

Wykład 10

Wrażliwość na kontrast
i mechanizmy adaptacyjne

Kontrast

- Słowo „kontrast” ma wiele znaczeń.
 - Fizyczne różnice w luminancji i barwie
 - Percepcja (wrażenie) tych różnic
- Kontrast pełni kluczową rolę w procesie widzenia
 - Odróżnianie przedmiotów od tła, wykrywanie tekstury, koloru, ruchu, kształtu, głębi

Wrażliwość na kontrast





Wrażliwość na kontrast

Wrażliwość na kontrast



Wrażliwość na kontrast

- Są sytuacje w których ważniejsza od ostrości widzenia jest wrażliwość oka na kontrast
- Zdarza się, że normalnej rozdzielczości widzenia towarzyszy słaba wrażliwość na kontrast i odwrotnie
- O ile ostrość widzenia bada się za pomocą minimalnej wielkości optotypów możliwych do identyfikacji i rozpoznania, wrażliwość na kontrast jest dużo prostszym badaniem polegającym na wykryciu bodźca, którym najczęściej są prążki o określonej częstotliwości przestrzennej i kontraście

Wrażliwość na kontrast

- Wrażliwość na kontrast definiuje się, jako odwrotność progu wykrycia kontrastu, tj. minimalnej wykrywalnej różnicy ΔL w luminancji prążków ciemnych i jasnych.
- Wrażliwość na kontrast zależy od wartości bezwzględnej bodźca L , częstości przestrzennej (skali, wielkości przestrzennej) prążków oraz ew. zmian czasowych bodźca.
- Można mówić o kontraście luminancji, ale także o kontraście chromatycznym, w kontekście zdolności do wykrywania różnic w kolorach

Dobre warunki oświetlenia

- Wrażliwość na statyczne zmiany kontrastu prążków z ostrymi krawędziami jest największa dla przedmiotów o rozmiarze kątowym większym niż $0,2^\circ$. Rozmycie krawędzi sprawia że wrażliwość na kontrast dla obiektów większych spada.
- Wrażliwość na zmiany koloru tymczasem rośnie dla rosnących rozmiarów przedmiotów i nie wpływa na to nawet rozmycie krawędzi.

Pomiar wrażliwości na kontrast

- Ponieważ każdy sygnał optyczny (w tym siatkę prostokątną) można rozłożyć na szereg prążków o sinusoidalnych zmianach luminancji i różnych częstościach przestrzennych (analiza fourierowska) siatkę sinusoidalną uważa się za podstawowy bodziec badania wrażliwości na kontrast.
- Prążki o sinusoidalnym profilu luminancji tworzą na siatkówce obrazy także o profilu sinusoidalnym (o zmienionym kontraście i fazie).

Współczynnik Webera

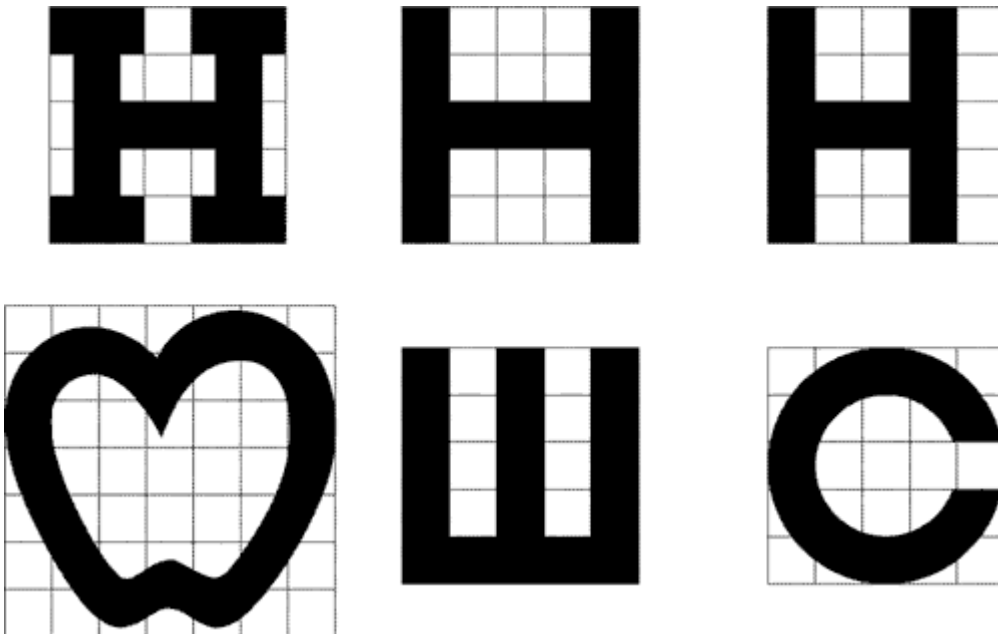
- W przypadku nieperiodycznego bodźca (np. optotypu) o luminancji L , obserwowanego na tle o luminancji L_b fizyczny kontrast określany jest często jako współczynnik Webera między obrazkiem a tłem:

$$\frac{(L - L_b)}{L_b} = \frac{\Delta L}{L_b}$$

- Współczynnik Webera może być zarówno dodatni (jasne litery na ciemnym tle) jak również ujemny (ciemne litery na jasnym tle)

Optotypy

- W przypadku tablicy z nadrukowanymi optotypami (powierzchnia idealnie rozpraszająca) współczynnik Webera można także odnieść do współczynników odbicia β



$$C_{Weber} = \frac{\beta - \beta_b}{\beta_b}$$

Bezwzględna wartość luminancji

- W przypadku definicji opartej na współczynniku odbicia współczynnik Webera nie zależy od natężenia oświetlenia.
- Fizyczny kontrast nie zależy od bezwzględnej wartości luminancji
- Jednakże nasza percepcja kontrastu jest różna w dzień i w nocy

