



## O kolorze słów kilka

*Kinga Bochenek*

*Instytut Fizyki UJ*

Niebieski, żółty, zielony, czerwony, seledynowy, fioletowy, biały długo można by jeszcze ciągnąć taką wyliczankę. W końcu na liście pojawiłyby się nazwy takie jak łososiowy, groszkowy, cytrynowy, świadczące o tym, że nie zawsze łatwo jest określić kolor, czasem łatwiej jest go porównać z czymś znanym. Być może wszystkie nazwy kolorów powstały w ten sposób. Czym wobec tego jest kolor? Czy jeżeli ktoś opisuje kolor ścian jako np. łososiowy, to czy każda inna osoba opisałaby go tak samo? A co odróżnia kolor morski od turkusowego? Czy są to takie same kolory, czy dwa słowa na powiedzenie tego samego?

Promienie światła, które docierają do oka, mogą mieć różną historię. Mogą pochodzić bądź bezpośrednio z jakiegoś źródła światła, bądź z jakiejś powierzchni, na której zostały rozproszone. Tak czy inaczej niosą w sobie informację o przedmiotach znajdujących się w otoczeniu. Gdy światło pada na rogówkę – czyli najbardziej zewnętrzną część oka – przechodzi przez nią zubożone o część ultrafioletową widma, gdyż rogówka intensywnie pochłania światło w zakresie ultrafioletu. Podobnie jest przy przejściu przez soczewkę i wypełniające oko ciało szkliste. Następnym krokiem na tej drodze jest siatkówka, warstwa tkanki nerwowej o grubości około 300  $\mu\text{m}$ , wyścielająca od wewnątrz gałkę oczną. Tutaj światło z zakresu mniej więcej 400–800 nm jest pochłaniane i informacja o tym zostaje przesłana do mózgu. Tutaj właśnie zaczyna się proces, który nazywamy widzeniem.

Siatkówka składa się z wielu rodzajów komórek nerwowych połączonych w sieć. Dzięki układowi optycznemu, jakim jest oko, obraz świata zostaje odwzorowany na siatkówce jak na kliszy fotograficznej. Ten obraz zostaje zarejestrowany przez wyspecjalizowane komórki nerwowe – receptory światła, ułożone w mozaikę po wewnętrznej stronie gałki ocznej. Komórki te pochłaniają światło i przekształcają jego energię na impulsy nerwowe. Receptory przesyłają informację o swoim pobudzeniu do innych komórek siatkówki w pewien określony sposób. Te pozostałe komórki „komunikują” się między sobą według pewnych reguł, realizowanych poprzez strukturę połączeń między komórkami, dzieląc się w ten sposób otrzymaną informacją. W efekcie to, co siatkówka wysyła za pomocą nerwu wzrokowego do mózgu, to zakodowana informacja o otoczeniu, podzielona na „kanały informacyjne”. Inne włókna nerwu wzrokowego niosą dane np. o kolorach, a inne o ruchu. To tak jak w telewizji czy w radiu. Jedni dziennikarze zbierają informacje z kraju, inni z zagranicy, ktoś inny przygotowuje informacje sportowe, a wszystko to składa się na jeden program informacyjny, jeden obraz świata.

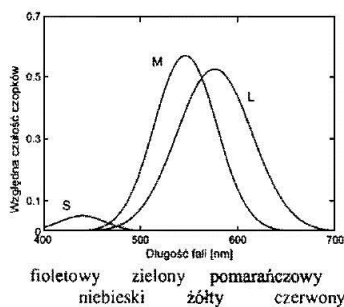
Obróbka i analiza informacji wizualnej nie kończy się na siatkówce. W całym procesie biorą udział jeszcze liczne struktury mózgowe, a wiele aspektów tego zagadnienia jest jeszcze wciąż okrytych tajemnicą. Wróćmy jednak do miejsca, gdzie zostaje odebrana informacja ze środowiska.

