

# Jeszcze krótsze niż ultrakrótkie Nagroda Nobla z fizyki 2023

**Piotr Fita**

**pokazy: Przemysław Słota, Adam Kubiela**

Wydział Fizyki Uniwersytetu Warszawskiego  
Instytut Fizyki Doświadczalnej

*Zapytaj fizyka, 23.11.2023*



Ill. Niklas Elmehed © Nobel Prize Outreach

**Pierre Agostini**

Prize share: 1/3



Ill. Niklas Elmehed © Nobel Prize Outreach

**Ferenc Krausz**

Prize share: 1/3



Ill. Niklas Elmehed © Nobel Prize Outreach

**Anne L'Huillier**

Prize share: 1/3

Nagrodę Nobla w dziedzinie fizyki 2023 przyznano wspólnie Pierre'owi Agostiniemu, Ferencowi Krauszowi i Anne L'Huillier „za metody eksperymentalne generujące **attosekundowe impulsy światła** do badania **dynamiki elektronów w materii**”

# Badania stacjonarne a badania dynamiki



# 1949

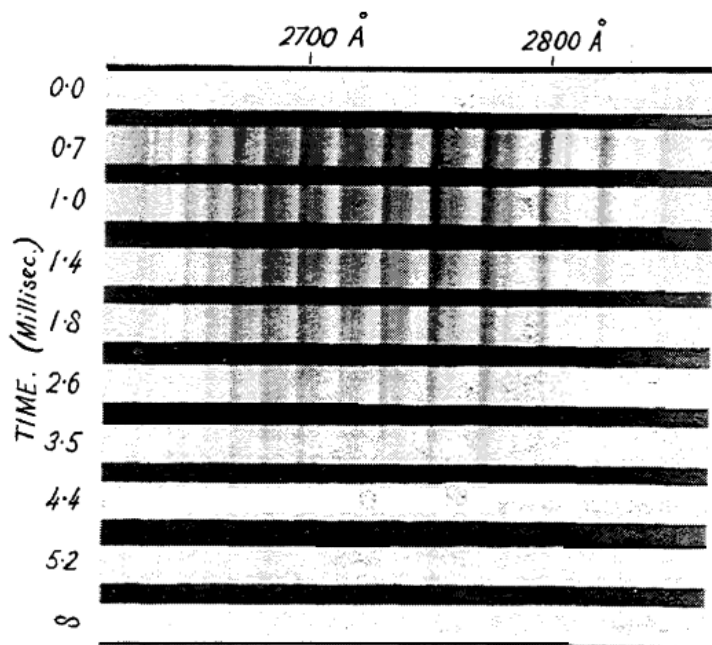
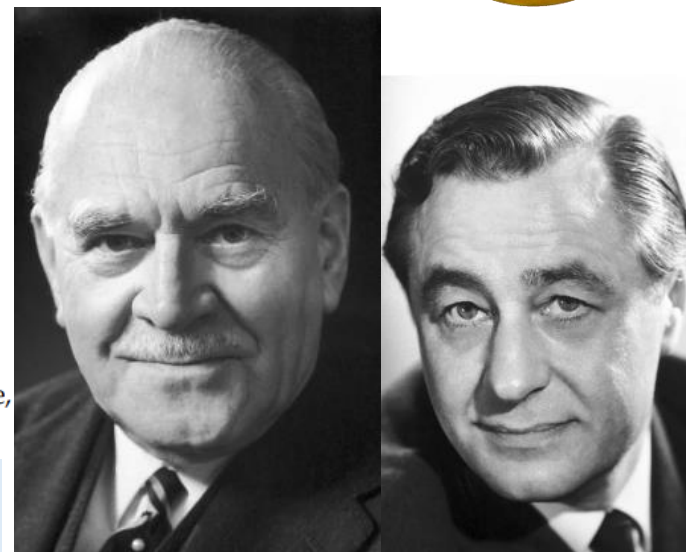


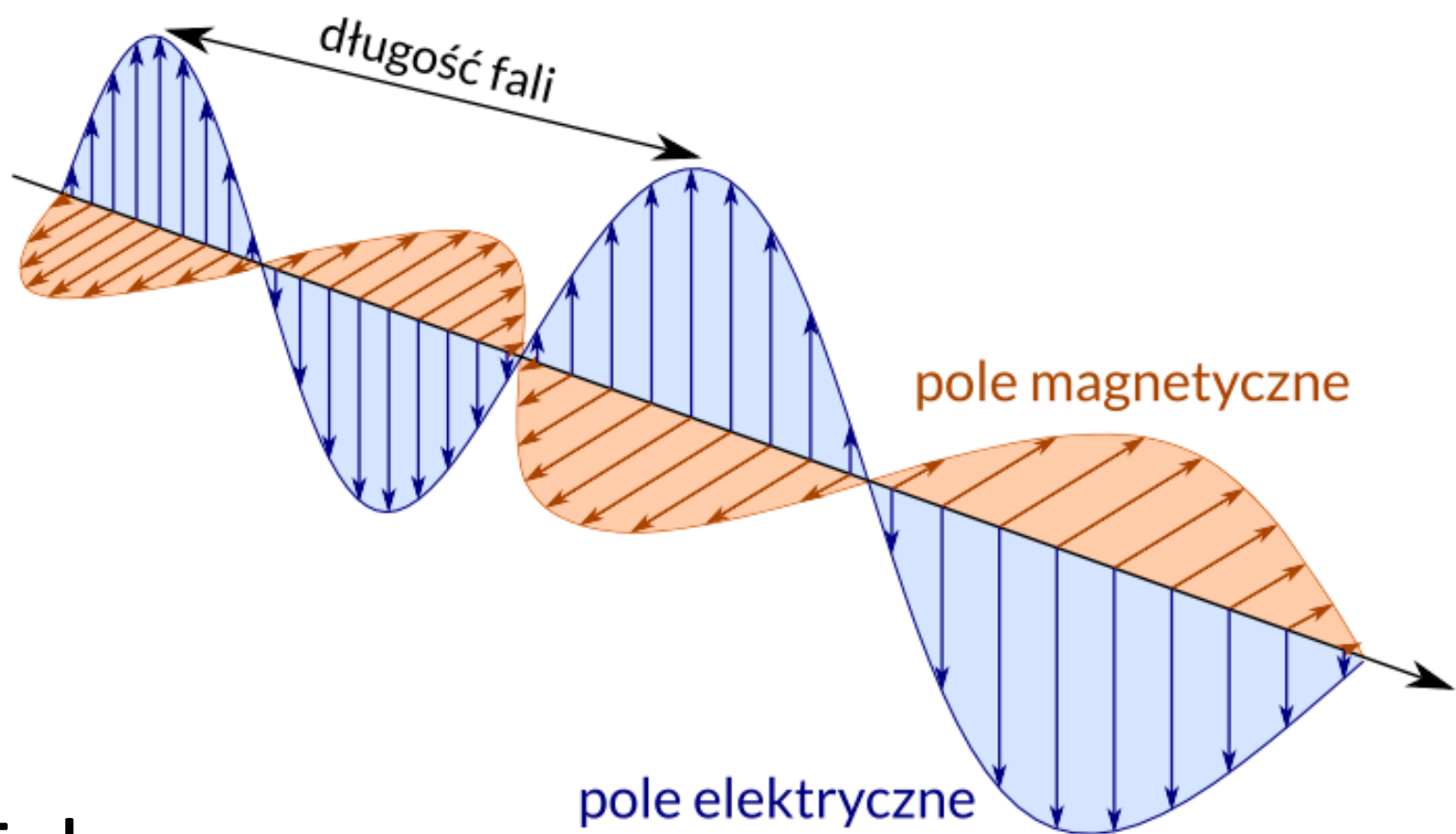
Fig. 3. Sequence of spectra of ClO after flash photolysis of a chlorine-oxygen mixture, showing bimolecular decay.

