

Lasery

- ♦ Własności światła laserowego
- ♦ Zasada działania
- ♦ Rodzaje laserów

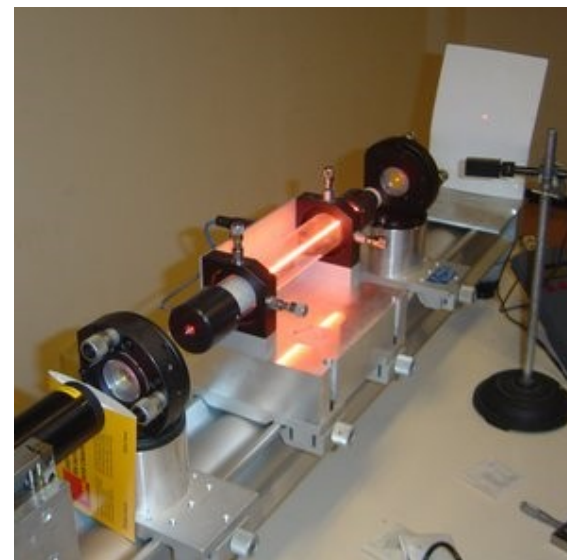
LASER (Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation)

Laser jest generatorem promieniowania elektromagnetycznego charakteryzującego się monochromatycznością i kierunkowością, dużą gęstością mocy spektralnej oraz wysokim stopniem spójności czasowej i przestrzennej.

Pierwszy laser skonstruowany został przez Maimana w 1960 r. Materiałem aktywnym był rubin (Al_2O_3) domieszkowany chromem (Cr^{3+}), umieszczony między dwoma zwierciadłami stanowiącymi rezonator optyczny.

Lasery

Laser - nazwa utworzona jako akronim od *Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation* - wzmocnienie światła poprzez wymuszoną emisję promieniowania

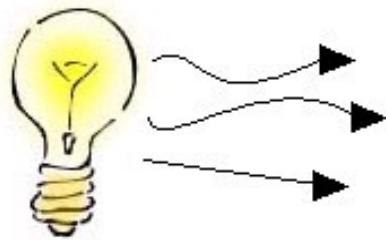


Najmniejsze mają rozmiar części milimetra i dają światło o mocy ok. 200 mW

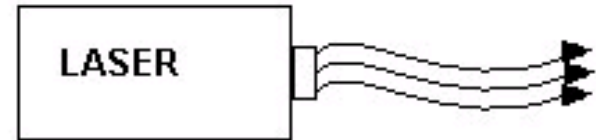
Największe, używane do wywołania reakcji jądrowych, mogą mieć moc impulsu świetlnego do ok. 10^{14} W

Własności światła laserowego

- Światło laserowe jest wysoce **monochromatyczne**
 - składa się z jednej (w przybliżeniu) długości fali („z jednego koloru”)
 - zwykła żarówka emituje światło nie-monochromatyczne
- Światło laserowe jest wysoce **koherentne (spójne)**



Żarówka wolframowa daje światło niekoherentne – emituje ciągi falowe niespójne ze sobą



W laserze emitowane „ciągi falowe” są ze sobą „w fazie” - „biegną w jednym szeregu!” - są spójne i monochromatyczne

Koherencja czasowa, czas koherencji : $\Delta\tau \approx 1 / \Delta\nu$

np. dla $\Delta\nu \approx 1 \text{ MHz}$ $\Delta\tau \approx 1 \text{ }\mu\text{s}$ jest nieporównywalnie dłuższy niż czas koherencji mierzony dla klasycznych źródeł promieniowania (10^{-9} s)

Długość koherencji: $\Delta z = v \Delta\tau$

zdolność do interferowania będą miały te porcje promieniowania pochodzące z tej samej wiązki, które oddalone są od siebie o odległość nie większą niż Δz .

dla $\Delta\tau \approx 1 \text{ }\mu\text{s}$ droga spójności jest równa $\Delta z \approx 300 \text{ m}$

Własności światła laserowego

- Promień światła laserowego rozchodzi się kierunkowo z bardzo małą rozbieżnością wiązki
 - złożony z ciągów fal o prawie płaskich frontach falowych
 - np. wiązka światła laserowego użyta do mierzenia odległości Księżyca od Ziemi daje „plamkę” na Księżycu rzędu kilku metrów. Nie da się „zsoczkować” światła z żarówki w taki sposób na taką odległość.
 - Kąt bryłowy rozbieżności wiązki zależy głównie od długości fali i od apertury wyjściowej

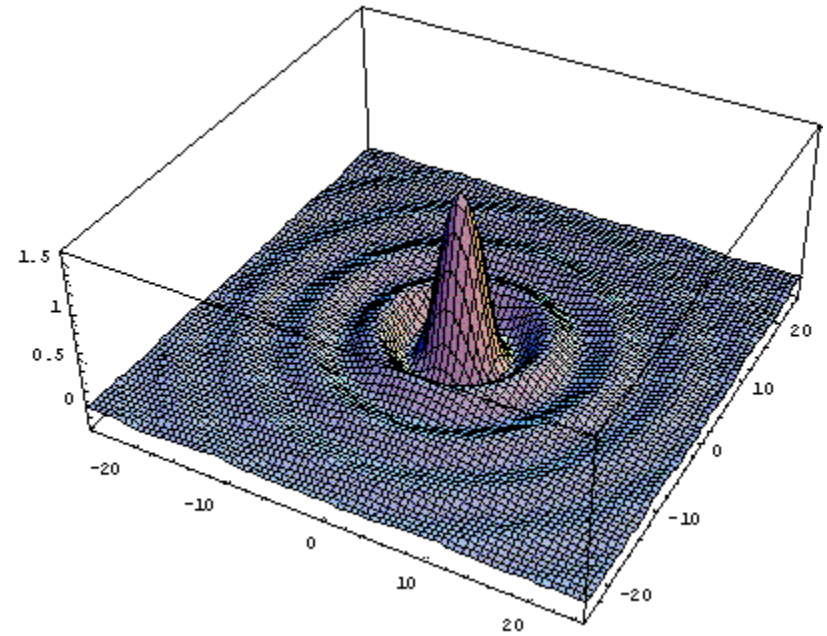
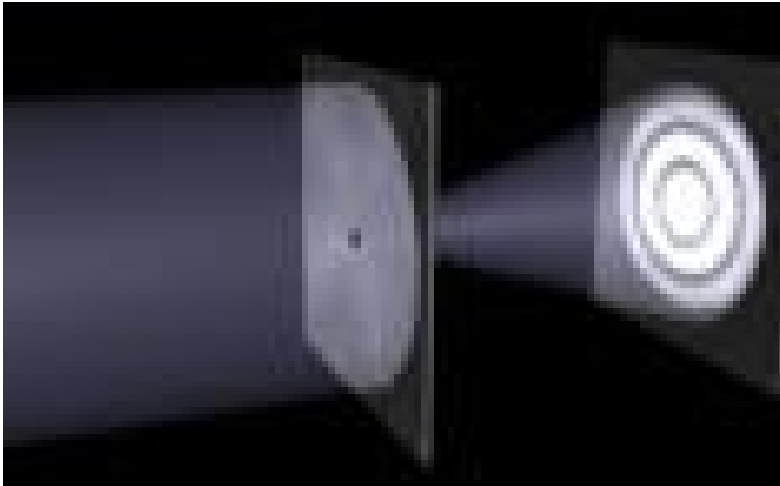
$$\Delta\Omega = \frac{\lambda^2}{A}$$

np. $\lambda = 0.5 \mu\text{m}$ (barwa zielona) $A = 5 \text{ mm}^2$;
 $\Delta\Omega = 10^{-8}$



Promień światła laserowego może być bardzo mocno skupiony. Dzięki temu możliwe jest „skupienie” w małym punkcie olbrzymiej gęstości energii - nawet do 10^{17} W/cm^2 (dla porównania płomień z palnika acetylenowo-tlenowego daje gęstość energii tylko 10^3 W/cm^2)

Dyfrakcja na małym otworze o promieniu a

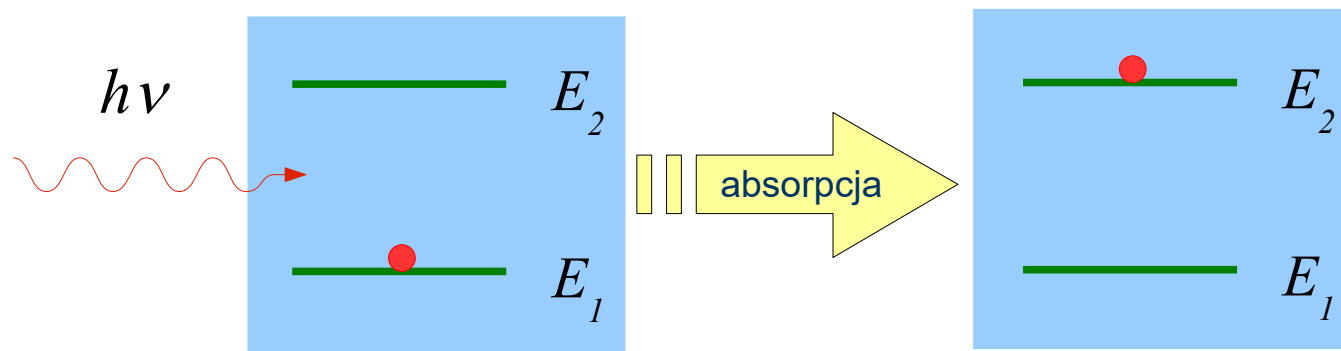


Położenie pierwszego minimum:

$$\sin \theta = 1.22 \frac{\lambda}{a}$$

Jak działa laser?