Siatki sinusoidalne

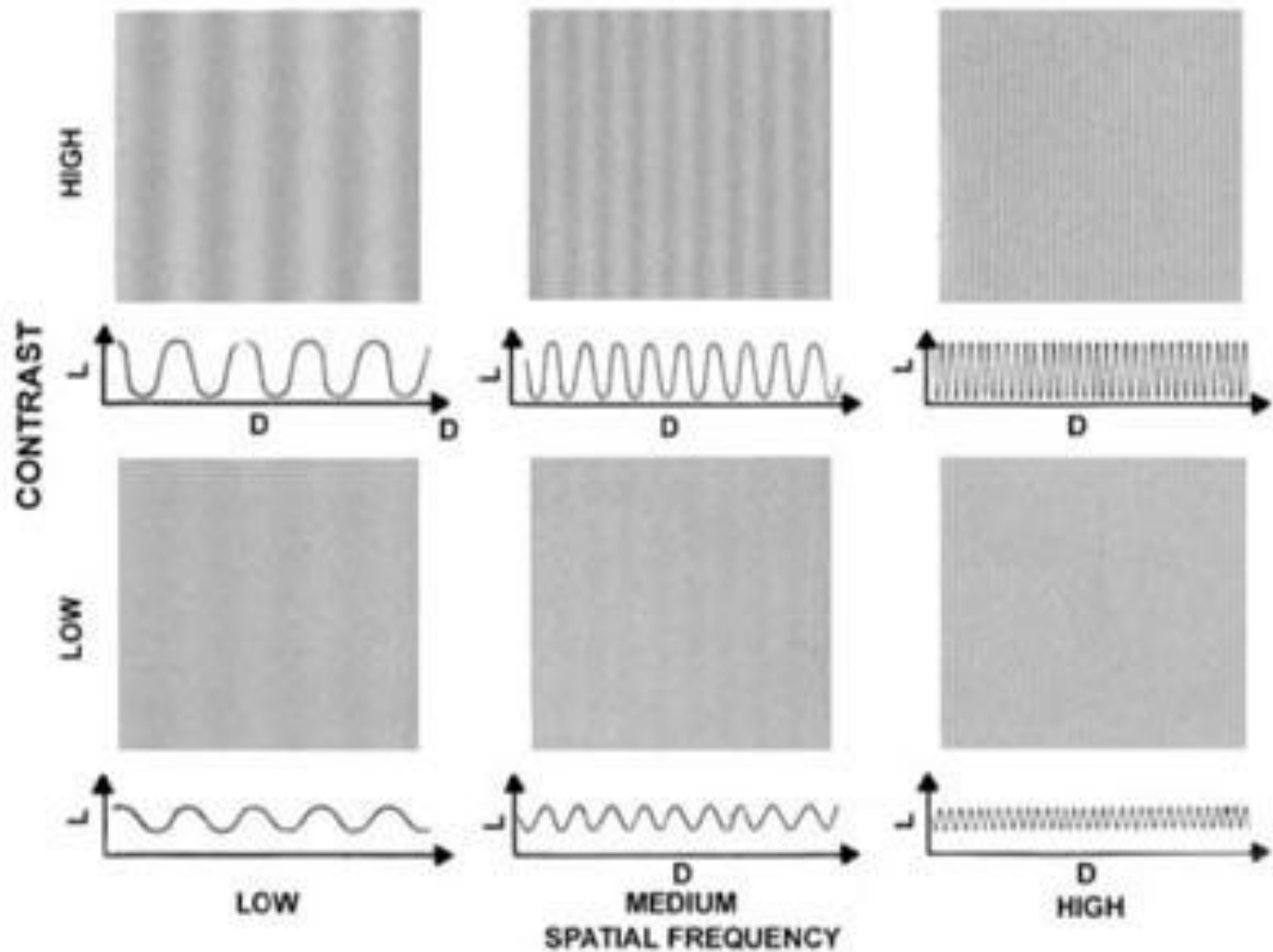
- Matematyczny opis luminancji siatki sinusoidalnej wyraża się wzdłuż osi x wzorem:

$$L(x) = L_m (1 + C_m \sin \omega x)$$

- gdzie L_m jest średnią luminancją siatki, zaś C_m jest kontrastem siatki według definicji Michelsona, tj.

$$C_m = \frac{L_{\max} - L_{\min}}{L_{\max} + L_{\min}} = \frac{L_{\max} - L_{\min}}{2L_m}$$

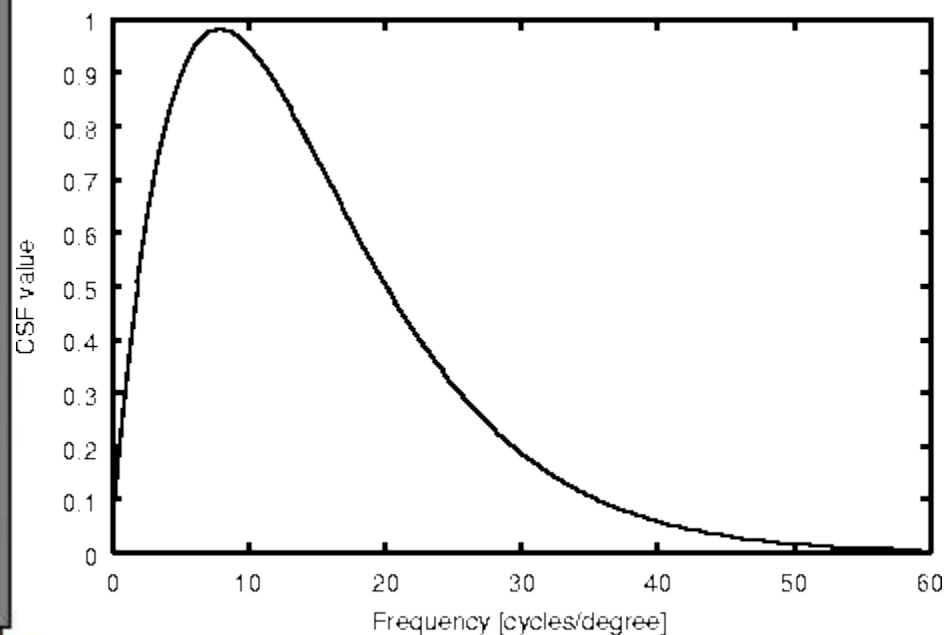
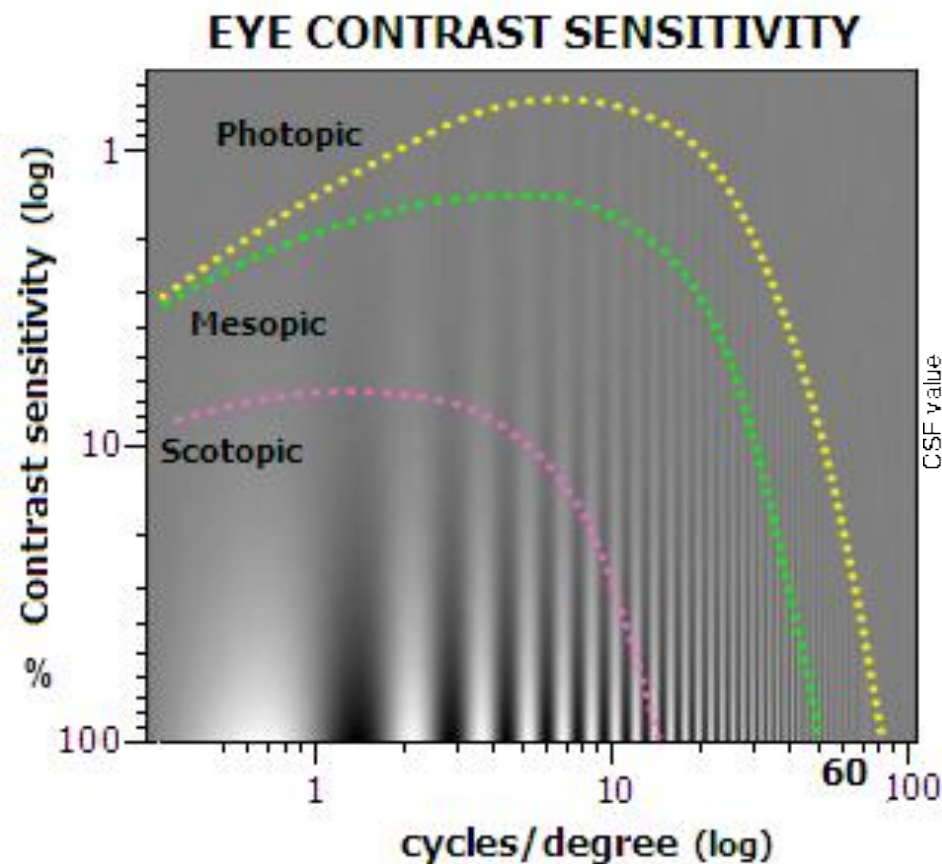
Siatki sinusoidalne



