

Experimental generation of (entangled) photon pairs



INNOWACYJNA GOSPODARKA
NARODOWA STRATEGIA SPÓJNOŚCI

UNIA EUROPEJSKA
EUROPEJSKI FUNDUSZ
ROZWOJU REGIONALNEGO



Projekt współfinansowany ze środków Europejskiego Funduszu Rozwoju Regionalnego w ramach Programu Operacyjnego Innowacyjna Gospodarka

LASER



Quantum statistics

LASER

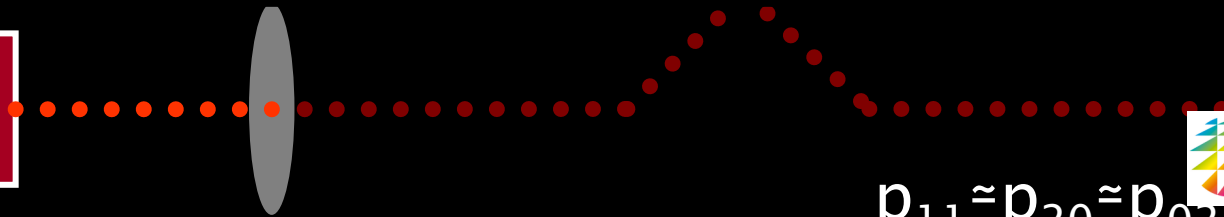


$$|\alpha\rangle = e^{-|\alpha|^2/2} \left(|0\rangle + \alpha|1\rangle + \frac{\alpha^2}{2}|2\rangle + \dots \right)$$

We need

$$p_2 \ll p_1^2 / 2$$

LASER

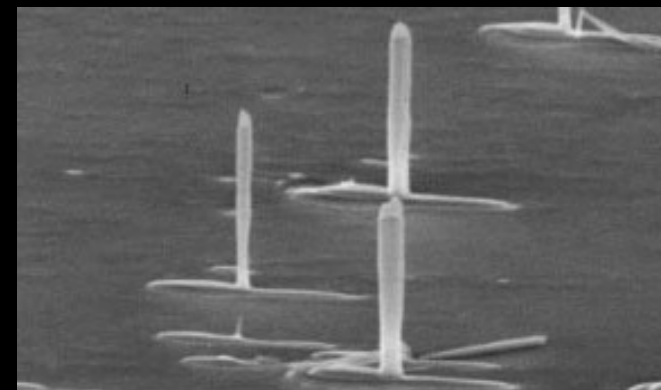
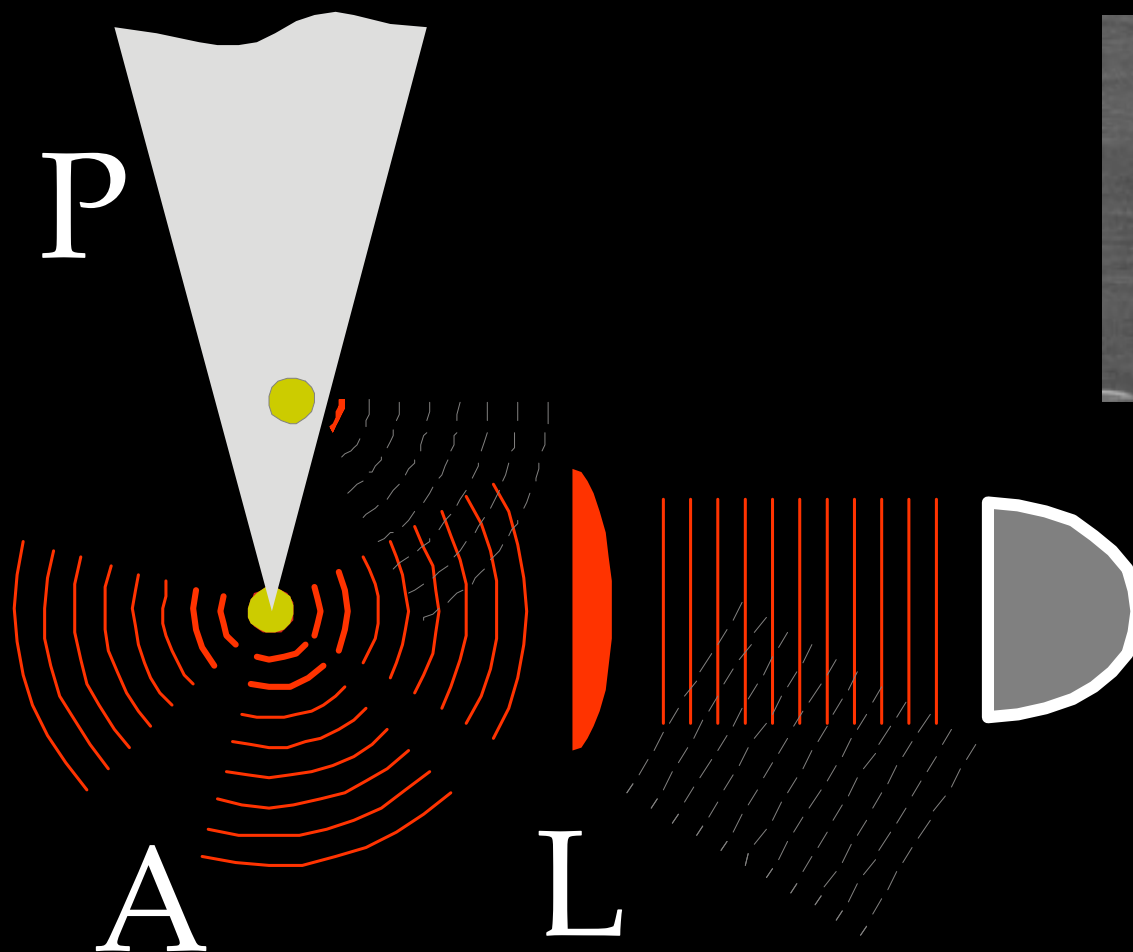


$$p_{11} \approx p_{20} \approx p_{02}$$

Narodowe
Laboratorium
Technologii
Kwantowych

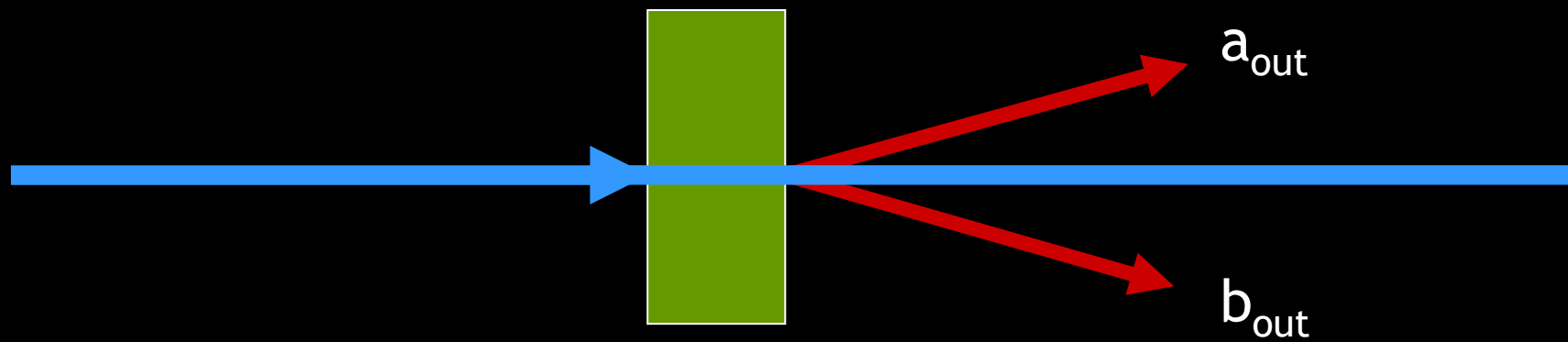
INNOWACYJNA GOSPODARKA
PROJEKT WSPÓLFINANSOWANY ZE ŚRODKÓW EUROPEJSKIEGO FUNDUSZU ROZWOJU
REGIONALNEGO W RAMACH PROGRAMU OPERACYJNEGO INNOWACYJNA GOSPODARKA

Quantum statistics



Santori et al, *Nature*,
419, 594-597 (2002)

1 photon ← 1 atom



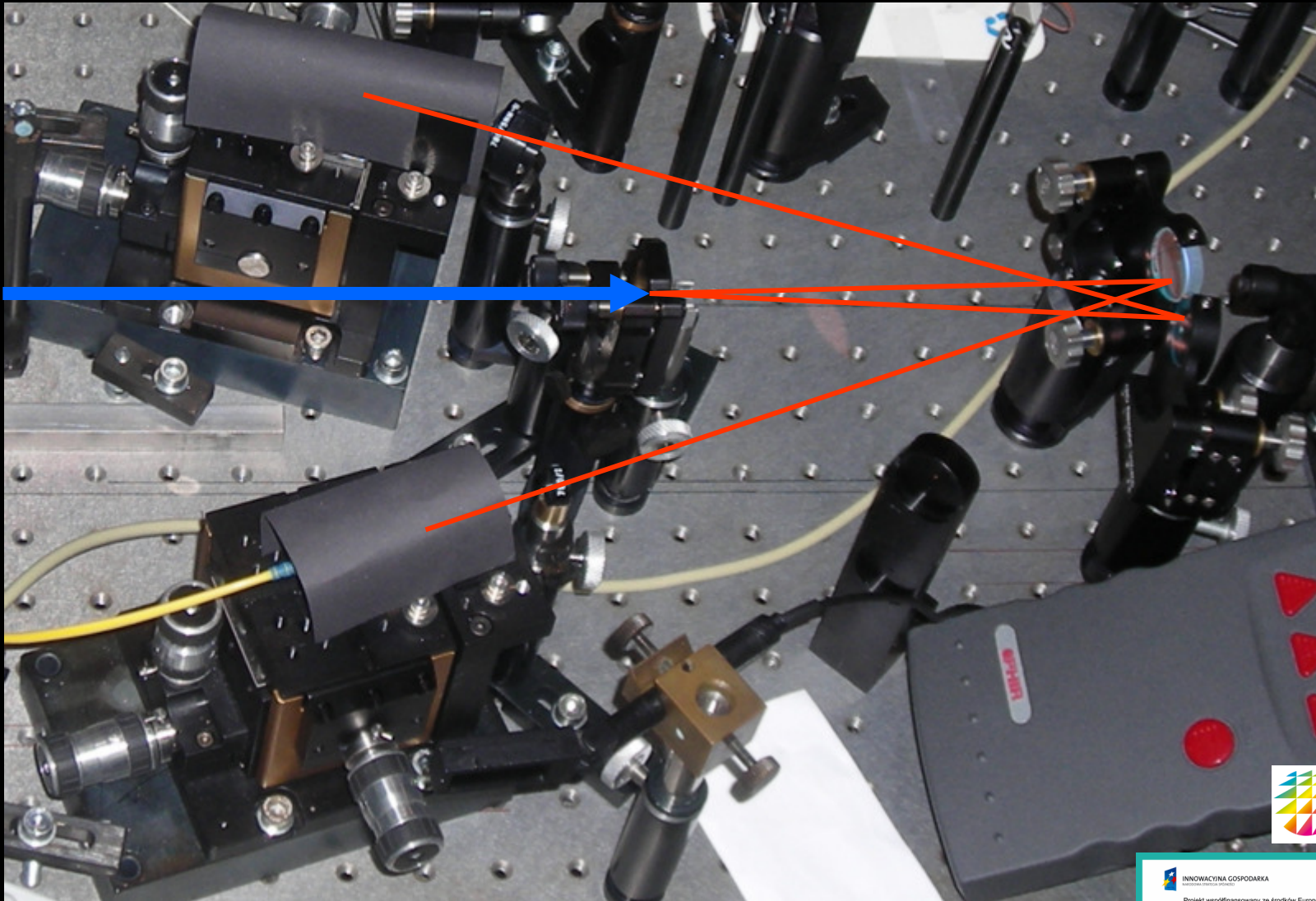
Paul Kwiat



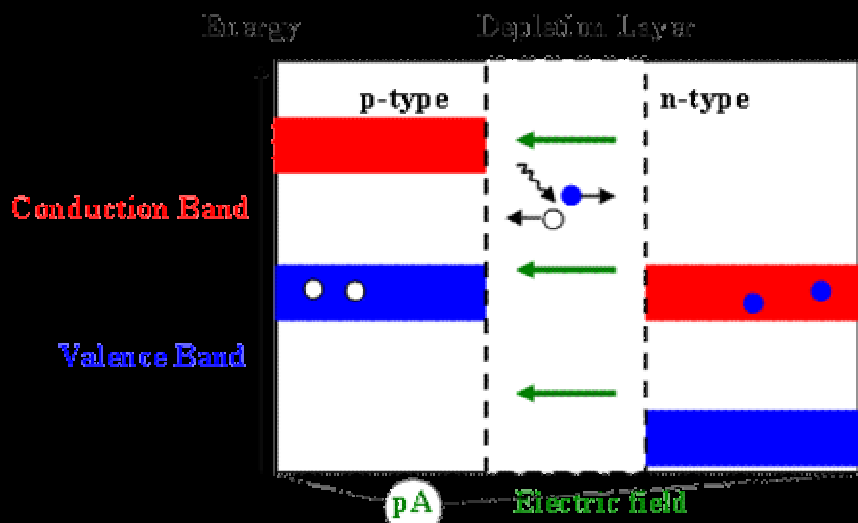
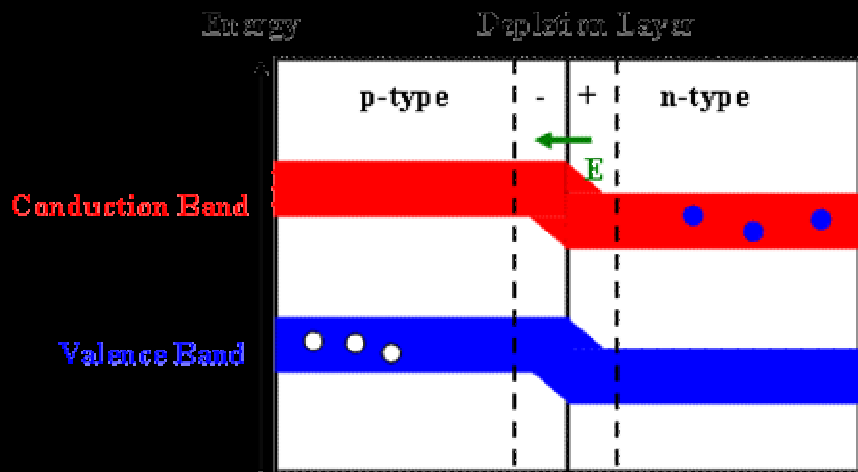
Narodowe
Laboratorium
Technologii
Kwantowych

