

# Absorpcja i emisja promieniowania. Lasery.

1. Absorpcja, emisja wymuszona i emisja spontaniczna
2. Wyprowadzenie wzoru Plancka przez Einsteina
3. Laser –zasada działania i warunki akcji laserowej

W 1917r Einstein podał wyprowadzenie wzoru Plancka zakładając

- kwantowy model atomu (z dwoma poziomami energetycznymi o energiach  $E_1$  – stan podstawowy i  $E_2$  – stan wzbudzony )
- oddziaływanie z otaczającym go promieniowaniem opisane zgodnie z elektrodynamiką klasyczną (w stanie równowagi termicznej).

Jest to opis półklasyczny.

Einstein założył trzy rodzaje oddziaływania atomów z polem promieniowania:

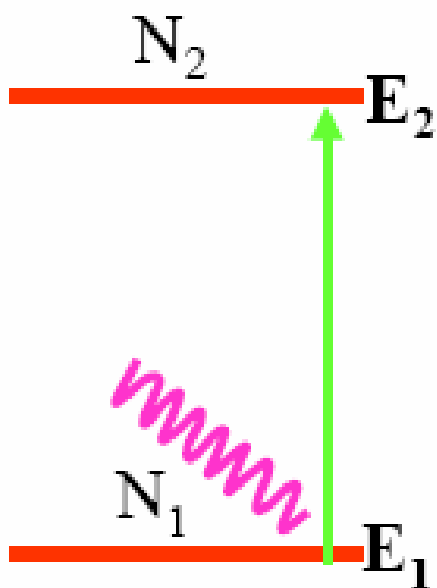
- **Absorpcję** kwantu o energii  $E_2 - E_1$ ,
- **Emisję spontaniczną** kwantu o energii  $E_2 - E_1$ , połączoną z przejściem elektronu ze stanu  $E_2$  do stanu  $E_1$
- **Emisję wymuszoną** przez kwant o energii  $E_2 - E_1$ , połączoną z przejściem elektronu ze stanu  $E_2$  do stanu  $E_1$  i jednoczesnym pojawieniem się drugiego kwantu o energii  $E_2 - E_1$ .

Wprowadzenie emisji wymuszonej (stimulated emission) przez Einsteina dało podstawy kwantowe dla działania lasera.

LASER - Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation.

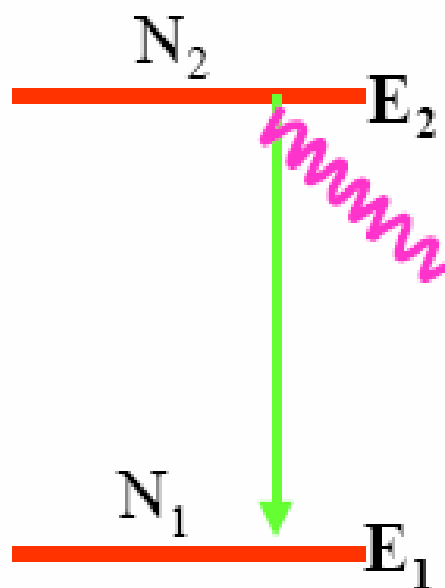
# Trzy procesy w modelu Einsteina

**Absorpcja**



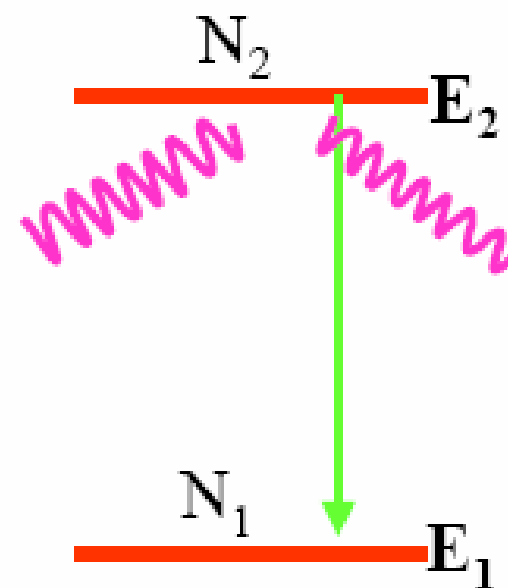
**Emisja**

**spontaniczna**



**Emisja**

**wymuszona**



# Wyprowadzenie wzoru Plancka metodą Einsteina. Emisja wymuszona

Równania różniczkowe określające  
zmianę obsadzeń poziomów 1 i 2:

$$dN_{12} = B_{12} u(\nu) N_1 dt; \quad \text{absorpcja promieniowania}$$

$$dN'_{21} = A_{21} N_2 dt; \quad \text{emisja spontaniczna}$$

$$dN''_{21} = B_{21} u(\nu) N_2 dt; \quad \text{emisja wymuszona}$$

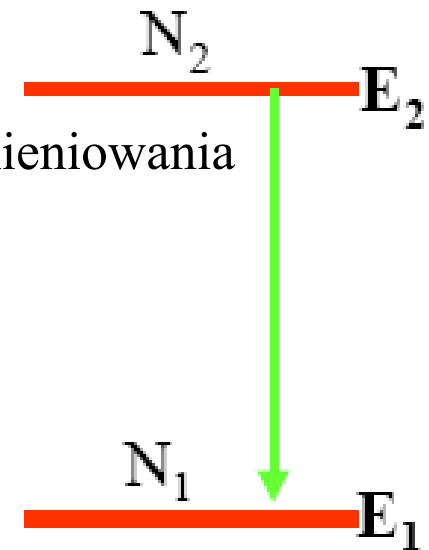
warunek równowagi:  $u(\nu)$  – gęstość energii pola promieniowania