Receptorów światła jest w oku kilka rodzajów. Przede wszystkim wyróżnia się dwa – czopki i pręciki. Nazwy pochodzą od charakterystycznego kształtu tych komórek. Pręciki są bardzo czułymi receptorami. Pozwalają widzieć przy skąnym oświetleniu. Czopki, mniej więcej 1000 razy mniej czułe, służą widzeniu za dnia. Pojedynczy receptor pochłania światło z różnym prawdopodobieństwem, w zależności od długości fali padającego światła. Jednak kiedy już pochłonie kwant światła, informacja o długości fali zostaje utracona. W odpowiedzi na pochłonięcie jednego kwantu światła czopek generuje zawsze taki sam sygnał. Pojedynczy czopek jest tak samo ślepy na kolory jak pręcik – pozwala tylko odróżnić jasne od ciemnego. Można się o tym przekonać, oglądając małą kolorową kropkę (o średnicy około 0,5 mm). Jeśli powoli odsuwamy obrazek od oczu, w pewnym momencie kropka robi się czarna (przy odległości od oczu około 1 m). W takich warunkach kropki tej wielkości są odwzorowywane na obszarze siatkówki porównywalnym z rozmiarami pojedynczego czopka.

Ludzkie oko posiada jednak więcej niż jeden rodzaj czopków. Różnią się one widmami absorpcji. Rozróżnia się czopki wrażliwe głównie na fale krótkie typ S, środkowe – typ M i długie – typ L. Nazwy długie – krótkie odnoszą się do zakresu widzialnego widma. Czasem używa się nazw: czopki niebieskie, zielone i czerwone, jednak te określenia mogą być mylące. Maksima absorpcji różnych rodzajów czopków są przesunięte względem siebie, ale te trzy widma razem pokrywają cały zakres widma widzialnego, w taki sposób, że każdy fragment (poza brzegami) jest „obsługiwany” przez dwa typy czopków. Tym samym prawie każda wiązka światła, w tym monochromatyczna, pobudzi przynajmniej dwa różne typy czopków. Wrażenie koloru powstaje, gdy informacja o pobudzeniach różnych receptorów zostaje porównana. Porównanie względnych pobudzeń receptorów pozwala na powstanie nowej jakości – wrażenia koloru.

Na rysunku przedstawiono krzywe absorpcji dla czopków ludzkich na tle widma widzianych przez nas barw. Wyobraźmy sobie eksperyment, w którym prezentuje się komuś światło monochromatyczne i że zmieniamy powoli długość fali, zaczynając od 350 nm i posuwając się ku czerwieni. Początkowo badany nie widzi nic. Przy około 400 nm zaczyna dostrzegać światło ciemnoniebieskie – zostały pobudzone tylko czopki typu S, w końcu są też pobudzane czopki typu M, kolor zmienia się na błękit. Stopniowo czopki S są coraz mniej, a czopki M coraz mocniej pobudzane kolor przechodzi w zielony. Równocześnie zaczynają pracować czopki typu L. W momencie, gdy czopki S są już nieaktywne, a pobudzenia czopków M i L stają się porównywalne, kolor jest żółty. Dalej aktywność czopków M maleje, podczas gdy czopków L rośnie kolor zmienia się z pomarańczo-

wego na czerwony. Gdy pracują już tylko czopki L, kolor staje się ciemnoczerwony i taki zostaje do momentu, gdy znów nic nie widać.



Rys. 1. Krzywe absorpcji trzech typów ludzkich czopków, wykonane na podstawie danych eksperymentalnych uzyskanych przez Walda (G. Wald, „The Receptors of Human Color Vision”, *Science*, **145**, 1973)

Krzywe przedstawione na rysunku narysowano na podstawie danych eksperymentalnych, uzyskanych przez G. Walda i opublikowanych w *Science* w 1973 roku. Prezentował on badanej osobie światło o danej długości fali, tak słabe, że niemożliwe do zobaczenia. Następnie zwiększał natężenie wiązki aż do momentu, gdy badany oświadczał, iż zobaczył światło. Postępując tak dla różnych długości fal i sprytnie wykorzystując adaptację receptorów<sup>1</sup>, otrzymał „krzywe odpowiedzi” wszystkich trzech typów ludzkich czopków. Wykazał też, że krzywe dla danego typu receptora otrzymane dla różnych osób mogą się różnić. Tym samym wrażenia koloru mogą się nieznacznie różnić w przypadku różnych osób. Dotyczy to właściwie tylko kolorów „niezdecydowanych”, kiedy nie mamy pewności, która z barw tęczy w nich dominuje.

