



## ***Lasery – wybrane konstrukcje***



## Klasyfikacja laserów

### ośrodek wzmacniający

- gaz (atomowy, molekularny)
- ciecz
- ciało stałe (kryszta, szkło)
- półprzewodnik
- swobodne elektrony

### metoda pompowania

- optyczne
- elektryczne
- chemiczne
- inne

### reżim pracy

- ciągła + długie impulsy
- impulsowa
  - Q-switching
  - mode-locking



## Lasery gazowe

### gazowe ośrodki wzmacniające

- mała gęstość  $N \approx 10^{12} \text{ cm}^{-2}$  dla  $1 \text{ atm}$
- niski koszt
- wąskie linie spektralne  $\Delta \nu = \text{MHz} \div \text{GHz}$

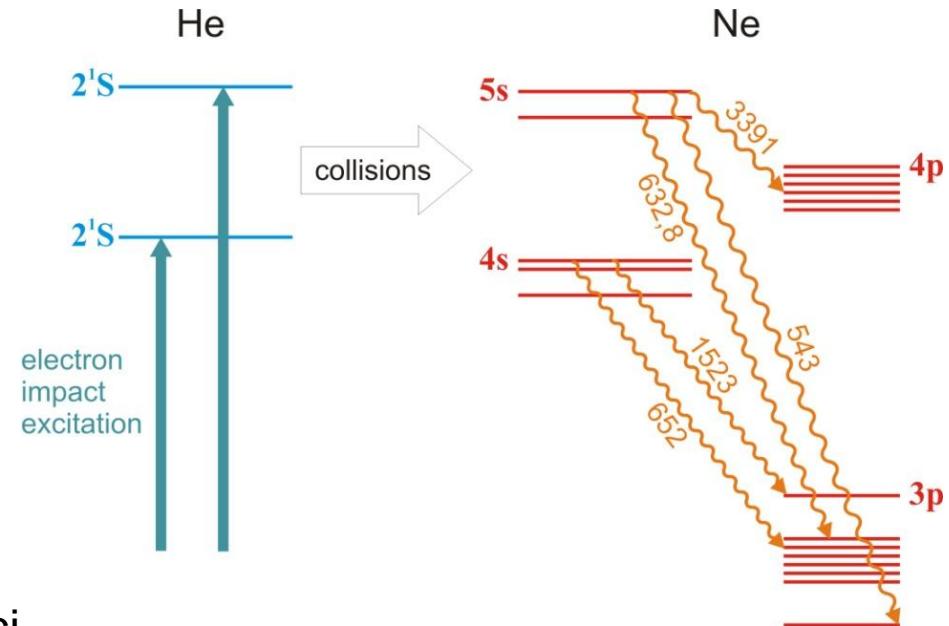
gazy atomowe      ->    dyskretne linie

gazy molekularne      ->    ciągłe, quasi-ciągłe bądź dyskretne pasma wzmocnienia

- pompowanie – wyładowanie w gazie  
(podłużne bądź poprzeczne)

## Laser hel-neon (He-Ne)

- He : Ne  $\approx 10 : 1$
- $pd \approx 0.5 \text{ Torr} \cdot \text{cm}$
- $i \approx 30 \text{ mA}$
- $\frac{U}{P} \approx 28 \text{ V/Torr}$
- $T_e \approx 80000 \text{ K}$



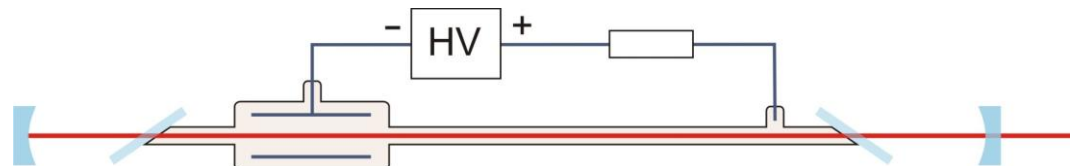
konkurencja

$$3.39 \Leftrightarrow 0.6328$$

$$0.6328 \Leftrightarrow 1.15$$

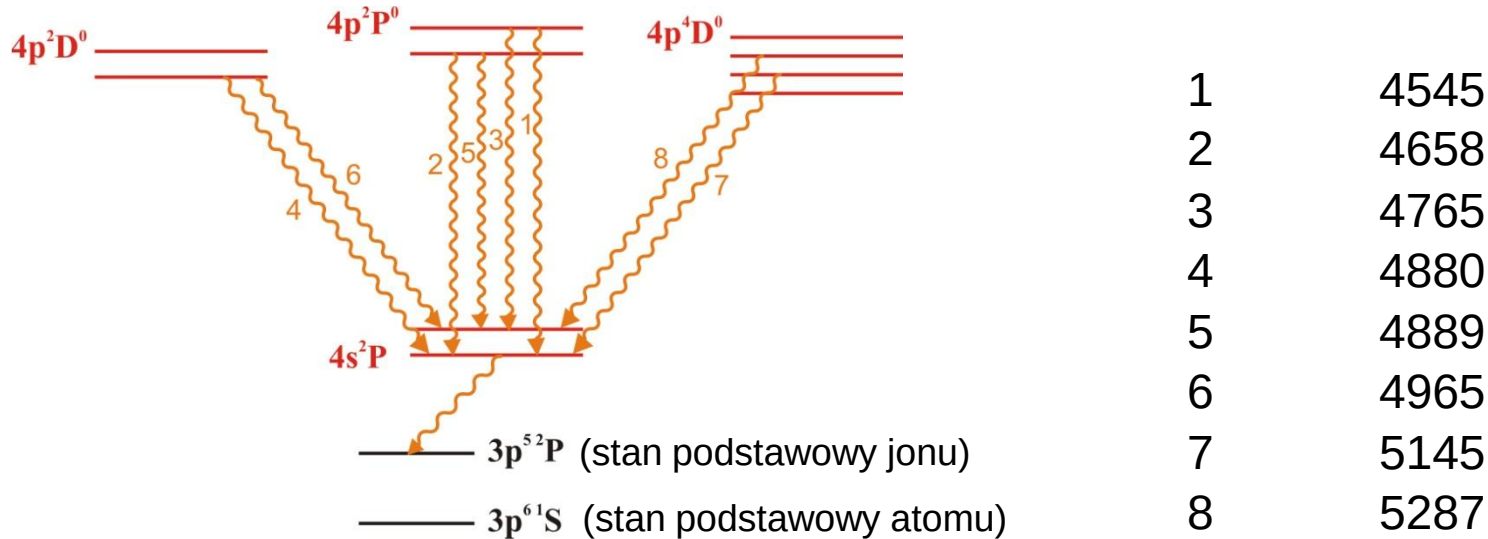
- okienka Brewstera ( $R=0$  dla polaryzacji  $\rho$ )
- 2 lustra sferyczne
- kapilara o średnicy wewnętrznej 2 - 5 mm
- zimna katoda
- bardzo małe wzmocnienie  $\rightarrow$  ważna czystość
- polaryzacja liniowa
- praca wielomodowa  $\Delta\nu \cong 1.5 \cdot 10^9 \text{ Hz}$ ,  $\delta\nu \approx 100 \text{ MHz}$

