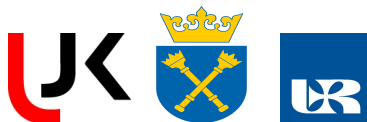




KAPITAŁ LUDZKI
NARODOWA STRATEGIA SPÓJNOŚCI



Człowiek – najlepsza inwestycja

UNIA EUROPEJSKA
EUROPEJSKI
FUNDUSZ SPOŁECZNY



FENIKS

- długofalowy program odbudowy, popularyzacji i wspomaganie nauczania fizyki w szkołach w celu rozwijania podstawowych kompetencji naukowo-technicznych, matematycznych i informatycznych uczniów

Pakiet nr 12:

Natura światła

dr Tadeusz Pałasz

*Instytut Fizyki im. Mariana Smoluchowskiego
Uniwersytet Jagielloński*

Wersja UJ/1, listopad 2010

Zawarte w tym opracowaniu materiały przeznaczone są do wspomaganie pracy nauczycieli i uczniów w czasie zajęć pozalekcyjnych w szkołach biorących udział w projekcie edukacyjnym FENIKS.

<http://www.fais.uj.edu.pl/FENIKS/>

<http://th-www.if.uj.edu.pl/~feniks/>



- długofalowy program odbudowy, popularyzacji i wspomaganie fizyki w szkołach w celu rozwijania podstawowych kompetencji naukowo - technicznych, matematycznych i informatycznych uczniów

Projekt współfinansowany jest ze środków Unii Europejskiej w ramach Europejskiego Funduszu Społecznego

Spis rzeczy:

- Motywacja.
- Jaka jest natura światła?
- Wyposażenie naszego laboratorium.
- Doświadczenia:
 1. Ostrość widzenia – czyli optyka geometryczna.
 2. Robaki w oku – czyli drażniąca dyfrakcja.
 3. Przechodzenie światła przez dziurkę – czyli spójnie o dyfrakcji.
 4. Kółka na szkle – czyli dlaczego Newton widział pierścienie.
 5. Kwanty w boju – czyli efekt fotoelektryczny.
 6. Kameleon – czyli o tym, że można zmienić kolor światła.
 7. Jak zobaczyć niewidzialne – czyli o fotografii w podczerwieni.
- „W co się bawić” – czyli planujemy kolejne eksperymenty.
- Literatura.

Motywacja

Światło jest bodźcem fizycznym odbieranym przez jeden z najważniejszych zmysłów człowieka czyli przez wzrok. Nasze oczy reagują na bardzo niewielki fragment widma fal elektromagnetycznych (o długości fali od 400 nm do 700 nm) i tylko tym zakresem zajmujemy się w tym opracowaniu (z „małą wycieczką” w podczerwień). Zaproponowane eksperymenty mają pomóc w zrozumieniu natury światła oraz ukazać zalety ale też i ograniczenia używanych przez nas na co dzień przyrządów optycznych. Doświadczenia te są jedynie przykładem zabawy ze światłem i nie stanowią wyczerpującego opracowania z optyki ani tym bardziej nie są powtórzeniem podstawowych doświadczeń prezentowanych w podręcznikach szkolnych.

Praca fizyka eksperymentatora odbywa się w laboratorium i wykonywana jest przy użyciu wielu urządzeń. Do eksperymentowania ze światłem zostaliśmy hojnie wyposażeni przez naturę. Nasze oczy są jednak zbyt cenne, by używać ich do przeprowadzania ryzykownych i niebezpiecznych doświadczeń (zwłaszcza z laserami). Tam, gdzie będzie to możliwe postaramy się zastąpić je cyfrowym aparatem fotograficznym lub kamerą internetową. Dzięki temu wyniki pomiarów będą bardziej powtarzalne, uzyskamy możliwość ich rejestracji i unikniemy błędów związanych z subiektywną obserwacją. Z drugiej strony

będzie się to wiązało ze zgromadzeniem odpowiednich urządzeń. Eksperymenty fizyczne są kosztowne a sprzęt laboratoryjny jest drogi. Intencją autora było jednak użycie tylko takiego sprzętu, który można znaleźć w domu lub pracowni szkolnej. Zadbajmy też o to, aby przygotowanie i przeprowadzenie doświadczeń nie spowodowało uszkodzenia tych urządzeń.

Jaka jest natura światła?

Czym jest światło? Ludzie od bardzo dawna próbowali wyjaśnić fenomen postrzegania światła narządem wzroku. Intrygowało ich również zagadnienie rozchodzenia się światła. Optyka geometryczna pozwalała wyjaśnić proste zjawiska, takie jak odbicie promienia świetlnego od powierzchni zwierciadła. Trzy stulecia przed naszą erą Euklides sformułował zasadę prostoliniowego rozchodzenia się światła oraz prawo odbicia, czyli równości kątów padania i odbicia. Obserwacja zanurzonego w cieczy przedmiotu prowadziła do wniosku, że na granicy z powietrzem światło ulega załamaniu, to znaczy zmienia się kierunek jego rozchodzenia. Kawałki szkła, których powierzchnia została oszlifowana i przybrała kształt wycinka sfery umożliwiały zbudowanie prostych przyrządów optycznych jak lupa czy okulary. Połączenie kilku soczewek w układ optyczny pozwoliło zbudować lunetę i mikroskop. Jednak zjawisko załamania światła na granicy ośrodków nie zostało poprawnie wytłumaczone. Jeszcze Tycho de Brahe i Johannes Kepler używali specjalnych tablic uwzględniających poprawki refrakcyjne dla światła gwiazd docierającego do przyrządów astronomicznych poprzez atmosferę. Dopiero Willebrord Snell w 1621 roku poprawnie sformułował prawo załamania, a wyniki tych obserwacji opublikował w 1637 roku René Descartes (Kartezjusz). Natura światła czyli zrozumienie czym ono jest wymykało się jednak uczonym konstruującym wymienione urządzenia i opisującym zachowanie się światła. W roku 1662 Pierre Fermat uzasadnił prawo załamania światła różnymi prędkościami jego rozchodzenia się w różnych ośrodkach. Wykorzystał w tym celu znaną od czasów Herona z Aleksandrii „zasadę najkrótszego czasu”, opisującą bieg promieni świetlnych między dwoma punktami po najkrótszej drodze. Dyfrakcję (ugięcie) światła na brzegu małego otworu, czyli wyraźne odstępstwo od optyki geometrycznej, pierwszy zaobserwował i opisał Francesco Maria Grimaldi. Robert Hooke, konstruktor doskonałych przyrządów optycznych i badacz mikro–świata widzianego przez mikroskop, opisał barwne wzory pojawiające się przy przechodzeniu światła przez cienkie warstwy. Pod koniec XVII wieku Christiaan Huygens zaproponował falową teorię światła. Ponad sto lat później Thomas Young, za pomocą tej teorii, objął wynik doświadczenia polegającego na przepuszczaniu światła przez dwie szczeliny i obserwacji struktury prążków, z których występowaniem opis

geometrycznego rozchodzenia się światła był niezgodny. W 1676 roku Olaus Rømer, na podstawie obserwacji zaćmień księżyców Jowisza wykazał, że światło porusza się z bardzo dużą ale skończoną prędkością. Falowy opis światła rozszerzał i uzupełniał optykę geometryczną. W tamtych czasach inny pogląd na naturę światła miał Isaac Newton. Zbudował on teleskop zwierciadlany oraz badał rozszczepienie światła słonecznego przez pryzmat i obserwował pierścienie powstające w pobliżu styku wypukłej soczewki z płaską płytką szklaną, a więc efekty falowej natury światła. Według teorii zaproponowanej przez Newtona światło jest jednak strumieniem cząstek. Teorię korpuskularną akceptowało wielu uczonych aż do początku dziewiętnastego wieku. Kto miał rację?

Francuska Akademia Nauk w 1819 roku ogłosiła konkurs na rozprawę, w której wyjaśnione zostanie zjawisko dyfrakcji. Najlepszą okazała się praca wojskowego inżyniera, Augustina Fresnela. Rozwiązanie zaproponowane przez Fresnela wciąż nie przekonywało jednak wielu uczonych, według których światło to strumienie cząsteczek, a nie fale. Siméon Denis Poisson zaproponował doświadczalny test, którego wynik miał obalić bądź potwierdzić teorię Fresnela. Na drodze światła umieszczono małą kulkę i zbadano cień jaki ona rzucała. Według teorii cząsteczkowej powinno tam być ciemno, natomiast teoria falowa zakładała ugięcie światła na kuli i wytworzenie w miejscu zacienionym jasnej plamki. Wynik doświadczenia był jednoznaczny – za kulką, na ekranie pojawiła się jasna kropka, nazwana dla uczczenia autora teorii o falowej naturze światła „*plamką Fresnela*”. Wiele kolejnych eksperymentów, w których przepuszczano światło przez szczeliny i układy szczelin, a także odbijano od powierzchni szkła i nakładano na siebie (interferometry) potwierdziło słuszność teorii falowej.

W roku 1865 James Clerk Maxwell przedstawił postulat, że światło jest falą elektromagnetyczną. Teoria falowa Maxwella nie wyjaśniała jednak wszystkich własności światła mówiąc, że energia fali świetlnej zależy wyłącznie od jej natężenia i nie ma związku z częstotliwością. W roku 1887 Rudolf Hertz badał zjawisko emisji ujemnie naładowanych cząsteczek (elektronów) z metalu pod wpływem światła. Według teorii falowej, ze wzrostem natężenia światła oświetlającego elektrodę, liczba wybijanych z niej elektronów powinna wzrastać, oraz maksymalna prędkość, z którą może poruszać się każdy z nich, też powinna wzrastać. Zgodnie z teorią klasyczną energia fali elektromagnetycznej jest związana z jej amplitudą; amplituda zaś jest wprost proporcjonalna do natężenia fali. Maksymalna energia kinetyczna wybijanych z powierzchni metalu cząstek nie powinna zależeć od częstotliwości (barwy) padającej fali. Wynik doświadczenia Hertza był jednak inny. Zwiększanie

częstotliwości światła padającego na elektrodę (czyli zamiana źródła na emitujące światło o mniejszej długości fali, np. barwy niebieskiej) zwiększało energię kinetyczną cząsteczek. Światło o większej częstotliwości nadawało cząstkom większe prędkości (energii kinetyczne) niż światło o mniejszej częstotliwości. Istniała ponadto pewna granica częstotliwości, poniżej której z elektrody nie były emitowane w ogóle żadne cząstki. Granicę tą nazwano częstotliwością progową, a jej wartość zależała od rodzaju metalu, z którego wykonana była elektroda. Zależność wzrostu energii kinetycznej od częstotliwości światła dla wszystkich przebadanych metali była natomiast taka sama. Zwiększanie natężenia padającego światła nie zwiększało prędkości wybitych cząsteczek. Klasyczna teoria źle opisywała obserwacje Hertza. Zjawisko to, nazwane *fotoelektrycznym*, poprawnie wyjaśnił dopiero Albert Einstein w roku 1905. W zaproponowanej przez niego teorii energia promieniowania światła występuje, nie tak jak dotychczas sądzono, w postaci ciągłej, lecz w postaci pewnych porcji – kwantów, nazwanych fotonami. Energia fotonów jest tym większa, im wyższa jest częstotliwość promieniowania: $E = h \cdot \nu$. W przytoczonym wzorze $h \cong 6,63 \cdot 10^{-34} [\text{J} \cdot \text{s}]$ wyraża stałą Plancka, a „ ν ” (grecka litera, którą czytamy „ni”) oznacza częstotliwość fali. Albert Einstein za wyjaśnienie efektu fotoelektrycznego otrzymał nagrodę Nobla z fizyki, a my dostaliśmy kolejną teorię tłumaczącą naturę światła. Pęd fotonu został zaobserwowany eksperymentalnie przez Artura Comptona, który rozpraszał fotony o dużej energii na swobodnych elektronach. Fotony w takim oddziaływaniu przypominają cząstki, zachowując w zderzeniu z elektronami energię i pęd. Artur Compton za swoje odkrycie otrzymał nagrodę Nobla w 1927 roku, a zjawisko zostało nazwane *efektem Comptona*. Połączenie obu teorii – falowej teorii światła z jego cząsteczkową naturą, nastąpiło dopiero w *elektrodynamice kwantowej* oraz tak zwanym *modelu standardowym*.

