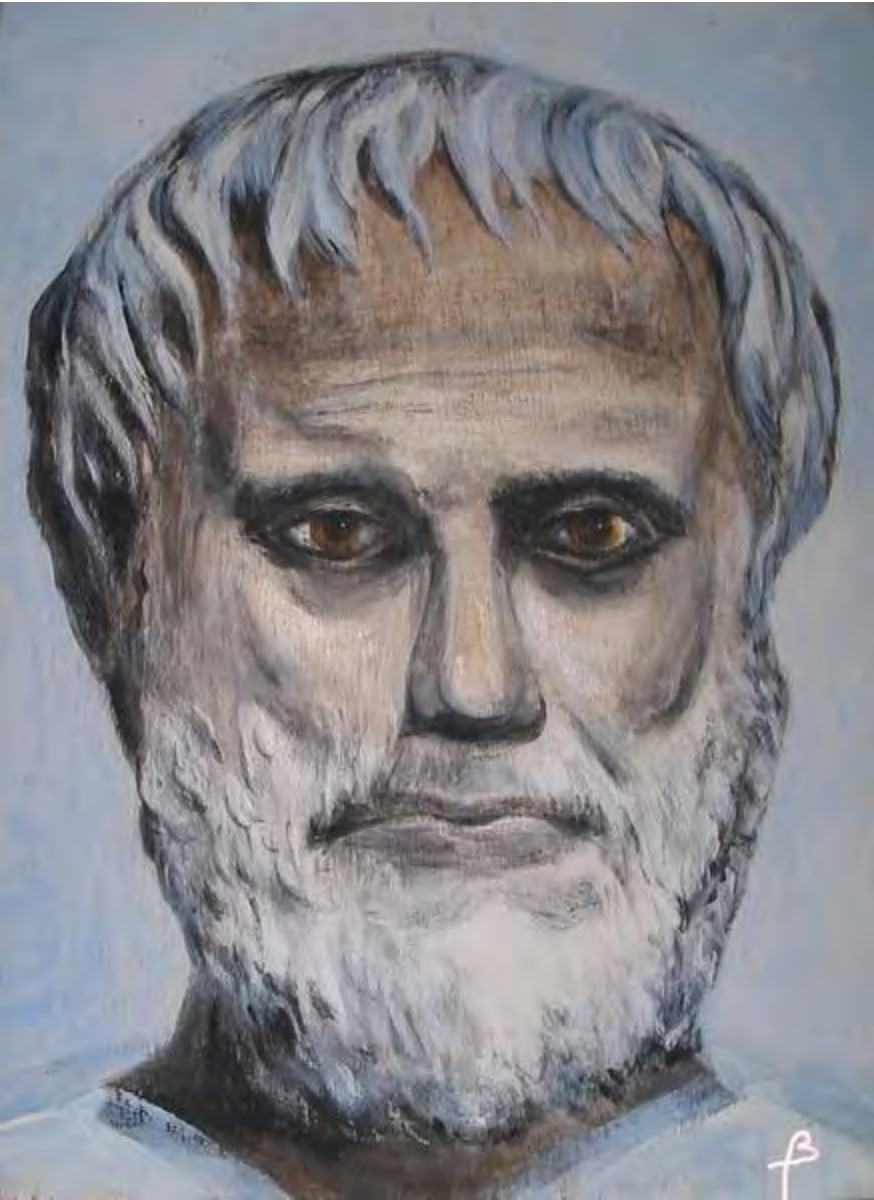


# Wykład 11

Widzenie barwne

# Arystoteles



To co jest widoczne w świetle  
zawsze kolorem

Kolor jest nieodłączny od  
ciała, ale niejako w stanie  
potencjalnym. Konieczne  
jest światło, które  
uaktywnia barwę.

Wszystkie barwy pochodzą  
z czerni i bieli, a więc  
światła i ciemności

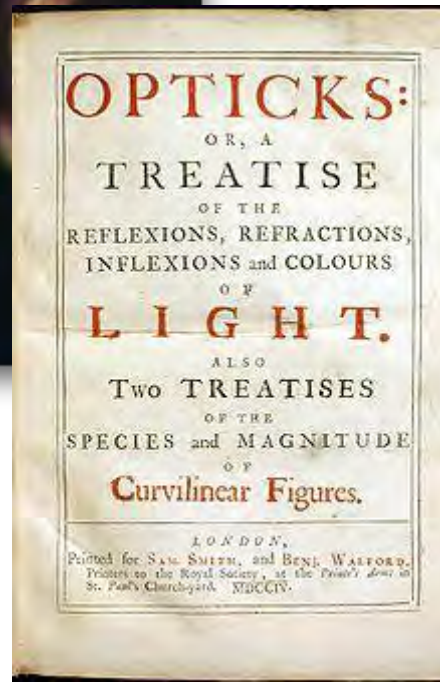
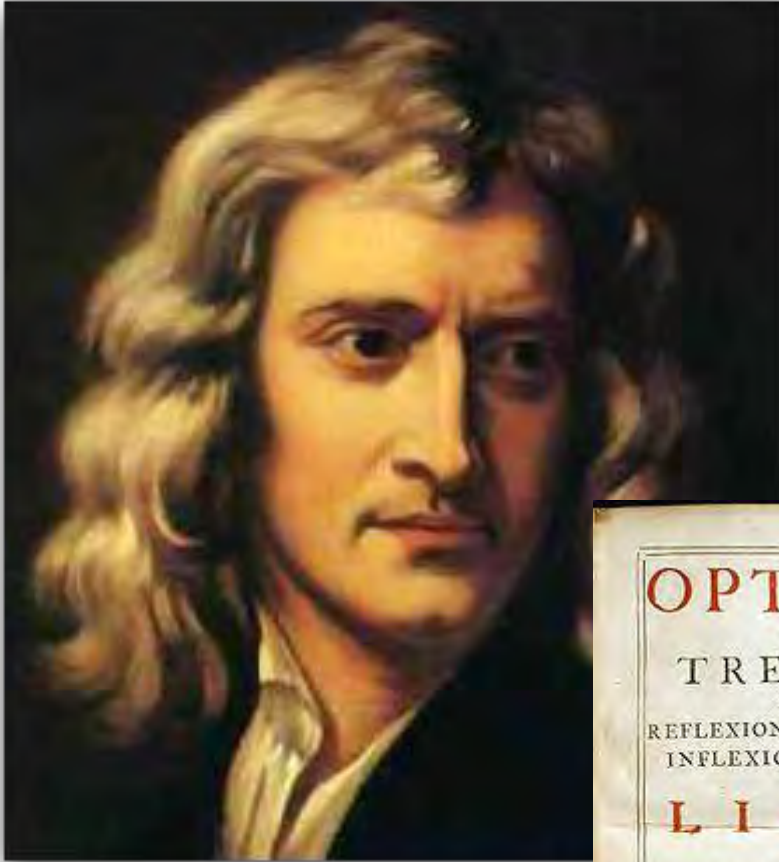
Istnieją cztery kolory  
podstawowe: ogień (R),  
ziemia (G), woda (B) i  
powietrze (Y)