Wrażliwość na kontrast

- Wrażliwość na kontrast wskazuje która siatka jest już widoczna
- Odwrotność tego kontrastu progowego określona dla szeregu częstości przestrzennych tworzy krzywą wrażliwości na kontrast.
- Zazwyczaj krzywą taką prezentuje się w skali podwójnie logarytmicznej

Wrażliwość na kontrast

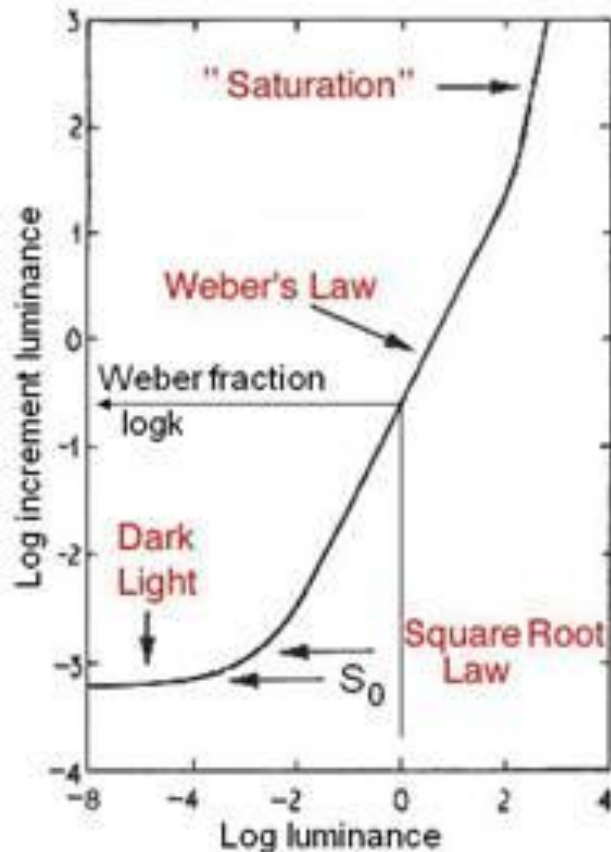


- Dla średniej luminancji 40 cd/m^2 maksymalna wrażliwość na kontrast występuje dla 3 prążków na stopień kąta (szerokość prążka 10 minut) i wynosi ona (wg definicji Michelsona) 0,3%

Całkowita wrażliwość na kontrast

- Jeśliby krzywą wrażliwości na kontrast wykreślić zmiennych liniowych, pole pod wykresem stanowi miarę wrażliwości na wszystkie hipotetyczne częstości przestrzenne (analogicznie do funkcji $V(\lambda)$ wskazującej na wrażliwość na wszystkie długości fal)
- Stanowi to miarę zawartości informacji przestrzennej przetwarzanej przez wzrok

Prawo Webera



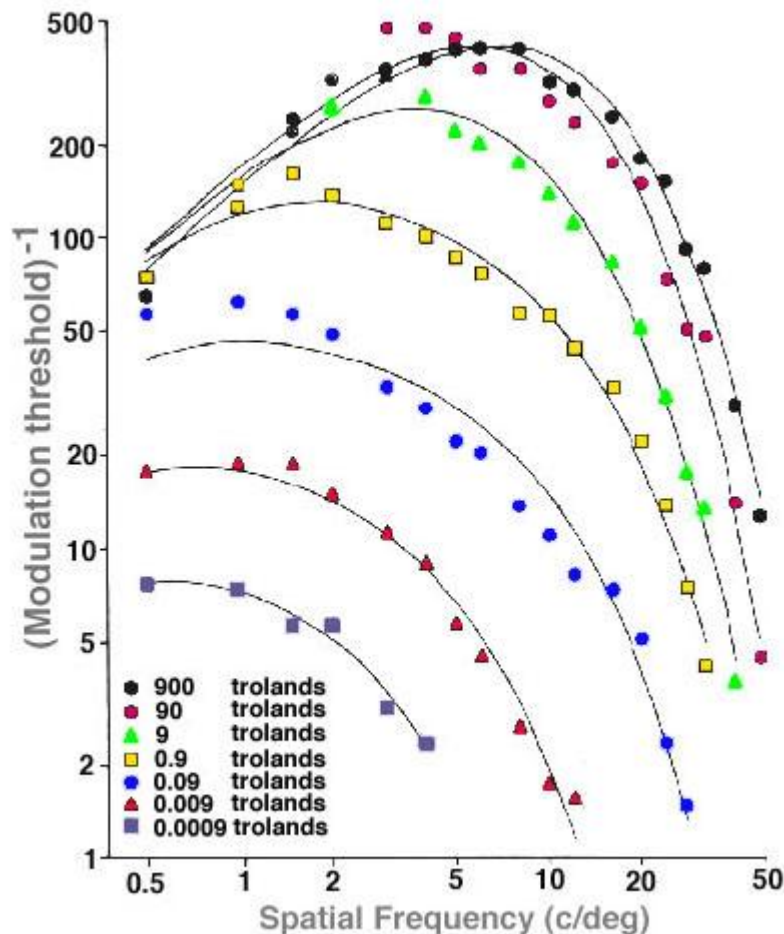
- Za wyjątkiem niskich częstości przestrzennych wrażliwość na kontrast rośnie z rosnącą luminancją bodźca.
- Prawo Webera mówi, że kontrast progowy wykrycia (współczynnik Webera) jest stały i niezależny od luminancji
- Prawo to obowiązuje dla luminancji z zakresu 50 – 10 000 cd/m^2 , zaś wartość współczynnika Webera wynosi ok. 2%

Wrażliwość na kontrast a wartość luminancji

- Maksymalna wrażliwość na kontrast zwykle przypada na częstotści między 3 a 5 prążków na stopień i w młodych oczach wynosi ok. 500 (0,2%).