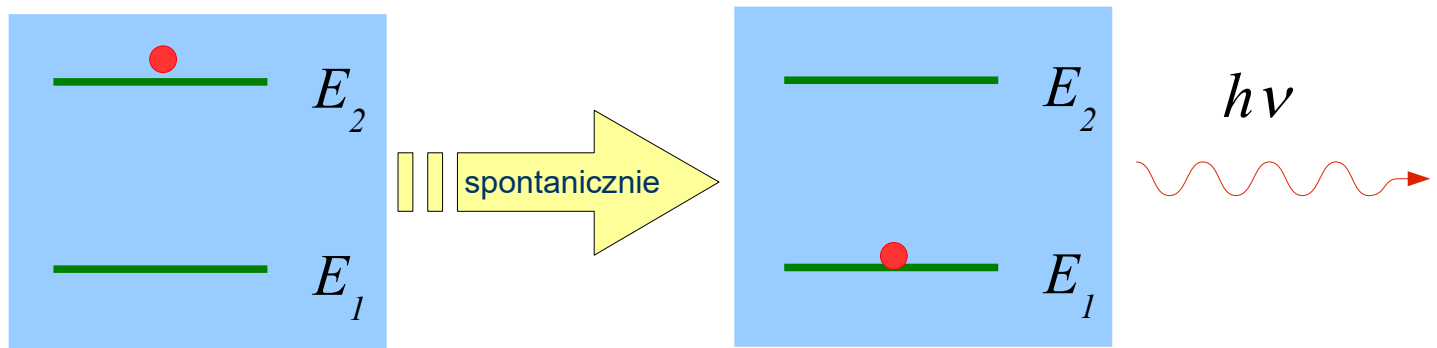
- Atomy mogą być w różnych stanach energetycznych
 - Jeśli elektrony obsadzają stany energetyczne w ten sposób że atom ma najmniejszą z możliwych energii to wtedy **atom taki jest w stanie podstawowym** o energii E_1
 - Jeśli z jakichś powodów atom ma większą energię (tzn. np. jego niektóre elektrony zajmują wyższe stany energetyczne, pozostawiając „luki” w niższych stanach) wówczas mówimy że **atom jest w stanie wzbudzonym** o energii E_2
- Procesy które mogą zmieniać stan atomu:
 - ♦ **Absorpcja kwantu promieniowania** - atom jest w polu e.-m. i może pochłonąć porcję energii $h\nu$



wówczas zasada zachowania energii: $h\nu = E_2 - E_1$

Jak działa laser?

- Procesy które mogą zmieniać stan atomu:
 - **Spontaniczna emisja** - atom w stanie wzbudzonym po pewnym czasie spontanicznie przechodzi do stanu podstawowego, proces ten **nie jest** stymulowany z zewnątrz.



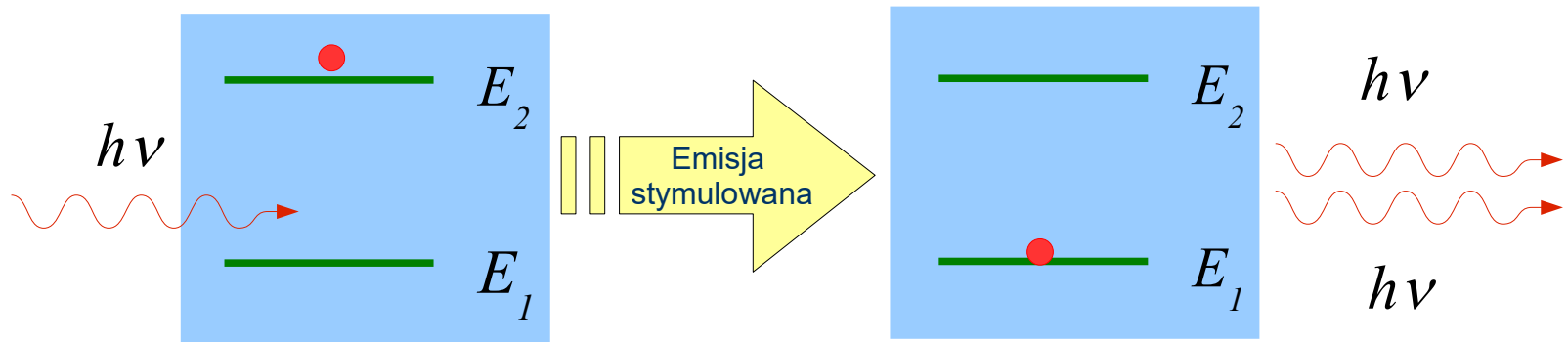
Zasada zachowania energii wymaga aby atom wypromieniował nadmiar energii o wartości:

$$h\nu = E_2 - E_1$$

Jak działa laser?

- Procesy które mogą zmieniać stan atomu:

Wymuszona emisja - atom jest ponownie w stanie wzbudzonym i pozostaje w tym stanie przez pewien czas. Jeśli w tym momencie wokół atomu istnieje promieniowanie e-m. o częstotliwości $\nu = (E_2 - E_1)/h$ może ono „pobudzić” atom do „spadku” na poziom podstawowy. W ten sposób atom emituje promieniowanie dokładnie takie samo jak promieniowanie padające (zgodne co do energii, kierunku, fazy, częstotliwości, polaryzacji) – emitowany foton jest taki sam jak foton padający



Jak działa laser ?- „Inwersja obsadzeń”

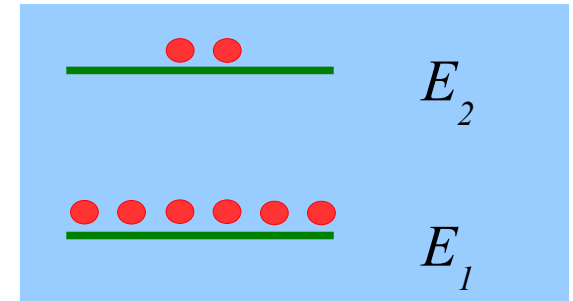
- Jeśli zbiór atomów jest w stanie równowagi termodynamicznej, to liczba atomów które są w stanie energetycznym E_2 , jest dana przez rozkład Boltzmana.

$$\frac{N_2}{N_1} = e^{-(E_2 - E_1)/kT}$$

- ♦ Zatem więcej jest atomów w stanie E_1 niż w stanie E_2 , czyli $N_1 > N_2$
- ♦ Trzeba znaleźć sposób aby „przepompować” jak najwięcej atomów od stanu podstawowego do stanu wzbudzonego. Mówimy, że trzeba doprowadzić do tzw. „inwersji obsadzeń”.

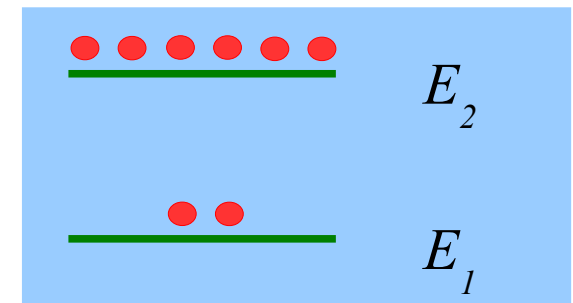
Pompowanie lasera odbywa się poprzez

- błysk lampy błyskowej (flesza),
- błysk innego lasera,
- przepływ prądu (wyładowanie) w gazie,
- reakcję chemiczną,
- zderzenia atomów,
- wstrzelenie wiązki elektronów do substancji.



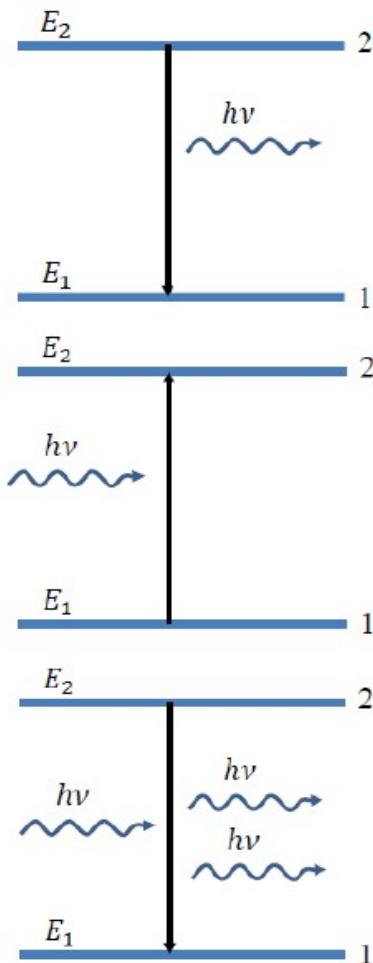
każda kropka oznacza jeden atom w stanie energetycznym E

Stan równowagi w pewnej temperaturze $T > 0$, rozłożenie atomów pomiędzy stany E_1 i E_2



„Inwersja obsadzeń” pomiędzy stanami E_1 i E_2 uzyskana specjalnym sposobem – to jest zasadniczo ważne w działaniu lasera – tzw. **pompowanie lasera**

Absorpcja i emisja fotonu przez atom, który ma dwa poziomy energii



$$h\nu = E_2 - E_1$$

$$h = 6,63 \times 10^{-34} \text{ J s}$$

Emisja spontaniczna

A_{21} – prawdopodobieństwo emisji fotonu przez atom w stanie E_2 w ciągu sekundy
(liczba przejść w jednostce czasu)

$t_s = 1/A_{21}$ – oznacza średni czas trwania stanu wzbudzonego

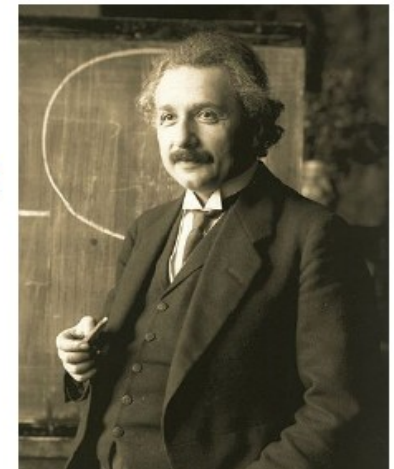
Absorpcja (wymuszona)

$B_{12}u(\nu)$ – prawdopodobieństwo absorpcji fotonu z promieniowania padającego o gęstości energii $u(\nu)$ przez atom w stanie E_1 w ciągu sekundy

Emisja wymuszona

$B_{21}u(\nu)$ – prawdopodobieństwo emisji fotonu przez atom w stanie E_2 w ciągu sekundy pod wpływem promieniowania padającego o gęstości energii $u(\nu)$

A_{21}, B_{21}, B_{12} – współczynniki wprowadzone przez Einsteina w 1917 r.

