

Materiały do wykładu

Fizyka w doświadczeniach



Krzysztof Korona



Uniwersytet Warszawski
Wydział Fizyki

2025

Materiały do celów dydaktycznych przeznaczone dla studentów Uniwersytetu Warszawskiego.
Wykorzystanie ich w innych celach jest możliwe pod warunkiem uzyskania zgody autora.

V Światło

Kolejne dwa wykłady poświęcone będą światłu, jego właściwościom i oddziaływaniu z materią. Światło jest najszybszym obiektem znanym fizyce, a jego prędkość jest jedną z podstawowych stałych fizycznych. Światło ma też ogromne znaczenie dla nas osobiście, bo dzięki niemu widzimy.

Najnowsze odkrycia pozwalają nam lepiej wykorzystywać światło w technice: światłowody dla komunikacji, lasery w medycynie i przemyśle itd. Dziedzinę fizyki zajmującą się światłem nazywamy optyką.



Rys. Q.1 Tęcza w Sudetach

Wstęp

Naturę światła ludzie próbowali odgadnąć od wielu wieków, jednak dopiero od niedawna (nieco ponad 100 lat) wiemy, że światło jest falą elektromagnetyczną, a jednocześnie strumieniem fotonów.

W niniejszym wykładzie będą omawiane falowe właściwości światła.

Plan wykładu

1. Wstęp
2. Widmo światła
3. Dyfrakcja
4. Interferencja
5. Rozpraszanie i polaryzacja światła
6. Podsumowanie

Widmo światła

Widmem nazywamy wykres lub inny sposób przedstawienia, z jakich częstotliwości składa się dane drganie lub fala. W przyrodzie, dzięki zjawisku tęczy, w naturalny sposób możemy od czasu do czasu przekonać się, jakie składniki zawiera światło słoneczne (patrz rys. Q.1).

Widmo częstotliwości światła

Światło widzialne to fale elektromagnetyczne o długościach od 0,38 do 0,78 μm (1 μm = 0.001 mm = 10^{-6} m), czyli o częstotliwościach od 380 do 790 THz (1 THz = 1000 GHz = 1 mln MHz = 1 bilion Hz). Przypomnijmy tu, że zależność pomiędzy długością (λ) a częstotliwością (ν) fali świetlnej dana jest wzorem:

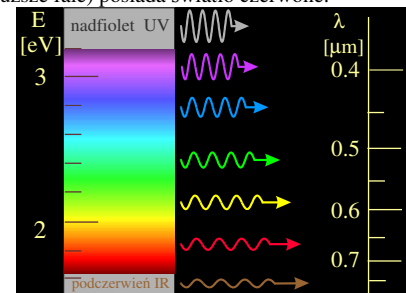
$$\lambda = c/\nu, \quad (\text{Q.1})$$

gdzie prędkość światła $c = 299\,792\,458 \text{ m/s} \approx 300 \mu\text{m} \cdot \text{THz}$.

Najwyższe częstotliwości (najkrótsze fale) posiada światło fioletowe, najniższe częstotliwości (najdłuższe fale) posiada światło czerwone.

Orientacyjne zakresy długości fal dla poszczególnych barw wynoszą:

- fioletowa 380-430 nm,
- niebieska 430-500 nm,
- zielona 500-570 nm,
- żółta 570-620 nm,
- czerwona 620-780 nm.

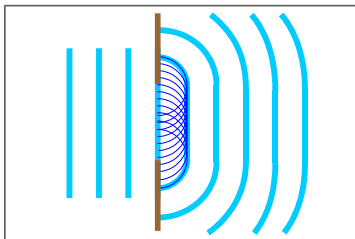


Rys. Q.2 Widmo fal świetlnych

Dyfrakcja

Zachowanie się fali w pobliżu przeszkody można wyjaśnić w oparciu o zasadę Huygensa. Mówi ona, że każdy punkt frontu falowego jest źródłem nowej fali kulistej.

Wyjaśnimy to na przykładzie fali przechodzącej przez otwór.



Rys. Q.3 Dyfrakcja fal na szczelinie

Analizę rozpoczynamy w momencie, gdy grzbiet fali mija szczelinę. Punkty grzbietu traktujemy jak źródła nowych fal (patrz rys. Q.7). Fale z sąsiednich punktów sumują się, tworząc nowy płaski grzbiet, ale końcowe punkty grzbietu przechodzącego przez szczelinę, nie mając sąsiadów, dadzą fale kuliste rozchodzące się na boki.

Efekt ten obserwowaliśmy na wykładzie, wykorzystując fale rozchodzące się po powierzchni wody.

Dyfrakcja i interferencja fal (!)

Dyfrakcja fal to zmiana kierunku ruchu fal polegająca na rozchodzeniu się fal we wszystkich kierunkach, po ominięciu przeszkody. Dyfrakcję łatwo zauważymy w przypadku fal na wodzie. Natomiast, aby

zaobserwować ugięcie (dyfrakcję) fal, świetlnych należy użyć bardzo wąskiej szczeliny i źródła fal spójnych (mających ustaloną fazę), czyli lasera.

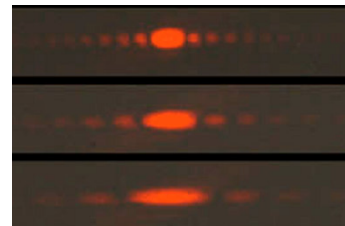
Dyfrakcja lasera na szczelinie

Przyrządy i materiały

- laser,
- szczelina 0,1 – 0,5 mm,
- ekran.

Przebieg doświadczenia

Laser ustawiamy w odległości 2 - 5 m od ekranu, a w jego wiązkę wstawiamy szczelinę.



Rys. Q.4 Obraz dyfrakcja lasera na szczelinie.
Od góry: szeroka, średnia i wąska szczelina.

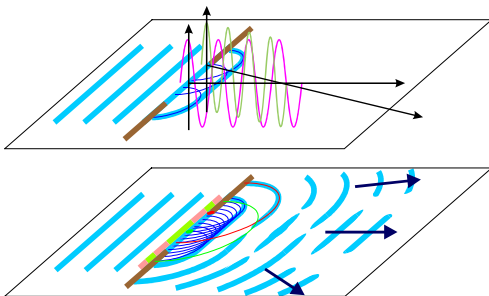
Obserwujemy obraz jak na rys. Q.5. Dla szeroko otwartej szczeliny widzimy pojedynczy promień lasera. Gdy zwężymy szczelinę, zamiast pojedynczej plamki lasera pojawia się szereg prążków. Zmieniając dalej szerokość szczeliny stwierdzamy, że im węższa szczelina, tym szersze prążki (i większe odstęp między nimi). W miarę zwężania szczeliny obraz poszerza się, ciemnieje, aż w końcu znika.