**Fotoliza błyskowa** – badania przebiegu reakcji chemicznych w skali mili- i mikrosekund

# 1967

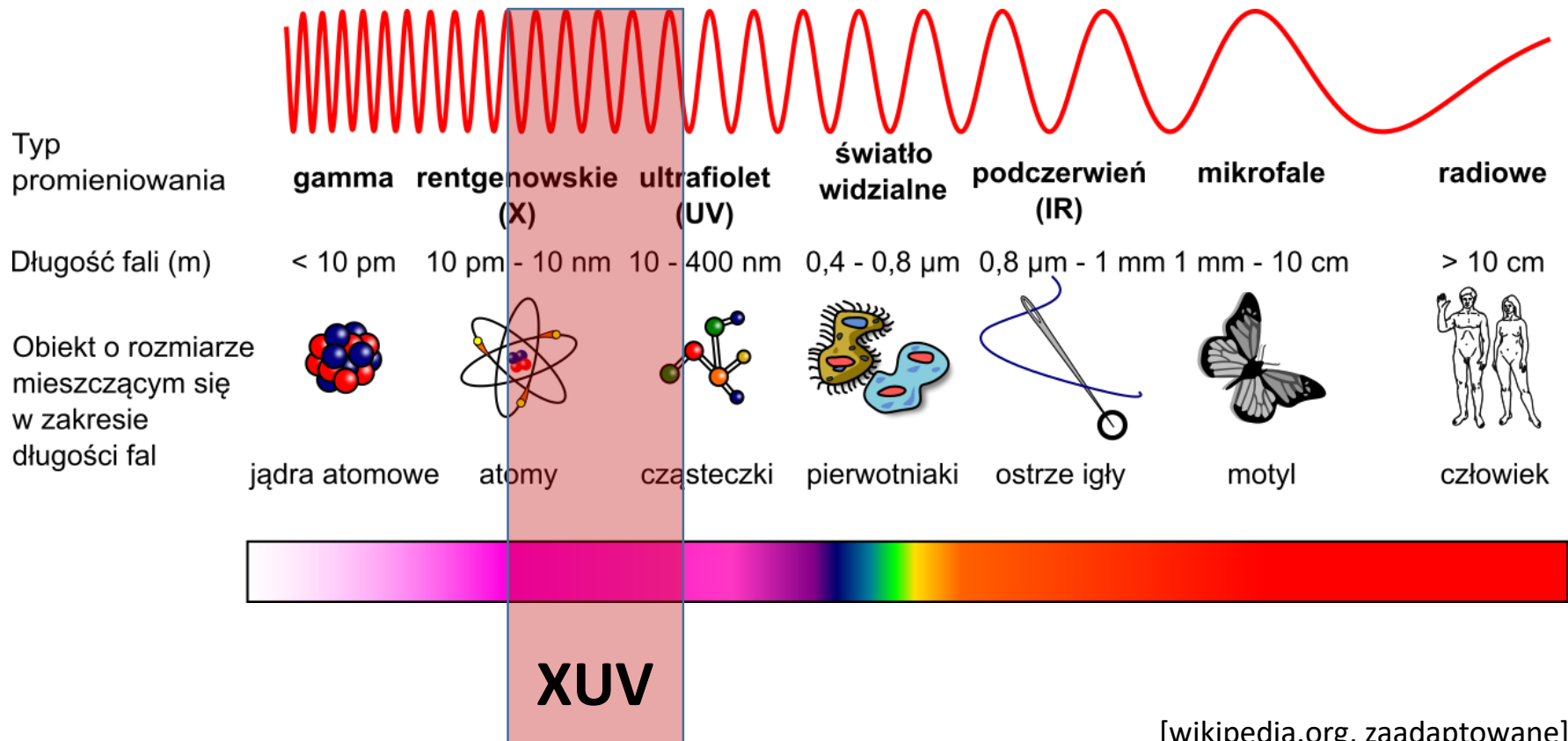
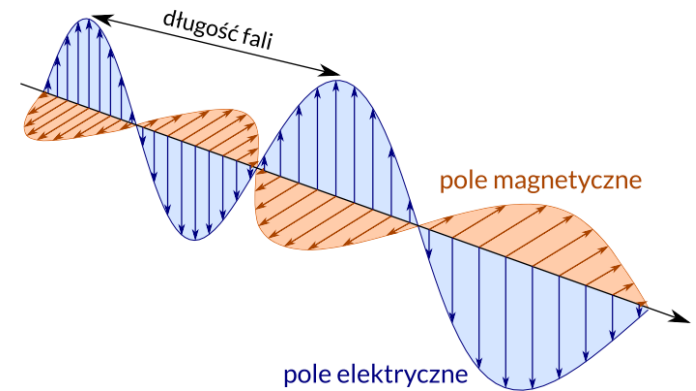


Ronald Norrish i George Porter



# Fale elektromagnetyczne

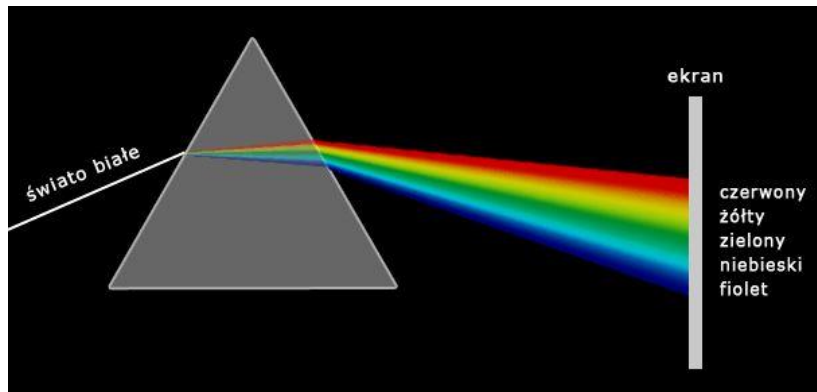
# Rodzaje fal elektromagnetycznych



[wikipedia.org, zaadaptowane]

# Widmo fal elektromagnetycznych

- Światło białe zawiera różne długości fal (barwy)