INNOWACYJNA GOSPODARKA
NARODOWA STRATEGIA ROZWOJU
UNIA EUROPEJSKA
ROZWOJ I PRACY
REGIONALNY
Projekt współfinansowany ze środków Europejskiego Funduszu Rozwoju Regionalnego w ramach Programu Operacyjnego Innowacyjna Gospodarka

SPDC



SPDC



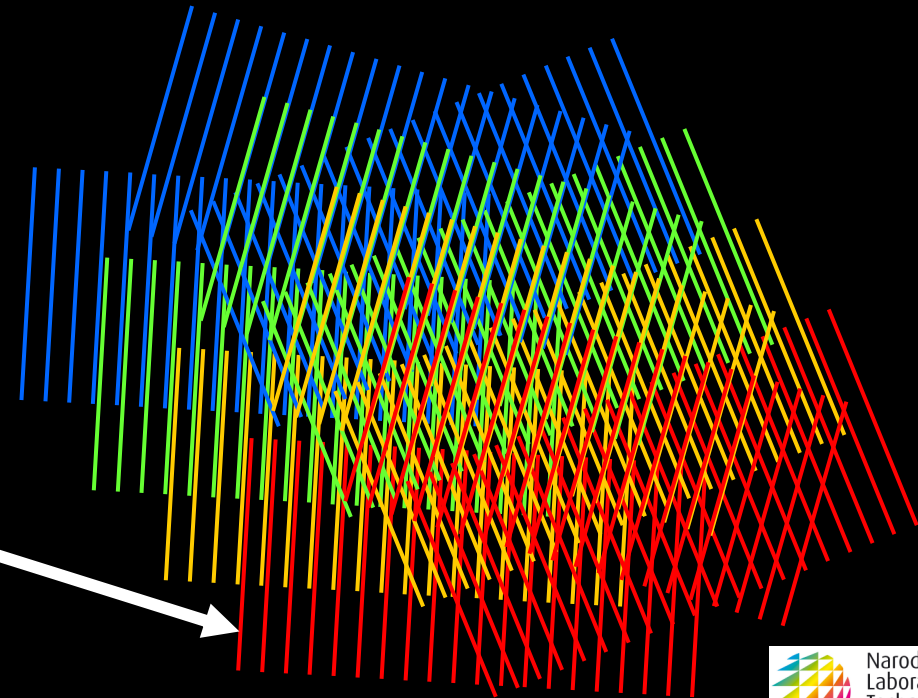
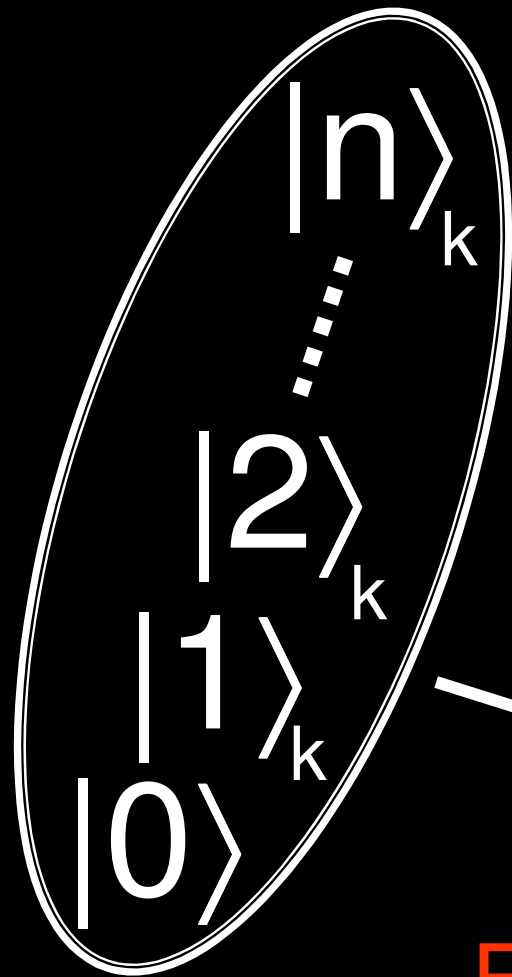
Single-Photon Counting
Module—SPCM



<http://electron9.phys.utk.edu/optics421/modules/m4/photodiode.htm>



Detectors



$$E_k(\mathbf{x}, t) = E_0 \exp(i\mathbf{k} \cdot \mathbf{x} - i\omega t)$$

Modal characteristics

Nonlinear crystal

$$\mathbf{P} = \chi \varepsilon_0 \mathbf{E} + \chi^{(2)} \mathbf{E} \mathbf{E} + \dots$$



Narodowe
Laboratorium
Technologii
Kwantowych



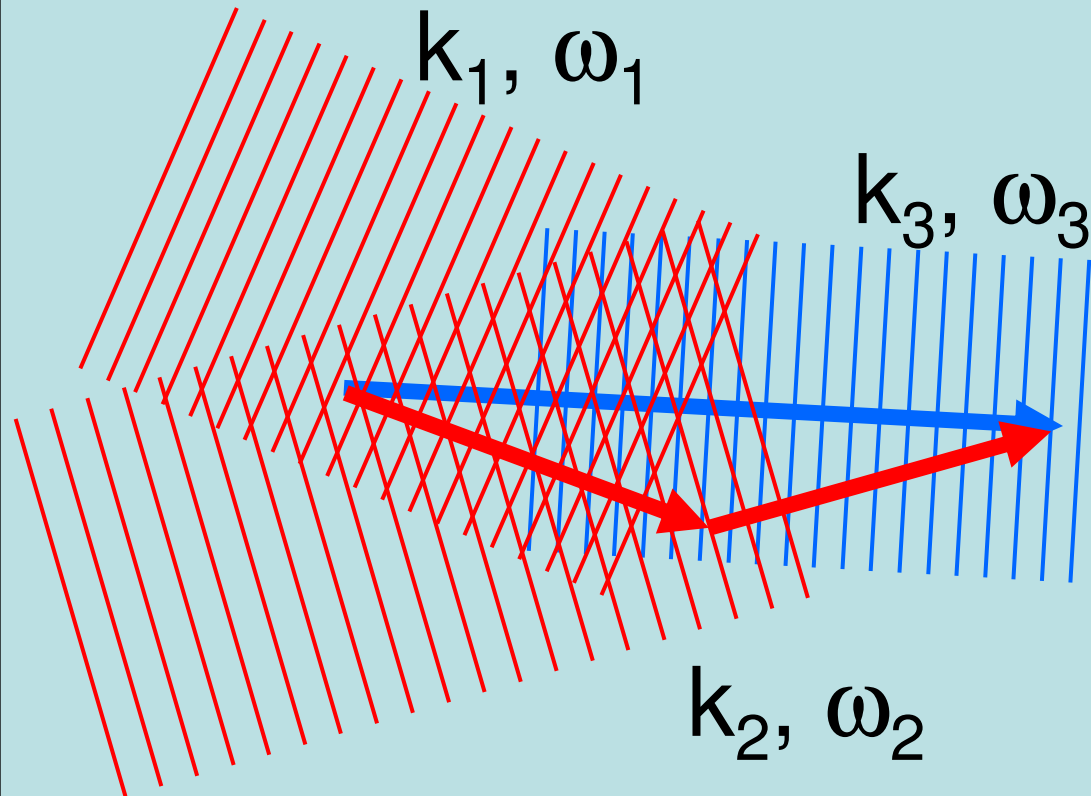
INNOWACYJNA GOSPODARKA
NARODOWA STRATEGIA SPÓJNOŚCI

UNIA EUROPEJSKA
EUROPEJSKI FUNDUSZ
ROZWOJU REGIONALNEGO



Projekt współfinansowany ze środków Europejskiego Funduszu Rozwoju Regionalnego w ramach Programu Operacyjnego Innowacyjna Gospodarka

Generic case: 3WM



$$\omega_3 = \omega_1 + \omega_2$$

$$k_{3\perp} = k_{1\perp} + k_{2\perp}$$

Sprawność

$$\sim [\sin(\Delta k L/2) / \Delta k]^2$$



Narodowe
Laboratorium
Technologii
Kwantowych



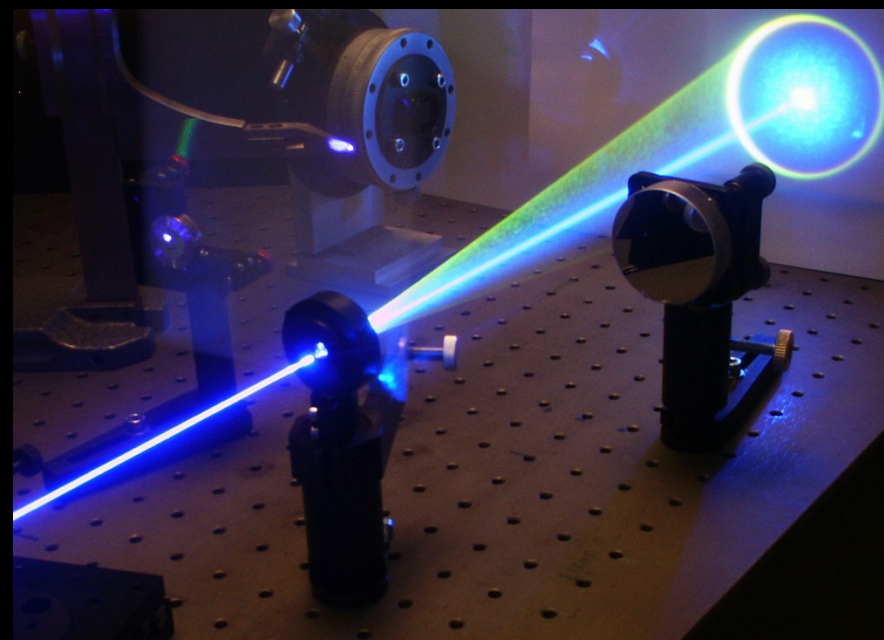
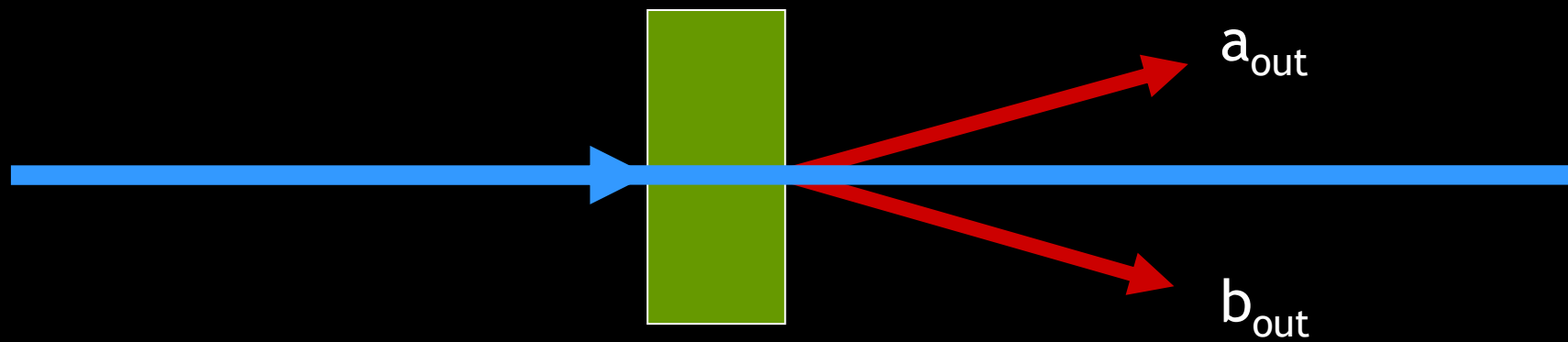
INNOWACYJNA GOSPODARKA
NARODOWA STRATEGIA SPÓJNOŚCI