Interferencja

Zjawisko interferencji powstaje wtedy, gdy nakładają się na siebie dwie fale o tej samej częstotliwości i stałej różnicy faz. Jeśli fale nakładają się zgodnie w fazie, czyli grzbiet trafia na grzbiet, a dolina na dolinę, to dodają się (mówimy o interferencji konstruktywnej). Jeśli grzbiet jednej fali trafia na dolinę drugiej, to fale odejmują się tak, że obie mogą zniknąć.

Warto zauważyć, że dodawać mogą się też dwa strumienie cząstek. Jednak cząstki nie mogą odejmować się. Fakt, że nakładające się dwa strumienie światła mogą się osłabić, dowodzi, że światło jest falą.

Przy przejściu przez przesłonę rozważaliśmy poprzednio tylko dyfrakcję powodującą zmianę kierunku. W rzeczywistości następuje również interferencja fal wychodzących z różnych punktów szczeliny.



Rys. Q.5 Dyfrakcja i interferencja

Dla różnych kierunków drogi, nakładających się fal są różne. Zatem dla niektórych kierunków fale dodadzą się, a fale biegnące w innych

kierunkach odejmą się.

Jeśli fale interferują pod małym kątem, to powstaje obraz o rozmiarach znacznie większych od długości fali, a więc łatwy do obserwacji. Dzięki temu możemy obserwować obraz interferencyjny dla fal świetlnych, mimo, iż mają one długość poniżej $1\text{ }\mu\text{m}$ ($0,001\text{ mm}$).

Doświadczenie Younga polega na nałożeniu na siebie fal przechodzących przez dwie, blisko siebie leżące szczeliny.

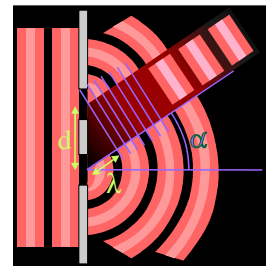
Interferencja na 2 szczelinach (!)

Przyrządy i materiały

- laser,
- podwójna szczelina,
- ekran.

Przebieg doświadczenia

Doświadczenie wykonujemy podobnie jak w przypadku pojedynczej szczeliny. Układ dwóch szczelin można wydrukować na folii przy pomocy drukarki komputerowej. Drukarka o rozdzielczości 600 dpi może w zasadzie drukować paski o szerokości $0,05\text{ mm}$. Dobry obraz można uzyskać ze szczelin o szerokości $0,1\text{ mm}$ odległych o $0,2, 0,3$ i $0,4\text{ mm}$. Ekran ustawiamy w odległości $2 - 3\text{ m}$.



Rys. Q.6 Dyfrakcja i interferencja na dwóch szczelinach

Porównując pary szczelin o różnych odległościach, stwierdzamy, że im mniejsza odległość, tym szersze prążki (i większe pomiędzy nimi odstępy).

Geometryczna analiza interferencji pokazuje, że aby nastąpiła interferencja pozytywna, różnica dróg dla fal z dwóch szczelin powinna być wielokrotnością długości fali, czyli wynosić $\Delta s = m\lambda$ ($m = 0, 1, 2 \dots$). Musi być zatem spełniony warunek: $d \sin(\alpha) = m\lambda$, czyli:

$$\sin(\alpha) = \frac{m\lambda}{d} \quad (Q.2)$$

gdzie α – kąt obserwacji, $m = 0, 1, 2, \dots$ - numeruje kolejne prążki interferencyjne.

Dwie szczeliny przepuszczają niewiele światła. Dokładając kolejne, równoodległe szczeliny przepuszczamy więcej światła, a jednocześnie zjawisko interferencji potęguje się. Przyrząd złożony z szeregu równoodległych szczelin nazywamy siatką dyfrakcyjną. Siatki dyfrakcyjne posiadają znacznie większe możliwości niż para szczelin i dlatego wykorzystywane są często do analizy widma światła.

Aby zaobserwować działanie siatki dyfrakcyjnej, musimy uwidocznić bieg promieni. Pomoże nam w tym akwarium z wodą lekko zamąconą mlekiem.

Siatka dyfrakcyjna przed akwarium (!)

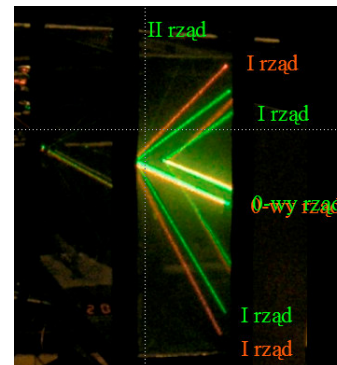
Przyrządy i materiały

- Siatka dyfrakcyjna (na zdjęciu: siatka 150/cm).
- Laser (na zdjęciu: czerwony, AlGaAs, 650 nm i zielony, Nd:YAG, 532 nm).
- Akwarium z wodą, do której dodano odrobinę mleka lub mydła, aby zwiększyć rozpraszanie światła i poprawić widoczność promieni.

Przebieg doświadczenia

Siatkę dyfrakcyjną mocujemy do ścianki akwarium i oświetlamy laserem.

W wodzie obserwujemy rozchodzenie się światła. Oprócz głównego promienia lasera pojawiają się prążki interferencyjne.

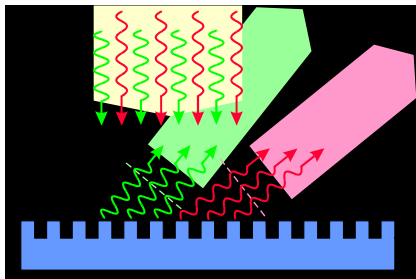


Rys. Q.7 Interferencja na siatce dyfrakcyjnej w akwarium (2 lasery: czerwony i zielony)

Prążki interferencyjne światła o krótszej fali (zielonego) odchylają się mniej niż prążki światła o dłuższej fali (czerwonego). Efekt ten jest zgodny ze wzorem (Q.2), który pokazuje, że im dłuższa fala tym większy kąt. Warto zauważyć, że zależność ta jest odwrotna niż dla rozszczepienia światła w pryzmacie (tam im krótsza fala tym większy kąt).

Przykładem łatwo dostępnych siatek dyfrakcyjnych są płyty kompaktowe. Płyty CD odbijają światło od metalizowanych linii, czyli są to siatki odbiciowe. Prążki interferencyjne występują dla takich kątów, aby różnica dróg fal odbitych od sąsiednich linii odpowiadała

długości fali (patrz rys. Q.8). W tym wypadku obowiązuje takie samo równanie jak dla siatki transmisyjnej (Q.2).



