

Lasery

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

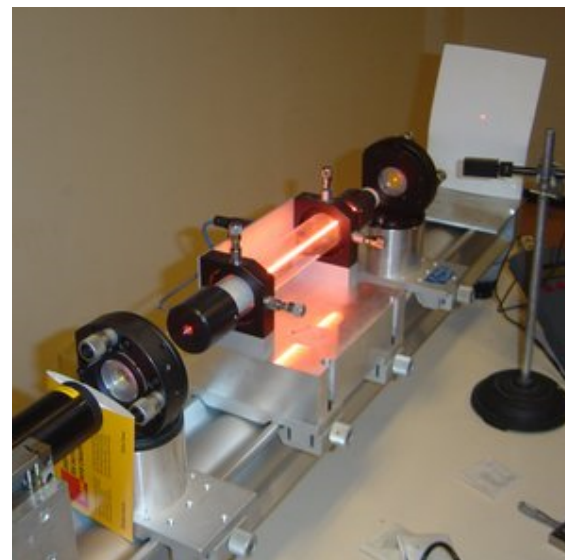
LASER (Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation)

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

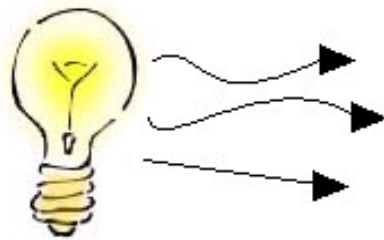


Najmniejsze mają rozmiar części milimetra i dają światło o mocy ok. 200 mW

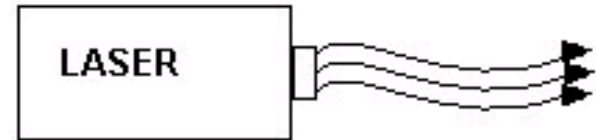
Największe, używane do wywołania reakcji jądrowych, mogą mieć moc impulsu świetlnego do ok. 10^{14} W

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

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

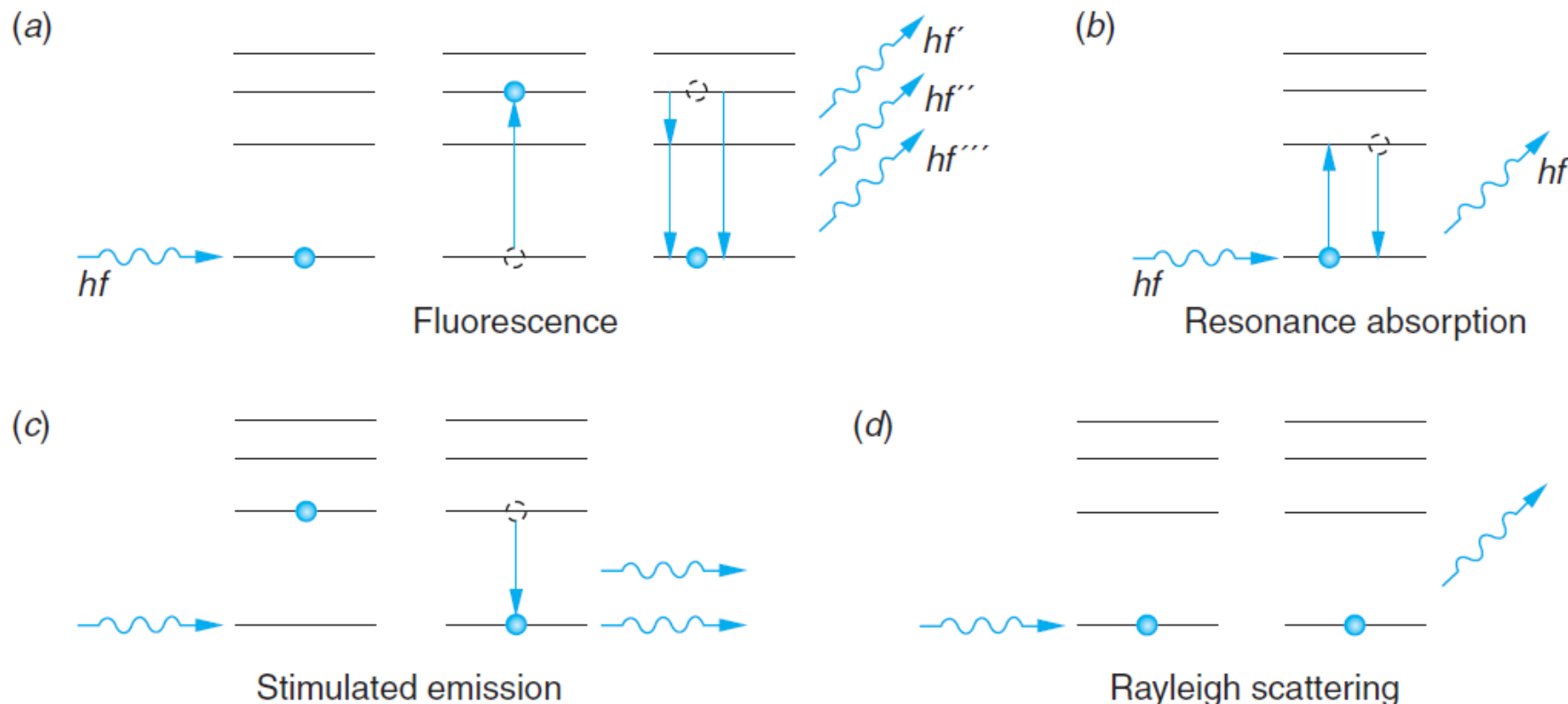
np. $\lambda = 0.5 \mu\text{m}$ (barwa zielona) $A = 5 \text{ mm}^2$;
 $\Delta\Omega = 10^{-8}$



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)

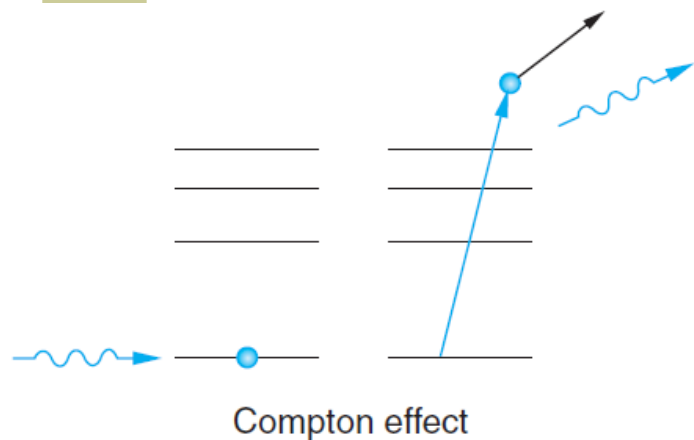
Oddziaływania fotonu z atomem lub cząsteczką

- 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
- Również cała cząsteczka może być w różnych stanach energetycznych
 - Energie drgań rotacyjnych i oscylacyjnych także są skwantowane.
 - Przechodzeniu cząsteczki ze stanu wzbudzonego o wyższej energii do stanu o niższej energii lub odwrotnie może towarzyszyć emisja lub absorpcja promieniowania elektromagnetycznego