Do wyjaśnienia prostych zjawisk optycznych doskonale nadaje się opis geometryczny biegu promieni świetlnych. Gdy światło ugina się na brzegu przesłony, konieczne staje się zastosowanie formalizmu falowego. Do wyjaśnienia zjawiska fotoelektrycznego, a także wielu doświadczeń z fizyki atomowej niezbędny jest opis kwantowy. Musimy się więc pogodzić z podwójną naturą światła. Jest ono jednocześnie falą jak i strumieniem cząstek – fotonów. Możemy sami to sprawdzić i w prostych doświadczeniach badać tę dualną naturę światła, do czego w tym opracowaniu wszystkich zachęcam.

Wyposażenie naszego laboratorium.

Planując eksperyment fizyczny należy się zastanowić, jakie urządzenia techniczne będą pomocne lub niezbędne do jego przeprowadzenia. Odkrywcy natury światła nie dysponowali bardzo wyszukaną aparaturą. Dużo ważniejsza okazała się poprawna interpretacja ich obserwacji. My spróbujemy powtórzyć ich doświadczenia wykorzystując sprzęty, które można znaleźć w domu lub szkolnej pracowni fizycznej. Postęp techniczny dał nam do dyspozycji wiele ciekawych narzędzi. Dziś bardzo łatwo jest zdobyć soczewkę o odpowiedniej ogniskowej. Ludzkie oko może zostać zastąpione aparatem fotograficznym czy nawet kamerą internetową. Mamy do dyspozycji bardzo wiele interesujących źródeł światła. Laser – urządzenie wytwarzające spójną i monochromatyczną wiązkę światła możemy nosić w kieszeni i korzystać z niego jako wskaźnika do pokazywania na tablicy. Zakup pryzmatu czy siatki dyfrakcyjnej to niewielki wydatek, a można go dokonać w wielu wysyłkowych sklepach z pomocami dydaktycznymi. Elementy te są też na wyposażeniu wielu szkolnych pracowni. Mając taki „arsenał” badawczy można wykonać bardzo interesujące obserwacje.

Oko.

To bardzo cenny przyrząd! Ma ogromne możliwości badawcze! Działa lepiej niż jakakolwiek kamera czy aparat fotograficzny wykonany przez człowieka. W naszych eksperymentach ograniczymy się jednak tylko do najprostszych i bezpiecznych doświadczeń, w których udział naszego oka będzie niezbędny. Musimy dbać o oczy i wszędzie tam, gdzie będzie je można zastąpić np. kamerą internetową lub aparatem fotograficznym – będziemy to robić. Szczególnie podczas doświadczeń z użyciem wskaźnika laserowego!

Kamera internetowa.

To urządzenie może nas (nasze oko) zastąpić w wielu eksperymentach. Pozwoli ponadto zarejestrować wynik obserwacji w celu dalszej analizy lub dokumentowania badań. Kamera internetowa, dzięki masowej produkcji jest tania i bardzo łatwa w użyciu. Podpięta poprzez złącze USB do komputera umożliwia podgląd i rejestrację kolorowego obrazu w wystarczająco dobrej rozdzielczości (najczęściej 640 × 480). Czułość kamery internetowej jest wystarczająca do przeprowadzenia proponowanych doświadczeń, a możliwość regulacji położenia jej obiektywu okaże się bardzo użyteczną cechą. Typową kamerą bardzo łatwo można zmodyfikować w celu rejestracji obrazów w bliskiej podczerwieni, czyli tam gdzie nasz wzrok nic nie dostrzega.

Cyfrowy aparat fotograficzny.

Aparat fotograficzny, w którym można wyłączyć automatyczne nastawianie parametrów ekspozycji, jest bardzo użytecznym narzędziem do zademonstrowania wielu ciekawych efektów optycznych. Ręczna kontrola odległości obiektywu od elementu światłoczułego i wyboru przesłony pozwalają panować nad głębią ostrości fotografowanej sceny. Niektóre modele pozwalają na usunięcie filtra odcinającego światło podczerwone przed światłoczułą matrycą i rejestrację obrazu w podczerwieni. Cyfrowy aparat fotograficzny, zwłaszcza konstrukcje lustrzankowe, jest urządzeniem drogim i delikatnym, dlatego w naszych doświadczeniach musimy chronić go przed uszkodzeniem!

Ciekawe źródła światła.

Dysponujemy wieloma bardzo użytecznymi źródłami światła o ciekawych własnościach. Diody elektroluminescencyjne (tak zwane LEDy) są dostępne w każdym sklepie z częściami elektronicznymi, a ich zasilanie nie stanowi problemu. Zazwyczaj wystarcza bateria (np. dwa ognia 1,5 V) i odpowiednio dobrany opornik ograniczający prąd do natężenia kilkunastu mA. Możemy wybrać barwę emitowanego światła od niebieskiej do czerwonej, a nawet diody wielokolorowe lub emitujące światło „białe”. Gdy nie chcemy sami budować układu elektronicznego, możemy wykorzystać dowolne urządzenie, które posiada wyświetlacz lub wskaźniki zbudowane z takich diod. Na podobnej zasadzie (zjawiska elektroluminescencji – generacji fotonów w wyniku rekombinacji elektronów i dziur w materiale półprzewodnikowym) działa dioda laserowa. Emituje ona bardzo monochromatyczną (wąską spektralnie) wiązkę spójnego (jedna fala) światła o liniowej polaryzacji. W małej strukturze o długości mniejszej niż pół milimetra znajduje się ośrodek czynny lasera i miniaturowy rezonator optyczny. Pięćdziesiąt lat po wynalezieniu lasera możemy miniaturową jego wersję nosić w kieszeni! Powszechnie dostępne i tanie są wskaźniki laserowe emitujące światło o barwie niebieskiej, zielonej i czerwonej. Należy jednak obchodzić się z nimi bardzo ostrożnie.

Nigdy nie wolni kierować wiązki z lasera prosto do oka!

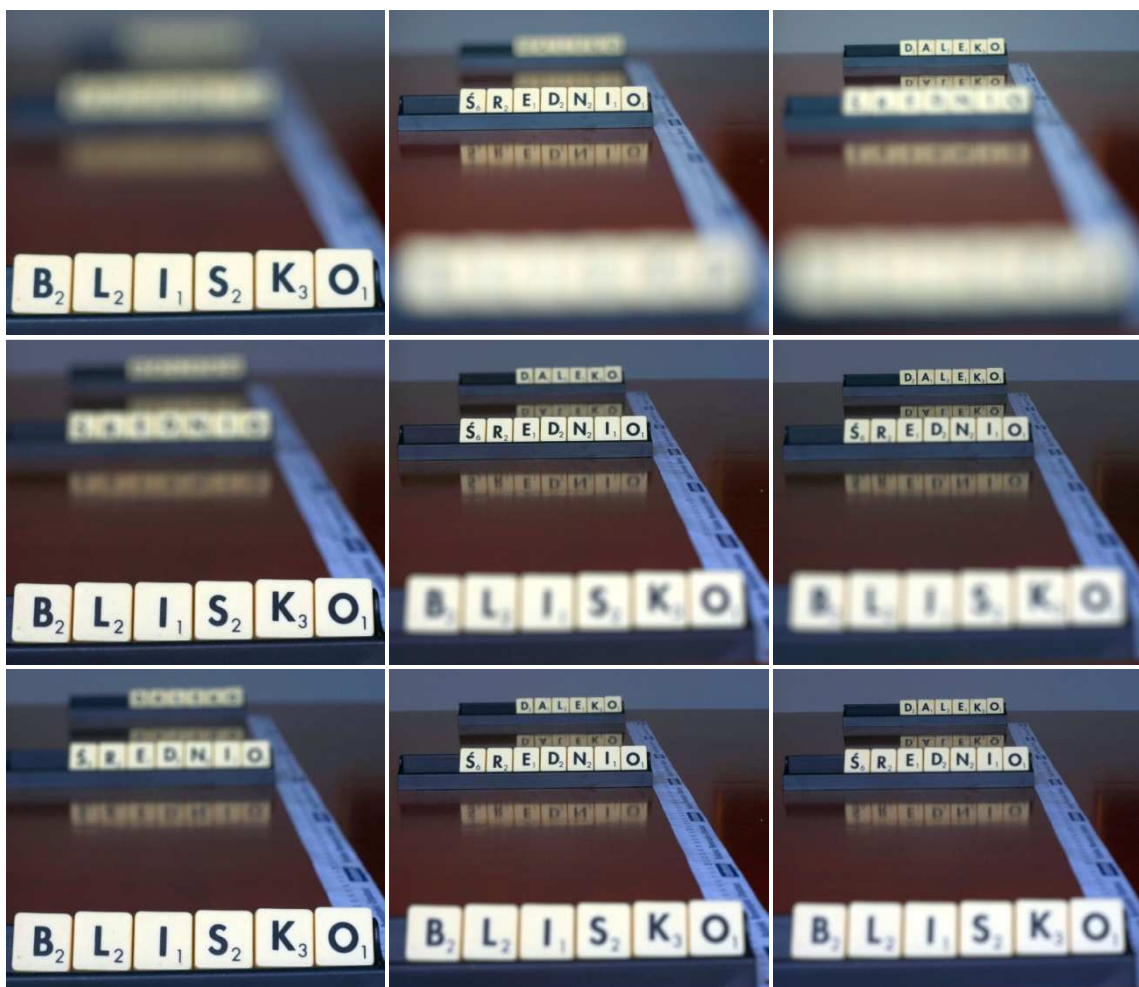
Należy uważać na wiązkę laserową odbitą od metalowych bądź szklanych powierzchni!

Doświadczenia.

