



# Wysokowydajne falowodowe źródło skorelowanych par fotonów

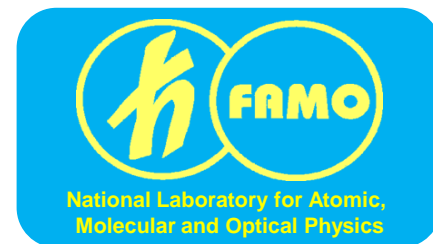
Michał Karpiński\*

Konrad Banaszek<sup>†</sup>, Czesław Radzewicz\*

*\*Instytut Fizyki Doświadczalnej, <sup>†</sup>Instytut Fizyki Teoretycznej  
Wydział Fizyki  
Uniwersytet Warszawski*



Ultrafast Phenomena Lab



Międzyzdroje, 28.06.2011

# Źródła par fotonów/pojedynczych fotonów



Pojedynczy atom/ion

Procesy nieliniowe

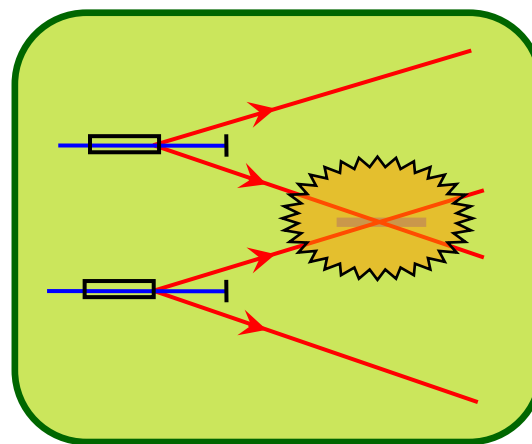
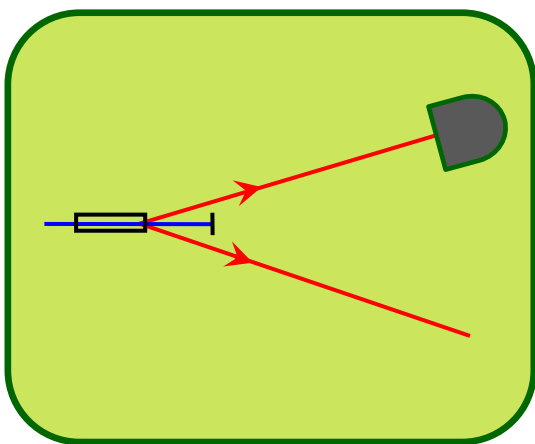
Kropki kwantowe

Centra barwne

Mieszanie 3 fal:  
fluorescencja parametryczna

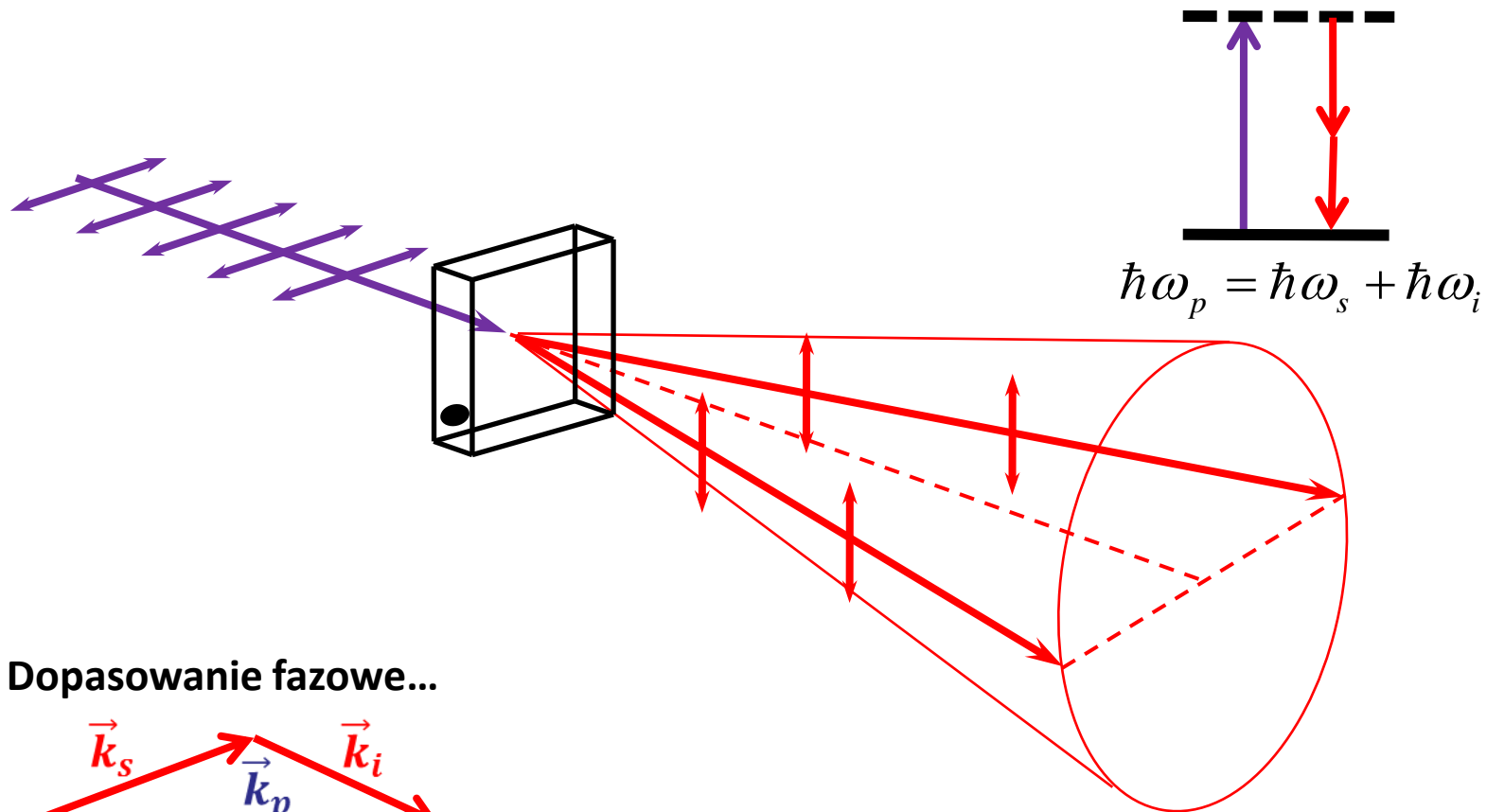
Mieszanie 4 fal

Procesy ramanowskie

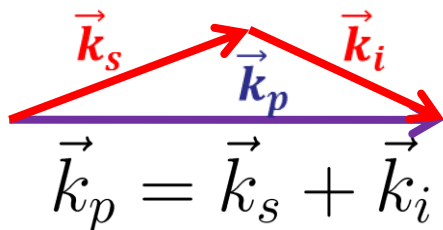




# Standardowe źródło fluorescencji parametrycznej



Dopasowanie fazowe...