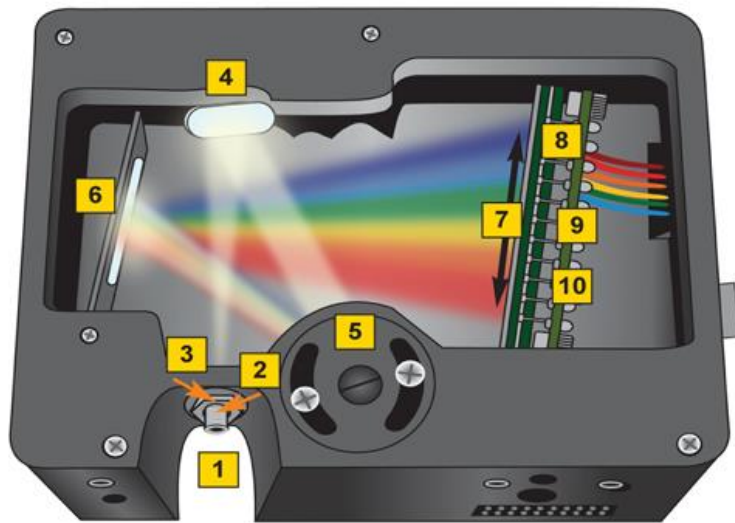


- Możemy je rozszczepić i zobaczyć, jakie barwy zawiera

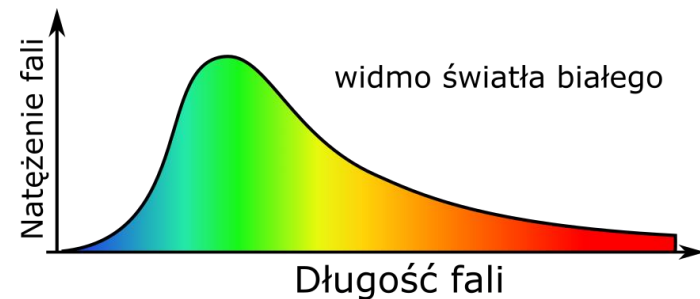


# Rejestracja widma - spektrometr

- Element rozszczepiający światło + detektor = spektrometr



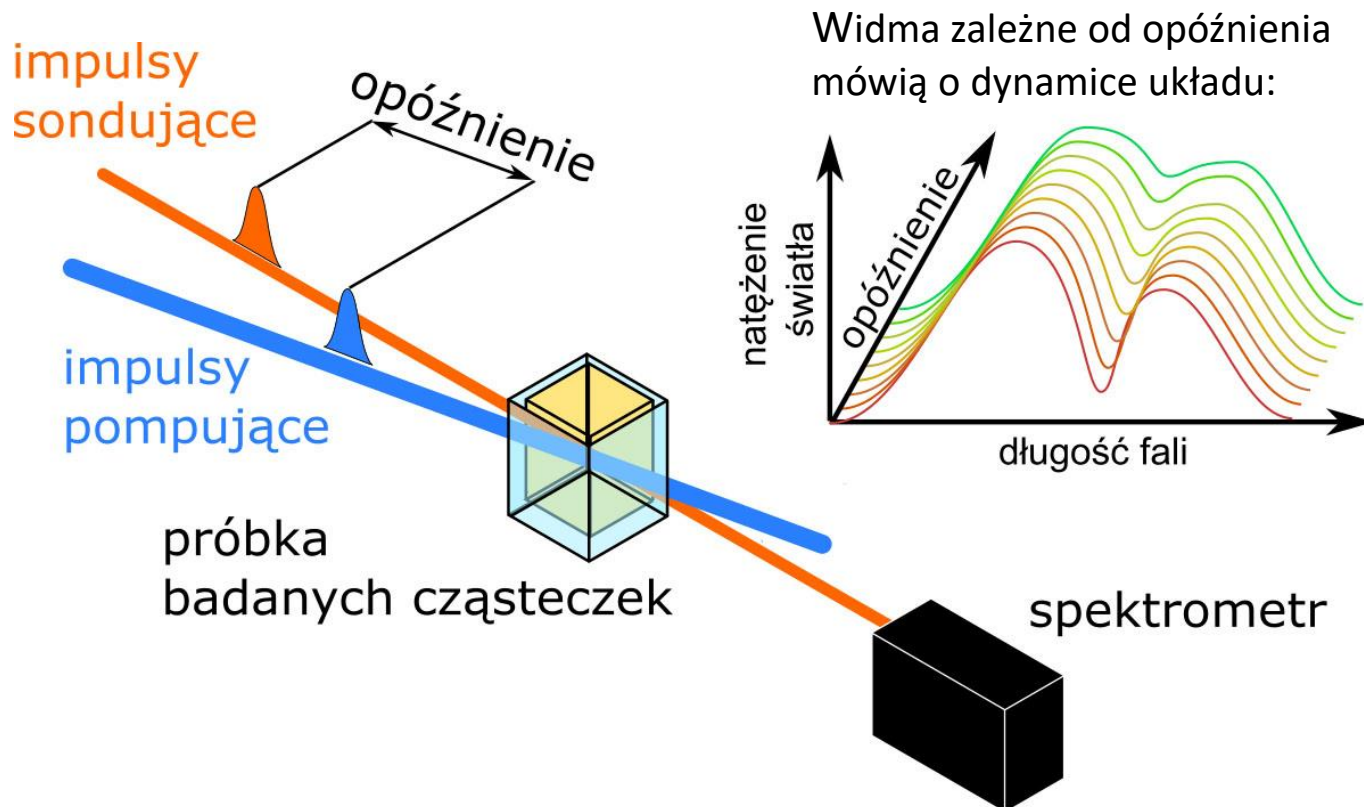
- Używamy go do pomiaru **widma światła**





# Optyczne pomiary dynamiki

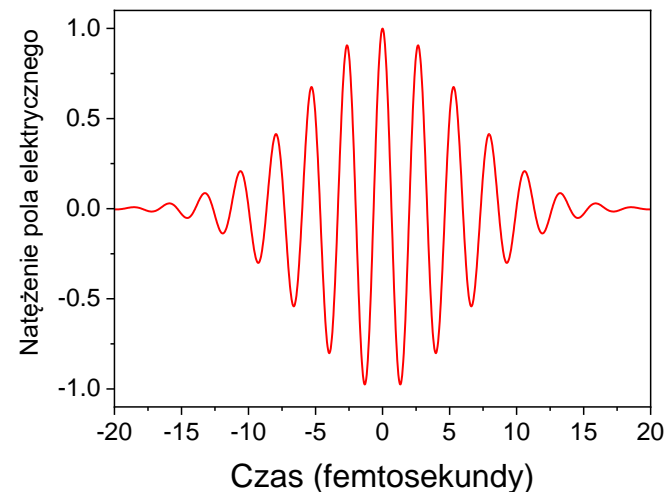
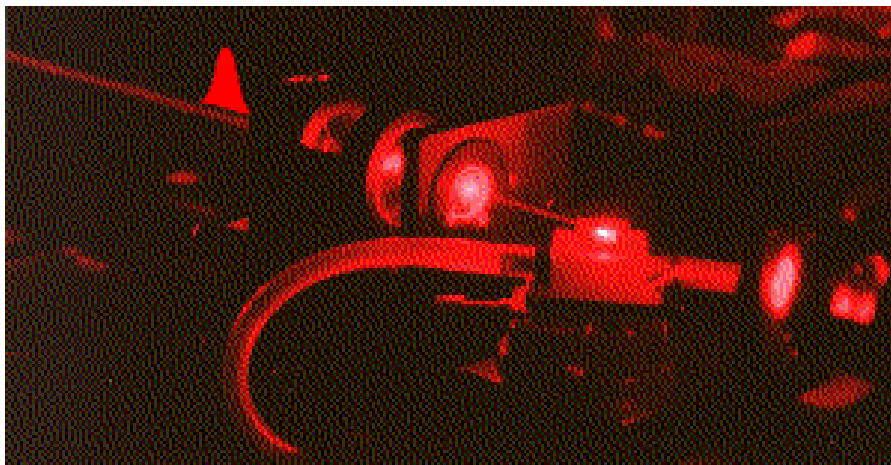
(technika **pompa-sonda**)



**Fotoliza błyskowa Portera i Norrish:**

impulsy światła pochodziły z lamp błyskowych

# Lata 80-te: lasery femtosekundowe



Okres drgań pola elektrycznego dla światła widzialnego:

**1,3 - 2,6 fs**

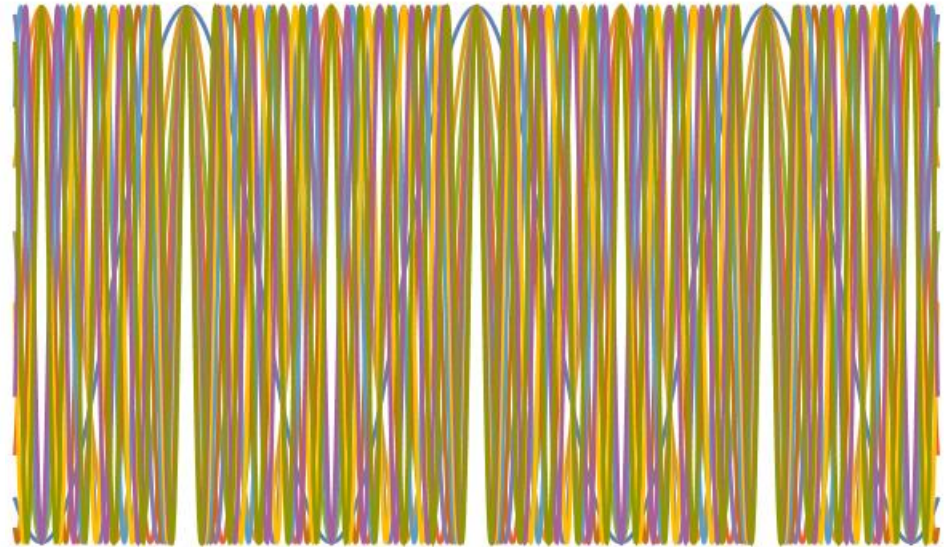
**1 fs =  $10^{-15}$  s**

**$10^{-15}$  · wiek Wszechświata = 8 min**

**1 as = 0,001 fs**

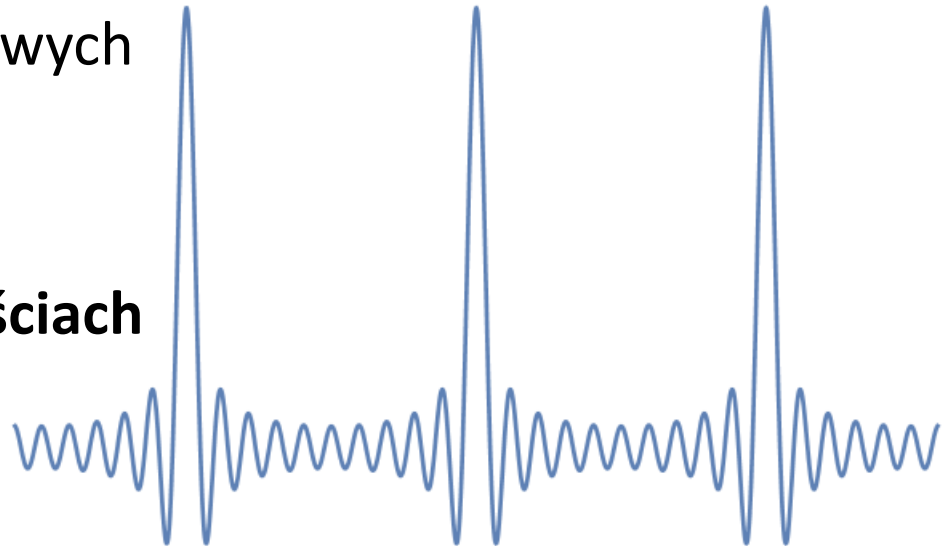
## **Dodawanie fal o różnych długościach**

10 składowych



Suma składowych

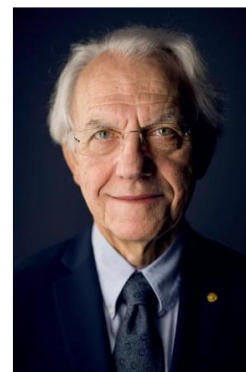
**Krótki impuls jest sumą  
wielu fal o różnych długościach**



