

## 6. Widmo światła

### Bączki a la Monet (składanie barw)

Claude Monet nie był fizykiem lecz najwybitniejszym impresjonistą przełomu XIX i XX wieku. Nazwa kierunku sztuki pochodzi od tytułu jego obrazu "Impresja. Wschód słońca". Dlaczego został malarzem?

Być może w dzieciństwie bawił się kolorowymi bączkami, które wprowadzone w ruch obrotowy wywoływały złudzenie mieszania się barw. Zafascynowany gamą kolorów zaczął mieszać barwy na swojej palecie z farbami i przenosić je na płócienne obrazy.



Sprawdź czy Ty możesz zostać malarzem, przed Tobą leżą bączki, spróbuj nimi zakręcić. Czy na wszystkich bączkach zaobserwowałeś (aś) składanie barw?

Słowo kolor pochodzi z języka łacińskiego. W większości kontekstów dotyczy wrażeń odbieranych za pośrednictwem oka. Słowo kolor jest używane przez osoby grające w karty, kiedyś też było używane dla odznak w wojsku, obecnie używa się go nawet dla określenia właściwości kwarków. Tak więc termin kolor podobnie jak inne słowa wywołuje sobą skojarzenia związane z kontekstem.

Podobnie jest z terminem barwa, jej nazwa pochodzi z języka łacińskiego: barbus. Słowo barwa kojarzy się z wrażeniami odbieranymi za pośrednictwem oka, może kojarzyć się z materią zawartą w barwniku, ma też zastosowanie przy ocenie dźwięku, "barwa dźwięku", przy ocenie samogłosek "barwa samogłoski", również było używane w wojsku "barwy oddziału".



Oko rejestruje fale światła. Światło, oceniane jest przez mózg jako zestaw wrażeń wytwarzanych w punktach odbiorczych oka. Fale świetlne ulegają w punktach odbiorczych przekształceniu na wrażenia. Takie przekształcenie nie jest funkcją wzajemnie jednoznaczną w sensie matematycznym. Znaczy to, że to samo wrażenie wytworzone w oku może powstać w wyniku różnych konfiguracji fal światła.

## Składanie kolorów (składanie barw)

Eksperyment służy do wyjaśnienia pojęcia składania addytywnego. Jest to realizowane przez użycie płaskiego źródła światła, arkusza cienkiego kartonu z trzema otworami, z filtrem w każdym otworze (czerwony, zielony i niebieski) oraz trzech luster.

Doświadczenie pokazuje w jaki sposób można otrzymać każdy kolor używając tylko trzech kolorów o właściwym natężeniu. Jeśli ustawi się karton w płaszczyźnie źródła światła otrzyma się trzy barwne promienie. Za pomocą trzech lusterek można rzucać je na biały ekran. Teraz można na różne sposoby nakładać trzy kolory (*zobacz ilustracje*); w szczególności należy odnotować, że jeśli nałoży się na siebie wszystkie trzy kolory podstawowe otrzyma się światło "białe".



Model RGB to jeden z pierwszych praktycznych modeli przestrzeni kolorów zawierający receptę dla tworzenia barw. Ten model w sposób jawny wyłonił się w czasach narodzin telewizji (lata 1908 i następane). Jest to model wynikający z właściwości odbiorczych oka i opiera się na fakcie, że wrażenia prawie wszystkich barw w oku można wywołać przez zmieszanie w ustalonych proporcjach tylko trzech wybranych wiązek światła o odpowiednio dobranej szerokości widma. Do dziś w oparciu o ten model pracują lampy obrazowe - kineskopy. Pomimo tego, że sam sygnał telewizji kolorowej jest oparty o zupełnie inny sposób kodowania kolorów (dla telewizji jest kilka takich sposobów). W modelu RGB identyfikacją barwy jest trójka składowych (r, g, b), (Red - czerwony, Green - zielony, Blue - niebieski).

