

# 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

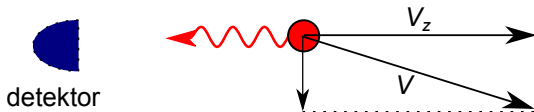
Wydział Fizyki  
Uniwersytet Warszawski

2017/18

# Plan

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

# 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:

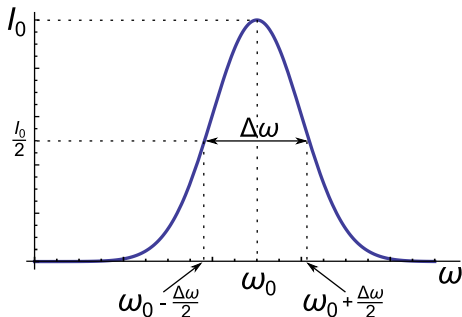
$$n_i(v_z)dv_z = \frac{N_i}{\sqrt{\pi}v_p} \exp\left[-\left(\frac{v_z}{v_p}\right)^2\right] dv_z$$

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

# Poszerzenie dopplerowskie

Kształt linii emisyjnej:

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



Całkowita szerokość półowkowa:

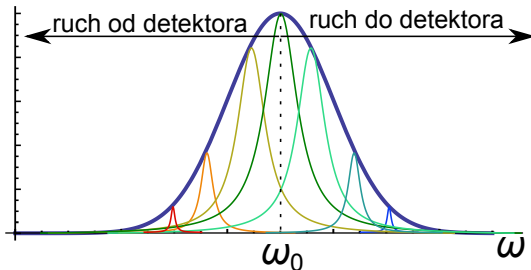
$$\Delta\omega = \omega_0 \frac{2\sqrt{\ln 2}}{c} v_p = \omega_0 \sqrt{\frac{8kT \ln 2}{mc^2}}$$

(Szczegóły - na tablicy)

# 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

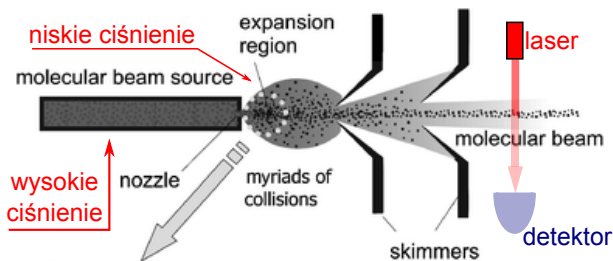
Poszerzenie **niejednorodne** - prawdopodobieństwo oddziaływania jest różne dla różnych grup atomów (cząsteczek):

- 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

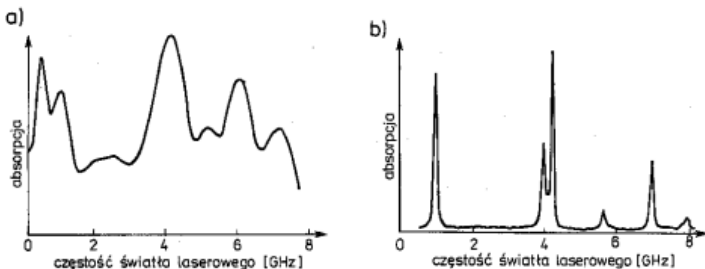


[V. Aquilanti et al, Phys. Chem. Chem. Phys., 2005,7, 291]

- 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



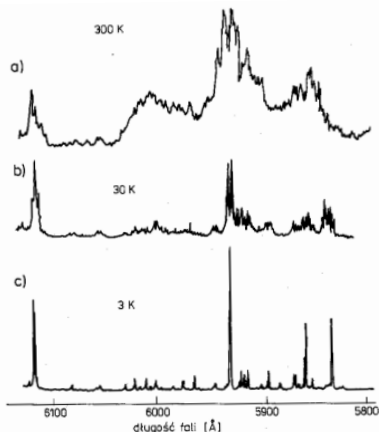
**Rys. 10.3.** Wycinek widma wzbudzenia cząsteczki  $\text{Cs}_2$  w zakresie widmowym około  $\lambda = 476,5$  nm  
a) uzyskanego w komórce z parami ceszu, b) uzyskanego w skolimowanej wiązce ceszowej

