

# Wstęp do Optyki i Fizyki Materii Skondensowanej

## Część I: Optyka, wykład 2

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

Wydział Fizyki  
Uniwersytet Warszawski

2017/18

# Plan

- 1 Podstawy spektroskopii
- 2 Spektroskopia w zastosowaniach
- 3 Kształty linii

# Natężenie światła

Pole elektryczne fali E-M:

$$E(t) = E_0(t)e^{i\omega_0 t}$$

- $E_0(t)$  – wolnozmiennie
- $e^{i\omega_0 t}$  – szybkozmiennie

Natężenie światła:

$$I(t) = \frac{1}{2}c\epsilon_0 |E(t)|^2 = \frac{1}{2}c\epsilon_0 |E_0(t)|^2$$

Energia (na jednostkę powierzchni):

$$\mathcal{E} = \int_{-\infty}^{\infty} I(t) dt = \frac{1}{2}c\epsilon_0 \int_{-\infty}^{\infty} |E_0(t)|^2 dt$$

$I(t)$  takie, żeby  $\mathcal{E}$  – skończone (włączamy i wyłączamy żarówkę...)

# Widmo światła

Rozkład pola elektrycznego na fale płaskie:

$$E(t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \tilde{E}(\omega) e^{i\omega t} d\omega$$

Amplitudy spektralne:

$$\tilde{E}(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} E(t) e^{-i\omega t} dt$$

Skorzystamy z twierdzenia Parsewala:

$$\int_{-\infty}^{\infty} |E(t)|^2 dt = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} |\tilde{E}(\omega)|^2 d\omega$$

I policzymy energię (na jednostkę powierzchni):

$$\mathcal{E} = \frac{1}{2} c \epsilon_0 \int_{-\infty}^{\infty} |E(t)|^2 dt = \frac{1}{4\pi} c \epsilon_0 \int_{-\infty}^{\infty} |\tilde{E}(\omega)|^2 d\omega \equiv \int_{-\infty}^{\infty} \tilde{I}(\omega) d\omega$$

# Widmo światła

Energia:

$$\mathcal{E} = \int_{-\infty}^{\infty} I(t) dt$$

Natężenie światła:

$$I(t) = \frac{1}{2} c \epsilon_0 |E(t)|^2$$

**lub**

$$\mathcal{E} = \int_{-\infty}^{\infty} \tilde{I}(\omega) d\omega$$

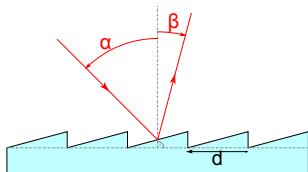
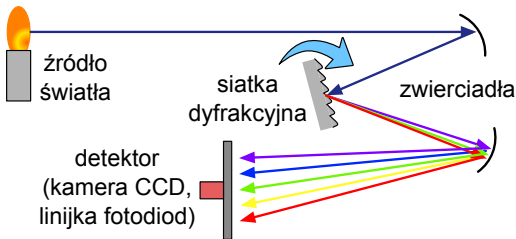
Widmo światła (natężenie spektralne):

$$\tilde{I}(\omega) = \frac{1}{4\pi} c \epsilon_0 |\tilde{E}(\omega)|^2$$

Widmo = ile energii przypada na przedział częstości  $d\omega$  w okolicy częstości  $\omega$

# Pomiar widma światła

## Spektrometr siatkowy



[Wikimedia Commons]

Interferencja konstruktywna:

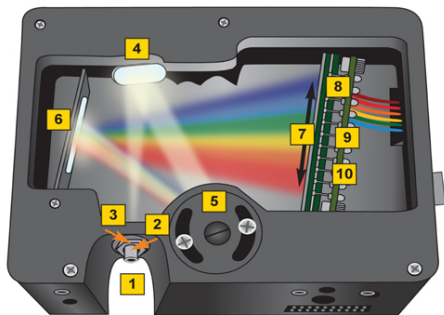
$$d(\sin \alpha - \sin \beta) = m\lambda$$

$m$  - rząd interferencji

# Pomiar widma światła

## Spektrometr siatkowy

Praktyczna realizacja miniaturowego spektrometru  
(Ocean Optics)