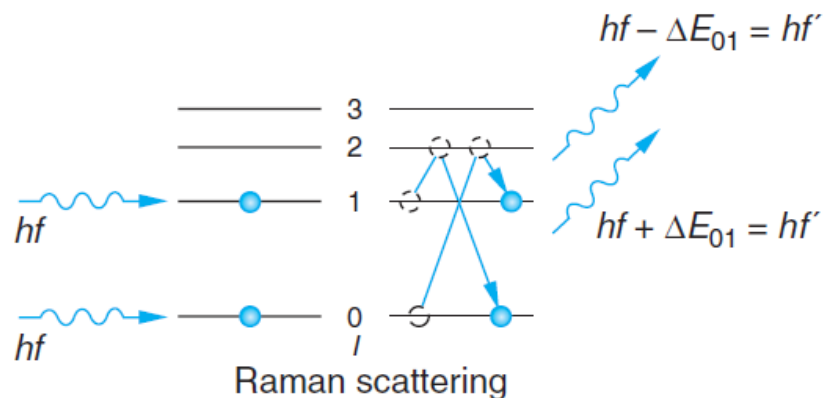


Rysunek 9.30. Oddziaływania fotonu z atomem. (a) Atom absorbuje foton, przechodzi do stanu wzbudzonego i po pewnym czasie emituje jeden lub kilka fotonów, przechodząc do stanu o niższej energii. Dwuetapowy proces tego typu nazywamy *fluorescencją*. Fotony początkowy i końcowy nie są ze sobą skorelowane. (b) Jeżeli energia fotonu dokładnie odpowiada energii wzbudzenia atomu, to występuje absorpcja i emisja rezonansowa. (c) Atom znajduje się w stanie wzbudzonym. Foton o odpowiedniej energii może wymusić przejście atomu do stanu o niższej energii. Fotony padający i emitowany przez atom mają taką samą energię i są spójne. Rozpraszanie Rayleigha (d) oraz rozpraszanie Ramana (f) różnią się od procesów (a) i (b) tym, że zachodzą jednoetapowo, a fotony padający i rozproszony są skorelowane. Na schematach (e) i (g) przedstawiono odpowiednio rozpraszanie komptonowskie oraz zjawisko fotoelektryczne, opisane w rozdziale 3.

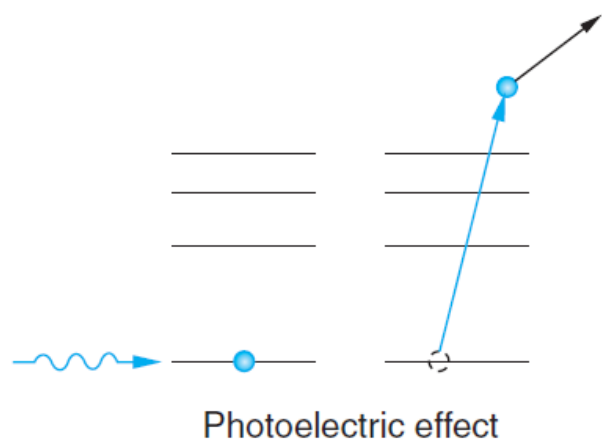
(e)



(f)



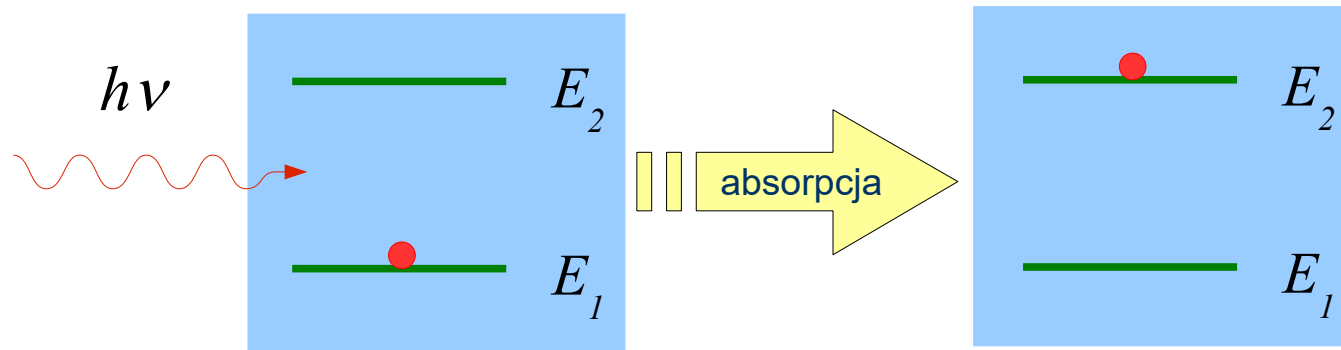
(g)



Rysunek 9.30. Oddziaływania fotonu z atomem. (a) Atom absorbuje foton, przechodzi do stanu wzbudzonego i po pewnym czasie emituje jeden lub kilka fotonów, przechodząc do stanu o niższej energii. Dwuetapowy proces tego typu nazywamy *fluorescencją*. Fotony początkowy i końcowy nie są ze sobą skorelowane. (b) Jeżeli energia fotonu dokładnie odpowiada energii wzbudzenia atomu, to występuje absorpcja i emisja rezonansowa. (c) Atom znajduje się w stanie wzbudzonym. Foton o odpowiedniej energii może wymusić przejście atomu do stanu o niższej energii. Fotony padający i emitowany przez atom mają taką samą energię i są spójne. Rozpraszanie Rayleigha (d) oraz rozpraszanie Ramana (f) różnią się od procesów (a) i (b) tym, że zachodzą jednoetapowo, a fotony padający i rozproszony są skorelowane. Na schematach (e) i (g) przedstawiono odpowiednio rozpraszanie komptonowskie oraz zjawisko fotoelektryczne, opisane w rozdziale 3.

Jak działa laser?

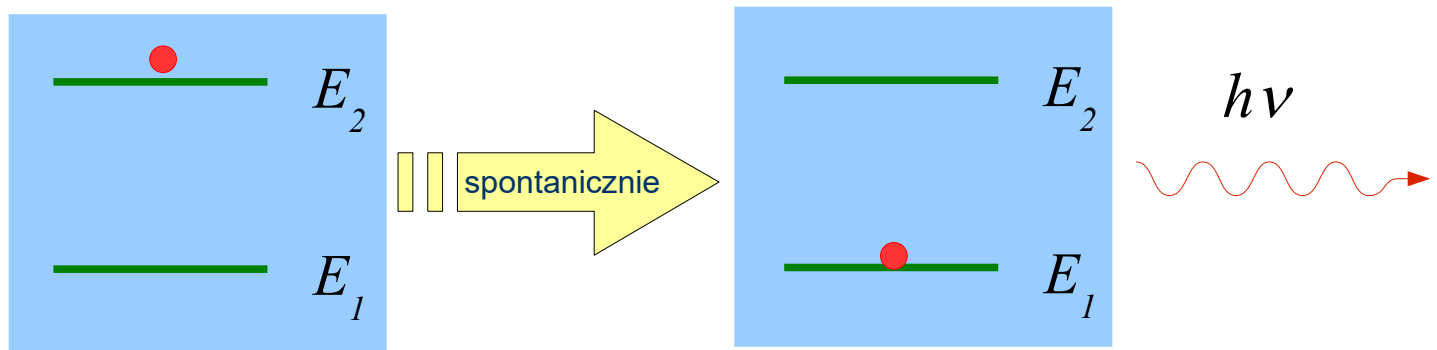
- Procesy które mogą zmieniać stan atomu:
 - ♦ **Absorpcja kwantu promieniowania** - atom jest w polu e.-m. i może pochłoniąć porcję energii $h\nu$



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.