Rys. Q.8 Odbicie fali świetlnej od siatki dyfrakcyjnej.

Odległości pomiędzy rowkami wynoszą: $d = 1,6 \mu\text{m}$, a więc zgodnie ze wzorem (Q.2) dla światła o $\lambda = 0,5 \mu\text{m}$ (zielone) pierwszy prążek interferencyjny ($m = 1$) odchyli się o kąt 18° .

Dualizm korpuskularno-falowy, cząstki jako fale

Na początku XX wieku odkryto, że światło jest równocześnie falą i strumieniem cząstek. W ślad za tym Louis de Broglie wysunął hipotezę (potwierdzoną niedługo potem), że wszystkie obiekty materialne mają charakter falowy. (Louis de Broglie otrzymał nagrodę Nobla w 1929 r.)

Obiekty materialne o masie m , prędkości v , pędzie p i energii kinetycznej E_{kin} są falami o długości fali λ :

$$\lambda = \frac{h}{p} = \frac{h}{mv} = \frac{h}{\sqrt{2mE_{kin}}} \quad (\text{Q.3})$$

gdzie h – stała Plancka $= 6,626070015 \cdot 10^{-34} \text{ J}\cdot\text{s}$
 $\approx 4,13 \text{ meV}\cdot\text{ps}$.

Stała Plancka jest wartością bardzo małą, więc własności falowe dużych ciał są praktycznie niedostrzegalne. Niemniej jednak powinniśmy o nich pamiętać.

Przykłady:

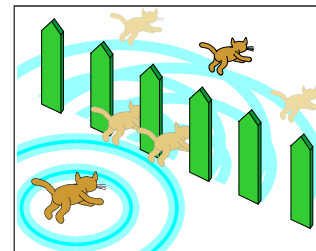
Elektron o energii 100 keV:

$$\lambda = 1,2 \text{ \AA}.$$

Kot o masie 3 kg ($v = 5 \text{ m/s}$):

$$\lambda = 0,4 \cdot 10^{-24} \text{ \AA}.$$

$$1 \text{ \AA} = 10^{-10} \text{ m} \approx \text{średnica atomu}.$$



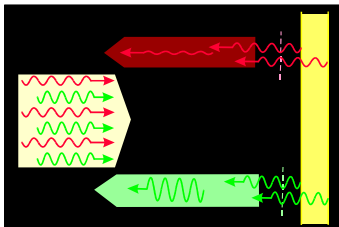
Rys. Q.9 Czy kot może znajdować się jednocześnie w kilku stanach?

Jak widać własności falowe kota są trudne do zaobserwowania. Największymi obiektami, na których zaobserwowano interferencje, są cząsteczki fullerenów C_{60} . Natomiast od dawna wykorzystuje się falowe własności elektronów do budowy mikroskopów elektronowych.

Interferencje w cienkich warstwach (!)

Każdy pewnie nieraz obserwował zmieniające się barwy baniek mydlanych albo plam oleju rozlanego na wodzie. W obu przypadkach barwa odbitego światła ustala się dzięki zjawisku interferencji w cienkich warstwach.

Na wykładzie obserwowaliśmy odbicie od płaskiej błonki mydlanej rozpiętej na pętli z drutu. Błonna u góry była cieńsza, a u dołu grubsza, dzięki czemu można było podziwiać interferencję fal o różnych długościach, a więc różnych barwach.



Rys. Q.10 Odbicie fal świetlnych od cienkiej warstwy

Fala świetlna odbija się od przedniej i od tylnej powierzchni warstwy o grubości d . Natężenie obu odbitych fal jest podobne, ale fala odbita od tylnej warstwy musi przebyć drogę dłuższą o $2d$ w ośrodku, w którym ma n razy mniejszą prędkość, a więc spóźni się tak, jakby pokonała drogę $2dn$. Obie fale będą interferować. Wzmocnienie następuje gdy:

$$2dn = m\lambda, m = 1, 2, \dots \quad (\text{Q.4})$$

gdzie: λ – długość fali, d – grubość warstwy, n – współczynnik załamania.

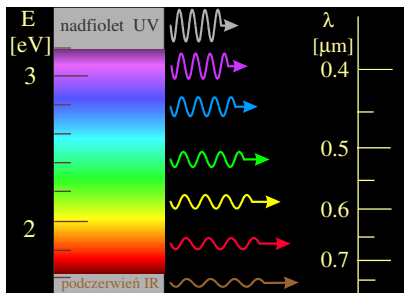
Zjawisko interferencji w cienkich warstwach wykorzystuje się w filtrach interferencyjnych. Filtry takie składają się na ogół z wielu cienkich (kilkaset nanometrów) warstw dielektryków, dobranych tak, aby na skutek interferencji przechodził tylko zadany zakres fal świetlnych.

Interesującą własnością filtrów interferencyjnych jest zmiana przepuszczanej barwy w zależności od kąta padania światła. Związane jest to ze zmianą długości dróg fal rozchodzących się w warstwach dielektryka.

Podczerwień, absorpcja

Jaka barwa niesie najwięcej ciepła?

Każdy wie, że kolory takie, jak niebieski i zielony są zimne, a barwy czerwona i pomarańczowa - ciepłe. Czy za naszym odczuciem stoją jakieś prawa fizyki?



Rys. Q.11 Barwy światła, widzialne i niewidzialne.

Pomiar widma światła żarówki przy pomocy termostosu pokazuje, że najmniej ciepła niesie światło fioletowe i niebieskie, więcej żółte, jeszcze więcej czerwone, a najwięcej niewidzialne promieniowanie poniżej czerwonego - podczerwień. Rozgrzane ciała łatwiej emitują podczerwień niż światło widzialne, ponieważ podczerwień ma fotony o niższej energii niż w przypadku światła widzialnego.

Podczerwień (!)

Podczerwień to promieniowanie elektromagnetyczne mające fale dłuższe od światła widzialnego.

Nazwa nie pochodzi od porównania długości fal. Zakres ten znajduje

się pod czerwienią (tak jak na rys. Q.2) ponieważ ma mniejsze energie fotonów (i mniejsze częstotliwości) niż światło widzialne.

Zakresy:

	początek VIS/ UV	bliższy/ daleki FUV	koniec zakresu granica X
dł. fali	0,78 μm	10 μm	1000 μm
częstość	380 THz,	30 THz	0,3 THz,
energia,	1,6 eV	0.124 eV	0,0012 eV

Źródła podczerwieni:

rozgrzane ciała, żarówki, lasery i diody świecące, promienniki.

Warto wiedzieć, że diody podczerwone stosowane są w pilotach sterujących telewizorami i innym sprzętem elektronicznym.