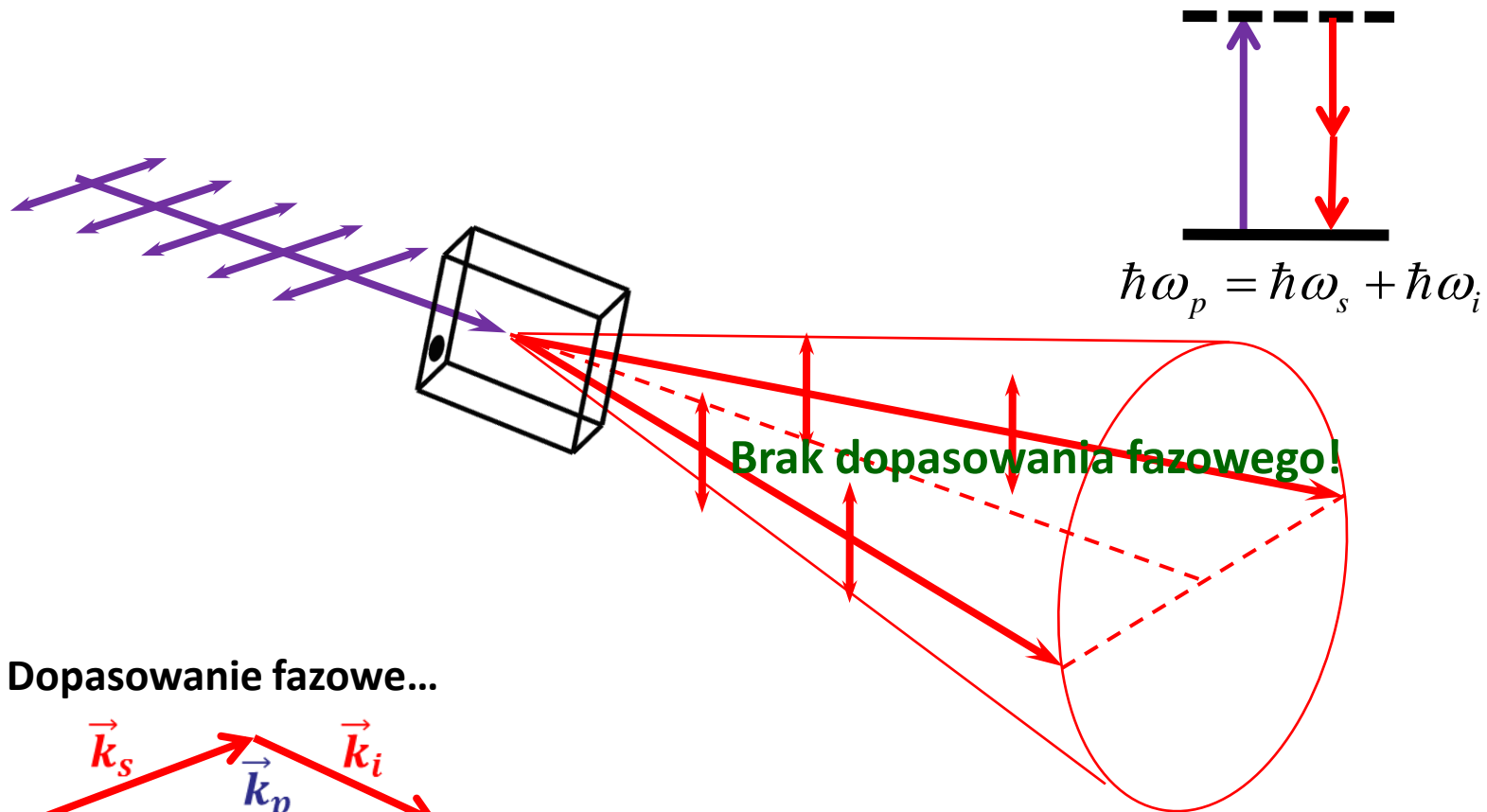


zapewnione dzięki wykorzystaniu  
dwójłomności

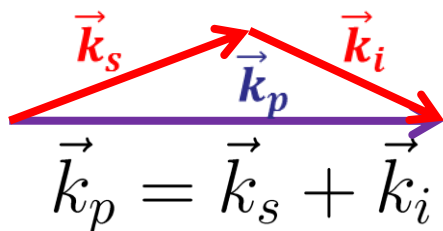
... ale często największa wydajność  
(polaryzowalność nieliniowa) dla kierunku  
pompy **wzdłuż** osi optycznej!



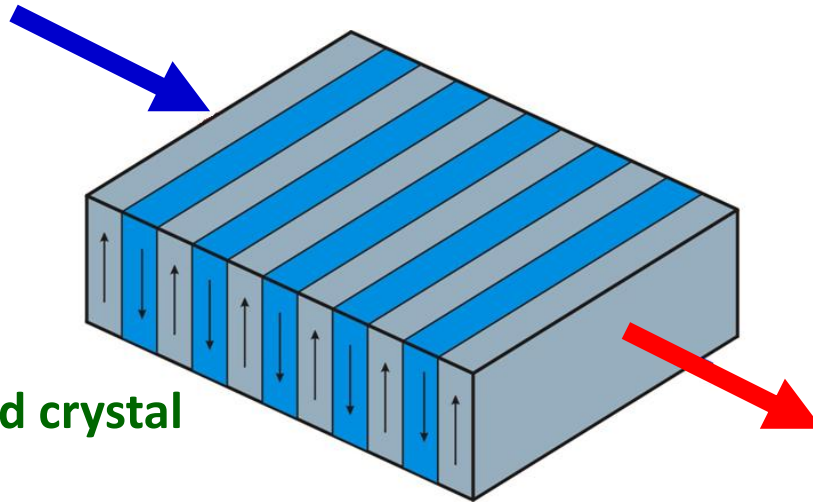
# Standardowe źródło fluorescencji parametrycznej



Dopasowanie fazowe...