Pojedyncza składowa to liczba proporcjonalna do intensywności wiązki fal odpowiadającej danej składowej. Równoczesne wyemitowanie trzech wiązek reprezentujących składowe w odpowiednich proporcjach energii, może spowodować wrażenie odpowiadające prawie światłu białemu - wrażeniu odbioru emisji przybliżonej do pełnego widma z odcinka fal od 400 nm do 700 nm. Natomiast wyemitowanie równoczesne takich trzech wiązek w inaczej dobranych proporcjach może wywołać w oku powstanie wrażeń innych barw.

Światło białe złożone jest z nieskończonej ilości fal różniących się częstotliwością (długością fali), i aby wytworzyć w oku wrażenie światła białego wiązki nie mogą być pojedynczymi falami monochromatycznymi lub wiązkami takich fal (na przykład światło lasera). Muszą to być wiązki światła o dobranej szerokości widma.

## Filtrowanie światła (składanie barw)

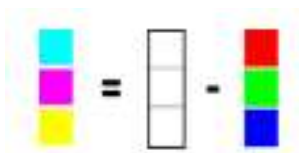
Zapewne widziałeś (aś) w jaki sposób otrzymuje się barwne światło w teatrze przy pomocy filtrów barwnych. Filtr przepuszcza światło o określonym kolorze. A co się stanie, jeżeli puścimy przefiltrowane światło przez filtr o innej barwie? Sprawdź jakiego koloru światło przepuści układ dwóch filtrów, a co się stanie jeżeli na drodze światła białego umieścimy trzy filtry?

Do dyspozycji masz trzy filtry o różnych kolorach:

C - cyjan (ang. *Cyan*)

M - magenta (ang. *Magenta*)

Y - żółty (ang. *Yellow*).



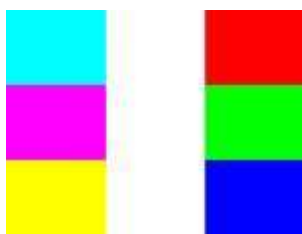
$$\begin{bmatrix} C \\ M \\ Y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \\ 1 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} R \\ G \\ B \end{bmatrix}$$

Od pierwszych liter użytych barw powstała nazwa zestawu podstawowych kolorów (CMY) farb drukarskich stosowanych powszechnie w druku kolorowym, w poligrafii i metodach pokrewnych (materiały barwiące w drukarkach komputerowych, urządzeniach xero itp.). Na zestaw tych kolorów mówi się również barwy procesowe (kolor i barwa w jęz. polskim to synonimy). CMY jest jednym z trybów koloru w pracy z grafiką komputerową.

Człowiek używa nazwy dla barwy farby tak jak ją widzi. Powierzchnia farby odbija światło z otoczenia i to odbite światło daje wrażenie nazywane barwą farby. Różnica pomiędzy światłem białym a światłem NIE odbitym:

Składowe koloru powstałe z takiej różnicy nazwano literami: CMY, ponieważ z analizy tego modelu w naturalny sposób wynikają przyjęte barwy podstawowe i są one lokalizowane na osi długości fal mniej więcej pomiędzy barwami podstawowymi z modelu RGB. Są czasem nazywane barwami "subtraktywnymi" (z ang. subtract, odejmować). Kolor Cyjan leży gdzieś pomiędzy niebieskim a zielonym, kolor Magenta (fiolet, okolice purpury) ma trochę czerwonego i niebieskiego, a kolor Yellow (żółty) leży pomiędzy zielenią a czerwienią.

Tak ustalone kolory bazowe mają swoje odpowiedniki na płaszczyznach sześcianu modelowego w przestrzeni RGB odpowiednio: Cyjan: (0,G,B), Magenta: (R,0,B), oraz Yellow: (R,G,0). Jak już wspominaliśmy kolor bieli jest pojęciem umownym. Z modelu RGB, punkt bieli (R,G,B) = (1,1,1), przenosi się wraz ze swoją całą umownością na punkt CMY = (0,0,0) i w ten sposób dla CMY jest to umowna barwa biała, można też użyć nazwy, że jest to barwa podłoża. Punkt RGB = (0,0,0) jako kolor czarny przenosi się na punkt CMY = (1,1,1).