# James Clerk Maxwell

- Każde widzenie jest widzeniem barwnym
- Jedynie na podstawie obserwacji różnic w kolorach możemy rozróżniać kształt przedmiotów. W różnice koloru włączam różnice jasności lub cienia.



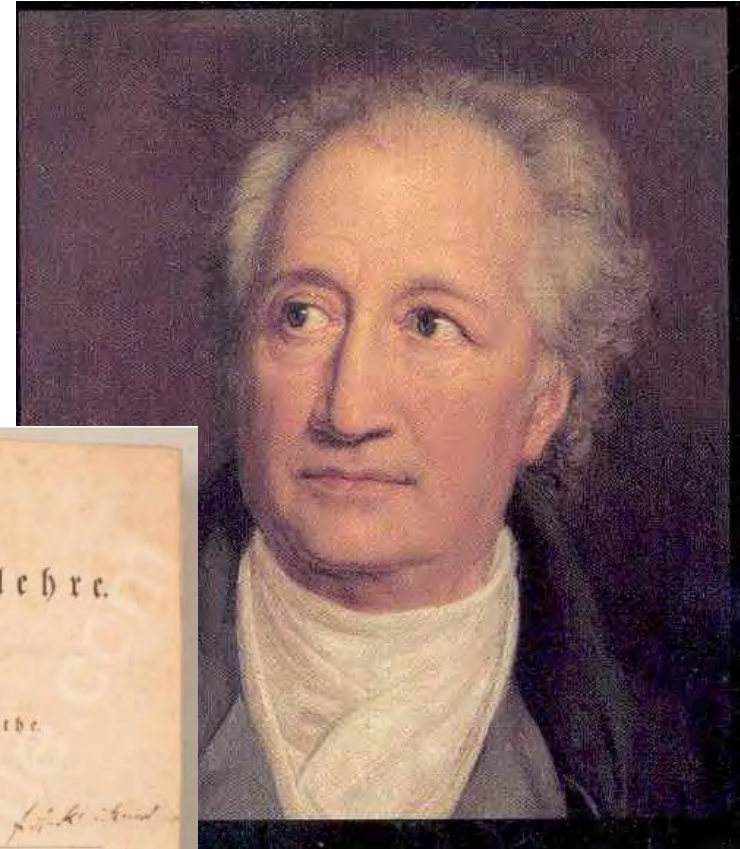
# Isaac Newton



- Promienie nie są kolorowe
  - Które części zjawiska koloru należą do zewnętrznego świata?
  - Które części wynikają z procesu sensorycznego?
  - Jaką rolę pełni w tym zjawisku proces nerwowy i kognitywny?

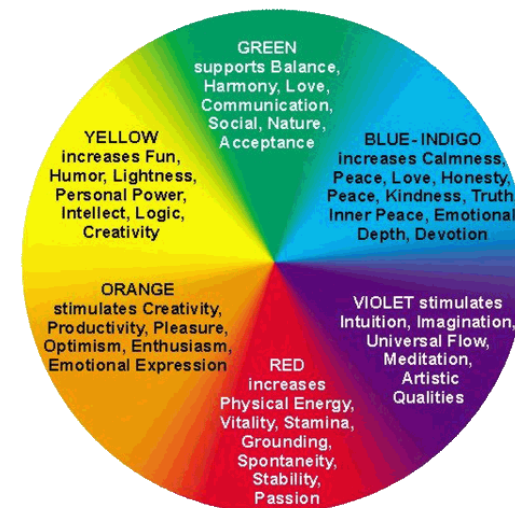
# Wolfgang Goethe

- Na kolor należy patrzeć jako na wielkość subiektywną tworzoną przez światło i ciemność



Właściwości światła	Newton (1704)	Goethe (1810)
Jednorodność	Białe światło jest złożone z różnych kolorów	Światło jest najprostszą niepodzielną i jednorodną rzeczą
Ciemność	Ciemność jest brakiem światła	Ciemność jest przeciwieństwem światła wchodzącym z nim w interakcje
Widmo	Światło jest rozkładane na kolory ze względu na podatność na załamanie	Kolorowe brzegi powstają na granicy światła i ciemności poprzez ich nakładanie się
Pryzmat	Pryzmat jest niezależny od istnienia kolorów	Jako ośrodek mętny pryzmat pełni rolę w powstawaniu kolorów
Znaczenie refrakcji	Światło rozkłada się poprzez załamanie, ugięcie i odbicie	Załamanie, ugięcie i odbicie mogą istnieć bez pojawienia się kolorów

Właściwości światła	Newton (1704)	Goethe (1810)
Rozkład	Światło rozkłada się na 7 barw podstawowych.	Są tylko 2 czyste kolory – niebieski i żółty. Pozostałe są stopniami tych dwóch
Połączenie	Tak jak światło może być rozłożone, może być także złączone	Kolory łączą się dając różne stopnie szarości
Cząstki czy fale?	Cząstki	Żadne – kolory są wrażeniami i nie mogą być określone w takim sensie.
Koło barwne	Asymetryczne – 7 barw	Symetryczne – 6 barw



# Thomas Young



- Wrażenie różnych kolorów zależy od różnych częstości drgań wzbudzonych w siatkówce.
- Są trzy rodzaje receptorów w siatkówce, każdy wzbudzany przez inną długość fali z newtonowskiego widma i każdy związany z jednym z 3 kolorów podstawowych.