- niespolaryzowany
- praca jednomodowa

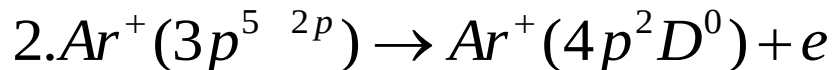
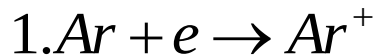




## Laser argonowy ( $\text{Ar}^+$ , $\text{Ar}:\text{ion}$ )



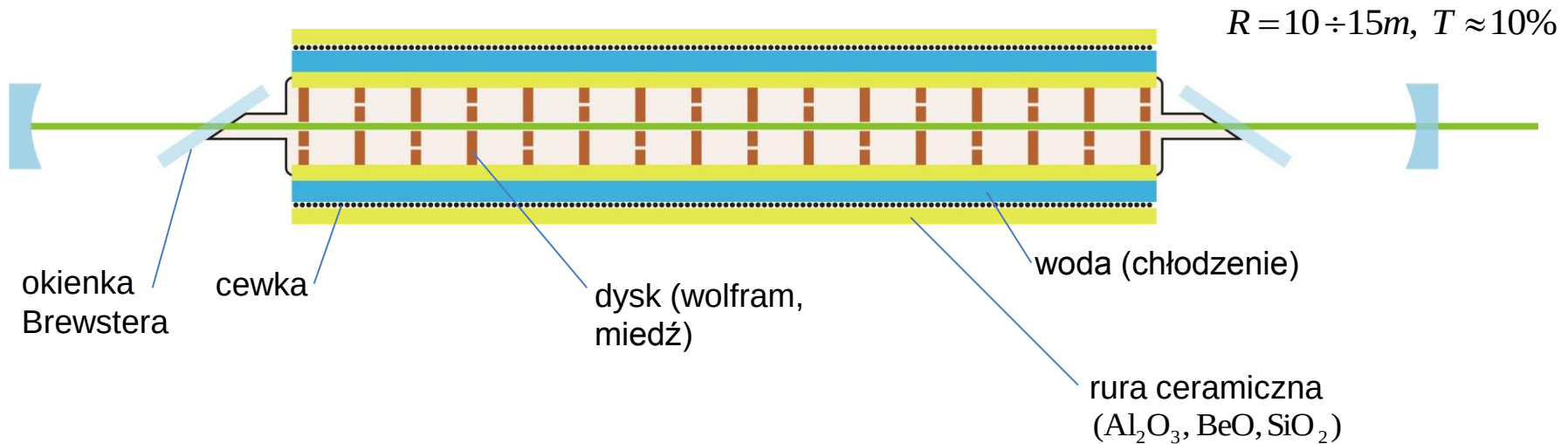
Główny kanał pompowania:



Wydajność obu procesów  $\sim F \sim I$       wydajność pompowania  $\sim I^2$

Linie ultrafioletowe:  $2754 - 3511 \text{\AA}$  (kilka linii, *all lines*)

## Laser argonowy ( $\text{Ar}^+$ , $\text{Ar}:\text{ion}$ )



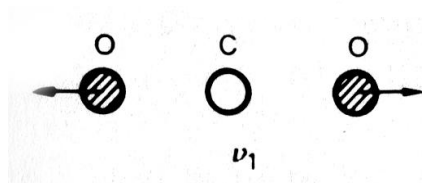
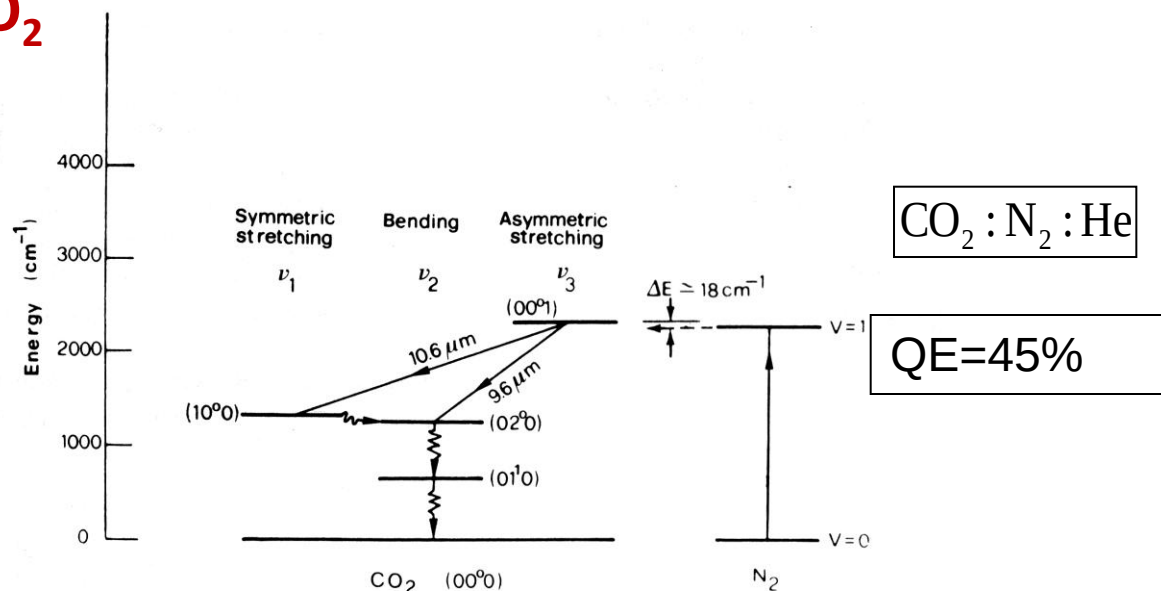
$$U = 400V, I = 50A \Rightarrow P_{\text{elektr}} = 20kW \Rightarrow \text{grzanie rury}$$

- pole magnetyczne
  - stabilizacja prądu wyładowania
  - stabilizacja mocy wyjściowej
- }  $\Rightarrow \sim 0.2\% \text{ RMS}$
- $\text{TEM}_{00}$
  - $P \sim 20W \text{ VIS}, 2 \div 3W \text{ UV}$  (praca na kilku liniach)
  - wybór jednej linii pryzmatem
  - $\Delta\nu \sim 7 \div 10GHz$ , poszerzenie jednorodne (starkowskie) i niejednorodne (dopplerowskie), etalon wewnętrzny  $\Rightarrow$  jeden mod
  - $\eta \leq 0.1\%$

# Laser CO<sub>2</sub>

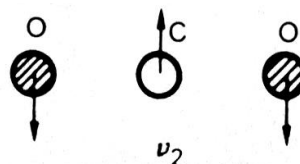
$$\tau_{001 \rightarrow 020} = 3s!$$

$$\tau_{001 \rightarrow 000} \approx 5ms$$



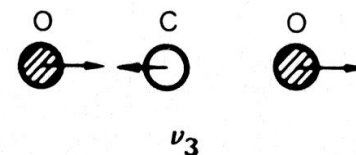
symetryczne  
rozciąganie

$$\nu_1 = 1388cm^{-1}$$



zginanie

$$\nu_2 = 667cm^{-1}$$



asymetryczne  
rozciąganie

$$\nu_3 = 2349cm^{-1}$$

- małe ciśnienie – dyskretne częstotliwości, strojenie siatką dyfrakcyjną i wnęką.
- duże ciśnienie – poszerzenie ciśnieniowe, ciągłe przestrajanie