# 1985

## Wzmacnianie femtosekundowych impulsów światła

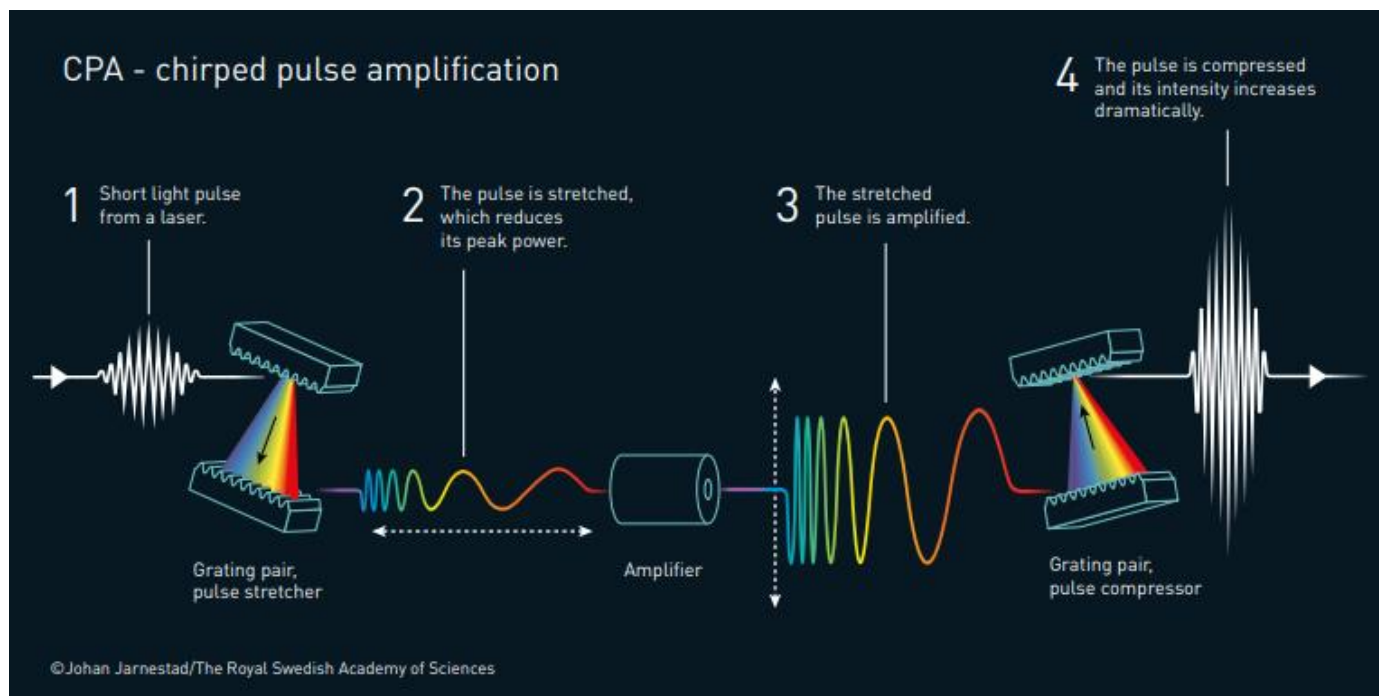
# 2018



© Nobel Media AB. Photo: A. Mahmoud  
Gérard Mourou  
Prize share: 1/4



© Nobel Media AB. Photo: A. Mahmoud  
Donna Strickland  
Prize share: 1/4



Lata 90-te

1999

**Femtochemia:** obserwacja tworzenia i zrywania wiązań w cząsteczkach chemicznych

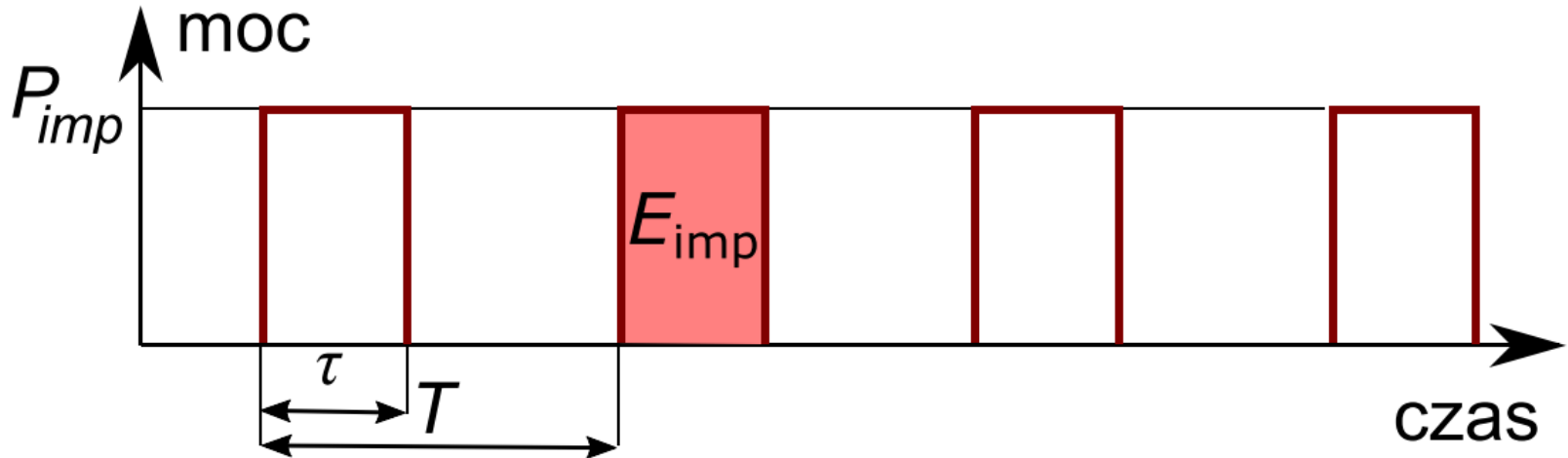
(laserowe impulsy femtosekundowe)



Ahmed Zewail



Układ lasera femtosekundowego ze wzmacniaczem mieści się na stole



$$P_{imp} = \frac{E_{imp}}{\tau}$$

Dla  $\tau = 50 \text{ fs}$ ,  $E_{imp} = 2 \text{ mJ}$ :  $P_{imp} = 40 \text{ GW}$

Natężenie światła po zogniskowaniu wiązki lasera do plamki o promieniu  $r = 10 \mu\text{m}$ :

$$I_{imp} = \frac{P_{imp}}{\pi r^2} = 1,3 \cdot 10^{20} \frac{\text{W}}{\text{m}^2}$$

Natężenie światła słonecznego na powierzchni Ziemi:

$$I_{Słońce} = 1300 \frac{\text{W}}{\text{m}^2} = 1,3 \cdot 10^3 \frac{\text{W}}{\text{m}^2}$$

Związek natężenia światła z amplitudą natężenia pola elektrycznego fali E-M:

$$I = \frac{1}{2} \epsilon_0 c E_0^2$$
$$\epsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12} \frac{\text{F}}{\text{m}}$$
$$c = 3 \cdot 10^8 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

Amplituda natężenia pola elektrycznego w impulsie:

$$E_{imp} = \sqrt{\frac{2I_{imp}}{\epsilon_0 c}} = 3,1 \cdot 10^{11} \frac{\text{V}}{\text{m}}$$

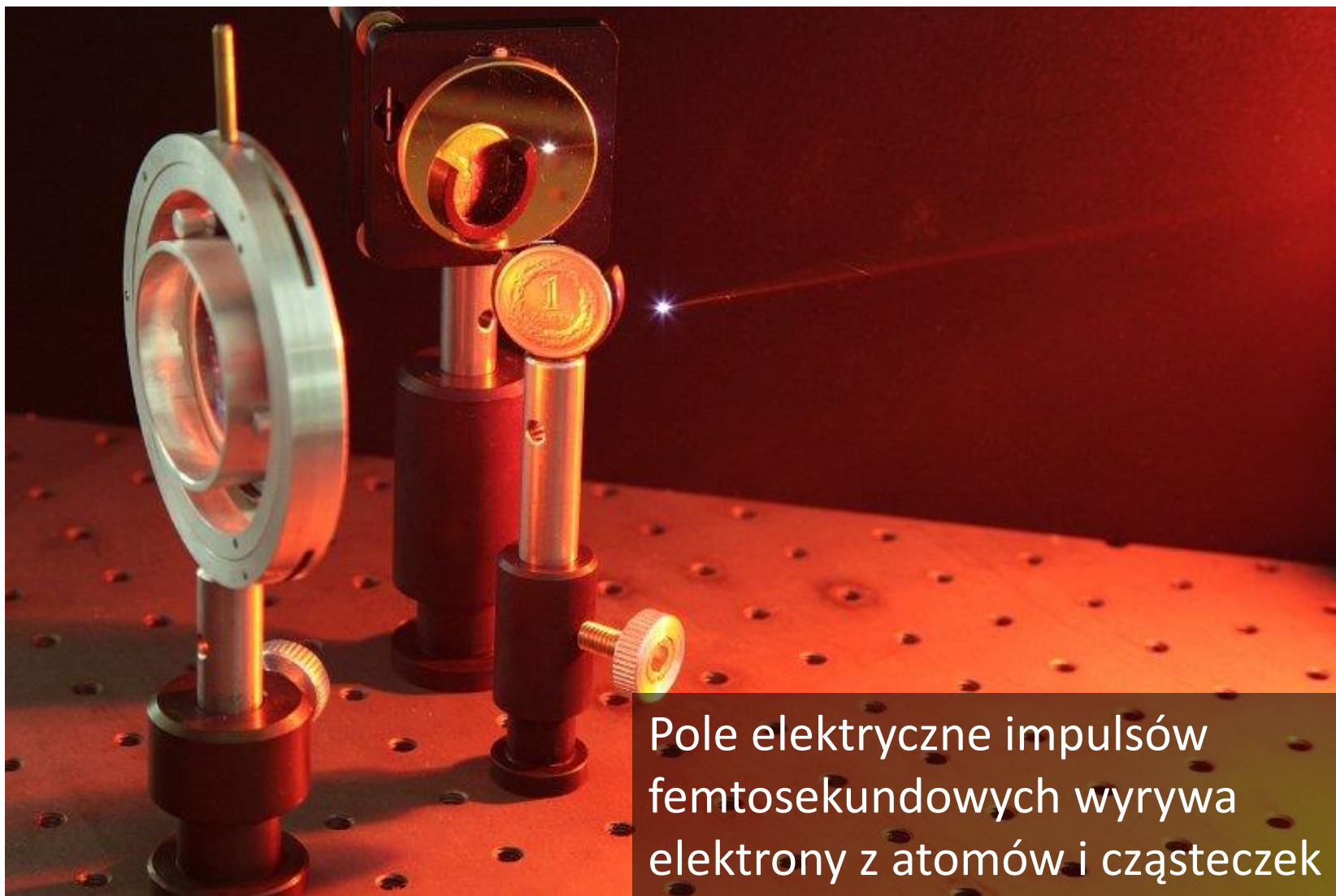
Natężenie pola elektrycznego w atomie wodoru utrzymującego elektron:

$$E_H = \frac{e}{4\pi\epsilon_0} \frac{1}{a_0^2} = 5,8 \cdot 10^{11} \frac{\text{V}}{\text{m}}$$
$$e = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{C}$$
$$a_0 = 5 \cdot 10^{-11} \text{m}$$

**Natężenie pola elektrycznego w impulsie femtosekundowym może być porównywalne z natężeniem pola elektrycznego utrzymującego elektrony w atomach i je z nich wyrwać!**

(dlatego wzmacnianie impulsów femtosekundowych wymaga ich rozciągnięcia, nagroda Nobla z 2018 r. dla D. Strickland i G. Mourou)



