

1100-1BO15, rok akademicki 2019/20

# **OPTYKA GEOMETRYCZNA I INSTRUMENTALNA**

dr hab. Rafał Kasztelanic

Wykład 13

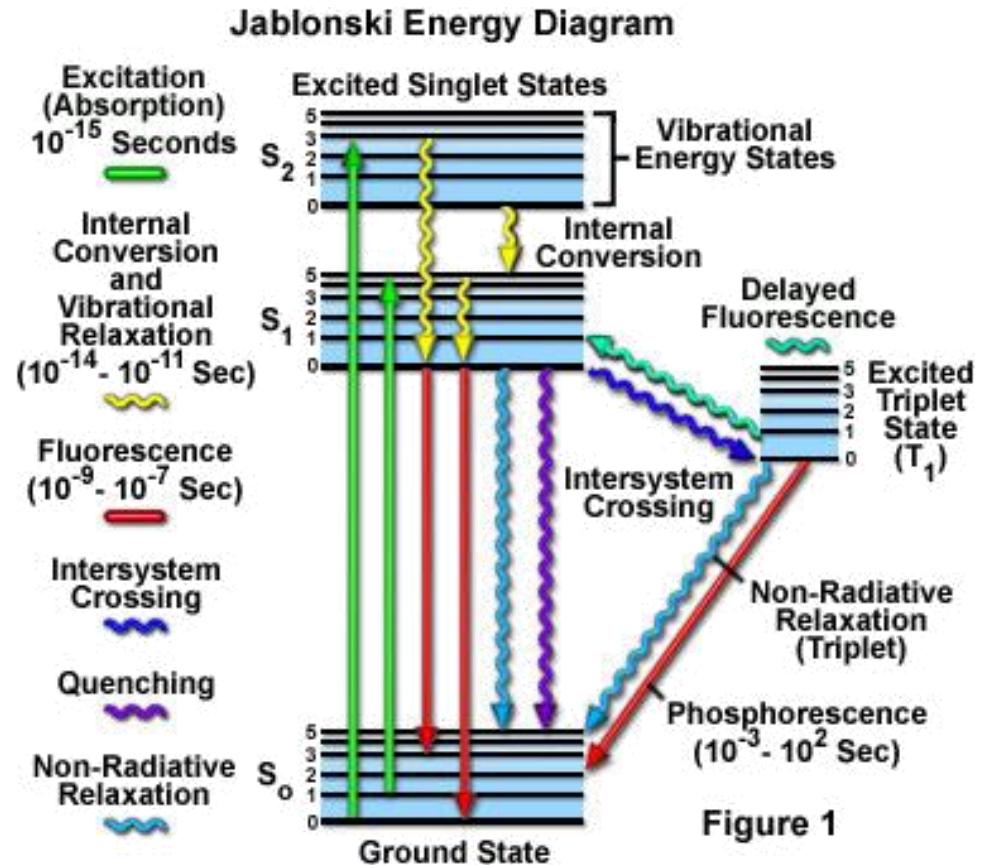
„Luminescencja to nadwyżka promieniowania ciała nad promieniowaniem temperaturowym tego samego ciała w danej części widmowej i w danej temperaturze, która ponadto charakteryzuje się skończonym czasem świecenia, to znaczy nie zanika natychmiast po przerwaniu wzbudzenia.”

Siergiej Wawitow

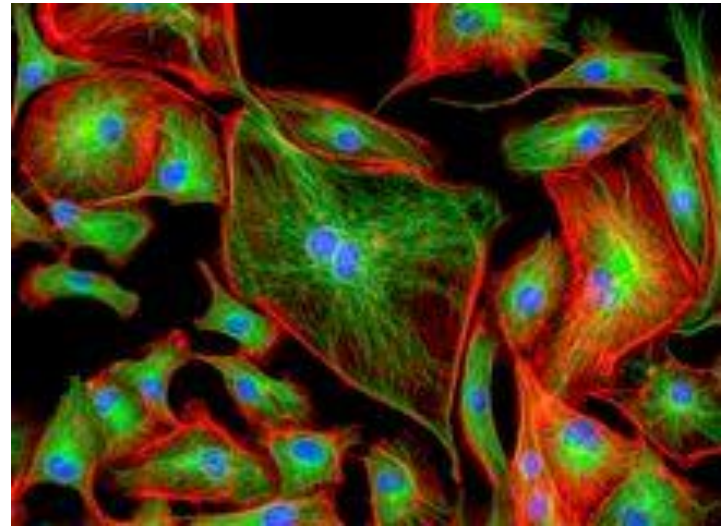
- chemiluminescencja – reakcja chemiczna
- elektroluminescencja – przepływ prądu
- elektronoluminescencja – bombardowanie elektronami
- **fotoluminescencja – oświetlenie UV/VIS**
- radioluminescencja – fale radiowe
- rentgenoluminescencja – promienie Roentgena
- sonoluminescencja – dźwięk
- triboluminescencja – tarcie
- termoluminescencja – energia cieplna

## Fluorescencja/fosforescencja – diagram Jabłońskiego

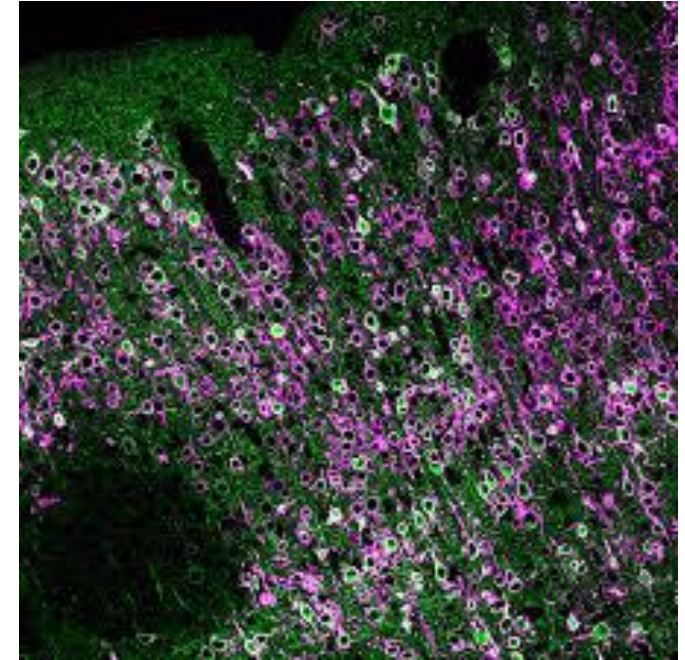
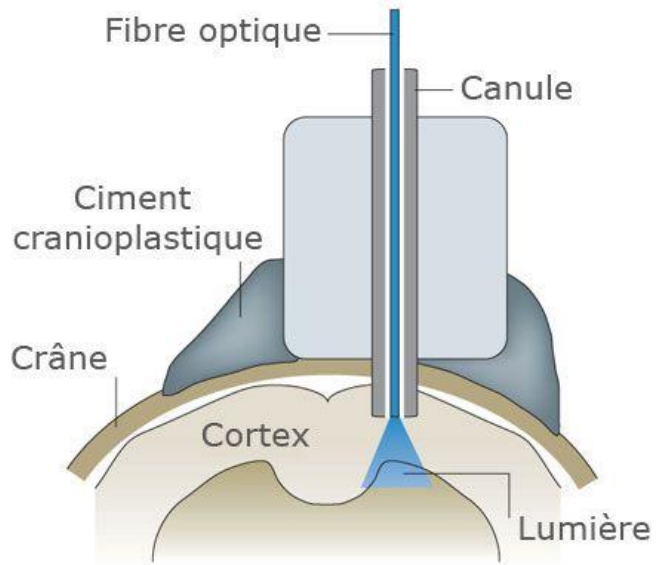
- Fluorescencja – jeden z rodzajów luminescencji – zjawiska emitowania światła przez wzbudzony atom lub cząsteczkę. Dawniej zjawisko uznawano za fluorescencję, gdy po zaniku czynnika pobudzającego następuje szybki zanik emisji w czasie około  $10^{-8}$  s, a gdy trwa dłużej – za fosforescencję.
- Obecnie o podziale decyduje rodzaj przejścia między pasmami.
- Wyróżnia się także fluorescencję długozyciową, gdy czas zaniku promieniowania jest znacznie dłuższy od zwykłej fluorescencji, zwanej w tej sytuacji dla odróżnienia krótkozyciową.