$$dN_{12} = dN'_{21} + dN''_{21}$$

$$B_{12} u(\nu) N_1 = A_{21} N_2 + B_{21} N_2 u(\nu)$$

$$\frac{N_1}{N_2} = \frac{A_{21} + B_{21} u(\nu)}{B_{12} u(\nu)} = \frac{\exp(-E_1 / kT)}{\exp(-E_2 / kT)}$$

dwupoziomowy  
model atomu użyty  
przez Einsteina



Czyli:

$$B_{12}u(\nu) \cdot \exp(-E_1 / kT) = (A_{21} + B_{21}u(\nu)) \cdot \exp(-E_2 / kT)$$

$$(B_{12} \cdot \exp(-E_1 / kT) - B_{21} \cdot \exp(-E_2 / kT)) \cdot u(\nu) = A_{21} \cdot \exp(-E_2 / kT)$$

mnożymy stronami przez  $\exp(E_2 / kT)$

$$(B_{12} \cdot \exp(h\nu / kT) - B_{21})u(\nu) = A_{21}$$

$$u(\nu, T) = \frac{A_{21}}{B_{12} \cdot \exp(h\nu / kT) - B_{21}}$$

Musimy teraz wyznaczyć współczynniki  $A_{21}$ ,  $B_{12}$  i  $B_{21}$ .

1.  $B_{12}=B_{21}$  z niezmienniczości względem odbicia w czasie lub  $u(v) \rightarrow \infty$ , gdy  $T \rightarrow \infty$ .
2. Dla  $h\nu \ll kT$  powinniśmy odtworzyć prawo Rayleigha-Jeansa, dotyczące widmowej gęstości mocy promieniowania przy założeniu, że ciało może promieniować w dowolnej częstotliwości:

$$u(\nu, T) = \frac{8\pi\nu^2 kT}{c^3}$$

Zatem:

$$\frac{8\pi\nu^2 kT}{c^3} = \frac{A_{21}}{B_{12}(\exp(h\nu/kT) - 1)} \approx \frac{A_{21}}{B_{12}} \cdot \frac{kT}{h\nu}$$

Stąd:

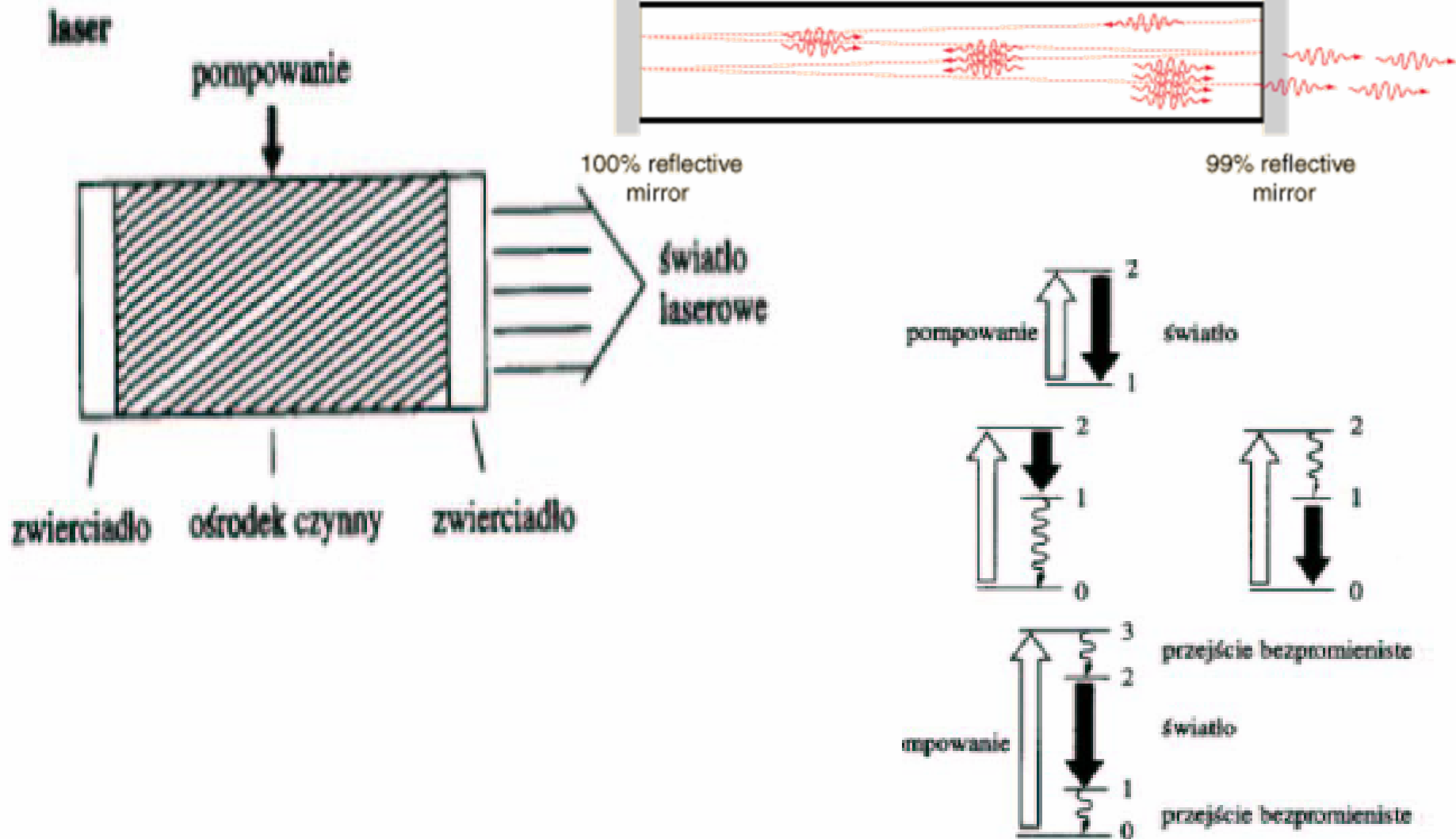
$$\frac{A_{21}}{B_{12}} = \frac{8\pi\nu^3 h}{c^3}$$