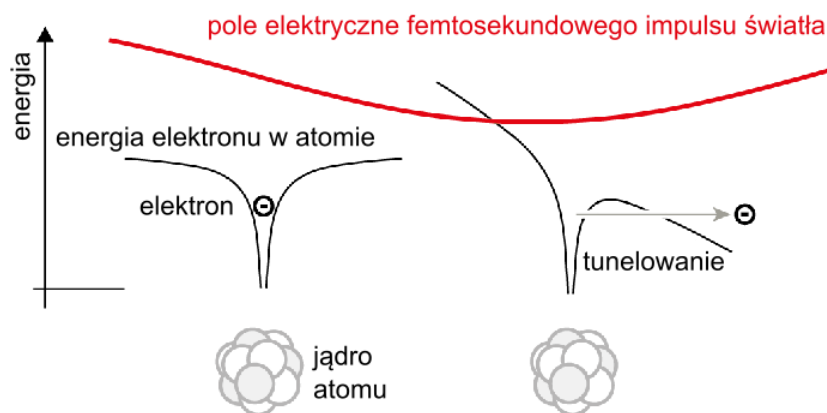


Pole elektryczne impulsów femtosekundowych wyrzuca elektrony z atomów i cząsteczek

# 1991-2001



## 1. Ucieczka $e^-$ z atomu




## 3. Powrót $e^-$ do atomu

## 2. Przyspieszanie $e^-$

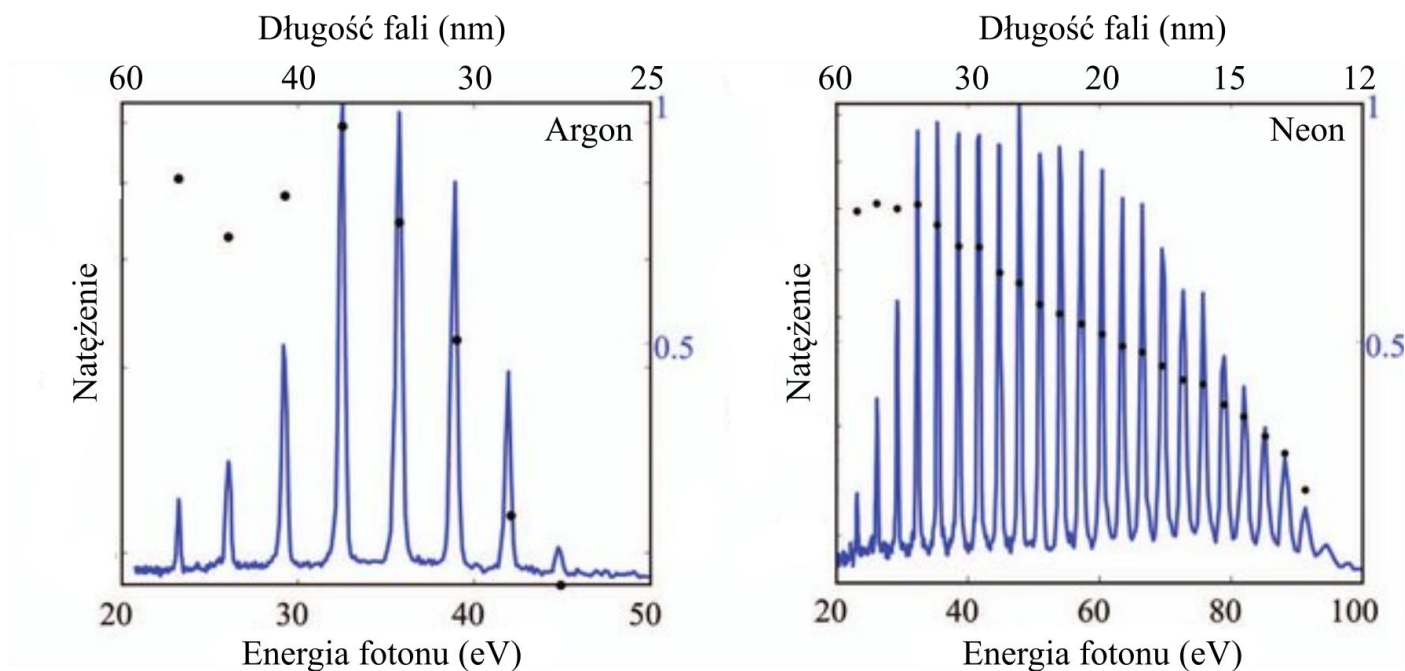
emisja impulsu promieniowania o dużej energii (XUV) i czasie trwania rzędu attosekund

The diagram shows an electron returning to the atom, emitting high-energy radiation (XUV) in the process. The nucleus is labeled 'jądro atomu'.

- **Anne L'Huillier** – generacja promieniowania XUV (teoria: m. in. Maciej Loewenstein) 
- **Pierre Agostini** – pojedynczy impuls 650 as
- **Ferenc Krausz** – ciąg impulsów 250 as

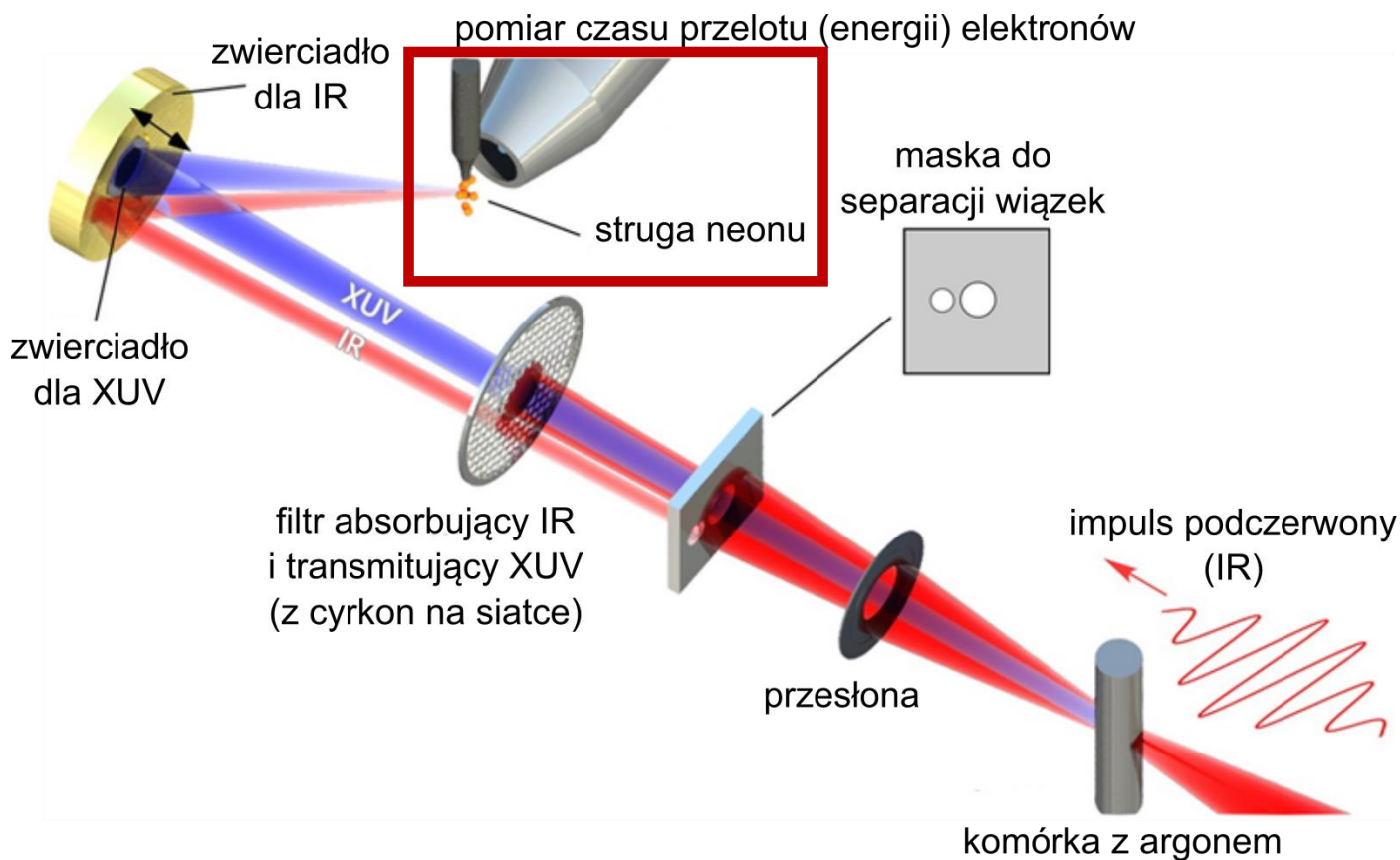
[Szwedzka Królewska Akademia Nauk, adaptowane]