# Luminescencja



# Luminescencia

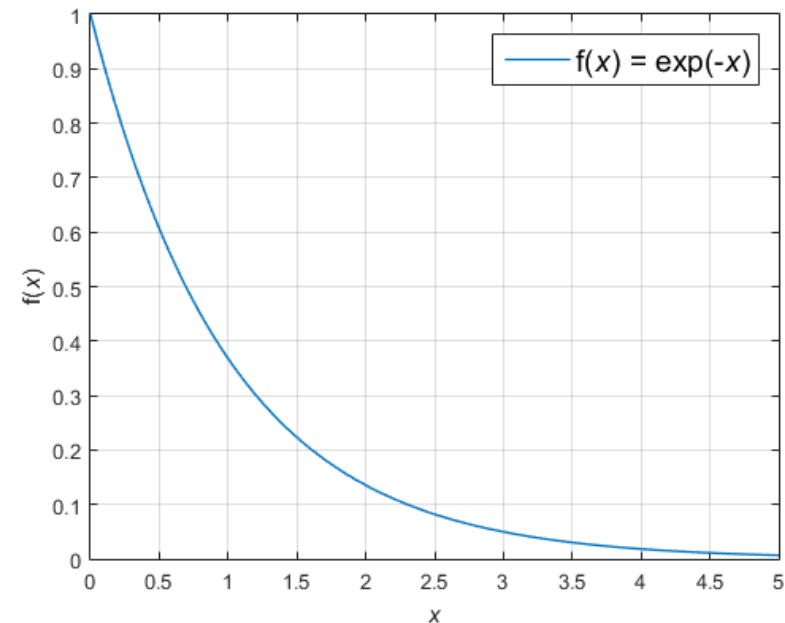


# Absorpcja – pochłanianie promieniowania

- Każde medium absorbuje (pochłania) promieniowanie elektromagnetyczne.
- Absorpcja zachodzi w wyniku różnych procesów fizycznych, zwykle zwiększając energię wewnętrzną absorbenta.
- Jeśli przez ośrodek o grubości  $dx$  przechodzi wiązka światła monochromatycznego, to strumień świetlny  $\Phi$  zmniejsza się o wielkość proporcjonalną do pierwotnego strumienia i grubości  $dx$ :  $-d\Phi = k\Phi dx$ .
- W wyniku rozwiązania powyższego równania dostajemy:

$$\Phi = \Phi_0 e^{-kx}$$

- $k$  jest współczynnikiem absorpcji zależnym od właściwości ośrodka.





# Absorbancja

## Prawo Lamberta-Beera

opisuje pochłanianie promieniowania elektromagnetycznego przy przechodzeniu przez częściowo absorbujący i rozpraszający ośrodek

Natężenie światła wiązki przechodzącej przez substancję ulega zmniejszeniu nie tylko w wyniku absorpcji, lecz również na skutek rozpraszania światła.

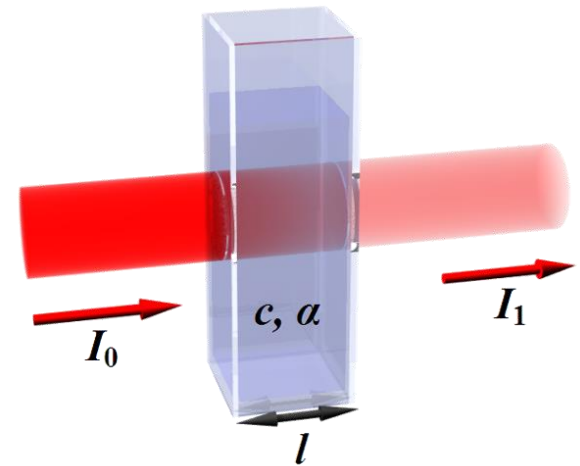
**Absorbancja** jest wprost proporcjonalna do stężenia  $c$  i grubości warstwy  $l$  roztworu, przez który przechodzi promieniowanie:

$$I_1 = I_0 e^{-\alpha c l}$$

$\alpha$  – stała proporcjonalności dla roztworu o stężeniu masowym w  $\text{g}\cdot\text{dm}^{-3}$

$T$  – transmitancja: 
$$T = \frac{I_1}{I_0} = e^{-\alpha c l}$$

$A$  – absorbancja: 
$$A = \log \frac{I_0}{I_1} = -\log T$$



Spełnione przy oświetleniu światłem monochromatycznym

## Prawo Lamberta-Beera

$$\text{Absorbancja: } A = \alpha cl$$

$\alpha$  – stała proporcjonalności dla roztworu o stężeniu masowym w  $\text{g}\cdot\text{dm}^{-3}$

$c$  – stężenie substancji w roztworze

$l$  – grubość warstwy absorbującej (droga jaką pokonuje promieniowanie przechodząc przez roztwór)

Gdy stężenie dane jest w molach:

$$A = \epsilon cl$$

$\epsilon$  – stała proporcjonalności dla roztworu o stężeniu molowym w  $\text{mol}\cdot\text{dm}^{-3}$

Ogólnie:

$$A = kcl$$

$k$  – stała proporcjonalności (współczynnik pochłaniania promieniowania, często nazywany współczynnikiem absorpcji)

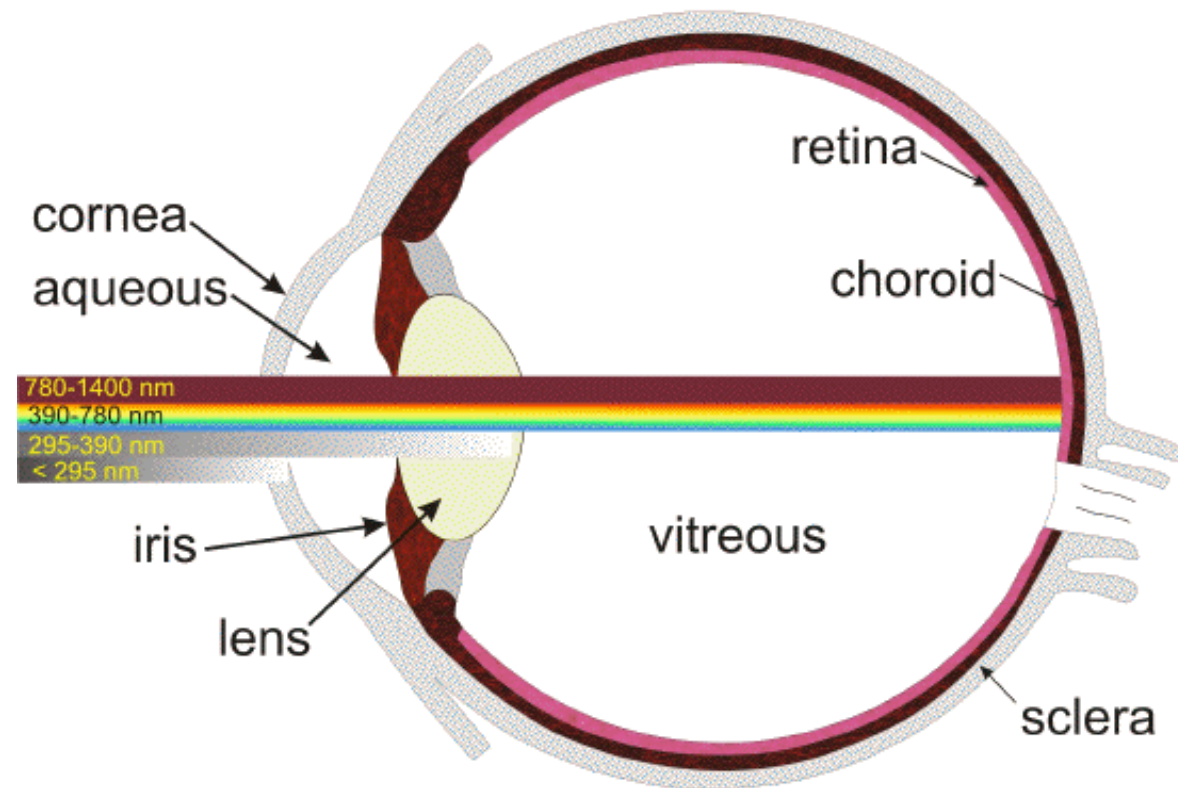
## Prawo addytywności absorbancji

Jeżeli w roztworze jest więcej substancji, które absorbują promieniowanie przy wybranej długości fali, to absorbancja tego roztworu jest równa sumie absorbancji jego poszczególnych składników:

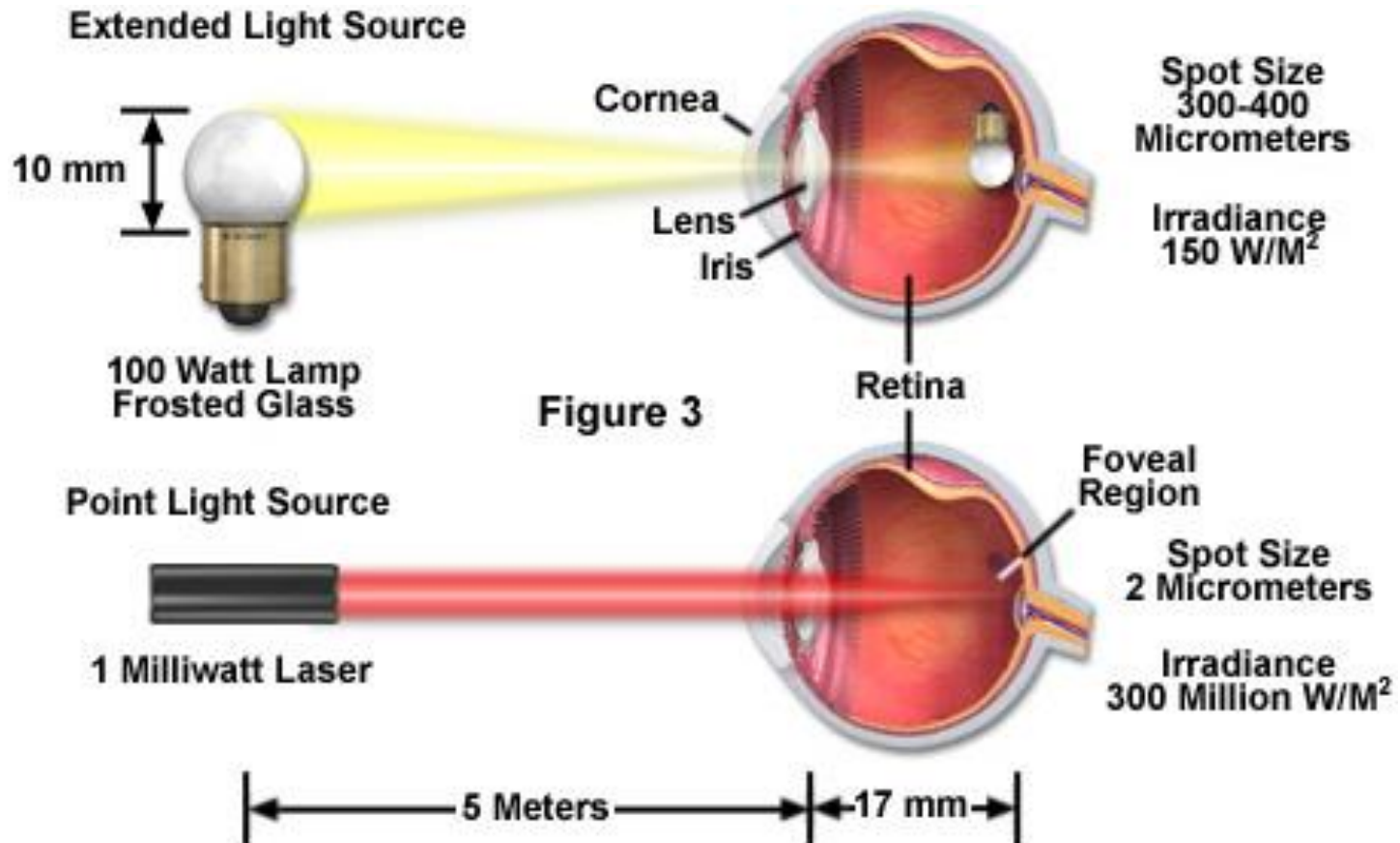
$$A = A_1 + A_2 + A_3 + \dots + A_n$$



# Absorbpcja w oku



# Absorbpcja w oku



# Dwójłomność

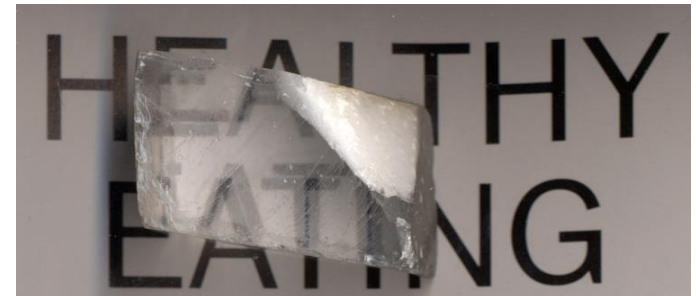
- Zdolność ośrodków optycznych do podwójnego załamania światła (także rozdwojenia promienia świetlnego).
- Zjawisko dwójłomności odkrył w 1669 roku Rasmus Bartholin a wyjaśnił Augustin J. Fresnel w pierwszej połowie XIX w wieku. Dwójłomność wykazuje wiele substancji krystalicznych, a także wszystkie ciekłe kryształy. Przykładami substancji dwójłomnych mogą być kryształy rutylu i kalcytu.
- Miarą dwójłomności jest różnica między współczynnikiem załamania promienia nadzwyczajnego  $n_e$ , a współczynnikiem załamania promienia zwyczajnego  $n_o$ .

## Przykłady substancji dwójłomnych [\[edytuj\]](#)

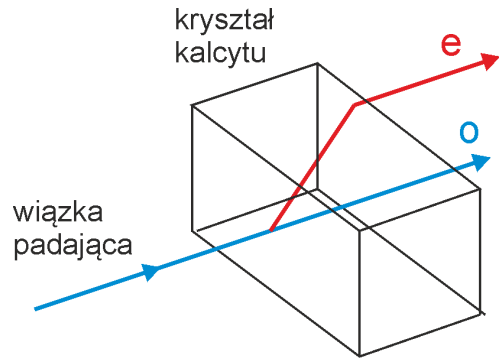
Dane dla światła o długości fali około 590 nm (okolice światła żółtego),

Substancja jednoosiowa	$n_o$	$n_e$	$\Delta n$
beryl	1,602	1,557	-0,045
kalcyt $\text{CaCO}_3$	1,658	1,486	-0,172
kalomel $\text{Hg}_2\text{Cl}_2$	1,973	2,656	+0,683
lód $\text{H}_2\text{O}$	1,309	1,313	+0,014
niobian litu $\text{LiNbO}_3$	2,272	2,187	-0,085
fluorek magnezu $\text{MgF}_2$	1,380	1,385	+0,006
kwarc $\text{SiO}_2$	1,544	1,553	+0,009

$$\Delta n = n_e - n_o$$



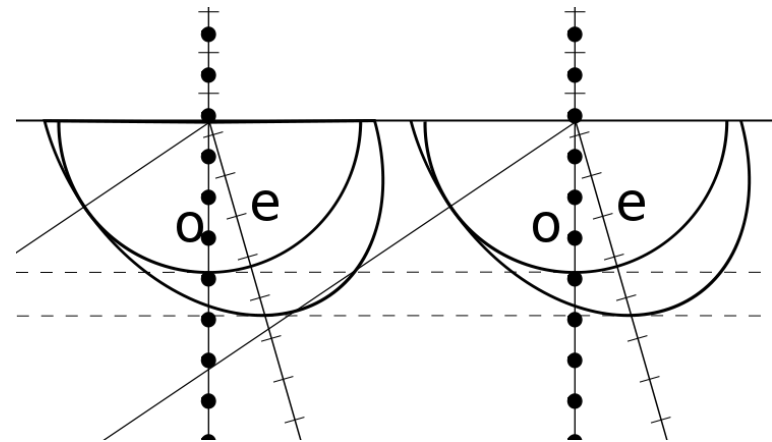
# Dwójtomność



o – promień zwyczajny (ordinary)  
e – promień nadzwyczajny (extraordinary)