Teraz dostajemy już wzór Plancka:

$$u(\nu, T)d\nu = \frac{8\pi h\nu^3}{c^3} \frac{d\nu}{(\exp(h\nu/kT) - 1)}$$

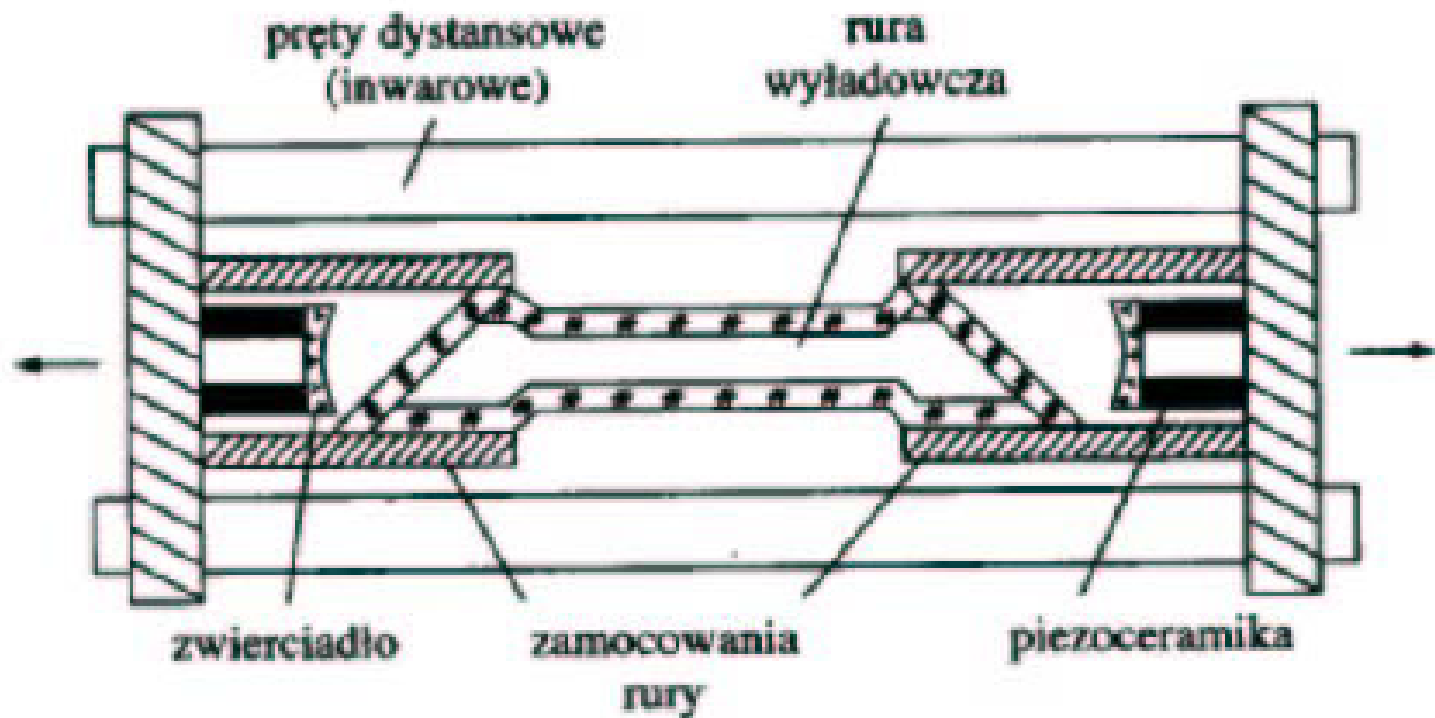
# Zasada działania lasera

L<sub>ight</sub> A<sub>mplification</sub> by S<sub>timulated</sub> E<sub>mission</sub> of R<sub>adiation</sub>



# Przykładowa konstrukcja lasera

## Laser He-Ne





# Warunki akcji laserowej

Oznaczmy:

$n$ -liczba fotonów poruszających się wzdłuż osi lasera,  $V$ -obj. rezonatora

$t_0$ -czas życia fotonu w laserze,

$N_2$ - liczba atomów w stanie wzbudzonym,  $\tau$ - jego czas życia

$N_1$ - liczba atomów w stanie podstawowym

$W$ - prawdopodobieństwo emisji wymuszonej na jednostkę czasu

$W'$ -prawdopodobieństwo emisji spontanicznej na jednostkę czasu

Równanie bilansu:

$$\frac{dn}{dt} = W(N_2 - N_1)n + W' N_2 - \frac{n}{t_0}$$

$W = \frac{1}{VD(\nu)\Delta\nu\tau}$

← straty (rozproszenia, wyjście poza zwierciadła)