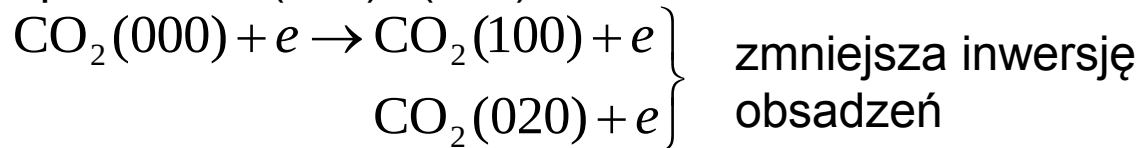


## Laser CO<sub>2</sub>

mechanizmy pompowania :

- $$\left. \begin{aligned} 1. \quad & \text{N}_2(v=0) + e \rightarrow \text{N}_2(v=n \leq 8) + e \\ & \text{N}_2(v=n) + \text{CO}_2(000) \rightarrow \text{N}_2(v=n-1) + \text{CO}_2(001) \end{aligned} \right\} \begin{array}{l} \text{wzbudzenie } \text{N}_2 \\ \text{i przekaz energii} \end{array}$$
- $$2. \quad \text{CO}_2(000) + e \rightarrow \text{CO}_2(001) + e \quad \text{bezpośrednie wzbudzenie}$$

wzbudanie poziomów (100) i (020)



ok.. 60% energii wyładowania prowadzi do obsadzenia poziomu (001)!

całkowita sprawność lasera ~ 27%

depopulacja poziomów (100) i (020) przez zderzenia z He.

- szerokość linii wzmocnienia

$$\Delta \nu_D \approx 50 \text{ MHz}$$

$$\Delta \nu_C \approx 7 \cdot 6 \cdot p(300/T)^{1/2} \text{ MHz} \approx 43 \text{ MHz} \quad \text{dla } p = 15 \text{ Torr}, T = 400 \text{ K}?$$

całkowita szerokość linii wzmocnienia dla małych ciśnień < 100 MHz

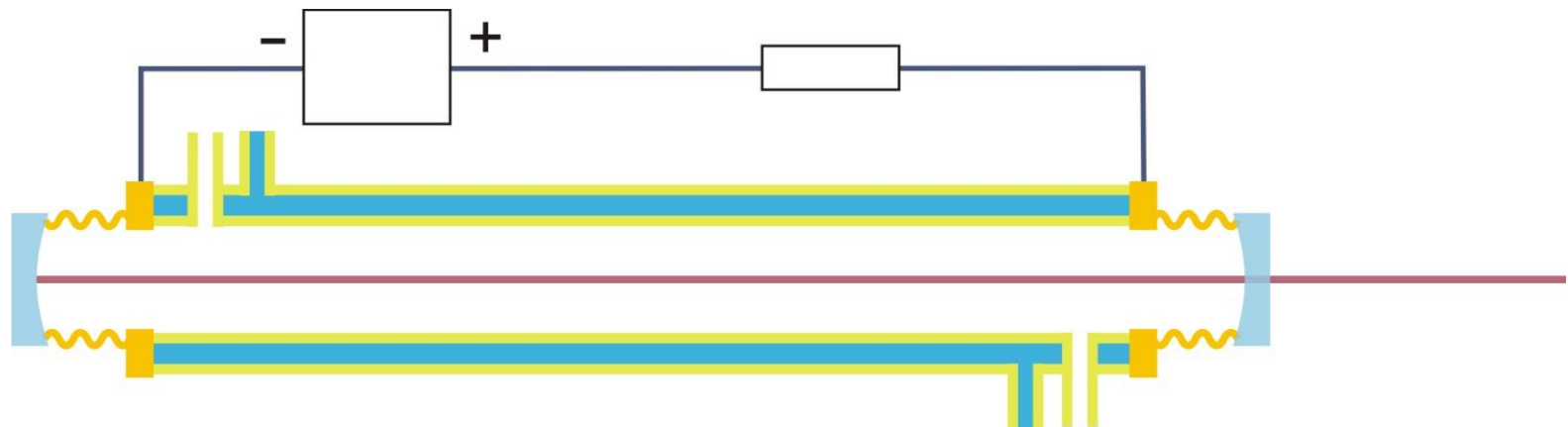
mod rezonatora o długości



## Laser CO<sub>2</sub>

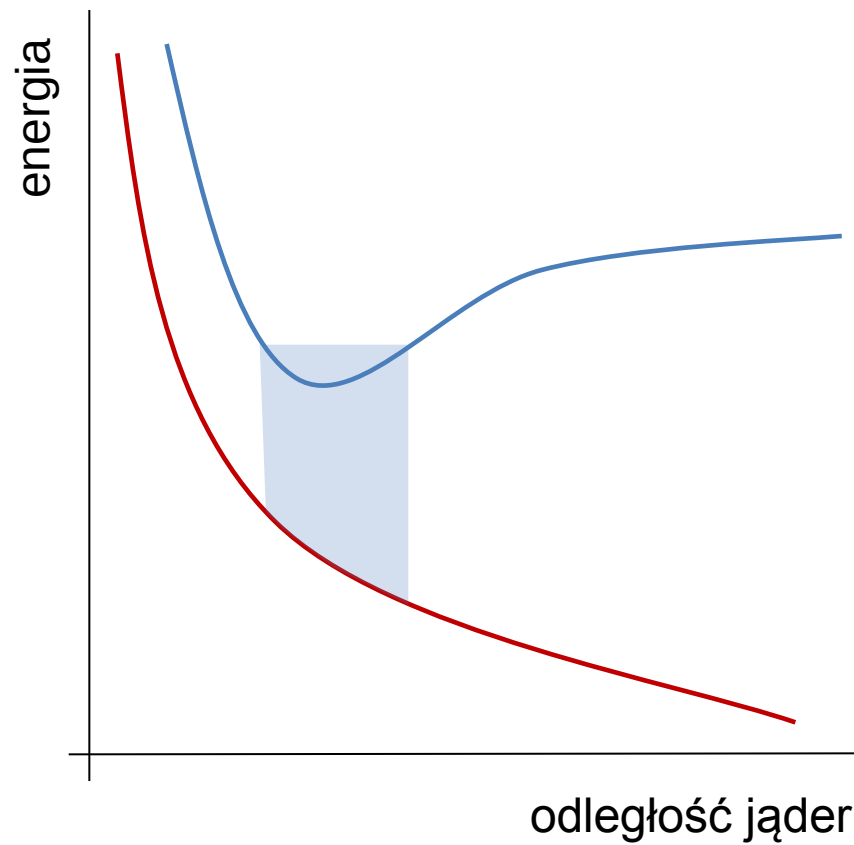
mieszanka: CO<sub>2</sub> : N<sub>2</sub> : He = 1:1:8 (wartość typowa, proporcje zależą od ciśnienia całkowitego prądu wyładowania, etc.)  
ciśnienie 10 Torr kilka atm.