Miejsce w którym krzywa przecina oś x przesuwają się w kierunku większych częstotliwości przestrzennych (węższych prążków) gdy rośnie luminancja bodźca. Rośnie więc wtedy także rozdzielczość widzenia.

Przy optymalnych warunkach oświetlenia (300 cd/m^2) krzywa przecina oś x dla 60 prążków na stopień co daje ostrość widzenia 2.0



Wzrok jako filtr częstości przestrzennych

- Dla widzenia dziennego kształt krzywych wrażliwości na kontrast sugeruje, że oko ma właściwości filtru przepuszczającego częstości przestrzenne z pewnego zakresu
- Dla widzenia nocnego wzrok zdaje się mieć charakterystykę filtra dolnoprzepustowego
- Charakterystyki te nie wynikają z optyki oka, lecz z procesów nerwowych

Kanały przestrzenne

- Badania psychofizyczne wskazują że kontrast zapisywany jest w co najmniej sześciu korowych kanałach częstości przestrzennych lub rodzajach komórek nerwowych z maksymalną wrażliwością wyśrodkowaną wokół sześciu różnych częstości przestrzennych
- Wrażliwość przestrzenna oka należy traktować jako obwiednie odpowiedzi tych komórek
- Możliwe także, że komórki te potrafią wzajemnie wygaszać swoje odpowiedzi

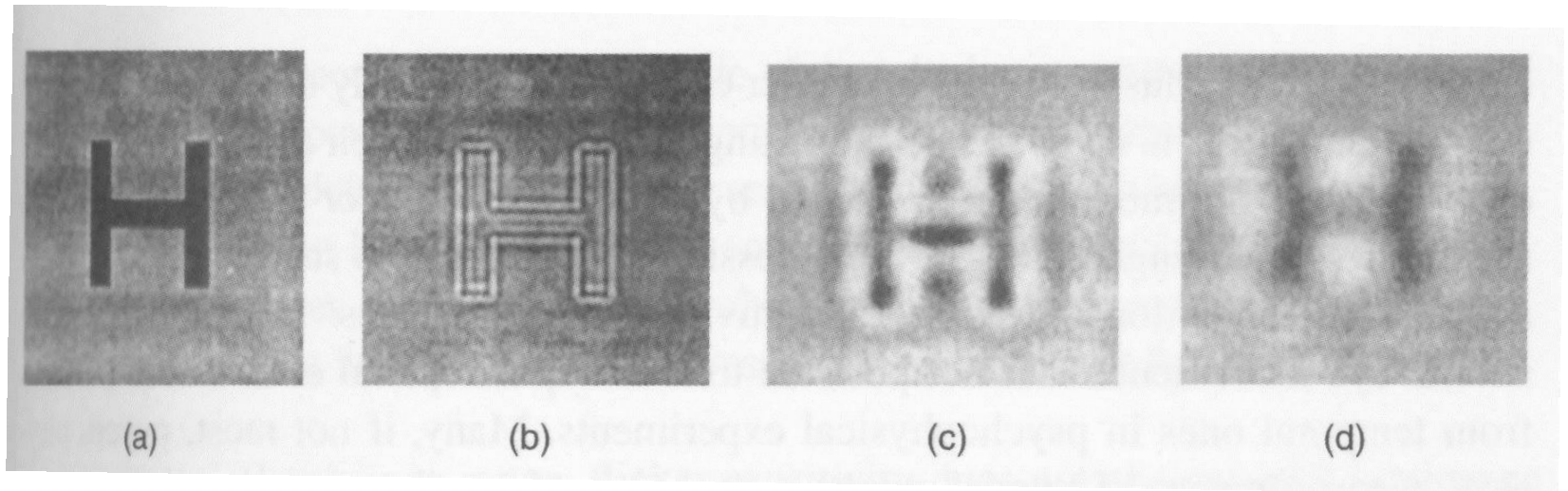
Kanały przestrzenne

- Oprócz podziału na komórki wykrywające różne zakresy częstości przestrzennych istnieje prawdopodobnie także podział na komórki wykrywające częstości przestrzenne w różnych kierunkach (np. w pionie i poziomie) – wydłużone pola receptywne

Problemy z widzeniem kontrastu

- Słabe widzenie w niskich częstościach
 - Słabe widzenie dużych obiektów
 - Problemu z poruszaniem się w nieznanym otoczeniu
- Słabe widzenie w średnich częstościach
 - Problemy z rozpoznawaniem twarzy
- Z wiekiem spada wrażliwość na kontrast jedynie w wysokich częstościach przestrzennych
- Dzieci mają zmniejszoną wrażliwość w całym zakresie częstości przestrzennych (w stosunku do dorosłych)

Filtracja przestrzenna



- Można przyjąć, że wzrok w pewnym stopniu poprawia jakość optyczną obrazu (np. przez wyostrowanie krawędzi)



Przerwa



Zależność od częstości czasowej

- Gdyby widziany świat nie był dynamiczny jego obraz przestałby być rejestrowany przez oko po kilku sekundach na skutek lokalnej adaptacji nerwowych ścieżek receptorowych
 - Ruchy sakkadyczne oka
 - Kompensacja rozmazania
 - Ruch przedmiotów w polu widzenia
- Aby oddzielić efekty czasowe od statycznych niezbędna jest farmakologiczna stabilizacja oka