UNIA EUROPEJSKA
EUROPEJSKI FUNDUSZ
ROZWOJU REGIONALNEGO



Projekt współfinansowany ze środków Europejskiego Funduszu Rozwoju Regionalnego w ramach Programu Operacyjnego Innowacyjna Gospodarka

k_{2z}



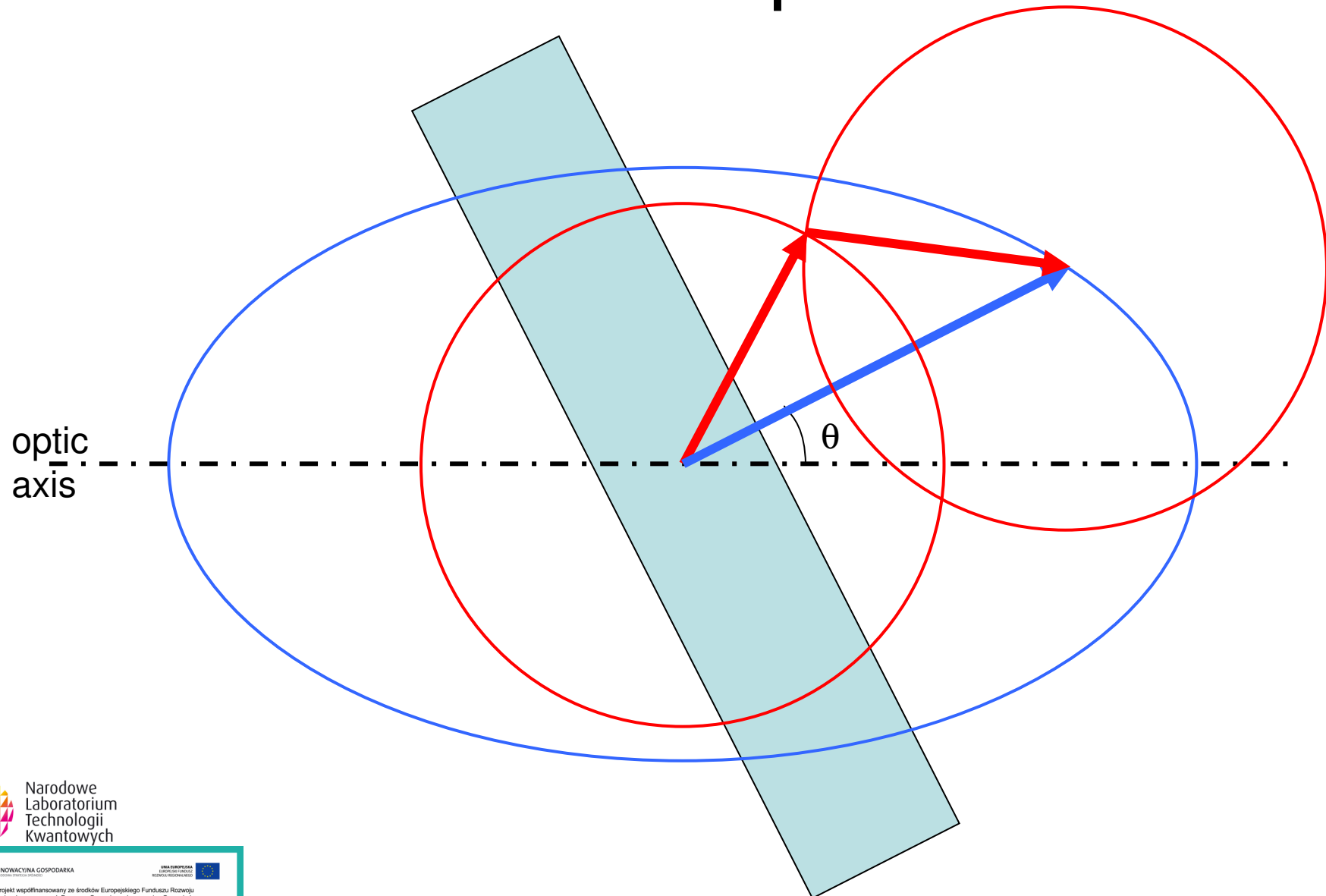
INNOWACYJNA GOSPODARKA



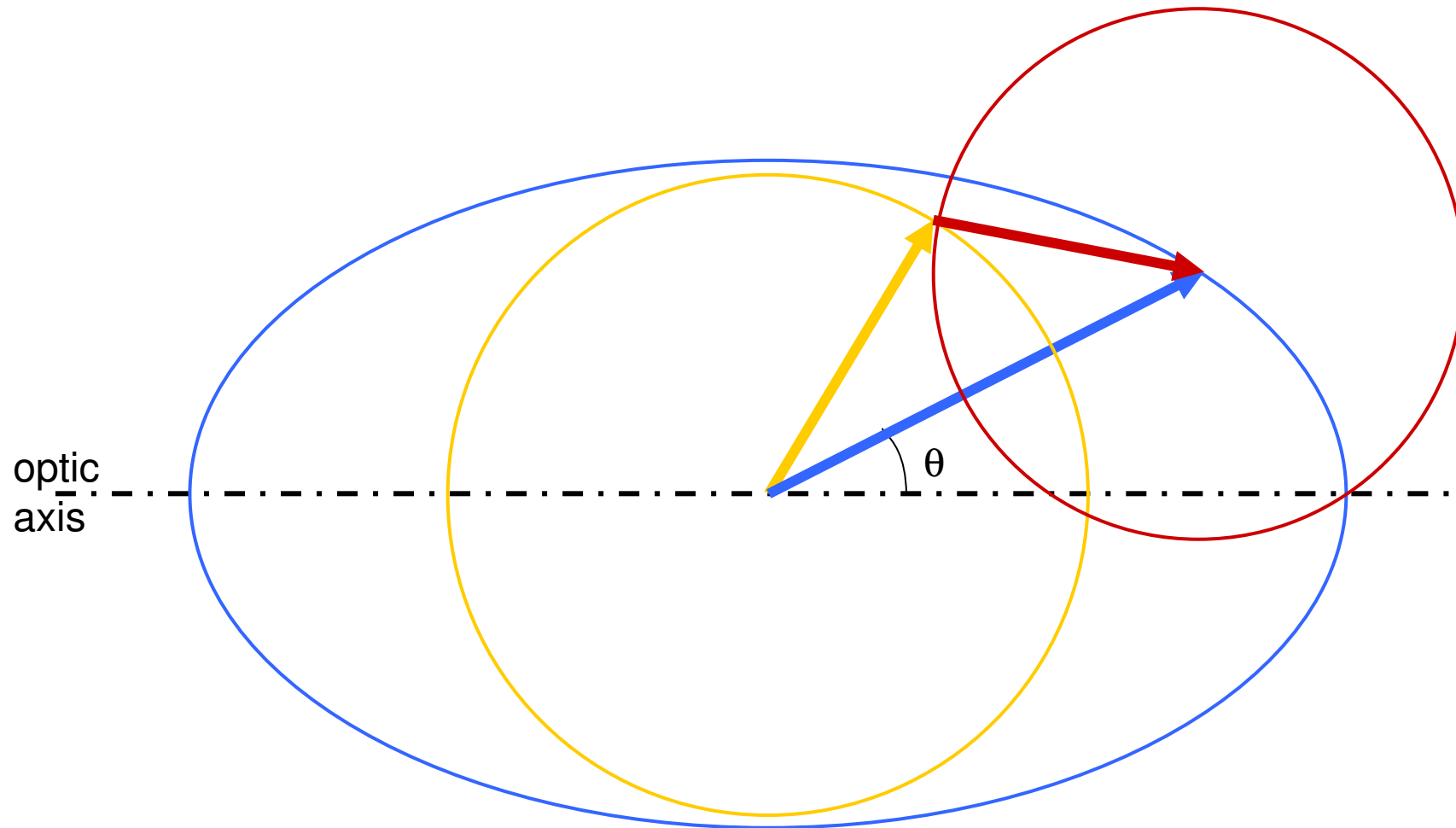
Projekt współfinansowany ze środków Europejskiego Funduszu Rozwoju Regionalnego w ramach Programu Operacyjnego Innowacyjna Gospodarka