Gdzie  $D(\nu)\Delta\nu$  – liczba fal stojących w przedziale częstości  $\Delta\nu$

$$D(\nu)\Delta\nu = \frac{8\pi\nu^2}{c^3} \Delta\nu$$

## Warunki akcji laserowej cd.

Warunkiem akcji laserowej jest to, żeby szybkość generacji fotonów  $dn/dt$  była większa od zera. W wyrażeniu na  $dn/dt$  możemy pominąć człon związany z emisją spontaniczną, gdyż nie jest on proporcjonalny do  $n$  oraz nie jest skorelowany z promieniowaniem laserowym (prowadzi on do szumów). Dostajemy warunek konieczny rozpoczęcia akcji laserowej: inwersję liczby obsadzeń:

$$\frac{N_2 - N_1}{V} > \frac{8 \pi \nu^2 \Delta \nu \tau}{c^3 t_0}$$

## Warunki akcji laserowej cd.

Im mniejsza jest prawa strona nierówności tym łatwiej uzyskać akcję laserową:

- Linia atomowa 2 powinna być jak najwęższa, zmniejsza to moc wymaganą do pompowania,
- Nierówność jest trudniej spełnić dla dużych częstości,
- Czas życia fotonów  $t_0$  powinien być jak najdłuższy; wymagane są np. jak najdoskonalsze lustra. Łatwo pokazać, że szybkość opuszczania laseraprzez fotony to mniej więcej  $1/t_0$ :

$$\frac{1}{t_0} = \frac{c}{L} (1 - R)$$

gdzie L- długość rezonatora, R- współczynnik odbicia zwierciadła. Pełne rozwiązanie dla akcji laserowej wymaga dodania równań opisujących obsadzenia poziomów w czasie (schemat pompowania).

## Warunki akcji laserowej cd.

Warunki pracy ciągłej lasera (abstrahując od schematu pompowania optycznego) dają nam ograniczenia na progowe obsadzenie poziomu wzbudzonego:

$$\frac{dn}{dt} = 0 \quad \text{oraz} \quad \frac{dN_2}{dt} = 0 \quad \text{co daje nam} \quad N_{2,pr} = \frac{1}{Wt_0}$$

oraz warunek na liczbę fotonów:

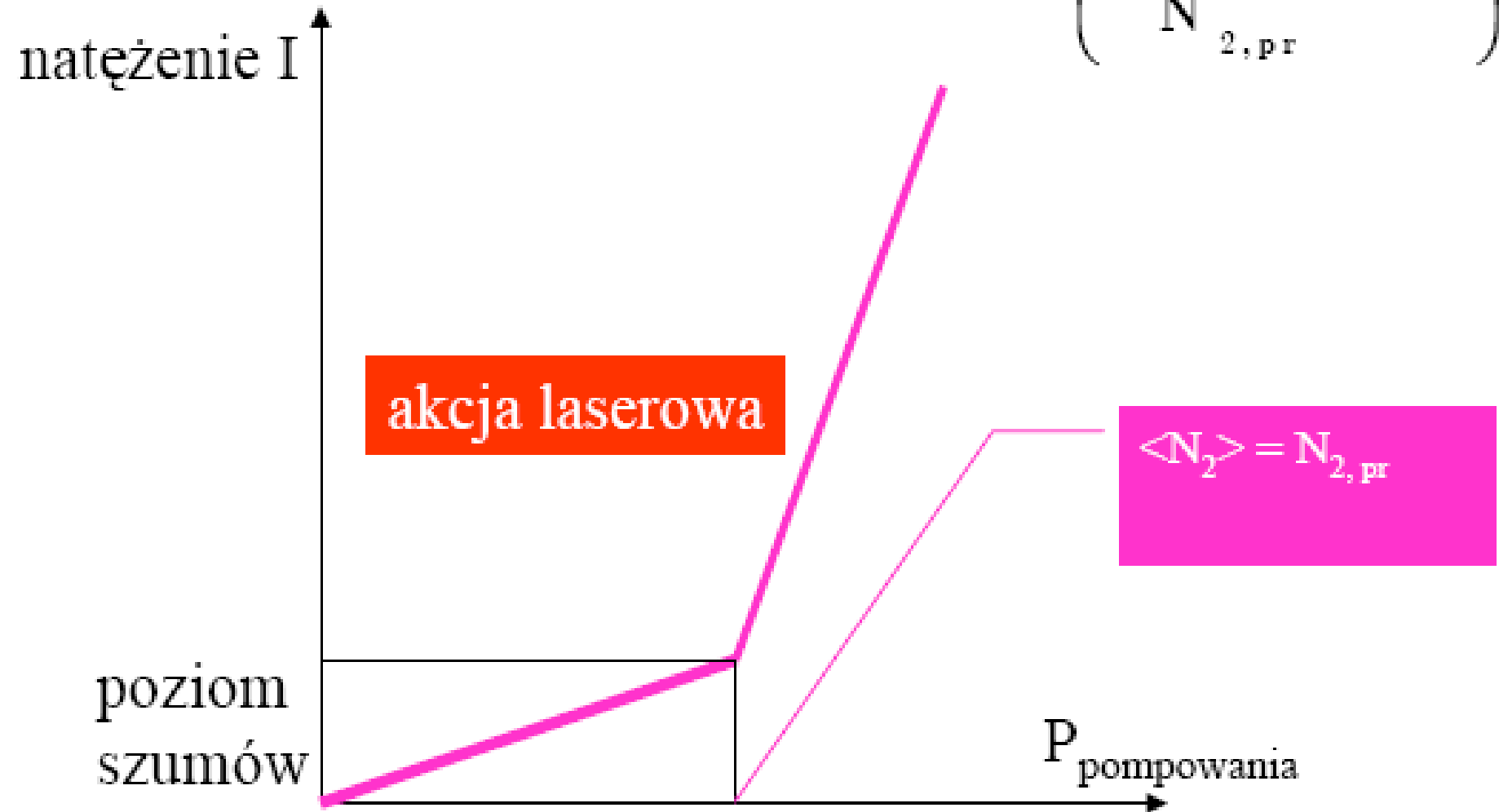
$$n = C \left( \frac{\langle N_2 \rangle}{N_{2,pr}} - 1 \right)$$