## Mydlane bańki (interferencja)

Zamocz pierścionek w kubeczku i dmuchaj mocno ale powoli. Chyba każdy z nas puszczał takie bańki. Ale czy przyglądaliście się dokładnie jak pięknie mienia się barwami tęczy?

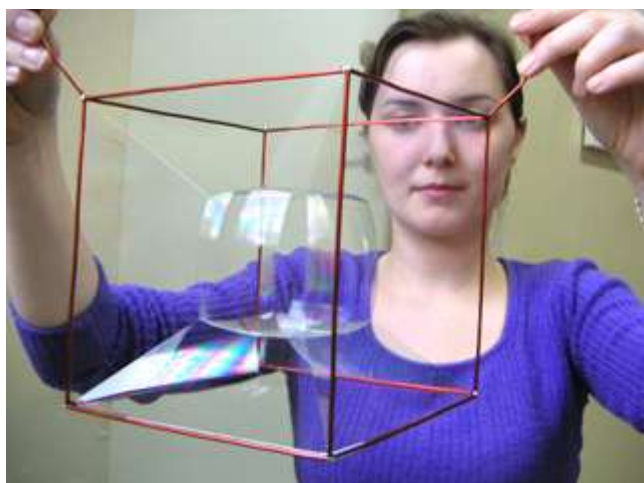
Odpowiedzialna za to jest interferencja światła na cienkich błonach.

Zjawiska te zawsze fascynowały człowieka nie tylko swoim pięknem, ale również dlatego, że

zwykle można je obserwować tylko w bardzo delikatnych lub nietrwałych obiektach, takich jak bańki mydlane, tłuste plamy na wodzie, plamy oleju na mokrej drodze, skrzydła owadów, masa perłowa, ogon pawia.



W 1672 Robert Hook przedstawił Królewskiemu Towarzystwu Naukowemu raport, w którym pisał, że "za pomocą szklanej rurki, z roztworu mydła wydychają się liczne małe bańki. Z łatwością można zauważyć, na początku dmuchania warstwa kulista cieczy, która je zamykała, była biała i przezroczysta, bez żadnych kolorów; zaraz po tym, gdy warstwa stopniowo stawała się cieńsza, pojawiała się powierzchnia z różnorodnymi kolorami, jak w tęczy".



Bańki powstające na skomplikowanych ramkach, jak na przykład sześciąt, przyjmują specyficzne kształty, minimalizujące wielkość powierzchni.

Aby uzyskać duże bańki, jak na przykład na pokazanych zdjęciach warto sporządzić mieszankę składającą się objętościowo z 6 części wody, 2 części dobrego płynu do mycia naczyń oraz 1 części gliceryny (do kupienia w aptece) i odstawić ją na kilka godzin.

Pozostaje pytaniem, dlaczego dla wytworzenia długich baniek dodaje się mydła, które zmniejsza napięcie powierzchniowe cieczy. Pozornie, wydaje się, że zmniejszając napięcie

powierzchniowe zmniejszamy siły, które trzymają bańkę razem. W rzeczywistości, dopiero po zmniejszeniu napięcia powierzchniowego, woda daje się rozciągać w długie warstwy - bez mydła siły spójności są zbyt silne.

Oświetlając światłem białym błonę mydlaną, możemy zaobserwować w świetle odbitym ułożone poziomo kolorowe prążki. Gdy jednobarwna wiązka światła pada na powierzchnię błony, częściowo się od niej odbija, a częściowo, po załamaniu, przeniknie w głąb. Część promieni, które przenikną, odbije się z kolei od drugiej powierzchni i opuszczając błonę, w drodze powrotnej ponownie załame na powierzchni pierwszej. W oku obserwatora spotkają się promienie bezpośrednio odbite i biegnące tylko w powietrzu z promieniami, które dzięki wniknięciu do błony przebyły drogę dłuższą o podwójną grubość błony. Różnica dróg optycznych ( $d=n\lambda$ ) między spotykającymi się promieniami powoduje, że wytworzona zostaje między nimi różnica faz. Kiedy fale



światłone nakładają się fazami zgodnymi, interferencja jest konstruktywna i obserwujemy wzmocnienie. Kiedy fazy są przeciwne mamy interferencję destruktywną i następuje wygaszenie.