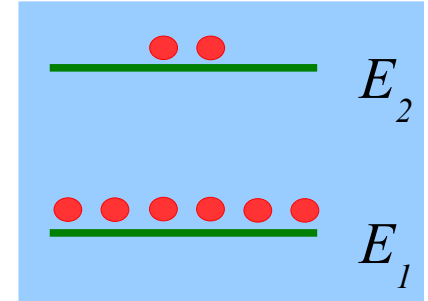


Absorpcja i emisja fotonu przez atom, który ma dwa poziomy energii

Bilans obsadzenia poziomów energii E_1 i E_2 w obecności promieniowania o gęstości energii $u(\nu)$:

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

N_2 i N_1 – liczby atomów w stanie o energii odpowiednio E_2 i E_1



Stosunek liczb atomów w stanach o energii E_1 i E_2 w równowadze termodynamicznej w temperaturze T opisuje rozkład kanoniczny Boltzmanna:

$$\frac{N_1}{N_2} = e^{(E_2 - E_1)/(k_B T)} = e^{(h\nu)/(k_B T)}$$

$$k_B = 1,38 \times 10^{-23} \text{ J/K}$$

Równowaga termodynamiczna atomów i promieniowania

Gęstość energii promieniowania w równowadze z układem atomów:

$$u(\nu) = \frac{N_2 A_{21}}{N_1 B_{12} - N_2 B_{21}} = \frac{A_{21}/B_{21}}{\frac{N_1 B_{12}}{N_2 B_{21}} - 1} = \frac{A_{21}/B_{21}}{\frac{B_{12}}{B_{21}} \exp\left(\frac{h\nu}{k_B T}\right) - 1}$$

Powinna być zgodna z rozkładem Plancka promieniowania ciała doskonale czarnego w temperaturze T :

$$u(\nu, T) d\nu = \frac{8\pi h \nu^3 d\nu}{c^3 \left[\exp\left(\frac{h\nu}{k_B T}\right) - 1 \right]}$$

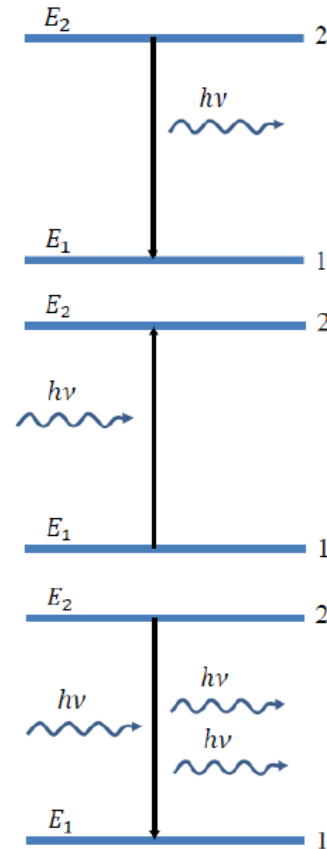
Zatem współczynniki Einsteina spełniają związki:

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

W stanie równowagi:

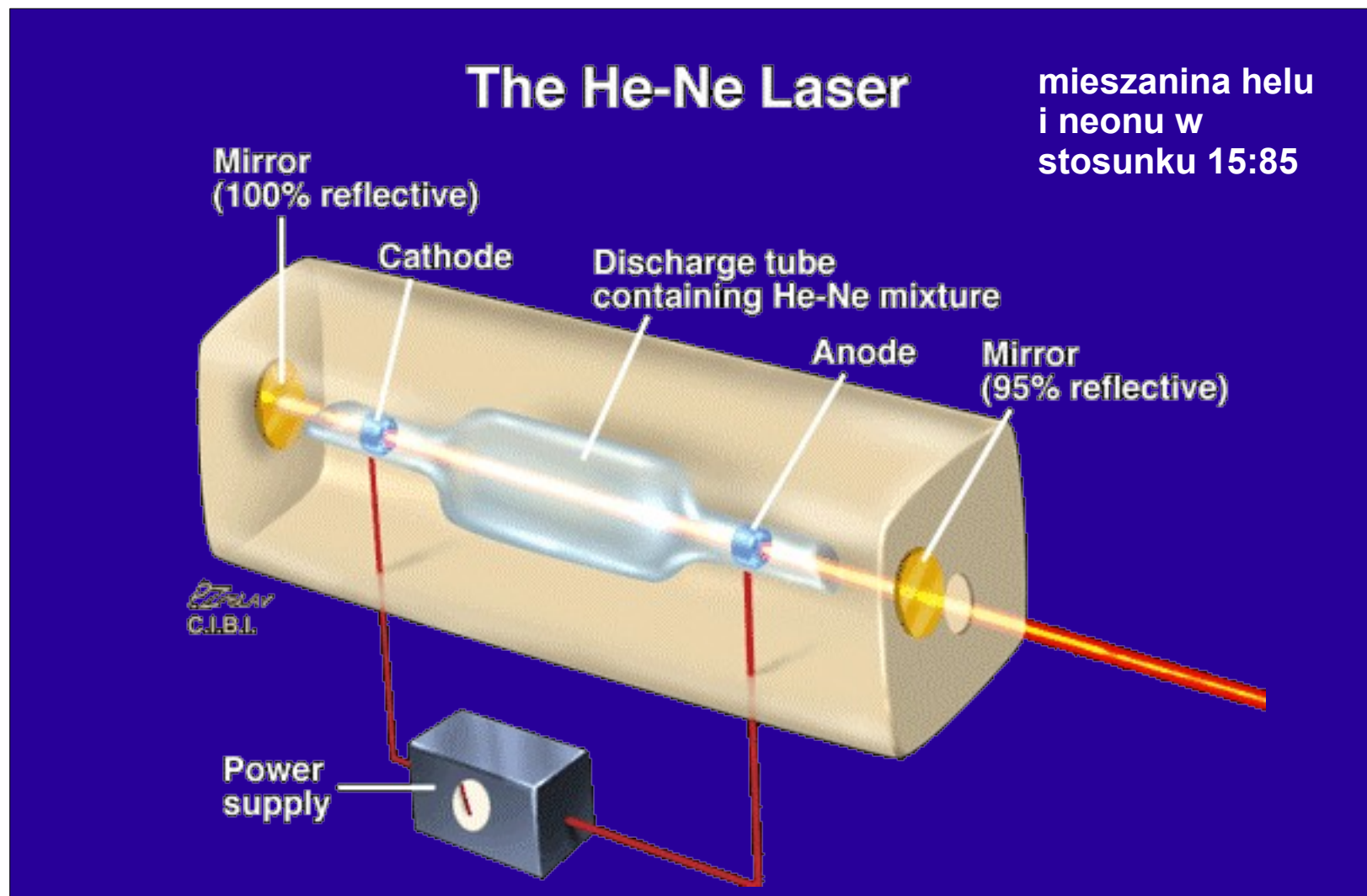
$$\text{absorpcja } N_1 B_{12} u(\nu) \gg N_2 B_{21} u(\nu) \text{ emisja wymuszona,}$$

bo $N_1 \gg N_2$ – dlatego dla działania lasera konieczne jest wytworzenie inwersji obsadzeń $N_1 < N_2$