# Herman von Helmholtz



- W oczach występują 3 rodzaje włókien nerwowych. Stymulacja pierwszego wzbudza wrażenie czerwieni, drugiego – wrażenie zieleni, zaś trzeciego wrażenie fioletu.
- Sensem hipotezy Younga jest to, że wrażenie koloru może być wyobrażone jako złożone z 3 całkowicie niezależnych procesów nerwowych.

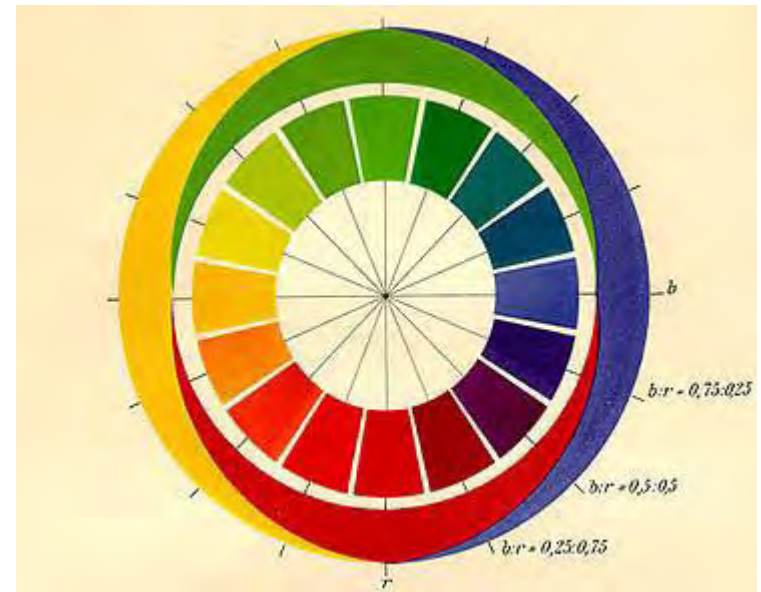
# Ewald Hering

- Widzenie barwne nie jest oparte na 3 podstawowych wrażeniach, lecz na czterech chromatycznych i dwóch achromatycznych elementarnych czy też unikalnych wrażeniach kolorów i towarzyszącym im procesach fizjologicznych.
- Czysty niebieski odpowiada długości fali 470 nm, zielony 500 nm, żółty 575 nm, zaś czysty czerwony jest mieszaniną czerwonego i niebieskiego z komplementarną długością fali ok. 495 nm.
- Kolor żółty może zostać wyznaczony z niezwykłą precyzją (choć wartość ta różni się między poszczególnymi osobami w zakresie 565-590 nm)



# Ewald Hering

- Czysta czerwień jest związana z rozbiciem lub wyczerpaniem szczególnej „substancji wzrokowej”, zaś czysty zielony z jej odbudowanie lub uzupełnieniem.
- Podobnie z czystym żółtym i niebieskim oraz z czarnym i białym.
- „Substancja wzrokowa” to nie ftopigment ale coś bardziej ogólnego w kontekście wzrokowej ścieżki nerwowej



# Erwin Schrödinger



- Teoria 3 barw podstawowych może być poprawna na poziomie fotoreceptorów w siatkówce
- Reakcja tych fotoreceptorów na światło może być przekształcona w czterobarwny sygnał kodujący później w systemie wzrokowym

# Edwin Land

- Nie potrzebujemy 3 kolorów aby stworzyć pełną paletę barw. Wystarczą 2 kolory i światło białe
- Jednoczesny kontrast barwny i stałość kolorów
- Teoria RETINEX (retina+cortex)
  - Odbierany kolor zależy nie tylko od widma światła ale także od otoczenia
  - Względne właściwości odbiciowe powierzchni są ważniejsze w tym kontekście niż bezwzględne



# Nerwowa reprezentacja koloru

Jeśli komórka nerwowa zwiększa liczbę impulsów na skutek światła czerwonego to

- Komórka jest (przez sygnał wejściowy z poprzedzających neuronów) wzbudzana przez promieniowanie elektromagnetyczne z końca widma odpowiadającego dużym długościom fal

czy też

- Komórka odpowiada na czerwony kolor, tj. istnieje korelacja między odbieraną jakością i odpowiedzią komórki, niezależna od widma spektralnego bodźca

# Nerwowa reprezentacja koloru

- Komórki nerwowe w siatkówce i LGN (ciała kolankowatym bocznym) wykazują raczej pierwszy z tych mechanizmów
- Komórki w obszarze V4 kory wzrokowej odpowiadają jednakże na kolor a nie długość fali bodźca.
- Niemniej procesy stojące za jakością kolorów (np. czerwonością czerwieni) są enigmatyczne.
- Można badać aktywność mózgu (PET, fMRI) lecz nie da to odpowiedzi na pytanie o nasze świadome doświadczenie jakości takich jak kolory.

# Francis Crick

Problem „qualii” - na przykład jak wyjaśnić czerwoność czerwieni... to bardzo trudne zadanie... Problem wypływa z faktu, że czerwoność czerwieni którą odbieramy tak wyraźnie nie może być precyzyjnie przekazana innemu człowiekowi...

To nie znaczy, że w pełni czasu nie jest możliwe wyjaśnienie parametrów nerwowych swojego widzenia czerwieni. Innymi słowy możesz powiedzieć, że widzisz czerwień jeśli i tylko jeśli odpowiednie neurony (i/lub cząsteczki) w twojej głowie zachowują się w odpowiedni sposób.





# David J. Chalmers

Ten, kto jest zainteresowany jedynie funkcjonowaniem mózgu spotyka się z łatwym i rozwiązalnym problemem. Jednakże pozostaje



Rzeczywisty problem, mianowicie ten o świadome doświadczenie.