1. Ostrość widzenia – czyli optyka geometryczna.

Mija dokładnie 400 lat od chwili, gdy człowiek po raz pierwszy użył skomplikowanego przyrządu optycznego i skierował go w niebo by dostrzec to, co było niewidoczne gołym okiem. W roku 1610 Galileo Galilei rozpoczął obserwacje przy pomocy teleskopu soczewkowego – refraktora. Przez kolejne stulecia ulepszano ten układ lunety astronomicznej. Pod koniec XIX wieku skonstruowano obiektyw o średnicy ponad jednego metra. Konkurencyjną konstrukcją był teleskop zwierciadlany – reflektor. Również ten układ optyczny był wielokrotnie ulepszany od czasu, gdy przez pierwsze takie urządzenie w niebo spoglądał Isaac Newton. Obecnie podziwiamy obrazy przesyłane z orbity okołoziemskiej przez teleskop Hubble’a, gdyż słabe światło docierające z dalekich obszarów kosmosu ulega zbyt dużym zniekształceniom przy przejściu poprzez atmosferę ziemską i jego obserwacja z wystarczającą rozdzielczością nie jest możliwa nawet z położonego wysoko w górach obserwatorium. Pierwsza wersja układu optycznego zamontowanego w teleskopie Hubble’a nie dawała jednak dobrych obrazów. Podczas jej projektowania popełniono błąd i dopiero specjalna podróż astronautów na orbitę, podczas której zamontowano odpowiedni układ naprawczy uratowała projekt. Dlaczego tak trudno było zbudować dobry układ optyczny? Spróbujmy sami zastanowić się nad różnymi wadami odwzorowania każdego systemu złożonego z soczewek bądź luster. W każdym szkolnym podręczniku, w rozdziale poświęconym optyce, możemy znaleźć podstawowe informacje o wadach soczewek. Historia fotografii ukazuje próby wyeliminowania tych wad w coraz doskonalszych projektach obiektywów. Obiektyw dobrego współczesnego aparatu fotograficznego to niezwykle skomplikowany układ kilku lub nawet kilkunastu soczewek. Mają one różne kształty i są wykonane ze szkła o różnych współczynnikach załamania światła. Tolerancja ich wzajemnego położenia jest rzędu mikrometrów. Mimo to w rygorystycznie przeprowadzanych testach ukazywane są błędy odwzorowania obrazu i aberracje wprowadzane nawet przez bardzo dobre obiektywy. Mając do dyspozycji cyfrowy aparat fotograficzny umożliwiający wyłączenie automatyki i ręczne regulowanie nastawami (otwór przesłony, ostrość, czas naświetlania) możemy przeprowadzić proste doświadczenie z pomiarem „głębokości ostrości”. Wielu doświadczonych fotografów celowo stara się rozmyć tło i skupić uwagę odbiorcy zdjęcia na wybranym planie. Sztuka fotografii to głównie umiejętność „operowania nieostrością”!

Przedstawione zdjęcia zostały wykonane lustrzanką cyfrową. Użyto aparatu Canon model 300D, w którym rozmiar matrycy CCD wynosi około $25\text{ mm} \times 16\text{ mm}$ (tzw. standard APS-C) czyli tylko część powierzchni klatki filmu małoobrazkowego $36\text{ mm} \times 24\text{ mm}$. Zamiast obiektywu wyposażonego w automatykę (starowanie przesłoną i regulacja ostrości) zamontowano przy użyciu odpowiedniego pierścienia redukcyjnego stary, stało ogniskowy obiektyw o ogniskowej 50 mm i otworze względnym (czyli liczbowym stosunku średnicy otworu obiektywu do jego ogniskowej) $1:1,8$.



Zdjęcia wykonano przy różnych ustawieniach odległości obiektywu od matrycy światłoczułej (lewa kolumna – ostrość na pierwszy plan, środkowa kolumna– ostrość na środkowy plan, kolumna po prawej – ostrość na daleki plan) i różnych ustawieniach otworu względnego (rząd górny – przesłona $1:2$, rząd środkowy – przesłona $1:8$, rząd dolny – przesłona $1:16$).

Matryca światłoczuła aparatu fotograficznego znajdowała się w odległości 50 cm od klocków z literkami tworzącymi napis „BLISKO”. Kolejne plany (oznaczone napisami „ŚREDNIO” i „DALEKO”) znajdowały się w odległościach 100 i 150 cm od aparatu. Odpowiednio dobierając otwór przesłony czyli ograniczając otwór obiektywu można ostro

ukazać tylko wybrany plan, a tło lub plan bliższy rozmyć (przesłona otwarta) albo domykając przesłonę (w sfotografowanej scenie cztero lub ośmiokrotnie) ukazać wszystkie trzy plany „prawie ostro”. Głębią ostrości nazywamy odległość od pierwszego do ostatniego ostro odwzorowanego miejsca na zdjęciu. Głębina ostrości zależy od ogniskowej obiektywu. Im krótsza ogniskowa tym głębia ostrości jest większa. Obiektywy aparatów posiadających małe matryce światłoczułe (aparaty kompaktowe, aparaty w telefonach komórkowych) mają ogniskowe dużo mniejsze od zastosowanego w przedstawionym doświadczeniu obiektywu 50 mm. Aparaty takie mają dużo większą głębię ostrości. Znacznie ułatwia to fotografowanie prostych scen ale wyklucza wykonanie bardziej kreatywnych zdjęć.

Zakres głębi ostrości możemy wyliczyć. Odwzorowanie soczewki opisuje wzór

$$\frac{1}{f} = \frac{1}{x} + \frac{1}{y},$$

gdzie f oznacza ogniskową, x oznacza odległość przedmiotu od soczewki, a y to odległość od soczewki do płaszczyzny w której powstaje obraz (odwrócony i rzeczywisty). Punkt znajdujący się w płaszczyźnie ostrości (czyli w odległości x) odwzorowywany jest na płaszczyźnie obrazu (czyli w odległości y) również jako punkt. Jeśli jednak fotografowany punkt znajduje się przed lub za płaszczyzną ostrości, to na zdjęciu przedstawiony zostanie jako „krążek rozproszenia”. Średnica tego krążka będzie tym większa, im dalej od płaszczyzny ostrości znajdować się będzie fotografowany punkt. Promienie światła pochodzące z punktów leżących w odległości innej niż ta, na którą nastawiony jest obiektyw, ogniskowane są przed bądź za płaszczyzną obrazową i na zdjęciu są widoczne jako tzw. „bokeh”. Zjawisko stopniowego rozmywania fotografowanych obiektów nasila się w miarę ich oddalenia od płaszczyzny ostrości.

Niewielkie krążki rozproszenia widzimy okiem w dalszym ciągu jako punkty, a obraz wydaje nam się ostry. Jednak po przekroczeniu pewnej średnicy krążka rozproszenia uznajemy, że obserwowany przez nas obraz przestaje być ostry. Ta graniczna wielkość, zwana akceptowalną wielkością krążka rozproszenia, pozwala nam obliczyć głębię ostrości fotografowanej sceny. Przyjmijmy, że wielkość krążka rozproszenia wynosi $\frac{1}{2000}$ przekątnej pola widzenia ludzkiego oka. Podobną wielkość przyjmijmy w przypadku, gdy obraz powstaje na matrycy światłoczułej przy użyciu standardowego obiektywu o podobnej do ludzkiego oka przekątnej pola widzenia. Wielkość odwzorowanych na zdjęciu krążków nieostrości, a więc i zakres głębi ostrości, zależy od ustawionego otworu przesłony (przy ustalonej odległości obiektu względem obiektywu) i od ogniskowej obiektywu.

W poniższych wzorach A oznacza wartość wybranej przesłony obiektywu, czyli otwór względny obiektywu o ogniskowej f , zaś Φ to dopuszczalna wielkość krążka rozproszenia. *Odległość hiperfokalną*, czyli odległość do najbliższej położonego, akceptowalnie ostrego punktu dla obiektywu ustawionego na nieskończoność, obliczymy ze wzoru:

$$H = \frac{f^2}{A \cdot \Phi} + f \approx \frac{f^2}{A \cdot \Phi} .$$

Granice bliskiego (D_{blisko}) i dalekiego (D_{daleko}) zakresu głębi ostrości wyrażają wzory:

$$D_{blisko} = \frac{H \cdot D_o}{H + (D_o - f)} ,$$

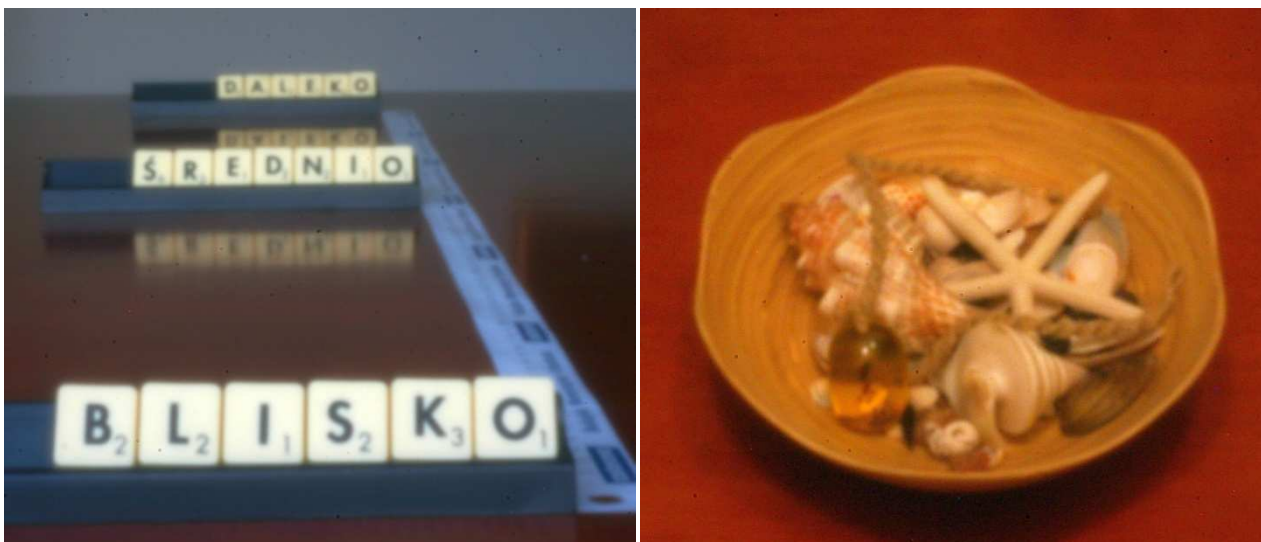
$$D_{daleko} = \frac{H \cdot D_o}{H - (D_o - f)} ,$$

gdzie przez D_o oznaczono odległość do planu, na który ustawiona jest ostrość.

Zakres głębi ostrości otrzymamy po odjęciu od siebie obu tych granic.

$$D = D_{daleko} - D_{blisko} .$$

Pierwowzorem aparatu fotograficznego był prosty przyrząd optyczny nazywany *camera obscura* (łac.) czyli „ciemna komnata”. Urządzenie takie buduje się z poczernionego wewnątrz pudełka, na którego jednej ścianie znajduje się niewielki otwór spełniający rolę obiektywu, a na przeciwległej ścianie umieszczona jest matowa szyba lub kalka techniczna. Promienie światła wpadające przez otwór tworzą na matówce odwrócony i pomniejszony obraz. Obraz otrzymany za pomocą camera obscura cechuje nieskończona głębia ostrości oraz brak dystorsji (zniekształcenia geometrii). Z uwagi na te cechy obrazu camera obscura jest często wykorzystywana w fotografii artystycznej. Kliszę fotograficzną umieszcza się w miejscu ścianki z matówką. Im mniejszy jest otworek, przez który wpada światło, tym wyraźniejszy obraz można otrzymać, ale wiąże się to ze znacznym wydłużeniem czasu ekspozycji. Wielu pasjonatów przerabia też swoje cyfrowe aparaty fotograficzne, dodając do nich możliwość wykonywania „fotografii otworkowej”. Przeróbka taka jest bardzo prosta w przypadku lustrzanki z wymiennym obiektywem. Mając czarną plastikową zaślepkę korpusu aparatu, montowaną w miejsce obiektywu, aby chronić lustro i migawkę przed kurzem, możemy zamontować w niej blaszkę z wywierconym małym otworkiem (o średnicy np. 0,2 mm lub 0,3 mm). Aparat umieszczamy na statywie i doświadczalnie dobieramy czas ekspozycji. Zazwyczaj jest to czas liczony w dziesiątkach sekund! Otrzymane zdjęcia cechują się miłym dla oka rozmyciem i bardzo dużą głębią ostrości.