... ale często największa wydajność (polaryzowalność nieliniowa) dla kierunku pompy **wzdłuż** osi optycznej!



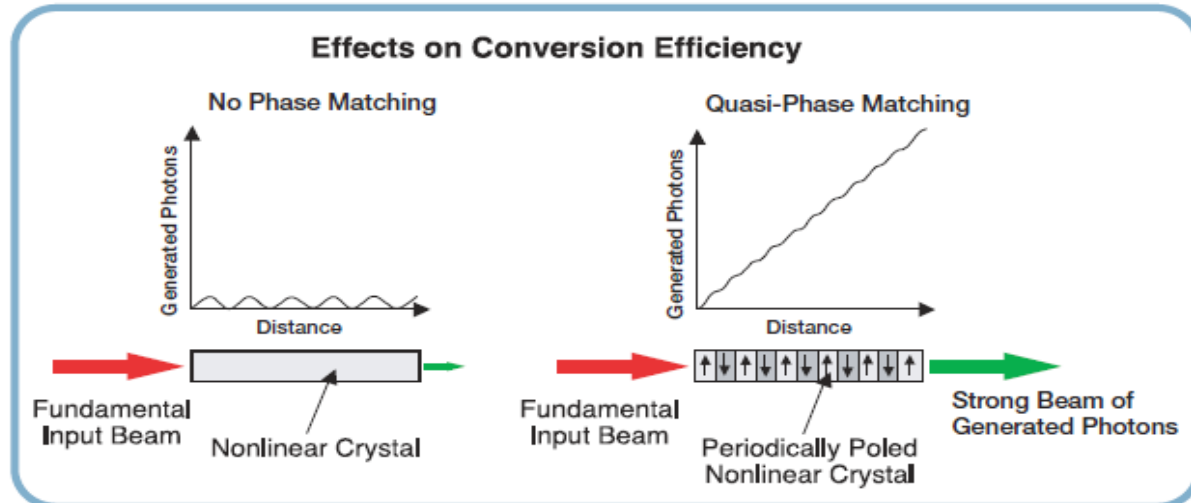
$$k_p = k_s + k_i - q$$

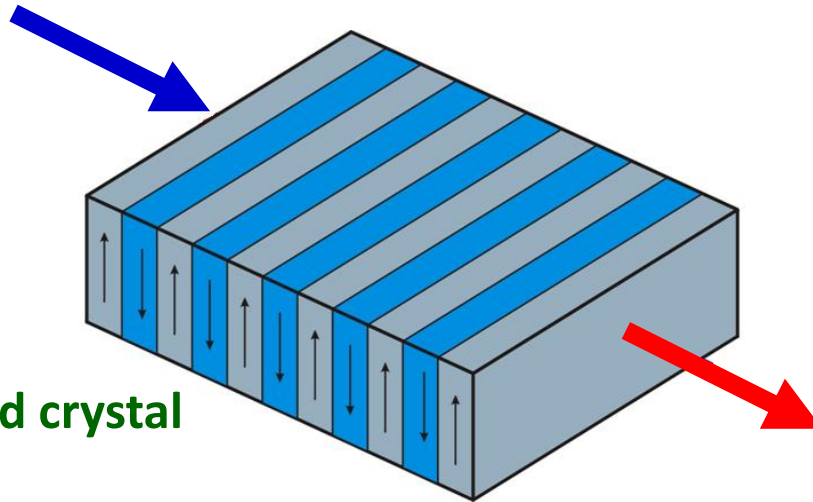
Periodically poled crystal

Kryształ z periodyczną strukturą domenową

Większa wydajność

- wykorzystanie polaryzowalności
- współliniowość oddziaływania, wyprodukowanie





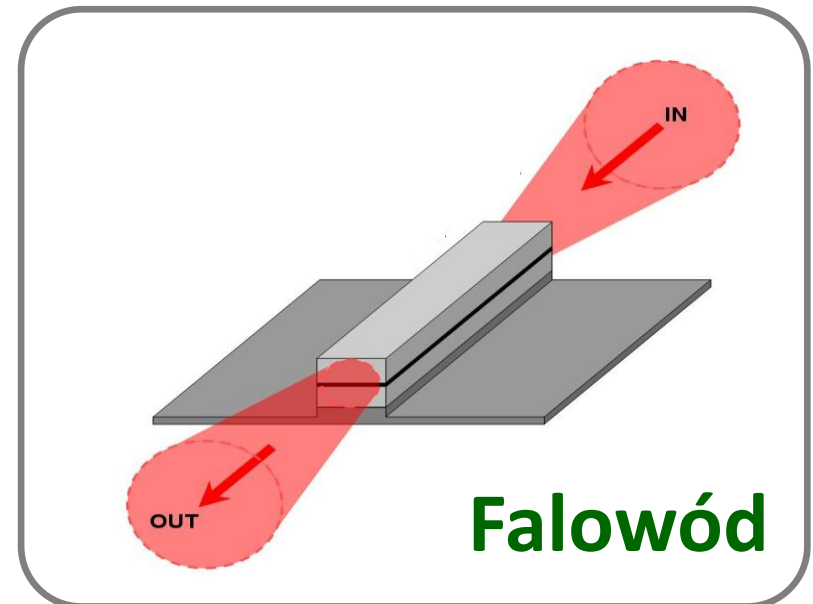
$$k_p = k_s + k_i - q$$

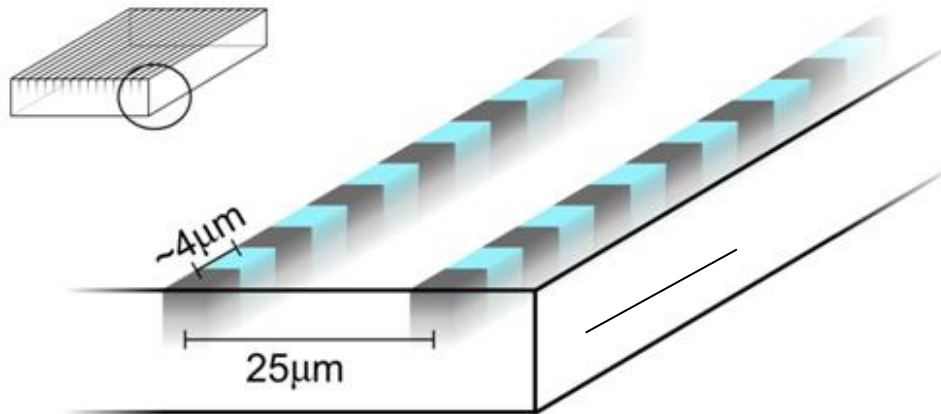
Periodically poled crystal

Kryształ z periodyczną strukturą domenową

Jeszcze większa wydajność:

- ograniczenie emisji do wyższych modów poprzecznych
- zwiększenie natężenia (na długim dystansie!)



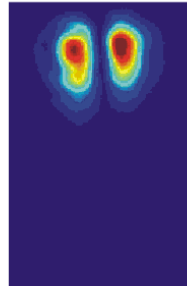
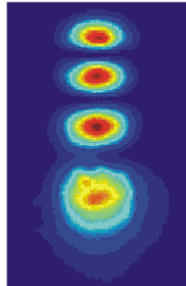
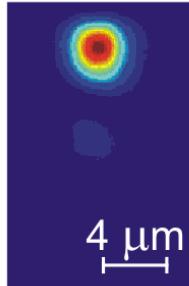


## Charakterystyka falowodów

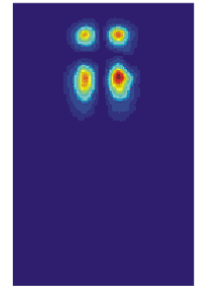
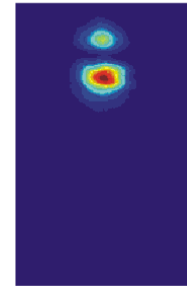
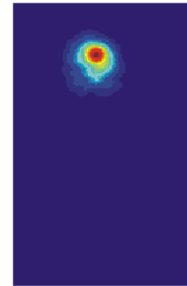