Wrażliwość na migotanie

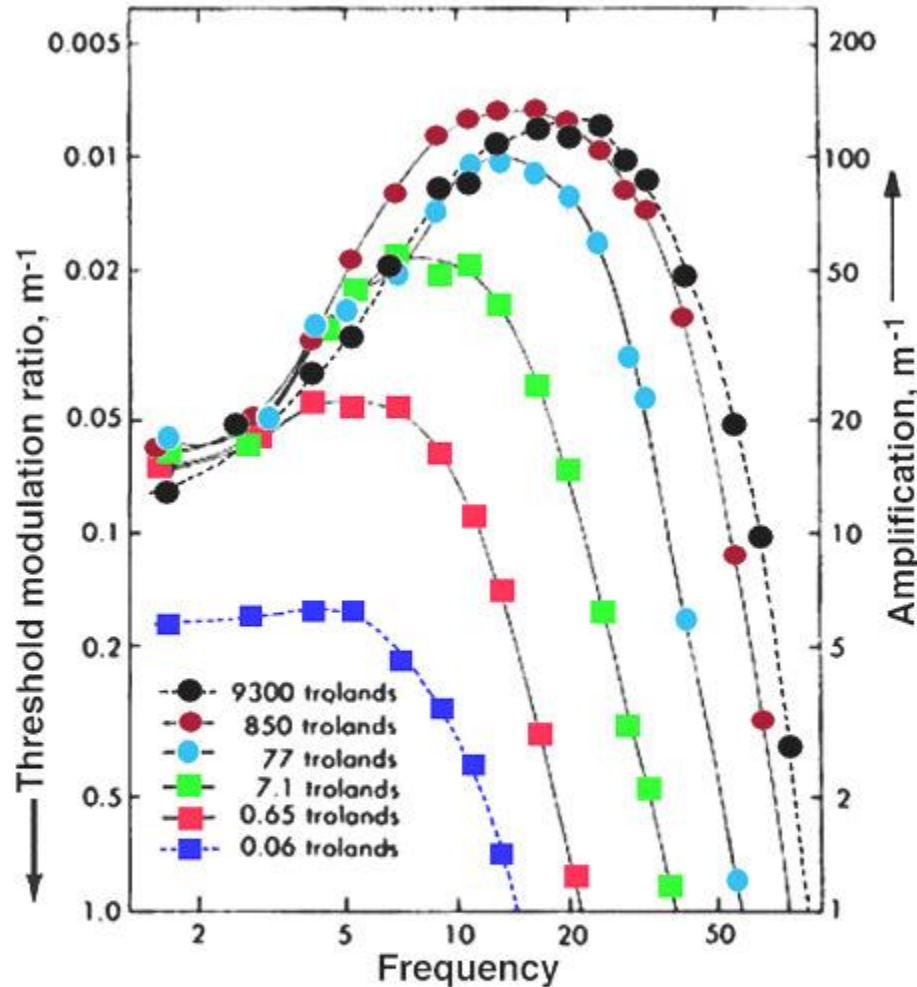


Fig. 11. Temporal Contrast Sensitivity Function (TSF) for various adapting fields. Kelly's data from Hart Jr, W. M., *The temporal responsiveness of vision*. In: Moses, R. A. and Hart, W. M. (ed) *Adler's Physiology of the eye, Clinical Application*. St. Louis: The C. V. Mosby Company, 1987.

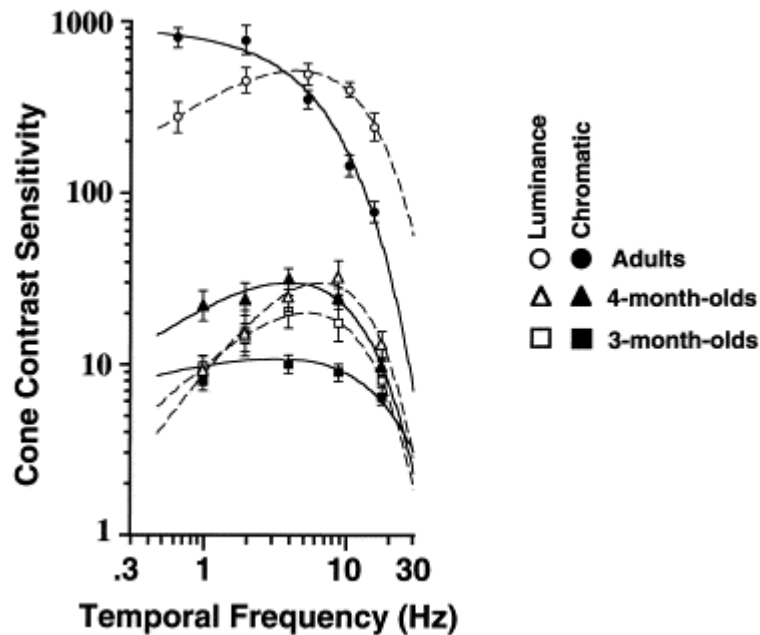
- Próg wykrycia kontrastu rośnie z luminancją do ok. 300 cd/m² gdzie czułość na migotanie jest na poziomie 10-20Hz
- Najwyższa częstość odbierana jako migocząca w optymalnych warunkach i przy maksymalnym kontraście wynosi ok. 80Hz
- Powyżej tej częstości migotanie nie jest wykrywane (graniczna częstość fuzji) (np. żarówka miga z częstością 100Hz co jest powyżej częstości fuzji)

Zmiany czasowe a adaptacja

- Przy widzeniu dziennym czułość na migotanie nie zmienia wraz z luminancją i prawo Webera obowiązuje
 - Jest wystarczająco dużo czasu do przeprowadzenia procesu adaptacyjnego
- Przy wysokich częstotliwościach prawo Webera przestaje być spełnione

Kontrasty chromatyczne

- System wzrokowy przetwarza kontrasty chromatyczne i kontrasty luminancji na oddzielnych ścieżkach nerwowych
- Rozmycie obrazu silnie zmniejsza czułość na kontrast luminancji, lecz czułość na kontrast chromatyczny nie ulega zmniejszeniu



- Dla obiektów o rozmiarach powyżej $0,5^\circ$ kontrast chromatyczny jest łatwiej dostrzegalny niż luminancyjny, nawet jeśli obraz jest rozmazany
- Łatwiej dostrzegalne są różnice między zielonym a czerwonym niż między żółtym a niebieskim
- Krzywa chromatyczna jednakże spada do zera wcześniej niż luminancyjna

Prawo Webera-Fechnera

- Prawo Webera:
 - Im jaśniejsze jest tło tym większa musi być różnica między nim a przedmiotem aby został on wykryty
 - Wartość współczynnika Webera zależy od wielkości obiektu i jego kształtu
 - Najmniejsza wartość współczynnika (największa czułość) jest dla obiektów powyżej $0,2-0,5^\circ$ o ostrych krawędziach.
 - W przypadku siatek sinusoidalnych czułość spada dla szerokich prążków
 - Dla mniejszych obiektów stałe jest raczej ΔL , a nie $\Delta L/L$

Prawo Webera-Fechnera

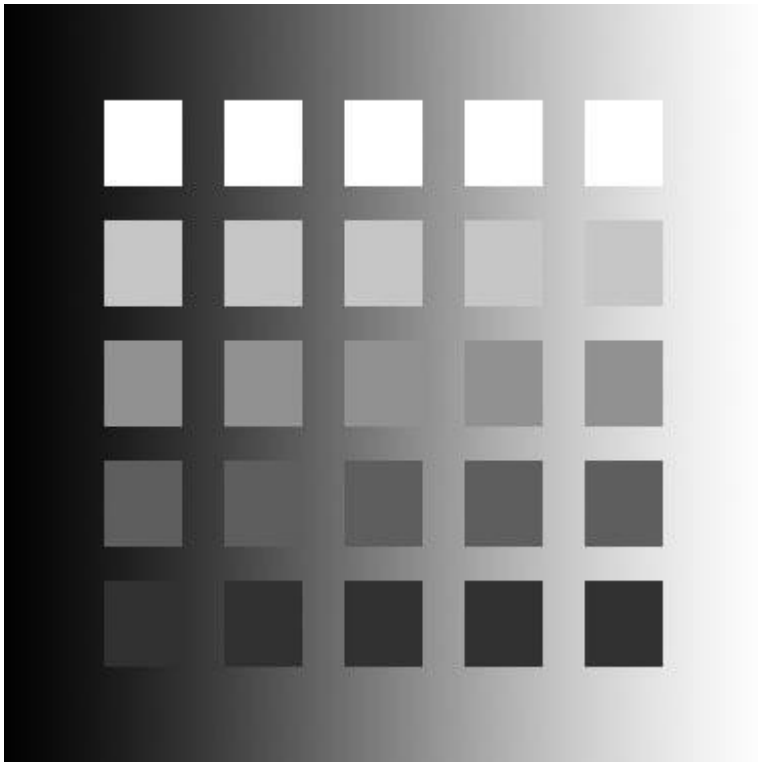
- Gustav Theodor Fechner stwierdził, że współczynnik Webera mógłby stać się ilościową miarą wrażenia jasności. Wprowadził tzw. wielkość sensoryczną bodźca odpowiadającą najmniejszej wykrywalnej zmianie kontrastu (prawo Webera-Fechnera):