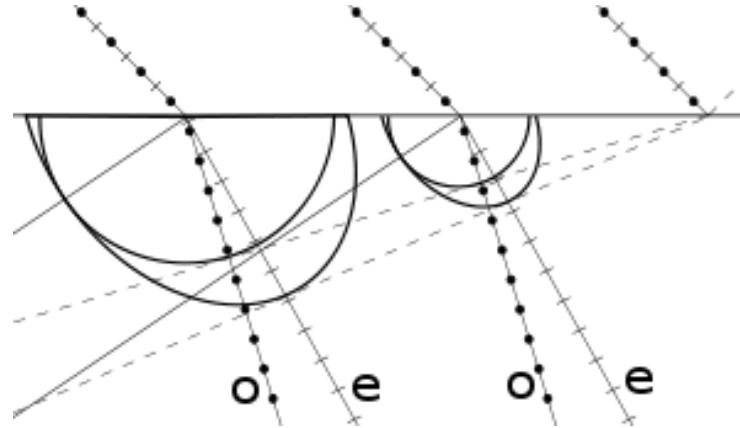
Zjawisko to wynika z faktu, że substancja jest **anizotropowa**, co oznacza, że współczynniki przenikalności elektrycznej  $\epsilon$  i wynikająca z niego prędkość światła, a co za tym idzie współczynnik załamania światła, w kryształach zależą od kierunku drgań pola elektrycznego fali elektromagnetycznej (polaryzacji fali).

W kryształach takim istnieje oś optyczna. Jest to kierunek, w którym biegnące światło nie rozdziela się na dwa promienie, ponieważ prędkość światła poruszającego się w tym kierunku nie zależy od kierunku polaryzacji. Kierunek tej osi nie zależy od kształtu kryształu. Istnieją kryształy jedno- i dwuosiowe.



# Dwójtomność

W kryształach jednoosiowych prawo Snella spełnia promień zwyczajny. Promień nadzwyczajny może się ugiąć nawet przy padaniu pod kątem  $0^\circ$ .

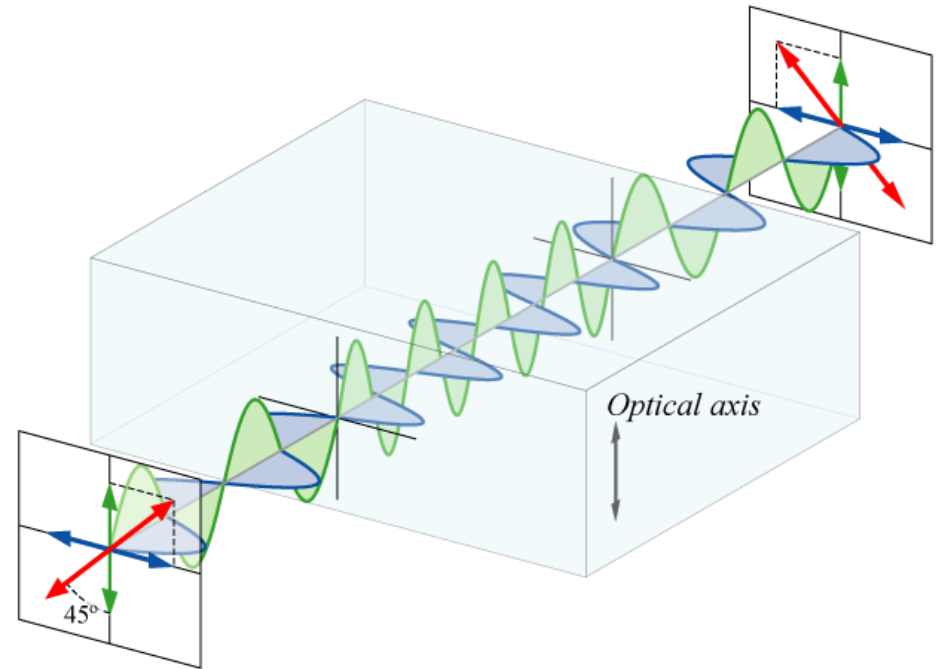
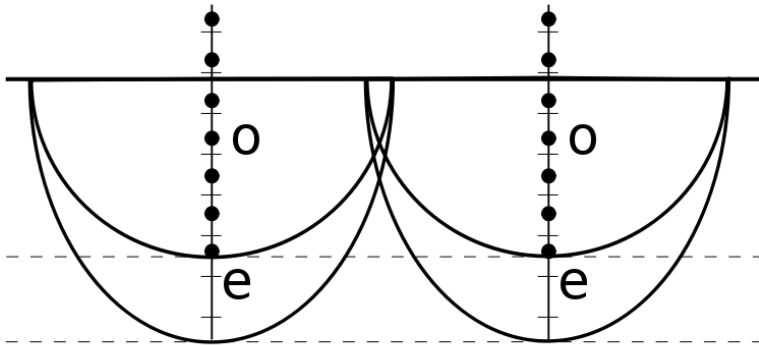


W kryształach dwuosiowych oba promienie nie spełniają prawa Snella.

# Dwójtomność - półfalówka

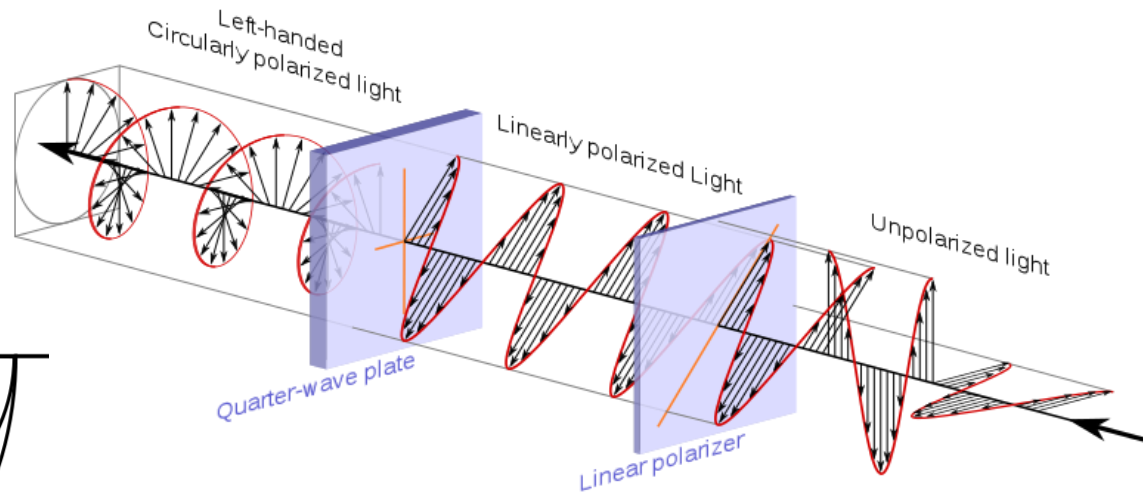
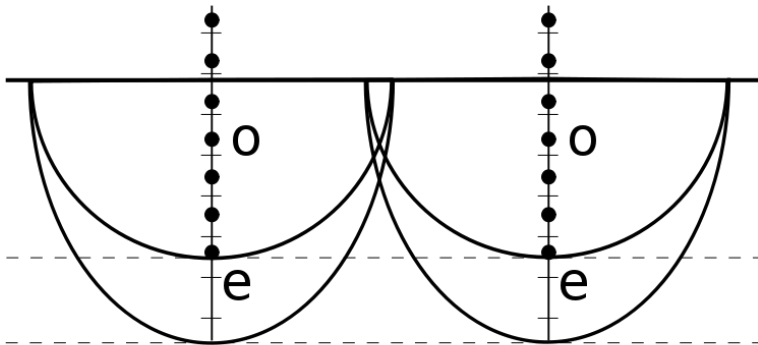
- Przepuszcza całe padające na nią światło zmieniając tylko stan jego polaryzacji.
- Nie polaryzuje światła niespolaryzowanego.
- Światło spolaryzowane liniowo zamienia na światło spolaryzowane liniowo w kierunku, który jest odbiciem polaryzacji światła padającego względem jednej z osi (szybkiej).
- Zmienia światło spolaryzowane kołowo prawoskrętnie na światło spolaryzowane kołowo lewoskrętnie i odwrotnie.

