

# Budowa i zasada działania lasera

## Budowa atomu

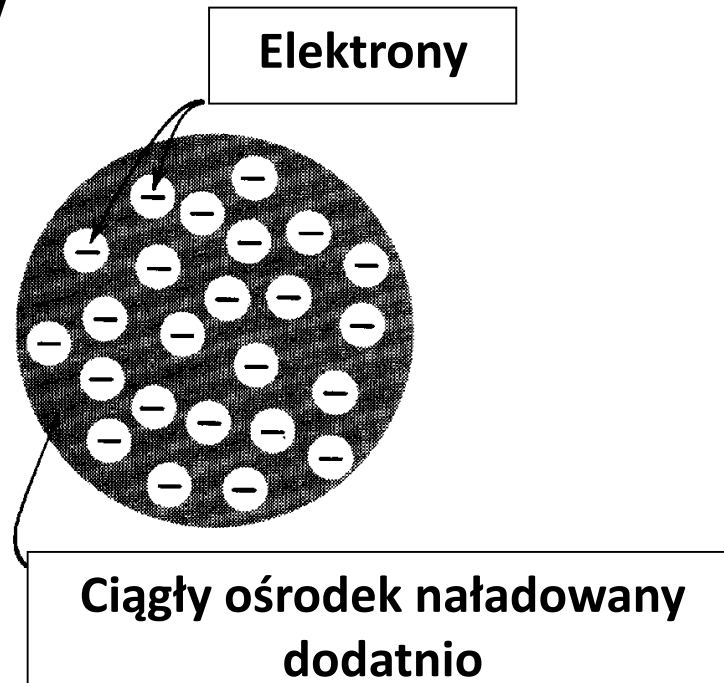
Demokryt (460 – 370 p.n.e.) – materia składa się z niepodzielnych elementów; (atom, gr. „*atomos*” - niepodzielny).

**Stan wiedzy o atomie w drugiej połowie XIX stulecia:**

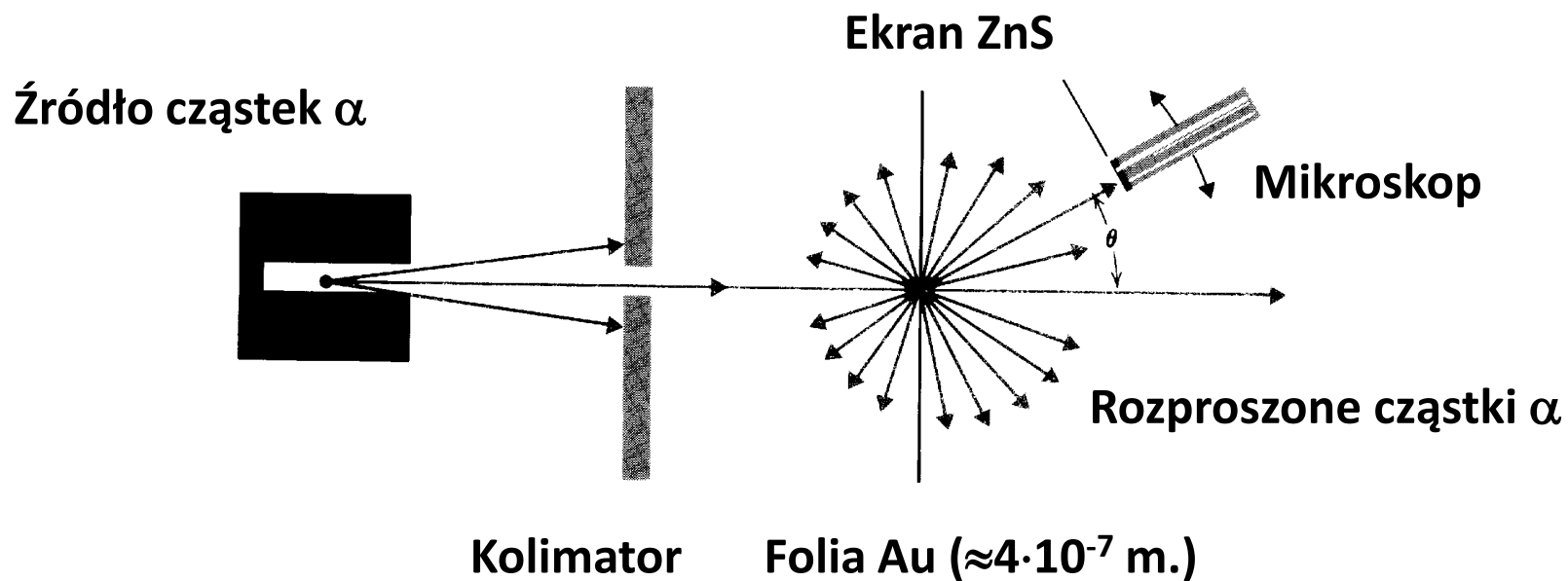
- Atom ma budowę złożoną, a w skład jego wchodzi cząstki obdarzone dodatnimi i ujemnymi ładunkami elektrycznymi;
- Po wyrwaniu ujemnie naładowanego elektronu, atom staje się dodatnio naładowanym jonem;
- Ładunki elektronów oderwanych od atomów dowolnego pierwiastka są jednakowe, zaś dodatnie ładunki atomów są ściśle związane z ich masą, czyli z rodzajem pierwiastka;
- Masa elektronu jest ok. 2000 razy mniejsza od najlżejszego jonu, czyli jonu wodoru.