Wykrywanie:

efekt termoelektryczny, półprzewodniki wąskoprzerwowe, kamery IR. Podczerwień widzą na przykład węże.

Zastosowania:

telekomunikacja, sterowanie, ogrzewanie, pomiary temperatury.

Bliska podczerwień

Bliska podczerwień to fale od 0,8 μm do około 10 μm .

Fale te są silniej absorbowane przez wodę i powietrze, niż światło widzialne. Do ich emisji potrzebna jest temperatura wyższa od pokojowej. Ich źródłami są m.in. żarówki, diody świecące, lasery.

Bliska podczerwień: pilot, wykrywanie kamerą (!)

Przyrządy i materiały

- pilot do telewizora,
- kamera turystyczna lub internetowa.

Przebieg doświadczenia



Rys. Q.12 Pilot od telewizora

Aby zobaczyć świecenie pilota telewizyjnego, wystarczy poświecić nim w kierunku kamery internetowej lub amatorskiej kamery wideo i obserwować obraz na ekranie. Kamery takie wyposażone są w detektory krzemowe i widzą światło o falach krótszych niż $1,1 \mu\text{m}$ (o energii ponad $1,1 \text{ eV}$ – odpowiadającej przerwie energetycznej krzemu). (Niestety nowsze kamery mają filtry nie widzą już podczerwieni.)

Z kolei diody LED używane w pilotach są produkowane na bazie arsenku galu (GaAs) i emitują światło o długości $0,9 \mu\text{m}$ (czyli o energii $1,4 \text{ eV}$ – odpowiadającej przerwie energetycznej GaAs). Ponieważ energia ta jest wyższa od energii absorpcji dla krzemu, detektor krzemowy widzi światło diody GaAs.

Dalsza podczerwień

Dalsza podczerwień to fale od $10 \mu\text{m}$ do około $1000 \mu\text{m}$.

Źródła:

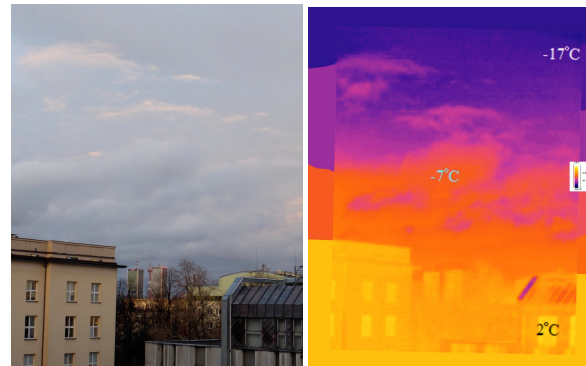
przedmioty o temperaturze porównywalnej z pokojową, lasery, ludzie.

Wykrywanie:

termosy, dioda z półprzewodnika o małej przerwie energetycznej, kamera termowizyjna.

Zastosowanie:

- pomiary temperatury (medycyna, przemysł),
- ogrzewanie (rolnictwo, przemysł).



Rys. Q.13 Zdjęcia nieba w świetle widzialnym i przy użyciu kamery IR, w zakresie dalekiej podczerwieni, widać różnice temperatur.

Rozkład Plancka

Zgodnie z prawem Wiena, wraz ze wzrostem temperatury maksimum natężenia emitowanego światła przesuwają się w stronę krótszych fal.

$$\lambda_{\text{MAX}} = b/T, \quad (\text{Q.6})$$

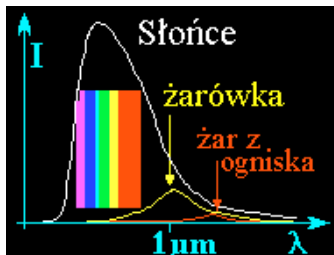
gdzie $b = 2898 \mu\text{m} \cdot \text{K}$. Zauważmy, że temperatura podana jest w kelwinach.

Kształt widma (zwany rozkładem Plancka) wyprowadzony został w 1890 roku przez Maxa Plancka przy założeniu, że światło jest emitowane w postaci kwantów o energii: $E = h\nu = hc/\lambda$, wzór (9.8).

Wzór Plancka ma postać:

$$I = \frac{h\nu^3}{c^2} \frac{1}{\exp\left(\frac{h\nu}{k_B T}\right) - 1} \quad (\text{Q.5})$$

Słońce, którego temperatura powierzchni wynosi 5800 K, świeci światłem białym. Żarówka mająca temperaturę 2000 K świeci na żółto, a żar z ogniska (ok. 1000 K) świeci na czerwono.



Rys. Q.14 Rozkład natężenia światła.

Do wyemitowania fotonu potrzebna jest określona energia. Tak więc, wysokoenergetyczne fotony światła widzialnego są emitowane tylko w wysokich temperaturach. Energia termiczna wynosi $k_B T$, a zatem fotonom o energii 1 eV ($\lambda = 1,24 \mu\text{m}$) odpowiada temperatura $T = 11600 \text{ K}$.

Podczerwień grzeje i chłodzi.

Ciała o temperaturze odpowiadającej naszemu otoczeniu 10 - 30°C czyli około 300 K emitują najwięcej promieniowania w zakresie 10 μm , a więc na granicy bliskiej i dalekiej podczerwieni. Zatem, poprzez fale o tej długości odbywa się wymiana ciepła w naszym otoczeniu.

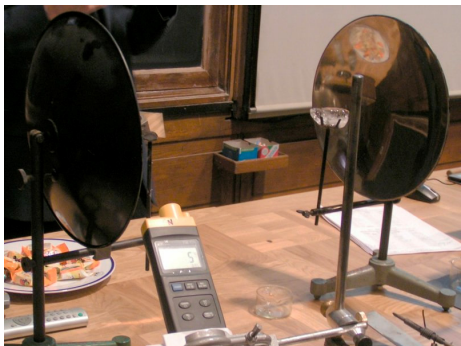


Rys. Q.15 Transmisja ciepła przy pomocy podczerwieni.

Podczerwień nie przechodzi przez niektóre materiały przezroczyste dla światła, jak np. szkło, dlatego zwykle soczewki mogą nas zawieść w tym zakresie fal. Natomiast podczerwień, podobnie jak inne fale elektromagnetyczne odbija się od metalu. Zatem do odbijania i skupiania podczerwieni możemy używać tych samych zwierciadeł, co do światła widzialnego. Nawet daleka podczerwień, która nie przenika przez szkło, odbija się od zwierciadła, jak światło widzialne.