# Widmo emitowanego promieniowania



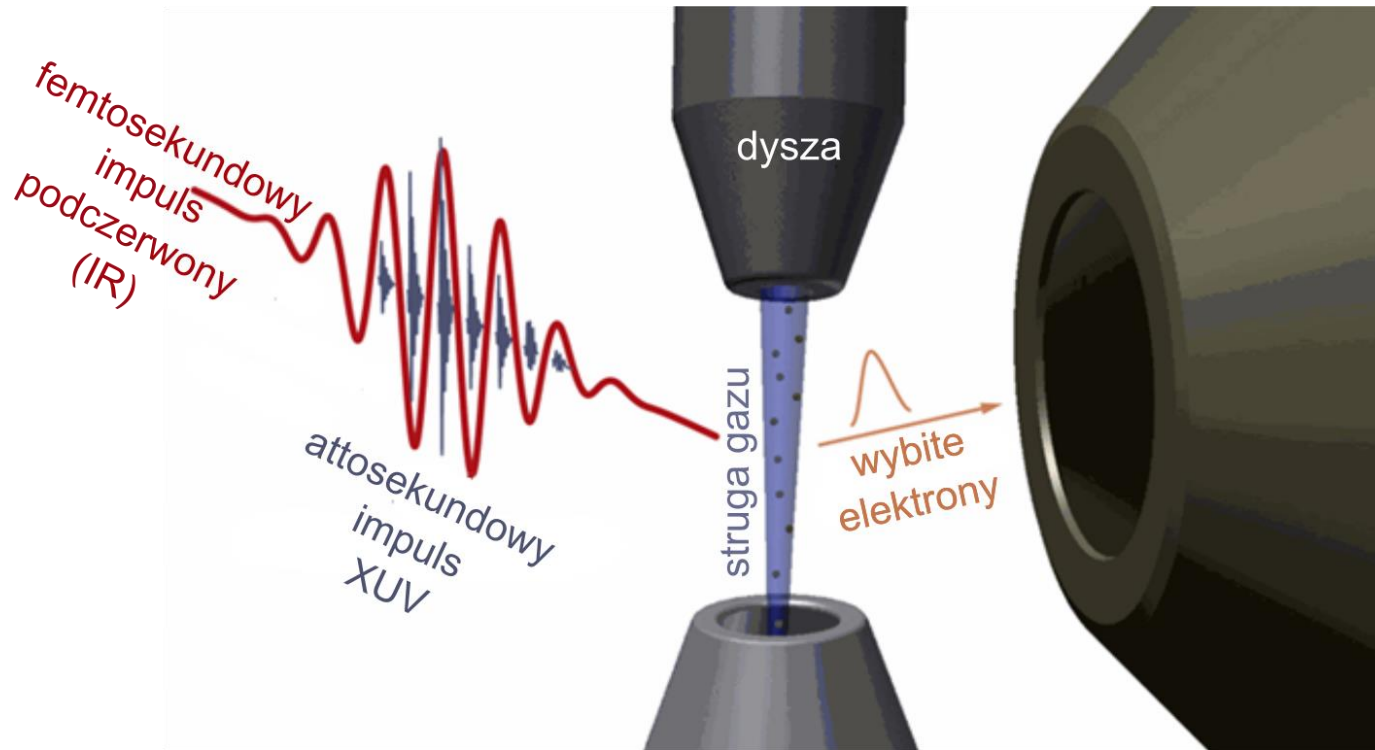
Szereg składowych, które razem dają **impuls attosekundowy**  
( *dodawanie fal o różnych długościach...*)

# Generacja i pomiar impulsów attosekundowych - eksperyment



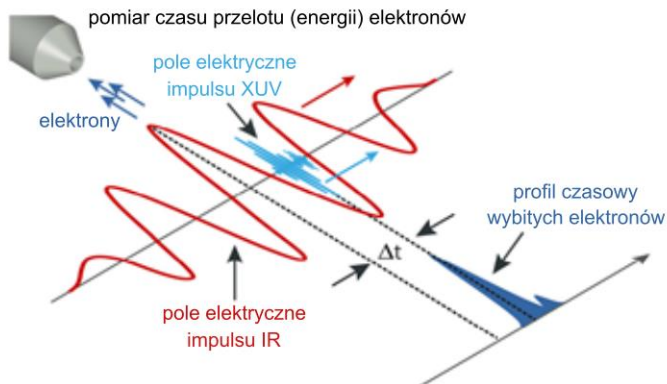
[N. Saito. *et al.*, *Sci Rep* **6**, 35594 (2016)]

# Attosekundowy eksperyment pompa - sonda

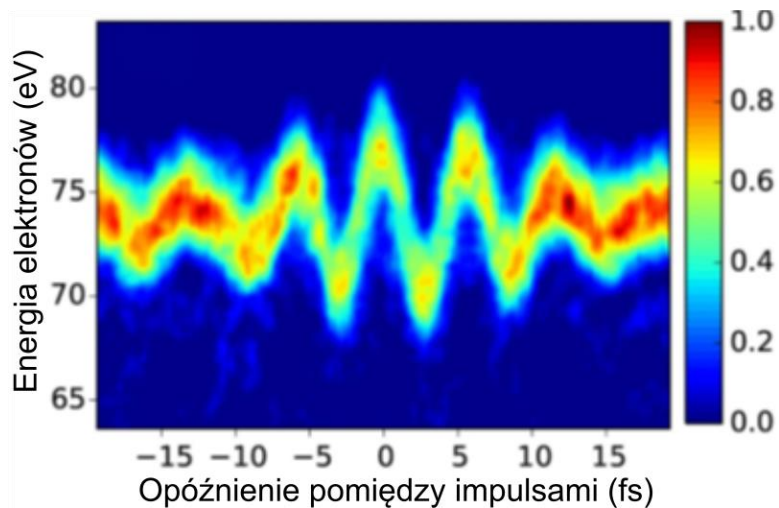


[I. Jordanet al., *Rev. Sci. Instrum.* **86**, 123905:1-10 (2015)]

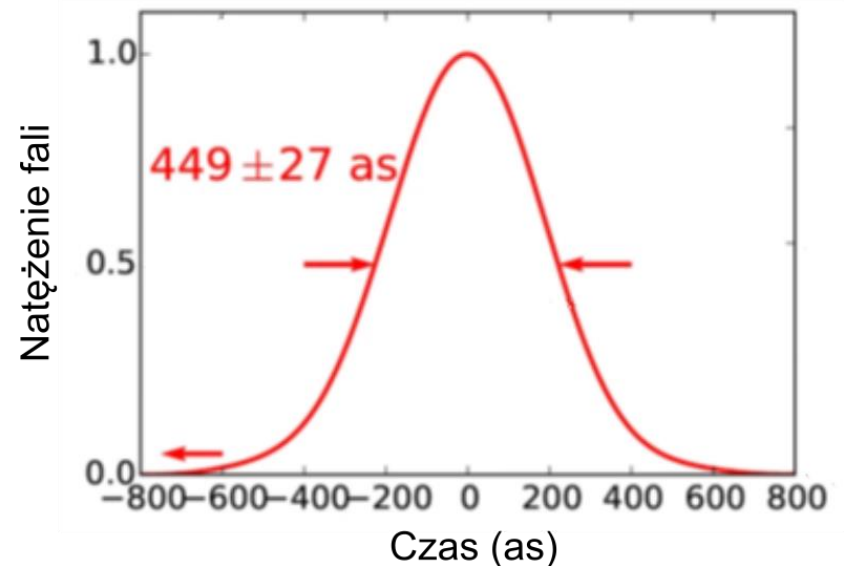
# Pomiar impulsów attosekundowych - wyniki