# *Model Thomsona (1904)*

- Atom ma postać równomiernie, dodatnio naładowanej kuli o promieniu rzędu  $10^{-9}$  m, wewnątrz której swobodnie poruszają się elektrony



# Model Rutherforda



- **Zdecydowana większość cząstek przechodzi przez folię (tzw. rozproszenie do przodu).**
- **Zdarzyły się jednak rozproszenia do tyłu (na  $6.17 \cdot 10^6$  do przodu było jedno! do tyłu).**
- **Rozproszenie do tyłu nie może być spowodowane przez elektrony atomu**

# ***Jądrowy model atomu (Rutherford 1911):***

- Atom składa się z dodatnio naładowanego jądra o promieniu ok.  $10^{-12}$  m., w którym skupiona jest praktycznie cała masa atomu.
- Elektrony krążą wokół jądra po orbitach o promieniu ok.  $10^{-9}$  m.
- Wszystkie orbity są równoprawne, a elektrony mogą mieć dowolny okres obiegu.

## ***Podstawowe wady modelu:***

- ✓ Atomy są stabilne, a widmo energetyczne wysyłanego promieniowania jest dyskretne.
- ✓ Cząstki naładowane poruszające się ruchem przyspieszonym, promieniują energię w postaci fali elektromagnetycznej.

## ***Wniosek:***

Elektron w modelu Rutherforda krążący wokół jądra powinien tracić energię w sposób ciągły, a tym samym atomy powinny być niestabilne.

# Model atomu Bohra

Aby usunąć sprzeczności pomiędzy modelem Rutherforda a teorią Maxwella Niels Bohr zaproponował w roku 1913 *kwantowy model budowy atomu*. Istotę tego modelu stanowią następujące postulaty:

- I. Elektron w atomie może krążyć tylko po pewnych dozwolonych orbitach zwanych orbitami stacjonarnymi.
- II. Dla orbity kołowej moment pędu elektronu musi spełniać warunek

$$m \cdot v_n \cdot r_n = n \frac{h}{2\pi}$$

$m$  – masa elektronu,

$v_n$  – jego prędkość,

$r_n$  – promień orbity,

$n = 1, 2, 3...$ (główna liczba kwantowa)

$h$  – stała Plancka.

- III. Elektron krążący po orbicie stacjonarnej nie emituje energii.
- IV. Atom może absorbować energię o wartości równej energii kwantu  $E=h \cdot \nu$  (wzór Einsteina) przechodząc z orbity niższej (mniejsze  $n$ ) na orbitę wyższą.
- V. Atom wypromieniowuje energię gdy elektron przechodzi z orbity wyższej na orbitę niższą. Ilość wypromieniowanej energii dana jest wzorem

$$\mathbf{h \cdot \nu = E_n - E_k}$$

$E_n$  i  $E_k$  – energie elektronu na tych orbitach ( $n > k$ ).