[W. Demtroder, Spektroskopia laserowa, PWN]



# Spektroskopia subdopplerowska

## Wiązki atomowe i molekularne

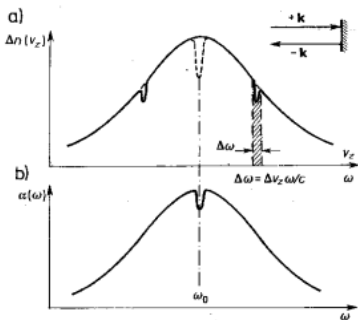


Rys. 10.5. Uproszczenie widma wzbudzenia  $\text{NO}_2$  wskutek wewnętrznego chłodzenia w wiązce nadźwiękowej; a) zwykła próbka czystego  $\text{NO}_2$  w temperaturze pokojowej pod ciśnieniem 0,04 tora, b) nadźwiękowa wiązka czystego  $\text{NO}_2$ , c) nadźwiękowa wiązka Ar z domieszką 5%  $\text{NO}_2$ . Źródłem wzbudzenia był laser barwnikowy o pracy ciągłej o szerokości widmowej  $0,5 \text{ \AA}$  [10.13]



# Spektroskopia nasyceniowa

## Dip Lamba

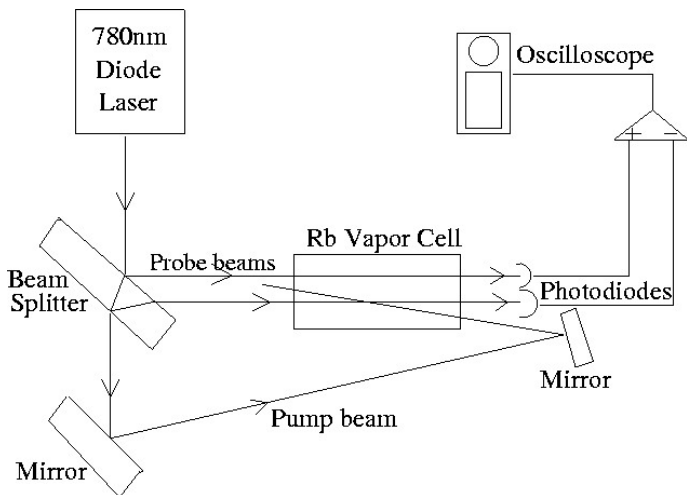


[W. Demtroder, Spektroskopia laserowa, PWN]