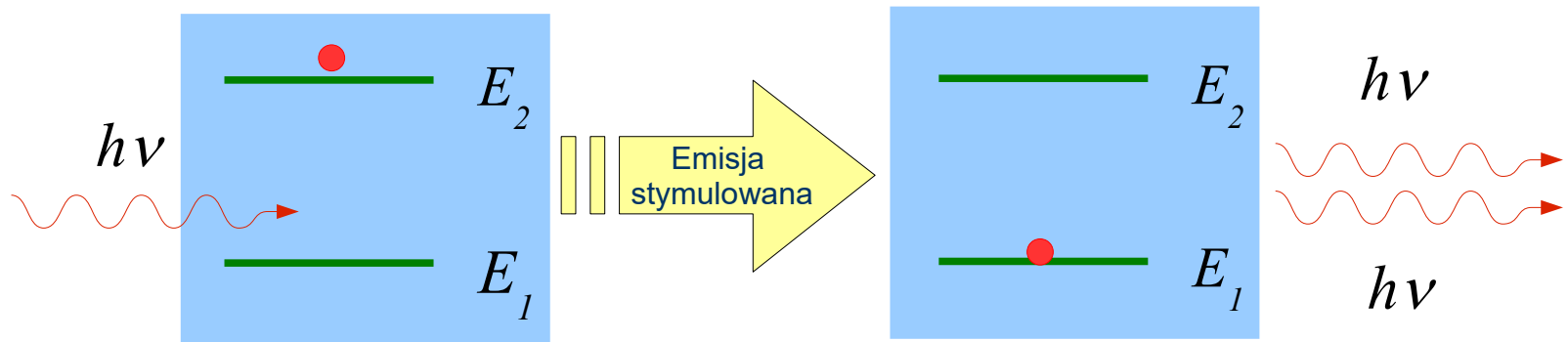
Zasada zachowania energii wymaga aby atom wypromieniował nadmiar energii o wartości:

$$h\nu = E_2 - E_1$$

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”

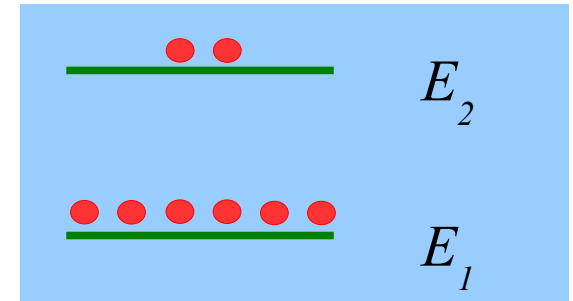
- Jeśli zbiór atomów jest w stanie równowagi termodynamicznej, to liczba atomów które są w stanie energetycznym E_2 , jest dana przez rozkład Boltzmana.

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

- ♦ 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”.

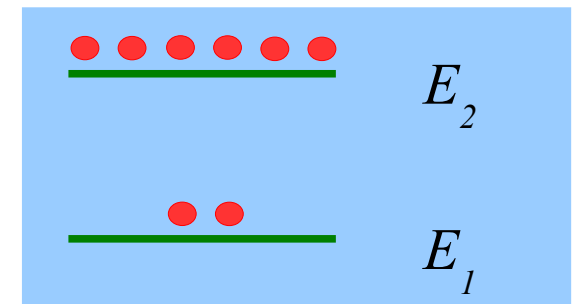
Pompowanie lasera odbywa się poprzez

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



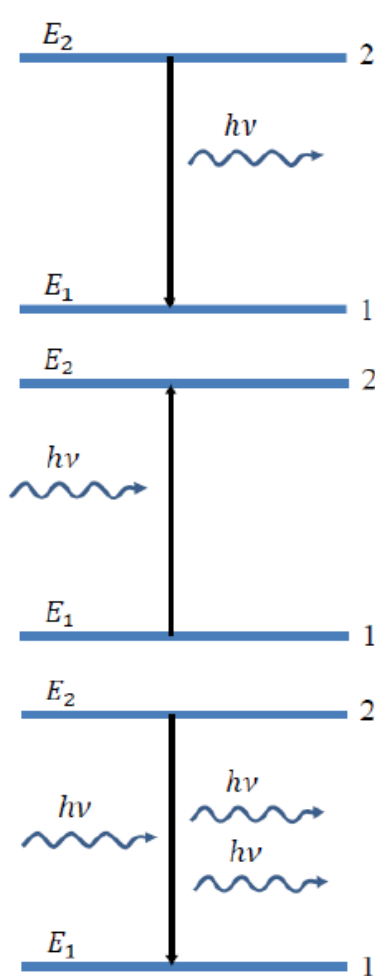
każda kropka oznacza jeden atom w stanie energetycznym E

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

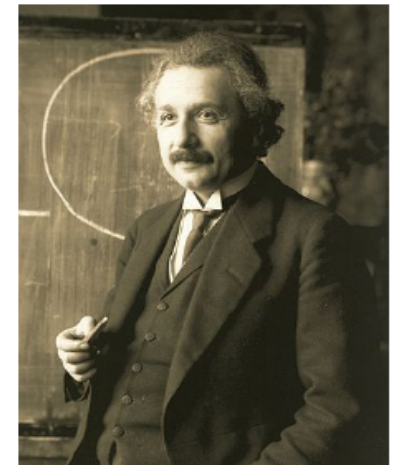
Absorpcja (wymuszona)

$B_{12}u(\nu)$ – 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.

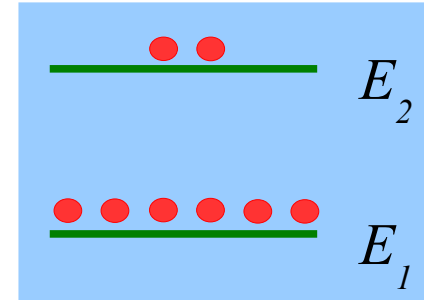


Absorpcja i emisja fotonu przez atom, który ma dwa poziomy energii

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 :

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

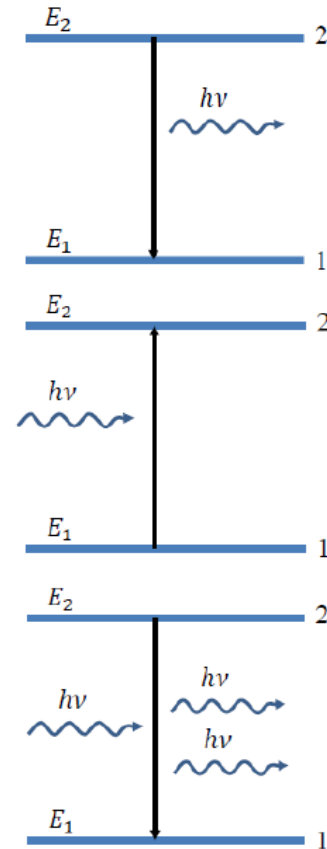
Zatem współczynniki Einsteina spełniają związki:

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

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 $N_1 < N_2$



Relacja między emisją spontaniczną a wymuszoną

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

Im większa jest różnica $\Delta E = E_2 - E_1 = h\nu$, tym większe jest prawdopodobieństwo emisji spontanicznej w porównaniu z emisją wymuszoną

$$\frac{A_{21}}{B_{21}u(\nu)} = e^{h\nu/(kT)} - 1$$

W stanie równowagi emisja spontaniczna jest dużo bardziej prawdopodobna niż emisja wymuszona dla $h\nu \gg kT$.