$$\frac{\mathbf{m} \cdot \mathbf{v}_n^2}{\mathbf{r}_n} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{e^2}{\mathbf{r}_n^2}$$

$$\mathbf{m} \cdot \mathbf{v}_n \cdot \mathbf{r}_n = n \frac{\mathbf{h}}{2\pi}$$

$$r_n = n^2 \frac{h^2 \epsilon_0}{\pi m e^2},$$

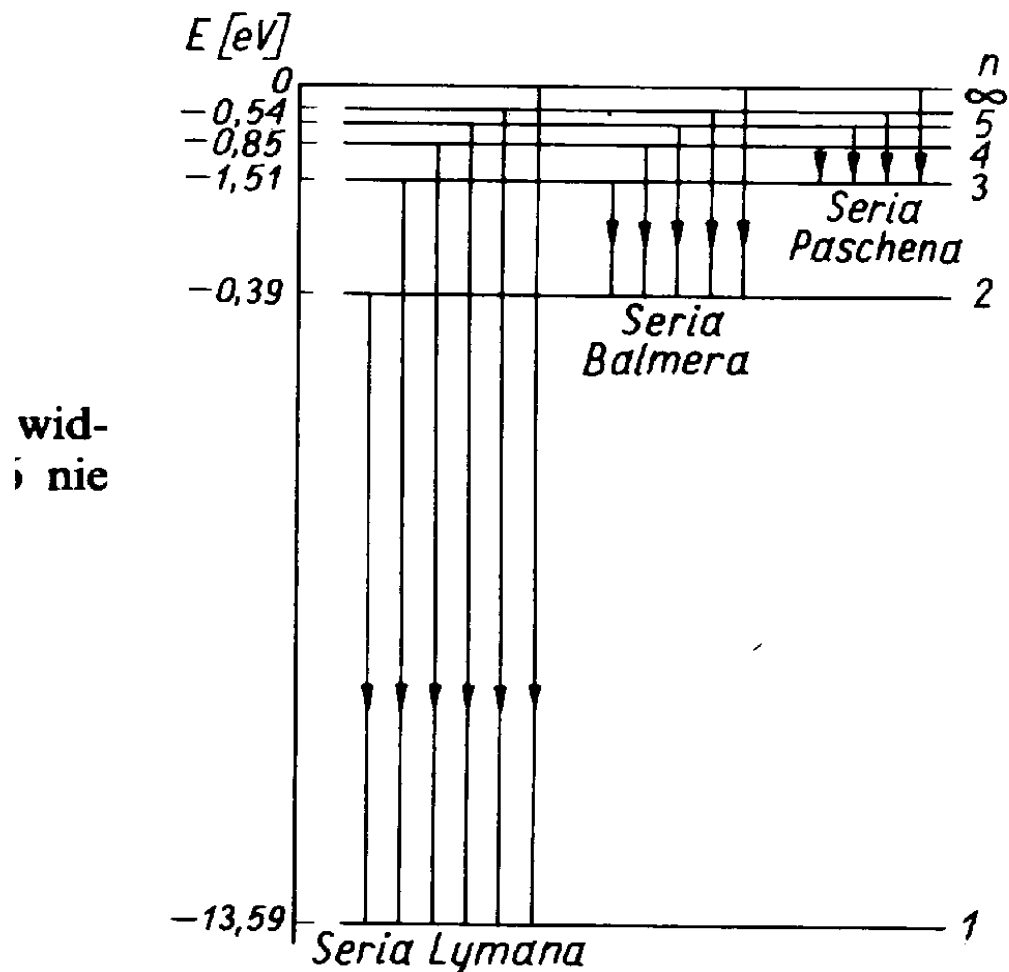
$$v_n = \frac{e^2}{2nh\epsilon_0},$$

$$\mathbf{E}_n = \mathbf{E}_p + \mathbf{E}_k = -\frac{e^2}{4\pi\epsilon_0 \mathbf{r}_n} + \frac{1}{2} m \mathbf{v}_n^2 = -\frac{m e^4}{8\epsilon_0^2 h^2 n^2}$$

$$\mathbf{v} = \mathbf{E}_n - \mathbf{E}_k = \frac{m e^4}{8\epsilon_0^2 h^3} \left( \frac{1}{\mathbf{k}^2} - \frac{1}{\mathbf{n}^2} \right) = \mathbf{C} \left( \frac{1}{\mathbf{k}^2} - \frac{1}{\mathbf{n}^2} \right)$$

$$\mathbf{v} = \mathbf{Z}^2 \mathbf{C} \left( \frac{1}{\mathbf{k}^2} - \frac{1}{\mathbf{n}^2} \right)$$