SPDC

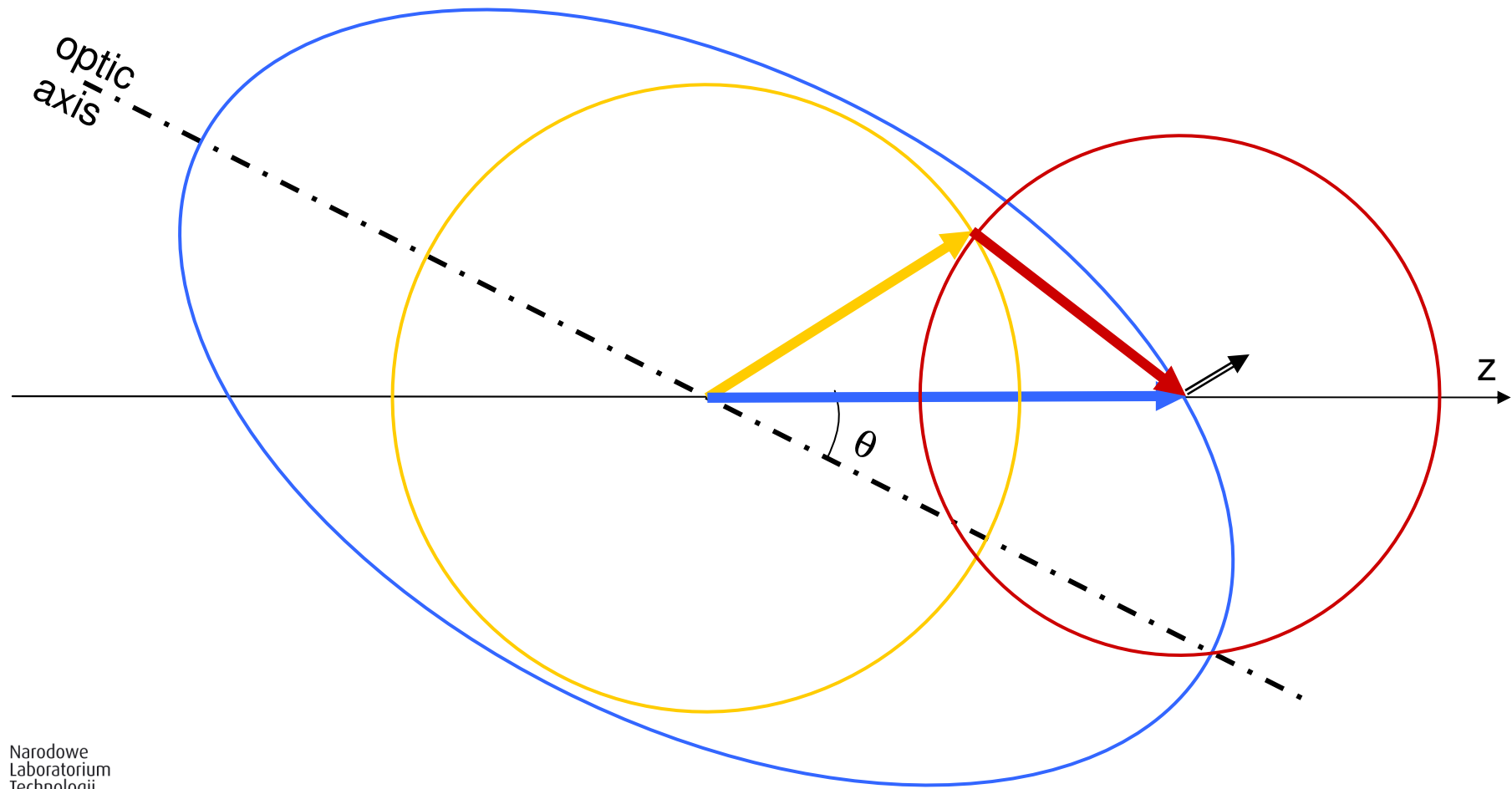
k vector Ellipsoids



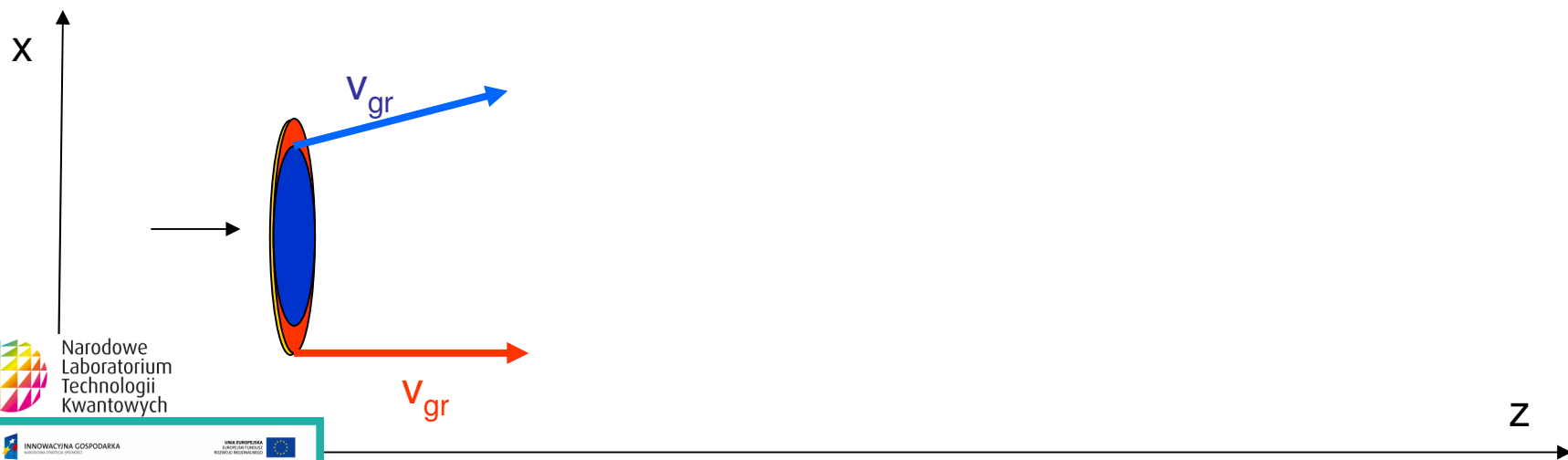
k vector Ellipsoids



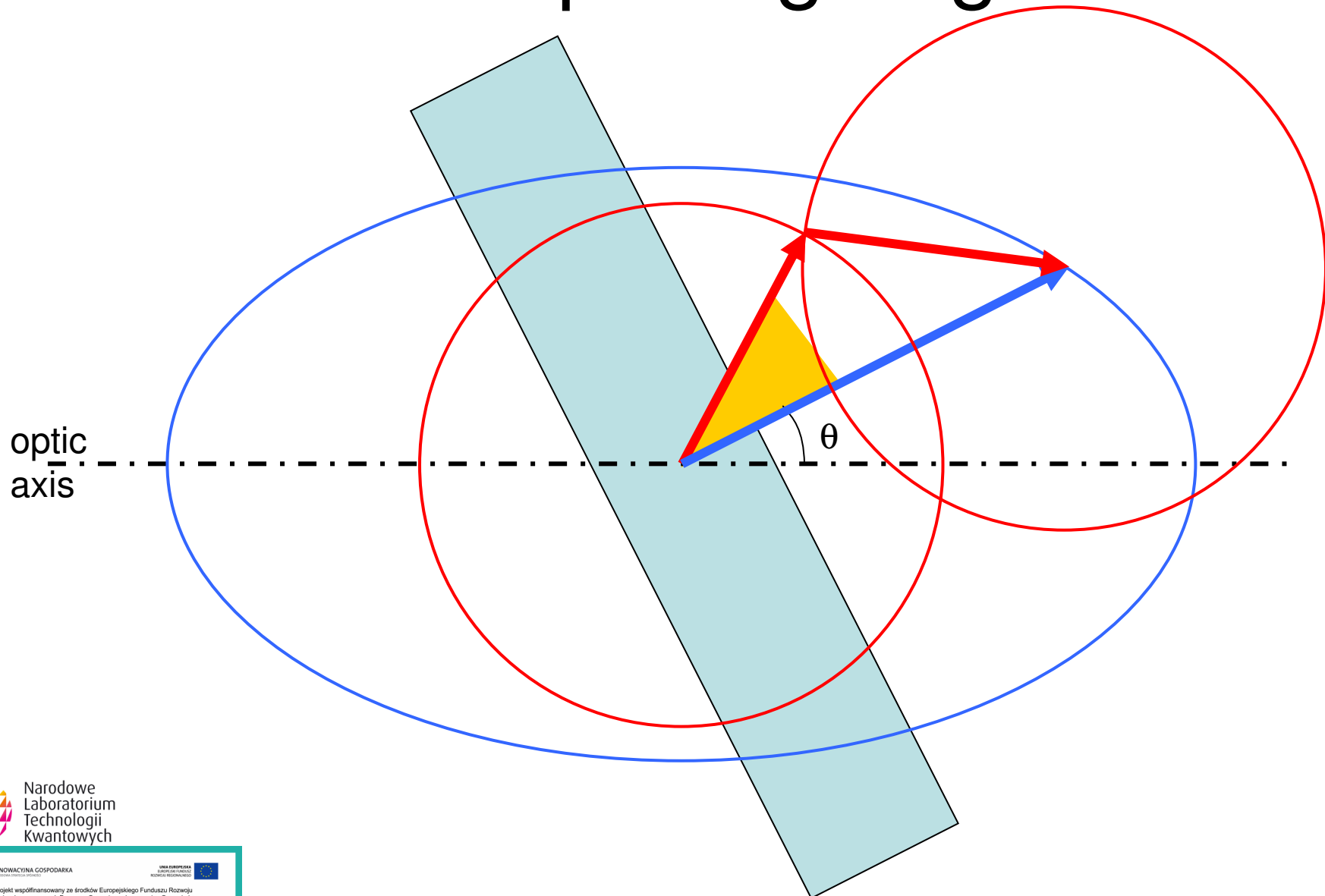
k vector Ellipsoids



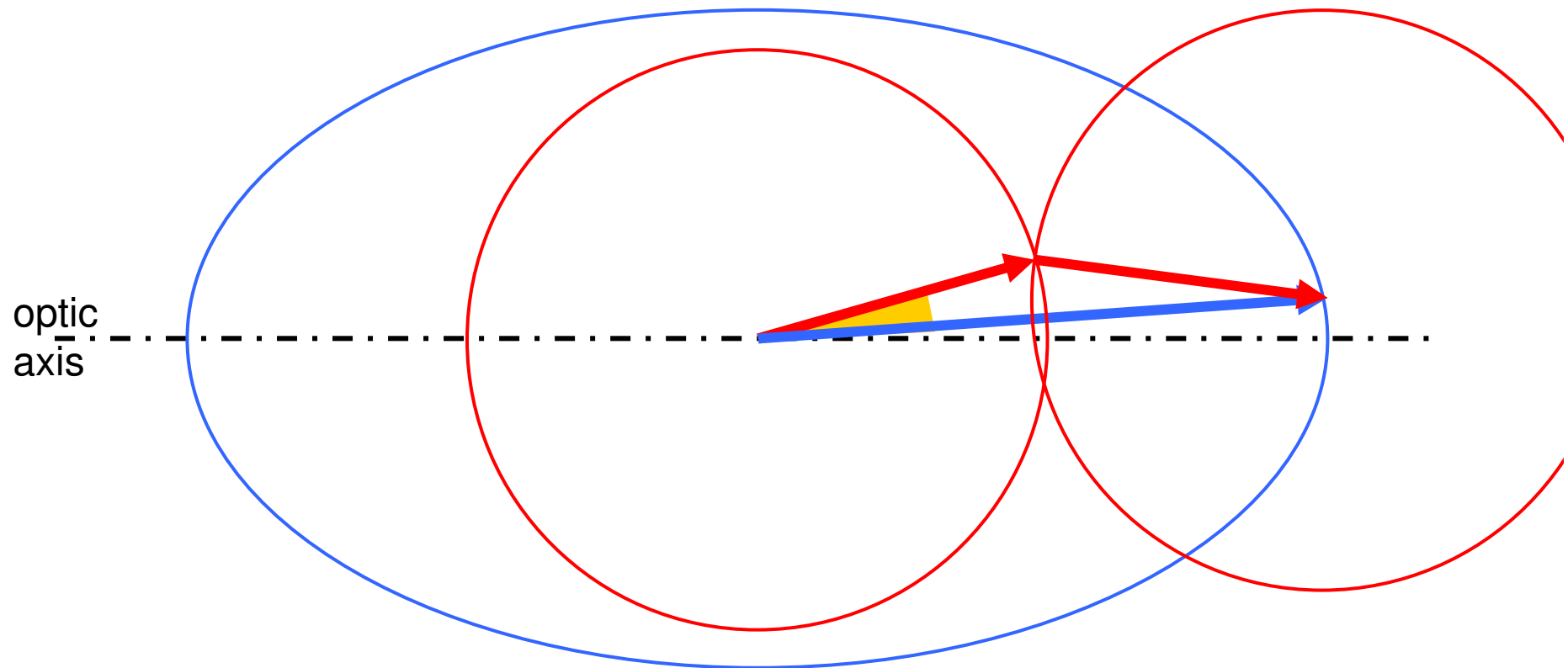
Propagation picture



cone opening angle