$$\Delta s = d \cdot (n_e - n_o) = d\Delta n$$



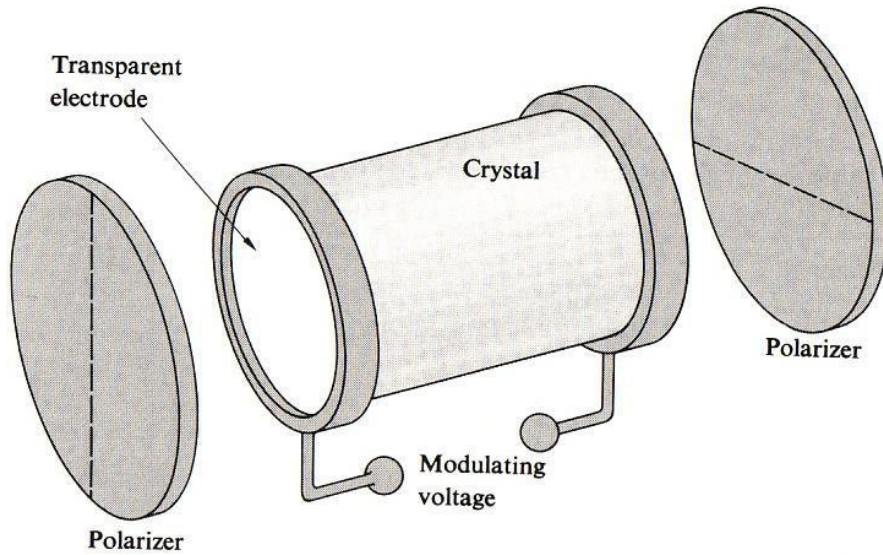
# Dwójtomność - ćwierćfalówka

- Przepuszcza całe padające na nią światło zmienia tylko stan jego polaryzacji.
- Nie polaryzuje światła niespolaryzowanego.
- Światło spolaryzowane liniowo zamienia na światło spolaryzowane eliptycznie zależnie od kąta polaryzacji względem osi szybkiej płytki i tak w szczególności:
  - gdy oś płytki (szybka lub wolna) pokrywa się z kierunkiem polaryzacji światła, nie zmienia polaryzacji,
  - gdy płaszczyzna polaryzacji światła tworzy kąt  $45^\circ$  z osią płytki, to światło zmienia polaryzację na kołową,
- zmienia światło spolaryzowane kołowo na światło spolaryzowane liniowo.



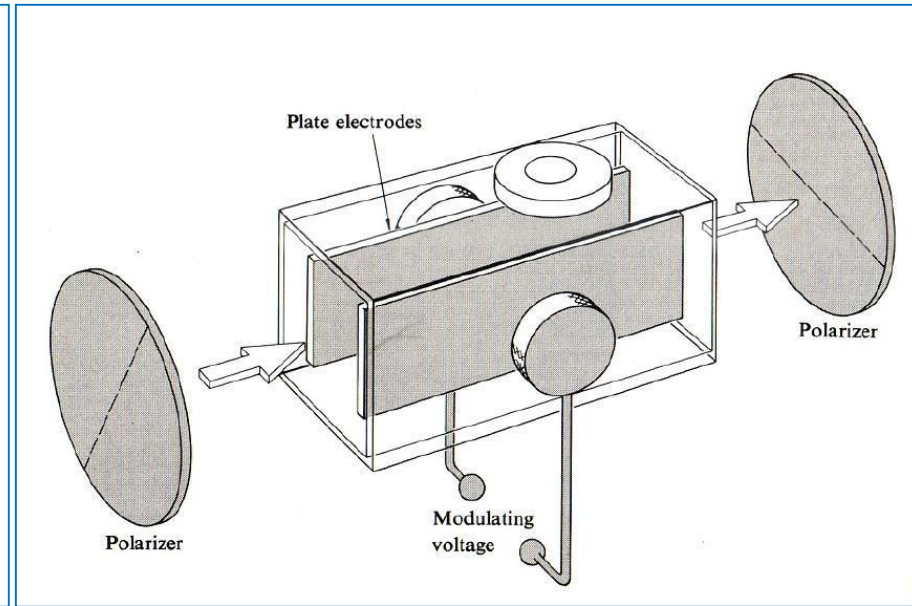


# Dwójtomność wymuszona



komórka Pockelsa

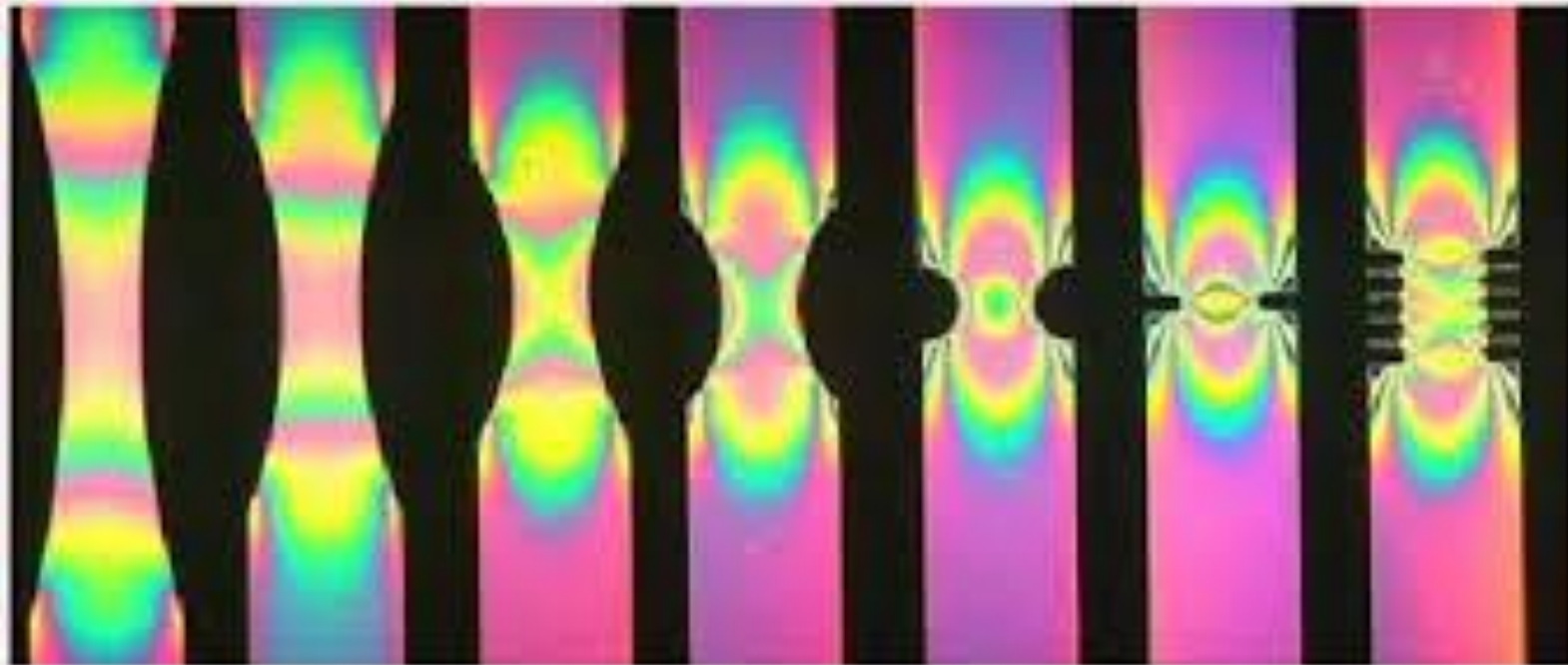
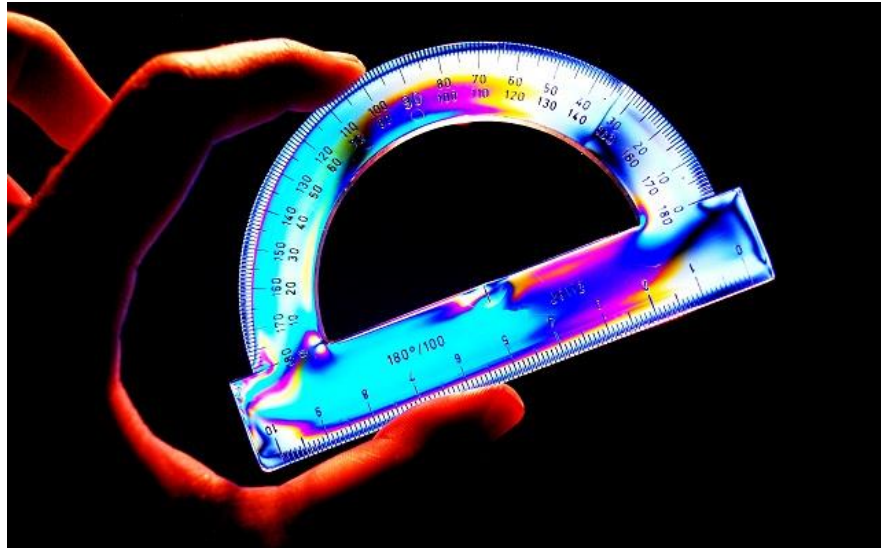
$$\Delta n \sim n_o^3 E_z$$