- kryształ KTP ( $\text{KTiOPO}_4$ ) z 40 – 80 falowodami tuż pod powierzchnią,
- szerokość 2, 3 lub 4  $\mu\text{m}$ , głębokość  $\sim 8 - 10 \mu\text{m}$ ,
- próbki długości 1 mm,
- quasi dopasowanie fazowe dla mieszania 3 fal II typu, dla  $\lambda 800 \text{ nm}$
- wytwarzane przez wymianę jonów z roztworu (*AdvR Inc., USA*) → dyfuzja powoduje eksponencjalny rozkład współczynnika załamania



800  
nm



400  
nm



Wiele modów poprzecznych: > 6 „czerwonych”, >25 „niebieskich”  
(dla falowodu o szerokości 2 μm).

## Charakterystyka falowodów

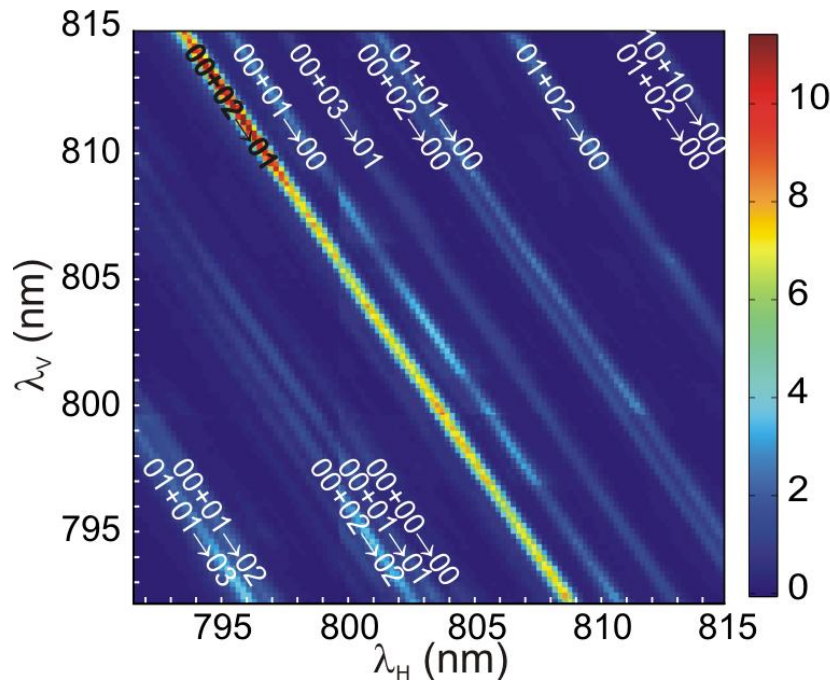
- kryształ KTP ( $\text{KTiOPO}_4$ ) z 40 – 80 falowodami tuż pod powierzchnią, szerokość 2, 3 lub 4 μm, głębokość ~ 8 - 10 μm,
- próbki długości 1 mm,
- quasi dopasowanie fazowe dla mieszania 3 fal II typu, dla  $\lambda$  800 nm
- wytwarzane przez wymianę jonów z roztworu (*AdvR Inc.*, USA) → dyfuzja powoduje eksponencjalny rozkład współczynnika załamania