Współczynnik  $C$  zależy od detali schematu pompowania optycznego.

Z w/w wzoru wynika, że akcja laserowa nie może być rozpoczęta dopóki nie zostanie osiągnięta krytyczna wartość średniej liczby obsadzeń poziomu wzbudzonego 2. Poniżej  $\langle N_2 \rangle = N_{2,pr}$  światło laserowe nie jest emitowane. Powyżej, natężenie światła laserowego wzrasta liniowo z  $\langle N_2 \rangle$ , a więc z mocą pompowania.

# Warunki akcji laserowej cd.

$$n = C \left( \frac{\langle N_2 \rangle}{N_{2,pr}} - 1 \right)$$



natężenie I

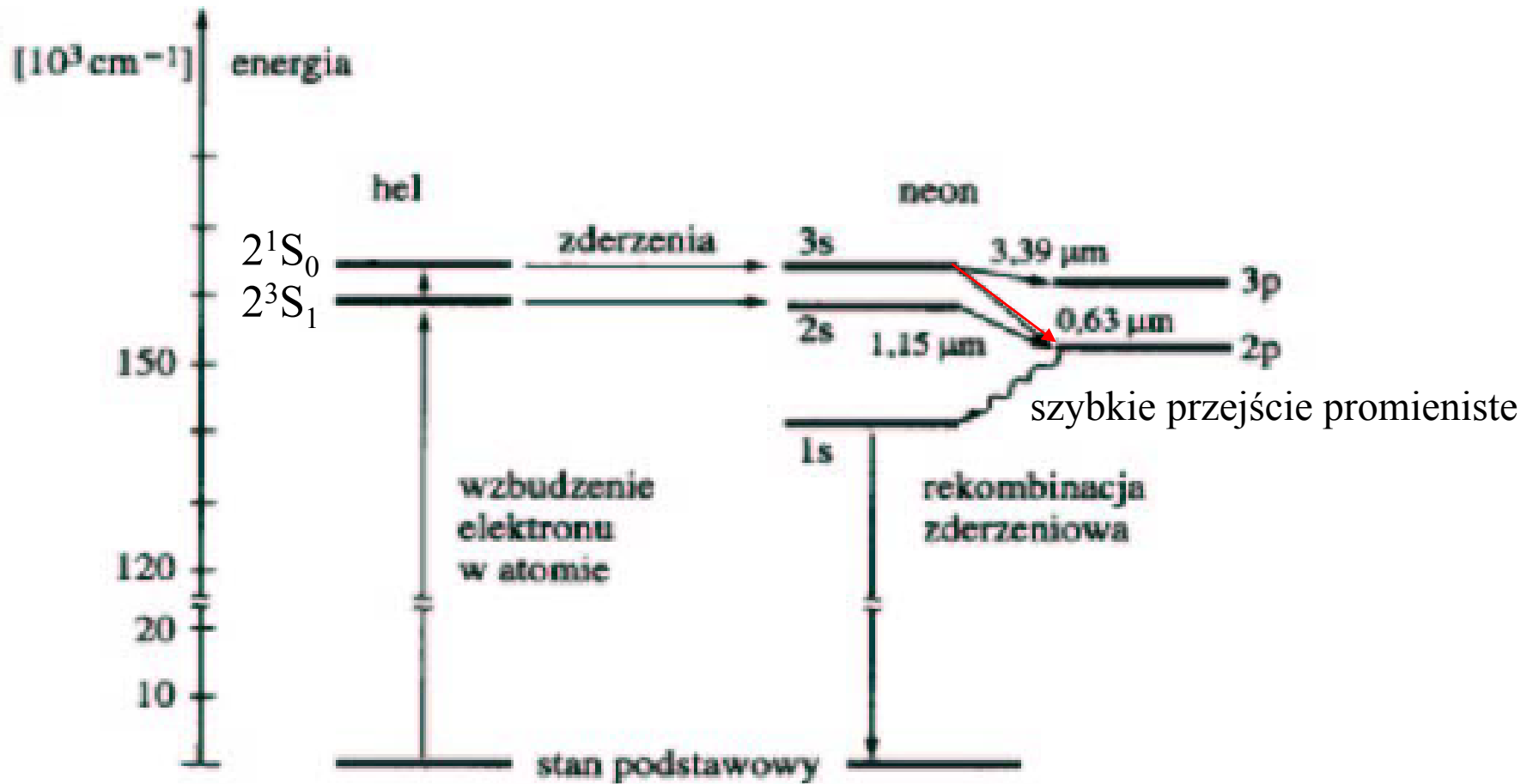
akcja laserowa

$\langle N_2 \rangle = N_{2,pr}$

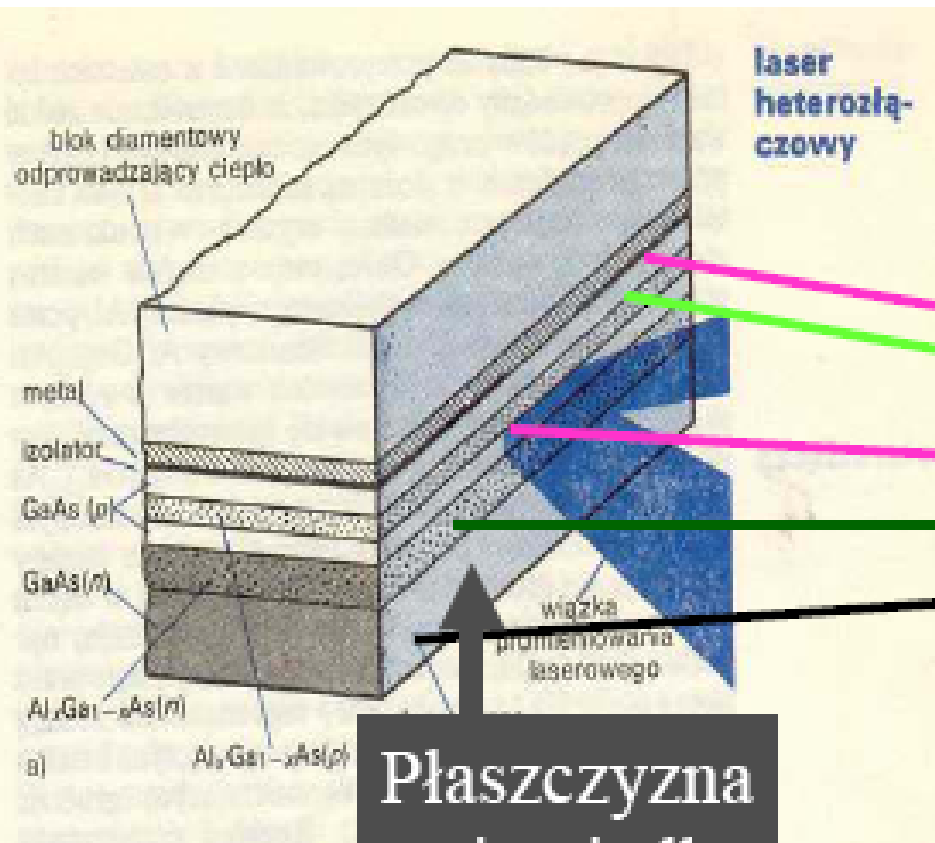
poziom szumów

$P$  pompowania

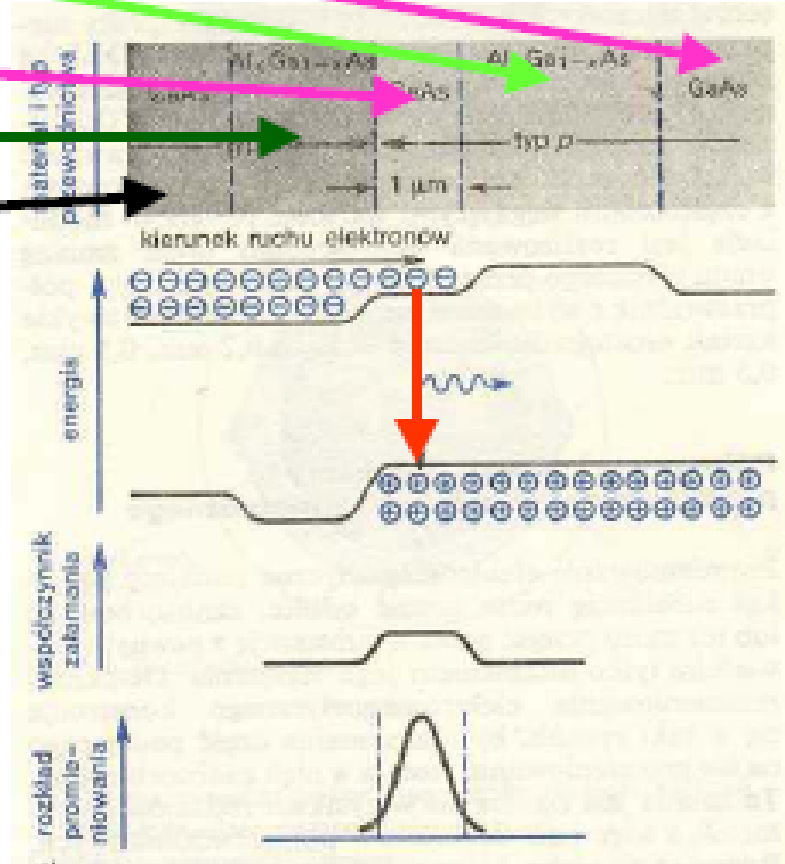
# Poziomy i przekazywanie energii w laserze helowo-neonowym