W przypadku odbicia na dwóch różnych powierzchniach do różnicy faz między promieniami, nabytej dzięki różnicy ich dróg optycznych, należy jeszcze dodać zmianę fazy promienia odbitego od powierzchni na przeciwną ( $180^\circ$ ). Dzieje się tak, gdy odbicie następuje od ośrodka gęstszego optycznie (błona mydlana) niż powietrze. Jeśli zatem różnica faz między promieniami będzie równa całkowitej wielokrotności  $360^\circ$ , to nastąpi efekt wzmocnienia, co uwidoczni się w postaci zaobserwowania jasnego prążka. Ciemny prążek będzie widoczny natomiast wtedy, kiedy analogiczna różnica faz będzie równa nieparzystej wielokrotności  $180^\circ$ .

Przy oświetleniu błony światłem białym prążki nabiorą kolorów. Ze względu na to, że różne długości fal światła odpowiadają różnym barwom, maksimum odpowiadające każdej barwie będzie miało swoje określone położenie. Prążki określonego koloru powstają, kiedy grubość błony jest nieparzystą wielokrotnością jednej czwartej długości fali (w wodzie)  $(2m+1)\lambda'/4$ , gdzie  $m=0,1,2,\dots$  itd. a  $\lambda'$  jest długością fali w wodzie (bańce).  $\lambda'$  natomiast wynosi  $\lambda'/n$ , gdzie  $n$  jest współczynnikiem załamania wody (względny, w stosunku do powietrza). Minimalna grubość bańki jest równa jednej czwartej długości fali (w wodzie) - światło przebiega przez bańkę dwukrotnie, tam i z powrotem, czyli pokonuje drogę  $\lambda'/2$  a więc zmiana fazy na całym przebiegu wynosi  $180^\circ$ . Obliczenie to pozwala nam też ocenić grubość bańki - najcieńsza grubość bańki, tam gdzie jest ona fioletowa wynosi zaledwie 70 nanometrów - około 500 średnic atomu (przyjmując długość fali fioletowej 400 nm a współczynnik załamania wody 1,34)



W dolnych częściach bańki prążki ułożone są gęściej - profil grubości błony zmienia się w sposób nieliniowy z wysokością. Spływanie roztworu i odparowywanie wody sprawia, że grubość błony na całej jej wysokości maleje w czasie. Obserwowane prążki będą się wzajemnie od siebie oddalać aż do momentu, kiedy błona osiągnie graniczną, minimalną grubość. Podczas kiedy grubość błony tuż po jej uformowaniu jest wielokrotnie większa od długości fali, to po pewnym czasie relacja staje się odwrotna i bańka staje się bezbarwna.



W paryskim Eksploratorium "La Villette" można wyciągać bańki o rozmiarach metra kwadratowego.

## Światłowody

Jeśli zrozumiałeś na czym polega odbicie światła, które nie może się wydostać z wody, jak w kostce z pingwinami, zrozumiesz również, jak można przesyłać światło w kablu. Kabel jest szklany, zbudowany podobnie jak elektryczny: nieco inny w środku, inny ku powierzchni. Światło nie może się z niego wydostać, z powodu różnicy współczynników załamania (większy w kablu, mniejszy na obrzeżach) i podróżuje aż do krawędzi, jak w tych plastikowych kubkach<sup>1</sup>).



Jeśli przewody mają formę włókien, można z nich zrobić lampę lub kolorową zmiotkę.