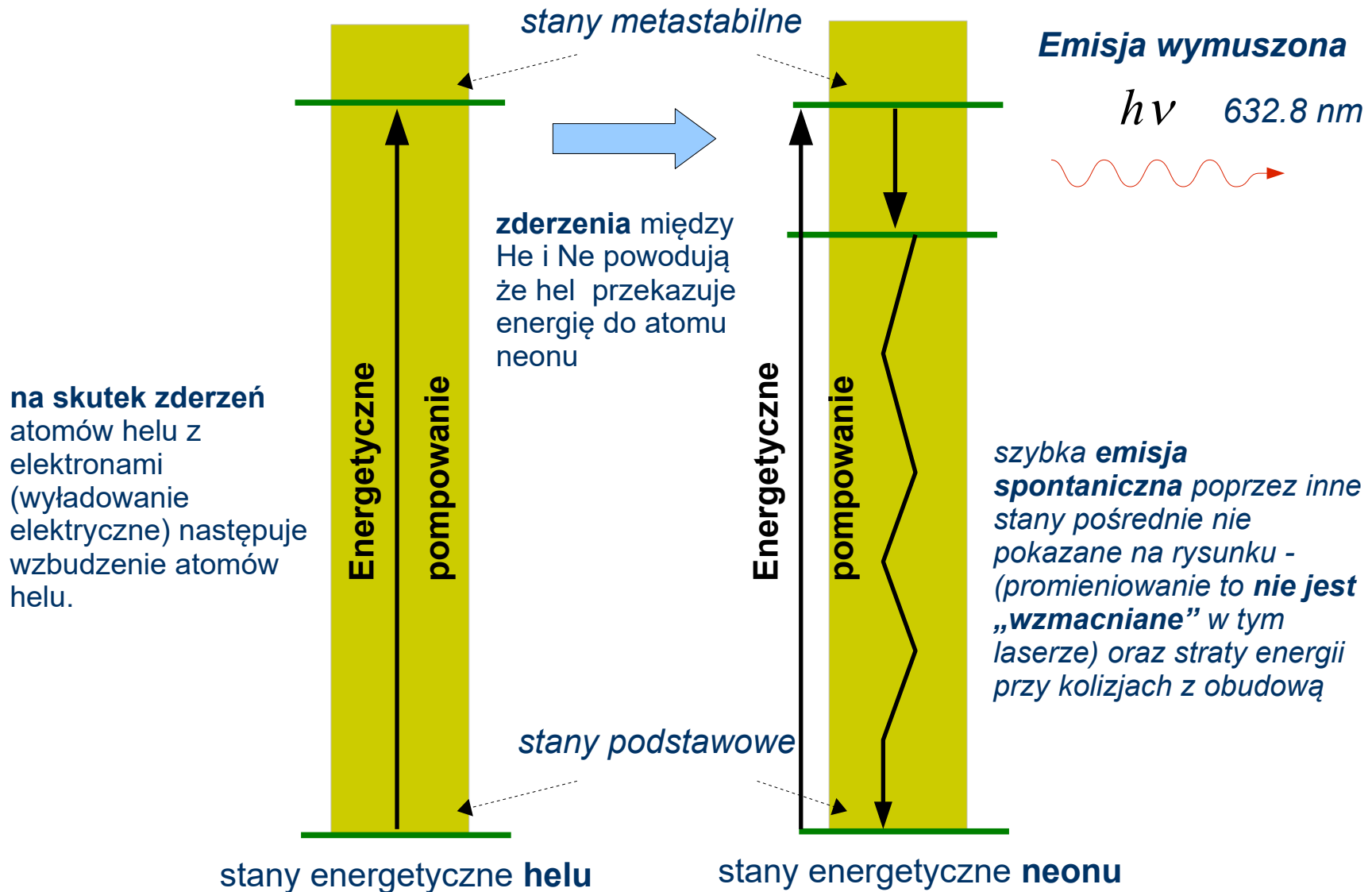


Lasery – przykład laser helowo-neonowy

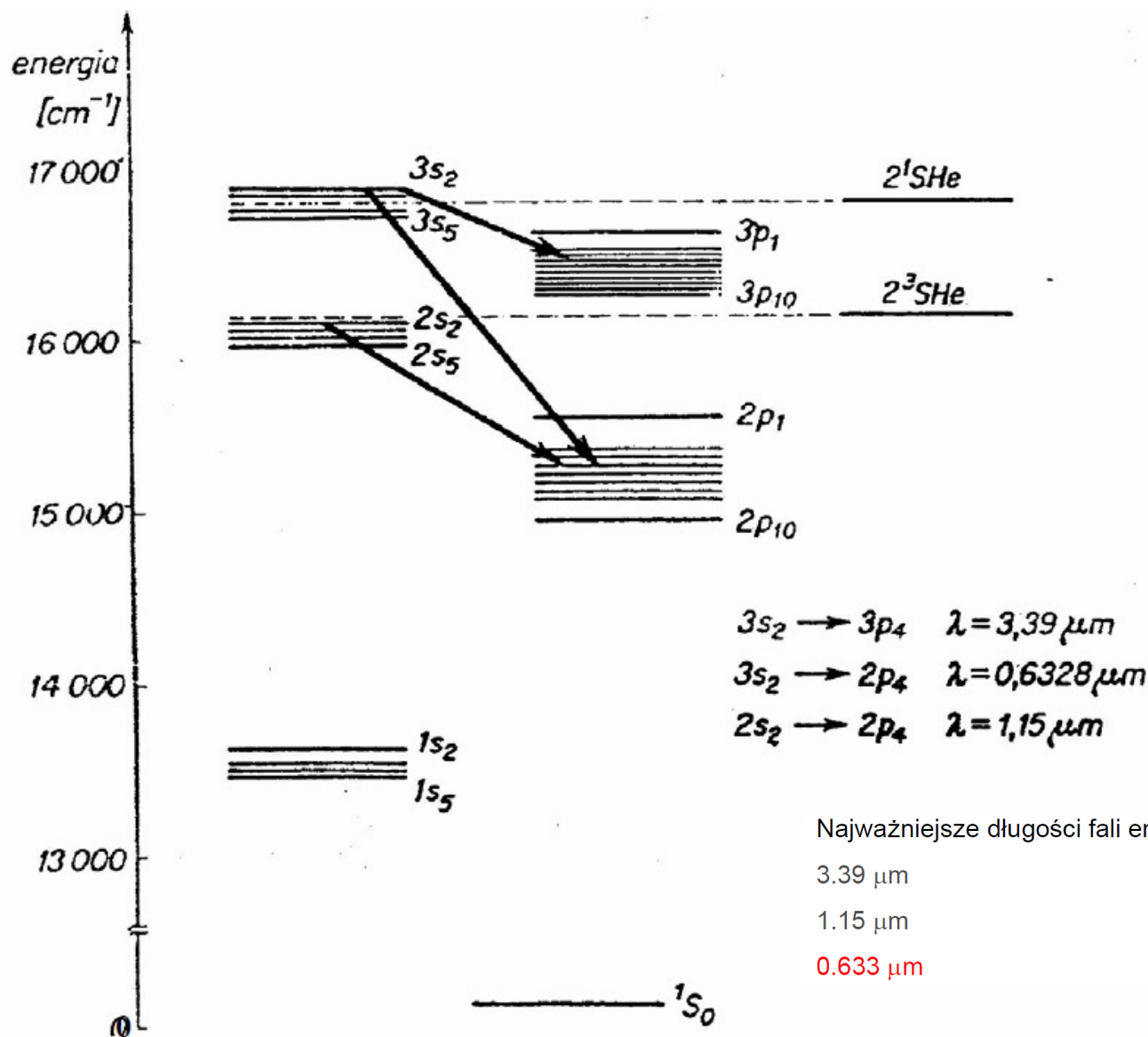
(1961r. pierwszy laser emitujący wiązkę ciągłą)



Lasery – przykład laser helowo-neonowy



Schemat wybranych poziomów energetycznych neonu oraz koincydencyjnych z nimi poziomów helu



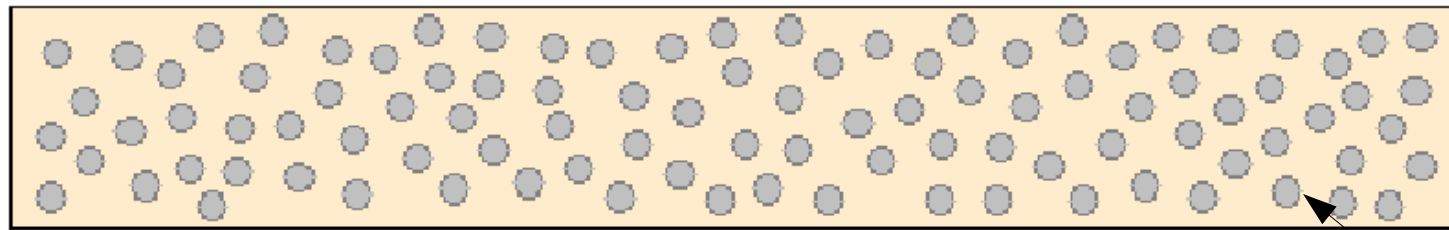
Jak działa laser ?

Zwierciadło 1
(100% odbicia –
całkowite odbicie)

Rezonator optyczny lasera

Zwierciadło 2
(<100% odbicia) -
częściowo
przepuszczalne

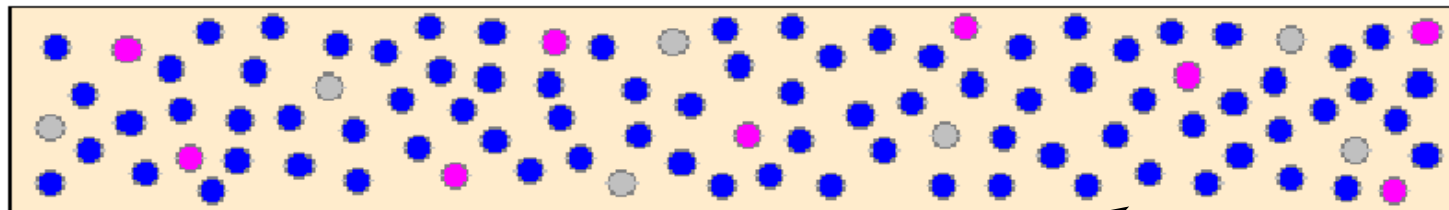
Świejące medium (gaz, kryształ albo ciecz)



Pompowanie energetyczne (optycznie, elektrycznie lub chemicznie)



atomy w stanie podstawowym

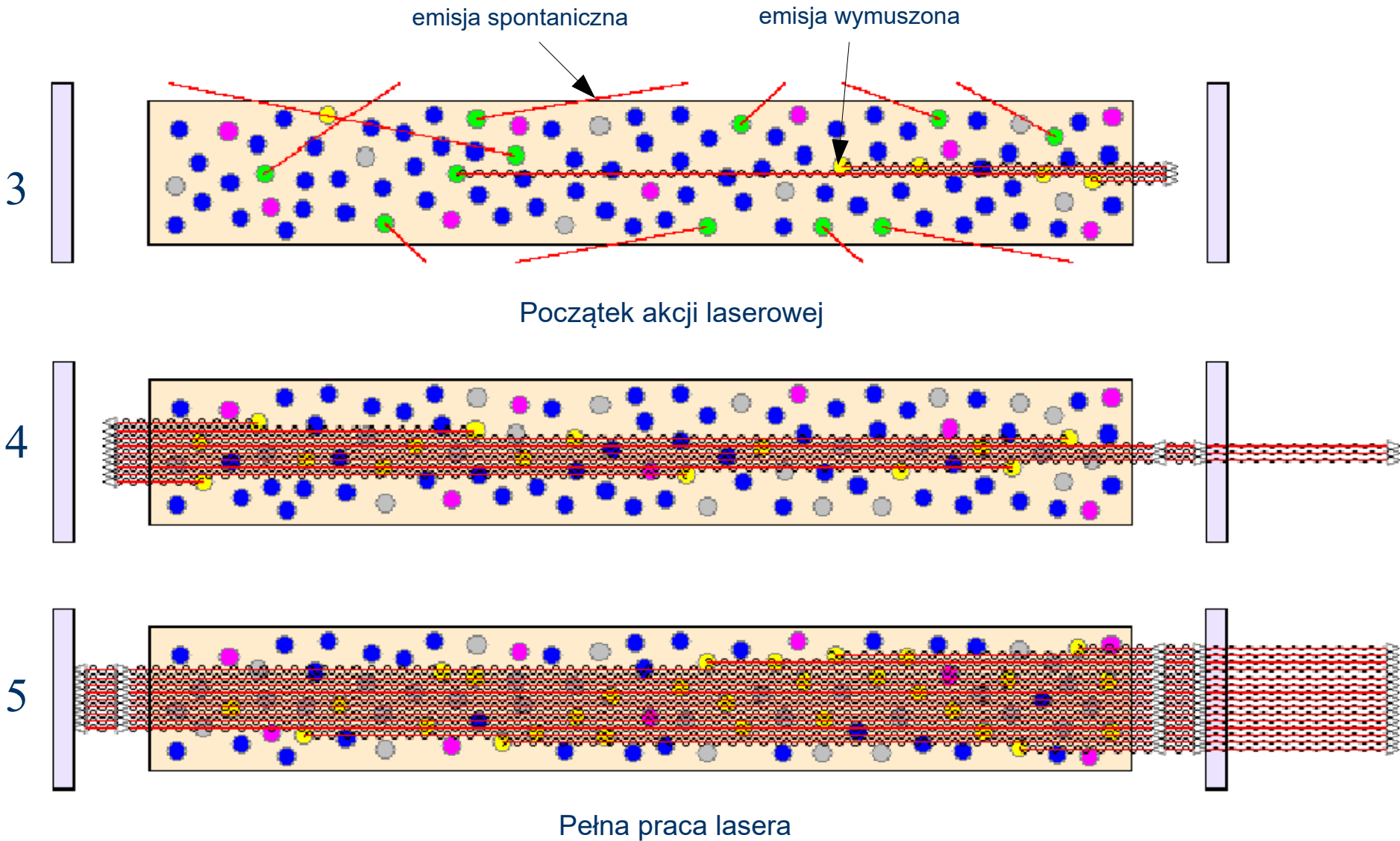


atomy w stanie E1

atomy w stanie E2

Odległość między zwierciadłami nie jest dowolna! - odpowiada wielokrotności dł. fali emitowanej z lasera tak aby w rezonatorze mogły powstać fale stojące

Jak działa laser ?