# Czym więc jest kolor?

- Pomiedzy dwoma skrajnymi podejściami Cricka i Chalmersa można stwierdzić, że kolor „zajmuje miejsce” czegoś więcej niż reakcji fizjologicznej na fizyczny bodziec skutkującej percepcją.
- Kolor obejmuje oba poglądy, jest czymś pomiędzy zjawiskami natury zewnętrznej i subiektywnością natury wewnętrznej. W dodatku jest zjawiskiem, które ma własne zasady rządzone przez naturalne prawa (jak stałość koloru, mieszanie barw itp.)

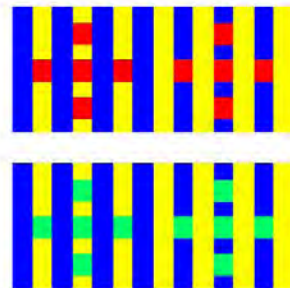
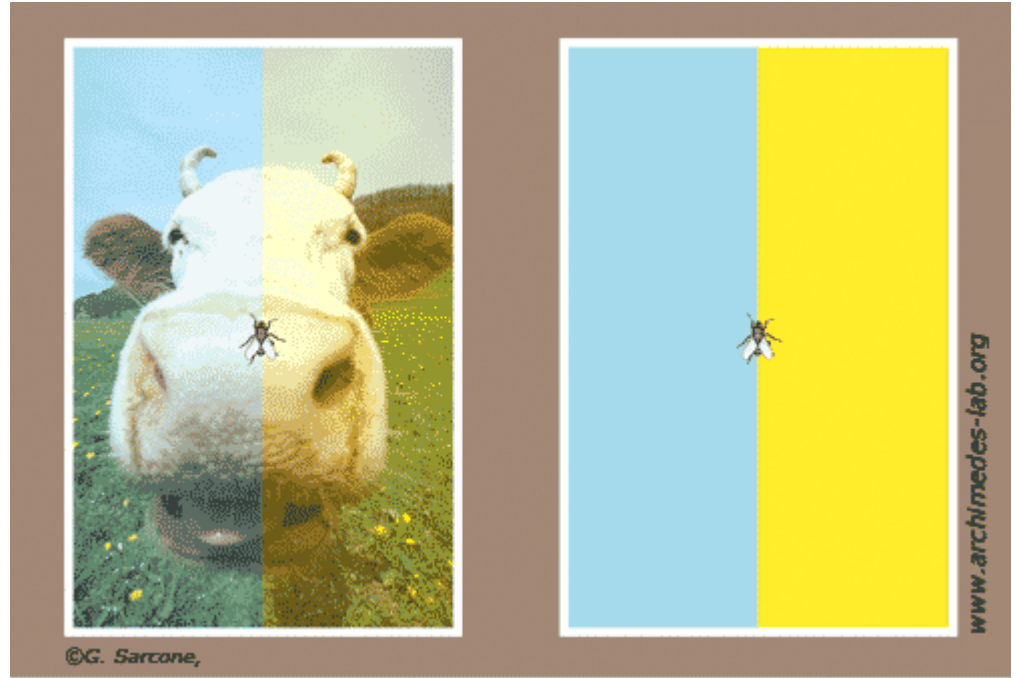
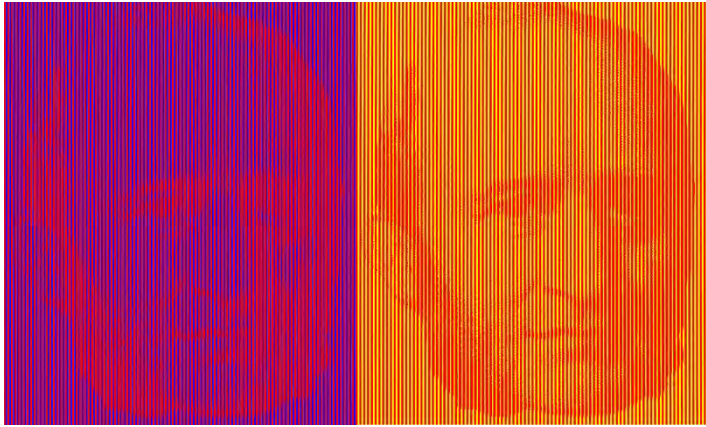
# Co wymaga wyjaśnienia?

- Bodźce metametryczne z różnymi rozkładami widmowymi wyglądają tak samo (mają ten sam kolor)
- Światła monochromatyczne o różnych długościach fali mają różne kolory i ta różnica nie może zostać wyeliminowana przez dostrojenie jasności
- Trzy kolory wystarczą do dopasowania wszystkich innych kolorów w addytywnym mieszanii barw
- Niektórzy ludzie nie są w stanie odróżnić czerwieni od zieleni, a inni mylą żółty z niebieskim

# Zjawiska i efekty

- Zjawisko Bezolda-Brücke'a
- Efekt Abneya
- Adaptacja barwna
- Jednoczesny kontrast barwny
- Stałość koloru i odchylenia od niej
- Percepcja bieli i czerni
- Granice i kontrast powierzchni (pasma Macha, zjawisko Heringa)

# przerwa



# Widzenie monochromatyczne

- 0,003% populacji posiada w siatkówce jedynie pręciki i rodopsynę jako jedyny fotopigment
- Osoby dotknięte takim schorzeniem mogą rozróżniać obiekty jasne od ciemnych ale nie widzą barw
- Widzenie nocne jest takie samo jak u osób zdrowych (choć brak widzenia barwnego może wywoływać pewne zmiany adaptacyjne w mózgu)

# Widzenie monochromatyczne

- Innym rodzajem widzenia monochromatycznego jest posiadanie pręcików i tylko jednego rodzaju czopków
- Teoretycznie możliwe jest w takim przypadku resztkowe widzenie barwne (pręciki x czopki), lecz aby tak się stało w ścieżkach nerwowych sygnał musi być prowadzony osobno i na wyższych poziomach porównywany ze sobą.