komórka Kerra

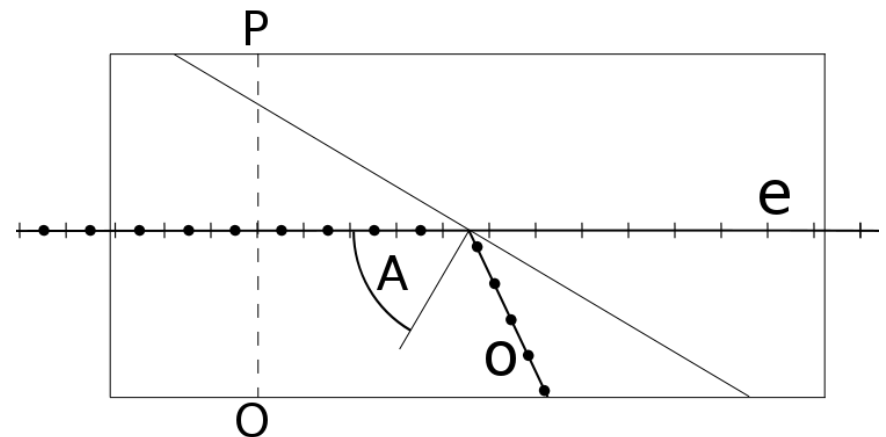
$$\Delta n \sim n_o^3 E_z^2$$

# Dwójtomność wymuszona



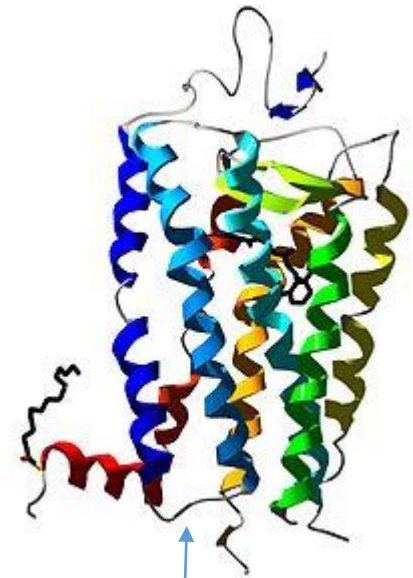
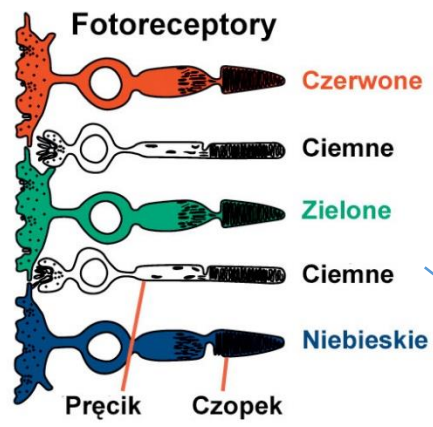
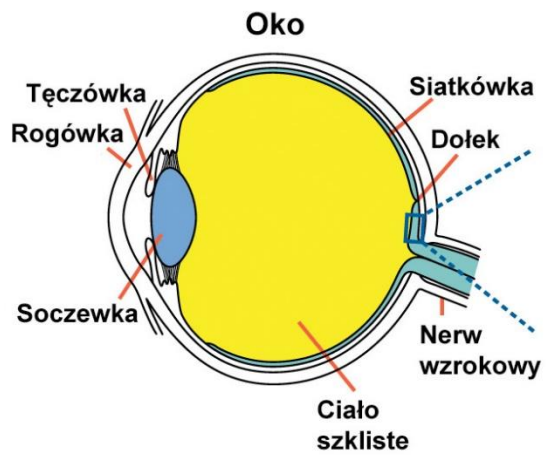
# Dwójłomność – pryzmat Nicola

- Pryzmat polaryzujący utworzony z romboedrycznego kryształu szpatu islandzkiego (kalcyt  $\text{CaCO}_3$ ), odpowiednio oszlifowanego, przeciętego na dwie części i sklejonego balsamem kanadyjskim.
- Oś optyczna (na schemacie odcinek OP) jest równoległa do powierzchni na którą pada promień. Promień światła po wejściu do kryształu, rozszczepia się więc na dwa promienie spolaryzowane w kierunkach wzajemnie prostopadłych: zwyczajny.
- Współczynnik załamania balsamu kanadyjskiego wynosi  $n_{bk} = 1,550$ , ma wartość pośrednią między współczynnikiem załamania dla promienia zwyczajnego  $n_o = 1,658$  i dla nadzwyczajnego  $n_e = 1,486$ . Balsam jest więc dla promienia zwyczajnego optycznie rzadszy, a dla nadzwyczajnego gęstszy. Kąt przecięcia pryzmatu jest tak dobrany, aby kąt padania  $A$  na powierzchnię balsamu, był dla promienia zwyczajnego większy od kąta granicznego całkowitego wewnętrznego odbicia.



# Detektory

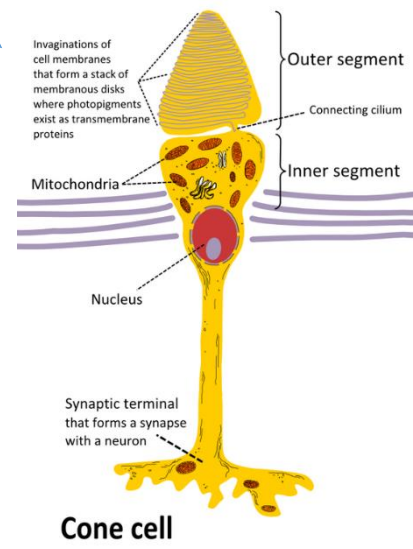
## OKO



Rodopsyna (widzenie w ciemności)  
Padający foton zmienia jedną konfigurację na inną (izomer), to aktywuje białko a to wyzwala sygnał komórkowy.

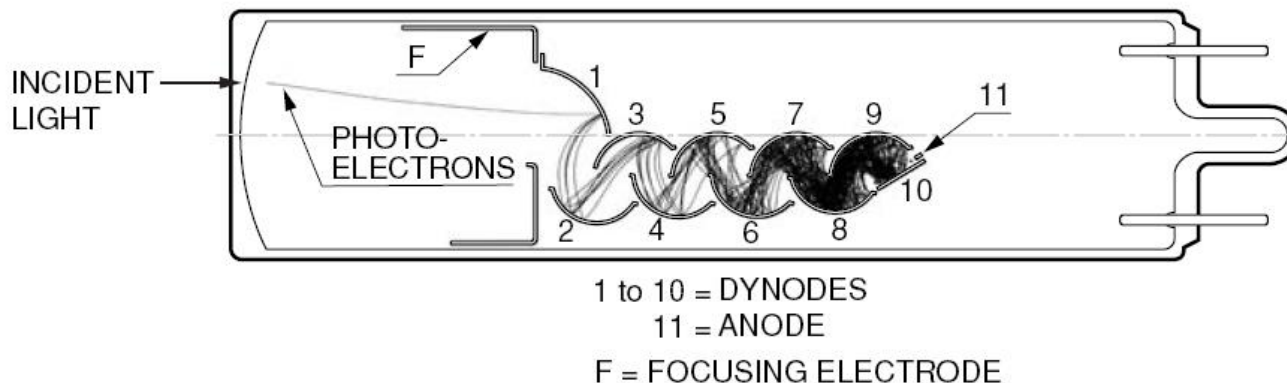
Dzięki witaminie A proces się odwraca.