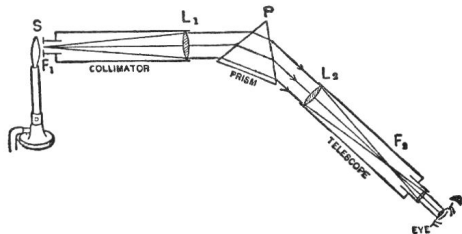
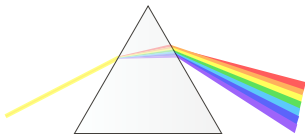


[Ocean Optics]



# Pomiar widma światła

## Spektrometr pryzmatyczny



Współczynnik załamania pryzmatu zależy od długości fali

$$n = n(\lambda)$$

Dlaczego? O tym na kolejnych wykładach

[Wikimedia Commons]



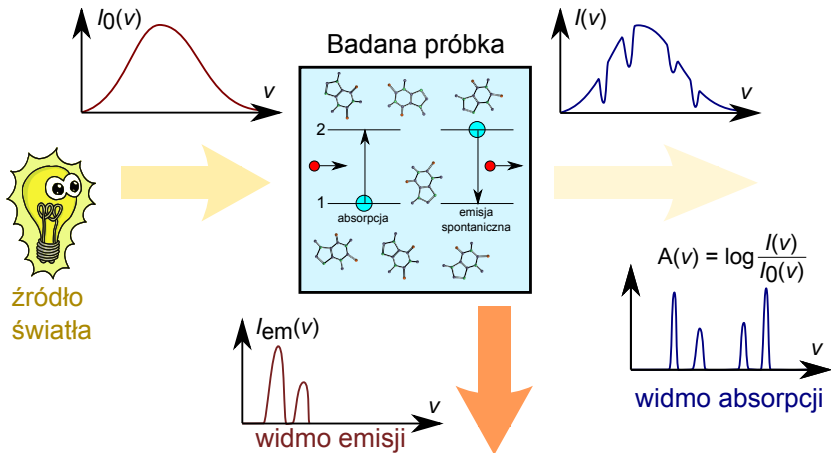
[<http://vuihocly.freevnn.com>]



# Jednostki w spektroskopii

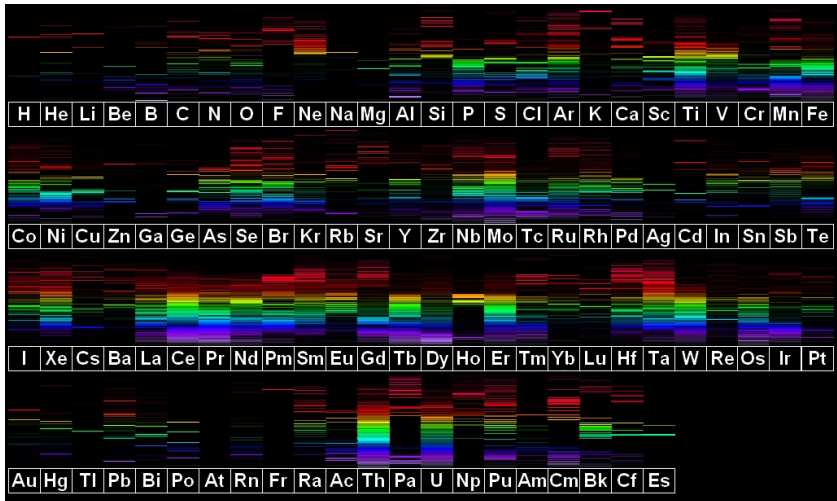
- Częstość kołowa:  $\omega$  [1/s]
- Częstotliwość:  $\nu = \frac{1}{T} = \frac{\omega}{2\pi}$  [Hz]
- Długość fali:  $\lambda = \frac{c}{\nu}$  [ $\mu\text{m}$ , nm]
- Energia:  $\mathcal{E} = h\nu$  [J, eV, meV]
- Liczba falowa:  $\tilde{\nu} = \frac{1}{\lambda}$  [ $\text{cm}^{-1}$ ]