podłużny przepływ gazu – podłużne wyładowanie



- $pD \cong 22 \text{ Torr} \cdot \text{cm}$ , typowo:  $D = 1.5 \text{ cm}$ ,  $p = 15 \text{ Torr}$
- $50 \div 60 \text{ W/mbrury}$  (niezależnie od średnicy rury wyładowczej)
- $T_{\text{gaz}}$  zdefiniowana przez dyfuzję do ścian rury wyładowczej
- degradacja mieszanki – powstaje CO (absorbpcja  $\lambda_L$ )

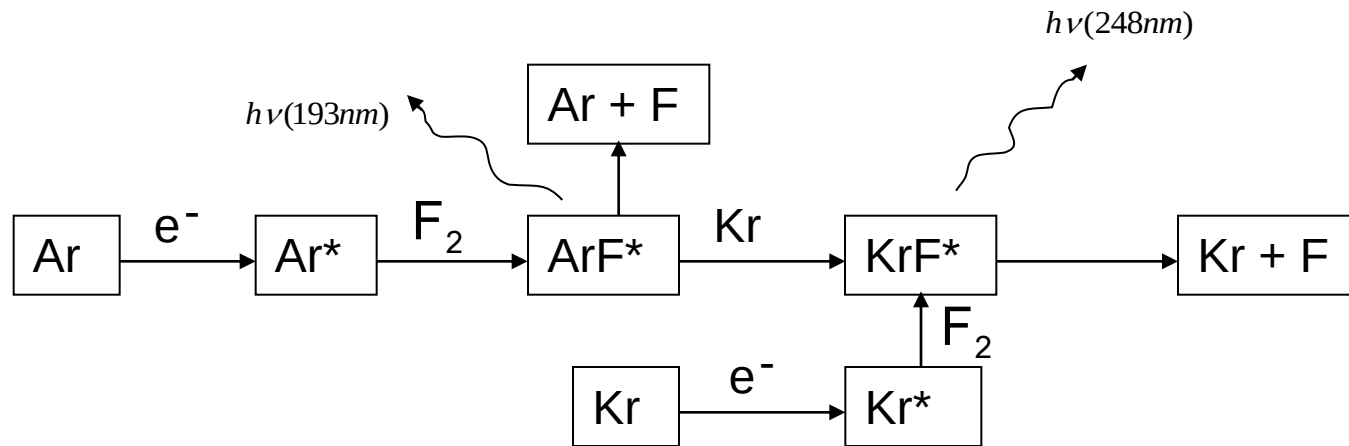
## Lasery ekscymerowe



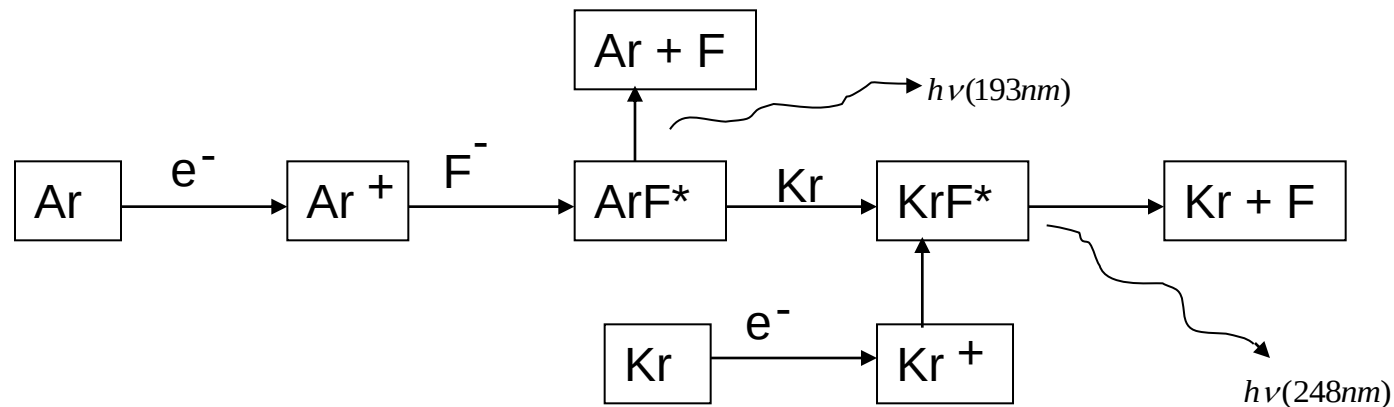
## Lasery ekscymerowe

mieszanka  $F_2 : Kr : Ar = 0.005 : 0.05 : 0.945$

$p = 2 \div 3 \text{ atm}$



Tworzenie ekscimeru  $KrF^*$  w laserze pobudzonym wyładowaniem elektrycznym



Tworzenie ekscimeru  $KrF^*$  w laserze wzbudzany wiązka szybkich elektronów



## Lasery ekscymerowe

- duże ciśnienie gazu + obecność chlorowców  $\Rightarrow$  wyładowanie elektryczne nie jest stabilne  
 $\Downarrow$   
praca impulsowa
- pompowanie  
wiązka szybkich elektronów  
próżnia  
mieszanka gazów  
b. mała częstość repetycji

impuls

– 100kV

~100ns

prejonizacja (jonizacja wstępna) –UV, wiązka elektronowa, X

$$N_c > 10^9 \text{ cm}^{-3}$$



## Lasery na ciele stałym (ale nie półprzewodnikowe)

matryca + domieszki

izolatory =  
kryształy, szkła

metale przejściowe: Cr, Ti  
metale ziem rzadkich: Nd, Er, Ho, Yb

- matryca

kryształy tlenkowe: korund ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ )  
aleksandryt ( $\text{BeAl}_2\text{O}_4$ )  
YAG – garnet aluminowo - itrowy ( $\text{Y}_3\text{Al}_5\text{O}_{12}$ )  
⋮

kryształy fluorkowe: LiSAF ( $\text{LiSrAlF}_6$ )  
YLF ( $\text{YLiF}_4$ )  
⋮

- ważne parametry matrycy

- przewodnictwo termiczne
- ogniskowanie termiczne ( $\frac{dn}{dT}$ )
- własności mechaniczne
- absorpcja i rozpraszanie na  $\lambda_L$

$$FOM = \frac{\Delta \alpha_p}{\alpha_L}$$



## Lasery na ciele stałym (ale nie półprzewodnikowe)

- domieszki (metale ziem rzadkich)

Przykład: Nd:YAG

konfiguracja elektronowa:  $1s^2 2s^2 2p^6 3d^{10} 4s^2 4p^6 4f^4 5s^2 5p^6 6s^2$

w kryształach atom neodymu jest 3-krotnie zjonizowany

$\dots 4f^4 5s^2 5p^5$

przejścia optyczne  $\Leftrightarrow$  wzbudzenia elektronu 4f

ekranowanie przez elektrony 5s i 5p powoduje, że częstości, szerokości linii, czasy życia mało zależą od rodzaju kryształu.