Ciekawy efekt zaobserwujemy, gdy ustawimy układ według schematu z rys. Q.8 i Q.9. Jeżeli w ognisku pierwszego ze zwierciadeł wstawimy termometr, to będzie on odbierał promieniowanie z ciała umieszczonego w ognisku drugiego zwierciadła. Gdy umieścimy tam np. rozgrzaną lutownicę, to temperatura termometru wyraźnie wzrośnie. Można powiedzieć, że termometr będzie mierzył temperaturę lutownicy. Dzieje się tak, bo promieniowanie ciepłe lutownicy zostanie odbite przez zwierciadło, w którego ognisku jest lutownica, a następnie zostanie skupione przez kolejne zwierciadło na termometrze.

Niespodziewany efekt zaobserwujemy, gdy w ognisku zwierciadła umieścimy kostkę lodu. Okazuje się, że w tym przypadku temperatura pokazywana przez termometr spadnie poniżej temperatury pokojowej (rys. Q.9). Czyżby lód promieniował zimnem?



Rys. Q.16 Podczerwień chłodzi. Termometr widząc lód pokazuje 5°C.

Efekt można wyjaśnić biorąc pod uwagę, że podczerwień nie tylko dostarcza ciepła, ale też, że jej emisja powoduje utratę ciepła. Każde ciało emituje ciepło i dostaje je równocześnie od otoczenia. W warunkach równowagi przepływy energii są równe. Jeśli jednak dane ciało widzi przed sobą inne, zimne ciało np. lód, to jego temperatura spada, bo samo emituje ciepło, a nie dostaje go z powrotem od otoczenia.

Ultrafiolet i luminescencja

Ultrafiolet (!)

Ultrafiolet (nadfiolet) to promieniowanie elektromagnetyczne mające fale krótsze od światła widzialnego.

Nazwa 'nadfiolet' nie pochodzi od porównania długości fal. Zakres ten znajduje się nad fioletem (tak jak na rys. Q.2) ponieważ ma większe energie fotonów (i większe częstotliwości) niż światło widzialne.

	początek VIS/ UV	bliższy/ daleki FUV	koniec zakresu granica X
częstość	790 THz,	1500 THz	30000 THz,
dł. fali	380 nm	200 nm	10 nm
energia,	3,1 eV	6,2 eV	124 eV

Źródła:

lampa Xe lub Hg, lasery i diody świecące, wyładowania elektryczne.

Wykrywanie:

efekt fotoelektryczny, luminescencja.

Ultrafiolet widzą, na przykład, pszczoły.

Zastosowania:

pobudzanie luminescencji, zapis informacji (HD DVD), opalanie, sterylizacja, dezynfekcja.

Bliski ultrafiolet przechodzi przez szkło, dalszy ($\lambda < 350$ nm) - nie przechodzi.

Ultrafiolet ma na tyle duże energie fotonów, że jest w stanie jonizować atomy i cząsteczki chemiczne oraz wywoływać reakcje chemiczne. Z tej przyczyny może być niebezpieczny dla naszej skóry. Ma też właściwości bakteriobójcze.

Fotoluminescencja

Luminescencja, zwana też fluorescencją lub zimnym świeceniem, pojawia się, gdy światło emitowane jest przez elektrony przeskakujące z wyższego na niższy stan kwantowy. Może być pobudzana światłem (fotoluminescencja), reakcjami chemicznymi (chemoluminescencja i bioluminescencja) albo energią elektryczną (elektroluminescencja).



Rys. Q.17 Fotoluminescencja sanek

W pochmurny dzień, gdy słońce jest nisko i jego promieniowanie nie może do nas dotrzeć bezpośrednio, dociera do nas stosunkowo dużo wysokoenergetycznych (ultrafioletowych) fotonów. Dzieje się tak, gdyż ultrafiolet silnie się rozprasza na chmurach. Ultrafiolet pobudza różne barwniki do świecenia.

Pobudzenie luminescencji diodami świecącymi (!)

Przyrządy i materiały

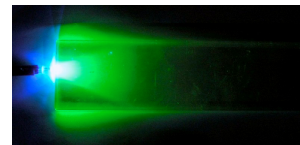
- diody elektroluminescencyjne o różnych barwach,
- kawałek szkła lub przezroczystego tworzywa sztucznego zabarwionego świecącym na zielono barwnikiem.

Przebieg doświadczenia

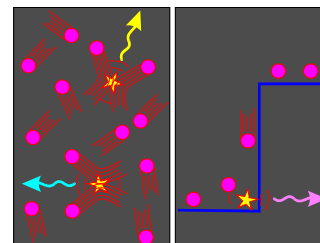
Wysokoenergetyczne (niebieskie) fotony mogą pobudzać elektrony na wyższe poziomy. Elektrony rekombinując, emitują fotony o niższej energii (zielone). Mamy w tym przypadku do czynienia z fotoluminescencją.

Używając czerwonej diody świecącej, obserwujemy z kolei, że czerwone fotony nie są w stanie pobudzić zielonego luminoforu.

Jedynie rozpraszają się tak, że światło nie zmienia barwy. Wyciągamy stąd wniosek, że energia fotonów pobudzających luminofor musi być wyższa (ewentualnie równa) niż fotonów emitowanych.



Rys. Q.18 Zielone świecenie pod wpływem niebieskiej diody



Rys. Q.19 Promieniowanie termiczne i luminescencja.

W procesach termicznych fotony produkowane są przypadkowo w trakcie zderzeń rozprzeczonych cząstek. Natomiast, w przypadku luminescencji mamy dobrze określony proces prowadzący do emisji. W efekcie dostajemy fotony o dobrze określonej energii. Dzięki temu luminescencja ma znacznie większą sprawność, gdyż energia nie jest

tracona na produkcję niewidzialnej podczerwieni, ani na wytwarzanie ciepła.

Emisja termiczna ma miejsce w żarówkach, natomiast luminescencję wykorzystujemy w lampach jarzeniowych i diodach świecących. Z tej przyczyny jarzeniówki i diody mają większą wydajność niż żarówki.

Porównanie wydajności: żarówka 10 - 20 lm/W, lampy jarzeniowe i diody - 100 lm/W.

Oddziaływanie światła z materią, spektroskopia

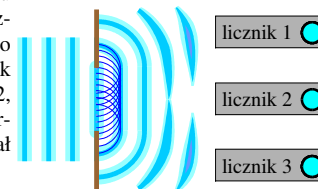
Światło rozchodzi się w postaci fal, ale oddziałując przekazuje pojedyncze porcje energii, czyli kwanty. Kwanty te zachowują się jak cząstki. Mówimy, że światło składa się z cząstek zwanych **fotonami**.