# Spektroskopia emisyjna i absorpcyjna



# Badania struktury energetycznej

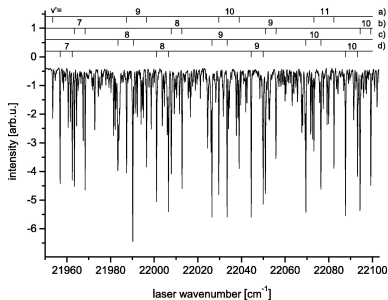
Źródło informacji o budowie materii



patlah.r

# Spektroskopia absorpcyjna

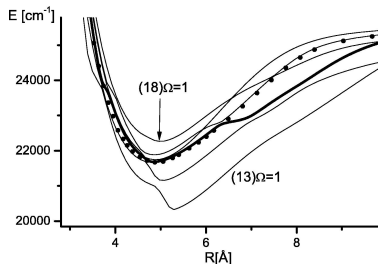
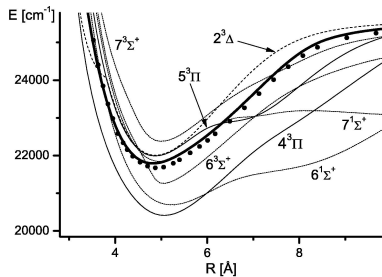
## Badania struktury energetycznej



↑ A portion of the polarisation spectrum of KCs recorded with circularly polarised pump laser beam [...]

→ The IPA potential curve of the 4<sup>1</sup>Π state in KCs (circles) [...]

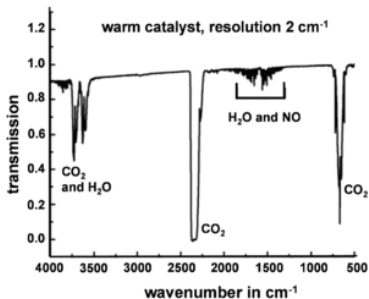
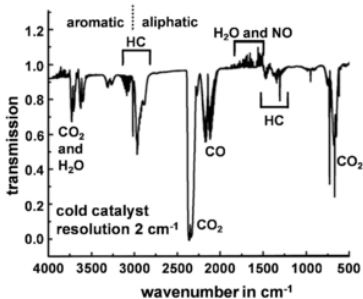
[J. Szczepkowski, A. Grochola, W. Jastrzębski, P. Kowalczyk, Chem. Phys. Lett. **576**, 10 (2013)]



# Spektroskopia absorpcyjna

## Analiza składu gazów

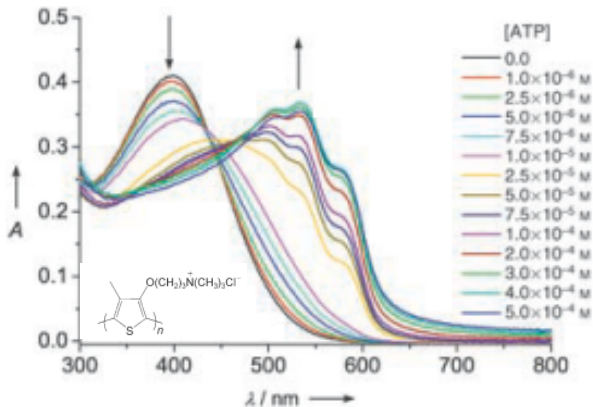
### Analiza spalin silnika samochodowego



K.-P. Mollmann, M. Vollmer 2013 Eur. J. Phys. 34. S123

# Spektroskopia absorpcyjna

## Sensory chemiczne

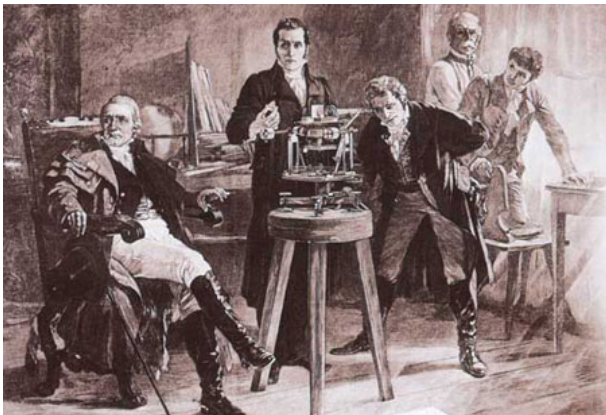


Zmiana widma cząsteczki-sensora w roztworze wodnym ze wzrostem stężenia ATP

[C. Li et al. Chem., Int. Ed., 2005, 44, 6371]