[I. Grguras, Hamburg 2015]



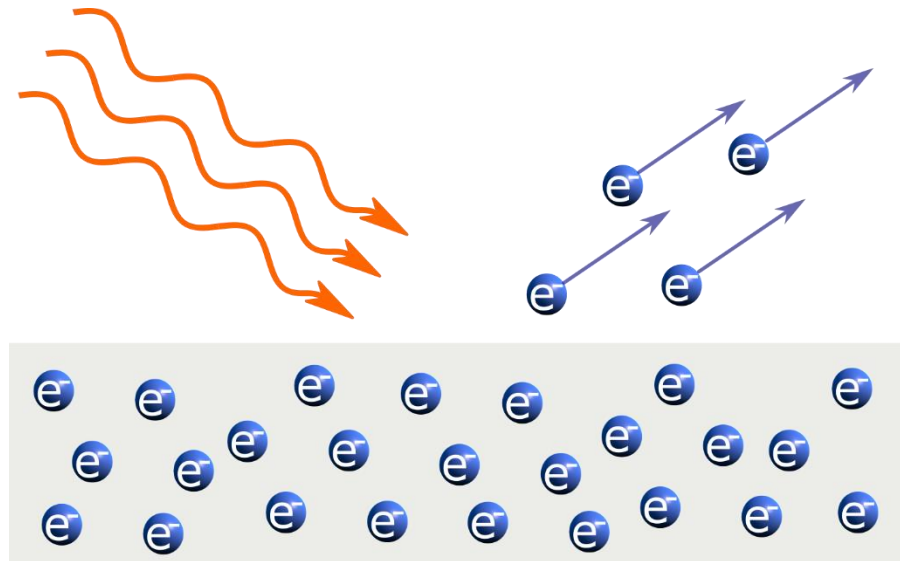
Elektrony wybite z materii impulsem attosekundowym są przyspieszane lub hamowane polem elektrycznym femtosekundowego impulsu światła



[N. Saito *et al.*, *Sci Rep* 6, 35594 (2016)]

# Efekt fotoelektryczny

- Światło wybija elektrony z powierzchni metalu

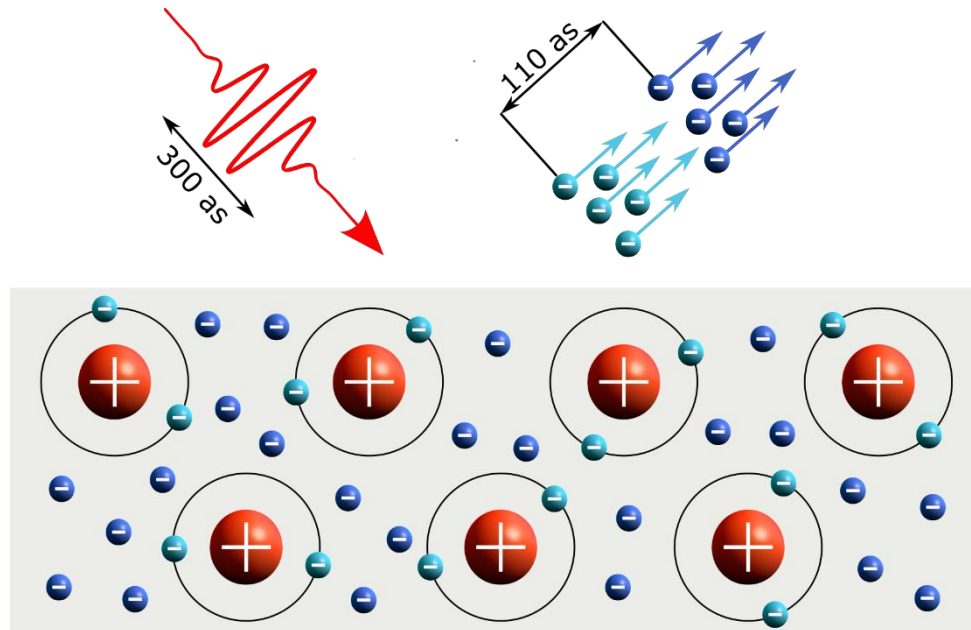


- Odkrycie – Heinrich Hertz, 1887
- Wyjaśnienie – Albert Einstein, 1905 (nagroda Nobla)



# Efekt fotoelektryczny

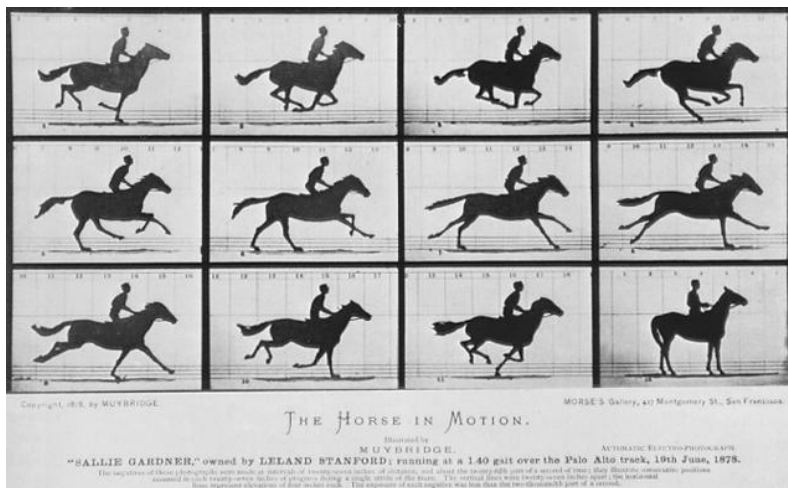
- W metalu znajdują się elektrony związane z jądrami i elektrony swobodne
- Eksperyment wykorzystujący impulsy attosekundowe pokazał, że elektrony swobodne opuszczają powierzchnię metalu wcześniej niż elektrony związane



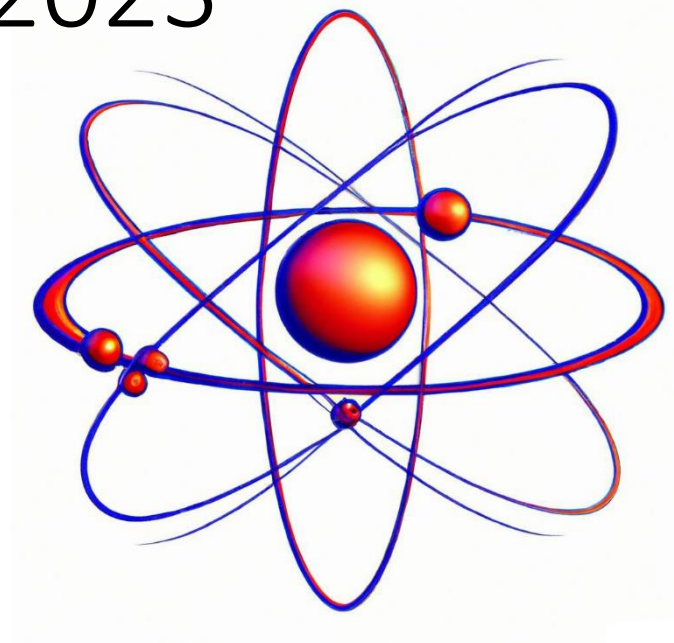
[A Cavalieri. et al. *Attosecond spectroscopy in condensed matter*. Nature **449**, 1029–1032 (2007)]



# 1878



# 2023



## Dziękuję za uwagę!