Rezonator optyczny

Funkcje rezonatora optycznego:

- **Wprowadzenie dodatniego sprzężenia zwrotnego** do układu wzmacniającego. Sprzężenie zwrotne polega na częściowym odbiciu wiązki promieniowania od zwierciadeł rezonatora z powrotem do ośrodka wzmacniającego.
- **Wzbudzenie pola elektromagnetycznego** tylko o takich częstotliwościach ν dla których spełniony jest warunek:

$$L = n \frac{\lambda}{2} \quad \longrightarrow \quad \nu = n \frac{v}{2L}$$

- **Uzyskanie kierunkowości** promieniowania.

L - długość rezonatora,
 n - liczba całkowita,
 λ - długość fali w
rezonatorze,
 v - prędkość fali w
rezonatorze

Bilans strat energii i wzmocnienia światła podczas akcji laserowej

W rezonatorze optycznym natężenie promieniowania maleje z czasem zaniku τ_w

$$I(t) = I_0 \exp\left(-\frac{t}{\tau_w}\right)$$

Strata natężenia na jednostkę czasu:

$$\left[\frac{dI}{dt}\right]_{strata} = -\frac{I}{\tau_w}$$

Wzrost natężenia promieniowania w ośrodku czynnym lasera wynika z przewagi emisji wymuszonej nad absorpcją po osiągnięciu inwersji obsadzeń

$$\left[\frac{dI}{dt}\right]_{zysk} = \frac{h\nu c}{V} (N_2 - N_1) \frac{2}{\pi\Delta\nu} u(\nu) B_{21}$$

gdzie $\Delta\nu$ szerokość linii widmowej przejścia $E_2 \rightarrow E_1$

$\frac{h\nu c}{V}$ natężenie promieniowania jednego fotonu w objętości V

Bilans strat energii i wzmocnienia światła podczas akcji laserowej

Biorąc pod uwagę związek gęstości energii z natężeniem promieniowania $I(\nu) = u(\nu)c$ i związek między współczynnikami Einsteina

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

oraz oznaczając: $n_1 = N_1/V$, $n_2 = N_2/V$, $A_{21} = 1/\tau_s$

otrzymujemy warunek wystąpienia akcji laserowej

$$\left[\frac{dI}{dt} \right]_{\text{zysk}} \geq \left[\frac{dI}{dt} \right]_{\text{straty}}$$

w postaci wyrażenia:

$$(n_2 - n_1) \frac{c^3 I}{4\pi^2 \nu^2 \Delta \nu \tau_s} \geq \frac{I}{\tau_w}$$

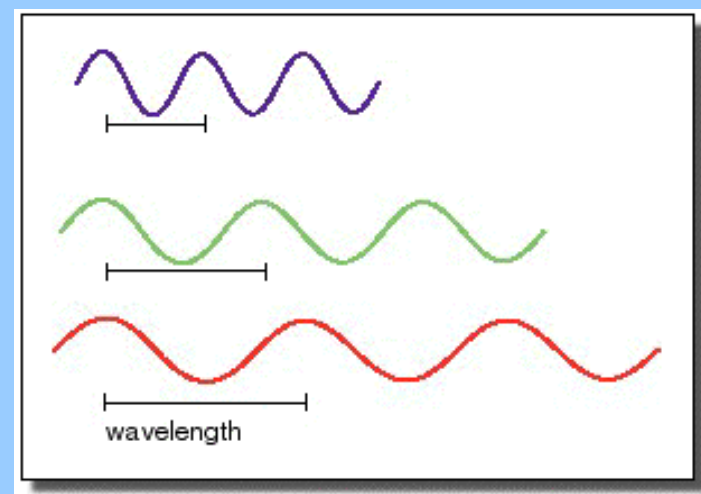
co daje progową wartość inwersji obsadzeń

$$\Delta n_p = \frac{4\pi^2 \nu^2 \Delta \nu \tau_s}{c^3 \tau_w}$$

Wartość progową inwersji obsadzeń można obniżyć zwiększając czas zaniku τ_w , czyli zmniejszając straty promieniowania w rezonatorze optycznym, np. stosując zwierciadła o większym współczynniku odbicia. Korzystne jest też zmniejszenie szerokości linii widmowej $\Delta \nu$ przez rezonator optyczny o bardzo wąskiej linii rezonansu.

Różne lasery i ich emitowane dł. fal

Typ lasera	dł. fali	μm
Fluorek Argonu (ultrafiolet)		0.193
Chlorek Ksenonu (ultrafiolet)		0.308
Fluorek Ksenonu (ultrafiolet)		0.351
Azot		0.337
Hel Kadm (fiolet)		0.441
Krypton (niebieski)		0.476
Argon (niebieski)		0.488
miedź - opary (zielony)		0.514
Hel Neon (zielony)		0.543
Krypton (żółty)		0.568
miedź - opary (żółty)		0.570
Hel Neon (żółty)		0.594
Hel Neon (pomarańczowy)		0.610
Hel Neon (czerwony)		0.633
Hel Neon (bliska-podczerwień)		1.15
Erb (bliska-podczerwień)		1.504
CO2 (daleka-podczerwień)		10.6



ultrafiolet	0.200-0.400 μm
widzialne	0.400-0.700 μm
bliska-podczerwień	0.700-1.400 μm

To samo „laserowe medium” może emitować różne dł. fal – w zależności na jaką dł. fali jest ustawiony rezonator

(nie uwzględniono laserów półprzewodnikowych)

Typy laserów ze względu na medium

- **Lasery gazowe:**

- He-Ne helowo-neonowy (543 nm lub 633 nm)

- Ar argonowy (jonowy) (458 nm, 488 nm lub 514,5

- nm)

- na dwutlenku węgla

- na tlenku węgla

- **Lasery na ciele stałym**

- rubinowy

- neodymowy na szkle

- neodymowy na YAG-u (Nd:YAG)

- erbowy na YAG-u (Er:YAG) (1645 nm)

- tulowy na YAG-u (Tm:YAG) (2015 nm)

- holmowy na YAG-u (Ho:YAG) (2090 nm)

- tytanowy na szafirze (Ti:szafir)

- **Lasery na cieczy**

- barwnikowe - ośrodkiem czynnym są barwniki rozpuszczone w nieaktywnym ośrodku przezroczystym np. rodamina