Zdjęcia wykonano cyfrowym aparatem fotograficznym (Canon 300D), w którym obiektyw zastąpiono małą dziurką (o średnicy 0,2 mm). Czas naświetlania wyniósł aż 30 sekund!

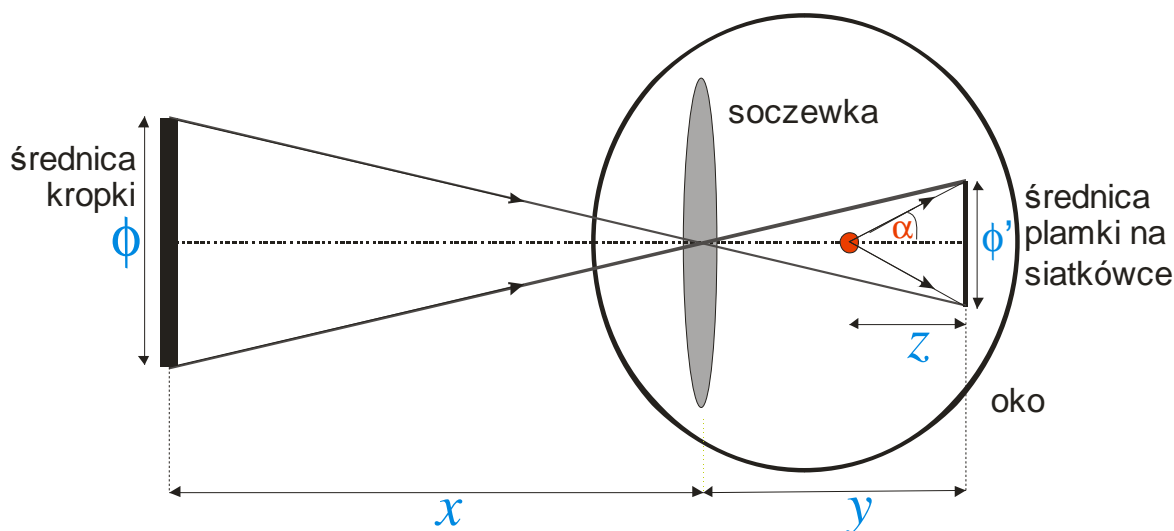
2. Robaki w oku – czyli drażniąca dyfrakcja.

Falową naturę światła możemy badać bez wyposażenia w jakiegokolwiek naukowe przyrządy. Wystarczy spoglądać na pozbawione szczegółów jasne tło, którym może być równomiernie oświetlona ściana lub błękitne niebo. Dostrzegamy wtedy podobne do powoli poruszających się „robaczków”, podłużne i lekko zagięte struktury. Obrazy te są zawsze obecne, ale zwracamy na nie uwagę tylko wtedy, gdy w polu widzenia nie ma innych szczegółów. Czy należy udać się po poradę do lekarza okulisty?

Obrazy „robaczków” są wytwarzane na siatkówce naszego oka na skutek dyfrakcji światła na zagęszczeniach (zmętnieniach) w ciele szklistym wypełniającym oko. Samych zmętnień nie dostrzegamy. Potrząsanie ciała szklistego podczas ruchów głowy powoduje wędrowanie „robaczków”, czyli przemieszczanie się obrazów dyfrakcyjnych po obszarze siatkówki. Obserwacje robaczków ułatwia spoglądanie przez małą dziurkę wykonaną w czarnym kartonie. Mały otwór przez który wpada do naszego oka światło działa wtedy jak pojedyncze źródło światła. Widząc „robaczki” wyraźnie, możemy oszacować ich rozmiar.

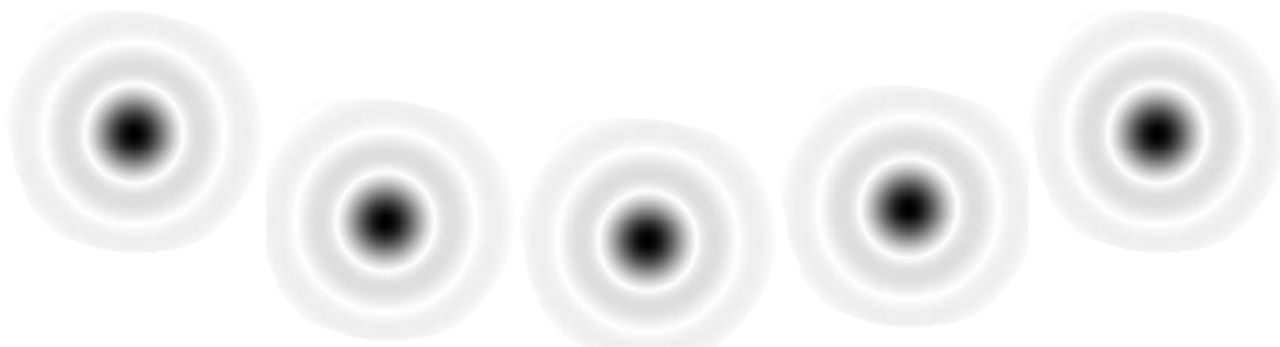
Wielkość zmętnień w ciele szklistym oka można zmierzyć nie używając żadnych specjalistycznych urządzeń! Dokonamy tego szacując rozmiar obrazów dyfrakcyjnych tworzonych na siatkówce oka (metoda „pomiaru” wielkość zmętnień opisana została w podręczniku [2]). Należy przygotować dwa niewielkie kawałki kartonu o rozmiarze umożliwiającym zasłonięcie oka. W jednym z kawałków kartonu wykonujemy niewielki okrągły otwór, a na drugim zaznaczamy kropkę o średnicy 2 milimetrów. Przez otwór

w kartoniku obserwujemy jednym okiem jasną powierzchnię (np. jasną ścianę lub błękitne niebo) i staramy się skoncentrować na pojawiających się obrazach rzucanych na siatkówkę przez zmętnienia. Drugim okiem obserwujemy kropkę namalowaną na kartonie i prosimy inną osobę o pomiar odległości tego kartonu od naszego oka w chwili, gdy obrazy jednego z kółek, z których składa się „robaczek” i kropki pokryją się.



Rysunek przedstawia schemat odzworowania kropki o znanej średnicy na siatkówce oka.

Na rysunku przedstawiony został schemat odzworowania kropki o znanej średnicy $\phi = 2 \text{ mm}$ na siatkówce oka. Poprzez zmianę odległości x , w jakiej znajduje się kartonik z kropką względem oka, dobieramy odzworowanie tak, aby obraz kropki na siatkówce pokrywał się z obrazem dyfrakcyjnym zmętnienia w ciele szklistym. Na rysunku oba obrazy powstają na płaskiej powierzchni (dla ułatwienia obliczeń), natomiast w oku siatkówka jest tkanką pokrywającą wklęsłą wewnętrzną powierzchnię oka. Średnica obrazu powstającego na siatkówce została na rysunku oznaczona przez ϕ' . Odległość od soczewki do siatkówki oka jest stała i możemy przyjąć, że wynosi ona $y = 20 \text{ mm}$. „Robaczek” składa się z kilku lub kilkunastu połączonych ze sobą okrągłych plamek. Każda taka plamka powstaje z kilku naprzemiennych ciemnych (minima) i jasnych (maksima) prążków dyfrakcyjnych.



Położenie pierwszego minimum w obrazie dyfrakcyjnym dane jest równaniem (zob. rozdział 37.5 w [2], opisujący dyfrakcję światła na otworze kołowym):

$$\sin \alpha \approx 1,22 \frac{\lambda}{d},$$

gdzie λ oznacza długość fali świetlnej, a d wyraża średnicę otworu, na brzegach którego następuje dyfrakcja. W naszym przypadku d będzie średnicą zmętnienia. Do obliczeń należy przyjąć, że zmętnienie może się znajdować w różnych odległościach od powierzchni siatkówki ($1 \text{ mm} < z < 15 \text{ mm}$). Aby wyznaczyć kąt α należy rozwiązać trójkąt prostokątny (zob. rysunek), którego bokami przyprostokątnymi są odległość z oraz promień plamki $\frac{\phi'}{2}$. Średnicę plamki ϕ' wyznaczamy z proporcji:

$$\frac{\phi'}{y} = \frac{\phi}{x}.$$

W obliczeniach należy uwzględnić długość fali świetlnej, która ulega dyfrakcji. Możemy przyjąć $\lambda = 550 \text{ nm}$, bo dla tej długości fali ludzkie oko jest najbardziej czułe. Możemy też wybrać określoną długość fali świetlnej i patrzeć przez filtr barwny, np. przez czerwoną folię w popularnych okularach do oglądania stereogramów (wtedy przyjmujemy λ dla światła czerwonego).

3. Przeciskanie światła przez dziurkę – czyli spójnie o dyfrakcji.

Dyfrakcję na otworze kołowym najłatwiej jest badać, używając źródła światła emitującego spójną (jedna fala o określonej koherencji czyli długości trwania ciągu falowego; fala spójna może interferować) i monochromatyczną (bardzo wąską spektralnie) wiązkę światła. Źródłem takim jest oczywiście laser, a do naszych doświadczeń możemy użyć taniego i powszechnie dostępnego wskaźnika laserowego. Zastosowanie w eksperymencie nawet słabego lasera (o niskiej mocy emitowanej wiązki) będzie wymagało zachowania szczególnej ostrożności i ochrony wzroku. Dlatego powstające wzory dyfrakcyjne najlepiej jest rejestrować przy użyciu aparatu fotograficznego lub kamery internetowej. W doświadczeniu można użyć wskaźnika laserowego emitującego światło o różnej długości fali. Obecnie dostępne są wskaźniki (np. pokazane na fotografii) emitujące wiązkę:

- **fioletową**, o długości fali $\lambda = 405 \text{ nm}$;
- **zieloną**, o długości fali $\lambda = 532 \text{ nm}$;
- **czerwoną**, o długości fali $\lambda = 650 \text{ nm}$
(zależnie od zastosowanej diody $630 \text{ nm} < \lambda < 670 \text{ nm}$).



Zdjęcie matówki z naklejoną skalą i trzech wskaźników laserowych.

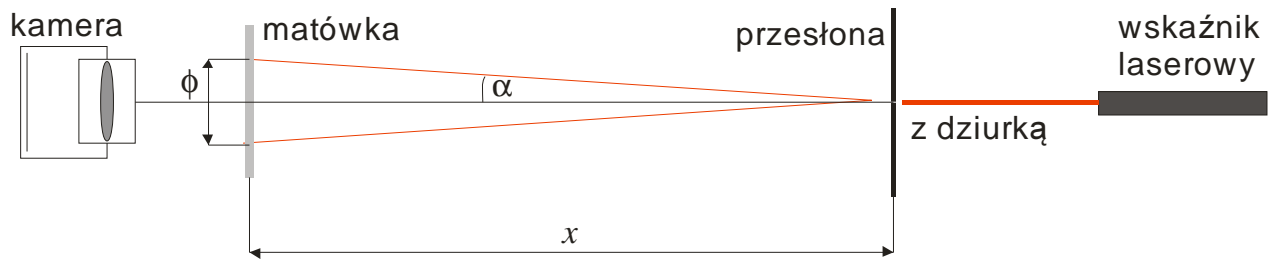
We wzorze wyrażającym sinus kąta α , pod jakim zaobserwujemy pierwsze minimum w obrazie dyfrakcyjnym światła przechodzącego przez otwór o średnicy d ,

$$\sin \alpha \approx 1,22 \frac{\lambda}{d},$$

podajemy długości fali światła emitowanego z lasera użytego w eksperymencie.