W laboratorium można przeprowadzić następujący eksperyment:

Źródło światła spójnego (laser) emituje światło w kierunku szczeliny. Za szczeliną umieszczamy liczniki fotonów. Światło ulega dyfrakcji i interferencji jak fala. Na przykład licznik 2, umieszczony w minimum interferencyjnym nie będzie wykrywał światła.

Dobieramy tak małe natężenie światła, że lecą pojedyncze cząstki światła, czyli fotony. Liczniki liczą wtedy pojedyncze, impulsy odpowiadające uderzeniom fotonów.

Porównując momenty czasu, w których następowały zliczenia, stwierdzamy, że reagował albo jeden detektor albo drugi, prawie nigdy dwa na raz. Oznacza to, że światło składa się z pojedynczych cząstek, które nie mogą być w dwóch miejscach równocześnie (w przeciwieństwie do fali).



Rys. Q.20 Światło jest falą i strumieniem cząstek.

Zgodnie ze wzorem (9.8) energia fotonów światła jest odwrotnie proporcjonalna do długości fali, λ , a proporcjonalna do częstości, ν .

Właściwość ta ma znaczenie w przypadku absorpcji i emisji światła, tak więc wzór ten pojawił się poprzednio przy absorpcji w półprzewodnikach i emisji termicznej danej rozkładem Plancka (Q.6). Warto wiedzieć, że także pęd p fotonów światła zależy od długości fali

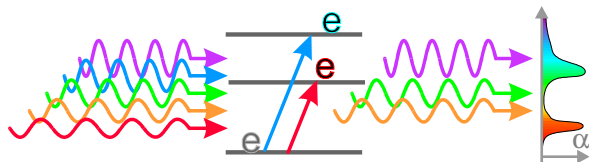
λ lub wektora falowego k .

$$p = \frac{h}{\lambda} = \hbar k. \quad (\text{Q.7})$$

Fakt, że fotony mają pęd oznacza, że światło padające na jakąś powierzchnię wywiera na nią ciśnienie.

Widmo absorpcji

Wykład rozpoczęliśmy opisując zjawisko absorpcji. W prawie Lamberta - Beera użyliśmy współczynnika absorpcji α .



Rys. Q.21 Rejestrując natężenie światła przechodzącego przez materię, możemy obliczyć widmo absorpcji.

Współczynnik ten zależy od rodzaju absorbującej substancji oraz od energii padających fotonów, czyli od długości fali świetlnej. Funkcję opisującą tę zależność $\alpha(\lambda)$, nazywamy widmem absorpcji. Przykład jest na rys. Q.14. Pomiaru widma absorpcji dokonujemy oświetlając badany obiekt światłem o kolejnych długościach fali i mierząc stosunek natężenia światła, które przeszło do światła padającego.

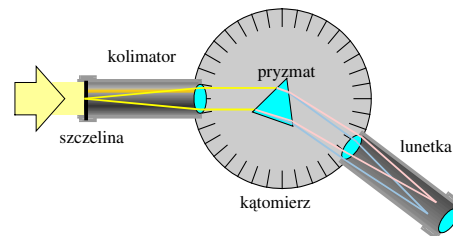
Spektroskop i spektrometr

Newton jako jeden z pierwszych stwierdził, że światło białe jest mieszaniną barw. Zestawienie pokazujące, z jakich barw składa się

dany strumień światła, nazywamy widmem światła.

Spektrometr pryzmatyczny (!)

Przyrząd pokazujący widmo światła nazywamy spektroskopem, a przyrząd mierzący to widmo – spektrometrem. Obecnie spektrometry są zazwyczaj wyposażone w kamery CCD rejestrujące widmo.



Rys. Q.22 Spektroskop pryzmatyczny

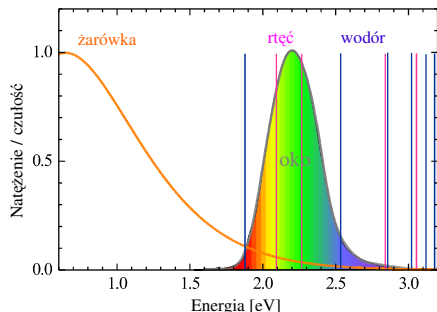
Aby można było uzyskać dobrze rozdzielone barwy światła przechodzącego przez pryzmat, strumień światła musi mieć dobrze określony kierunek przed wejściem do pryzmatu, to znaczy musi być skolimowany. Taki charakter ma światło pochodzące z dalekich obiektów, np. światło słoneczne. Dla bliskich źródeł musimy użyć kolimatora. Składa się on z soczewki lub zwierciadła i szczeliny umieszczonej w ich ognisku.

Skolimowaną wiązkę światła możemy rozszcześcić przy pomocy pryzmatu lub siatki dyfrakcyjnej.

Aby otrzymać ostry obraz widma, rozszczerzoną wiązkę światła trzeba skupić przy pomocy kolejnej soczewki.

Jeżeli na wyjściu umieścimy kamerę CCD, to będziemy mogli zarejestrować widmo (otrzymamy zatem spektrometr). Natomiast jeśli

na wyjściu umieścimy szczelinę, to będziemy mogli uzyskać światło o jednej, wybranej barwie. Taki przyrząd nazywamy monochromatorem.

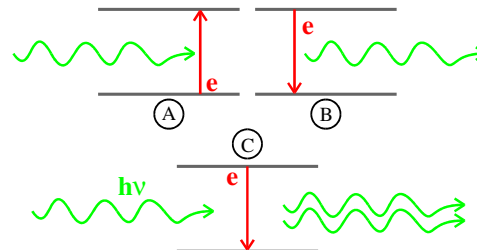


Rys. Q.23 Przykłady widm światła

Na poprzednich wykładach poznaliśmy już przykłady widm dźwięku i fal elektromagnetycznych. W przypadku światła, widma mogą być wykorzystane do rozpoznawania pierwiastków i związków chemicznych. Dzięki widmom można dokonać analizy składu chemicznego, nawet w przypadku odległych gwiazd.

Emisja i emisja wymuszona

Podstawowe procesy oddziaływania światła z materią to rozpraszanie, absorpcja i emisja.



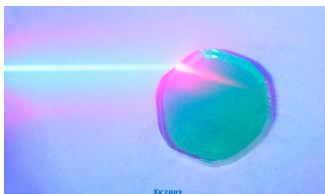
Rys. Q.24 Oddziaływanie światła z materią: A) absorpcja, B) emisja i C) emisja wymuszona.