$$\Delta r = c \frac{\Delta L}{L}$$

- Definiując więc R jako jasność i traktując r i L jako różniczki otrzymał równanie nazywane prawem Fechnera:

$$R = c \log_{10} \frac{L}{L_t}$$

Prawo Stevensa



- Skala szarości z 10 równymi stopniami od czerni do bieli na białym tle może zostać przybliżona jako prawo potęgowe:

$$V \sim 10\beta^{0,5}$$

zaś na szarym tle ($\beta=0,2$)
jako

$$V \sim 10\beta^{0,33}$$

- Stevens odkrył równanie potęgowe odpowiadające wielkość subiektywnej wrażenia w odniesieniu do wielkości fizycznej bodźca:

$$R \sim \text{const } I^n$$

Prawo Stevensa

- Dla wielkość progowych z prawa Stevensa wynika, że

$$\frac{\Delta r}{R} \sim n \frac{\Delta I}{I}$$

- Do współczynnika Webera nie jest proporcjonalna subiektywna różnica w jasności progowej lecz jej stosunek do wielkości sensorycznej
- Jeśli masz 100 zł i dostaniesz 10 zł to nie czujesz większy przyrost zamożności niż jeśli masz 1000 zł i dostaniesz 10 zł
- Prawo Webera-Fechnera i prawo Stevensa są podobne w przebiegu dla $n=0,3$ – wartości która została zmierzona w większości eksperymentów Stevensa

Adaptacja

- Siatkówka może dostosować się do bardzo różnych stopni oświetlenia i warunków świetlnych
 - Adaptacja (jako proces i jako efekt tego procesu)
 - Jasność i kontrast
 - Temperatura barwna
 - Ruch, głębia
- Zakres warunków oświetlenia funkcjonowania oka obejmuje 12 rzędów wielkości
 - Żrenica zmniejsza lub zwiększa oświetlenie siatkówki o jeden rząd wielkości

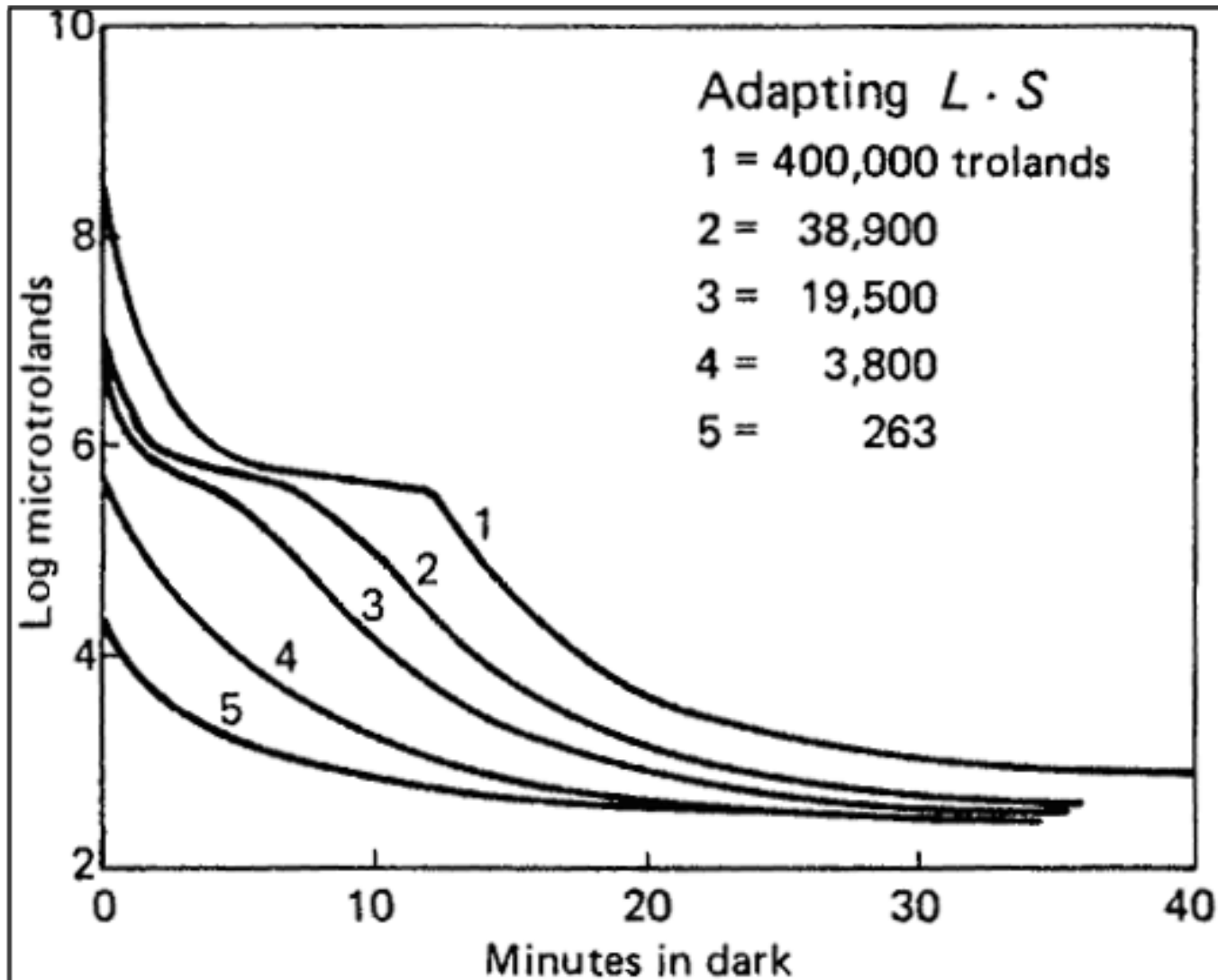
Adaptacja do ciemności, jasności i koloru

- Jeśli oko jest zaadaptowane do widzenia dziennego pełna adaptacja do ciemności (np. po wejściu ciemnego pomieszczenia) zajmuje nawet ponad godzinę
- Adaptacja do jasności zajmuje tylko kilka sekund
- System wzrokowy potrafi także kompensować i neutralizować zmiany chromatyczne w oświetleniu także widziany kolor jest względnie niezależny od rodzaju oświetlenia (np. żarówka lub słońce)