Emisja wymuszona staje się istotna, jeżeli $h\nu \approx kT$, i może dominować nad emisją spontaniczną, jeżeli $h\nu \ll kT$.

Dla typowego zakresu temperatur jest to spełnione dla mikrofalowej części widma (istotne dla konstrukcji pierwszych maserów).

PRZYKŁAD 9.7. Porównanie emisji spontanicznej z emisją wymuszoną. Porównajmy względne prawdopodobieństwa emisji spontanicznej i emisji wymuszonej dla układu w stanie równowagi w temperaturze pokojowej ($T = 300 \text{ K}$) dla przejść z zakresu (a) widzialnego i (b) mikrofalowego.

ROZWIĄZANIE

Wzór (9.42) wyznacza stosunek prawdopodobieństwa emisji spontanicznej A_{21} do emisji wymuszonej $B_{21}u(f)$. Dla $T = 300 \text{ K}$, $kT = 0,026 \text{ eV}$.

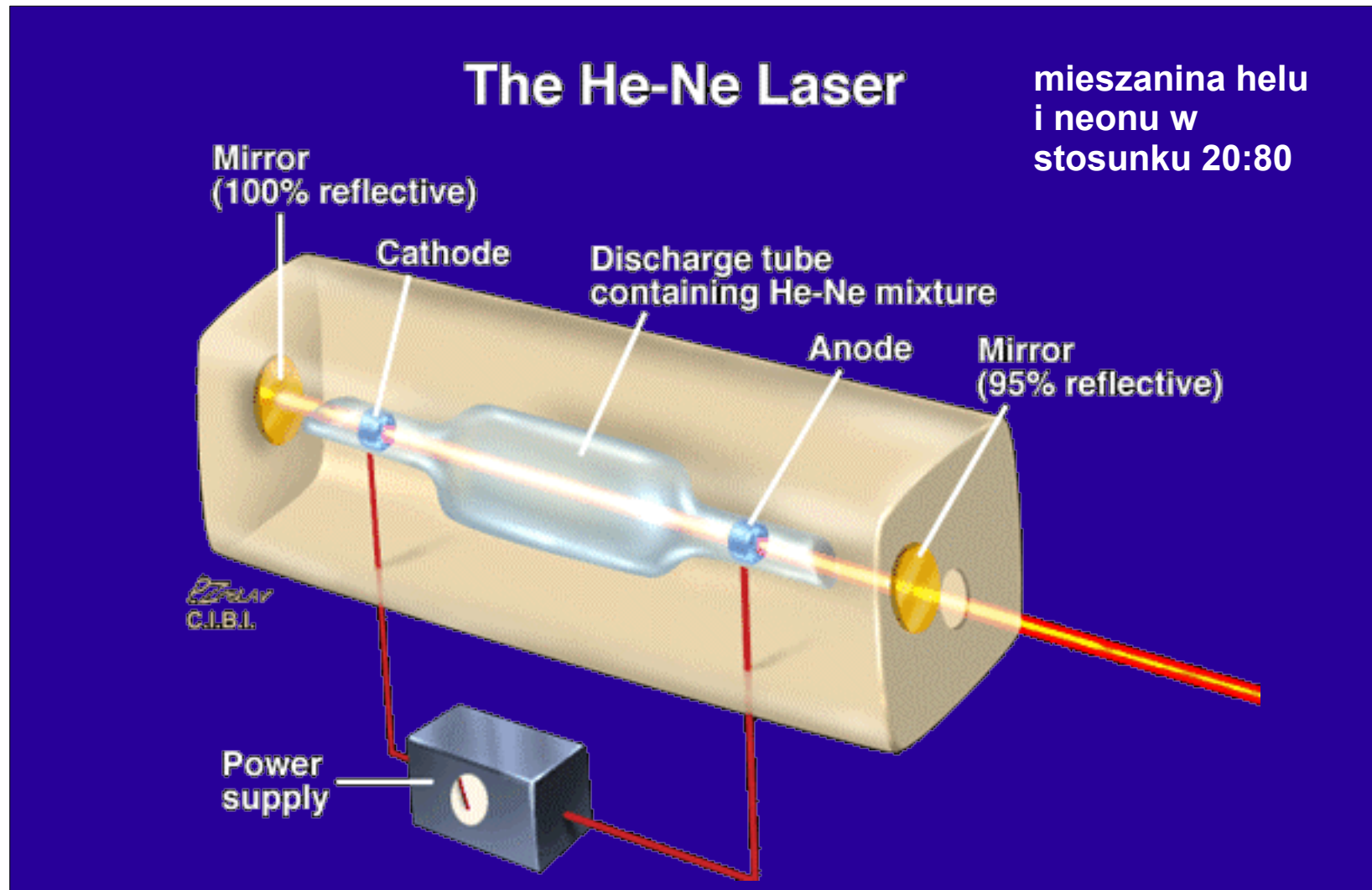
(a) Dla widzialnej części widma $hf \approx 2 \text{ eV}$, więc $hf/kT = 2/0,026 = 77$. Mamy więc

$$\frac{A_{21}}{B_{21}u(f)} = e^{77} - 1.$$

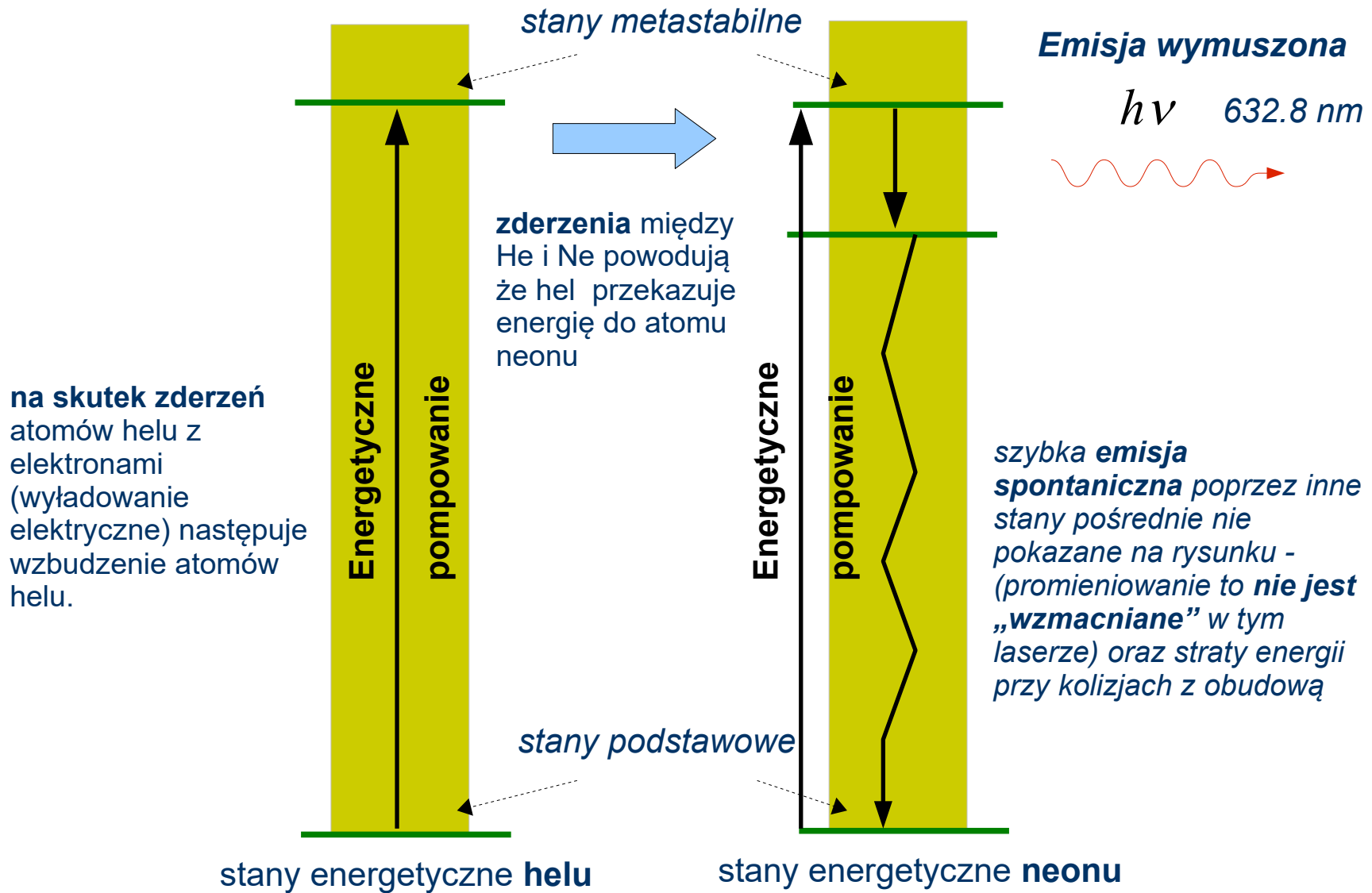
Nie ma wątpliwości, że w tych warunkach emisja spontaniczna zdecydowanie dominuje nad emisją wymuszoną.