# Spektroskopia w astronomii

## Badanie atmosfer gwiazd

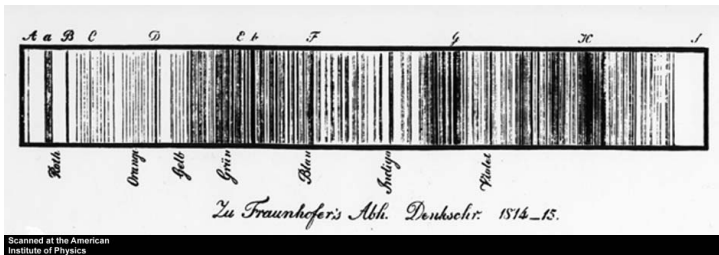


Fraunhofer i jego spektroskop zbudowany w 1814 roku

[<http://www.jvfg-cham.de>]

# Spektroskopia w astronomii

## Badanie atmosfer gwiazd

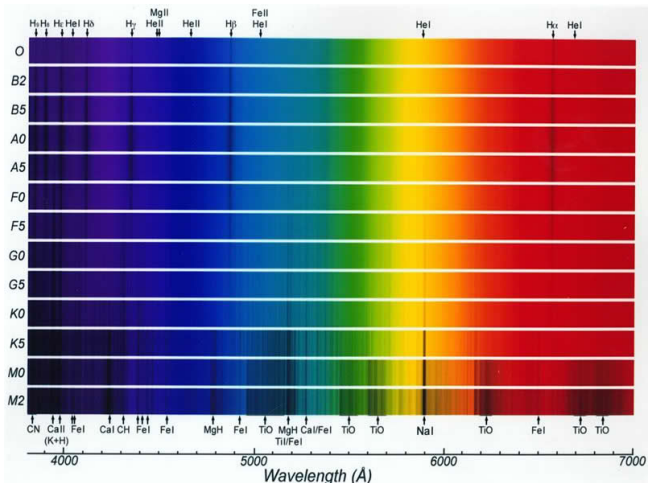


Widmo Słońca opisane przez Fraunhofera  
[American Institute of Physics]



# Spektroskopia w astronomii

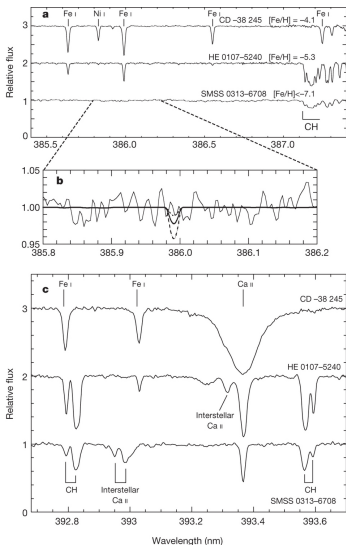
## Typy widmowe gwiazd



[<http://astrocosmosci.files.wordpress.com>]

# Spektroskopia w astronomii

## Oznaczenie wieku gwiazd



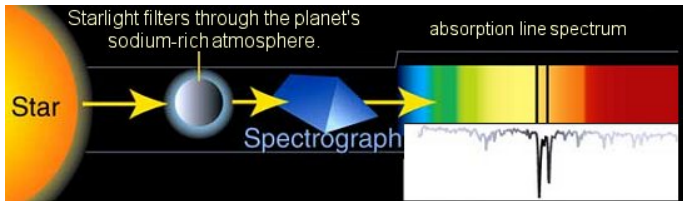
*The spectrum of SMSS 0313-6708 shows an absence of detectable Fe I lines (a) and is dominated by molecular features of CH (c). Panel b shows the vicinity of what should be one of the strongest iron lines in the UV/optical wavelength region.*

**Brak linii absorpcyjnych żelaza pozwolił stwierdzić, że jest to najstarsza znana obecnie gwiazda**

[S. C. Keller et al, Nature 2014, 09.02.2014]

# Spektroskopia w astronomii

## Badanie składu atmosfery planety pozasłonecznej

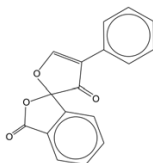


[NASA]

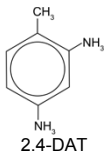
# Zastosowania spektroskopii fluorescencyjnej