Rozpraszanie polega na zmianie kierunku ruchu fotonów. **Absorpcja** następuje wtedy, gdy foton zostaje pochłonięty i dzięki swojej energii przenosi elektron z dolnego stanu na górny. **Emisja** następuje, gdy elektron spadając na dolny poziom emituje swoją energię w postaci fotonu. W świecie cząstek kwantowych możliwy jest jeszcze jeden proces. Jeśli elektron jest w górnym (wzbudzonym) stanie i padnie na niego foton, to wymusza on emisję drugiego, identycznego pod względem częstości i fazy fotonu. Taki proces nazywamy **emisją wymuszoną**. Stanowi on podstawę działania laserów.

W laserach doprowadzamy do inwersji obsadzeń, czyli umieszczamy dużo elektronów w stanie wzbudzonym, o wysokiej energii. Następnie przy pomocy zwierciadeł powodujemy, że fotony krążą we wnętrzu lasera w tę i z powrotem, za każdym razem powodując emisję wymuszoną, która wzmacnia wiązkę światła.

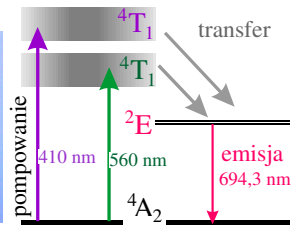
Laser rubinowy

Laser rubinowy był pierwszym działającym typem lasera. Został skonstruowany w 1960 roku przez Theodora Maimana.



Rys. Q.25 Kryształ granatu YAG z jonami chromu Cr^{3+} . Pobudzany niebieskim laserem, świeci na czerwono.

W laserze rubinowym wykorzystuje się przejścia wewnątrz jonu chromu Cr^{3+} (rys. Q.18 i Q.19). Chrom pobudzany jest niebieskim i zielonym światłem z lampy jarzeniowej. Elektrony spadają na stan, z którego emisja spontaniczna jest zabroniona. Uzyskaną w ten sposób inwersję obsadzeń wykorzystujemy do otrzymania emisji wymuszonej.



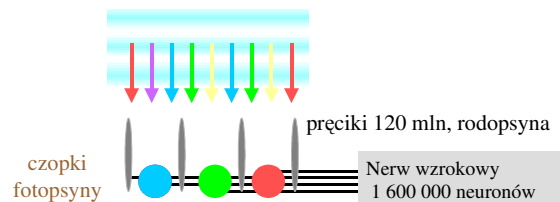
Rys. Q.26 Przejścia wewnątrz jonu chromu Cr^{3+} (w Al_2O_3)

Wzrok

Nasze oczy mają wiele ciekawych właściwości, na przykład, różne strumienie światła mogą mieć dla oka podobną barwę, choć w rzeczywistości mają różny skład. Na przykład, mieszanina światła czerwonego i zielonego oraz czyste żółte światło będą dla oka wyglądać tak samo.

Mechanizm widzenia barwnego (!)

Mechanizm rozróżniania barw przez nasze oczy różni się od zasady działania spektroskopu. Oko nie rozszczepia światła. Światło wpadające do oka skupiane jest przez soczewkę na siatkówce. Znajdują się tam światłoczułe komórki, dzięki którym widzimy i możemy rozróżniać barwy.



Rys. Q.27 Komórki nerwowe i barwniki w ludzkim oku

Mamy dwa rodzaje komórek światłoczułych czopki i pręciki. Pręcików jest znacznie więcej i są bardziej czułe od czopków. Widzimy dzięki nim nawet przy bardzo słabym oświetleniu. Jednak pręciki nie pomagają przy rozpoznawaniu barw. Kolory widzimy dzięki czopkom.

Mamy trzy rodzaje czopków:

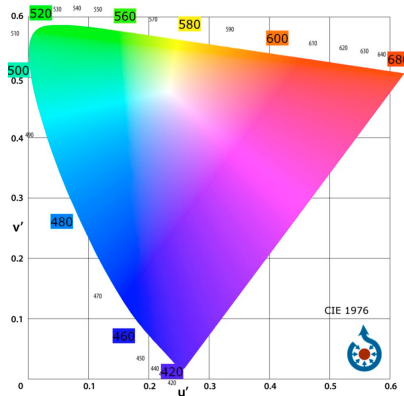
S - krótkofalowe - niebieskie,

M - średniofiałowe - zielone,

L - długofiałowe - czerwone.

Komórki te wyposażone są w różne typy barwników. Mają one stany kwantowe oddzielone przerwami energetycznymi, tak że fotony muszą mieć odpowiednią energię, aby wzbudzić elektron. Trzy rodzaje czopków mają trzy różne energie, a więc absorbują kwanty światła (fotony) o różnych barwach. Zatem kolory rozróżniamy dzięki kwantowym właściwościom cząsteczek chemicznych. Ponieważ mamy tylko 3 barwniki, więc tak naprawdę rozróżniamy tylko 3 kolory: niebieski, zielony i czerwony. Barwniki czerwony i zielony są podobne i kodowane przez geny na chromosomie X. Mężczyźni mają tylko jeden chromosom X i zdarza się, że mają na nim tylko 1 rodzaj barwnika czułego w zakresie od czerwieni do zieleni. Nie potrafią oni odróżnić czerwonego od zielonego. Natomiast niektóre kobiety mają 3 różne barwniki czułe w tym zakresie (Świat Nauki, maj 2009, str. 50)

Paleta barw



Rys. Q.28 Paleta barw CIE 1976

Ponieważ nasze oczy rozróżniają tylko 3 kolory, wszystkie pozostałe barwy odbieramy dzięki temu że mózg analizuje stosunki natężeń tych trzech kolorów w strumieniu światła. Wiedza o tym mechanizmie daje techniczną możliwość odtworzenia wrażenia dowolnej barwy poprzez mieszanie trzech podstawowych barw.

To, jak należy mieszać barwy, pokazuje nam paleta barw (patrz rys. Q.21). Jeżeli mamy dwie barwy odpowiadające dwóm punktom na tej palecie, to mieszając te barwy możemy otrzymać dowolną inną, leżącą na odcinku łączącym barwy wyjściowe.

Paleta ma kształt trójkąta. Aby odtworzyć wszystkie barwy znajdujące się wewnątrz tego trójkąta musimy mieć do dyspozycji źródła światła o barwach leżących w wierzchołkach tego trójkąta.

Paleta na rysunku Q.21 znajduje zastosowanie, gdy chcemy uzyskać kolory na ekranie telewizora lub monitora. Możemy też mieszać barwy z diod świecących.

Addytywne składanie barw - trójkolorowa dioda świecąca (!)

Przyrządy i materiały

- potrójna dioda świecąca RGB,
- zasilacz 6V,
- przewody i potencjometry (10 kΩ)

Przebieg doświadczenia

Do diod podłączamy zasilanie poprzez potencjometry. Regulując potencjometrami zmieniamy natężenia światła emitowanego z poszczególnych diod. Światło rzucamy na biały, matowy przedmiot, tak aby wymieszało się. Obserwujemy, że dobierając różne natężenia światła uzyskujemy różne barwy.