(b) W mikrofalowym zakresie widma, $hf \approx 10^{-4} \text{ eV}$, więc $hf/kT = 10^{-4}/0,026 = 0,0038 \approx 1/260$, co faworyzuje emisję wymuszoną.

Lasery – przykład laser helowo-neonowy, laser cztero-poziomowy



Lasery – przykład laser helowo-neonowy



Schemat wybranych poziomów energetycznych neonu oraz koincydencyjnych z nimi poziomów helu

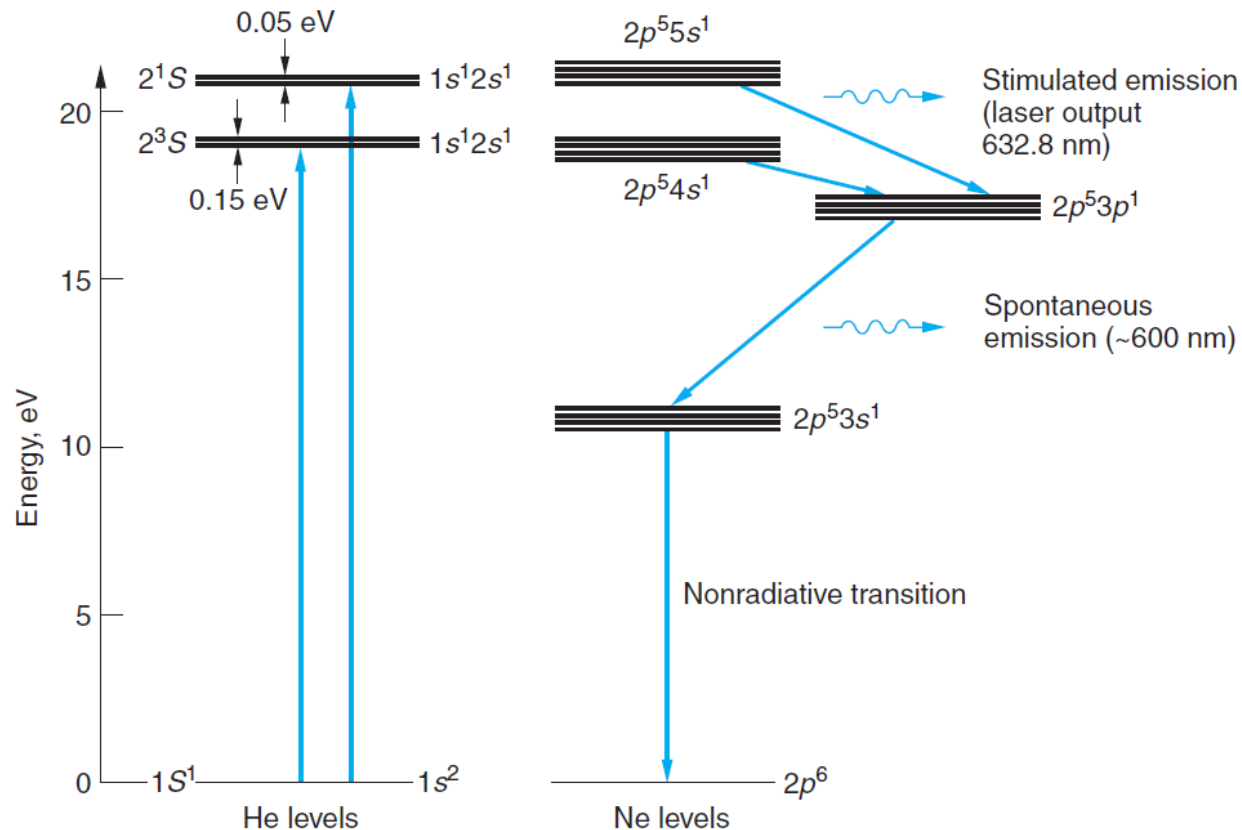


Figure 9-37 Energy levels of helium and neon that are important for the helium-neon laser. The helium atoms are excited by electrical discharge to energy states 19.72 eV and 20.61 eV above the ground state. They collide with neon atoms, exciting some neon atoms to energy states 19.83 eV and 20.66 eV above the ground state. Population inversion is thus achieved between these levels and one at 18.70 eV above the ground state. The spontaneous emission of photons of energy 1.96 eV from the upper state stimulates other atoms in the upper state to emit photons of energy 1.96 eV, producing the characteristic He-Ne red laser light. Emission from the 19.83 eV neon state to the 18.70 eV level also produces laser output at about 1100 nm.

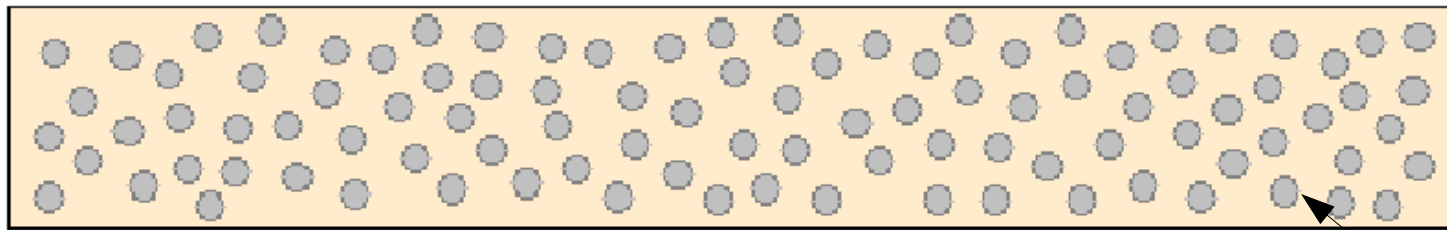
Jak działa laser ?