- **Lasery półprzewodnikowe**

- złączowe

- + na materiale objętościowym

- + na studniach kwantowych

- + na kropkach kwantowych

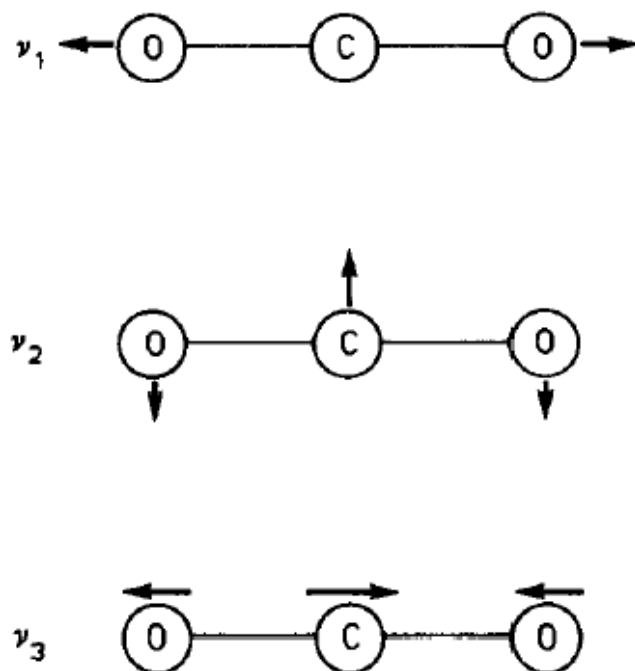
- bezzłączowe

- + kwantowy laser kaskadowy

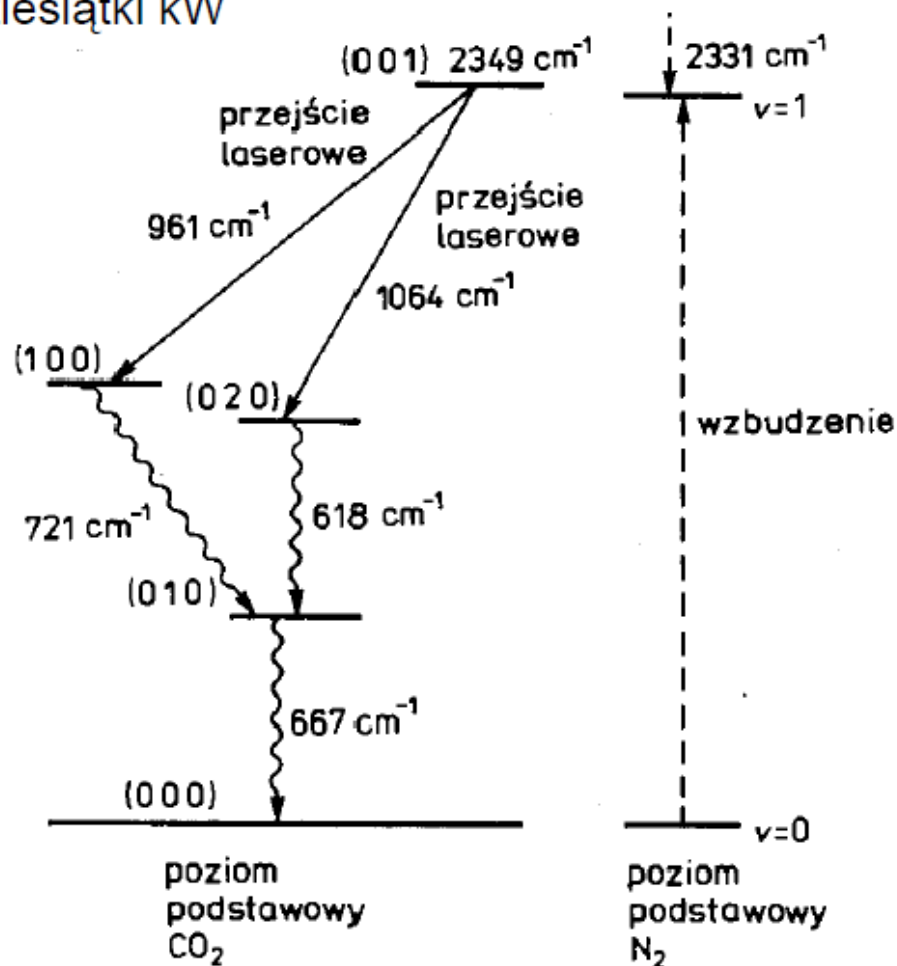
Laser molekularny na CO₂

Długość fali 10,6 μm - podczerwień

Praca ciągła lub impulsowa, duża moc – dziesiątki kW

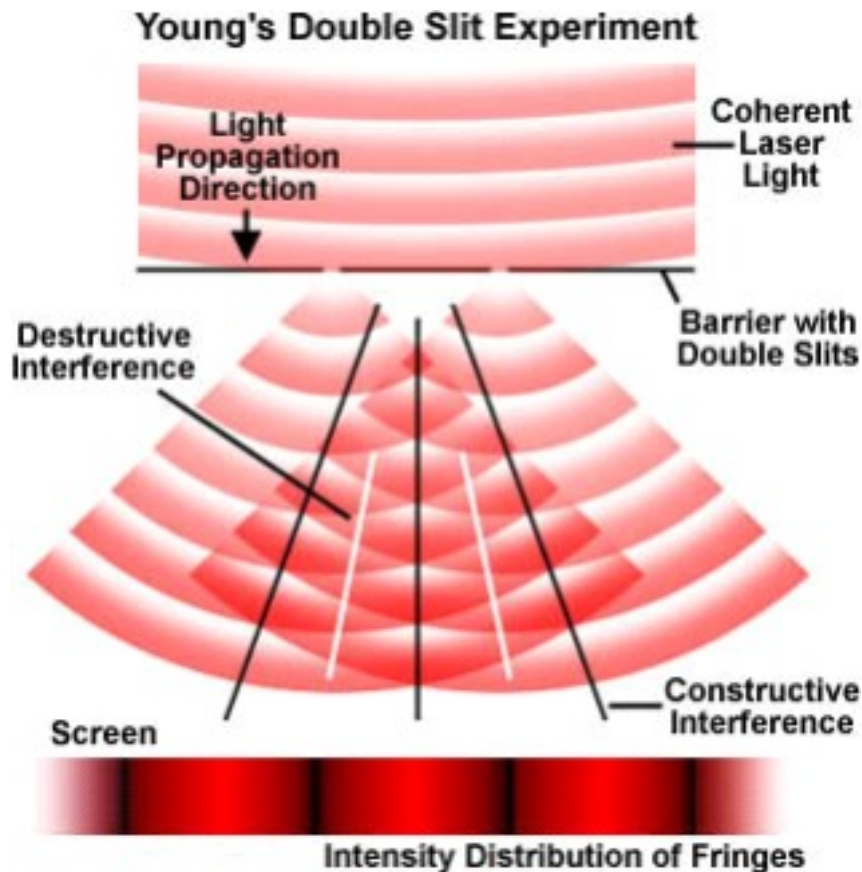


Rys. 1.3. Trzy mody oscylacyjne cząsteczki CO₂.



Rys. 1.4. Schemat poziomów energetycznych w laserze CO₂.

Interferencja



Interferencja światła przechodzącego przez dwie małe szczeliny.

← Zgodnie z zasadą Huygensa szczeliny są można uważać za źródła nowych fal kulistych.

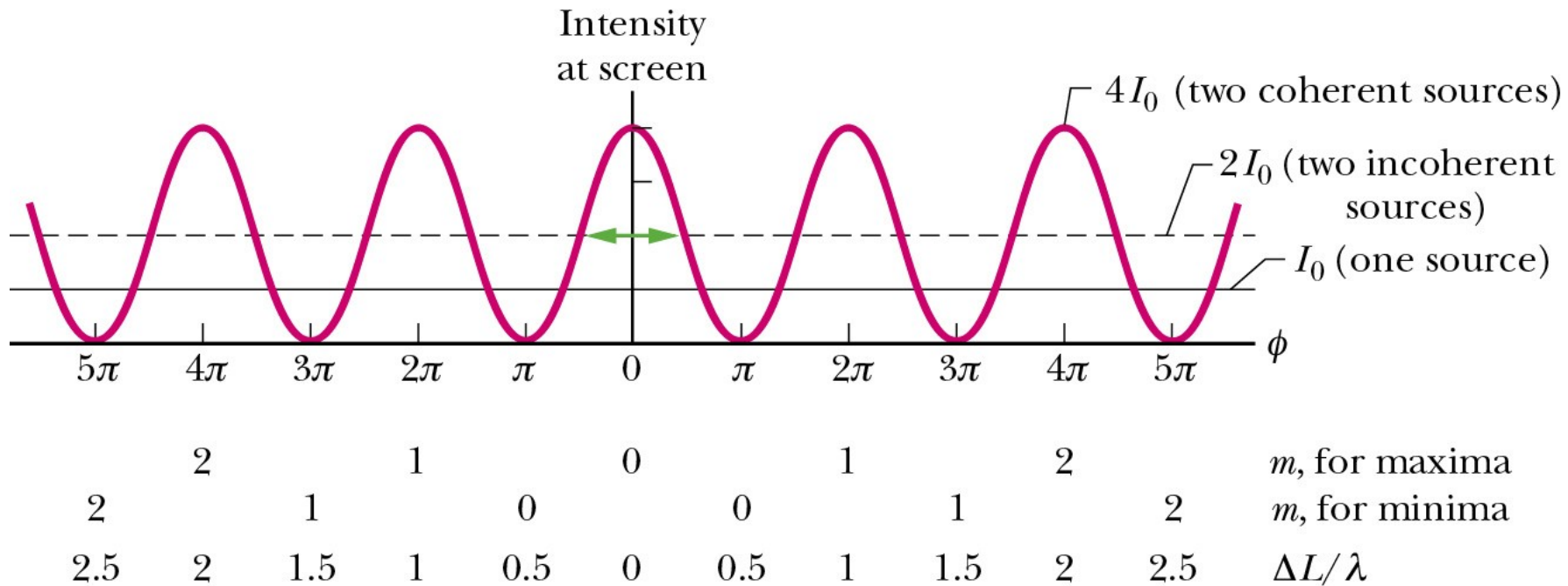
← Taki efekt jest obserwowany gdy padające światło jest spójne (koherentne) i monochromatyczne (takie światło daje laser)