Do przeprowadzenia eksperymentu potrzebna będzie jeszcze blaszka z otworkiem wykonanym jak najmniejszym wiertłem. Bez problemu wywiercimy dziurkę w blaszce miedzianej (bo miedź jest miękkim metalem) wiertłem o średnicy 0,5 mm. Korzystając z pomocy zegarmistrza lub znajomego ślusarza możemy się postarać o blaszkę z otworem jeszcze mniejszym, np. 0,2 mm. Elementy z tak małymi dziurkami wykorzystuje się w fotografii „otworkowej” i wiele sklepów internetowych oferuje gotowe „obiektywy”. Obraz dyfrakcyjny będziemy rzucać na matówkę z naklejoną skalą, która umożliwi pomiar średnicy prążków. Z drugiej strony matówki (może to być również kawałek kalki technicznej) umieścimy kamerę internetową lub aparat fotograficzny. Nasza kamera musi posiadać regulację położenia obiektywu. Należy ten obiektyw odpowiednio odsunąć od matrycy światłoczułej (wykręcić) aby można była uzyskać ostry obraz matówki z odległości kilku centymetrów. Autor skryptu używał zarówno lustrzanki cyfrowej z obiektywem o stałej ogniskowej jak również taniej i popularnej kamery internetowej (produkcji CREATIVE, model „Live! Cam Vista IM”), uzyskując w obu przypadkach dobre rezultaty.

Doświadczenie należy przeprowadzić na tak zwanej „ławie optycznej” czyli sztywnym uchwycie umożliwiającym ustawienie wszystkich elementów w jednej osi i zmianę odległości pomiędzy nimi. W roli ławy optycznej doskonale spisała się deska o długości 60 cm z płyty wiórowej, a do montażu elementów użyto pistoletu do klejenia na gorąco.



Schemat eksperymentu.

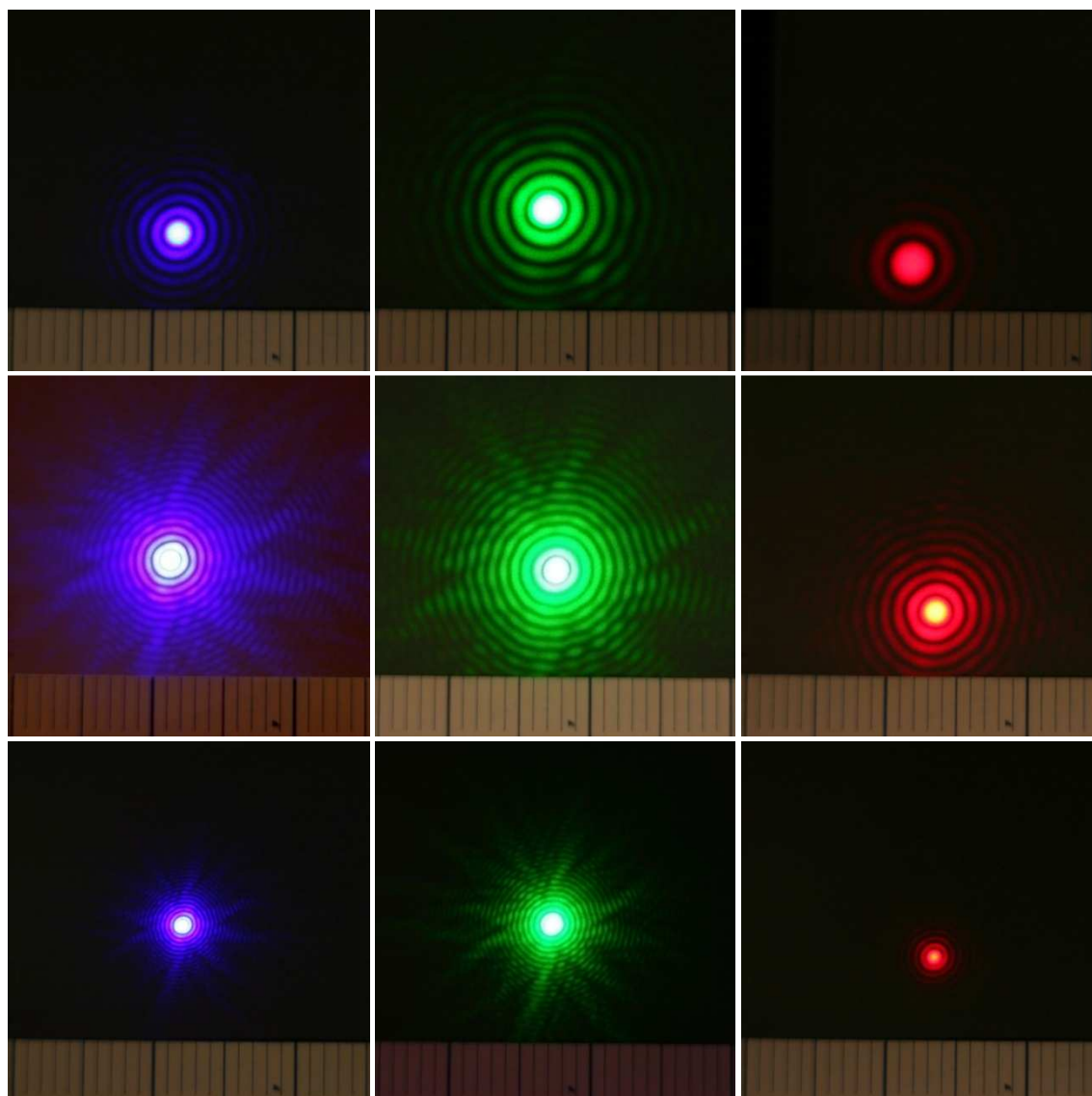


Realizacja doświadczenia.

Wygodnie jest zamocować matówkę i kamerę w ustalonej odległości względem siebie, a ostrość ustawić na naklejoną na matówce skalę (np. wyciętą z papierowej linijki). Zmieniając odległość przesłony z małą dziurką od matówki można uzyskać różne powiększenia prążków dyfrakcyjnych. Im odległość ta jest większa, tym stabilniej należy zamontować wszystkie elementy; uzyskane prążki łatwiej jest wtedy zmierzyć. Kąt, pod jakim powstaje na matówce pierwsze minimum dyfrakcyjne oblicza się ze wzoru:

$$\tan \alpha = \frac{\left(\frac{\phi}{2}\right)}{x}.$$

Pokazane fotografie obrazów prążków dyfrakcyjnych zarejestrowano dla trzech długości fali świetlnej (405 nm, 532 nm i 650 nm) oraz trzech odległości przesłony od matówki $x = 48$ cm, $x = 32$ cm i $x = 16$ cm.



$\lambda = 405 \text{ nm}$

$\lambda = 532 \text{ nm}$

$\lambda = 650 \text{ nm}$

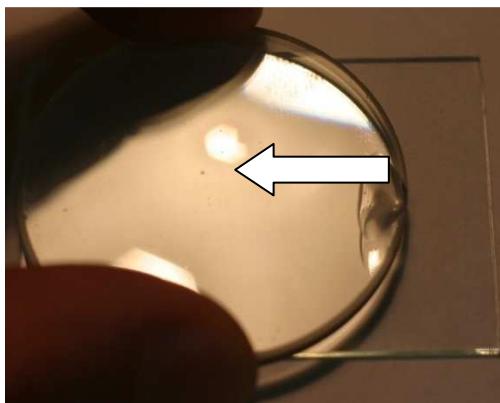
Obrazy dyfrakcyjne otrzymane na matówce dla różnych długości fali i przy różnych odległościach (rzęd górny: 48; środkowy: 32; dolny 16 cm) przesłony z dziurką od matówki.

4. Kółka na szkle – czyli dlaczego Newton widział pierścienie.

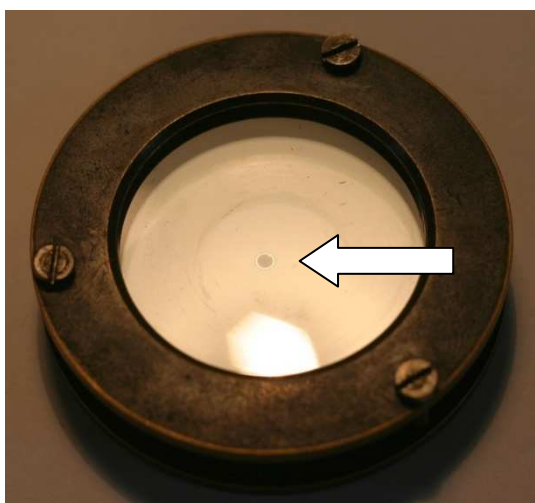
Gdy odpowiednio oświetli się soczewkę płasko – wypukłą, leżącą swoją wypukłą stroną na płaskiej szklanej płytce, dookoła miejsca stuku obu elementów pojawiają się naprzemienne ciemne i jasne, wielobarwne pierścienie. Zjawisko to pierwszy zaobserwował i opisał Isaac Newton, a poprawnie zinterpretował Robert Hooke w roku 1664. Newton, który badał rozszczepienie światła w pryzmacie – interpretował światło korpuskularnie, zaś Hooke objaśnił powstawanie pierścieni zaobserwowanych przez Newtona falową naturą światła. Obaj uczeni, członkowie Royal Society, przez długi czas prowadzili spór o to, czym jest światło. Jednak to nazwisko Newtona zostało powiązane ze zjawiskiem obserwowanych

prążków, których powstawanie jest dowodem na możliwość interferencji czyli nakładania się fal świetlnych.

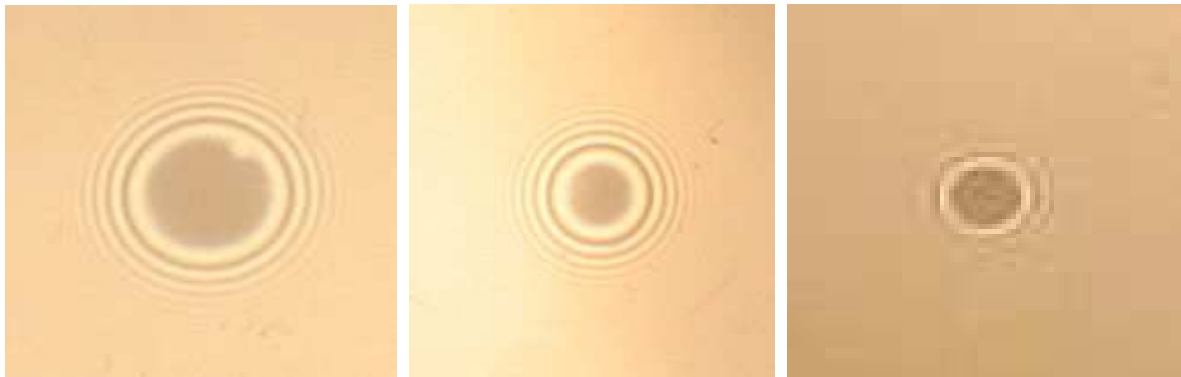
Eksperyment Newtona bardzo łatwo jest powtórzyć, kładąc jakąkolwiek soczewkę posiadającą wypukłą powierzchnię na szklanej płytce. Pierścienie z pewnością się pojawiają! Jednak chcąc uzyskać lepiej widoczne pierścienie, należy użyć soczewki o jak najmniej wypukłej powierzchni. Doskonale do tego celu nadaje się soczewka okularowa o bardzo małej mocy skupiającej, na przykład $+0,25D$, której ogniskowa wynosi aż 4 metry. Postarajmy się, aby była to soczewka bez pokrycia antyrefleksyjnego. Interferencja niespójnego światła białego jest możliwa wtedy, gdy powstaje na bardzo krótkiej drodze, a taką zapewnia niewielka odległość obu szklanych powierzchni. Pierścienie stają się wyraźniejsze, gdy lekko dociśniemy soczewkę do płytki.