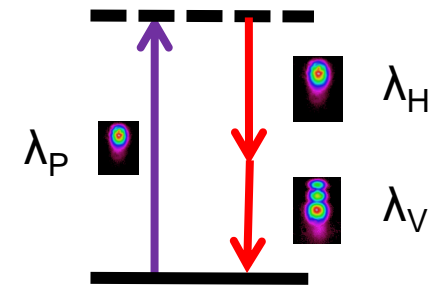
**Sprzężenie pomiędzy modami poprzecznymi promieniowania a dopasowaniem fazowym (czyli charakterystyką widmową) procesu mieszania 3 fal.**

$$n_{eff}^{(j)}(\lambda) = n_{KTP}(\lambda) + \Delta n^{(j)}$$

$$k^{(j)} = \frac{2\pi n^{(j)}_{eff}}{\lambda}$$



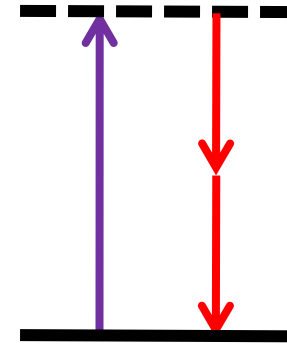
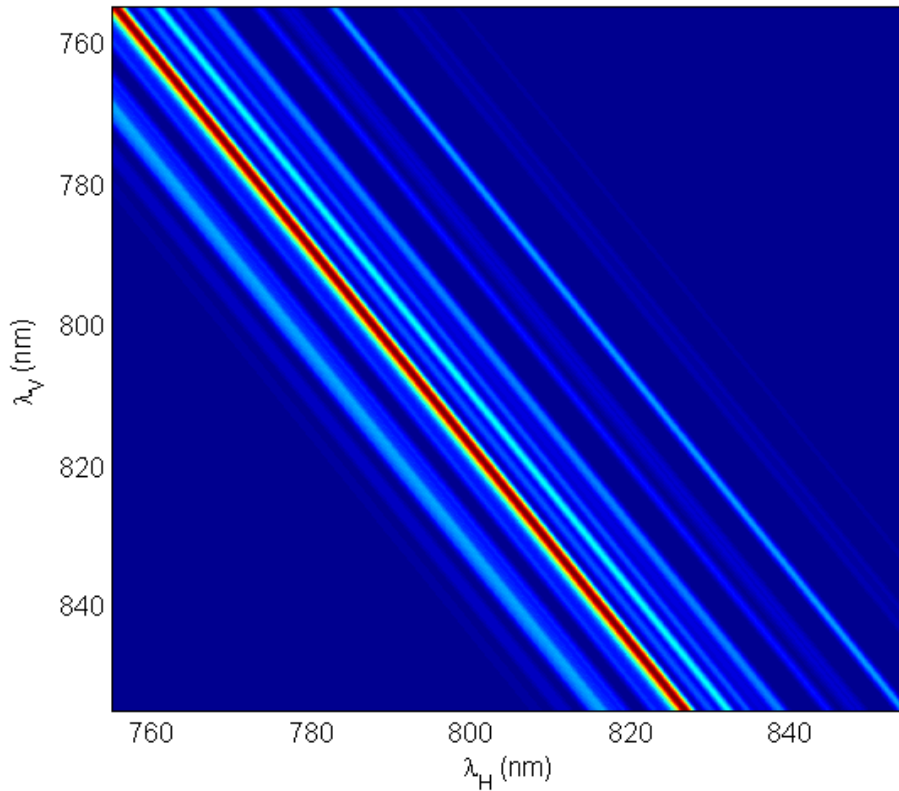
**Mapa dopasowania fazowego**



M. Karpiński, C. Radzewicz, K. Banaszek,  
Appl. Phys. Lett. 94, 181105 (2009)



## Kontrola dopasowania fazowego



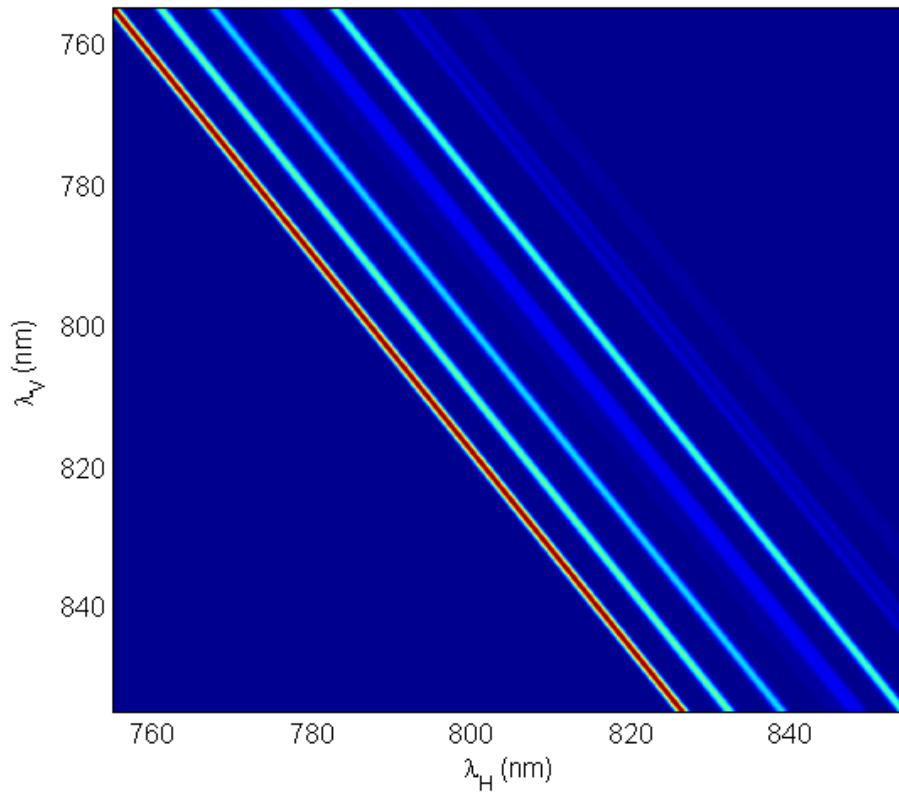
$$ij \rightarrow kl + mn$$

Pompa wielomodowa



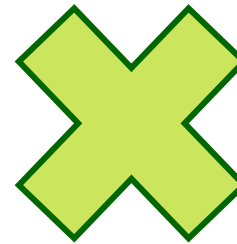
# Źródło par fotonów – kontrola modów poprzecznych