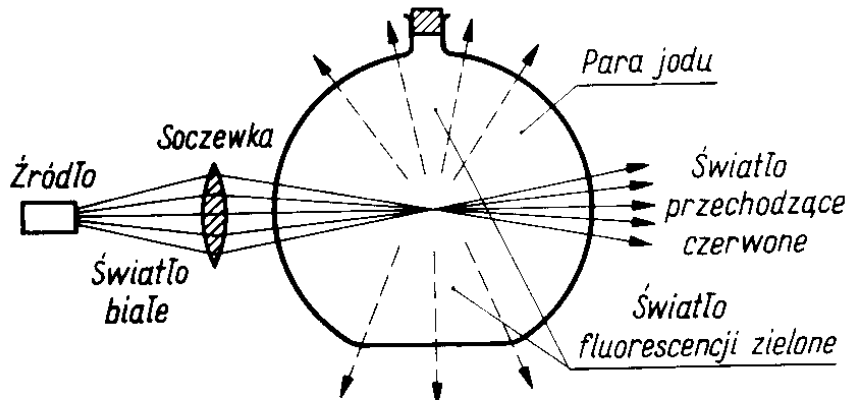
# Wybrane serie widmowe atomu wodoru



# Elementy optyki kwantowej

- Energia elektronu związanego w atomie lub cząsteczce jest skwantowana.
- Najniższy poziom energii nazywa się podstawowym, wszystkie poziomy wyższe nazywamy poziomami wzbudzonymi.
- Przekazanie atomowi odpowiedniej porcji energii powoduje wzbudzenie atomu, tzn. przejście elektronu na wyższy poziom.
- Atom w stanie wzbudzonym przebywa przez krótki czas ( $\approx 10^{-8}$  s), po czym elektron przechodzi z powrotem na poziom podstawowy - bezpośrednio, albo poprzez poziomy pośrednie. Nadmiar energii zostaje wypromieniowany w postaci jednego lub więcej fotonów.

## Zjawisko fluorescencji polega na pobudzeniu ciała do świecenia pod wpływem padającego na nie promieniowania

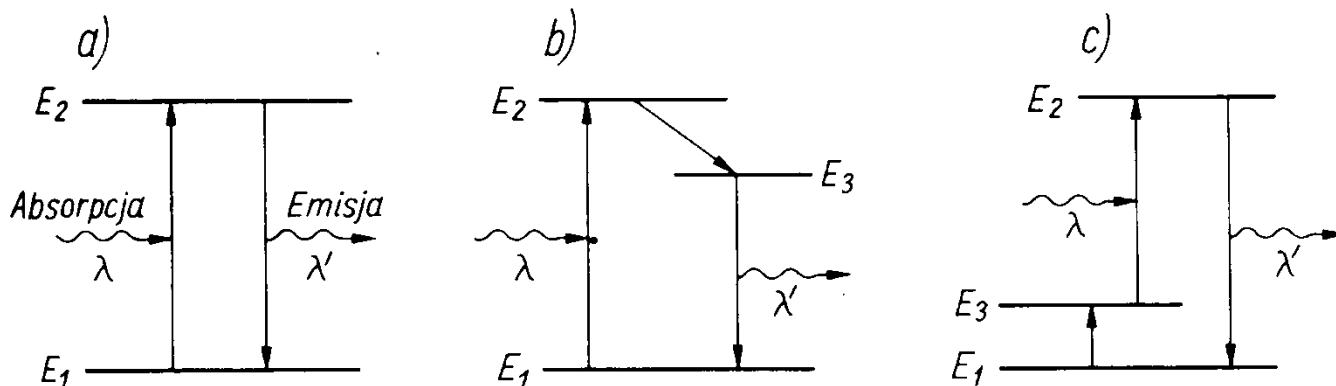


- Światło przechodzące ma zabarwienie purpurowe;
- Patrząc z boku widzimy natomiast wyraźnie barwę zielonkawą.

### *Interpretacja obserwowanego efektu:*

- Światło przechodzące ma zabarwienie purpurowe, co świadczy o pochłonięciu przez jod zielonej części widma. Część atomów jodu znajdująca się w stanie podstawowym zostaje wzbudzona światłem zielonym.
- Pochłonięte światło zielone jest wypromieniowane powtórnie we wszystkich kierunkach. Atomy wzbudzone przechodzą z powrotem do stanu podstawowego.