Jest to cykl widzenia.



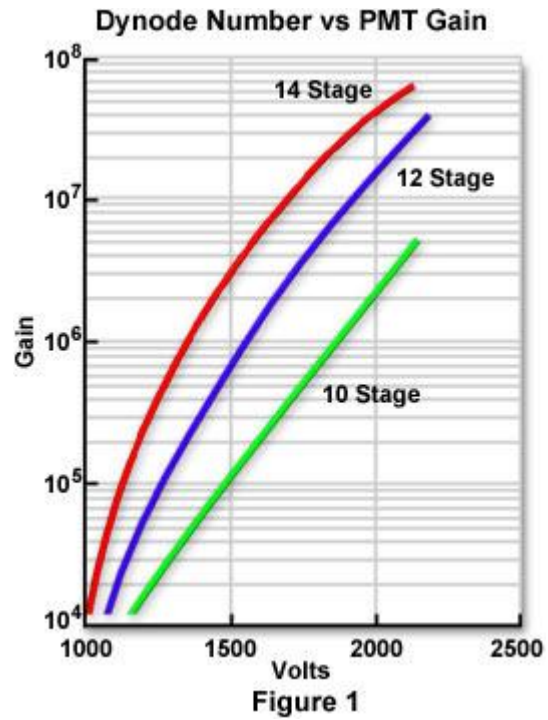
## FOTOPOWIELACZ

- Lampa próżniowa służąca jako detektor (szczególnie światła o bardzo małym natężeniu), składająca się z trzech zasadniczych elementów. Są to:
  - **Fotokatoda**, z której elektrony są wybijane przez padające kwanty światła o energii  $h\nu$ . (zjawisko fotoelektryczne zewnętrzne).
  - **Powielacz** złożony z **dynod** – elektrony z poprzednich dynod wybijają elektrony wtórne z kolejnych (emisja wtórna). Pomiedzy dynody jest przyłożone wysokie napięcie (powyżej 100 V), co powoduje kaskadowy przyrost liczby elektronów wybijanych z kolejnych dynod. W typowych lampach jedna dynoda daje kilkukrotne powielenie, a liczba stopni powielających wynosi od kilku do kilkunastu.
  - **Anoda** – na nią trafiają elektrony w ostatnim etapie.
- Fotopowielacze osiągają bardzo duże czułości (1000 A/lm) przy znikomych szumach, stosunek sygnału do szumu (SNR – *signal to noise ratio*) jest znacznie lepszy niż w przypadku urządzeń półprzewodnikowych. Czas reakcji fotopowielacza są rzędu dziesiątek nanosekund.
- Fotopowielacze znajdują zastosowanie w aparaturze pomiarowej, np. spektrometrach i innych urządzeniach pracujących w słabych warunkach oświetleniowych.



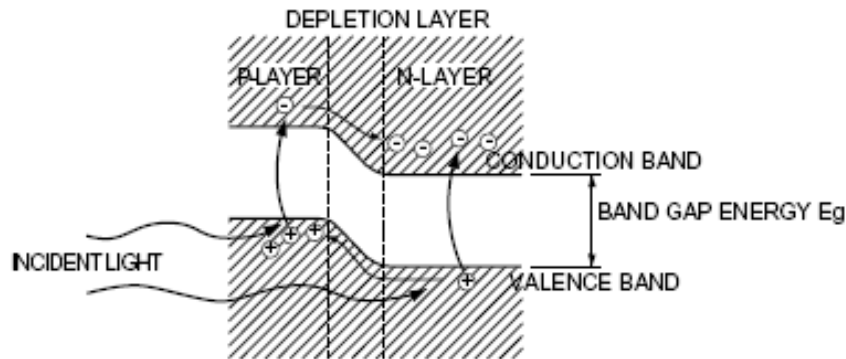
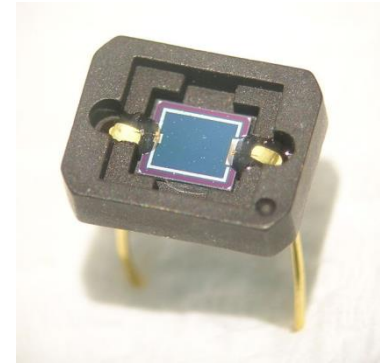


## FOTOPOWIELACZ – wzmacnienie

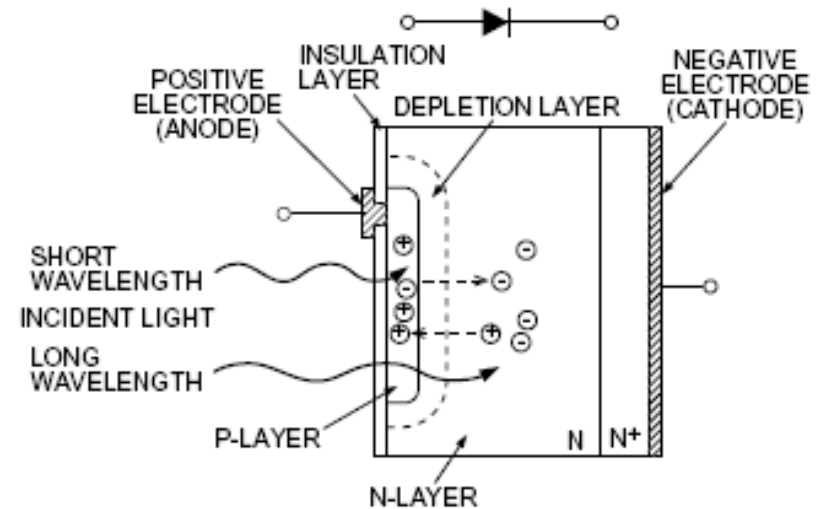


## FOTODIODA

- Fotodiody to zwykle złącza p-n.
- Fotony padające na złącze są absorbowane (zjawisko fotoelektryczne wewnętrzne), dzięki czemu powstaje para elektron-dziura: elektron zostaje przeniesiony do pasma przewodnictwa i jest przyciągany przez dodatni ładunek na granicy obszaru typu n, zaś dziury dyfundują do obszaru typu p.
- Prąd przewodzenia złącza p-n rośnie wraz ze wzrostem natężenia padającego światła.
- Aby działać jako fotodioda, złącze musi być spolaryzowane zaporowo.



KPDC0003EA



KPDC0002EA



## Zalety i wady typowej fotodiody w stosunku do fotopowielacza

### Zalety

- Dobra liniowość prądu wyjściowego w funkcji natężenia padającego światła.
- Odpowiedź widmowa w zakresie 190÷1100 nm (krzem), możliwe także dłuższe fale na bazie innych materiałów.
- Niskie szумы.
- Odporna na obciążenie mechaniczne.
- Niski koszt produkcji.
- Niewielki rozmiar.
- Długi czas życia.
- Wysoka wydajność kwantowa, typowo 80%.
- Nie jest wymagane wysokie napięcie.

### Wady

- Mała powierzchnia robocza.
- Brak lub niewielkie wzmocnienie.
- Znacznie niższa czułość.
- Możliwość zliczania fotonów tylko w specjalnych konstrukcjach.
- Długi czas reakcji.

## CCD

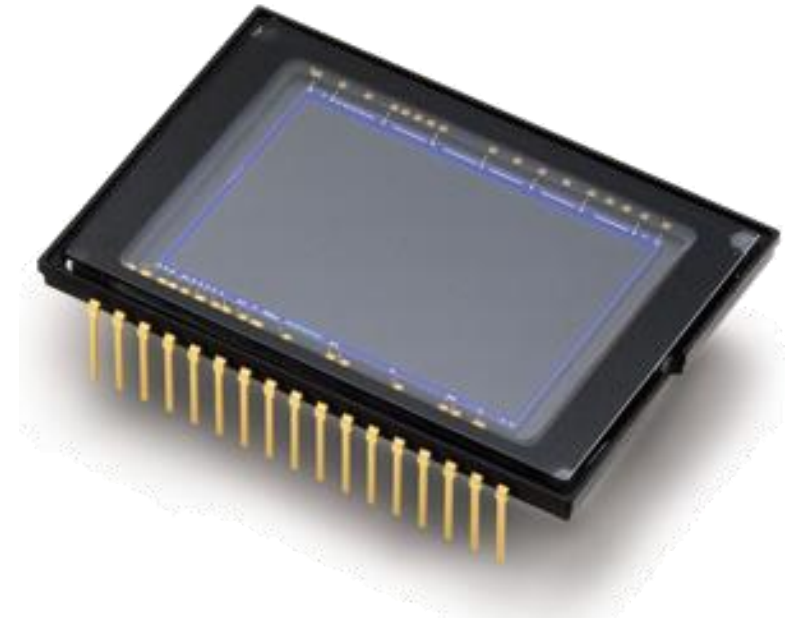
Kamera CCD (charge couple device) jest cyfrowym detektorem światła. Na dwu wymiarowej powierzchni umieszczona jest tablica elementów światłoczułych. Elementy te czułe są tylko na natężenie światła padającego.