## Detekcja śladowych ilości substancji

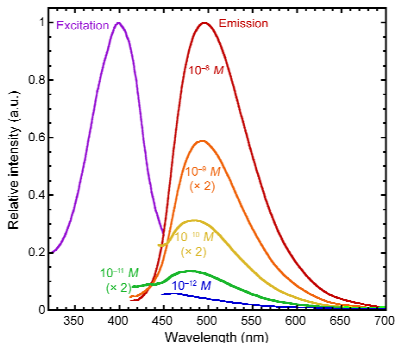
### Wykrywanie materiałów wybuchowych



Fluorescamine



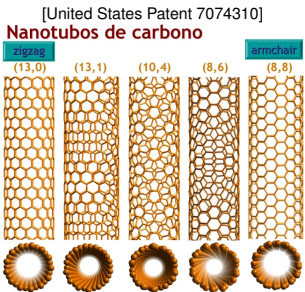
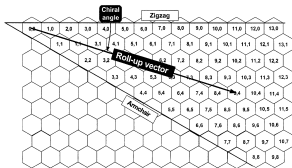
2,4-DAT



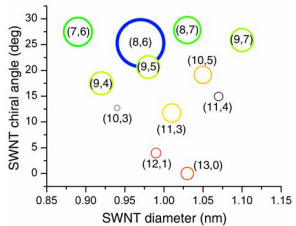
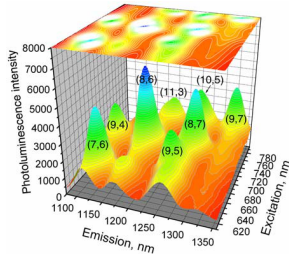
Excitation and emission spectra of 2,4-DAT + fluorescamine at various dilutions, blank-subtracted, and all bandpasses = 10 nm.

# Zastosowania spektroskopii fluorescencyjnej

## Charakteryzacja materiałów – nanorurki węglowe



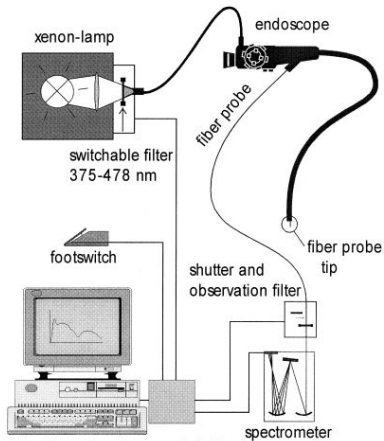
[Ceclilia Noguez, <http://www.fisica.unam.mx>]



[Horiba Jobin-Yvon]

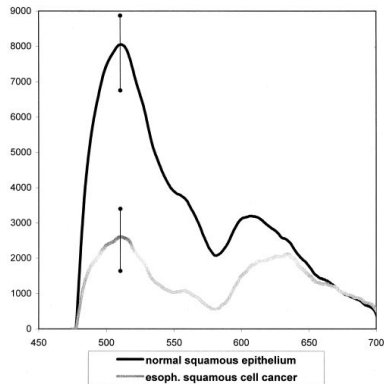
# Zastosowania spektroskopii fluorescencyjnej

## Medycyna - identyfikacja nowotworów



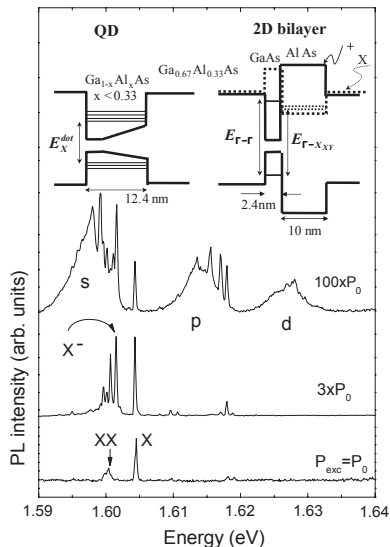
PC with synchro box, control of the switchable filter and the shutter, storage and display of spectra

Porównanie widm tkanki zdrowej i nowotworowej:



[B. Mayinger, Am. J. Gastroenterol. 96, 2616 (2001)]

# Luminescencja w ciele stałym

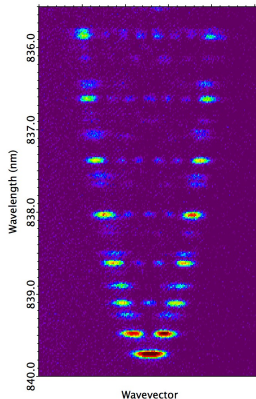
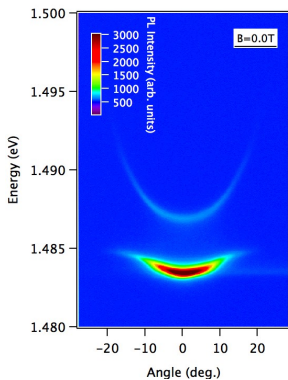


Fotoluminescencja kropki kwantowej dla różnej liczby ekscytonów w kropce kwantowej. X – pojedynczy ekscyton, XX – dwa związane ekscytony,  $X^-$  – trion = dwa elektrony + dziura. s,p,d – kolejne powłoki w kropce kwantowej oznaczane analogicznie do stanów wzbudzonych atomu wodoru.