# Schemat trzech rodzajów fluorescencji w dwupoziomowym układzie energii.



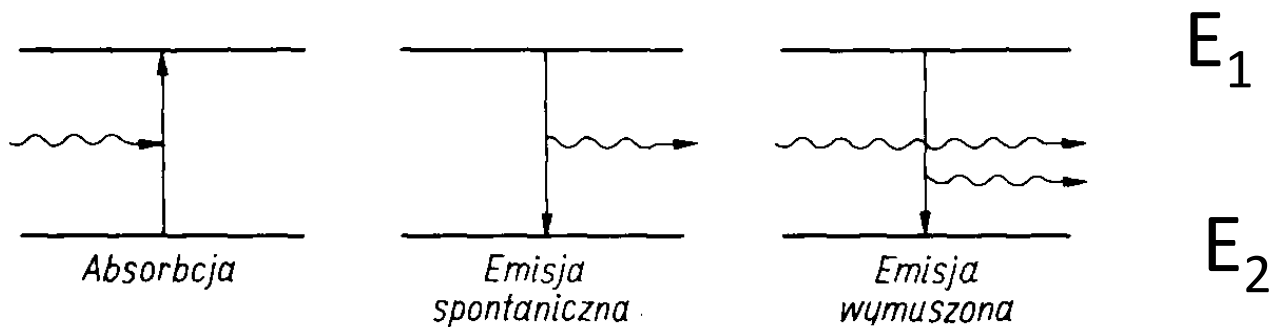
- a. o nie zmienionej długości fali ,  $\left( \lambda = \lambda' \right)$
- b. o zwiększonej długości fali , ,  $\left( \lambda' > \lambda \right)$
- c. o zmniejszonej długości fali .  $\left( \lambda' < \lambda \right)$

- ***Stan metastabilny (metatrwały)*** - stan wzbudzony, którego czas życia jest rzędu kilku sekund.
- ***Fosforescencja*** - świecenie ciał po przerwaniu naświetlenia → stanowi bezpośredni dowód istnienia stanów metastabilnych.

# Oddziaływanie atomu z promieniowaniem

Gdy na zbiór jednakowych atomów pada promieniowanie, mogą zachodzić jednocześnie trzy procesy:

- absorpcja promieniowania,
- emisja spontaniczna,
- emisja wymuszona.



- Przez ***emisję spontaniczną*** rozumiemy emisję fotonów przez wzbudzone atomy zachodzącą samorzutnie (bez wpływu czynników zewnętrznych).
- ***Emisja wymuszona (stymulowana)*** zachodzi wówczas, gdy atom wzbudzony zderza się z fotonem rezonansowym. W wyniku tego zderzenia foton nie ulega absorpcji, ale przyspiesza przejście atomu do stanu podstawowego i w efekcie wylatują w tym samym kierunku dwa spójne, tj. zgodne w fazie, fotony o tej samej częstotliwości (Einstein – 1917).
- Proces wzbudzania atomów na wyższe poziomy energetyczne przez ich oświetlanie nosi nazwę ***pompowania optycznego***.



- Jeżeli zbiór atomów ma stałą temperaturę, to ustala się równowaga dynamiczna opisanych trzech procesów. Polega ona na tym, że liczba fotonów absorbowanych w jednostce czasu jest równa liczbie fotonów emitowanych. Liczba atomów w stanie wzbudzonym również pozostaje stała w czasie.
- Jeżeli przez  $N_1$  oznaczymy liczbę atomów w stanie podstawowym o energii  $E_1$ , a przez  $N_2$  liczbę atomów w stanie wzbudzonym o energii  $E_2$ , to liczba atomów w stanie wzbudzonym podlega rozkładowi Boltzmannna

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

T – temperatura układu, k – stała Boltzmannna.

# Laser

- *Laser* jest unikalnym generatorem światła
- Nazwa pochodzi od pierwszych liter słów ***Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation***