- 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

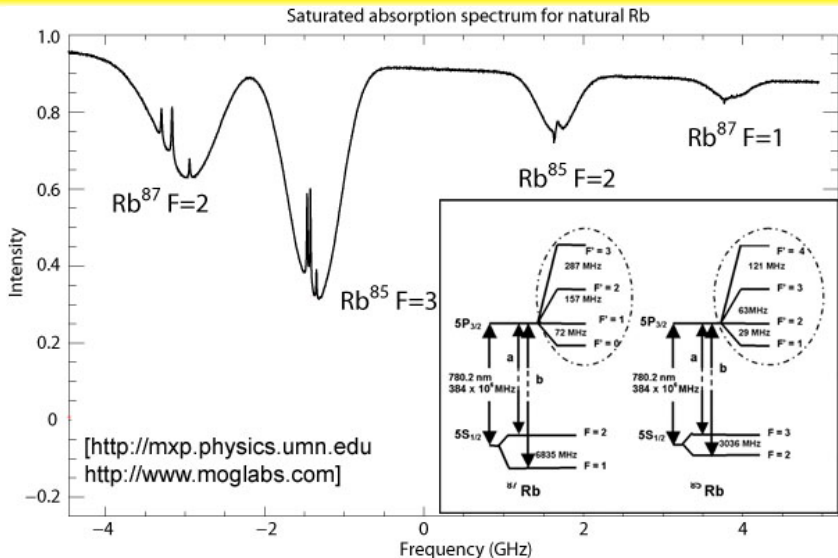
## Pomiar widma absorpcji nasyceniowej



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

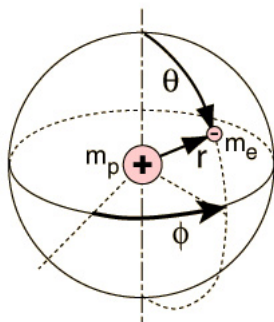
# Spektroskopia nasyceniowa

## 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

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

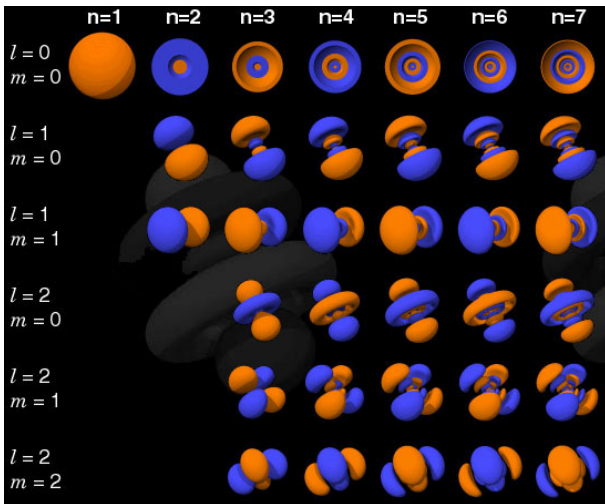
(nie wpływa na energię - degeneracja przypadkowa ze względu na zależność potencjału od  $r^{-1}$ )

- $m$  - decyduje o rzucie momentu pędu

$$L_z = \hbar m$$

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

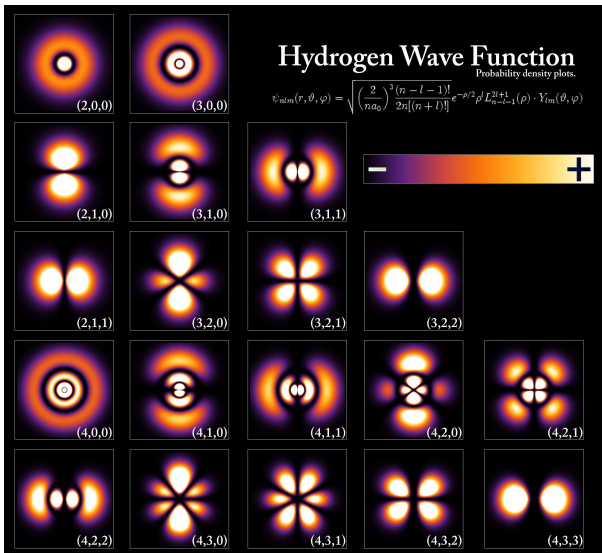
# Funkcje falowe atomu wodoru



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



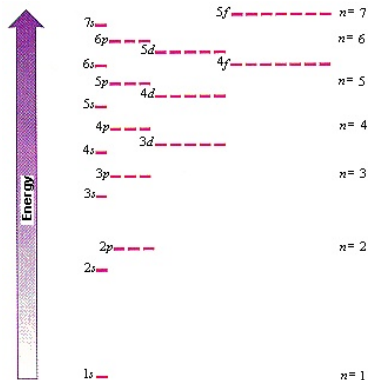
# Funkcje falowe atomu wodoru



# Atomy wieloelektronowe

## Energie poziomów energetycznych

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



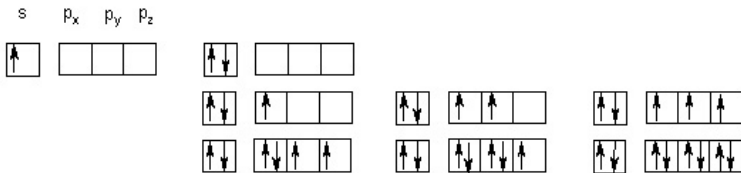
- $l = 0$ : **s**
- $l = 1$ : **p**
- $l = 2$ : **d**
- $l = 3$ : **f**

# 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



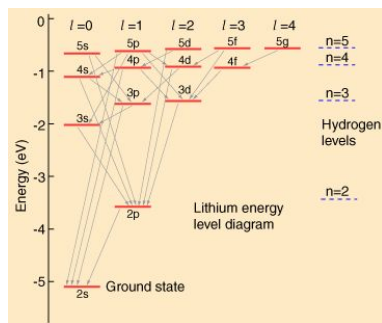
[<http://www.mlyniec.gda.pl>]

# 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]