# Widzenie dichromatyczne (daltonizm)

- 8% mężczyzn i 0,5% kobiet posiada jeden rodzaj czopków L lub M (lub obydwa rodzaje lecz z tym samym ftopigmentem).
- 0,002% populacji nie posiada czopków typu S
- Brak czopków L nazywana jest protanopią, brak czopków M – deuteranopią, zaś brak czopków S – tritanopią
- Daltoniści mają zwężoną funkcję wrażliwości spektralnej  $V(\lambda)$ , lecz niezmienną rozdzielczość widzenia
- Dla daltonisty wystarczą dwie barwy podstawowe do realizacji dowolnej barwy poprzez mieszanie addytywne



# Genetyka daltonizmu

- Człowiek posiada w swoim genomie 23 pary chromosomów. 22 z nich mają w parze analogiczny zestaw genów. 23. para u kobiet jest także sparowana (chromosomy X) zaś u mężczyzn tworzą ją chromosomy X i Y.
- Gen kodujący S znajduje się w chromosomie 7, więc u każdego człowieka znajdują się 2 kopie
- Geny kodujące M i L są w chromosomie X

# Genetyka daltonizmu

- W przypadku różnych genów w chromosomach tworzących parę jeden (najczęściej poprawny) jest dominujący, a drugi recesywny-nieaktywny
- Dzieci mężczyzny-daltonisty ( $X^*Y$ ) i zdrowej kobiety ( $X_1X_2$ ):
  - $X^*X_1, X^*X_2, X_1Y, X_2Y$  – wszyscy zdrowi, córki z genem recesywnym daltonizmu
- Dzieci zdrowego mężczyzny ( $X_1Y$ ) i kobiety z recesywnym daltonizmem ( $X_2X^*$ ):
  - $X^*X_1, X_1X_2, X^*Y, X_2Y$  – 50%, że córka będzie z genem recesywnym daltonizmu, 50%, że syn będzie daltonistą

# Widzenie trójchromatyczne

- Potrzeba trzech kolorów podstawowych do stworzenia w drodze mieszania addytywnego dowolnej barwy
- Maksymalne czułości dla czopków 565 nm (L), 530 nm (M), 420 nm (S)
- Dopasowanie kolorów dokonane przez osobę widzącą trójchromatycznie (normalnie) będzie zgodne także dla daltonisty i monochromaty

# Mieszanie addytywne

- Wiele bodźców kolorów z różnymi widmami spektralnymi daje się zredukować jednego bodźca o tym samym kolorze. Istnienie tego typu „bodźców metametrycznych” wyjaśniane jest przez istnienie tylko 3 różnych rodzajów czopków.
- Kolorowe bodźce tworzą więc trójwymiarową przestrzeń wektorową w której widma spektralne skoncentrowane wokół obszarów o dużej (R), średniej (G) i małej (B) długości fali, czyli osie tworzą wzbudzenia poszczególnych czopków.
- Teoria trójreceptorowa Younga-Helmholtza

# Teoria trójreceptorowa Younga-Helmholtza

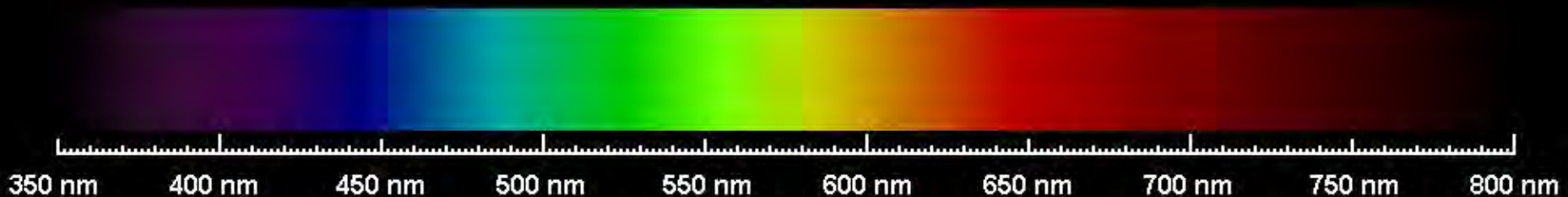
- Teoria ta ogranicza się do pierwszego poziomu przetwarzania wzrokowego, tj. wzbudzeń czopków w siatkówce i stosuje się do zjawisk związanych z addytywnym mieszaniem barw opartych na podstawie równości (np. dopasowania kolorów)
- Nie jest to pełna teoria widzenia w sensie wyjaśniania jakościowych właściwości koloru różnych bodźców. Nie jest możliwe wywnioskowanie widzianego koloru bodźca jedynie z poziomu wzbudzeń fotoreceptorów.

# Kolory bodźców

- Te same wielkości wzbudzeń trzech rodzajów czopków mogą dawać w rzeczywistości bardzo różne kolory w zależności od oświetlenia, otoczenia i zmian czasowych.
  - Adaptacja chromatyczna
  - Efekt Abneya
    - Jeśli dodamy białe światło do światła barwnego o dużej czystości (saturacji), odcień mieszaniny zmieni się
  - Zjawisko Bezolda-Brücke'a
    - Kiedy luminancja światła chromatycznego w dołku środkowym zwiększa się od zera, najpierw nie jesteśmy w stanie zidentyfikować odcienia, potem zaś widziany odcień stale się przesuwa ku zieleni.

# Problem z teorią Younga-Helmholtza

- Maksymalna czułość czopków L przypada na długość fali 565 nm
- Maksymalna czułość czopków M przypada na długość fali 540 nm
- W jaki sposób czysty żółty (R+G) jest widziany dla fali 575 nm?
- Jeśli przysuwamy barwne światło z dołka środkowego ku obszarom brzegowym pola widzenia percepcja czerwieni i zieleni jest tracona wcześniej niż percepcja żółtego i niebieskiego.