Lekko dociskając soczewkę okularową (na zdjęciu jest to soczewka o mocy skupiającej $+1D$) do szklanej płytki można łatwo uzyskać wyraźny obraz pierścieni Newtona w świetle białym, emitowanym przez zwykłą żarówkę z lampki na biurku.

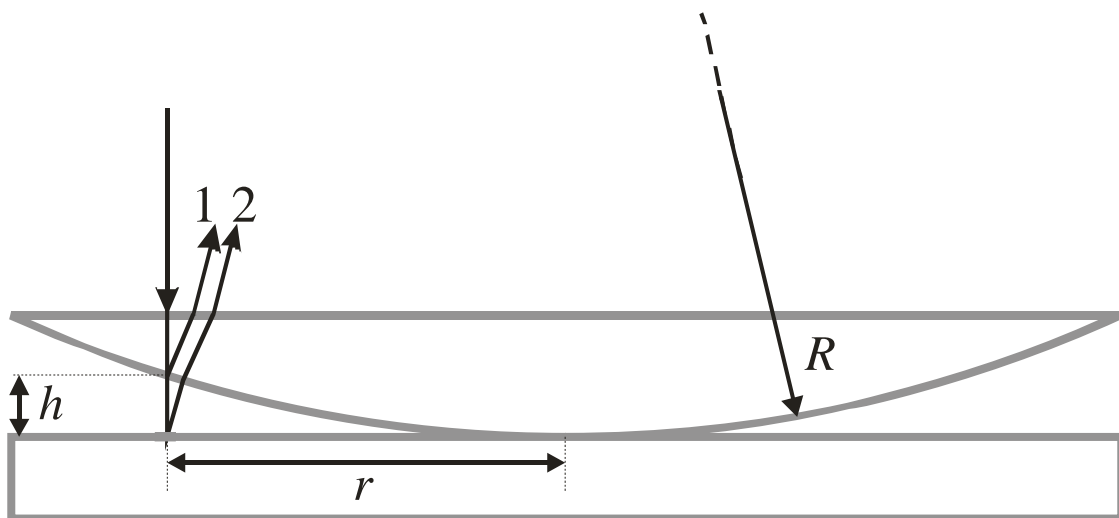


Zdjęcie przedstawia soczewkę o ogniskowej 12 m, dociśniętą do powierzchni szklanej płytki i oświetloną światłem z żarówki. W pobliżu miejsca styku widać pierścienie Newtona.



Pierścienie Newtona w powiększeniu. Fotografia w środku została wykonana po zmniejszeniu siły docisku soczewki do szklanej płytki. Fotografia po prawej stronie przedstawia pierścienie Newtona powstałe w pobliżu styku soczewki okularowej (+1D) położonej na płycie szklanej.

Układ do obserwacji pierścieni Newtona składa się z soczewki wypukłej o dużym promieniu krzywizny R (zobacz schemat), która leży na płaskiej powierzchni szklanej płytki. Między powierzchniami soczewki i płytki znajduje się cienka warstwa powietrza o grubości h , w odległości r od punktu styku szklanych elementów. W miarę oddalania się od miejsca zetknięcia, grubość tej warstwy wzrasta. Układ oświetlony jest od strony soczewki światłem o długości fali λ (do obliczeń wygodnie jest założyć, że światło jest monochromatyczne).



Układ do obserwacji pierścieni Newtona.

Padające światło ulega częściowemu odbiciu od każdej powierzchni granicznej, a odbite promienie interferują ze sobą czyli wypadkowa fala ulega wzmocnieniu lub osłabieniu, zależnie od różnicy faz. Rozpatrzmy promień odbity od dolnej powierzchni soczewki (1) i promień odbity od górnej powierzchni płytki (2).

Między tymi promieniami istnieje różnica dróg optycznych

$$d = \frac{\lambda}{2} + 2h ,$$

gdzie składnik $\frac{\lambda}{2}$ pochodzi od zmiany fazy fali świetlnej o 180° podczas odbicia od ośrodka gęstszego, czyli od powierzchni szklanej płytki. Taka zmiana fazy odpowiada różnicy drogi optycznej równej połowie długości fali. Wzmocnienie drgań nastąpi wtedy, gdy fazy nakładających się fal są zgodne czyli gdy różnica dróg optycznych wynosi

$$d_{max}(k) = k \cdot \lambda , \quad \text{gdzie } k = 0, \pm 1, \pm 2, \dots$$

Osłabienie (wygaszenie) drgań nastąpi wtedy, gdy fazy nakładających się fal są przeciwne, czyli gdy różnica dróg optycznych wynosi

$$d_{min}(l) = (2l + 1) \cdot \lambda , \quad \text{gdzie } l = 0, \pm 1, \pm 2, \dots$$

Ponieważ różnica dróg optycznych jest stała dla tej samej wartości h , występującej w odległości r od punktu styku soczewki z płytką, obserwujemy koncentryczne pierścienie – na przemian ciemne i jasne. W punkcie styku, gdzie $h = 0$, różnica dróg optycznych pochodzi tylko od zmiany fazy podczas odbicia światła od powierzchni płytki. W tym miejscu obserwujemy ciemny krążek. Związek pomiędzy grubością warstwy powietrza rozdzielającą powierzchnie szklane, a odległością od punktu ich styku można obliczyć z zależności

$$r^2 = 2Rh - h^2 .$$

Promień krzywizny soczewki jest dużo większy od grubości warstwy powietrza: $R \gg h$. Dlatego ($2Rh \gg h^2$) możemy uprościć wyrażenie

$$r^2 = 2Rh - h^2 \cong 2Rh$$

i wyznaczyć kwadrat promienia k – tego pierścienia jasnego

$$r_{max}^2(k) = R(k - \frac{1}{2})\lambda ,$$

oraz wyznaczyć kwadrat promienia l – tego pierścienia ciemnego

$$r_{min}^2(l) = Rl\lambda .$$

Obserwacja pierścieni Newtona potwierdza poprawność falowej teorii tłumaczącej naturę światła. Jakie jednak może być praktyczne zastosowanie tej obserwacji? Czy można pomiar położenia pierścieni powiązać z promieniem krzywizny soczewki i długością fali?

Z różnicy kwadratów promieni jasnych pierścieni Newtona k_1 –tego i k_2 –tego, można wyznaczyć promień krzywizny soczewki:

$$R = \frac{r_{max}^2(k_1) - r_{max}^2(k_2)}{(k_1 - k_2)\lambda} .$$

Można też wyznaczyć promień krzywizny soczewki z różnicy kwadratów promieni ciemnych pierścieni Newtona l_1 –tego i l_2 –tego:

$$R = \frac{r_{min}^2(l_1) - r_{min}^2(l_2)}{(l_1 - l_2)\lambda} .$$

Wzory te są bardzo użyteczne, gdy trzeba wyznaczyć promień soczewki o bardzo dużym promieniu krzywizny lub zbadać stopień gładkości polerowanej powierzchni.

Układ do badania pierścieni Newtona składający się z soczewki o znanym promieniu można zanurzyć w cieczy lub gazie innym niż powietrze i wyznaczyć współczynnik załamania światła dla tego ośrodka. Współczynnik załamania światła ośrodka, w którym światło porusza się z prędkością v wyznaczamy z zależności

$$n = \frac{c}{v} .$$

Światło porusza się w próżni z prędkością $c \cong 3 \cdot 10^8 \frac{m}{s}$, a w każdym ośrodku materialnym jego prędkość jest mniejsza od c . Dlatego w ośrodku materialnym ($n > 1$) światło o częstotliwości ν ma długość fali $\lambda_{o\acute{s}rodka} < \lambda_{pr\acute{o}żni}$, określoną wzorami:

$$\frac{\lambda_{pr\acute{o}żni}}{\lambda_{o\acute{s}rodka}} = \frac{c}{v} = n ,$$

$$\lambda_{o\acute{s}rodka} = \frac{\lambda_{pr\acute{o}żni}}{n} = \frac{v}{\nu} .$$

5. Kwanty w boju – czyli efekt fotoelektryczny.

Powtórzenie doświadczenia Rudolfa Hertza w domowym laboratorium raczej nie jest możliwe. Nie dysponujemy szklaną bańką, we wnętrzu której umieszczona jest odpowiednia elektroda i z wnętrza której usunięto powietrze. Natomiast korzystając z wyposażenia szkolnej pracowni fizycznej możemy zademonstrować efekt fotoelektryczny zewnętrzny przy użyciu płytki z cynku i elektroskopu.

Wykaz elementów potrzebnych do przeprowadzenia doświadczenia:

- źródło światła widzialnego (mocna lampa z żarówką 40 – 60 W);
- źródło światła ultrafioletowego. Nie musi to być mocna lampa, powinna wystarczyć niskoprężna świetlówka rtęciowa z bańką wykonaną ze szkła kwarcowego. Należy zachować dużą ostrożność przy użyciu lampy rtęciowej do opalania skóry!
- okulary chroniące przed promieniowaniem ultrafioletowym;
- płytkę cynkową (o powierzchni około 200 cm²);
- drobnoziarnisty papier ścierny i rękawice ochronne;
- elektroskop;
- pręt z tworzywa sztucznego (również ebonitowy) i tkanina do jego pocierania;
- pręt ze szkła i jedwabna tkanina do jego pocierania;

Przed przystąpieniem do doświadczenia należy przygotować powierzchnię płyty cynkowej poprzez oczyszczenie jej powierzchni papierem ściernym (przy wykonywaniu tej czynności używamy rękawic ochronnych). Tak przygotowaną płytę cynkową umieszczamy na metalowym dysku elektroskopu lub w inny sposób łączymy z elektrodą połączoną ze wskazówką elektroskopu. Poprzez pocieranie elektryzujemy ujemnie pręt z tworzywa sztucznego (w tej roli świetnie sprawdza się plastikowa rura od odkurzacza, a także pręt ebonitowy) i dotykając go do płyty cynkowej elektryzujemy elektroskop.

Oświetlamy płytę cynkową światłem z lampy ultrafioletowej. Promieniowanie ultrafioletowe wybija elektrony z powierzchni cynku i następuje rozładowanie elektroskopu. Jest to demonstracja efektu fotoelektrycznego zewnętrznego, potwierdzająca, że światło jest strumieniem cząstek – fotonów, które mają energię i pęd.

Uwaga!

Promieniowanie ultrafioletowe jest szkodliwe dla naszego wzroku i skóry!