Np. Nd:YAG  $\lambda_L = 1.064 \mu m$

Nd:YLF  $\lambda = 1.047 \mu m$

- domieszki (metale przejściowe)

przykład: Ti:Sapphire  $Ti^{3+} : Al_2O_3$

konfiguracja elektronowa:  $1s^2 2s^2 2p^6 3s^2 3p^6 3d^2 4s^2$

$Ti^{3+} : \dots 3p^6 3d^2$

- parametry przejść optycznych zależą od rodzaju matrycy
- możliwe jest silne sprzężenie z fononami



## Lasery neodymowe

najważniejsze matryce:      YAG  
                                         YLF      ~1% Nd  
                                         szkło

pompowanie lampami

pompowanie laserem półprzewodnikowym

$QE \approx 60 \div 70\%$

|                                              | YAG                  | YLF                                        | szkło              |
|----------------------------------------------|----------------------|--------------------------------------------|--------------------|
| przewodnictwo cieplne <sub>[W / m · K]</sub> | 13                   | 6                                          | 0.8                |
| $dn / dT$ [K <sup>-1</sup> ]                 | $7 \cdot 10^{-6}$    | $-4.3 \cdot 10^{-6}$<br>$-2 \cdot 10^{-6}$ | $-2 \cdot 10^{-6}$ |
| $\tau$ [μs]                                  | 230                  | 480                                        | ~800               |
| $\lambda_L$ [μm]                             | 1.064                | 1.047                                      | 1.059              |
| $\sigma$ [cm <sup>2</sup> ]                  | $1.8 \cdot 10^{-19}$ | $2.4 \cdot 10^{-19}$                       |                    |
| $\Delta \nu$ [cm <sup>-1</sup> ]             | ~6                   | ~6                                         | ~300               |

CW duża  
moc imp.

CW mała  
moc

impulsowa bardzo mała  
częstość repetycji



## Lasery półprzewodnikowe



## Ultrakrótkie impulsy laserowe – szkic historii

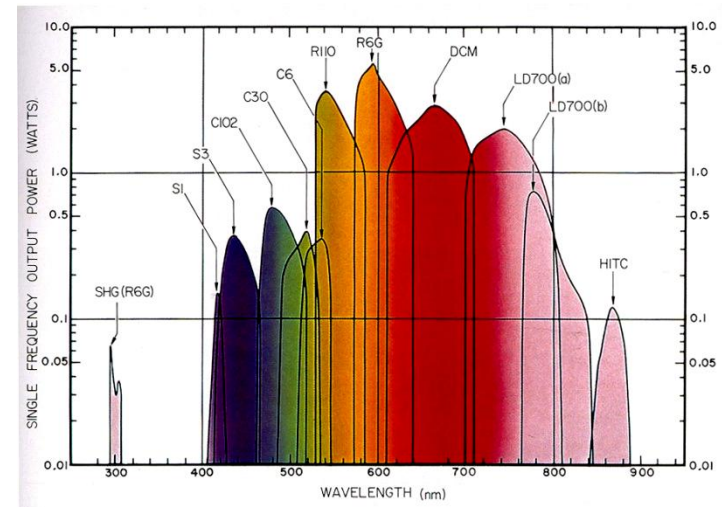
- 1878: Muybridge – fotografia
- 1899: Abram, Lemoigne – komórka Kerra
- 1955: Harold Edgerton ( $\mu\text{s}$ )

- 
- 1963: pierwsze obserwacje synchronizacji modów  
w laserze rubinowym, Guers, Mueller  
w laserze He-Ne, Statz, Tang

- 1966: laser barwnikowy, Schäfer et al.  
1970 – 10 ps  
1980 <100 fs  
1985(7) – 10 fs

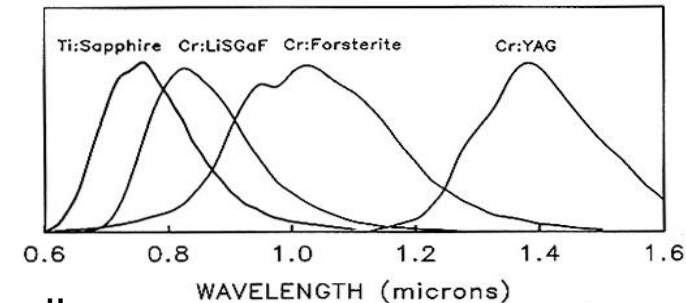
- 1974: Sub-ps-pulses, Shank, Ippen [16].

- 1985: Chirped Pulse Amplification, Strickland, Morou, [27].



## Ultrakrótkie impulsy laserowe – szkic historii

- 1986: Laser szafirowy, P. F. Moulton [28].  
 impulsy rzędu 100 fs  
 - technika pompa-sonda (pump-probe)  
 - pakiety falowe w cząsteczkach, A. Zewail



- 1987: 6 fs @ 600 nm, zewnętrzna kompresja, Fork et al. [18, 19].  
 1991: Kerr-lens modelocking, Spence et al. [32, 33, 34, 35, 36].

- impulsy rzędu kilku fs  
 - samomodulacja fazy (SPM)  
 - poszerzanie widma i kompresja

|                   |                            |    |
|-------------------|----------------------------|----|
| 1974: Ippen       | włókno z CS <sub>2</sub> , | nJ |
| 1978: Stolen, Lin | włókno jednomodowe,        | nJ |
| 1996: Nisoli      | włókno z gazem,            | mJ |



## Ultrakrótkie impulsy laserowe – szkic historii

2000: Corkum, attosekundy generacja wysokich harmonicznych (HHG),  
model 3-stopniowy

