

Wstęp do Optyki i Fizyki Materii Skondensowanej

Część I: Optyka, wykład 3

wykład: Piotr Fita
pokazy: Jacek Szczytko
ćwiczenia: Aneta Drabińska, Paweł Kowalczyk,
Barbara Piętka

Wydział Fizyki
Uniwersytet Warszawski

2018/19

Plan

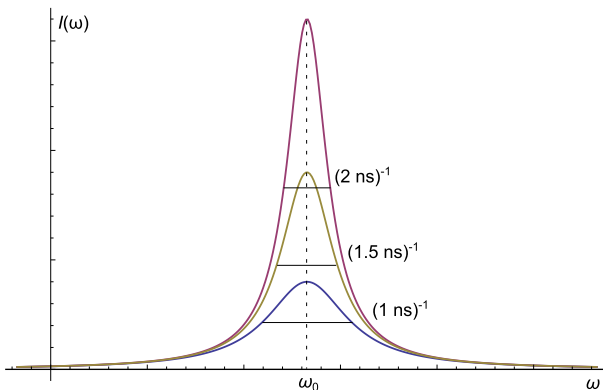
- 1 Poszerzenie linii
- 2 Spektroskopia subdopplerowska
- 3 Struktura atomów

Profil Lorentza

Szerokość połówkowa profilu Lorentza:

$$\Delta\omega = A_{21} = \tau^{-1}$$

(Zasada nieoznaczoności)



Poszerzenie zderzeniowe

Zderzenia są dodatkowym czynnikiem tłumiącym (Γ):

$$A_{21} \rightarrow A_{21} + \Gamma$$

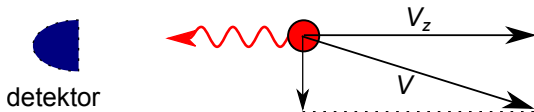
Ma znaczenie, gdy $\Gamma > A_{21}$ (dużo zderzeń = wysokie ciśnienia)

Widmo linii poszerzonej zderzeniowo:

$$\tilde{I}(\omega) = \frac{I_0}{(\omega - \omega_0)^2 + \left(\frac{A_{21} + \Gamma}{2}\right)^2}$$

(Szczegóły na ćwiczeniach)

Poszerzenie dopplerowskie



Dopplerowskie przesunięcie częstości:

$$\omega = \omega_0 \sqrt{\frac{1 - \frac{v_z}{c}}{1 + \frac{v_z}{c}}} \approx \omega_0 \left(1 - \frac{v_z}{c}\right)$$

Maxwellowski rozkład składowej prędkości w kierunku z:

$$n_i(v_z)dv_z = \frac{N_i}{\sqrt{\pi}v_p} \exp\left[-\left(\frac{v_z}{v_p}\right)^2\right] dv_z$$

v_p - prędkość najbardziej prawdopodobna, $v_p = \sqrt{2kT/m}$

Poszerzenie dopplerowskie

- Przekształcamy wzór na przesunięcie dopplerowskie:

$$v_z = -c \frac{\omega - \omega_0}{\omega_0}$$

$$dv_z = -\frac{c}{\omega_0} d\omega$$

- Wstawiamy do wyrażenia na rozkład prędkości:

$$n_i(\omega) d\omega = \frac{N_i}{\sqrt{\pi} v_p} \exp \left[- \left(\frac{c}{v_p} \frac{\omega - \omega_0}{\omega_0} \right)^2 \right] \frac{c}{\omega_0} d\omega$$

- Natężenie światła proporcjonalne do liczby emitujących atomów:

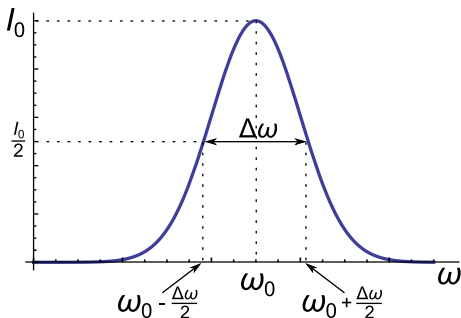
$$I(\omega) \sim n_i(\omega)$$

$$I(\omega) = I_0 \exp \left[- \left(\frac{c}{v_p} \frac{\omega - \omega_0}{\omega_0} \right)^2 \right]$$