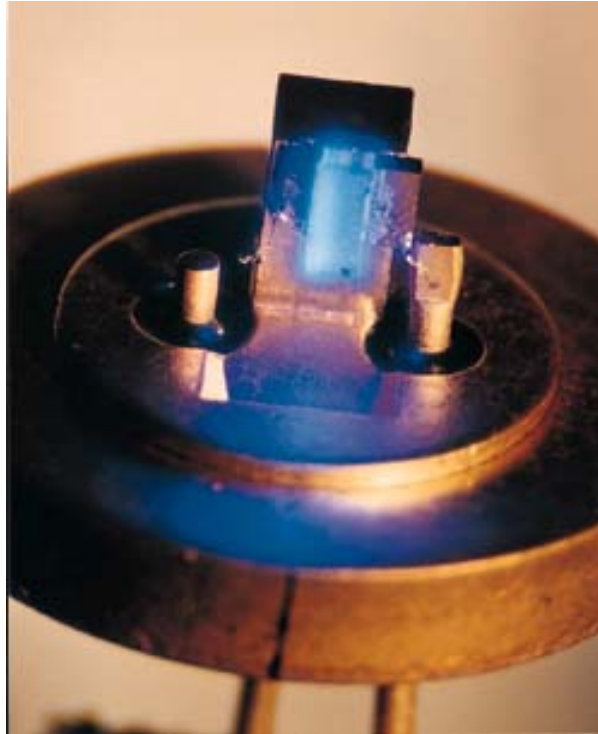


# Laser półprzewodnikowy heterozłączowy



**Płaszczyzna zwierciadła**





Niebieska dioda laserująca z GaInN na podłożu szafirowym. Jest źródłem światła o długości fali około 400nm w temperaturze pokojowej i ma czas życia około 10000 godzin pracy ciągłej.



## Lasery cząsteczkowe

**Lasery CO<sub>2</sub>:** wypełnione mieszaniną CO<sub>2</sub> i azotu.

Azot wykorzystywany jest do pompowania optycznego i wzbudzania pasm oscylacyjno-rotacyjnych w cząsteczkach CO<sub>2</sub>. Występuje ok. 100 dyskretnych częstości laserowych o długościach fal ok. 10.6 μm.

**Lasery barwnikowe:** są to lasery, których substancją czynną są roztwory barwników organicznych.

Podstawową zaletą jest przestrajalność: częstość pracy tych laserów można w pewnych granicach zmieniać.

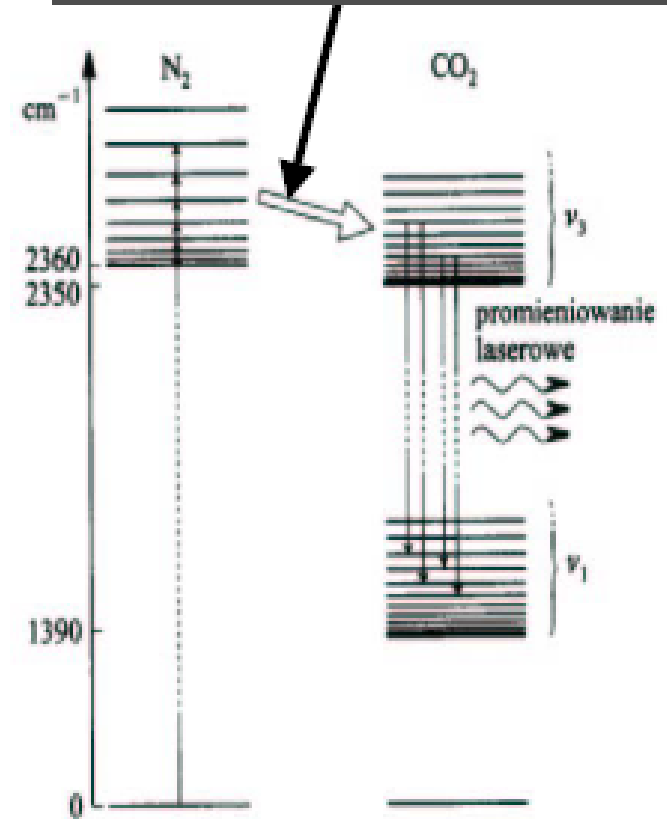
**Masery (M- microwave):** pierwszy historycznie laser (1955) oparty o drgania inwersyjne cząsteczki NH<sub>3</sub>.

## Laser $\text{CO}_2$

Pompowanie optyczne w rurze wyładowczej wykorzystuje oscylacyjno-rotacyjne poziomy  $\text{N}_2$ . Cząsteczki  $\text{N}_2$  przekazują energię bezpromieniście cząsteczkom  $\text{CO}_2$ , wzbudzonych wibracyjnie w drgania asymetryczne. Możliwa jest emisja wymuszona do niższych poziomów drgań symetrycznych ze spełnieniem reguły wyboru  $\Delta J = \pm 1$  w obszarze liczb falowych ok..  $1000 \text{ cm}^{-1}$ .

W laserze  $\text{CO}_2$  stosunkowo łatwo wytwarza się duże gęstości energii promieniowania.

Bezpromienne wzbudzenie cząsteczek  $\text{CO}_2$  (rezonans)