[B. Piętka et al, Phys. Rev. B 87, 035310 (2013)]

# Luminescencja w ciele stałym

## Widma luminescencji polarytonów ekscytonowych



Polaryton ekscytonowy = foton silnie sprzężony z ekscytonem w mikrowęzce półprzewodnikowej. W wyniku sprzężenia dostajemy górny i dolny polaryton (górny o wyższej i dolny o niższej energii). Na widmach widoczna jest luminescencja dla różnych kątów emisji (pędów polarytonu). [B. Piętka]



# Czas życia stanu wzbudzonego

Liczba przejść spontanicznych:

$$dN_{21} = A_{21} N_2 dt$$

Zmiana liczby atomów w stanie wzbudzonym:

$$dN_2 = -dN_{21} = -A_{21} N_2 dt$$

$$\frac{dN_2}{dt} = -A_{21} N_2$$

Liczba atomów w stanie wzbudzonym:

$$N_2(t) = N_{20} e^{-A_{21} t} = N_{20} e^{-t/\tau}$$

Czas życia stanu wzbudzonego:  $\tau = 1/A_{21}$

# Naturalna szerokość linii

Natężenie światła  $\sim$  liczby emitowanych w jedn. czasu fotonów:

$$I(t) \sim \frac{dN_{21}}{dt} = A_{21} N_{20} e^{-A_{21}t}$$

$$I(t) = I_0 e^{-A_{21}t}$$

Pole elektryczne emitowanej fali:

$$I(t) \sim |E(t)|^2$$

$$t \geq 0 : E(t) = E_0 e^{-A_{21}t/2} e^{i\omega_0 t}$$

$$\omega_0 = \frac{E_2 - E_1}{\hbar}$$

$$t < 0 : E(t) = 0$$

# Kształt linii widmowej

$$\tilde{E}(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} E(t)e^{-i\omega t} dt = \int_0^{\infty} E_0 e^{-i(\omega-\omega_0)t} e^{-A_{21}t/2} dt$$

$$\tilde{E}(\omega) = E_0 \int_0^{\infty} e^{-[A_{21}/2 - i(\omega-\omega_0)]t} dt$$

$$\tilde{E}(\omega) = -\frac{E_0}{A_{21}/2 - i(\omega - \omega_0)} \left[ e^{-[A_{21}/2 - i(\omega-\omega_0)]t} \right]_0^{\infty}$$

$$\tilde{E}(\omega) = -\frac{E_0}{i(\omega - \omega_0) - A_{21}/2}$$

$$\tilde{I}(\omega) \sim |\tilde{E}(\omega)|^2 = \frac{E_0^2}{(\omega - \omega_0)^2 + (A_{21}/2)^2}$$

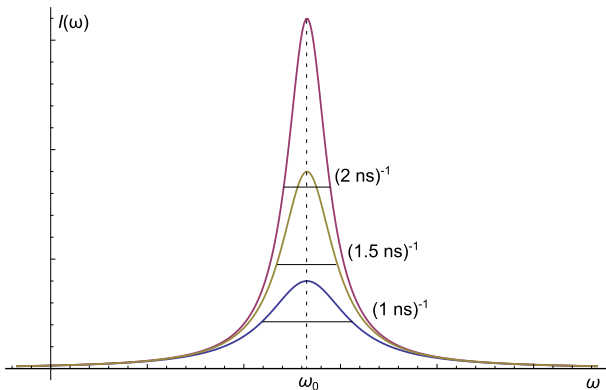
$$\tilde{I}(\omega) = \frac{I_0}{(\omega - \omega_0)^2 + (A_{21}/2)^2}$$

# Profil Lorentza

Szerokość połówkowa profilu Lorentza:

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

(Zasada nieoznaczoności)



# Poszerzenie zderzeniowe

Zderzenia są dodatkowym czynnikiem tłumiącym ( $\Gamma$ ):

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

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)*