Poszerzenie dopplerowskie

Kształt linii emisyjnej:

$$I(\omega) = I_0 \exp \left[- \left(\frac{c(\omega - \omega_0)}{v_p \omega_0} \right)^2 \right]$$



Całkowita szerokość połówkowa:

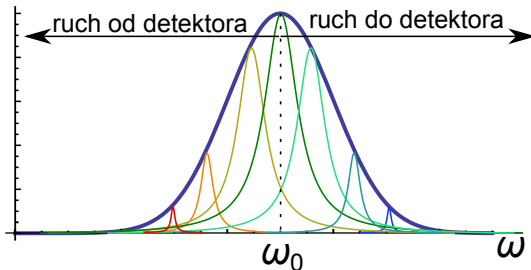
$$I\left(\omega_0 + \frac{\Delta\omega}{2}\right) = \frac{I_0}{2}$$

$$\Delta\omega = \omega_0 \frac{2\sqrt{\ln 2}}{c} v_p = \omega_0 \sqrt{\frac{8kT \ln 2}{mc^2}}$$

Rzeczywisty kształt linii widmowej gazu

Profil Voigta

Szer. naturalna ($1 \cdot 10^7$ Hz) \ll szer. dopplerowska (10^9 Hz)



Kształt linii = splot profilu Dopplera $D(\omega)$ i Lorentza $L(\omega)$

$$I(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} D(\omega)L(\omega - \omega')d\omega'$$

Poszerzenie jednorodne i niejednorodne linii

Poszerzenie **jednorodne** - prawdopodobieństwo oddziaływania ze światłem o danej częstotliwości jest jednakowe dla wszystkich atomów (cząsteczek), np:

- poszerzenie naturalne
- poszerzenie ciśnieniowe

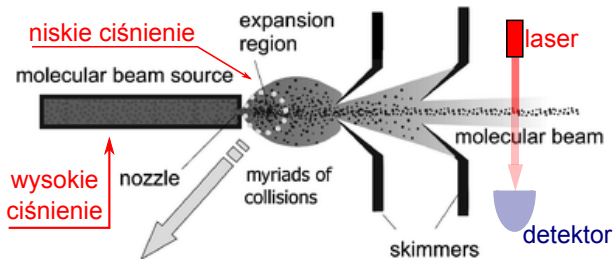
Poszerzenie **niejednorodne** - prawdopodobieństwo oddziaływania jest różne dla różnych grup atomów (cząsteczek):

- poszerzenie dopplerowskie - prawdopodobieństwo oddziaływania zależy od składowej prędkości w kierunku obserwatora

Poszerzenie niejednorodne można zredukować, np. selektywnie wzbudzając cząsteczki o określonej prędkości.

Spektroskopia subdopplerowska

Wiązki atomowe i molekularne

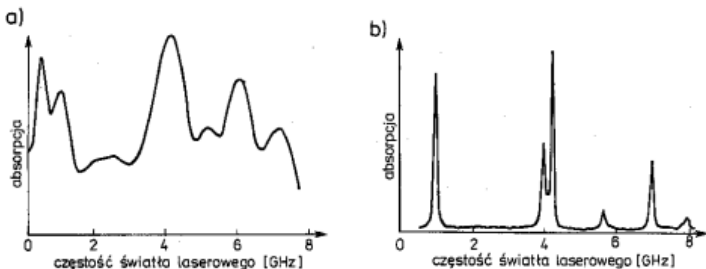


[V. Aquilanti et al, Phys. Chem. Chem. Phys., 2005,7, 291]

- rozprężanie gazu prowadzi do obniżenia temperatury
- selekcja przestrzenna wybiera cząsteczki (atomy) o \approx zerowej prędkości poprzecznej
- wiązka laserowa prostopadła do wiązki molekularnej (atomowej)
→ zredukowany efekt Dopplera