Nigdy nie wolno patrzeć na włączoną lampę rtęciową. Niebezpieczne dla wzroku jest także światło z takiej lampy odbite od przedmiotów. Należy zabezpieczyć oczy, ubierając odpowiednie okulary ochronne. Obszar oświetlony lampą ultrafioletową należy zabezpieczyć odpowiednimi osłonami. Obserwacji wskazań elektroskopu dokonujemy po włączeniu lampy. Doświadczenie to należy wykonywać tylko pod opieką nauczyciela fizyki!



Zdjęcie po lewej przedstawia elektroskop naelektryzowany ładunkiem ujemnym (elektrony). Zdjęcie po prawej przedstawia elektroskop rozładowany poprzez oświetlenie przymocowanej do niego płytki cynkowej światłem ultrafioletowym ($\lambda = 254 \text{ nm}$) z lampy rtęciowej.

Aby pokazać, że z powierzchni cynku wybijane były elektrony, powtarzamy doświadczenie ładując elektroskop dodatnio przy użyciu pręta ze szkła, potartego jedwabną tkaniną. Tym razem oświetlenie płytki cynkowej światłem ultrafioletowym nie powoduje rozładowania elektroskopu.

Promieniowanie z lampy ultrafioletowej ma wystarczająco dużą energię, aby wybić elektrony z powierzchni cynku. Światło widzialne, o niższej energii, nie powoduje efektu fotoelektrycznego z powierzchni blachy cynkowej. Sprawdzamy to doświadczalnie ładując elektroskop ujemnie (pręt ebonitowy) i oświetlając cynk światłem widzialnym z żarówki. Elektroskop pozostaje naładowany. Możemy powtórzyć to doświadczenie z elektroskopem naładowanym dodatnio (pręt ze szkła) i światłem z żarówki. Również i tym razem elektroskop pozostanie naładowany.

Wyjaśnienie zjawiska fotoelektrycznego jest możliwe tylko za pomocą teorii kwantowej, zaproponowanej przez Alberta Einsteina w 1905 roku. Energia fotonów („cząsteczek światła”) jest tym większa, im większa jest częstotliwość promieniowania ν :

$$E = h\nu,$$

gdzie $h \cong 6,63 \cdot 10^{-34} [\text{J} \cdot \text{s}]$ wyraża stałą Plancka.

Korzystając ze słynnego wzoru Einsteina (w którym prędkość światła $c \cong 3 \cdot 10^8 \frac{\text{m}}{\text{s}}$)

$$E = mc^2,$$

wyrażającego równoważność masy („ m ” we wzorze) i energii, możemy obliczyć masę odpowiadającą fotonowi

$$m = \frac{h\nu}{c^2}.$$

Oczywiście foton zawsze porusza się z prędkością fali elektromagnetycznej i nie posiada masy spoczynkowej.

Możemy obliczyć pęd fotonu znając: ν – częstotliwość lub λ – długość fali, z którą jest on związany:

$$p = mc = \frac{h\nu}{c^2} c = \frac{h\nu}{c} = \frac{h}{\frac{c}{\nu}} = \frac{h}{\lambda}.$$

W widmie lampy rtęciowej z bańką kwarcową występują wysokoenergetyczne ultrafioletowe linie o długościach fali 185 nm i 254 nm. Są one niewidoczne dla oka, nieprzepuszczalne przez szkło i szkodliwe dla skóry ludzkiej.

W widmie lampy rtęciowej (również takiej, której bańka wykonana jest ze szkła) występują także silne linie o długościach fal: 365 nm oraz fioletowa 405 nm i niebieska 436 nm.

Energię fotonów każdej z wymienionych linii emisyjnych rtęci możemy wyliczyć przez pomnożenie odpowiedniej częstotliwości fali przez stałą Plancka. Tak wyznaczoną energię wygodnie jest wyrazić w często używanych jednostkach – elektronowoltach, gdzie $1 \text{ eV} \cong 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ J}$.

długość fali λ [nm]	częstotliwość fali $\nu = \frac{\lambda}{c}$ [10^{14} Hz]	energia fotonu $E = h\nu$ [eV]
185	16,2	6,7
254	11,8	4,9
365	8,2	3,4
405	7,5	3,1
436	6,9	2,9

Praca wyjścia elektronu dla cynku wynosi 4,33 eV, więc posługując się lampą rtęciową musimy zadbać, aby bańka tej lampy wykonana była ze szkła kwarcowego i przepuszczała linię o długości fali 254 nm (niebezpieczny dla oczu i skóry zakres UV-C).

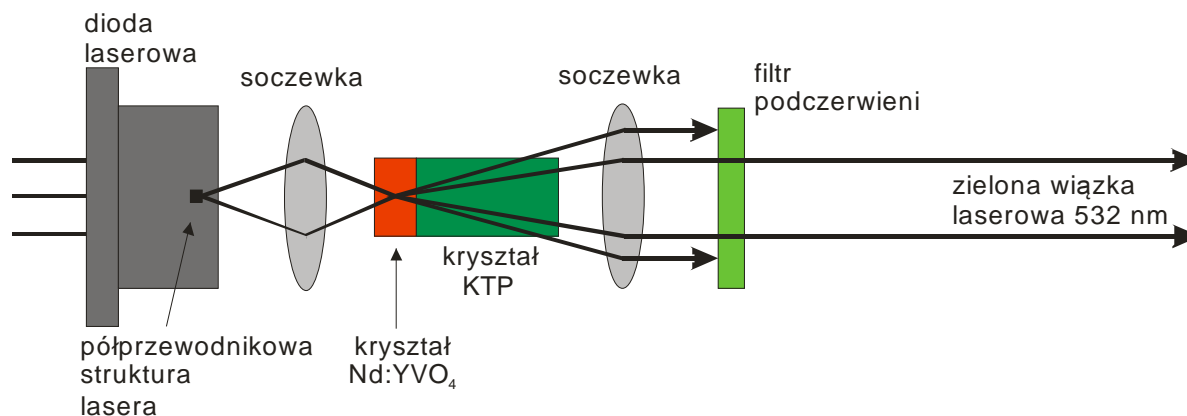
Linie emisyjne rtęci o większych długościach fali nie wywołają efektu fotoelektrycznego w cynku, zaś linia 185 nm jest silnie absorbowana w powietrzu i nie dociera do powierzchni metalu.

Efekt fotoelektryczny jest wykorzystywany w wielu urządzeniach technicznych, takich jak fotokomórki, fotopowielacze czy noktowizory. Specjalnie dobrany materiał pokrywający fotokatodę umożliwia wybitcie elektronów światłem o znacznie mniejszej energii, niż w przypadku blachy cynkowej. Na przykład noktowizory są czułe na światło podczerwone, niewidzialne dla ludzkiego oka (maksimum czułości typowego noktowizora wypada dla długości fali 900 nm, czyli dla fotonów o energii około 1,4 eV).

6. Kameleon – czyli o tym, że można zmienić kolor światła.

W przedstawionych dotychczas eksperymentach wykazaliśmy, że światło jest zarówno falą jak i strumieniem fotonów. Światło o jednej barwie, czyli monochromatyczne, opisujemy za pomocą długości fali (lub odpowiadającej jej częstotliwości), a jeżeli rozpatrujemy je jako cząsteczki, to również za pomocą energii i pędu. Czy można zmienić kolor światła – to znaczy czy można zmienić jego częstotliwość i energię? Okazuje się, że tak!

Łatwo dostępny i tani zielony wskaźnik laserowy to bardzo skomplikowane urządzenie. W małej rurce zamknięte jest nie tylko źródło zasilania (dwa ogniwa 1,5 V) i stabilizator prądu ale także DWA LASERY i kryształ podwajający częstość światła. Dioda laserowa dużej mocy emituje światło podczerwone o długości fali 808 nm. Światło to jest skupione za pośrednictwem soczewki na niewielkim kryształ Nd:YVO₄. Boki kryształu są wyszlifowane oraz pokryte warstwami odbijającymi światło (lustrami) i tworzą rezonator optyczny. Tak uformowany kryształ Nd:YVO₄ jest laserem na ciele stałym i wraz z diodą laserową tworzy tak zwany laser DPSS (ang. *Diode Pumped Solid State*), wytwarzający światło o długości fali 1064 nm, czyli również z zakresu podczerwieni. Bezpośrednio za laserem DPSS umieszczony jest kolejny kryształ nazywany KTP (czyli KTiOPO₄). Kryształ KTP jest nieliniowym ośrodkiem optycznym, w którym następuje podwojenie częstości światła, w skutek czego otrzymuje się długość fali 532 nm (kolor zielony). Ostatecznie generowane są trzy długości fal: 808 nm (podczerwień), 1064 nm (podczerwień) i światło widzialne o długości 532 nm. Na wyjściu całego układu znajduje się soczewka formująca wiązkę równoległą i filtr odcinający podczerwień.



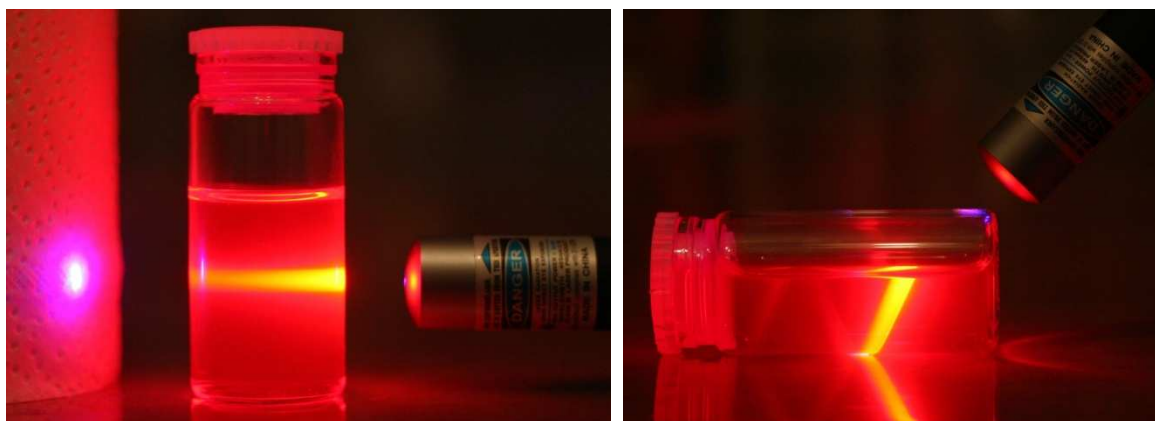
Schemat budowy układu optycznego zielonego wskaźnika laserowego.

Wydajność zamiany światła o długości fali 808 nm w światło zielone osiąga sprawność około 10%. Oznacza to, że chcąc otrzymać wiązkę światła zielonego o mocy np. 10 mW należy użyć laserowej diody pompującej o mocy około 100 mW. Tak duża moc skupiona na małej powierzchni jest bardzo niebezpieczna dla oka i od jakości użytego filtra odcinającego światło podczerwone zależy bezpieczeństwo wzroku. Światła podczerwonego nie dostrzegamy okiem, więc nie możemy sprawdzić czy zostało ono całkowicie wycięte z emitowanej przez wskaźnik laserowy wiązki!

Dysponując rzadziej spotykanym – „niebieskim” wskaźnikiem laserowym, z diodą emitującą światło fioletowe o długości fali 405 nm, możemy zbadać zjawisko fluorescencji, czyli emisji światła przez wzbudzone do świecenia cząsteczki. Zamieszczone poniżej zdjęcia ilustrują przejście wiązki światła laserowego przez roztwór fluoresceiny ($C_{20}H_{12}O_5$) w alkoholu etylowym (C_2H_5OH). Światło fioletowe z lasera pobudza cząsteczki barwnika do świecenia światłem zielonym! Zjawisko to jest wykorzystywane w laserach barwnikowych.