Adaptacja do ciemności

- Czas adaptacji do ciemności zależy od natężenia i okresu wcześniejszego stanu adaptacji
- Pozbawiony pręcików dołek środkowy ma ograniczone możliwości widzenia w ciemności, zaś jego adaptacja jest jednofazowa
- Pozostała część siatkówki przeprowadza proces adaptacyjny dwufazowo
 - szybkie zwiększanie czułości czopków
 - po osiągnięciu maksimum czułości czopków powolne zwiększanie czułości (oślepionych wcześniej) pręcików

Adaptacja do ciemności



Adaptacja do jasności

- Po nagłym zwiększeniu natężenia oświetlenia pręciki zostają oślepione i od razu zaczyna się zmniejszanie czułości czopków
- Stąd światło w pierwszej chwili razi nas mocno, lecz po kilku minutach wzrok adaptuje się do jasności
- Ponowna adaptacja do ciemności wymaga znów długiego okresu czasu.

Adaptacja a barwa światła

- W przypadku oświetlenia światłem o dużej długości fali (czerwonym) gałąź charakterystyki czułości oka odpowiadająca pręcikom nie istnieje (zakres czułości pręcików kończy się na ok. 630 nm)
- Różnica w czułości między pręcikami a czopkami zależy od stanu adaptacji do ciemności i jest nazywana interwałem fotochromatycznym
- Charakterystyka przy oświetleniu światłem białym jest zbliżona do monochromatycznego światła żółtego

Maksymalna czułość

- Maksymalna czułość oka występuje dla kątów widzenia między 10° a 20° od dołka środkowego
- Najmniejsze natężenie oświetlenia, które może być wykryte przez ludzkie oko (dla długości fali 507 nm) jest między $3,3$ a $6,6 \times 10^{-17}$ J mierząc na rogówce
- W tej długości fali jeden foton ma energię $3,92 \times 10^{-19}$ J. Rejestrowanych jest więc między 50 a 150 fotonów docierających do rogówki.
- 50% światła dociera do siatkówki, z czego 20% wzbudza fotoreceptory. Daje to 5-15 fotonów wzbudzających wrażenie wzrokowe.
- 5-15 pręcików rejestrujących jednocześnie po jednym fotonie wystarczy do zauważenia światła. To tak jakby widzieć światło świecy z 20-25 km.

Światło świecy z 20-25 km...



Adaptacja a widzenie kontrastu

- W praktyce bardziej użyteczne niż wyznaczanie progu czułości jest określenie wrażliwości na kontrast w danych warunkach oświetlenia.
- Przeprowadza się to np. jako pomiar najmniejszej wykrywalnej różnicy między bodźcem a tłem.
- Współczynnik Webera i prawo Webera



Zjawisko Purkinjego

- Krzywe czułości czopków i pręcików są przesunięte spektralnie
- Dwa światła o różnej barwie, które w dzień wydają nam się tak samo jasne po zmroku mogą różnić się jasnością.
- Na przykład niebieskawo-zielony kwiat, którym w dzień ma taką samą jasność jak czerwony kwiat, w nocy będzie dużo jaśniejszy



Krzywa natężenie-odpowiedź

- W detektorach liniowych wielkość bodźca jest proporcjonalna do odpowiedzi

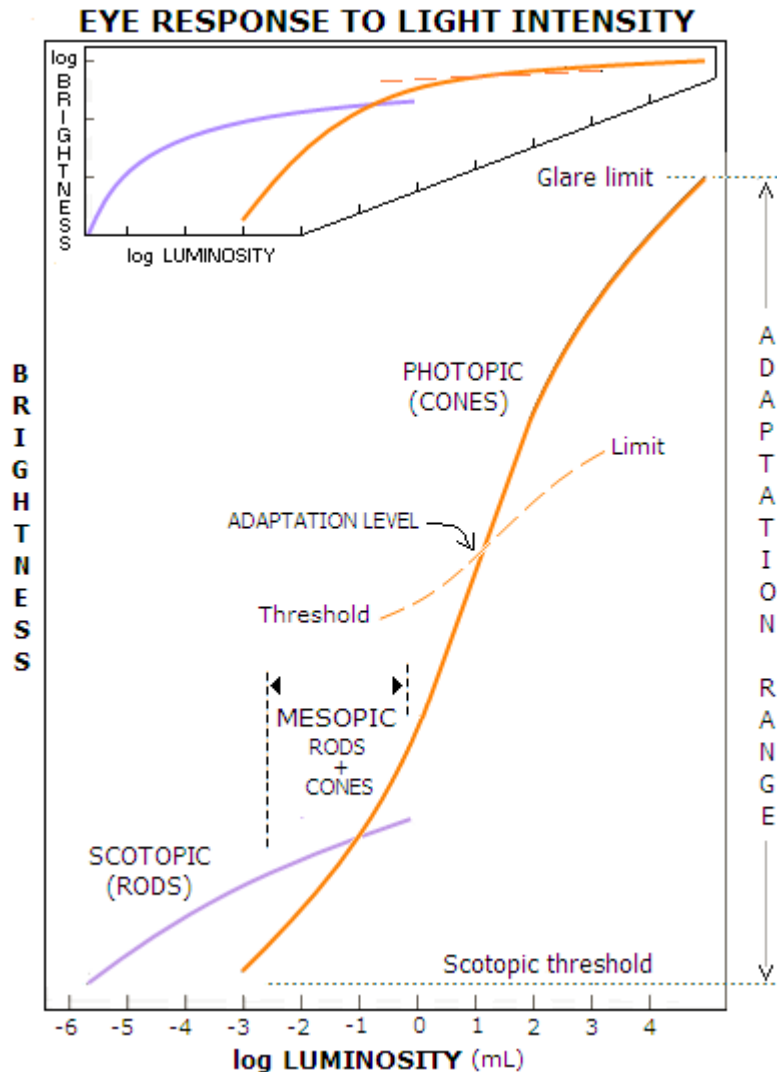
$$R = s \times I$$

- Wzbudzenie fotoreceptora wyniesie więc:

$$S = \int s_{\lambda} I_{\lambda} d\lambda$$

- W siatkówce absorpcja polaryzuje fotoreceptor wpływając na jego czułość (czas regeneracji).
Odpowiedź dla większych natężeń światła nie jest więc liniowa.