Spektroskopia subdopplerowska

Wiązki atomowe i molekularne

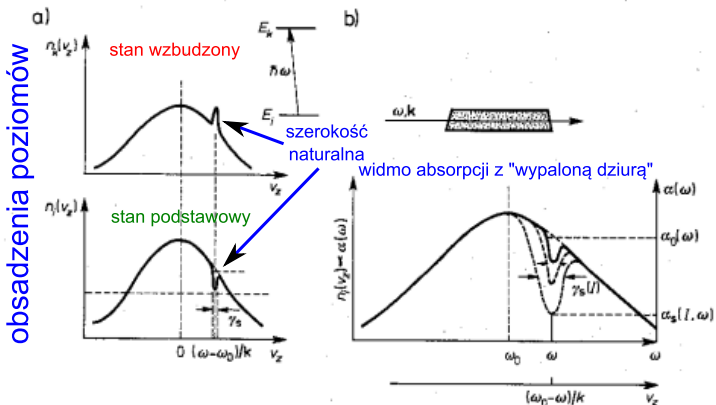


Rys. 10.3. Wycinek widma wzbudzenia cząsteczki Cs_2 w zakresie widmowym około $\lambda = 476,5$ nm
a) uzyskanego w komórce z parami ceszu, b) uzyskanego w skolimowanej wiązce ceszowej

[W. Demtroder, Spektroskopia laserowa, PWN]

Spektroskopia nasyceniowa

Wypalanie dziur

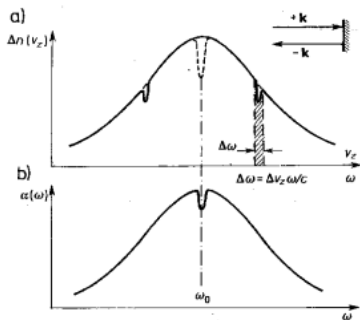


Rys. 10.17. a) „Wypalanie dziury” w rozkładzie obsadzeń $n_i(v_z)$ dolnego poziomu przejścia oraz powstawanie odpowiadającego jej pików w obsadzeniu górnego poziomu. b) Poszerzenie się dziury Bennetta w miarę wzrostu nasycającego natężenia światła

[W. Demtroder, Spektroskopia laserowa, PWN]

Spektroskopia nasyceniowa

Dip Lamba

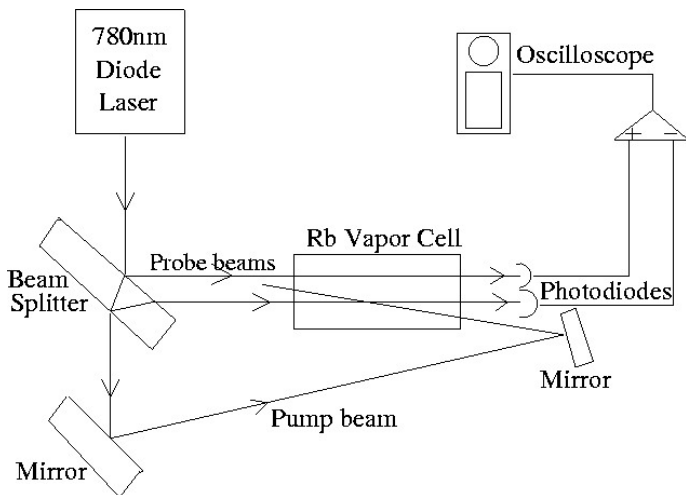


[W. Demtroder, Spektroskopia laserowa, PWN]

- Przeciwbieżne wiązki o $\omega \neq \omega_0$ wypalają w rozkładzie obsadzeń dwie symetryczne dziury (dla v_z i $-v_z$) - tzw. dziury Bennetta.
- Jeśli wiązka jest dostrojona dokładnie do przejścia ($\omega = \omega_0$) to powstaje jedna dziura w centrum profilu dopplerowskiego (dla $V_z = 0$) - tzw. **dip Lamba**
- Szerokość wypalonych dziur odpowiada szerokości naturalnej