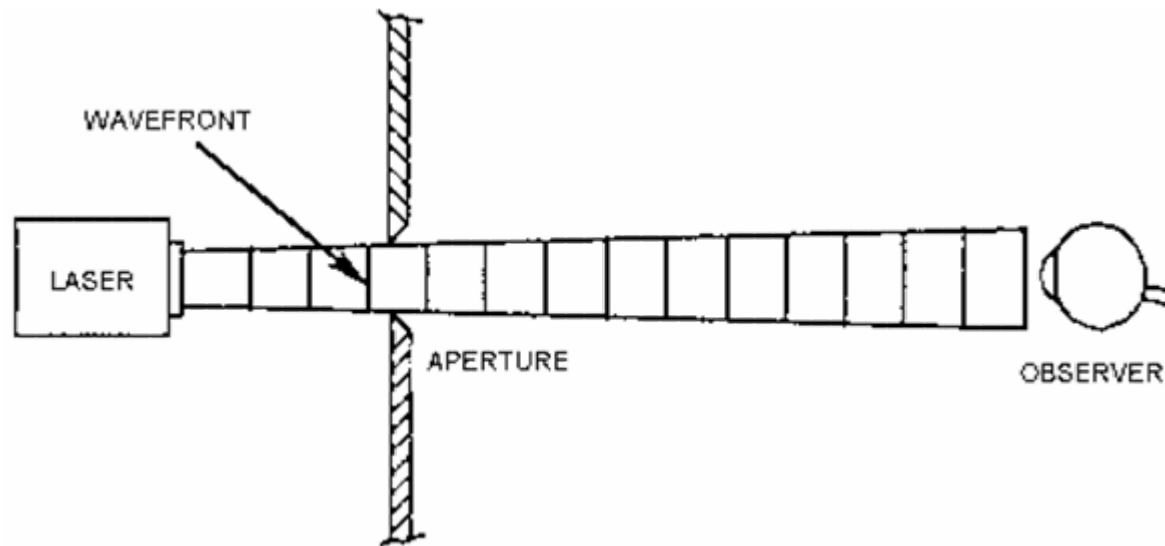
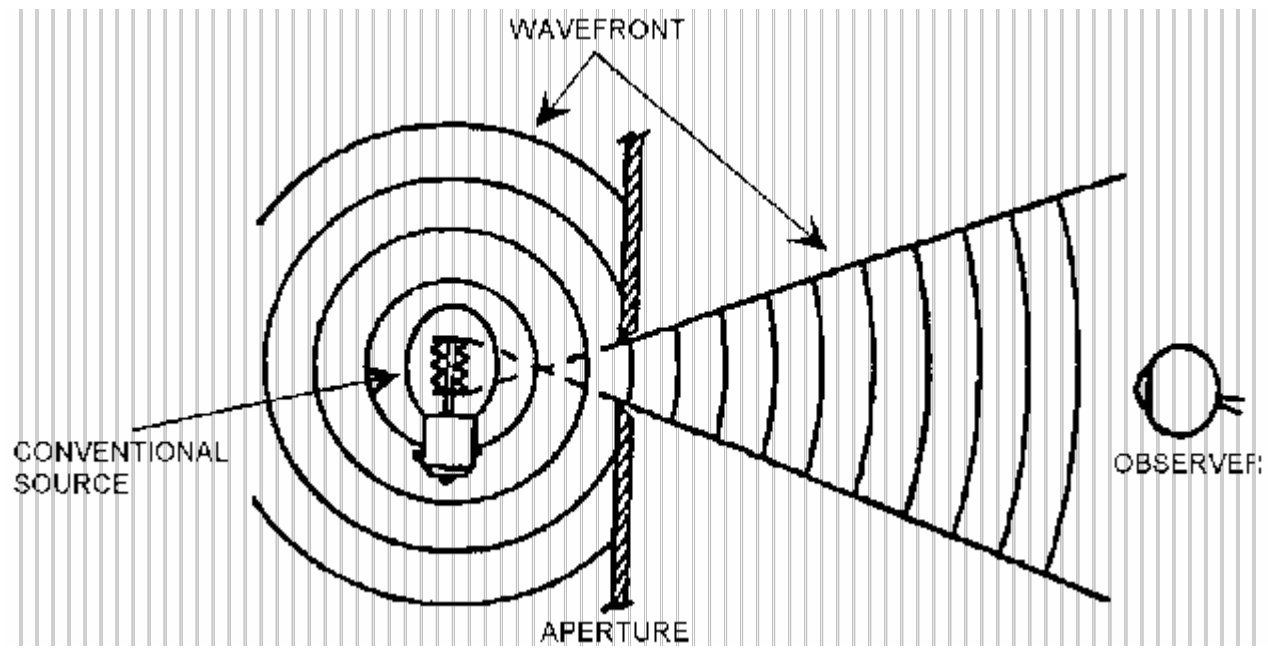
## Laser barwnikowy

Cząsteczki barwnika organicznego są pompowane optycznie ze stanu podstawowego  $S_0$  do wysokich stanów wzbudzonych wibronowych  $S_1$ , które w roztworze tworzą prawie ciągłe pasmo. Następuje szereg przejść bezpromienistych do najniższych stanów wibronowych  $S_1$ , po czym może nastąpić akcja laserowa do niemal ciągłego pasma stanów  $S_0$ . Zakres widmowy akcji laserowej może obejmować kilka tysięcy  $\text{cm}^{-1}$ .

Częstość przejścia laserowego wybiera się za pomocą strojenia długości rezonatora optycznego.

Pompowanie optyczne





# Charakterystyka światła laserowego

1. KOHERENTNE. Strumień światła laserowego „utrzymuje” fazę. Można obserwować efekty interferencyjne w dużej odległości od źródła
2. MONOCHROMATYCZNE. Światło laserowe typowo zawiera jedną długość fali, odpowiadającą emisji stymulowanej zachodzącej między określonymi poziomami
3. SKOLIMOWANE. Wielokrotne odbicia między zwierciadłami powodują, że wiązka opuszczająca laser z dużą dokładnością prostopadłą do powierzchni luster. Wiązki laserowe są wąskie na dużych odległościach.
4. DUŻE NATĘŻENIE PROMIENIOWANIA, przy działaniu impulsowym do  $10^{13}$ W.