## Zachowanie pędu



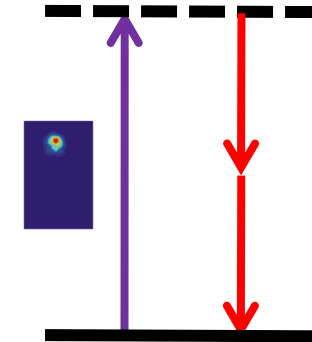
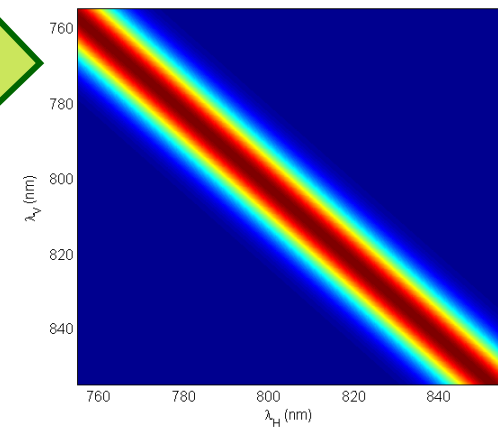
$$00 \rightarrow kl + mn$$

Pompa jednomodowa

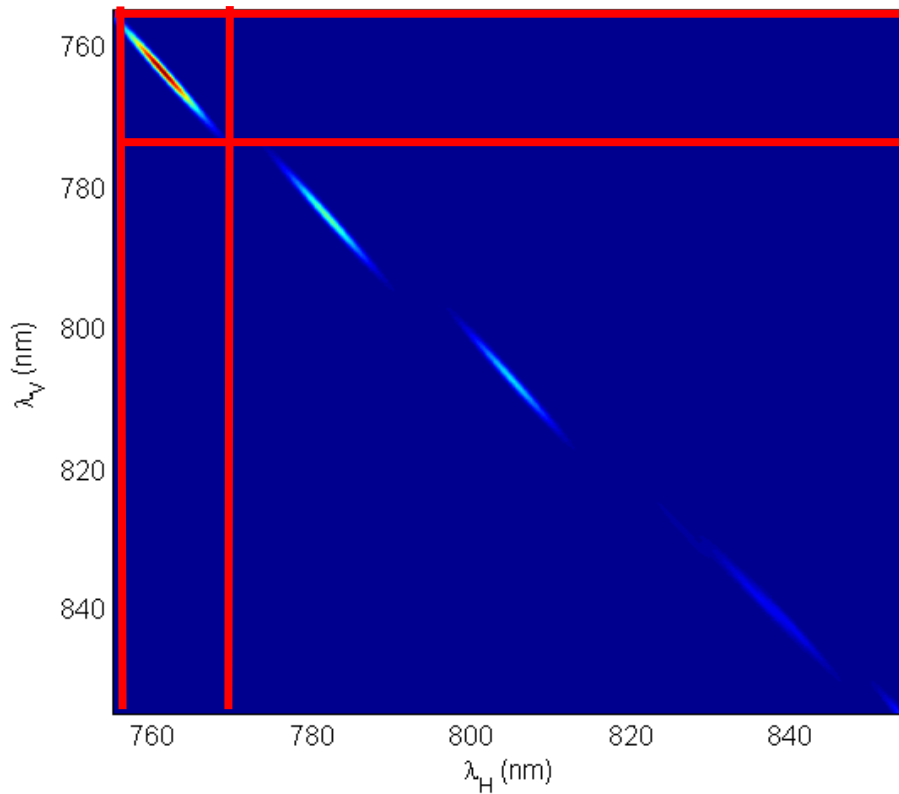


## Zachowanie energii

$$\hbar\omega_p = \hbar\omega_s + \hbar\omega_i$$

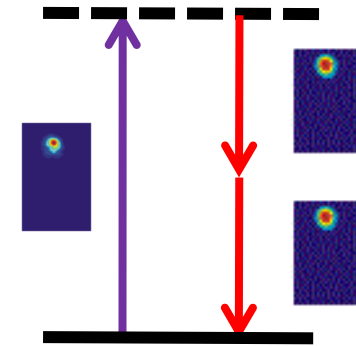


# Widmo fotonów fluorescencji parametrycznej

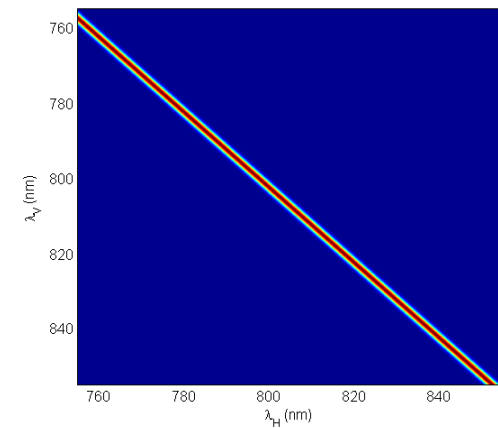


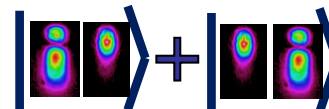
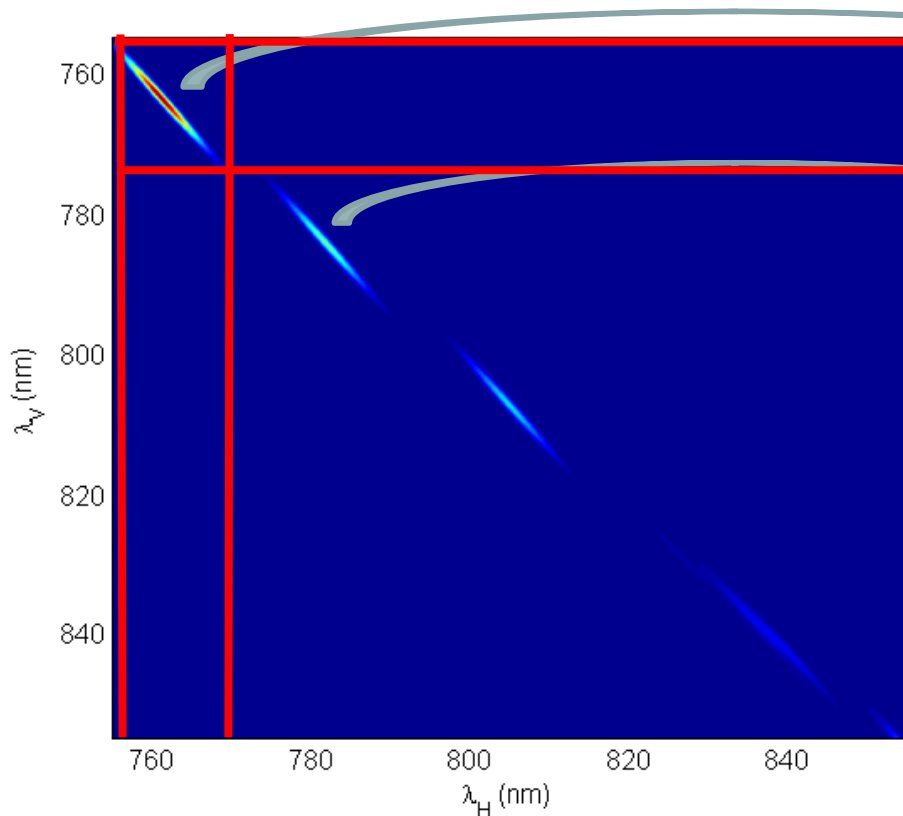
$$00 \rightarrow 00 + 00_2$$

Separacja pasm widmowych – łatwo uzyskać stan czysty widmowo i przestrzennie



Pompa wąskopasmowa

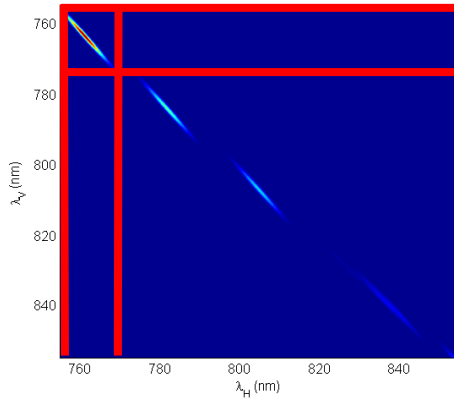




Stan splątany w modach  
(pędach) poprzecznych