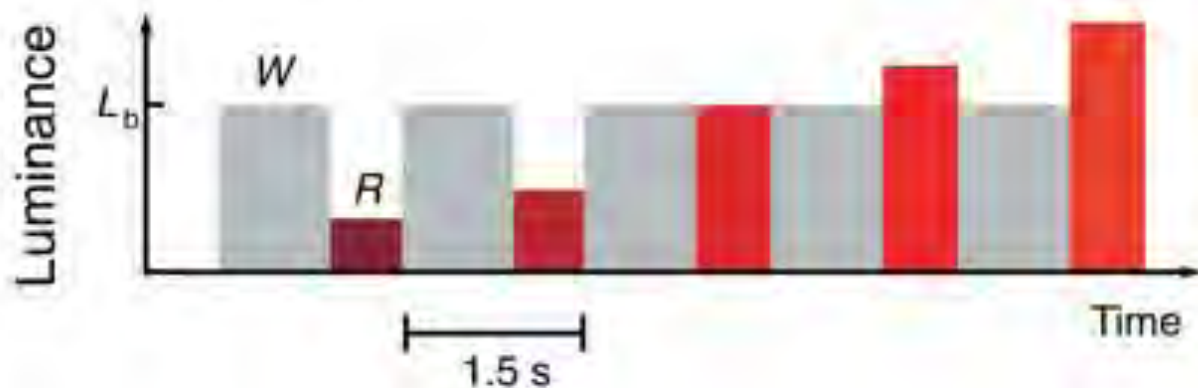
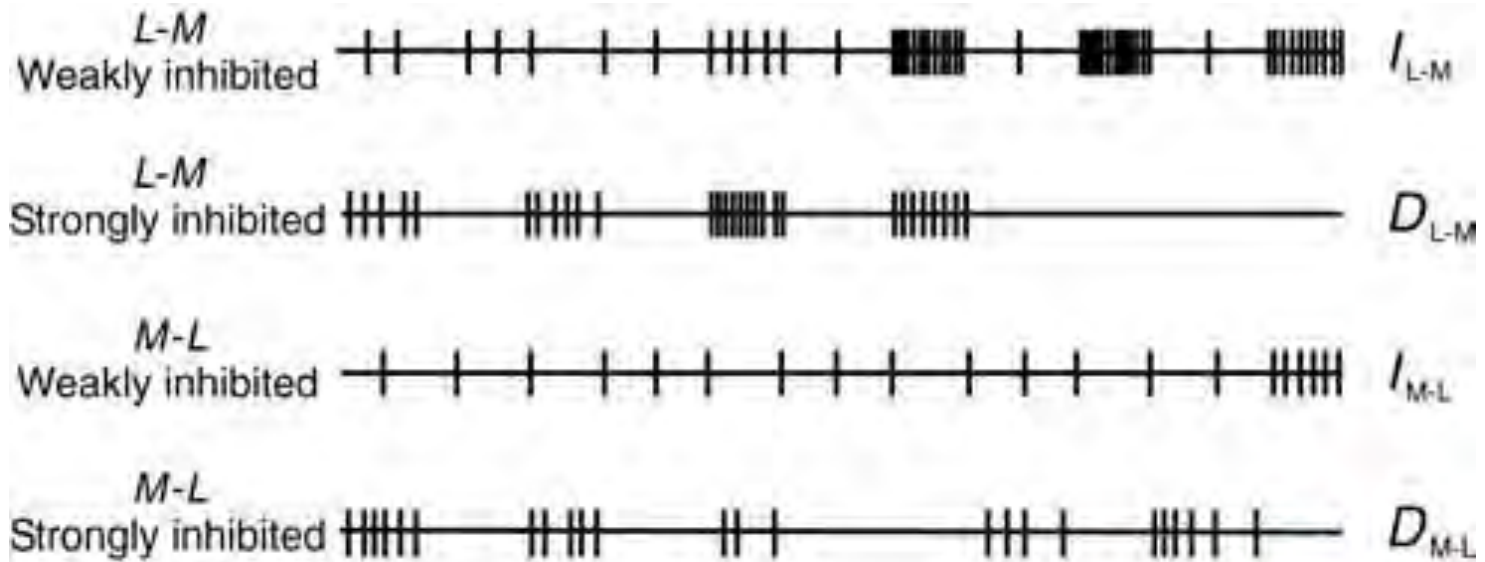


# Przeciwieństwa

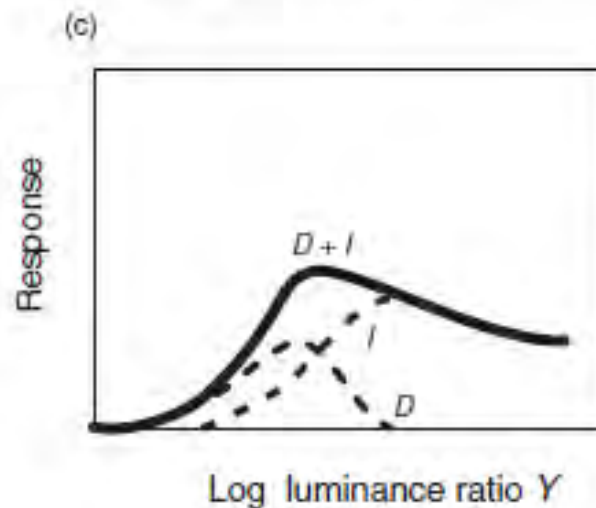
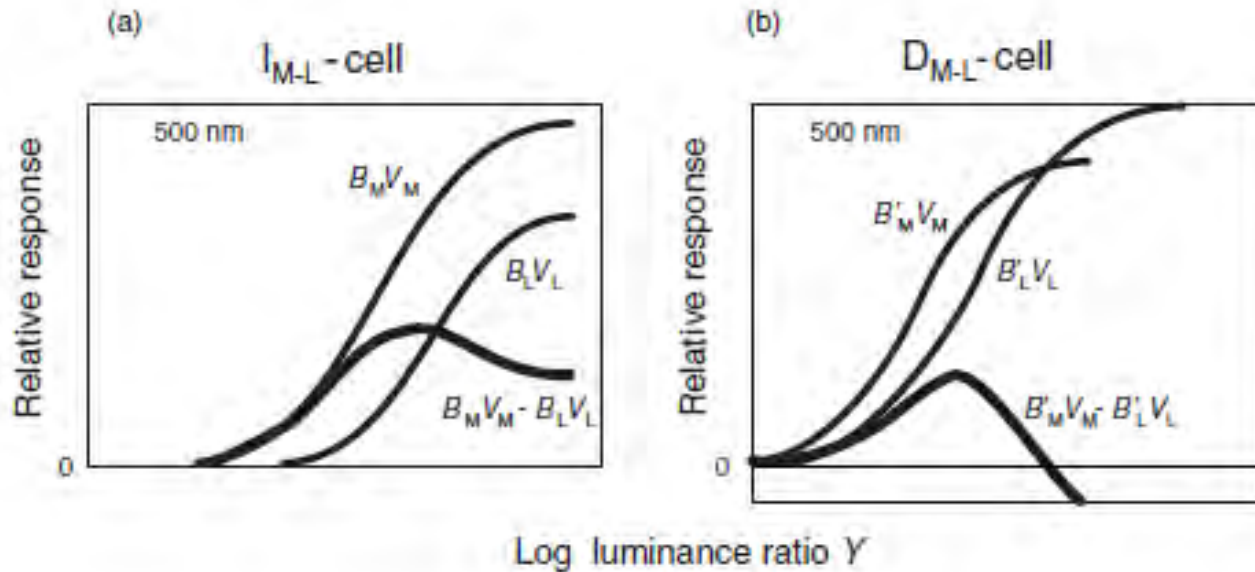
- Sygnały z czopków, ważne dla widzenia barwnego są przetwarzane przez różnicowe komórki zwojowe.
- W większości komórek nerwowych w siatkówce i LGN, różnicowanie sygnału z czopków jest najprościej odejmowaniem sygnałów z dwóch rodzajów czopków.
- Sygnał przekazywany dalej jest więc proporcjonalny do różnicy w wielkościach proporcjonalnych do wzbudzenia różnych czopków, z których jeden zwiększa sygnał, a drugi hamuje.
- Komórki zwojowe typu PC – reagują na różnice między czopkami M i L (w jedną lub drugą stronę, sygnałem rosnącym lub malejącym wraz z rosnącym natężeniem bodźca w polu receptywnym), zaś komórki KC reagują na różnice między czopkami S i pewną kombinacją sygnałów z czopków M i L.