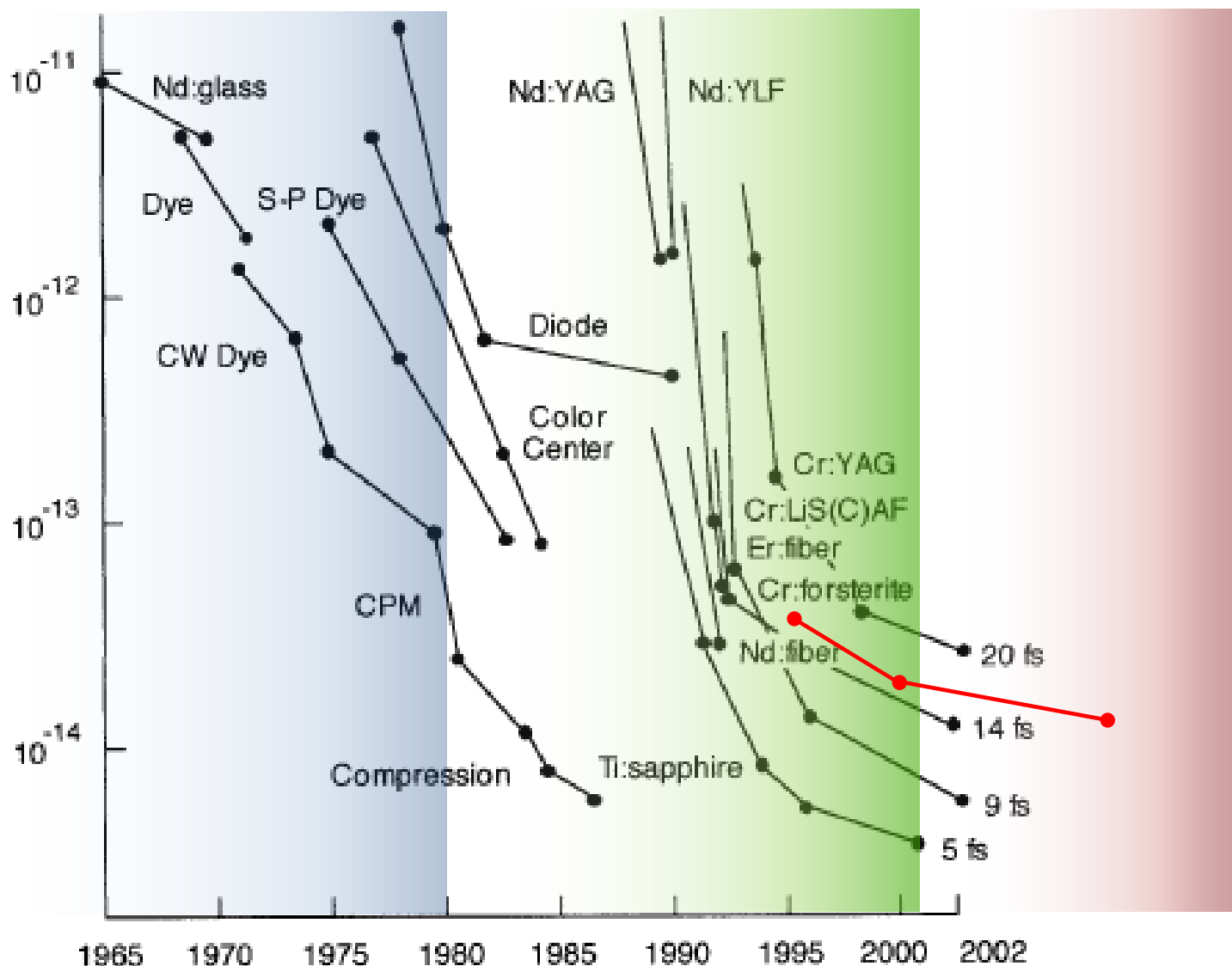
2001: 5 fs, poniżej dwóch cykli optycznych, oktawa, Ell et al.[42]

2001: 250 as, generacja wysokich harmonicznych, Krausz et al.[43]

2006: Sansone, pojedynczy impuls 160 as

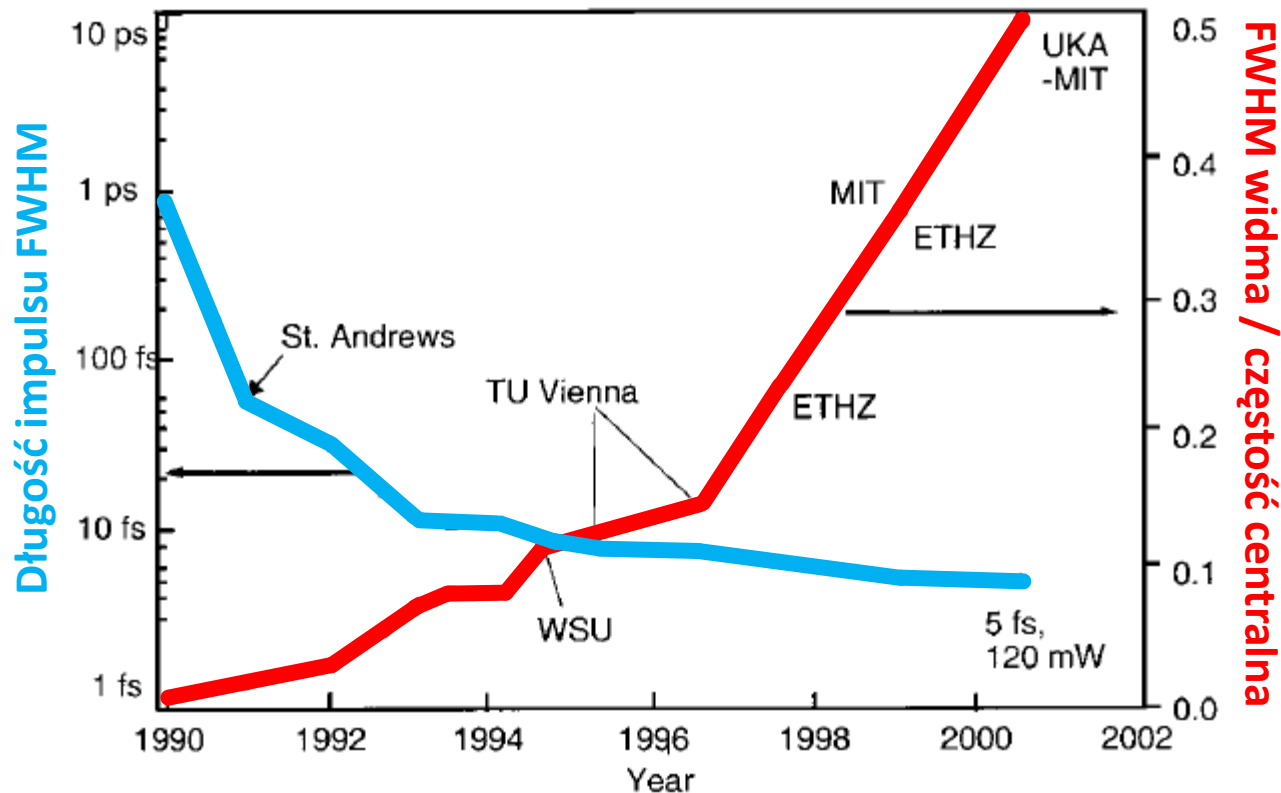
|                           |                           |                   |
|---------------------------|---------------------------|-------------------|
| <b>era pikosekundowa</b>  | <b>10 ps -&gt; 100 fs</b> | <b>15 lat</b>     |
| <b>era femtosekundowa</b> | <b>100 fs -&gt; 5 fs</b>  | <b>18 lat</b>     |
| <b>era aattosekundowa</b> | <b>5 fs -&gt;...</b>      | <b>&gt;15 lat</b> |