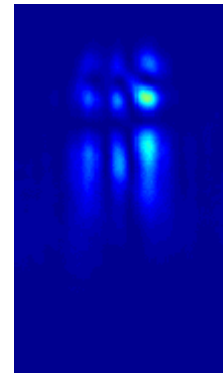
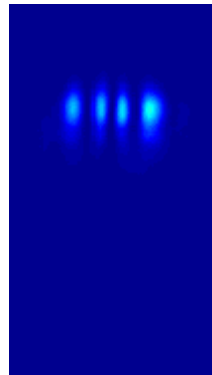
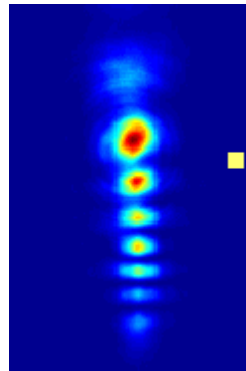
$$00 \rightarrow 00 + 00$$

Separacja pasm widmowych – łatwo uzyskać stan  
czysty widmowo i przestrzennie

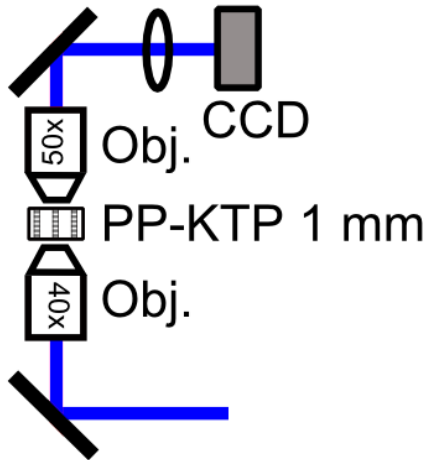


## Potrzebujemy

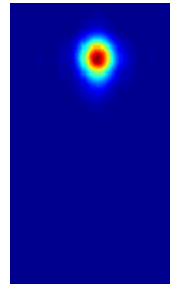
- Falowodu PP-KTP
- Wąskopasmowej ( $<2$  nm) pompy 400 nm
- Filtrowania widmowego fotonów fluorescencji parametrycznej ( $\sim 10$  nm FWHM)
- **Pompy w modzie podstawowym!**



# Selektywne przestrzennie sprzężanie pompy

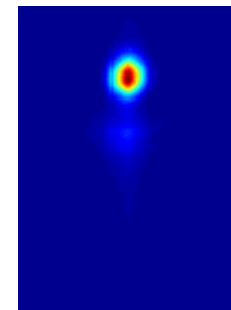
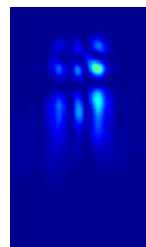
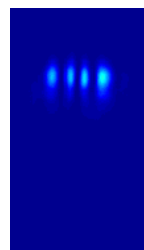
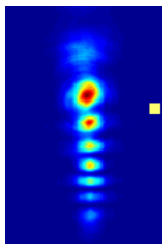