W lampie, wiązka giętkich włókien światłowodowych jest zainstalowana na podstawie, w której znajduje się żarówka o dużym natężeniu, której światło przepływa przez włókna. Aby eksponat był bardziej interesujący, w podstawie można zainstalować filtr z różnokolorowymi krążkami. Mały silniczek elektryczny kręci kolorowym krążkiem i światło wychodzące ze szklanych wiązek zmienia barwy.

W zmiotce, związanych zostało wiele szklanych wiązek w jednym uchwycie. W uchwycie tym jest ukryta lampka kieszonkowa. Kiedy

włącza się światło, podąża ono wzdłuż wiązek. Ponieważ wiązki szklane mają różne długości, a światło można zobaczyć na końcach wiązek, trzymana w ręku zmiotka w ciemności daje wrażenie złapanych w rękę gwiazdek.



Światłowód można przyrównać do bardzo cienkiego przewodu z plastiku otoczonego powłoką ochronną drugiego przewodu. Promień światła pada przez powierzchnię czołową przewodu. Na ścianie następuje maksymalne odbicie, tak że promień zostaje doprowadzony do końca przewodu. Zjawisko to funkcjonuje również przy przezroczystych materiałach.

Warunkiem koniecznym, aby światło mogło się rozchodzić w światłowodach jest, aby przenikalność elektryczna (stała dielektryczna  $\epsilon$ ) włókna była większa od przenikalności elektrycznej otaczającej go powłoki ( $\epsilon_1 < \epsilon_2$ ). Ponieważ  $n = \sqrt{\epsilon}$ , więc między współczynnikami załamania musi zachodzić podobna zależność ( $n_1 < n_2$ ). Wobec powyższego pojedyncze włókno wykonane z małostratnego materiału o przenikalności elektrycznej  $\epsilon_1$  większej od przenikalności otoczenia może nieść falę elektromagnetyczną. W praktyce takie włókno, zwane rdzeniem, otoczone jest płaszczem o mniejszej przenikalności elektrycznej  $\epsilon_2$ .

Promieniowanie wnikające do światłowodu może się w nim rozchodzić w postaci fal własnych rdzenia lub płaszczka, względnie wnikać do otaczającego ośrodka. Rodzaj wzbudzanych fal zależy od kąta, pod którym wchodzi wiązka świetlna przez płaszczyznę czołową do wnętrza światłowodu. Jedynie fale rdzeniowe są użytecznym rodzajem energii prowadzonej przez światłowód. Wzbudza je część promieniowania padającego na płaszczyznę czołową światłowodu, która zawiera się w kącie bryłowym  $2\alpha$ , odpowiadającym kątowi krytycznemu  $\Theta_{\text{kryt}}$ . Kąt  $\alpha$  wyznacza tzw. aperturę numeryczną NA światłowodu:

$$NA = \sin \alpha = \sqrt{n_1^2 - n_2^2}$$

Apertura numeryczna określa zdolność światłowodu do pobierania użytecznej energii świetlnej. W rdzeniu mogą rozchodzić się tylko fale, zwane modami fali elektromagnetycznej. Mod światłowodowy jest to pojedynczy rodzaj drgań własnych światłowodu, spełniający równanie falowe z warunkami brzegowymi zależnymi od wymiarów i konstrukcji światłowodu. Podstawowym parametrem określającym światłowód jest znormalizowana częstotliwość:

$$V = 2\pi a / \lambda_0 NA,$$

gdzie:

a - promień rdzenia,

$\lambda_0$  - długość fali w próżni.

Liczba modów w światłowodzie:

$$N = 0,5 V^2$$

N może przybierać wartości sięgające 1000, są to tzw. światłowody wielomodowe. Jeśli  $V < 2,4$ , to w światłowodzie może powstawać tylko jeden mod.

1) To pozorne wzmocnienie światła na brzegach kubka wynika z oświetlenia: dość silne lampy u góry, światło jest "zbierane" na całej powierzchni kubka, w wychodzi z materiału tylko na brzegach