## Ultrakrótkie impulsy laserowe – szkic historii



## Ultrakrótkie impulsy laserowe – szkic historii

Laser szafirowy – od początków do granic możliwości

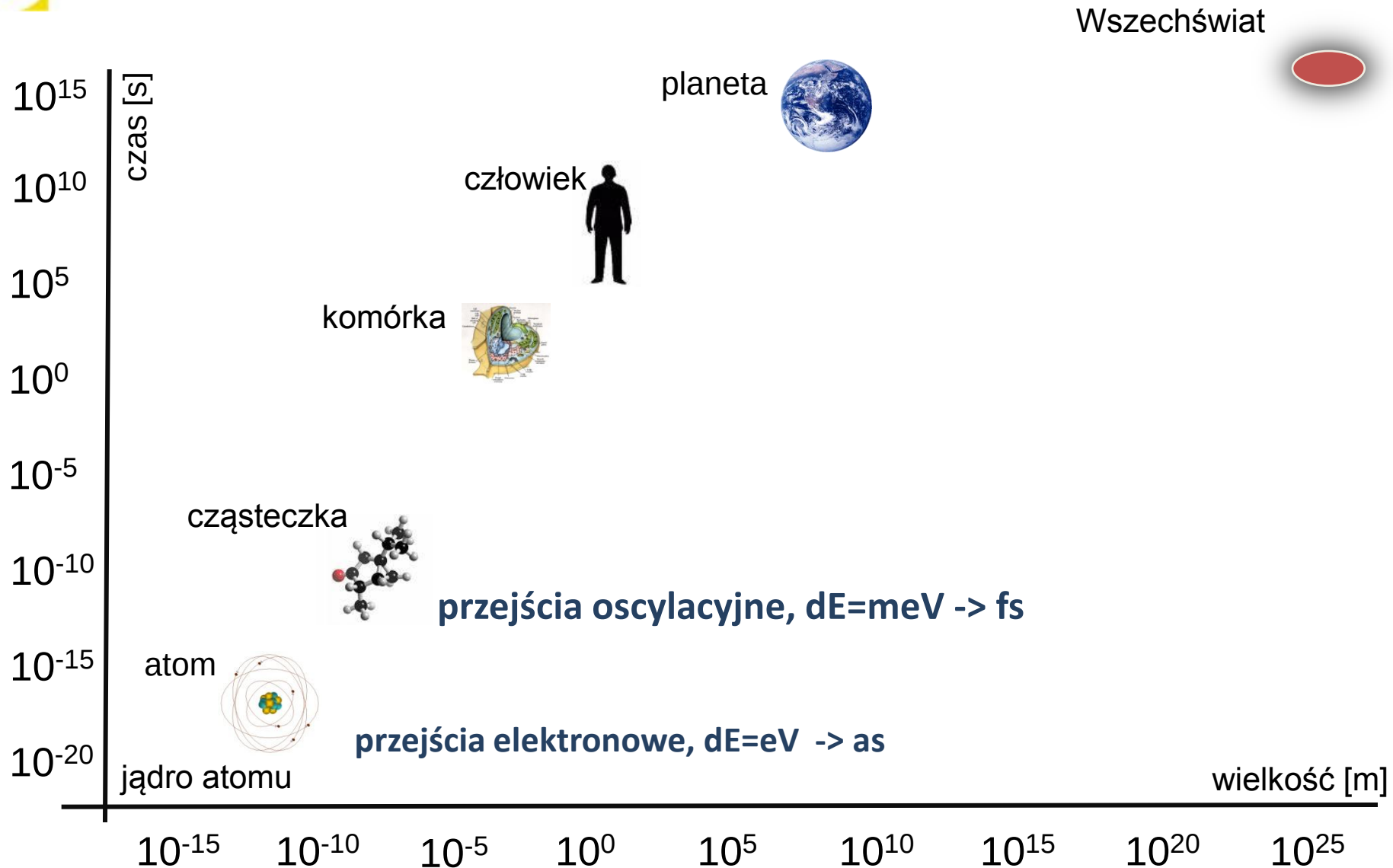


cykl optyczny 3 fs

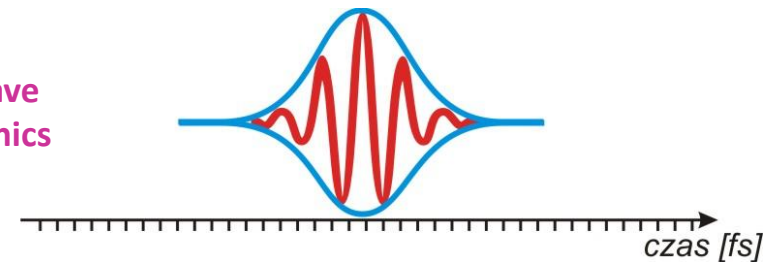
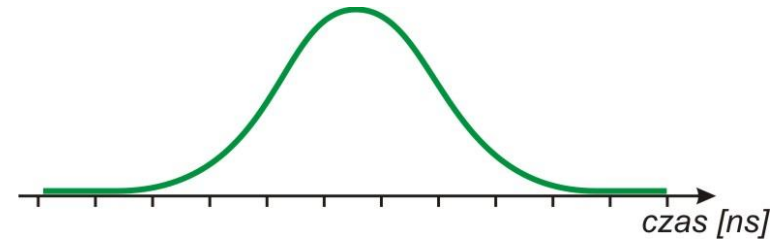
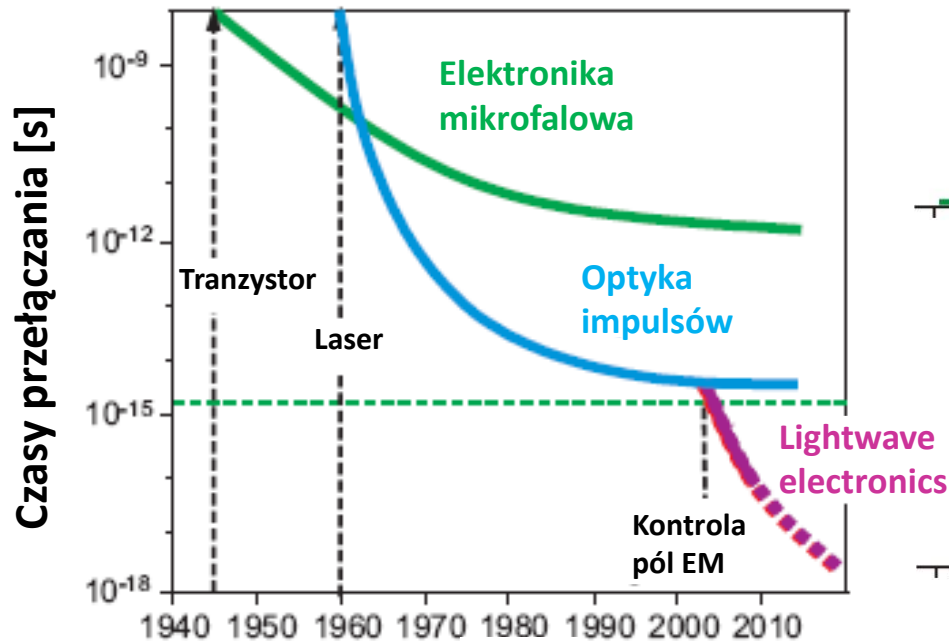
pomysł 1. x ray -> FEL

pomysł 2. ruch elektronu w polu E impulsu

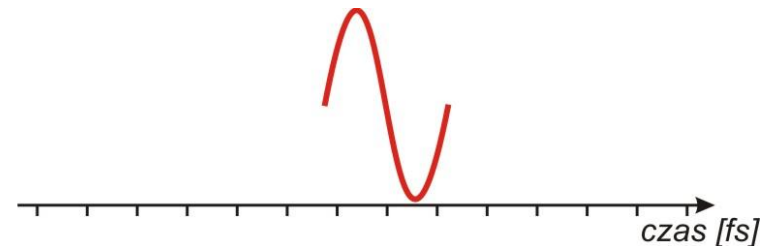
# Ultrakrótkie impulsy laserowe – szkic historii