Zwierciadło 1
(100% odbicia –
całkowite odbicie)

Rezonator optyczny lasera

Zwierciadło 2
(<100% odbicia) -
częściowo
przepuszczalne

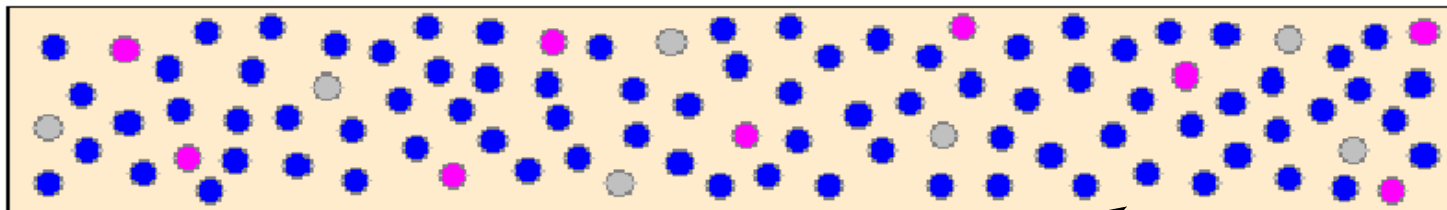
Świecące medium (gaz, kryształ albo ciecz)



Pompowanie energetyczne (optycznie, elektrycznie lub chemicznie)



atomy w stanie podstawowym

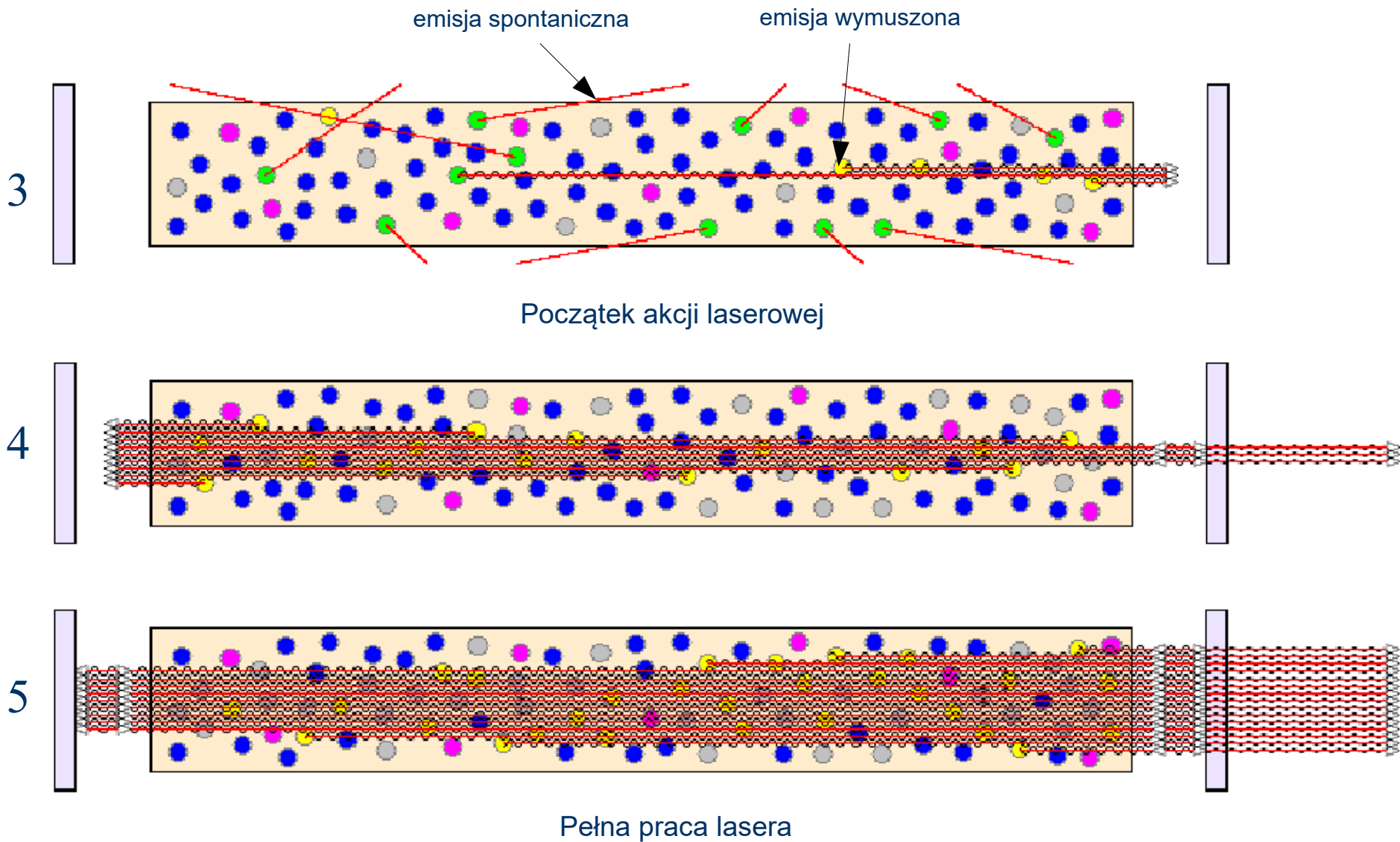


atomy w stanie E1

atomy w stanie E2

Odległość między zwierciadłami nie jest dowolna! - odpowiada wielokrotności połówki 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:

$$L = n \frac{\lambda}{2}$$

- **Uzyskanie kierunkowości** promieniowania.

L - długość rezonatora,
 n - liczba całkowita,
 λ - długość fali w
rezonatorze,
 ν - 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:

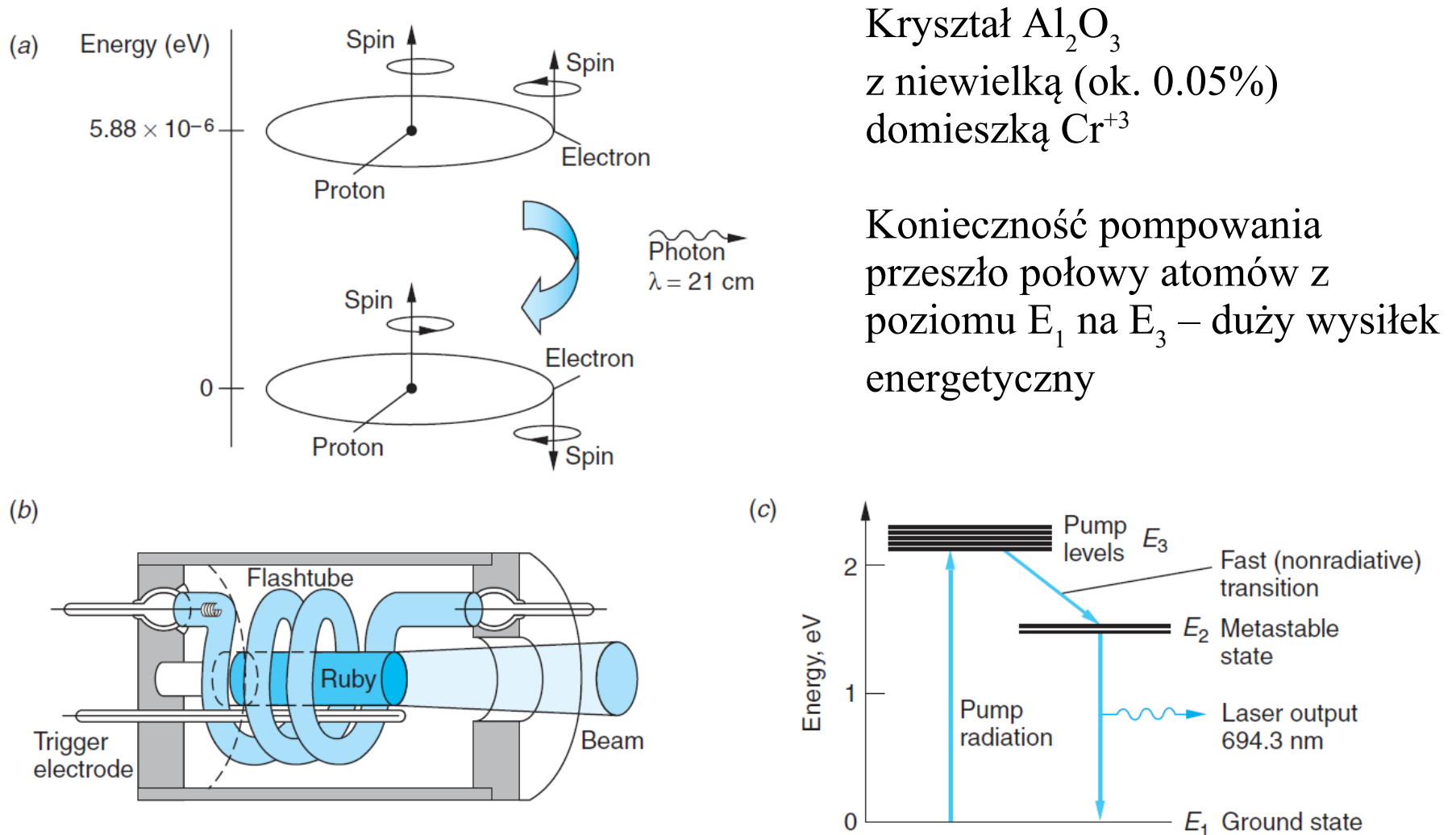
$$(n_2 - n_1) \frac{c^3 I}{4\pi^2 \nu^2 \Delta \nu \tau_s} \geq \frac{I}{\tau_w}$$

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.

Laser rubinowy – przykład lasera trój-poziomowego

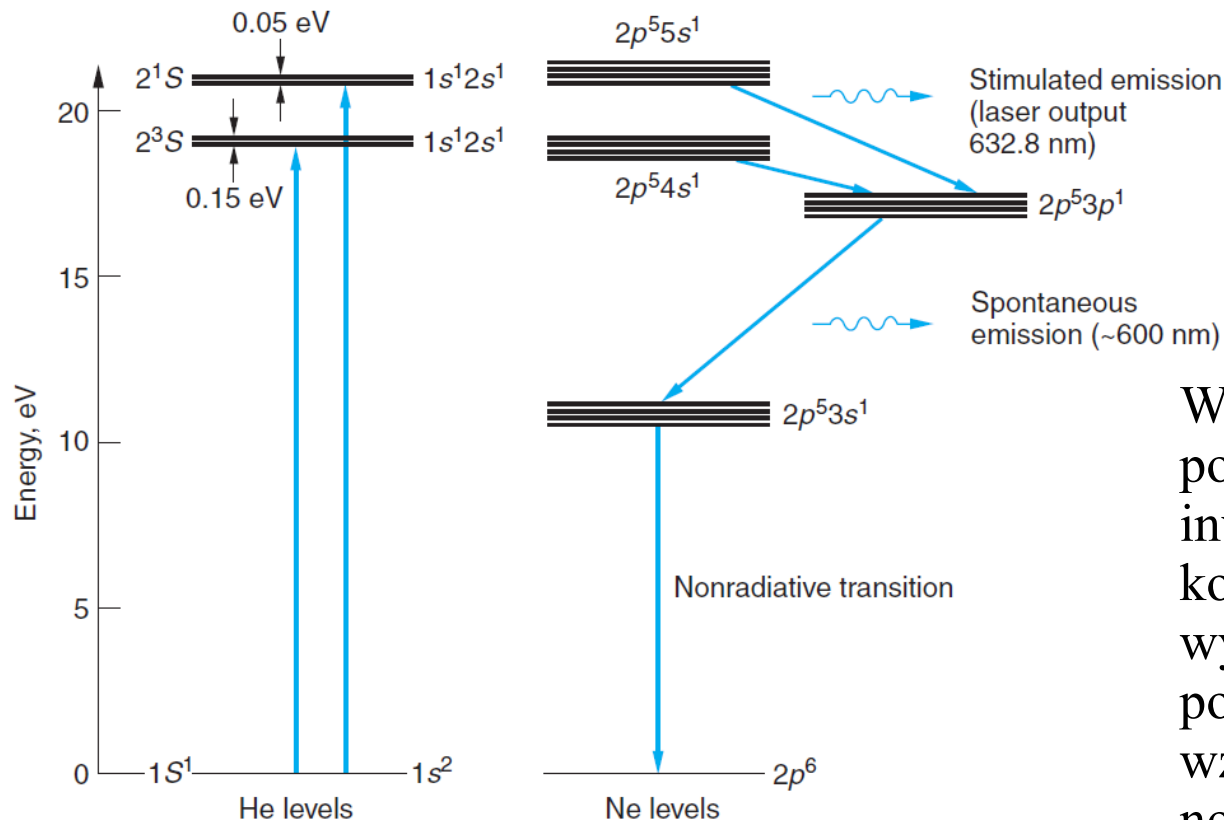


Kryształ Al_2O_3
z niewielką (ok. 0.05%)
domieszką Cr^{+3}

Konieczność pompowania
przeszło połowy atomów z
poziomu E_1 na E_3 – duży wysiłek
energetyczny

Figure 9-32 (a) Hyperfine levels used in the hydrogen maser. (b) Schematic diagram of the first ruby laser. (c) Energy levels of chromium in ruby, Al_2O_3 .

Laser cztero-poziomowy



W laserze cztero-poziomowym łatwiej jest o inwersję obsadzeń, gdyż stan końcowy po emisji wymuszonej nie jest stanem podstawowym, lecz wzbudzonym, który normalnie nie jest obsadzony

Figure 9-37 Energy levels of helium and neon that are important for the helium-neon laser. The helium atoms are excited by electrical discharge to energy states 19.72 eV and 20.61 eV above the ground state. They collide with neon atoms, exciting some neon atoms to energy states 19.83 eV and 20.66 eV above the ground state. Population inversion is thus achieved between these levels and one at 18.70 eV above the ground state. The spontaneous emission of photons of energy 1.96 eV from the upper state stimulates other atoms in the upper state to emit photons of energy 1.96 eV, producing the characteristic He-Ne red laser light. Emission from the 19.83 eV neon state to the 18.70 eV level also produces laser output at about 1100 nm.

PRZYKŁAD 9.8. Porównywanie progowej inwersji obsadzeń. Porównaj progową inwersję obsadzeń wymaganą do wystąpienia akcji laserowej w laserze rubinowym i helowo-neonowym. Oblicz niezbędną moc pompowania dla każdego z nich.