Rozmiar modu podstawowego – ok. 700 nm

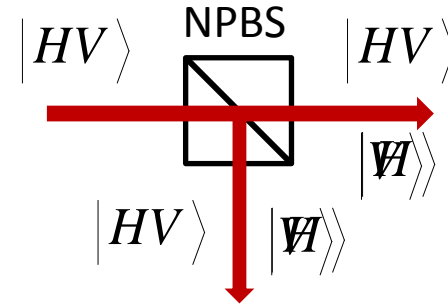
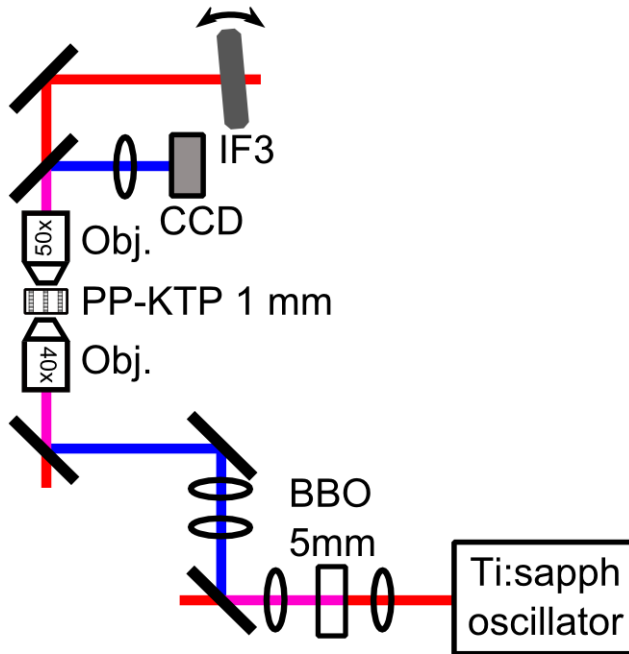


<http://www.thorlabs.de>

The MAX374 launch system features our high resolution differential adjusters, which are ideal for optimizing the coupling of a free space laser into a single mode fiber, even in the visible spectrum where the mode field diameter of the fibers are as small as  $3\ \mu\text{m}$ . The quick-release fiber holder provides six mounting surfaces



## Test – zrobmy splątanie:



Stan splątany w polaryzacjach  
(postselekcjonowany)

$$\frac{1}{\sqrt{2}} (|HV\rangle + |VH\rangle)$$

*Shih, Alley PRL 61, 2921 (1988)*

Korelacje w polaryzacjach pomiędzy fotonami pary – zarówno w bazie HV, jak i dla polaryzacji ukośnych (AD):

$$\frac{1}{\sqrt{2}} (|HV\rangle + |VH\rangle) = \frac{1}{\sqrt{2}} (|DD\rangle - |AA\rangle)$$

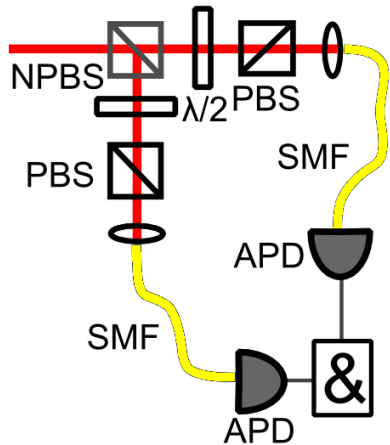
**Warunek: fotony pary są nierozróżnialne (przestrzennie, widmowo, czasowo...)**





# Źródło par fotonów w stanach czystych przestrzennie

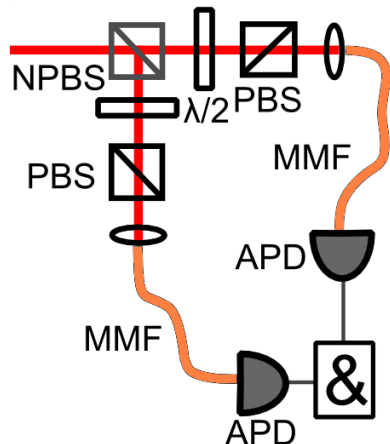
Włókna jednomodowe – z filtrowaniem przestrzennym:



$$V = \frac{I_{max} - I_{min}}{I_{max} + I_{min}}$$

Baza	Widzialność
HV	86±1%
AD	84±1%

Światłowody wielomodowe – brak filtrowania przestrzennego:

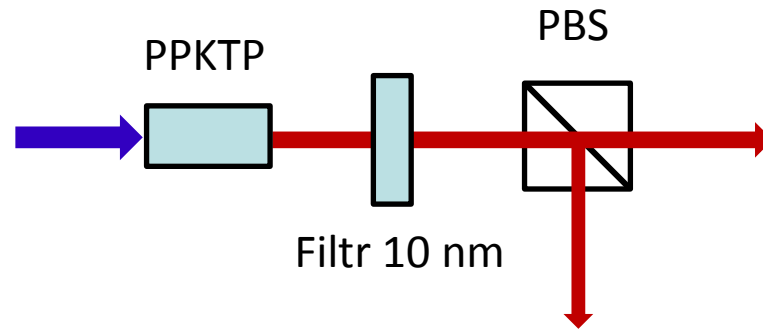


Baza	Widzialność
HV	80±1%
AD	77±1%

**Powyżej progu splątania,  
łamanie nierówności Bella – bez  
filtrowania przestrzennego!**



# Wysokowydajne źródło par fotonów



Moc pompy	200 $\mu\text{W}$
Wydajność sprzęgania pompy do falowodu	25-45%
Pojedyncze zliczenia	$1,2 \cdot 10^5 \text{ s}^{-1}$
Koincydencje	$1,5 \cdot 10^4 \text{ s}^{-1}$
Koincydencje/pojedyncze (przy 19% wydajności detekcji)	12%
Koincydencje/pojedyncze (tuż za falowodem)	>60%
Wydajność sprzęgania do włókna jednomodowego	>57%



- Pomiar dopasowania fazowego w falowodach PP-KTP
- Kontrola modów przestrzennych fotonów fluorescencji parametrycznej
- Splątanie bez filtrowania przestrzennego
- Wydajna generacja par fotonów.



# Dziękuję za uwagę



Ministerstwo Nauki  
i Szkolnictwa Wyższego



*Photonic implementations of quantum-enhanced technologies*  
Projekt realizowany w ramach programu TEAM Fundacji na rzecz Nauki Polskiej,  
współfinansowanego ze środków Europejskiego Funduszu Rozwoju Regionalnego w ramach  
Programu Operacyjnego Innowacyjna Gospodarka 2007-2013.



**INNOVATIVE ECONOMY**  
NATIONAL COHESION STRATEGY

**EUROPEAN UNION**  
EUROPEAN REGIONAL  
DEVELOPMENT FUND



Ultrafast Phenomena Lab