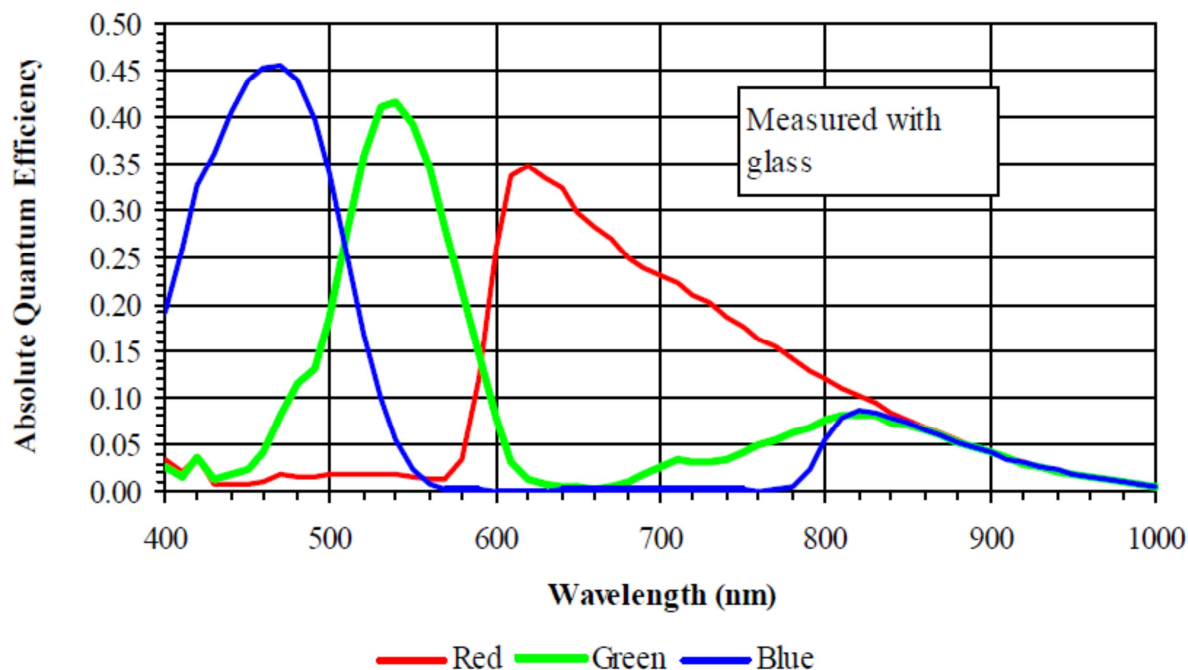
Fluorescencja barwnika wywołana światłem fioletowym (po lewej) i zielonym (po prawej).



Różowa fluorescencja barwnika (rodaminy) wywołana światłem fioletowym 405 nm.

7. Jak zobaczyć niewidzialne – czyli o fotografii w podczerwieni.

Niewielka przeróbka aparatu fotograficznego lub kamery internetowej umożliwia podglądanie otaczającego nas świata w niewidzialnym dla oka zakresie długości fal elektromagnetycznych. Wykres poniżej przedstawia wydajność elementów światłoczułych w przetwarzaniu światła o określonej długości fali na sygnał elektryczny. Elementy te znajdują się w matrycy CCD aparatu za mikroskopijnymi filtrami barwnymi. W typowej matrycy CCD filtry barwne są ułożone w mozaikę, gdzie obok siebie rozmieszczone są elementy rejestrujące światło czerwone (ang. „red”), zielone („green”) i niebieskie („blue”).



Wykres wydajności elementów światłoczułych, z których zbudowana jest matryca CCD rejestrująca obraz w aparacie fotograficznym (z materiałów reklamowych firmy KODAK).

Krzywe na wykresie odpowiadające poszczególnym kolorom zachowują się zgodnie z oczekiwaniami do długości fali około 700 nm. Powyżej tej wartości filtry barwne przestają spełniać swoją rolę, przepuszczając za dużo światła podczerwonego. Aby uniknąć prześwietlenia zdjęć, producenci aparatów fotograficznych montują dodatkowy filtr odcinający podczerwień. Filtr taki zamontowany jest zazwyczaj tuż przed matrycą CCD (rozwiązanie stosowane w aparatach fotograficznych) lub za ostatnią soczewką obiektywu (tanie i proste rozwiązanie stosowane w kamerach internetowych). Niektóre aparaty fotograficzne (głównie produkcji koncernu SONY, na przykład nieprodukowane już modele DCS-H50, DCS-F707 i DCS-F717 oraz DCS-V1 i DCS-V3) posiadają specjalny przełącznik umożliwiający odsunięcie przed matrycą CCD filtru odcinającego podczerwień i zastąpienie go płytką szklaną o odpowiedniej grubości (by zachować tą samą drogę optyczną od obiektywu do matrycy CCD). Przeróbka innych modeli aparatów, choć możliwa (opisane jest to na wielu stronach internetowych), wymaga rozkręcenia aparatu i stwarza ryzyko jego uszkodzenia. W warunkach domowych znacznie prościej jest przerobić taną kamerę internetową do rejestrowania światła podczerwonego. Wystarczy w tym celu wykręcić obiektyw takiej kamery i zdjąć z jego końca małą płytkę – filtr odcinający podczerwień. W wielu tanich modelach filtr ten jest po prostu przyklejony do obiektywu małą kropelką kleju. Gdy zechcemy przywrócić kamerze jej poprzednią funkcjonalność, wystarczy przykleić ten filtr z powrotem. Zdjęcie poniżej przedstawia bardzo prostą i taną kamerę internetową z wykręconym obiektywem.



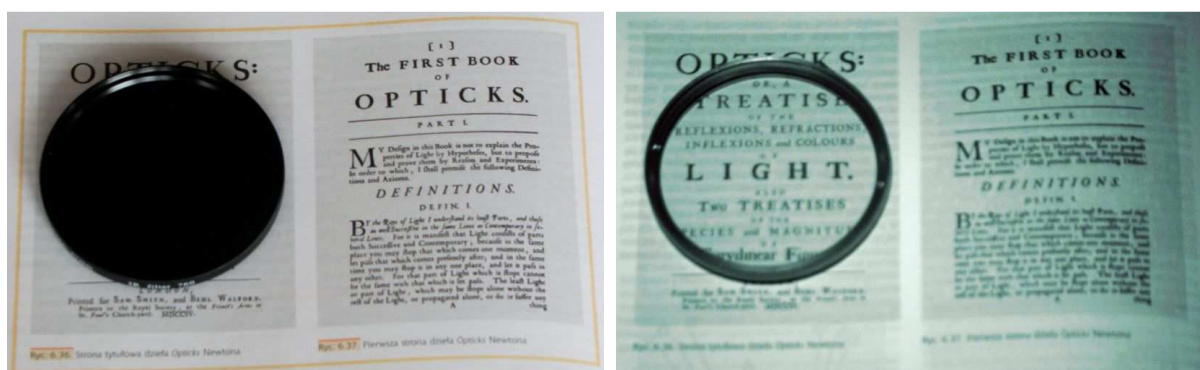
W miejscu usuniętego filtru warto zamontować (nakleć) inny filtr, który tym razem będzie odcinał światło widzialne. Rolę takiego filtru może z powodzeniem pełnić mały kawałek naświetlonej i wywołanej bony fotograficznej (np. pochodzący z początkowego odcinka filmu, który podczas zakładania filmu do aparatu zawsze jest prześwietlany). Innym rozwiązaniem jest zakup filtru fotograficznego do zdjęć w podczerwieni i umieszczenie go przed obiektywem w specjalnym tubusie zasłaniającym światło widzialne padające z boku.

Wspomniane filtry fotograficzne mają oznaczenia IR 720, IR 760 lub IR 850, gdzie liczba oznacza długość fali podczerwonej wyrażonej w [nm], od której transmisja filtru wzrasta.

Pierwszym testem przerobionej kamery może być rejestracja emisji światła podczerwonej diody elektroluminescencyjnej zamontowanej w „pilotach” zdalnego sterowania sprzętem RTV. Kolejne zdjęcia i filmy ograniczy tylko nasza wyobraźnia! Bardzo ciekawym tematem są ujęcia roślin, w których zielony barwnik odpowiedzialny za fotosyntezę bardzo mocno odbija promieniowanie podczerwone. Zdjęcia takie najlepiej wykonywać w oświetleniu słonecznym, gdzie promieniowanie podczerwone jest bardzo mocne.



Zdjęcia rośliny w świetle widzialnym i w podczerwieni (zastosowano filtr IR 850 nm).



Zdjęcia w świetle widzialnym i podczerwonym strony w podręczniku ([1]), na której położono filtr fotograficzny do zdjęć w podczerwieni. W świetle podczerwonym filtr taki wydaje się przezroczysty. Podobnie zachowuje się wiele materiałów z tworzyw sztucznych!

„W co się bawić” – czyli planujemy kolejne eksperymenty.

Przedstawione w tym opracowaniu proste eksperymenty miały pomóc w znalezieniu odpowiedzi na pytanie – czym jest światło. Doświadczeń i pokazów uzasadniających jego falową, a także korpuskularną naturę jest oczywiście dużo więcej. Można też wykazać słuszność stosowania przybliżeń optyki geometrycznej i zbudować wiele tak prostych jak i skomplikowanych urządzeń optycznych. Do dyspozycji mamy różne źródła światła o bardzo ciekawych własnościach. Powszechna dostępność diod elektroluminescencyjnych pozwala wykorzystywać ich wąski spektralnie zakres świecenia tam, gdzie do niedawna należało używać żarówek i filtrów barwnych. Lasery, choć niebezpieczne dla oka, emitują bardzo monochromatyczną wiązkę światła o małej rozbieżności i dużym natężeniu. Diody laserowe wytwarzają światło liniowo spolaryzowane. W eksperymentach możemy używać światłowodów (powszechnie wykorzystywanych w telekomunikacji, a także w domowym sprzęcie RTV), a pomiaru mocy lub natężenia światła dokonywać za pomocą bardzo tanich fotodiod, fototranzystorów czy nawet matryc CCD lub CMOS (elementów światłoczułych stosowanych w cyfrowych aparatach fotograficznych i kamerach internetowych). Mając takie zaplecze techniczne, tylko od naszej wiedzy i wyobraźni zależy to, do czego możemy je wykorzystać.

Literatura:

- [1] Andrzej Kajetan Wróblewski, *Historia Fizyki*, PWN, Warszawa 2006.
- [2] David Halliday, Robert Resnick, Jearl Walker, *Podstawy fizyki – tom 4*, PWN, Warszawa 2003.
- [3] Florian Ratajczyk, *Instrumenty optyczne*, Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, Wrocław 2005.

Podziękowania.

Chciałbym podziękować kierownictwu projektu FENIKS za zachęcenie mnie do napisania tego skryptu i pomoc w realizacji tego przedsięwzięcia.

Dziękuję również I Pracowni Fizycznej IF UJ za wypożyczenie elementów do pomiarów pierścieni Newtona i Pracowni Pokazów Fizycznych IF UJ za udostępnienie zestawu do demonstracji efektu fotoelektrycznego.