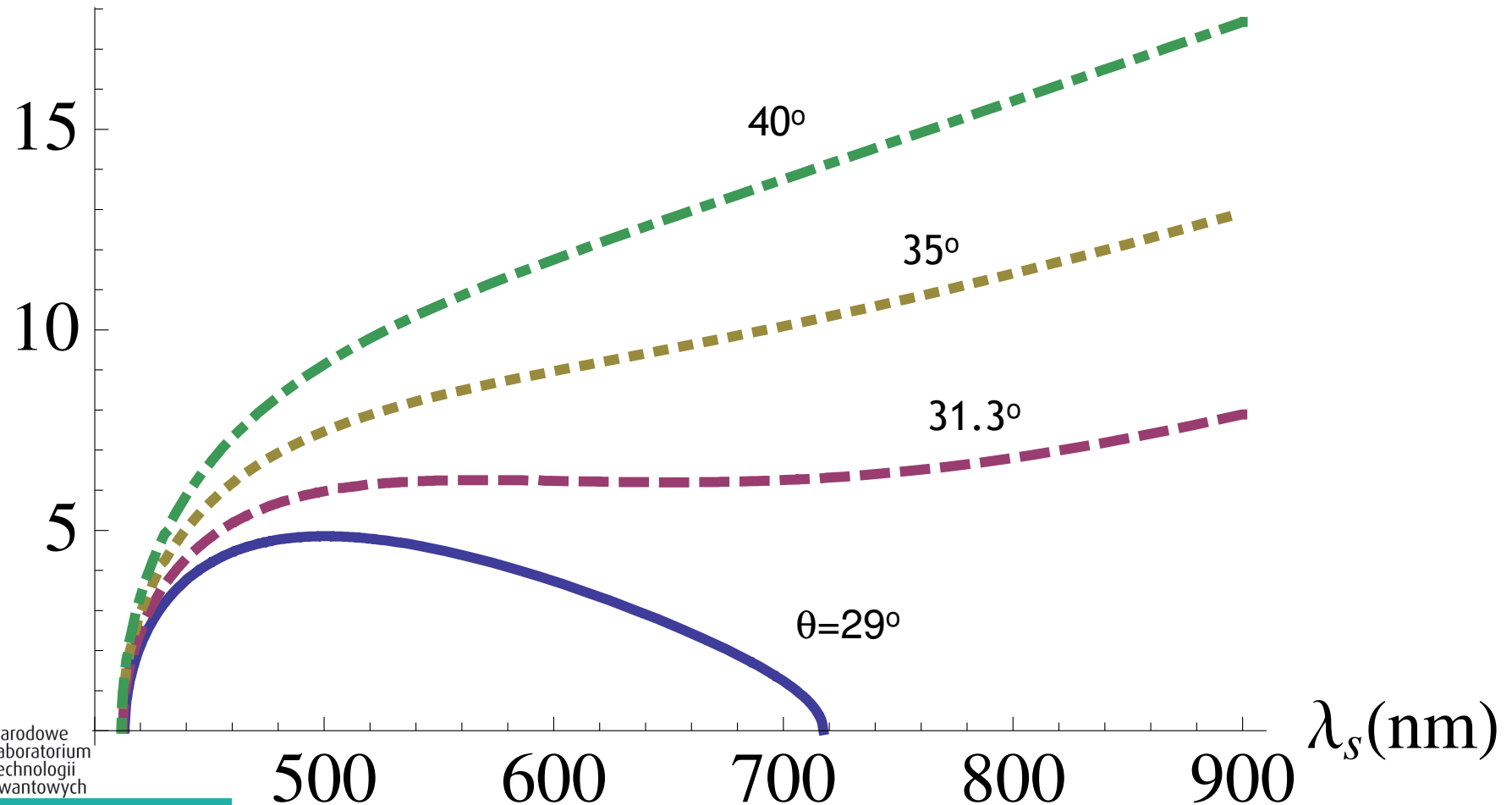


cone opening angle

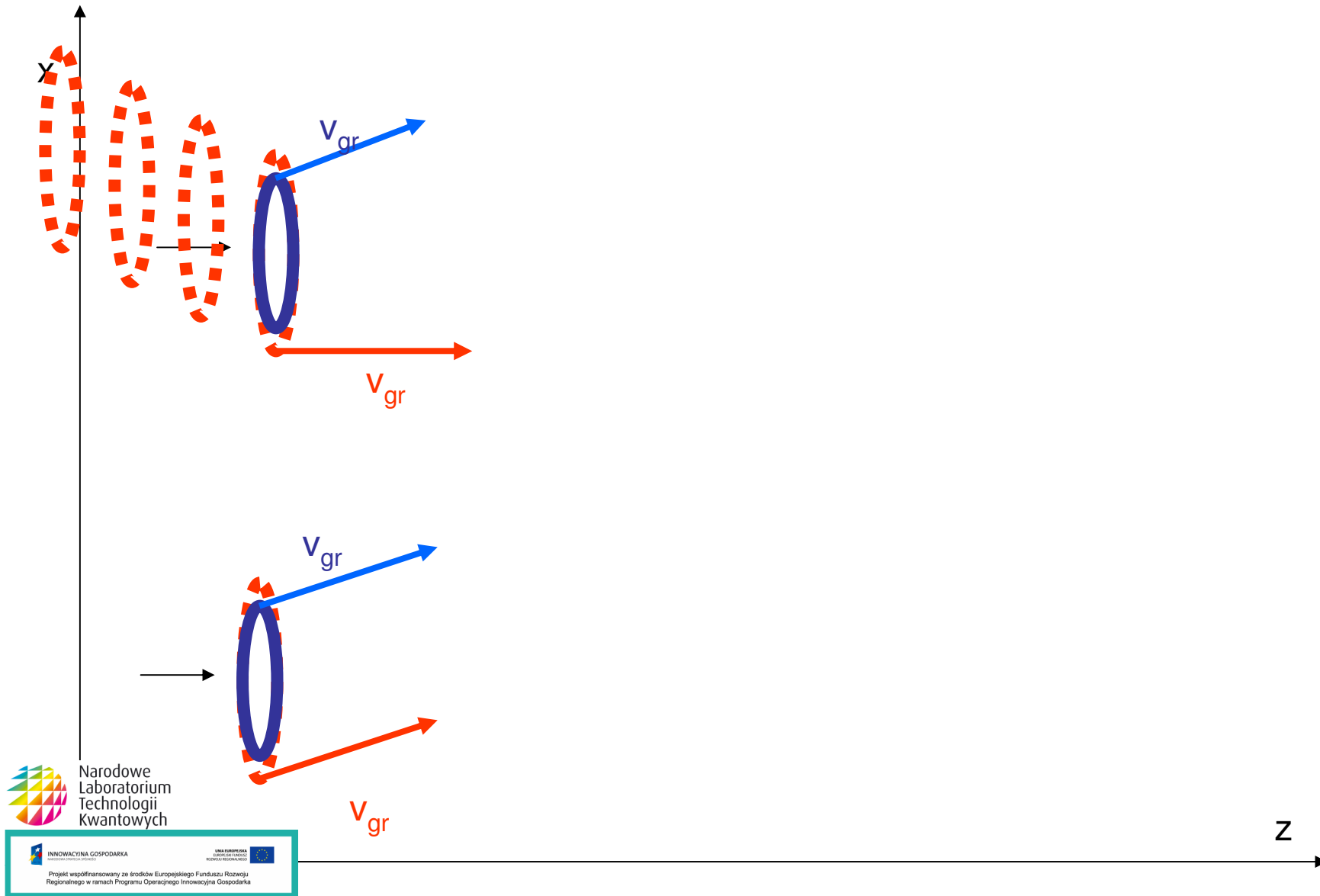


cone opening

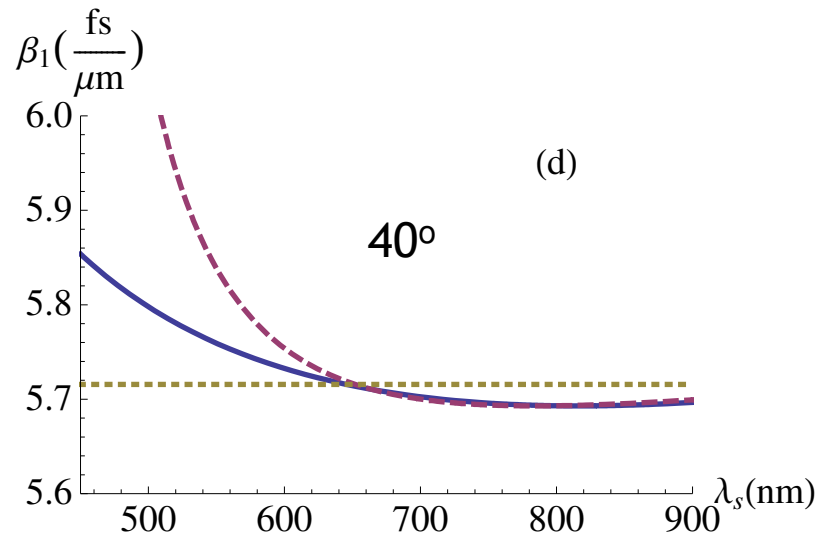
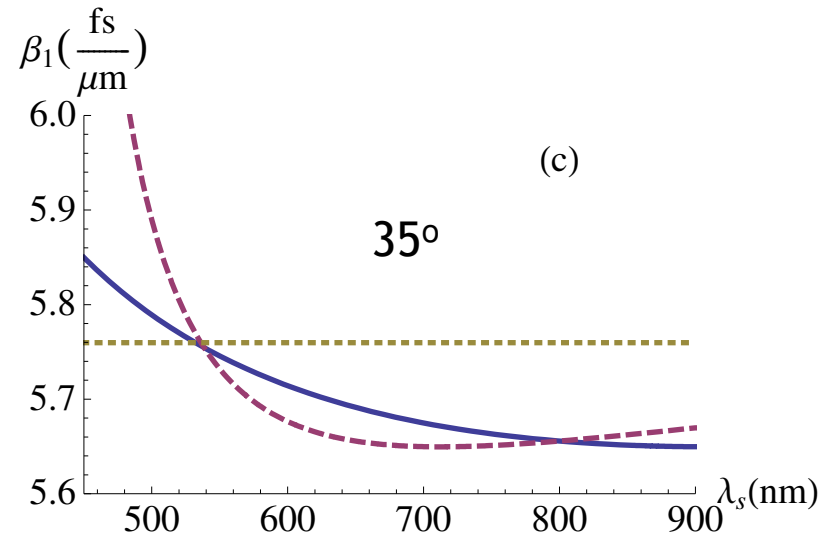
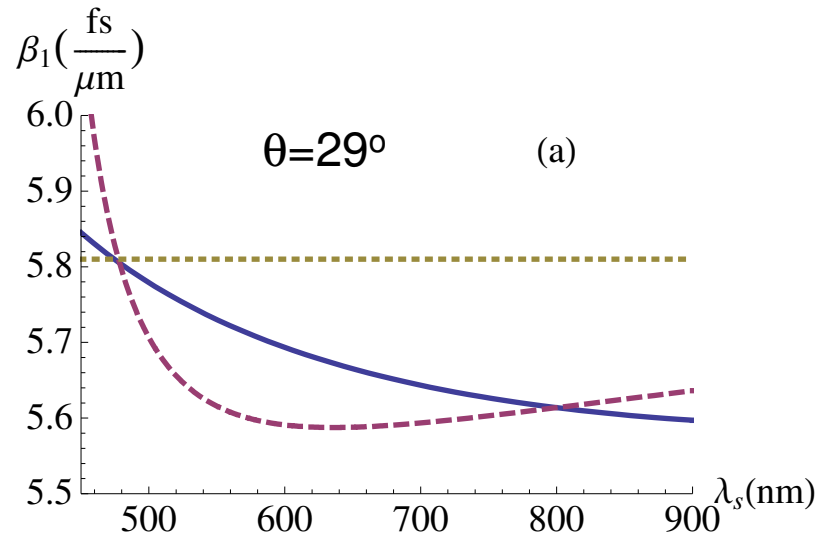
$\alpha_s(\text{deg})$