Jeżeli dwie wiązki światła pobudzą receptory w takich samych proporcjach, zobaczymy taki sam kolor, nawet jeśli pierwotne wiązki różniły się między sobą. Dzięki temu właśnie zamiast stosować monochromatyczne żółte światło można zmieszać odpowiednio światło czerwone z zielonym. Każdej długości fali można przyporządkować pewien kolor, ale nie odwrotnie. Wynika z tego również, że kolor nie jest czymś, co obiektywnie istnieje w otaczającym nas świecie. Jest to wrażenie powstałe w mózgu. Należy pamiętać, że dla żadnego zwierzęcia nie jest istotne, jaka długość fali dociera do jego oka, ale czy jest ono w stanie wystarczająco szybko odróżnić pokarm od czegoś, co może być trujące, i czy dostrzeże napastnika na maskującym tle.

<sup>1</sup> Zjawisko adaptacji polega na przyzwyczajaniu się receptorów do światła: po dłuższym naswietlaniu reagują one słabiej na bodziec, choć światło ma takie samo natężenie.

Łatwo sobie wyobrazić, że dwie wiązki światła o długościach fal położonych symetrycznie względem maksimum absorpcji pojedynczego receptora będą dla tego receptora nierozróżnialne. Obecność drugiego receptora o przesuniętym widmie absorpcji pozwala je odróżnić. Podobnie istnienie trzeciego receptora pozwala zobaczyć różnice niewykrywalne dla układu dwóch.

Okazuje się jednak, że trzy rodzaje czopków nie są wśród zwierząt czymś typowym. Większość współczesnych gadów posiada całą kolekcję różnych typów czopków w zakresie od bliskiego ultrafioletu do czerwieni. Dodatkowo gadzie receptory mogą zawierać krople kolorowych substancji, działających jak barwne filtry modyfikujące widma absorpcji całych komórek. Podobnie jest u ptaków. Ssaki natomiast posiadają przeważnie dwa typy czopków – S i L. To, co nam się wydaje najbardziej naturalne – system trójreceptorowy – występuje u naczelnych i jest raczej wyjątkiem<sup>2</sup>.

Kolory stanowią w świecie żywym swoisty język międzygatunkowy. To, co dla nas jest po prostu ładne, ciekawe bądź intrygujące, może stanowić ważny element życia zwierząt, tak jak to się dzieje w przypadku pewnego gatunku kalifornijskich jaszczurek. Samce tych zwierząt mogą być ubarwione na trzy różne sposoby -mogą mieć skórę pomarańczową, niebieską lub żółtą. Dla tych jaszczurek jest to element swoistej gry typu „kamień – nożyce – papier”, gry o przetrwanie.

Ubarwienie ciała może chronić – jak u flądry, która przybiera barwy podłoża, ostrzegać – jak u wielu gatunków jadowitych, oszukiwać – jak u zwierząt wykorzystujących zjawisko mimikry<sup>3</sup>. Może być stałe lub zmienne. Zmiany mogą być bardzo szybkie – jak u kameleona lub mątw, okresowe – jak u wielu zwierząt polarnych, lub zachodzić z wiekiem – jak u tropikalnej rybki *Pygoplites diacanthus*. Ciekawym przypadkiem są mątwy. Barwne wzory służą im do odstraszenia drapieżników, mylenia ofiary i odgrywiają pewną rolę podczas zalotów, tyle że same mątwy kolorów nie widzą.

Zwierzęta posługują się kolorystyką ciała do porozumiewania się zarówno w obrębie danego gatunku, jak i pomiędzy gatunkami. Istnieją pewne uniwersalne „kody” – jak jaskrawe ubarwienie u różnych jadowitych gatunków. Niektóre sygnały są natomiast zrozumiałe tylko dla wtajemniczonych, czyli przedstawicieli tego samego gatunku. Biorąc pod uwagę różnice pomiędzy gatunkami w ilości receptorów, a więc różnice w postrzeganiu, można dojść do wniosku, że nadawca barwnego sygnału często może widzieć coś zupełnie innego niż odbiorca. Jednak cały ten system od wieków funkcjonuje.

---

<sup>2</sup> Ciekawe omówienie widzenia kolorów przez zwierzęta na tle ewolucji od gadów do ssaków można znaleźć na anglojęzycznej stronie internetowej:  
<http://www.univie.ac.at/Vergl-Physiologie/www/research/morphretframe.html>.

<sup>3</sup> Mówiąc w skrócie, zjawisko to polega na upodobnieniu się w toku ewolucji gatunków bezbronych do gatunków jadowitych bądź trujących, co do pewnego stopnia daje ochronę.