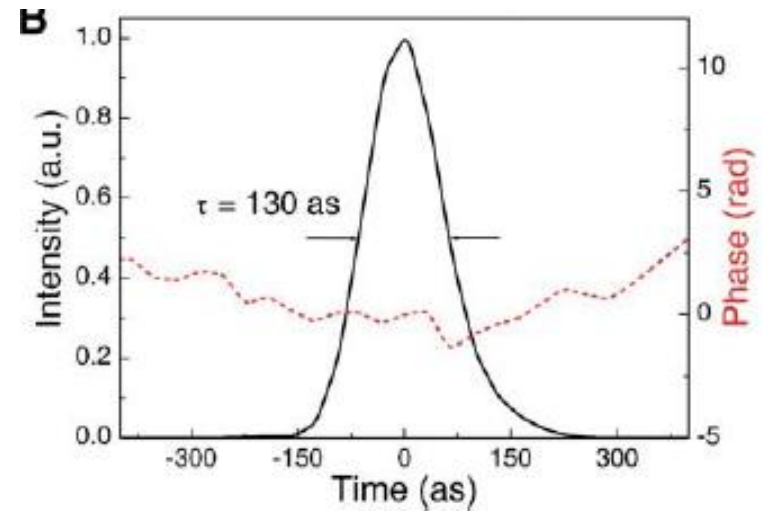
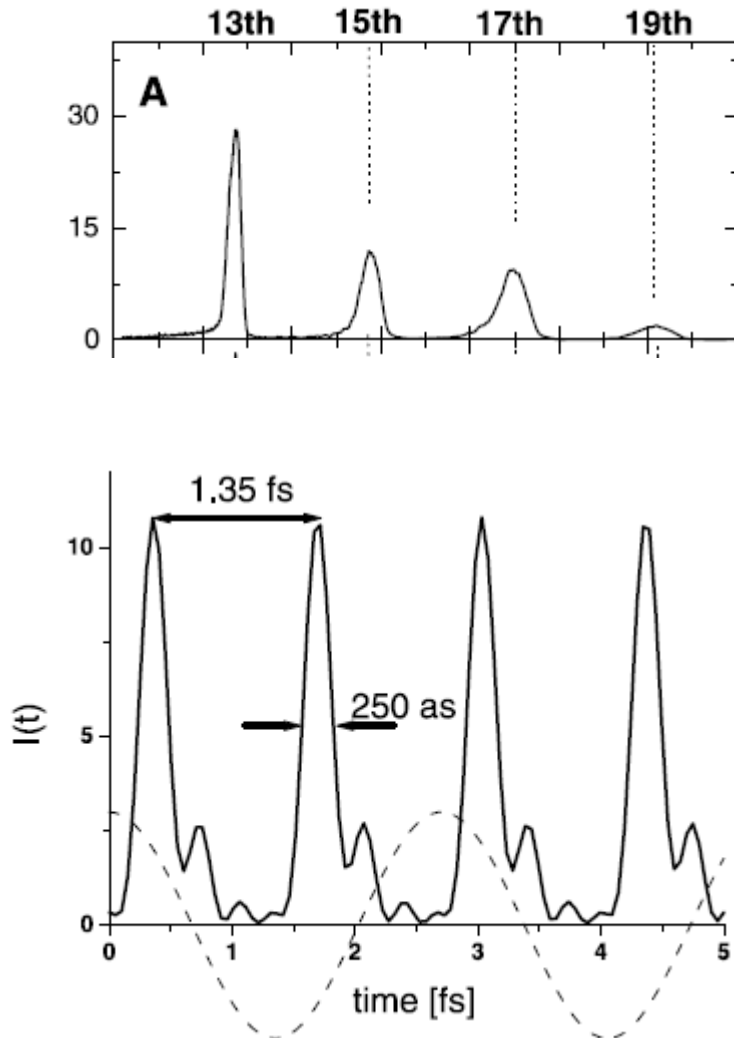
# Od tranzystora do "elektroniki fal EM" (lightwave electronics)



Czy można pójść dalej, w stronę impulsów attosekundowych, gdzie możemy kontrolować i mierzyć procesy zachodzące w stali czasu oscylacji pola EM fali z obszaru widzialnego?



## W stronę attosekund – wyniki

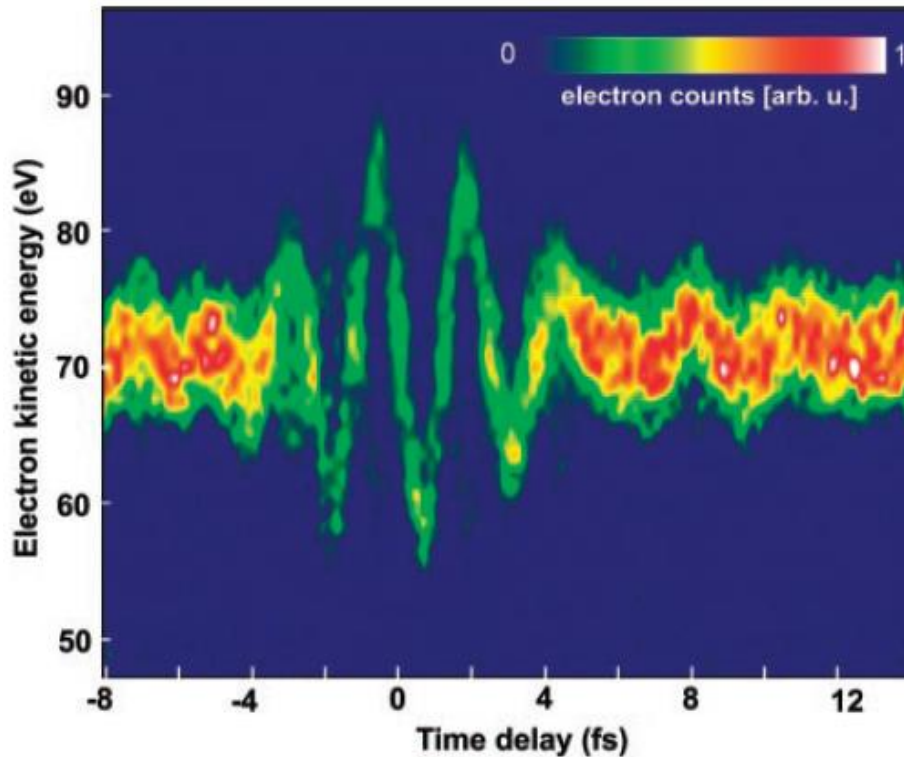


dodatkowo kontrola polaryzacji  
impulsu fs – izolowany impuls as



## Pomiar pola elektrycznego fali EM

widmo energii kinetycznej  
wyemitowanych elektronów  
impuls pompujący 250 as, 93 eV  
impuls próbkowany 5 fs, 750 nm



zmierzone i odtworzone  
na podstawie widma  
pole elektryczne impulsu