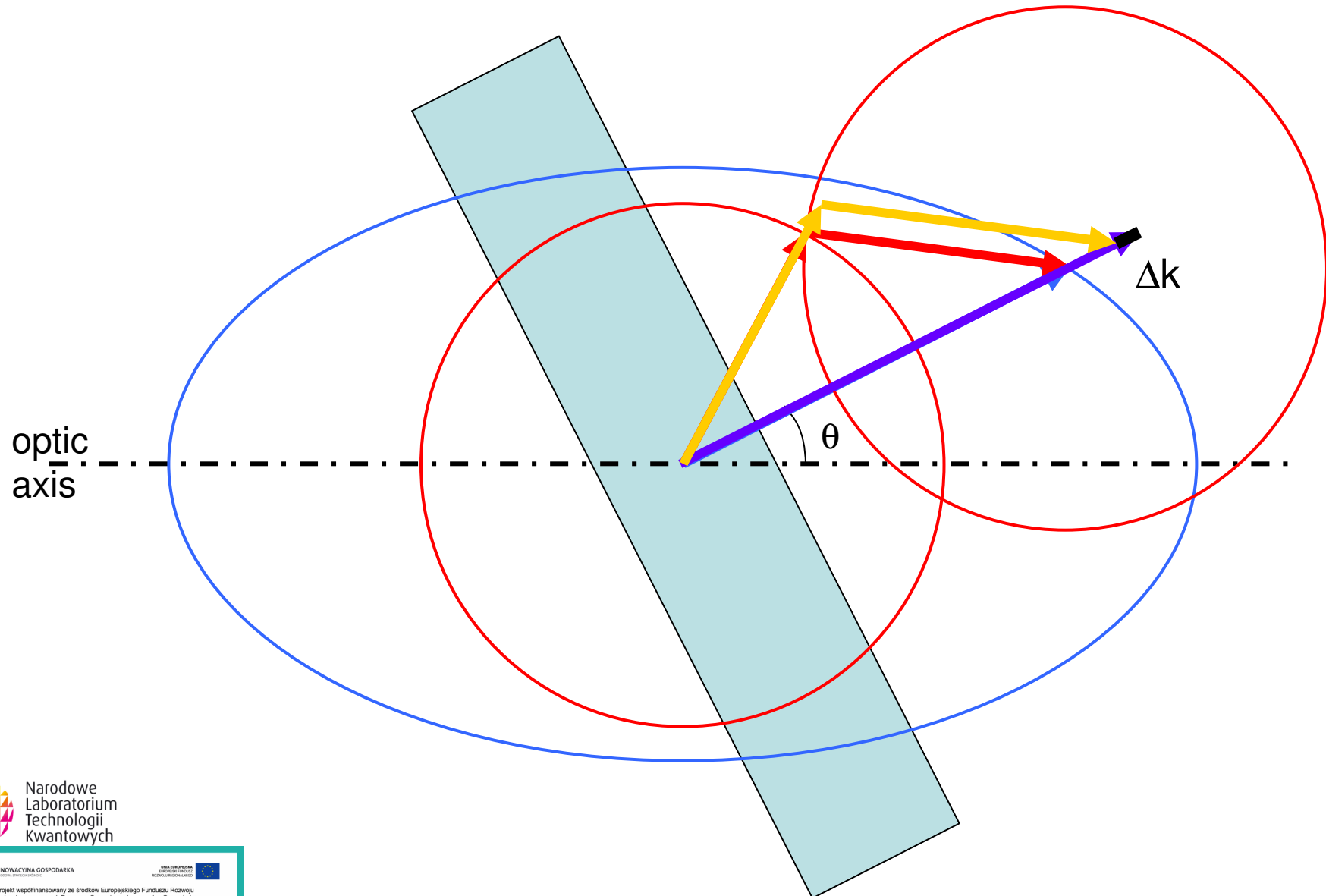
Propagation picture



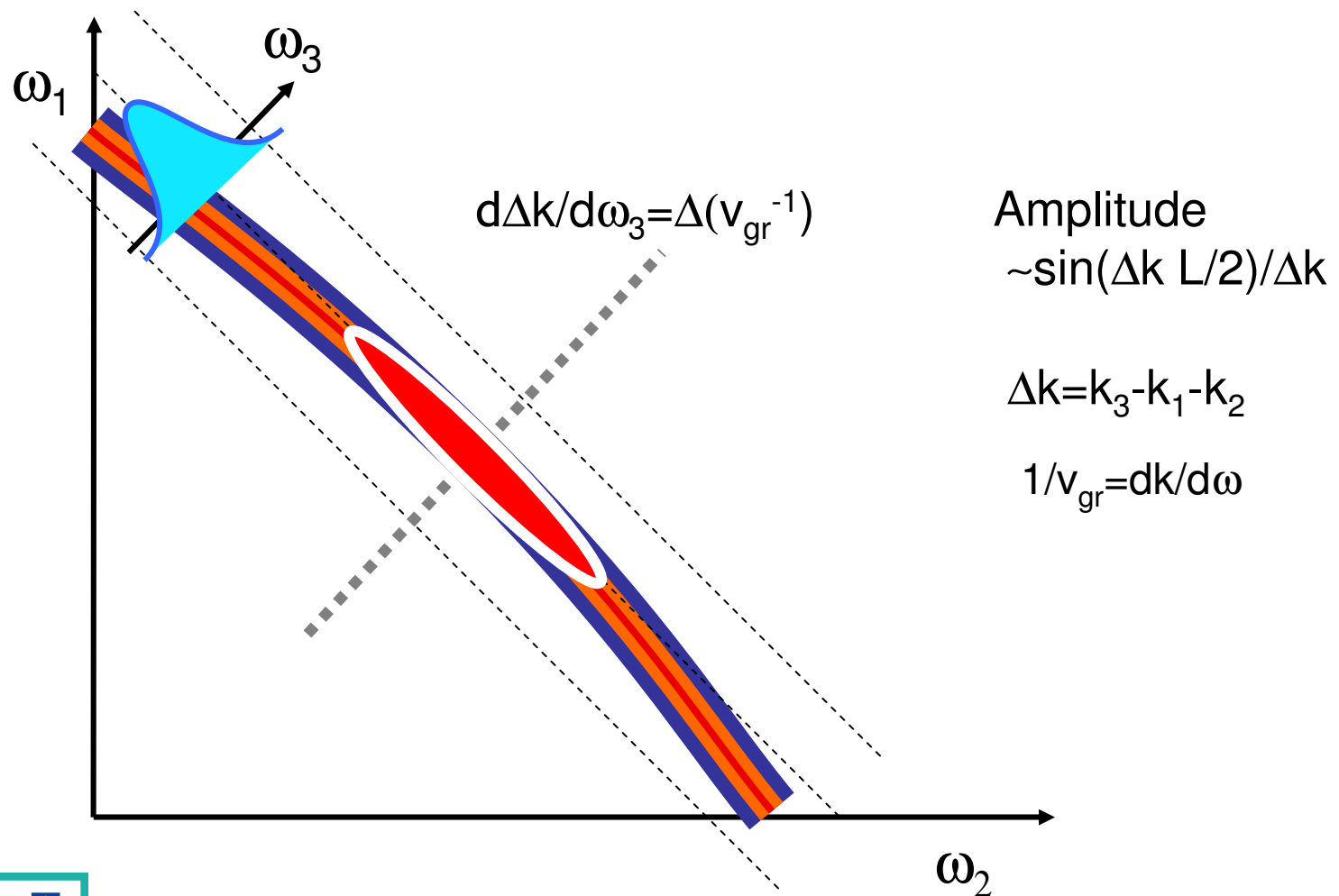
$1/v_{gr}$



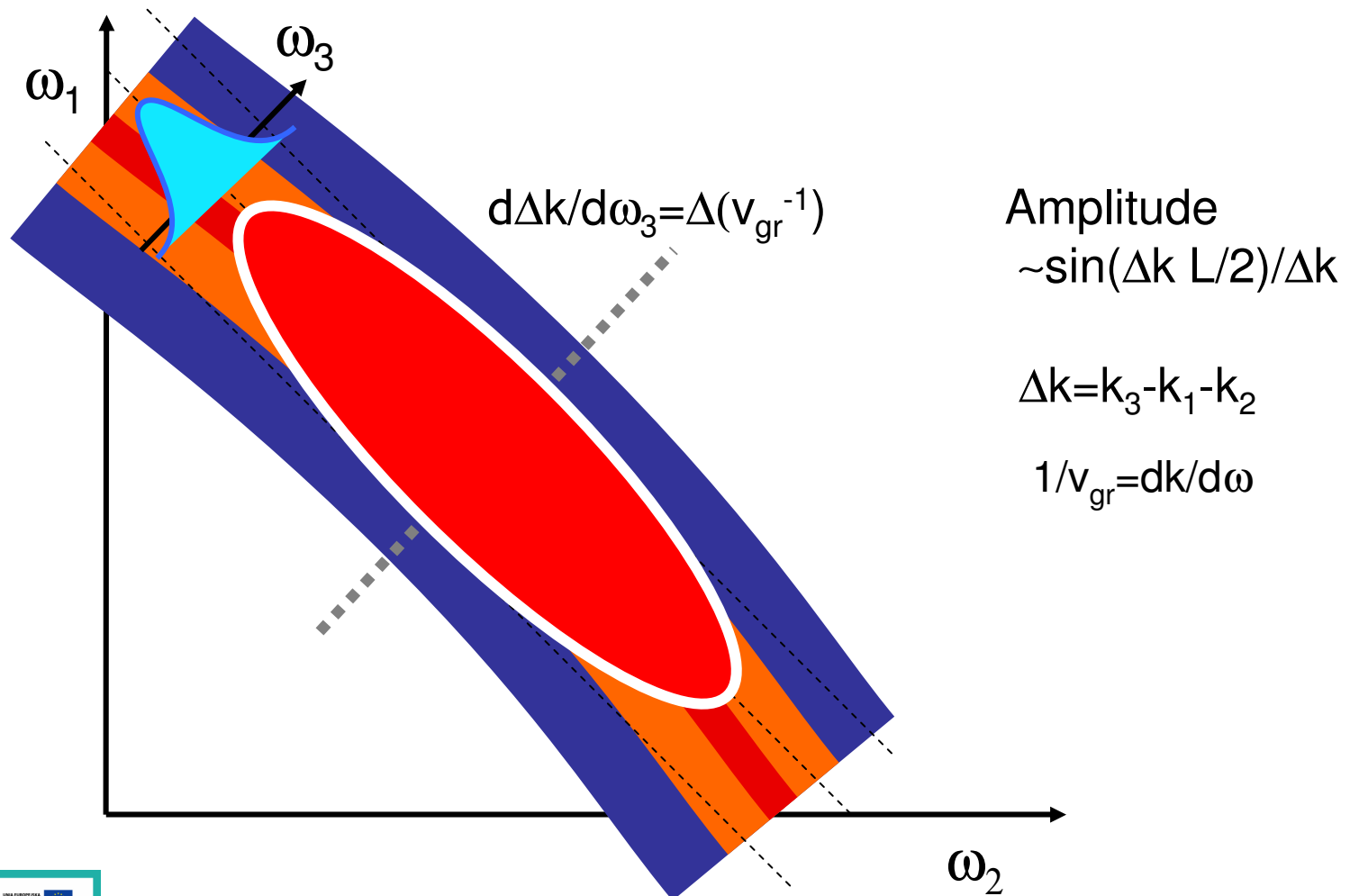
Mismatch



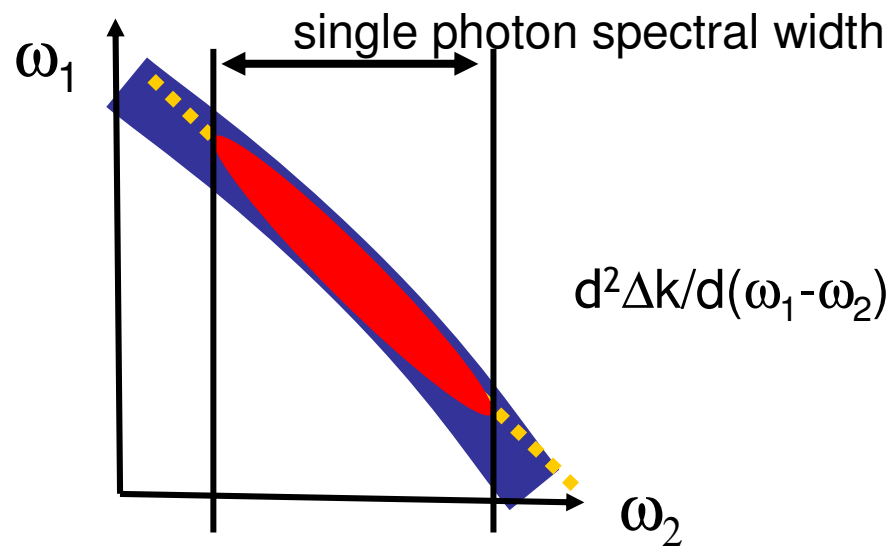
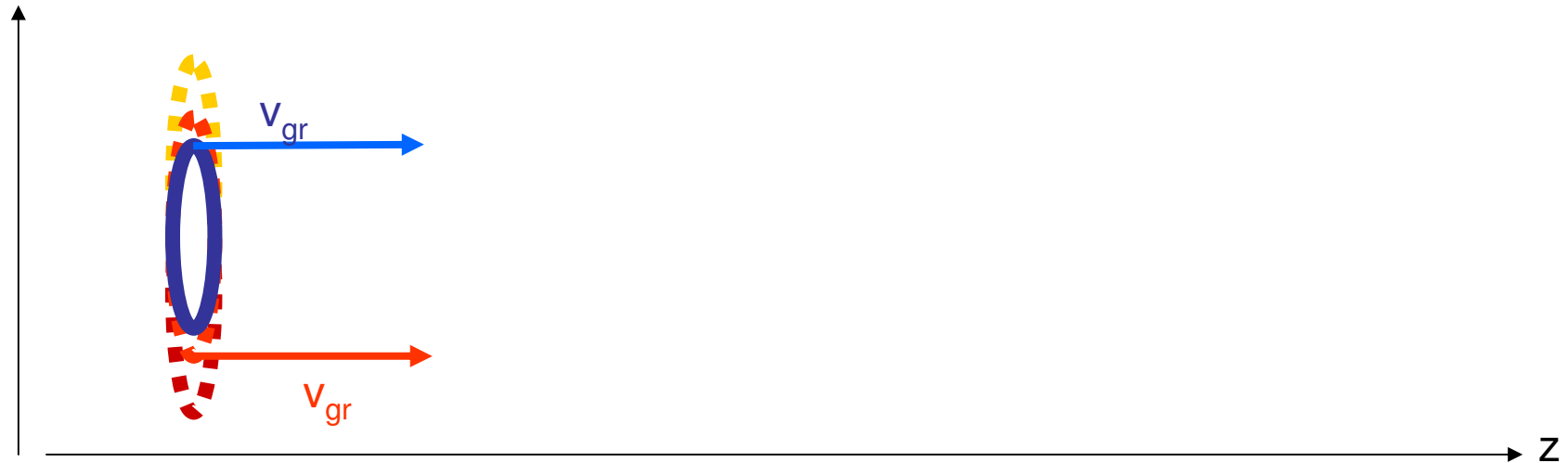
Biphoton wavefunction