Sumując niebieski i czerwony otrzymujemy barwę purpurową. Natomiast sumując zielony i czerwony otrzymujemy barwę żółtą lub pomarańczową w zależności od proporcji mieszanych barw. Gdy

zielonego jest dużo barwa jest żółta lub cytrynowa. Jeżeli sumujemy zielony o mniejszym natężeniu z czerwonym o większym natężeniu, to otrzymujemy kolor pomarańczowy.

Kodowanie RGB

Aby jednoznacznie podać jakąś barwę, którą na przykład chcemy wyświetlić na monitorze komputera, należy podać trzy parametry. Najczęściej podaje się parametry określające składowe czerwoną, zieloną i niebieską. Ten sposób nazywamy kodowaniem RGB, od angielskich słów: **R** – red, **G** – green, **B** – blue.

W grafice cyfrowej parametry RGB zapisuje się liczbami od 0 do 255. Na przykład:

biały (255,255,255), czarny (0, 0, 0), żółty (255, 255, 0).

Addytywne i subtraktywne kodowanie barw (!)

System RGB wykorzystywany jest do składania barw emitowanych (jak w przypadku diod czy telewizji). Składając dwa kolory w tym systemie dostajemy trzeci kolor, jaśniejszy. Taki sposób składania barw nazywamy systemem addytywnym.

Inaczej się dzieje, gdy malujemy farbami. Wtedy mieszając ze sobą dwa barwniki otrzymujemy kolor ciemniejszy. Farby bowiem pochłaniają światło.

Takie składanie kolorów nazywamy subtraktywnym. Kolorami podstawowymi są wtedy: błękitny, purpurowy i żółty.

Do opisu barwy, w takim przypadku używany jest system CMY lub CMYK. Skrót pochodzi od słów Cyan, Magenta, Yellow i black.

C = 60	R = 88
M = 20	G = 150
Y = 80	B = 90
0 - 100	0 - 255

Rys. Q.29 Opis koloru ciemno-zielonego (tło prostokąta) w systemach

RGB i CMY.

W grafice cyfrowej parametry CMYK zapisuje się zazwyczaj liczbami od 0 do 100.

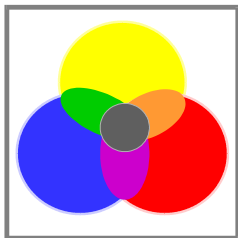
Na przykład: biały (0, 0, 0, 0), czarny (0, 0, 0, 100), żółty (0, 0, 100, 0), zielony (50, 0, 50, 0).

Porównanie dwóch metod kodowania przedstawione jest na rysunku Q.22. Znajdujący się na tym rysunku zielony prostokąt przedstawiony ma kolor opisany podanymi kodami w systemach RGB i CMY.

W sposób naturalny subtraktywna metoda mieszania barw ma zastosowanie przy malowaniu, farbowaniu tkanin, a także w wydrukach, w tym w drukarkach komputerowych.

Mieszanie trzech barw

Przy subtraktywnym mieszaniu barw, zielony nie jest już kolorem podstawowym. Otrzymujemy go mieszając żółty i błękitny. Natomiast kolor, który tu nazywam błękitnym (w angielskim cyan) jest jaśniejszy i trochę bardziej zielony od niebieskiego, będącego kolorem podstawowym w systemie addytywnym.



Rys. Q.30 Mieszanie barw podstawowych

Subtraktywne mieszanie kolorów możemy zademonstrować układając jeden na drugim filtry barwne. Zauważamy, między innymi, że niektóre pary kolorów dają w sumie kolor szary. Nazywamy je kolorami dopełniającymi.

Przykłady par kolorów dopełniających:

- czerwona + zielona = szara
- fioletowa + żółta = szara
- niebieska + pomarańczowa = szara

Doświadczalne mieszanie barw

Addytywne mieszanie barw najlepiej przeprowadzić nakładając na siebie strumienie światła z różnych źródeł. Na przykład z dwóch rzutników. Natomiast subtraktywne mieszanie barw otrzymamy, gdy z tego samego strumienia światła zabierzemy po kolei różne barwy np. nakładając na siebie filtry, można też prosto wykonać mieszanie farb. Na wykładzie demonstrowany był kolorowy wydruk pod mikroskopem.



Rys. Q.22 Mieszanie barw w teatrze cieni

Ciekawą metodą pokazującą jednocześnie mieszanie addytywne i subtraktywne jest oświetlenie ekranu zielonym, czerwonym i niebieskim strumieniem światła i wytworzenie nakładających się cieni, tak jak na zdjęciu Q.22. Można wtedy na ekranie wskazać obszary oświetlone dwoma strumieniami, gdzie dodaje się, na przykład, czerwony i zielony tworząc kolor żółty. Obserwując obszary zacienione, można prześledzić działanie metody subtraktywnej. Można, między innymi, wskazać obszar żółtego cienia, który przecinając się z błękitnym cieniem daje barwę zieloną.

Podsumowanie

Światło ma naturę falowo-cząstkową: jest **falą elektromagnetyczną** i jednocześnie strumieniem **fotonów**.

Fotony mogą być rozpraszane, **absorbowane** i **emitowane** (luminescencja). Może też nastąpić **emisja wymuszona** (lasery).

Prawo Lamberta-Beera (absorpcja): Natężenie światła maleje wykładniczo z grubością absorbera.

$$I = I_0 \cdot \exp(-\alpha x),$$

gdzie α - **współczynnik absorpcji**.

Prawo Wiena (emisja): Ze wzrostem temperatury, maksimum natężenia emitowanego światła przesuwają się w stronę krótszych fal.

Energia, E, fotonów jest odwrotnie proporcjonalna do długości fali, λ , a proporcjonalna do częstości, ν .

W przypadku **fotoluminescencji** pobudzać musimy fotonami o większej energii niż spodziewana energia emitowanych fotonów.

Podczerwień składa się z fotonów o niskiej energii (fale dłuższe od czerwieni), ale ma zazwyczaj duże natężenie i przenosi znaczące ilości ciepła.

Ultrafiolet składa się z fotonów o wysokiej energii (fale krótsze od fioletu), mogących powodować reakcje chemiczne, również szkodliwe.

Człowiek widzi barwy dzięki czopkom - receptorom czułym w trzech zakresach barw: czerwonym, zielonym i niebieskim. Dzięki temu aby zakodować barwę wystarczą trzy parametry:

czerwony, zielony i niebieski - kodowanie addytywne **RGB**.

lub

błękitny, czerwony i żółty - kodowanie subtraktywne **CMY**.