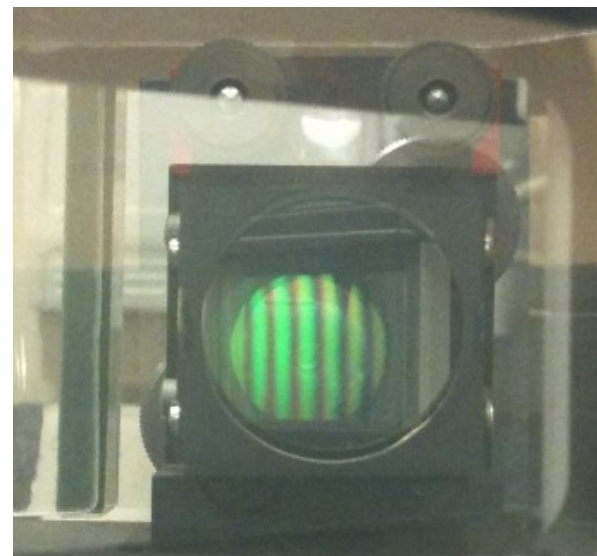
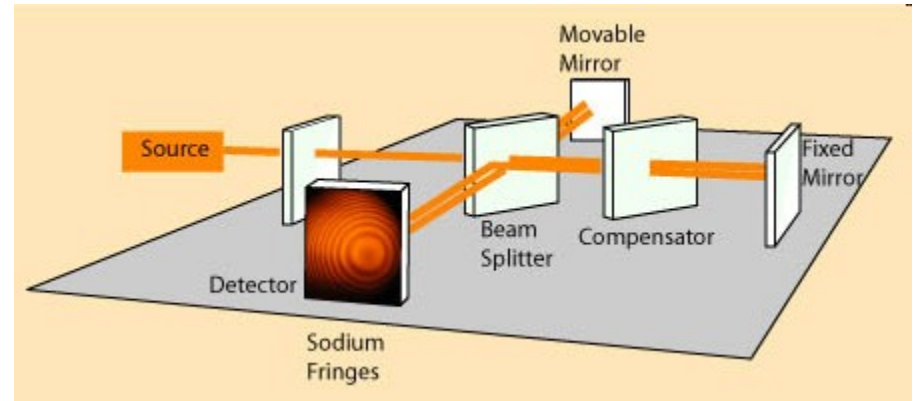
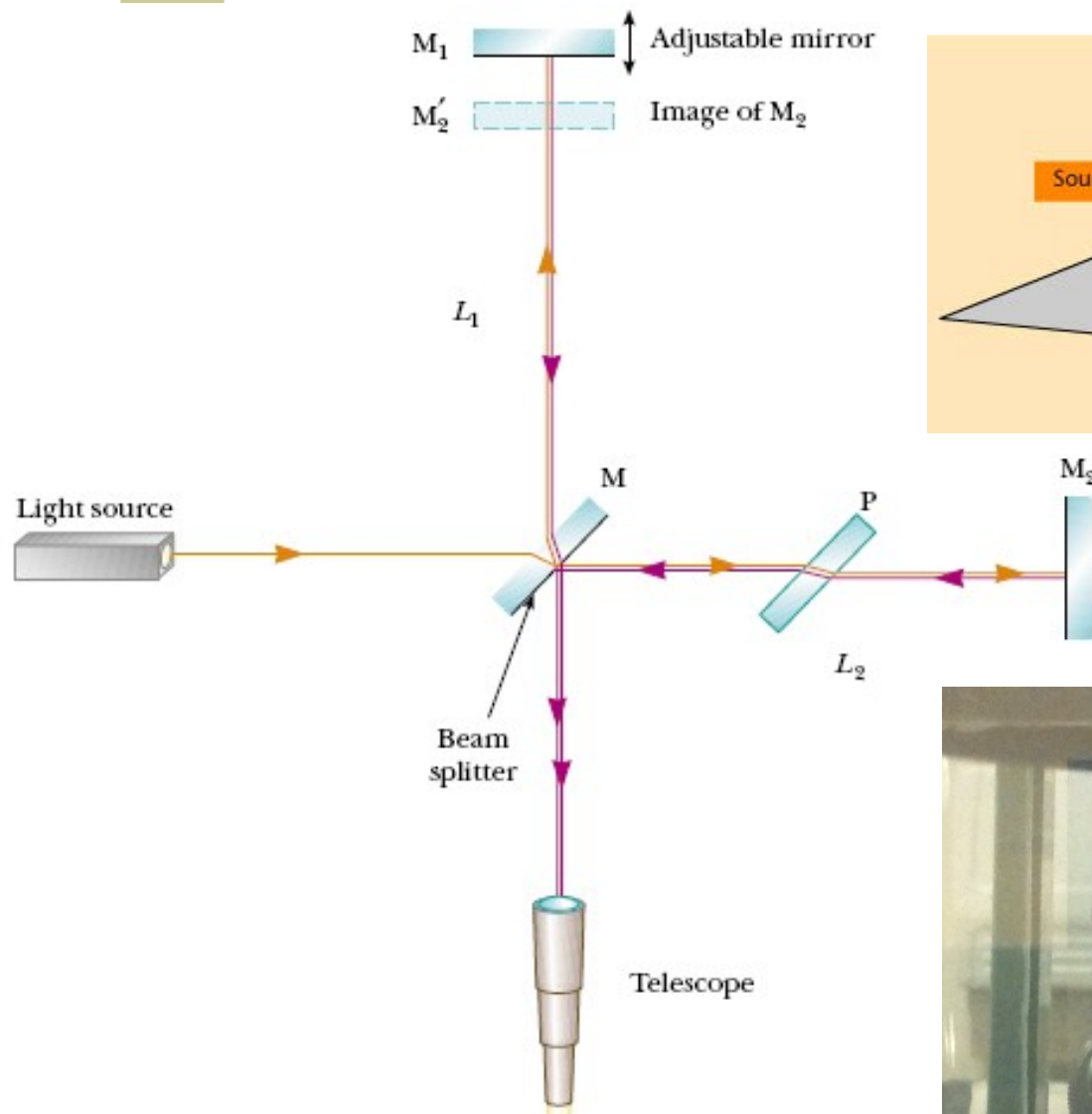
Interferencja światła na dwóch szczelinach

Interferencja światła przechodzącego przez dwie małe szczeliny – **obserwowana intensywność światła**

$$I = 4I_0 \cos^2 \frac{1}{2} \phi$$

$$\phi = \frac{2\pi d}{\lambda} \sin \theta$$





Obraz interferencyjny jest wyraźny
jeśli różnica dróg ΔL
rozdzielonych promieni jest
mniejsza od drogi spójności L_C

$$\Delta L < L_C = c \Delta t_{\text{koh}}$$

Δt_{koh} – czas spójności

Typowe drogi spójności:

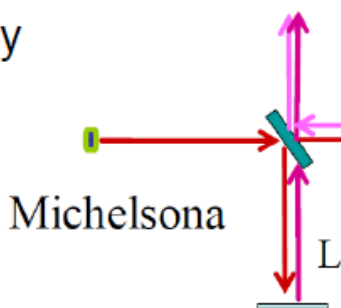
światło białe $L_C \approx 0,001 \text{ mm}$

dioda świecąca LED $L_C \approx 0,03 \text{ mm}$

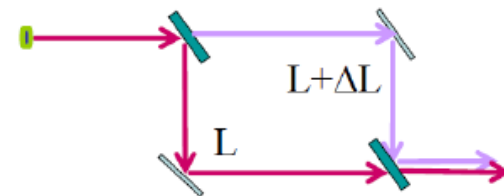
laser półprzewodnikowy $L_C \approx 3 \text{ mm}$

laser He-Ne $L_C \approx 300 \text{ m}$

Interferometry

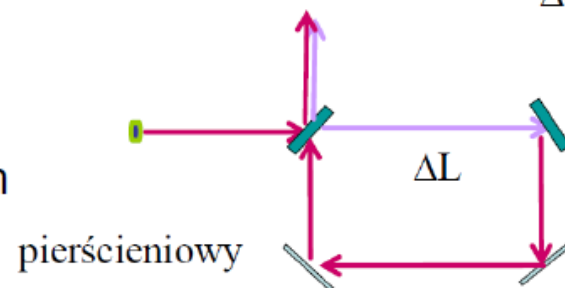


Michelsona

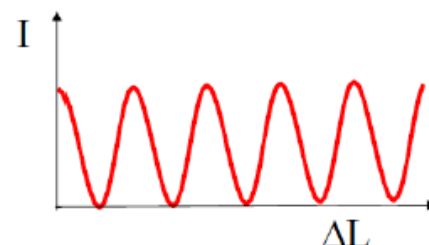


Macha-Zehndera

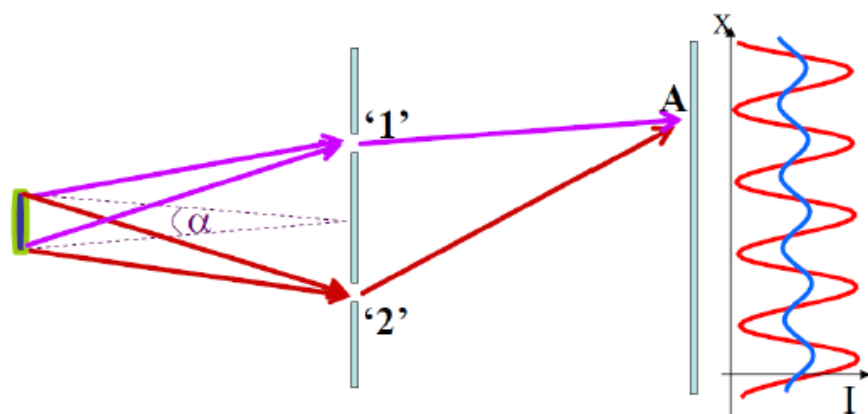
$$\Delta \phi \propto \Delta L$$



pierścieniowy



Interferencja światła (interferometr Younga)



Spójność przestrzenna –
między falami emitowanymi z różnych
punktów źródła

Stopień spójności (koherencji) światła γ
widzialność prążków interferencyjnych

$$\gamma = \frac{I_{\text{max}} - I_{\text{min}}}{I_{\text{max}} + I_{\text{min}}}$$

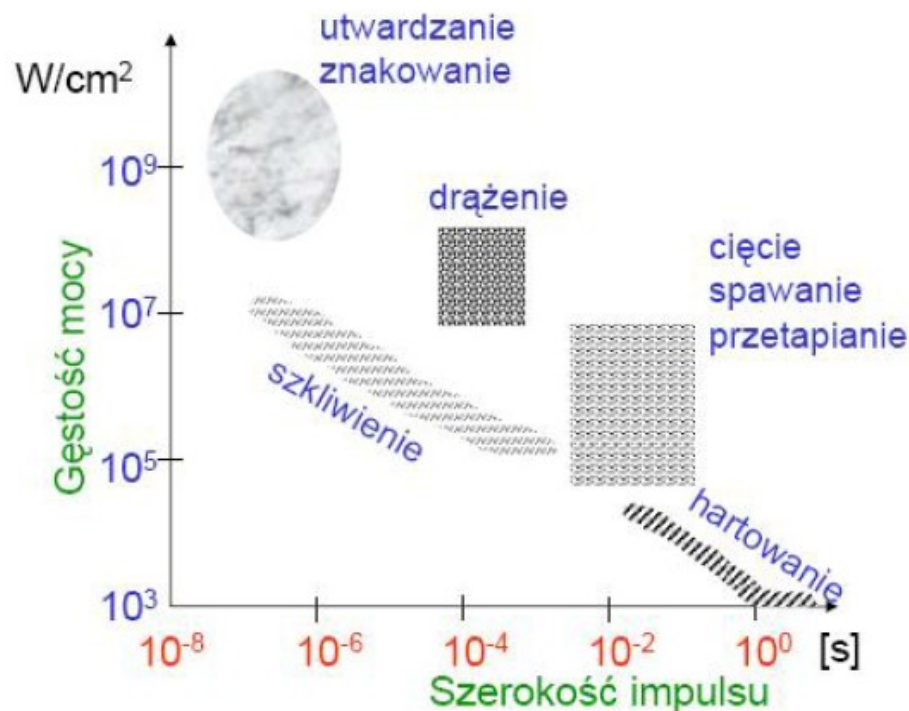
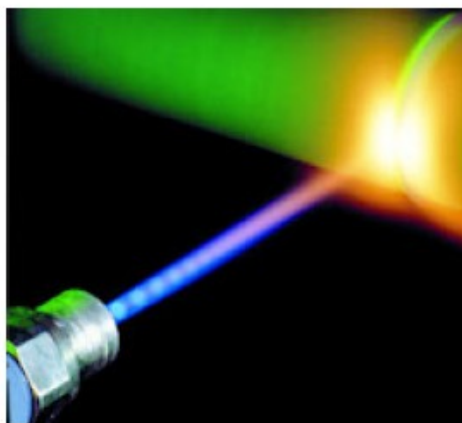
$\gamma = 1$ idealnie spójne