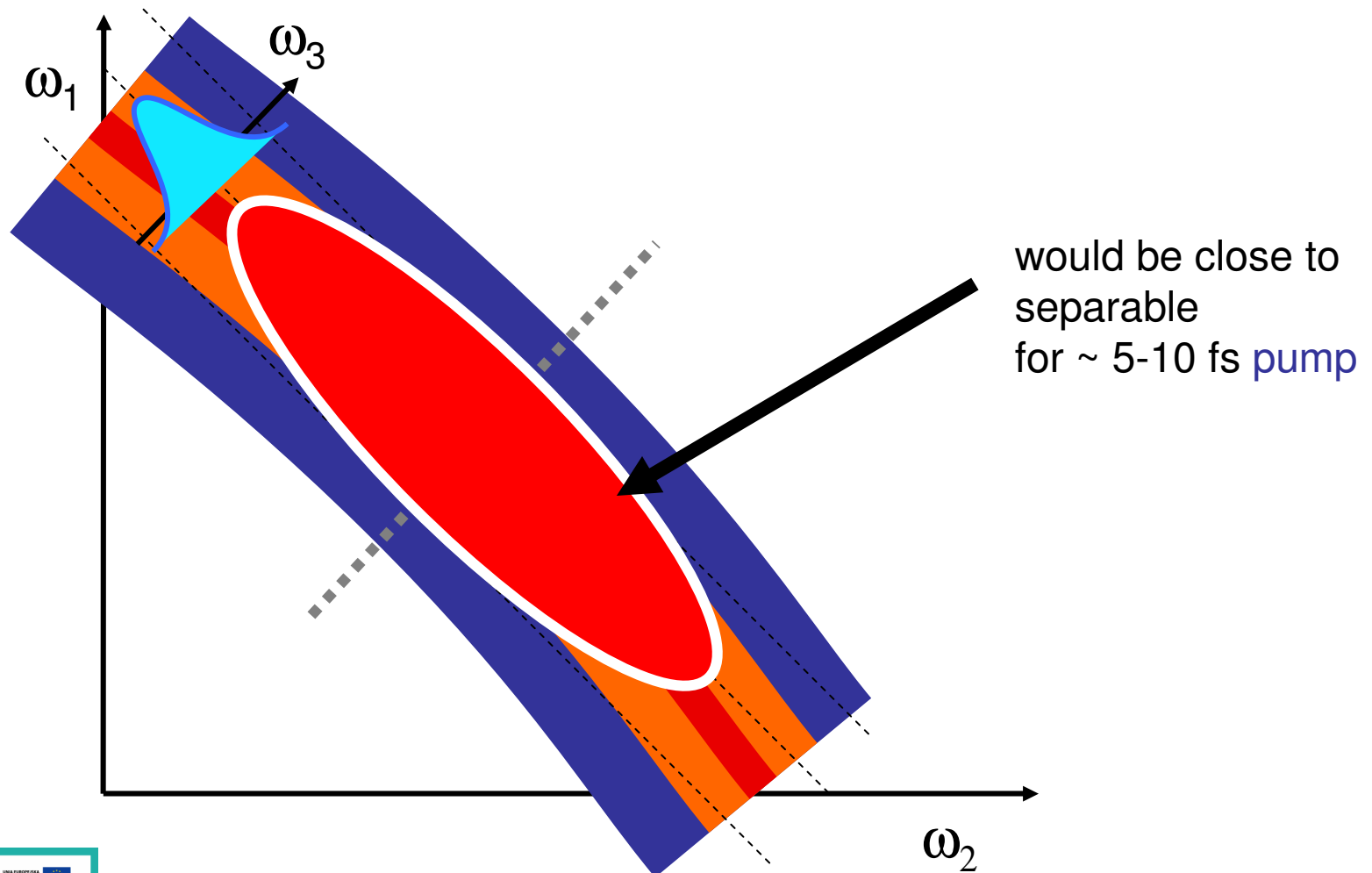
Biphoton wavefunction



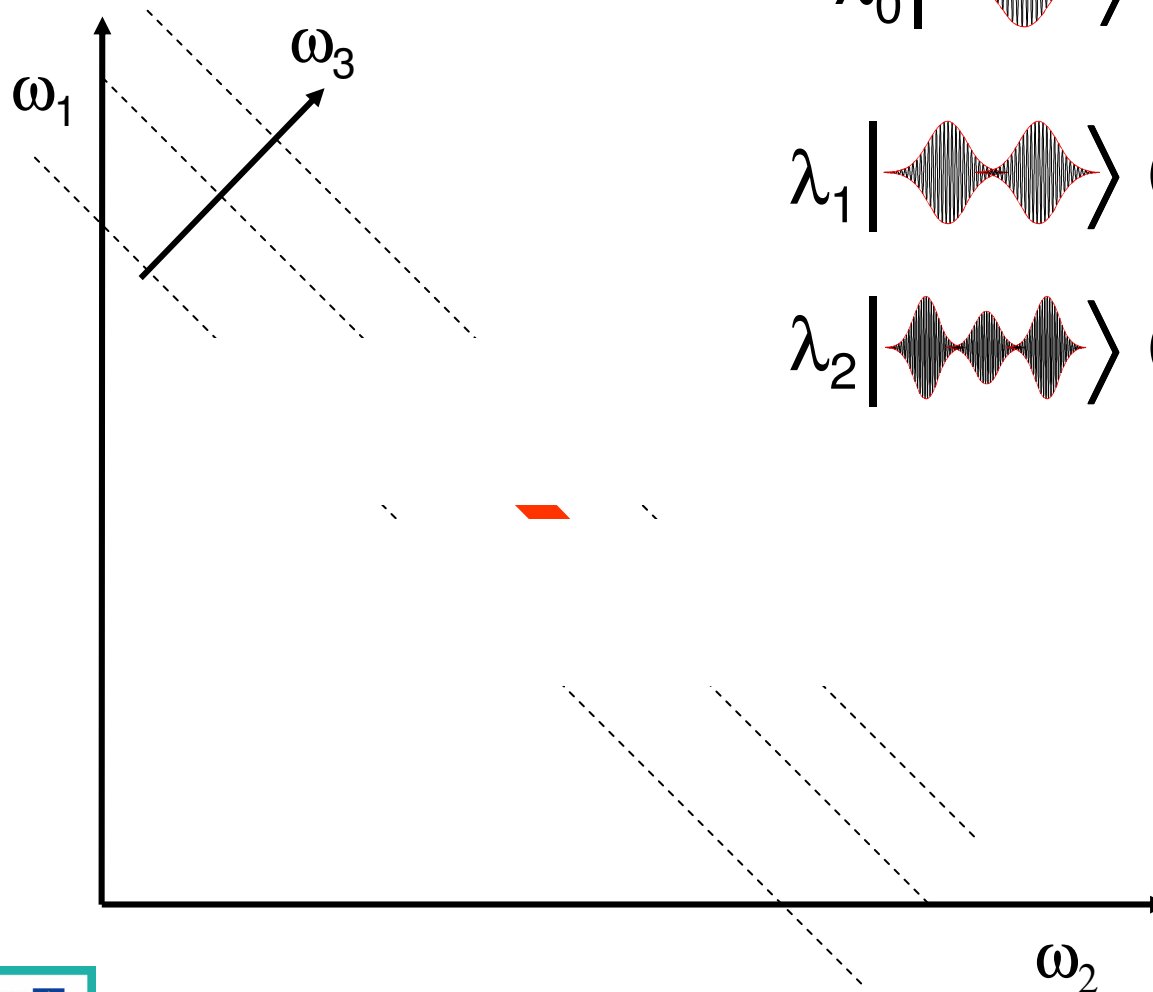
Propagation picture



Biphoton wavefunction



Filtering

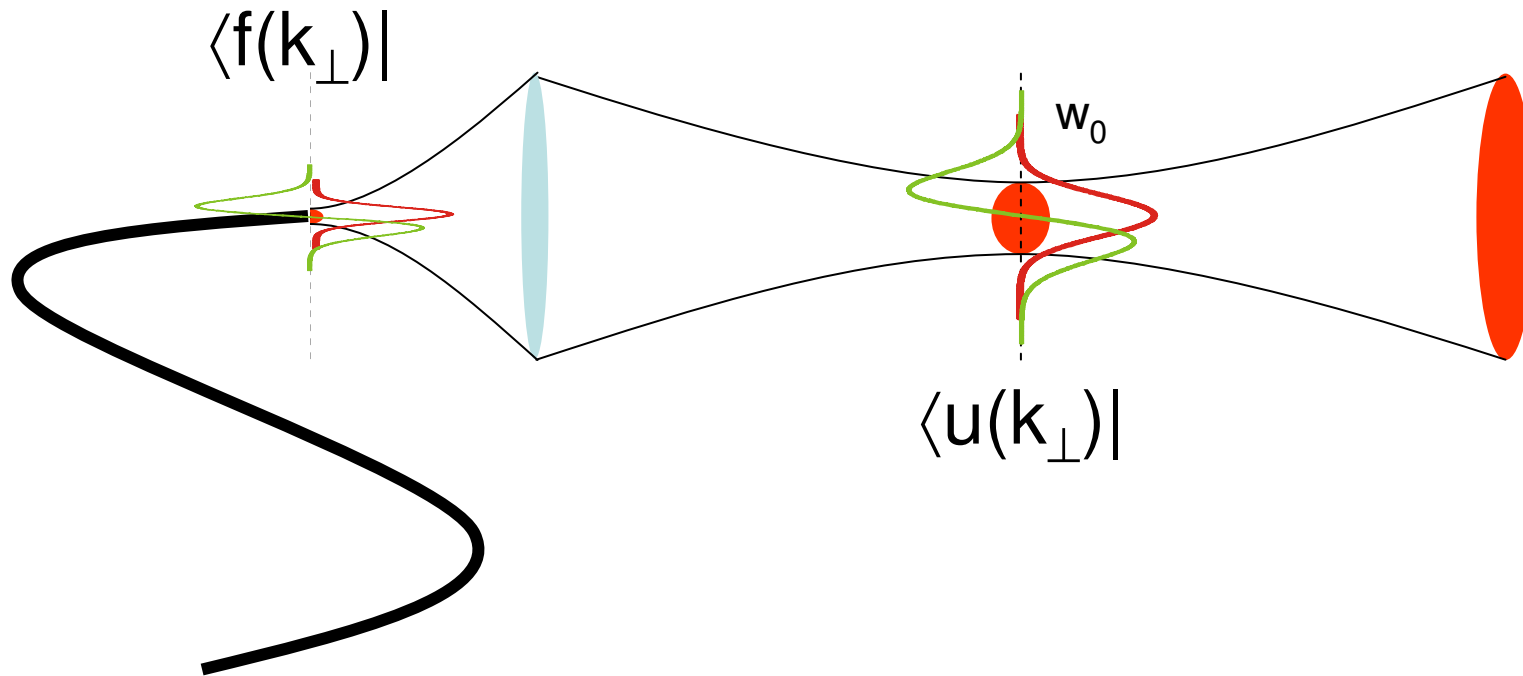


$$\lambda_0 | \text{waveform} \rangle \otimes | \text{waveform} \rangle$$

$$\lambda_1 | \text{waveform} \rangle \otimes | \text{waveform} \rangle$$

$$\lambda_2 | \text{waveform} \rangle \otimes | \text{waveform} \rangle$$

Fiber coupling



Narodowe
Laboratorium
Technologii
Kwantowych



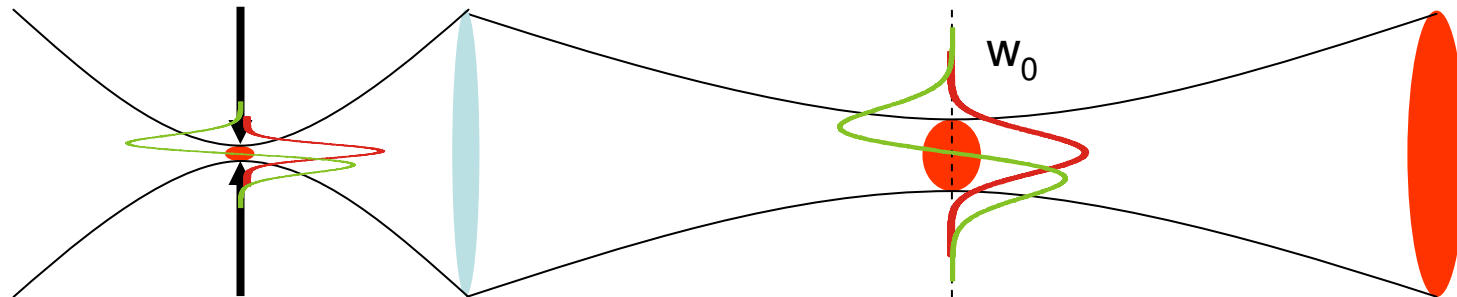
INNOWACYJNA GOSPODARKA
NARODOWA STRATEGIA SPÓJNOŚCI

UNIA EUROPEJSKA
EUROPEJSKI FUNDUSZ
ROZWOJU REGIONALNEGO



Projekt współfinansowany ze środków Europejskiego Funduszu Rozwoju Regionalnego w ramach Programu Operacyjnego Innowacyjna Gospodarka

Spatial filtering



Narodowe
Laboratorium
Technologii
Kwantowych



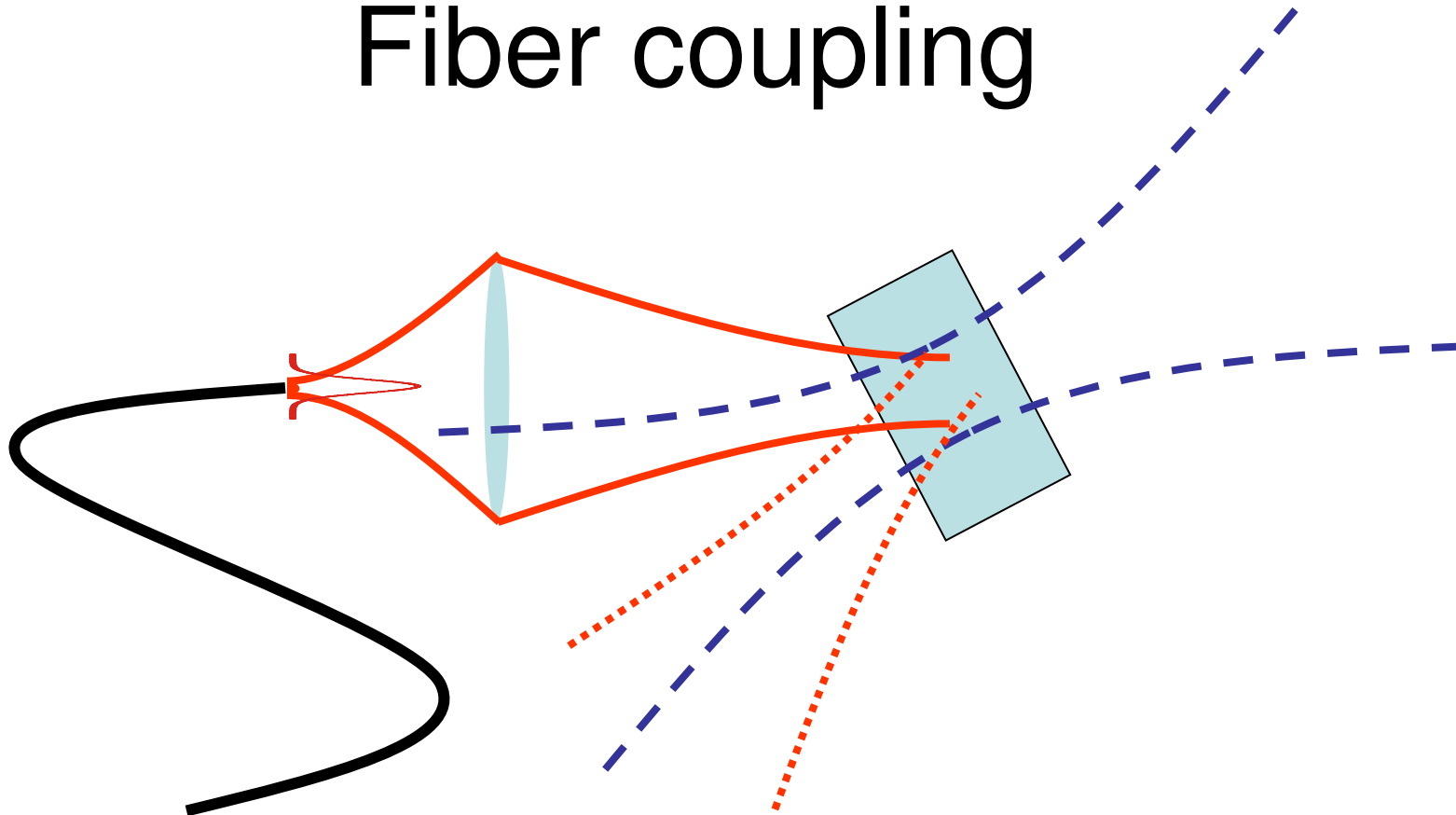
INNOWACYJNA GOSPODARKA
NARODOWA STRATEGIA SPÓJNOŚCI

UNIA EUROPEJSKA
EUROPEJSKI FUNDUSZ
ROZWOJU REGIONALNEGO



Projekt współfinansowany ze środków Europejskiego Funduszu Rozwoju Regionalnego w ramach Programu Operacyjnego Innowacyjna Gospodarka

Fiber coupling



Narodowe
Laboratorium
Technologii
Kwantowych

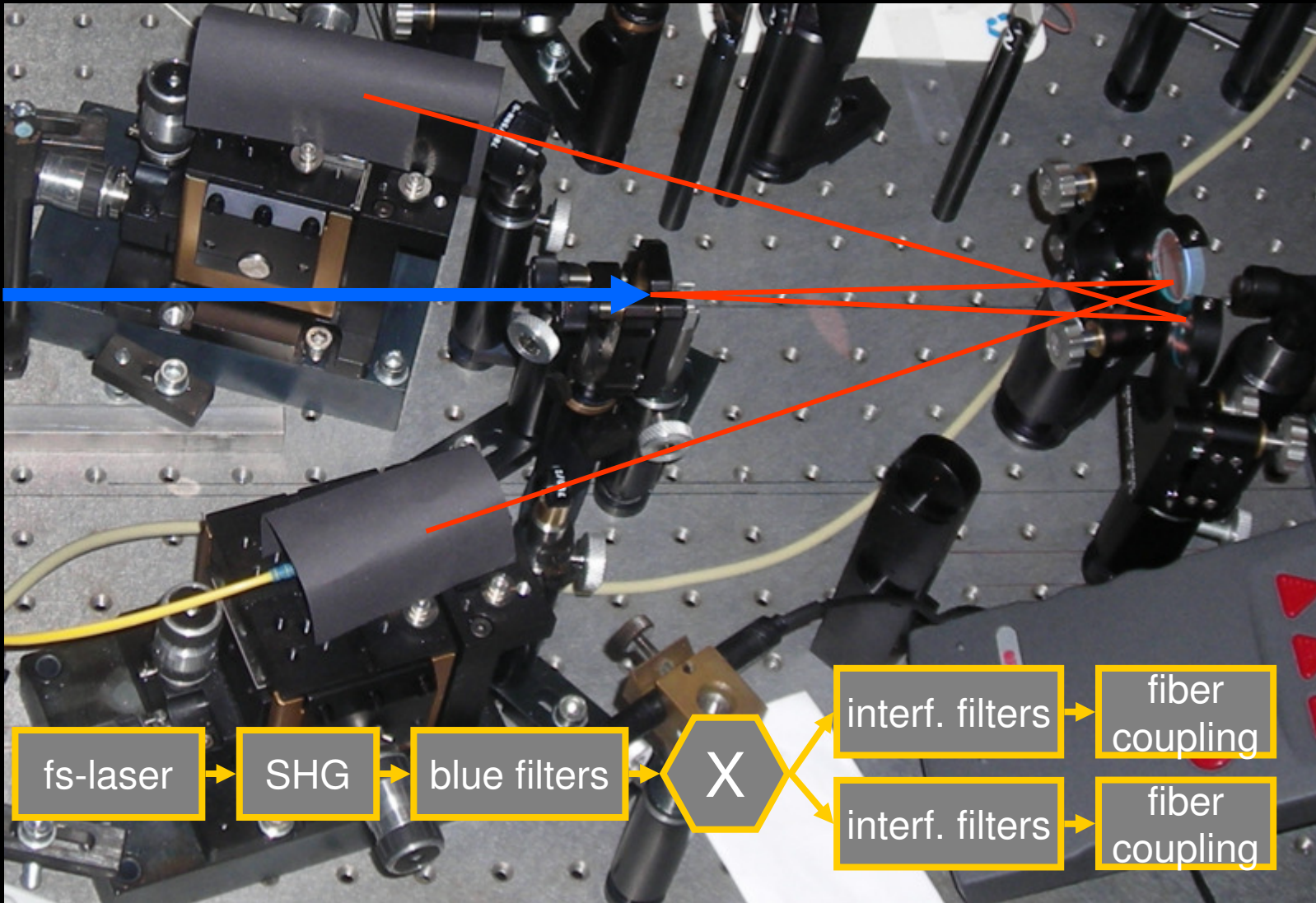


INNOWACYJNA GOSPODARKA
NARODOWA STRATEGIA SPÓJNOŚCI

UNIA EUROPEJSKA
EUROPEJSKI FUNDUSZ
ROZWOJU REGIONALNEGO



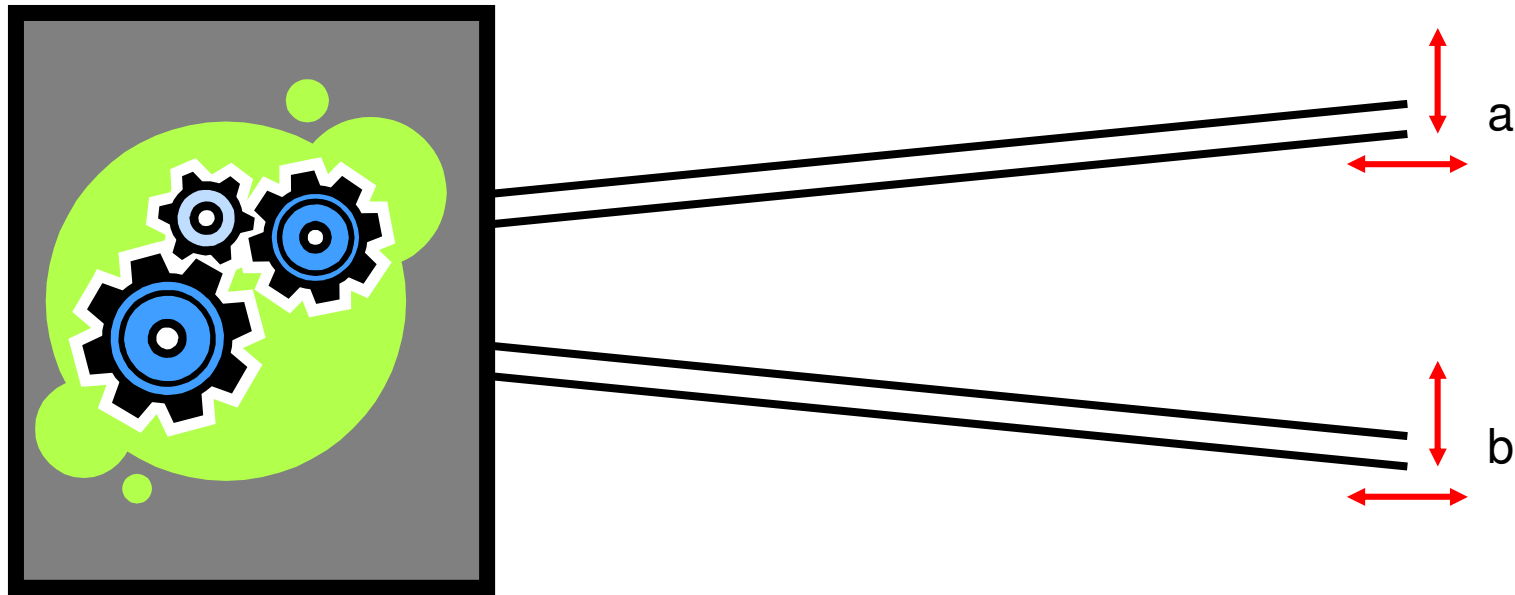
Projekt współfinansowany ze środków Europejskiego Funduszu Rozwoju Regionalnego w ramach Programu Operacyjnego Innowacyjna Gospodarka