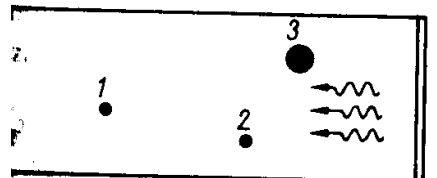
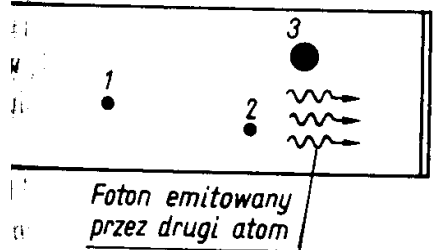
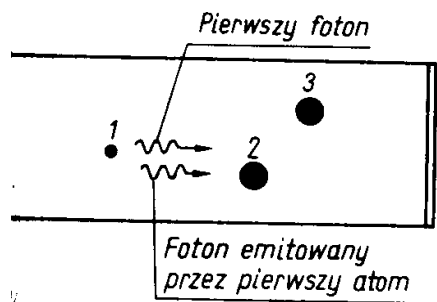
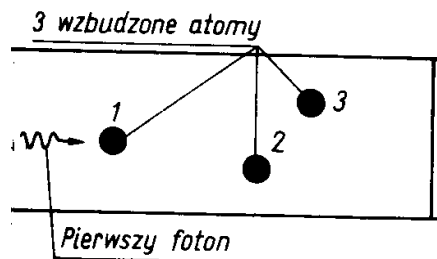
(wzmocnienie światła przez wymuszoną emisję promieniowania).

Unikalne cechy światła laserowego to:

- **kierunkowość i natężenie,**
- **jednobarwność (monochromatyczność),**
- **spójność.**

Przypuśćmy, że mamy zbiór atomów (lub cząsteczek), w którym większość atomów znajduje się w stanie wzbudzonym  $E_n$ . Taki układ można przygotować na wiele sposobów, między innymi tak:

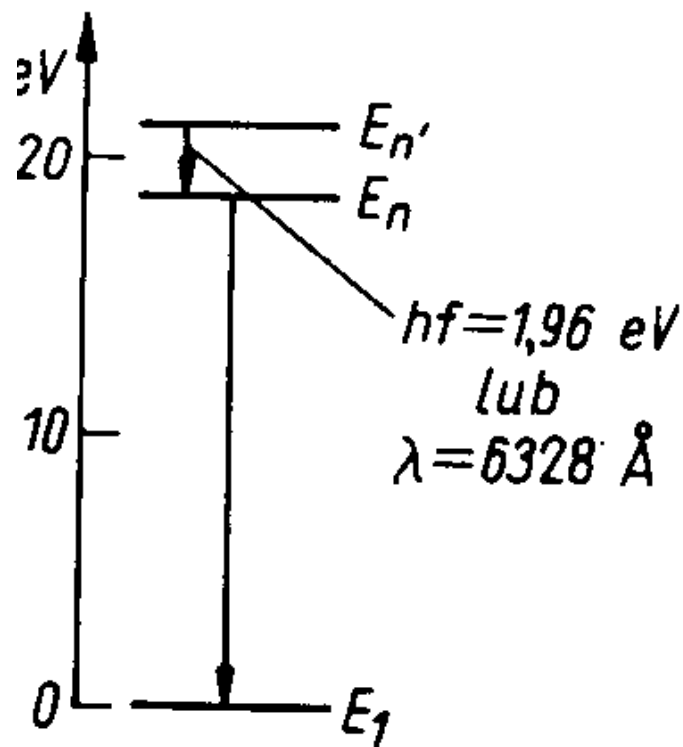
- za pomocą pompowania optycznego,
- wskutek zderzeń ze strumieniem elektronów lub innych wzbudzonych atomów,
- w wyniku emisji spontanicznej z jeszcze wyżej położonych stanów wzbudzonych, itp.
- **Zasada działania lasera oparta jest na procesie emisji wymuszonej**



- Pierwszy foton „ma zamiar” zderzyć się ze wzbudzonym elektronem.
- Wzbudzony atom wyemitował „swoj” foton, który „ma zamiar” zderzyć się z drugim wzbudzonym atomem.
- Te trzy fotony odbiły się od ściany i
- „mają zamiar zebrać” czwarty foton.

- Wszystkie wyemitowane fotony będą miały taką samą fazę.
- Jeżeli na obu końcach zbiornika z atomami znajdują się zwierciadła, to zacznie się reakcja łańcuchowa, która będzie trwała dopóty, dopóki wszystkie atomy nie znajdą się w niższym stanie energetycznym.
- Aby emisja wymuszona przeważała nad absorpcją, w wyższym stanie energetycznym musi znajdować się więcej atomów niż w stanie niższym, tzn. istnieje tak zwana inwersja stanów.
- Jeżeli jedno ze zwierciadeł jest zwierciadłem częściowo odbijającym i częściowo przepuszczającym to przechodząca przez nie spójna wiązka będzie stanowiła ciągłą falę sinusoidalną promieniowania elektromagnetycznego, tak samo jak promieniowanie elektromagnetyczne wysyłane przez nadajnik radiowy.