W celu uzyskania obrazu kolorowego stosuje się odpowiednie filtry. Wyróżniamy dwa rodzaje takich układów.

W przypadku gdy do dyspozycji mamy trzy panele CCD każdy z nich „widzi” obraz w innym kolorze.

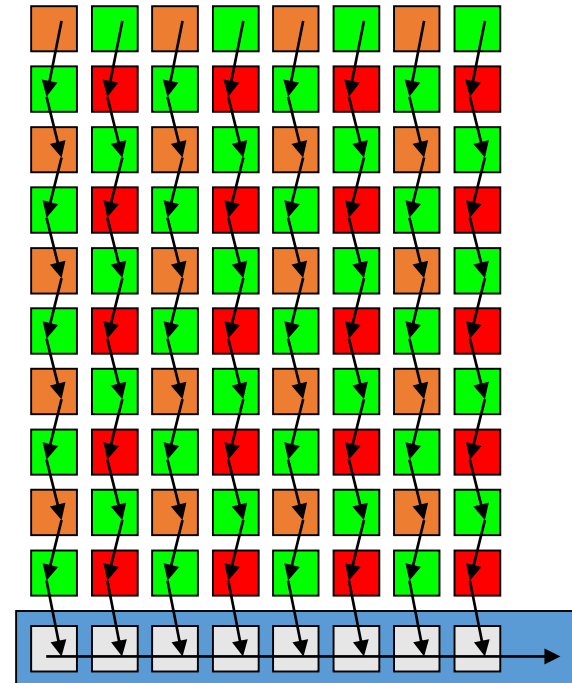
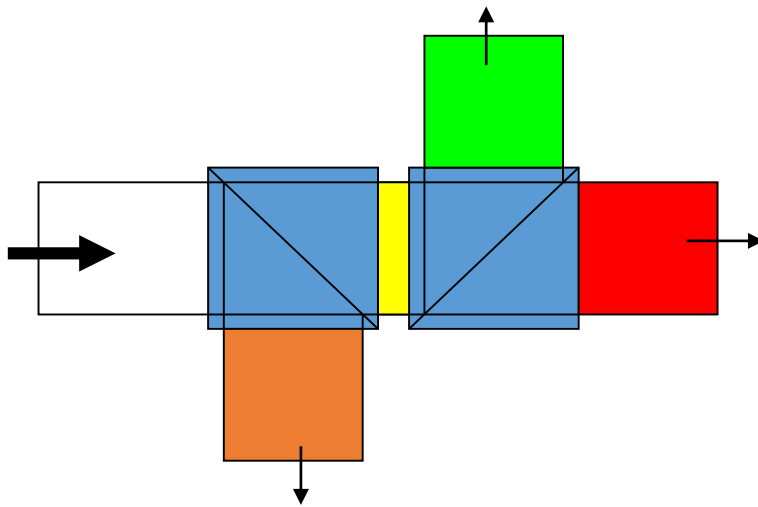
W przypadku gdy mamy do dyspozycji tylko pojedynczą kamerę 50% pikseli rejestruje kolor zielony a po 25% pikseli kolory czerwony i niebieski (kodowanie)

Pierwszy egzemplarz CCD został zbudowany w 1969 roku, przez dwóch naukowców, laureatów Nagrody Nobla: Willarda S. Boyle'a i George E. Smitha z Bell Telephone Laboratories



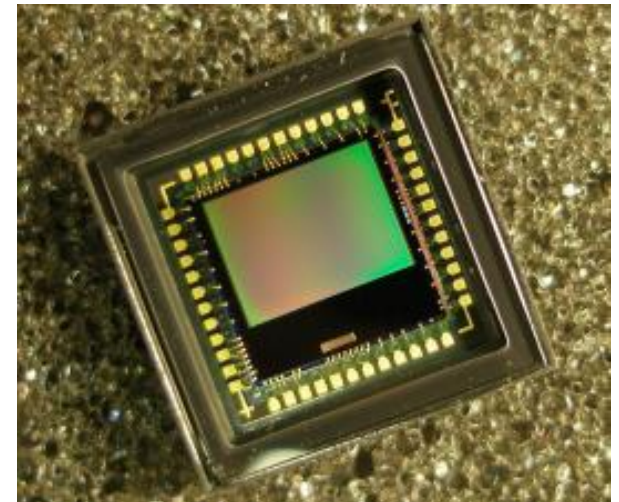
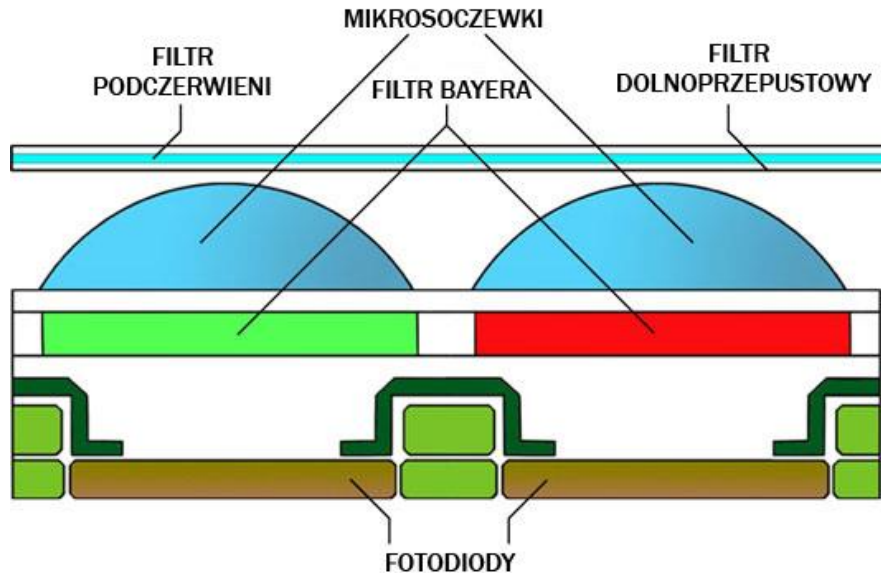
## CCD

W czasie naświetlania matrycy CCD na każdym z elementów gromadzi się ładunek. W chwili „zamknięcia migawki” ładunek po kolei spływa do układu mierzącego jego wielkość (rejestr przesuwany). Najpierw mierzone są ładunki z pierwszej kolumny (od lewej) i od pierwszego piksela w tej kolumnie (od dołu). Po spłynięciu ładunku z pierwszej kolumny przechodzi się do pomiaru ładunku w drugiej itd. W chwili gdy cały ładunek ze wszystkich elementów zostanie zmierzony możliwe jest ponowne „otworzenie migawki” i zrobienie kolejnego zdjęcia.



## CMOS

- Complementary Metal Oxide Semiconductor Active Pixel Sensor – **macierz elementów światłoczułych** (detektorów), z których każdy jest wyposażony we własny układ wzmacniający.
- Odczytywanie odbywa się jednocześnie dla wszystkich pikseli.
- Pomysł na budowę powstał w tym samym czasie, co matryce CCD (Noble w 1968, Chamberlain w 1969, Weimer et al. in 1969 ), jednak ze względu na trudności z otrzymaniem wzmacniaczy o powtarzalnych parametrach dla każdego piksela spowodowały czasową „dominację” matryc CCD.



## CMOS – nowe konstrukcje

### Backside Illumination Technology

OmniBSI offers CIS architectures for generations to come