Spektroskopia nasyceniowa

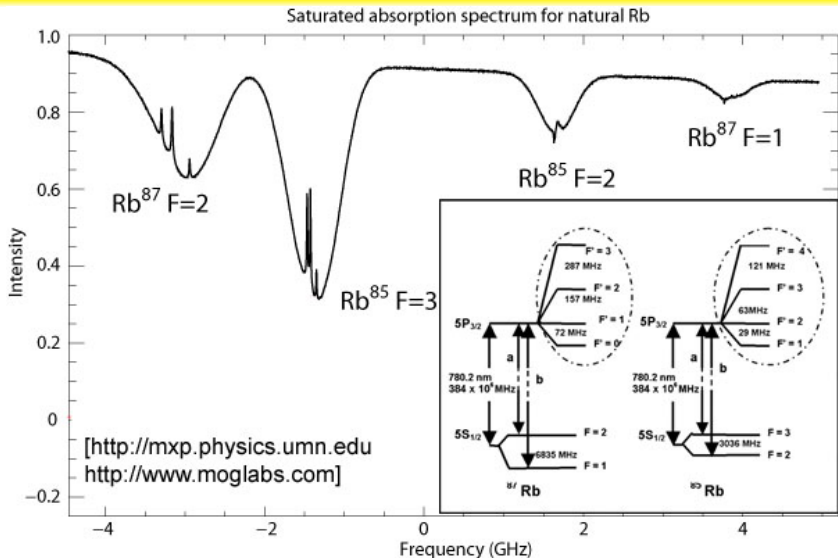
Pomiar widma absorpcji nasyceniowej



[<http://laser.physics.sunysb.edu>]

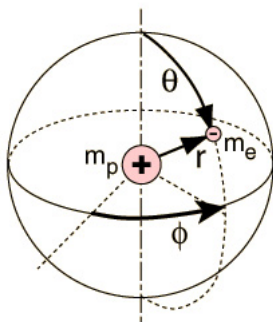
Spektroskopia nasyceniowa

Struktura nadsubtelna widma rubidu



Atom wodoru

równanie Schroedingera



[<http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu>]

- Potencjał:

$$V(\vec{r}) = -\frac{e^2}{4\pi\epsilon_0} \frac{1}{r}$$

- Równanie Schroedingera:

$$\left[\frac{\hat{p}^2}{2m_e} + V(\vec{r}) \right] \Psi(\vec{r}) = E\Psi(\vec{r})$$

- Rozwiązanie:

- Funkcje własne $\Psi_{n,l,m}$
- Energie własne E_n

Atom wodoru

bez uwzględnienia spinu

Stan elektronu opisują 3 liczby kwantowe:

- n - decyduje o energii

$$E_n = -\frac{m_0 e^4}{(4\pi\epsilon_0)^2 2\hbar^2} \frac{1}{n^2} = -\frac{Ry}{n^2}$$

- l - decyduje o wartości orbitalnego momentu pędu

$$L = \hbar\sqrt{l(l+1)}$$

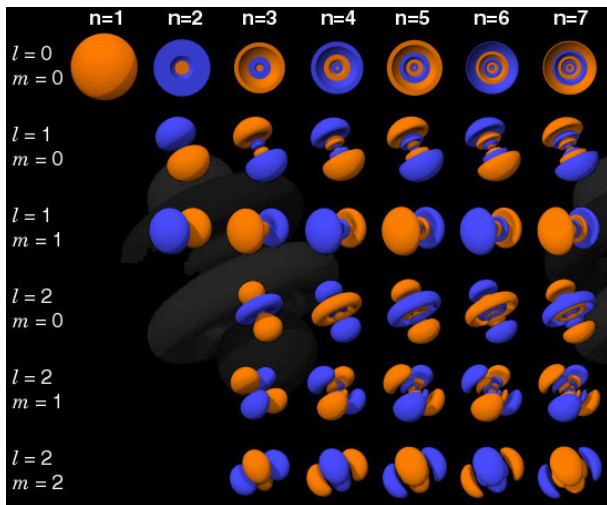
(nie wpływa na energię - degeneracja przypadkowa ze względu na zależność potencjału od r^{-1})