# Przykład wzbudzeń komórek zwojowych



# Przykład wzbudzeń komórek nerwowych



# Odczuwanie temperatury

- Sygnał różnicowy z czopków może być porównany do temperatury
- Skala temperatury rozciąga się od „zimno” do „ciepło”, nie ma jednakże żadnego wyróżnionego punktu pomiędzy tymi skrajnościami
- Wystarczy włożyć jedną rękę do zimnej wody a drugą do gorącej, a następnie obie do letniej aby przekonać się, że poczucie ciepła jest względne.

# Wnioski

- Komórki D mają silniej reagują na sygnały hamujące z czopków niż komórki I
- Odpowiedź i wrażliwość na niskie luminancje (ciemne kolory) jest generalnie większa dla komórek D niż I
- Odpowiedź na stosunkowo duże luminancje (jasne kolory) są większe dla komórek I niż D
- Dla światła 649 nm odpowiedź  $I_{L-M}$  stale rośnie z rosnącym natężeniem (poza obszarem wrażliwości czopków M). Dla światła zielonego (np. 555 nm) odpowiedź komórki  $I_{L-M}$  jest prowadzana do zera przy stosunkowo niskich natężeniach.
- W LGN małp (makaków)
  - $I_{M-L}$  15%;  $D_{M-L}$  15%;  $I_{L-M}$  20-25%;  $D_{L-M}$  15 %;  $D_{S-L}$  10 %;  $I_{M-S}$  3-4%

# Johanes von Kries



*J. von Kries*

Jeśli biały papier wydaje nam się biały mimo barwy oświetlenia jest to konsekwencja wzbudzenia trzech rodzajów czopków które zostaje dopasowane (znormalizowane) to zastanego oświetlenia.

Wrażliwość i wzbudzenie czopków zostają zredukowane przez oświetlenie o czynnik proporcjonalny do wcześniejszego pobudzenia

Dla każdego rodzaju receptorów czynnik jest taki sam dla wszystkich długości fal, więc ich względna czułość spektralna się nie zmienia.

# Adaptacja

- W porównaniu do adaptacji do bieli równej energii, adaptacja do czerwonego światła o dużej długości fali zredukuje czułość czopków L mocniej niż M i S
- $L' = \alpha L$
- $M' = \gamma M$
- $S' = \beta S$
- $\alpha = 1/L_{o\acute{s}w}$  ;  $\gamma = 1/M_{o\acute{s}w}$  ;  $\beta = 1/S_{o\acute{s}w}$  zależą od wzbudzenia czopków w nowym oświetleniu dla idealnie białej rozpraszającej powierzchni – transformacja wyśrodkowania

# Adaptacja liniowa

- Według hipotezy von Kriesa biel jest zawsze dokładnie kompensowana w tym sensie, że przypadają jej zawsze te same poziomy wzbudzeń czopków
- Nie jest to zgodne z naszym doświadczeniem, gdyż zauważamy różnice np. w oświetleniu sztucznym (żarówka) a dziennym.
- Zakres stosowalności tej liniowej metody ogranicza się więc do niewielkich odchyień od stanu wcześniejszej adaptacji (uśrednianie luminancji i chrominancji widzianej sceny)

# Współczynnik oddawanie barw (CRI)

- CIE charakteryzuje oddawanie barw w warunkach oświetlenia danym źródłem światła jako pojedynczą liczbę nazywaną CRI
- Obliczanie CRI jest oparte na hipotezie von Kriesa i określa przesunięcia barwne, które pojawiają się, gdy oświetlenie zmienia się ze standardowego na testowane



Warm White  
3000k - 52 CRI

SPX 30  
3000k - 82 CRI

SPX 65  
6500k - 82 CRI

- Oświetleniem standardowym jest światło dzienne lub światło ciała doskonale czarnego o najbardziej zbliżonej temperaturze to testowanego
- Wartość 90-100 oznacza bardzo dobre odwzorowanie barw