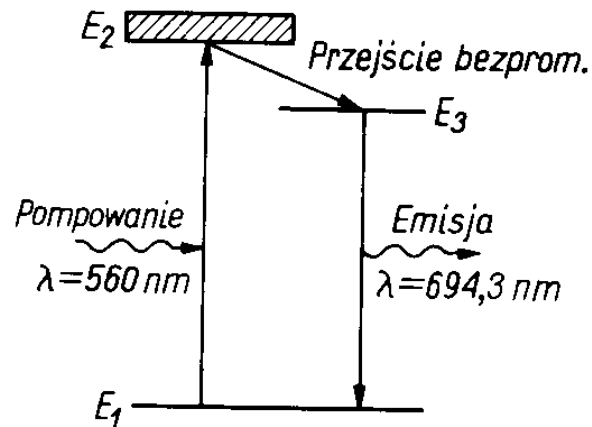
## Poziomy energetyczne w laserze helowo – neonowym



- Atomy Ne są wzbudzane na poziom  $E_{n'}$  w trakcie zderzeń ze wzbudzonymi atomami He. Przejście na poziom  $E_n$  zachodzi wskutek emisji wymuszonej.
- Istota akcji laserowej zawiera się w dwóch zjawiskach: inwersji obsadzeń poziomów energetycznych i emisji wymuszonej.

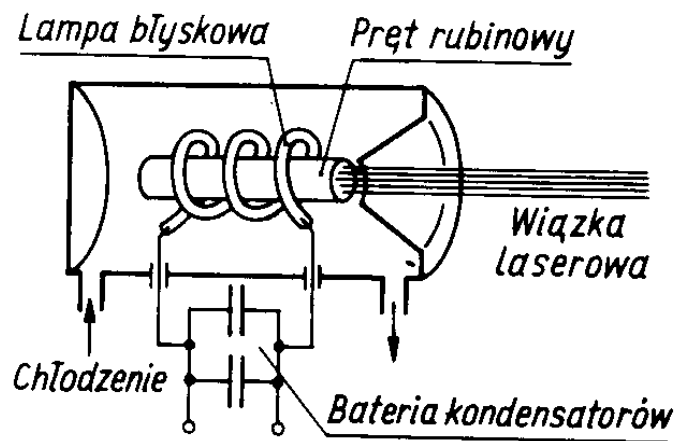
# Laser rubinowy

- rubin – kryształ tlenku glinu( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ), w którym niektóre atomy glinu są zastąpione atomami chromu.
- Schemat energetyczny atomów chromu w rubinie



## *Budowa lasera rubinowego:*

- Pręt rubinowy ma postać walca o średnicy około 5 mm i długości 5÷10 cm.
- Końce walca tworzą idealne równoległe zwierciadła, z których jedno jest półprzezroczyste
- Pręt jest otoczony kilkoma zwojami spiralnej lampy błyskowej zasilanej z baterii kondensatorów.
- Pręt i lampa znajdują się w chłodzonej obudowie odbijającej światło.





## *Podstawy wystąpienia akcji laserowej:*

- Absorbując światło o długości fali  $\lambda \approx 560$  nm atomy przechodzą do pasma wzbudzonego  $E_2$ .
- Proces ten staje się masowy, gdy rubin zaczynamy oświetlać silną wiązką światła białego (pompowanie optyczne).
- Atomy z poziomu  $E_3$  przechodzą na poziom  $E_2$  w sposób bezpromienisty.
- Poziom  $E_3$  jest metastabilny, o czasie życia 3 ms, podczas gdy czas życia poziomu  $E_2$  wynosi  $0.05 \mu\text{s}$ .
- Przez odpowiednio szybkie pompowanie można osiągnąć inwersję obsadzenia stanów  $E_3$  i  $E_1$ , tzn.  $N_3 > N_1$ .
- Emisja wymuszona zachodzi z poziomu  $E_3$  na  $E_1$  z emisją fotonu o długości fali równej  $\lambda = 694.3$  nm.

- Aby uzyskać silną emisję wymuszoną, konieczne jest utworzenie optycznej komory rezonansowej.
- Komorę tworzy sam kryształ rubinu w postaci pręta, którego powierzchnie czołowe są wypolerowane i pokryte powłokami odbijającymi.
- Wystarczy pojawienie się jednego fotonu rezonansowego poruszającego się równoległe do osi pręty aby akcja laserowa się rozpoczęła.