Krzywa natężenie-odpowiedź



- W przypadku detektorów nieliniowych użyteczne jest zdefiniowanie czułości różniczkowej lub przyrostu

$$S = \frac{dR}{dI}$$

- Zależność R od I w przypadku oka jest w dużym zakresie logarytmiczna
- Wykres odpowiedzi detektora w zależności od natężenia bodźca nosi nazwę krzywej I-R (intensity-response)

Zakres czułości

- Oko jest w stanie dostosować się do różnic w natężeniu światła obejmującym 12 rzędów (1 000 000 000 000) wielkości rozłożonych mniej więcej równo między czopki i pręciki
- Żrenica reguluje oświetlenie w zakresie jednej dekady
- Krzywa I-R dla czopków dla każdej długości fali obejmuje 2-3 dekady (100-1000)
- Komórki zwojowe mogą wytwarzać sygnał z prędkością 500-1000 impulsów na sekundę

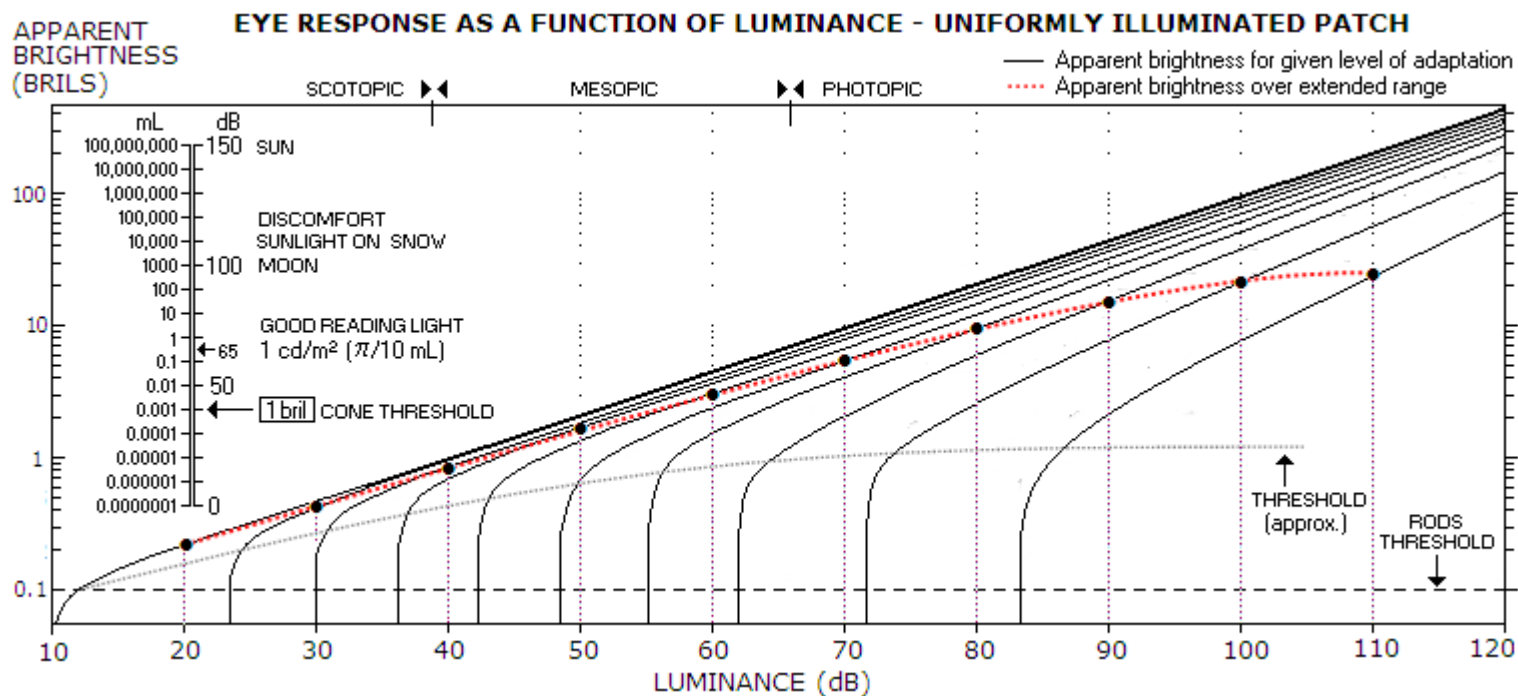
Mechanizm adaptacyjny

- Niezbędny jest (nie do końca poznany) mechanizm, który będzie przesuwiał pasmo czułości receptorów i komórek nerwowych w ten sposób aby były w stanie odpowiadać optymalnie na bodźce z zakresu luminancji adaptacji
- Luminancja adaptacji odpowiada średniemu punktowi krzywej I-R
- Jeśli natężenie oświetlenia się zmienia krzywa I-R przesuwa się, co oznacza, że scena ma to samo wrażenie jasności, lecz te same poziomy jasności odpowiadają innej luminancji
 - Adaptacja chromatyczna

Główne czynniki warunkujące czułość

- Adaptacja nerwowa
- Oślepienie fotopigmentu
- Przesunięcie w poziomie krzywej I-R
- Krzywa I-R obejmuje zawsze ok. jeden rząd wielkości zakresu natężenia światła
- Czułość na kontrast (progowa) rośnie wraz z rosnącym stopniem adaptacji do ok. 50 cd/m^2 poczym czułość ta jest stała (prawo Webera)

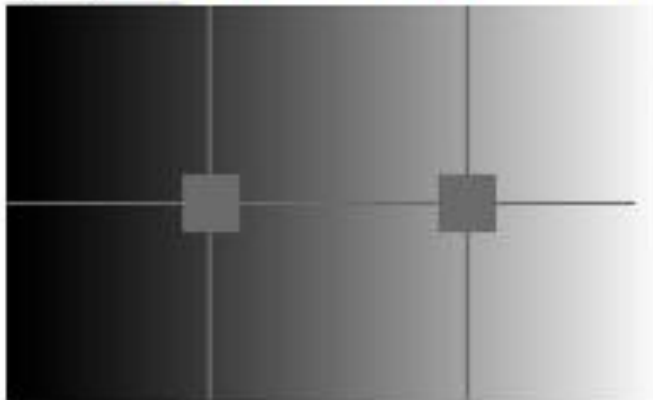
Krzywa I-R



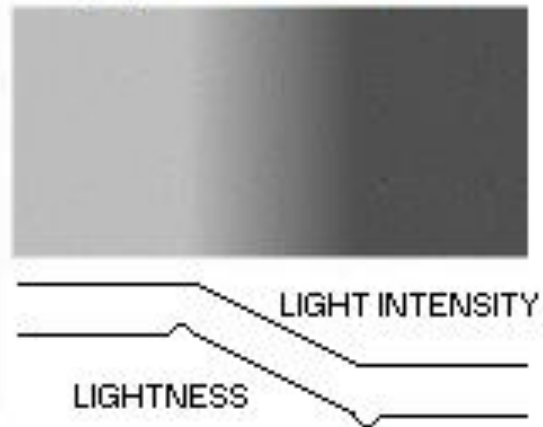
Stołość koloru i indukowany kontrast

LIGHTNESS VS. INTENSITY/BRIGHTNESS

(A) LIGHTNESS INDUCTION



(B) MATCH BENDS



(C) HERMAN GRID