ROZWIĄZANIE

Progowa inwersja obsadzeń Δn_c określona jest wzorem (9.51). Typowe parametry charakteryzujące oba układy podano w tabeli:

Parameter	Ruby laser	He-Ne laser
λ	694.3 nm	632.8 nm
f	$4.32 \times 10^{14} \text{ s}^{-1}$	$4.74 \times 10^{14} \text{ s}^{-1}$
n (refractive index)	1.76	1.00
t_s	$3 \times 10^{-3} \text{ s}$	10^{-7} s
t_p	$2.9 \times 10^{-8} \text{ s}$	$3.3 \times 10^{-7} \text{ s}$
Δf	$3.3 \times 10^{11} \text{ s}^{-1}$	$9 \times 10^8 \text{ s}^{-1}$
N (Cr^{3+} concentration)	$2 \times 10^{19}/\text{cm}^3$	—

Dla lasera rubinowego:

$$\Delta n_c = \frac{4\pi^2 f^2 \Delta f t_s}{c^3 t_p} = \frac{4\pi^2 (4,32 \cdot 10^{14})^2 (3,3 \cdot 10^{11}) (3 \cdot 10^{-3})}{(3,00 \cdot 10^8 / 1,76)^3 (2,9 \cdot 10^{-8})}$$

$$\Delta n_c = 5,08 \cdot 10^{22} \text{ atomów/m}^3 = 5,08 \cdot 10^{16} \text{ atomów/cm}^3$$

Dla lasera He-Ne:

$$\Delta n_c = \frac{4\pi^2 f^2 \Delta f t_s}{c^3 t_p} = \frac{4\pi^2 (4,74 \cdot 10^{14})^2 (9 \cdot 10^8) (10^{-7})}{(3,00 \cdot 10^8)^3 (3,3 \cdot 10^{-7})}$$

$$\Delta n_c = 8,96 \cdot 10^{13} \text{ atomów/m}^3 = 8,96 \cdot 10^7 \text{ atomów/cm}^3$$

Jak widać, progowa inwersja obsadzeń jest mniejsza dla lasera He-Ne.

Minimalna moc P niezbędna do podtrzymania akcji laserowej w laserze He-Ne jest w przybliżeniu równa $\Delta n_c (hf/t_s)$, ponieważ $N_1 \approx 0$, stąd

$$P(\text{He-Ne}) \approx \Delta n_c (hf/t_s) \approx \frac{(8,96 \cdot 10^7)(6,63 \cdot 10^{-34})(4,74 \cdot 10^{14})}{10^{-7} \cdot a} \approx 2,8 \cdot 10^{-4} \text{ W/cm}^3.$$

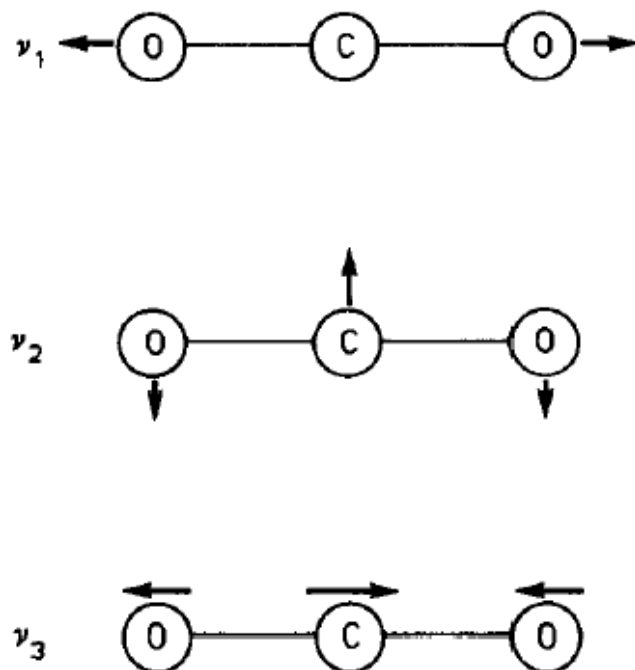
W laserze rubinowym przynajmniej połowę jonów Cr^{3+} trzeba przeprowadzić do stanu E_3 (patrz rys. 9.32c). Wymagana do podtrzymania inwersji obsadzeń moc na jednostkę objętości

$$P(\text{rubinowy}) \approx \frac{N}{2} \left(\frac{hf}{t_s} \right) \approx \frac{(2 \cdot 10^{19})(6,63 \cdot 10^{-34})(4,32 \cdot 10^{14})}{2 \cdot 3 \cdot 10^{-3}} \approx 955 \text{ W/cm}^3.$$

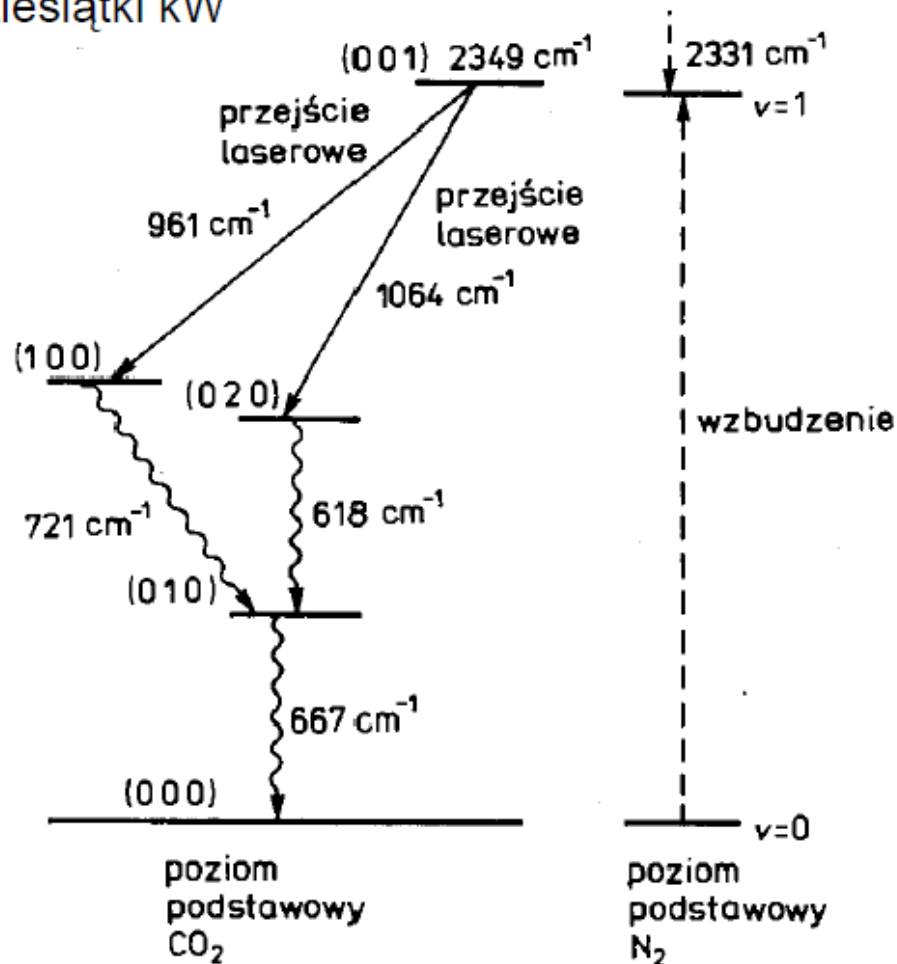
Laser molekularny na CO₂

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.