- m - decyduje o rzucie momentu pędu

$$L_z = \hbar m$$

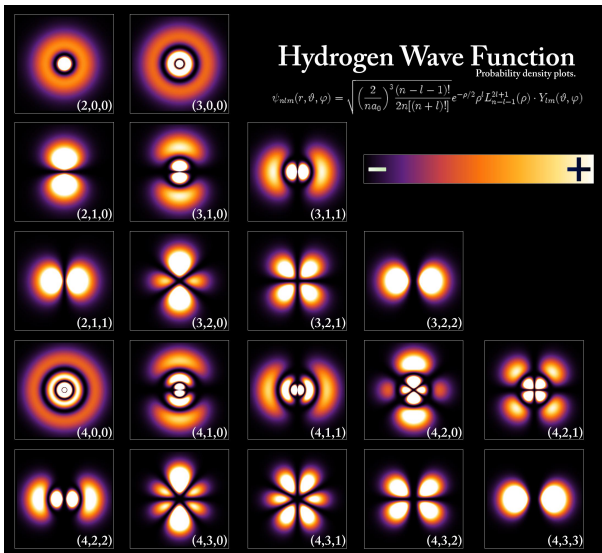
$$-l \leq m \leq l$$

Funkcje falowe atomu wodoru



[<http://chemistry.stackexchange.com>]

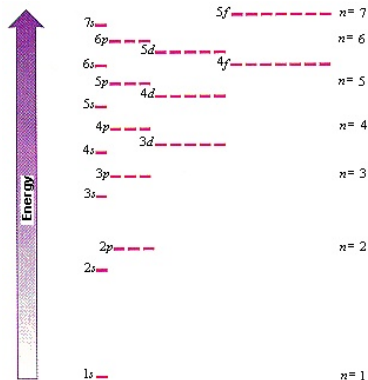
Funkcje falowe atomu wodoru



Atomy wieloelektronowe

Energie poziomów energetycznych

- Zniesienie degeneracji ze względu na l
- $2l + 1$ – krotna degeneracja ze względu na m



• $l = 0: s$

• $l = 1: p$

• $l = 2: d$

• $l = 3: f$

Atomy wieloelektronowe

Kolejność obsadzania poziomów energetycznych

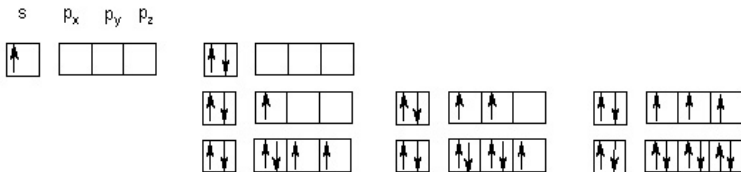
- Reguła Pauliego

Co najwyżej dwa elektrony (o przeciwnym spinie) mogą zajmować stany o tych samych liczbach n , l , m

- Reguła Hunda

- Elektrony o tej samej wartości l są rozmieszczane tak, żeby wypadkowy spin był maksymalny.

Kolejność wypełniania orbitali wg reguły Hunda



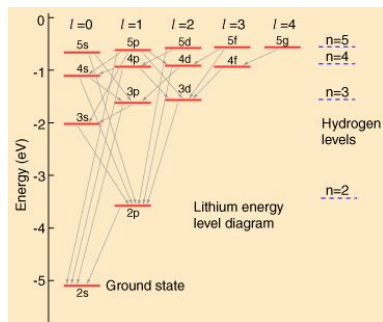
[<http://www.mlyniec.gda.pl>]

Atomy wodoropodobne

Atomy z jednym elektronem na ostatniej powłoce: Li, Na, K, Rb, ...

Zniesienie degeneracji ze względu na l .

- Daleko od jądra elektrony ekranują ładunek jądra - potencjał dla elektronu walencyjnego jak w atomie wodoru
- Rzeczywisty potencjał blisko jądra można opisać przez zaburzenie dodane do potencjału atomu wodoru



[hyperphysics.phy-astr.gsu.edu]