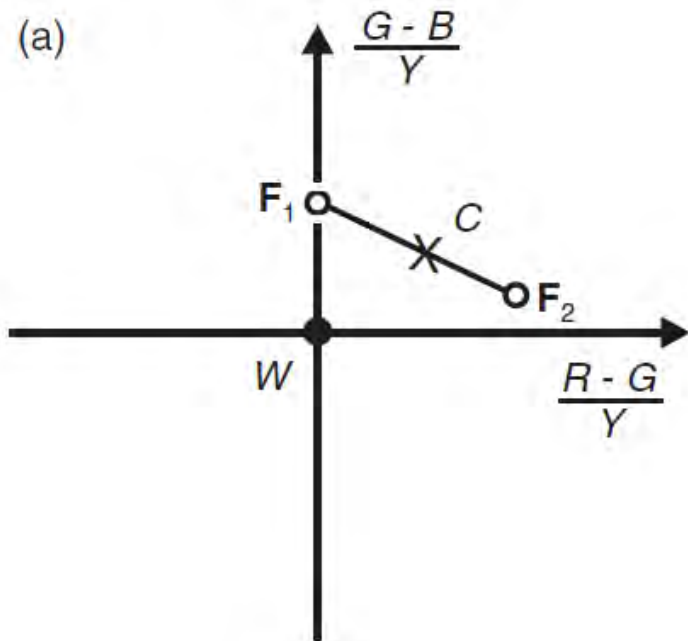
# Przykład

Wektor	R	G	B	Lum.	(R-G)/Lum.	(G-B)/Lum.	Kolor
W	1	1	1	2	0	0	Biały
F <sub>1</sub>	1	1	0	2	0	0,5	Żółty
F <sub>2</sub>	1,5	1,5	0,1	2	0,5	0,2	Czerwony
C	2,5	1,5	0,1	4	0,25	0,35	Pomarańczowy

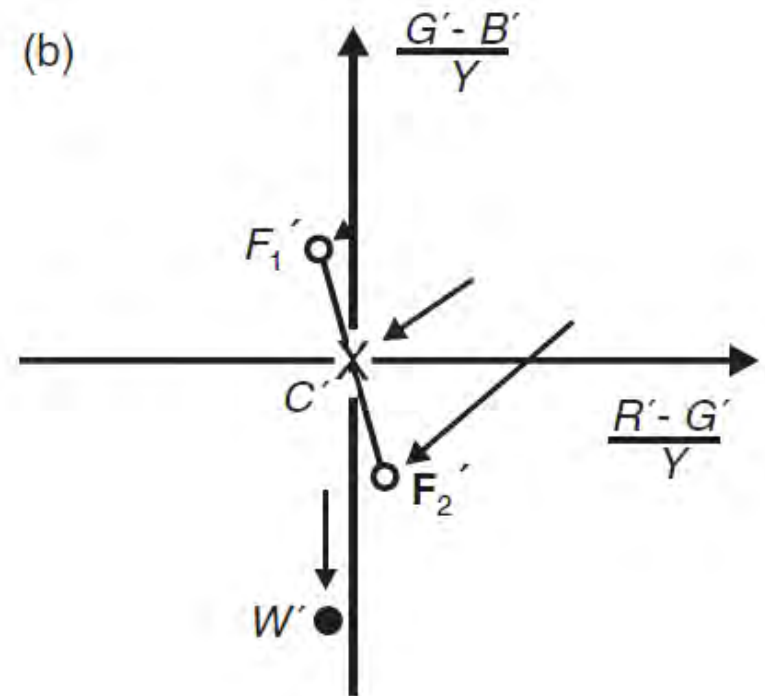
Wektor	R	G	B	Lum.	(R-G)/Lum.	(G-B)/Lum.	Kolor
W'	0,4	0,67	10	2	-0,14	-4,67	Niebieski
F <sub>1</sub> '	0,4	0,67	0	2	-0,14	0,34	Zielono-żółty
F <sub>2</sub> '	0,6	0,33	1	2	0,14	-0,34	Czerwono-nieb.
C'	1	1	1	2	0	0	Biały

# Przykład

(a)



(b)

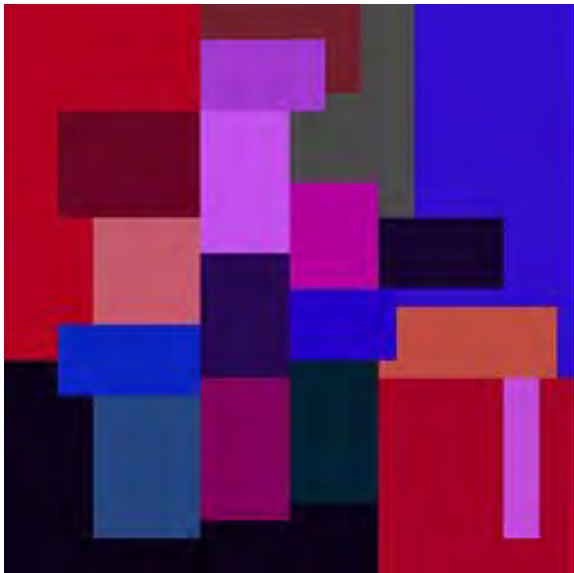


# Hipoteza retinex a adaptacja

- Wzbudzenia czopków są normalizowane do ich wartości dla białej powierzchni
- Powierzchnie o największej luminancji lub współczynniku odbicie wnoszą największy wkład w adaptację
- De facto jest to ten sam opis co w hipotezie von Kriesa i ma te same słabości

# Mondrian

- Land zmienił algorytm obliczania operacji wyśrodkowania zastępując wartości tróchromatyczne geometryczną sumą wzbudzeń czopków we wszystkich barwnych obszarach pola widzenia



- $\log L_1' = \log L_1 - (1/n)[\sum \log L_i]$

# Otwarte pytania

- Jak można najlepiej oddzielić fizyczne zmiany w bezpośrednim wzbudzeniu czopków od złożonych i pośrednich procesów takich jak indukcja?
- Nie powstała dotąd teoria adaptacji barwnej, która poprawnie opisywałaby wyniki badań psychofizycznych.

# Kontrast barwny a kontrast luminancji