$\gamma = 0$ niespójne - prążki niewidoczne

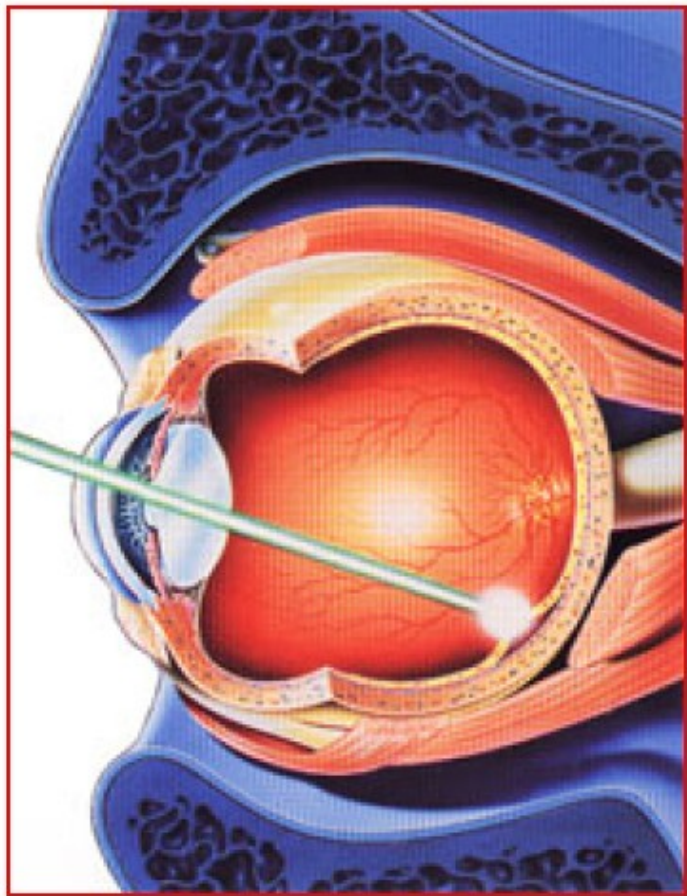
$0 < \gamma < 1$ częściowo spójne

Zastosowanie laserów w przemyśle

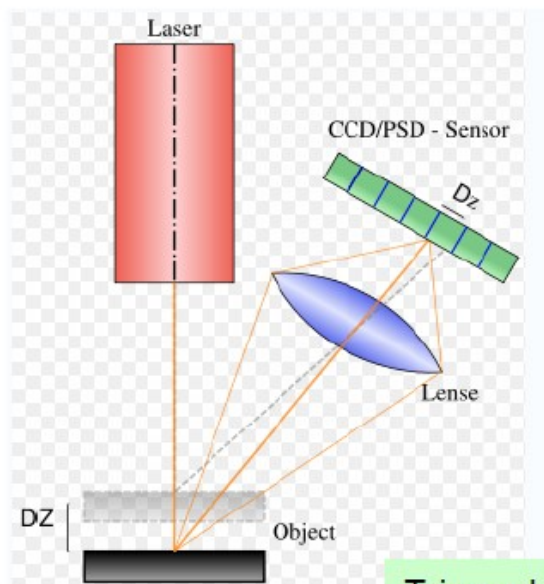
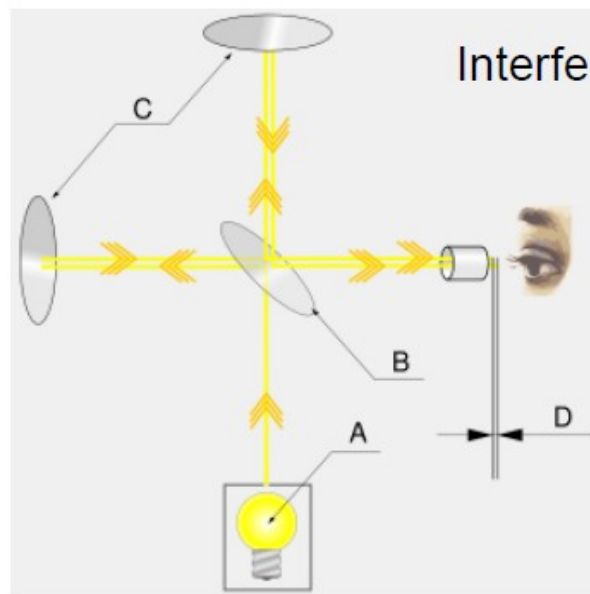
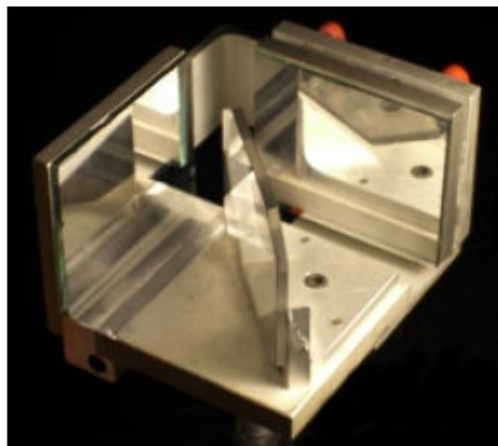
- wzbogacanie warstwy przypowierzchniowej w składniki stopowe
- nakładanie warstwy przypowierzchniowej (natapianie)
- stapianie warstwy powierzchniowej
- obróbka powierzchniowa
- drażenie otworów
- cięcie
- spawanie
- znakowanie
- hartowanie



Zastosowanie laserów w medycynie



Pomiar przesunięcia i odległości

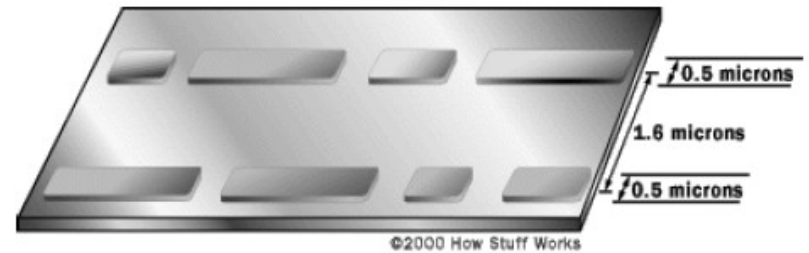
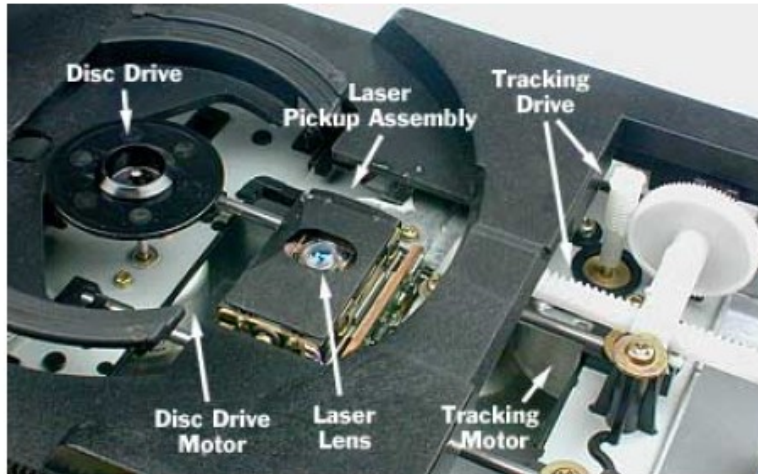


Triangulacja laserowa



Urządzenie geodezyjne LIDAR
– pomiar czasu przelotu

Zapis i odczyt danych



CD vs. DVD vs. Blu-ray Writing

Single-sided, single layer (4.7GB)



Single-sided, double layer (8.5GB)



Double-sided, double layer (17GB)



©2000 How Stuff Works

DVD

Blu-ray

CD	DVD	BD
780-nm Red Laser Lens Aperture = 0.45	650-nm Red Laser Lens Aperture = 0.6	405-nm Blue Laser Lens Aperture = 0.8
One 1.2-mm polycarbonate layer	Two 0.6-mm polycarbonate layers	One 1.1-mm polycarbonate layer
track pitch = 1.6µm	track pitch = .74µm	track pitch = .30µm

©2004 HowStuffWorks

Zastosowania: technika wojskowa



Działo laserowe na okręcie
Tactical High-Energy Laser THEL



Pomiar odległości do celu



Naprowadzanie rakiet na cel

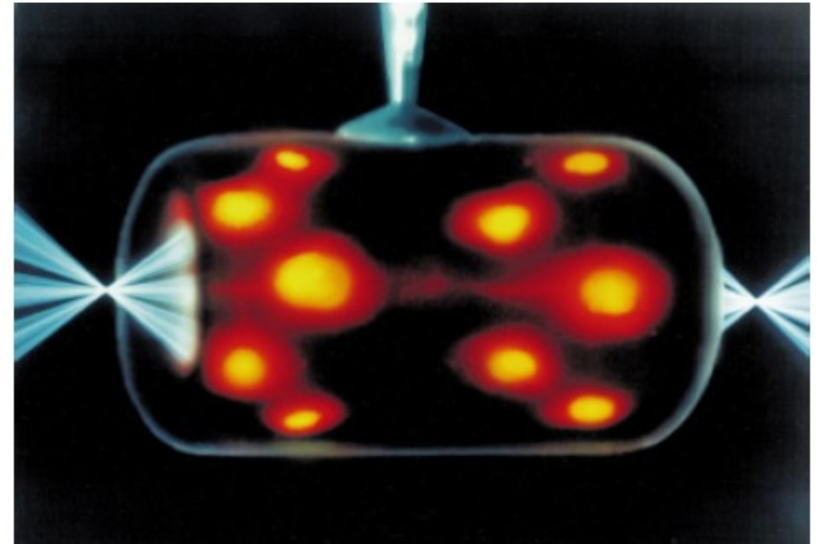


Samolot bezzałogowy
wyposażony w rakietę
naprowadzaną laserowo
Predator US Airforce

Kontrolowana mikrosynteza termojądrowa – utrzymywanie inercyjne plazmy

Inertial Confinement Fusion (ICF)

Lawrence Livermore National Laboratory USA



Lasery impulsowe dużej mocy – kapsułka z paliwem deuterowo-trytowym otrzymuje energię 200 kJ w czasie krótszym od 1 nanosekundy