SPDC

Entanglement

$$|10\rangle \otimes |10\rangle + |01\rangle \otimes |01\rangle$$



Narodowe
Laboratorium
Technologii
Kwantowych



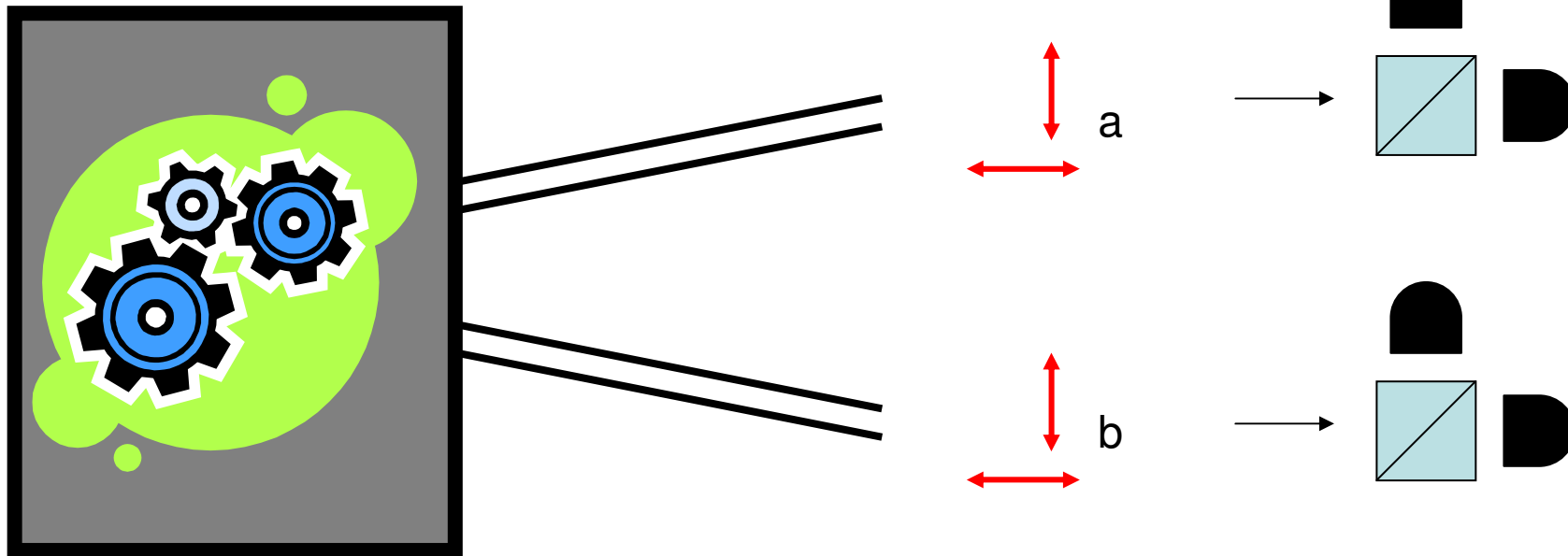
INNOWACYJNA GOSPODARKA
NARODOWA STRATEGIA SPÓJNOŚCI

UNIA EUROPEJSKA
EUROPEJSKI FUNDUSZ
ROZWOJU REGIONALNEGO



Projekt współfinansowany ze środków Europejskiego Funduszu Rozwoju Regionalnego w ramach Programu Operacyjnego Innowacyjna Gospodarka

Entanglement



Narodowe
Laboratorium
Technologii
Kwantowych



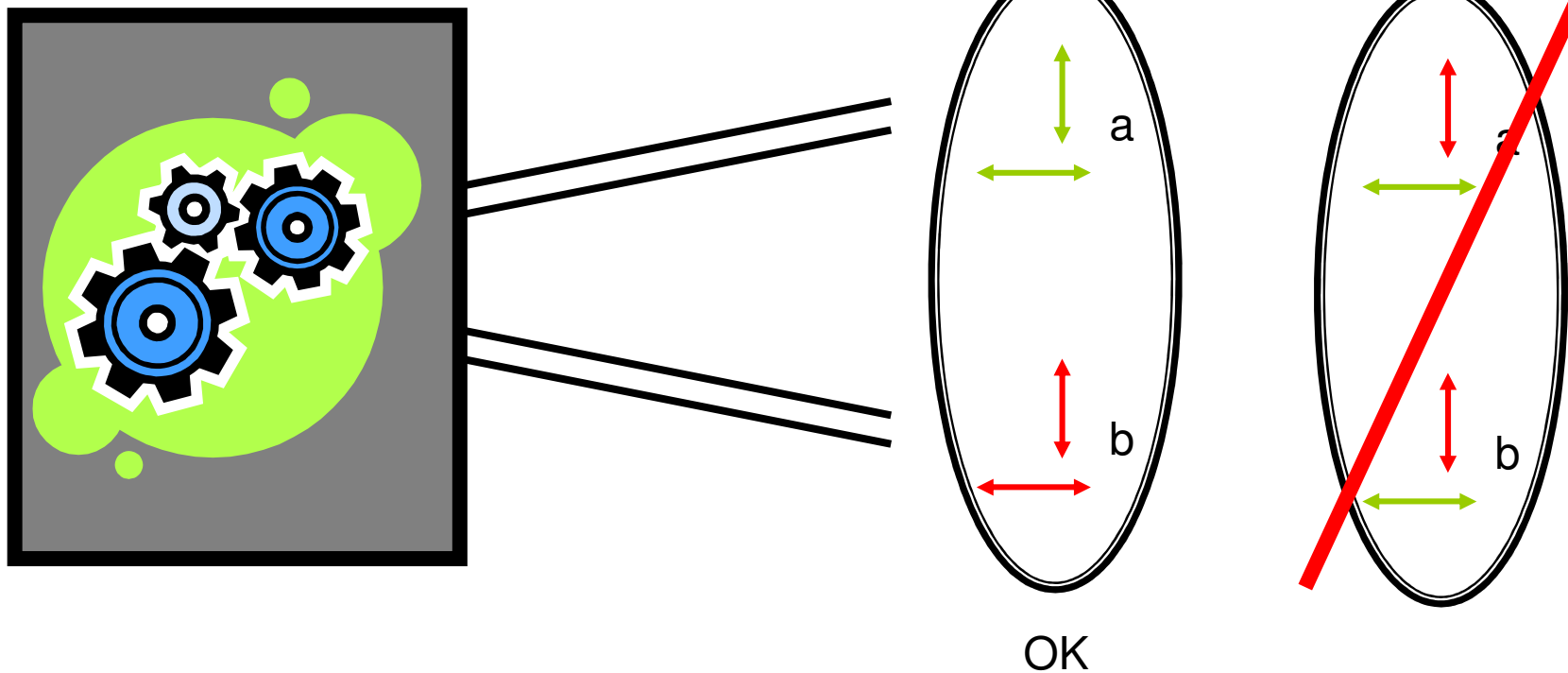
INNOWACYJNA GOSPODARKA
NARODOWA STRATEGIA SPÓJNOŚCI

UNIA EUROPEJSKA
EUROPEJSKI FUNDUSZ
ROZWOJU REGIONALNEGO



Projekt współfinansowany ze środków Europejskiego Funduszu Rozwoju Regionalnego w ramach Programu Operacyjnego Innowacyjna Gospodarka

Entanglement



Narodowe
Laboratorium
Technologii
Kwantowych



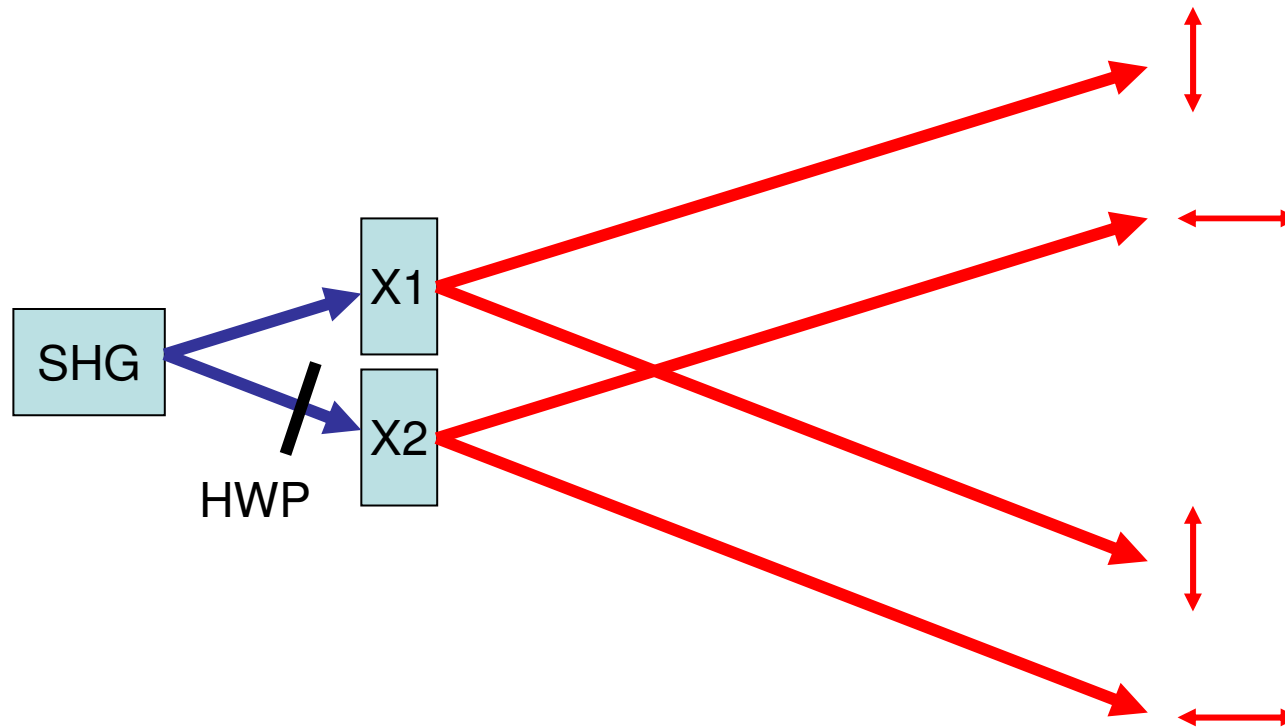
INNOWACYJNA GOSPODARKA
NARODOWA STRATEGIA SPÓJNOŚCI

UNIA EUROPEJSKA
EUROPEJSKI FUNDUSZ
ROZWOJU REGIONALNEGO



Projekt współfinansowany ze środków Europejskiego Funduszu Rozwoju Regionalnego w ramach Programu Operacyjnego Innowacyjna Gospodarka

Interferometric configuration



Narodowe
Laboratorium
Technologii
Kwantowych



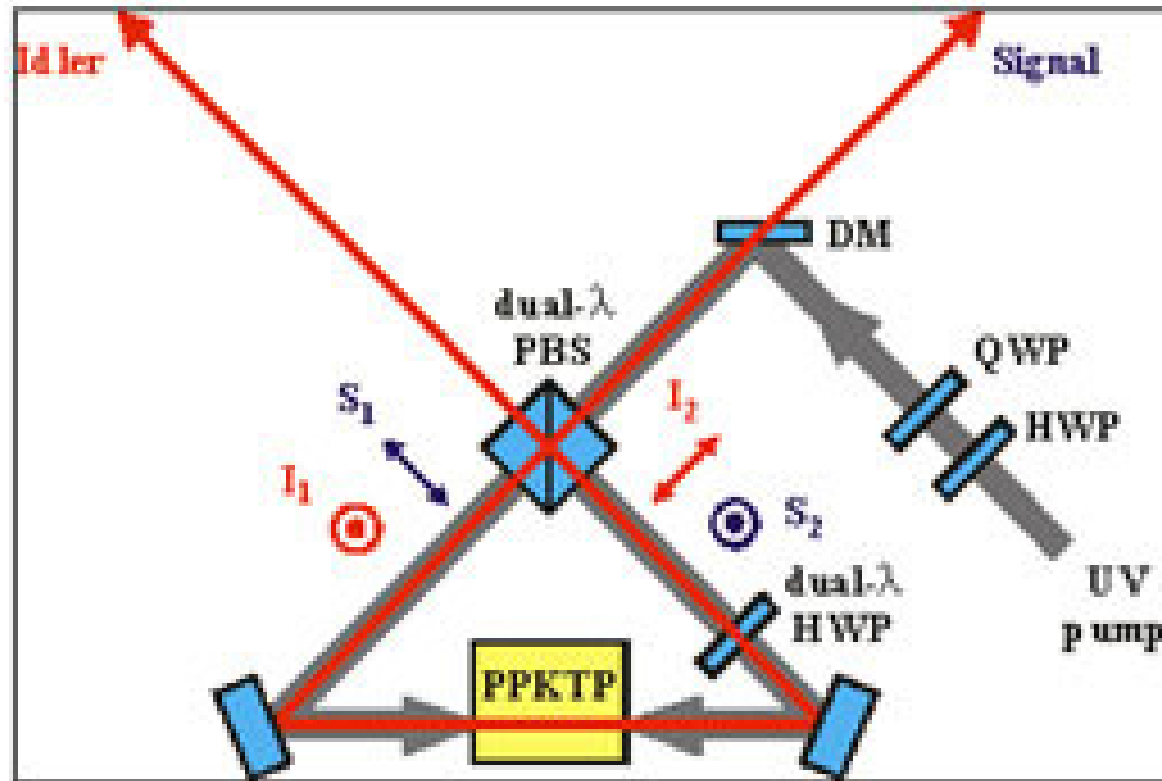
INNOWACYJNA GOSPODARKA
NARODOWA STRATEGIA SPÓJNOŚCI

UNIA EUROPEJSKA
EUROPEJSKI FUNDUSZ
ROZWOJU REGIONALNEGO



Projekt współfinansowany ze środków Europejskiego Funduszu Rozwoju Regionalnego w ramach Programu Operacyjnego Innowacyjna Gospodarka

Sagnac interferometer



www.rle.mit.edu/qoptics/research.htm



Narodowe
Laboratorium
Technologii
Kwantowych



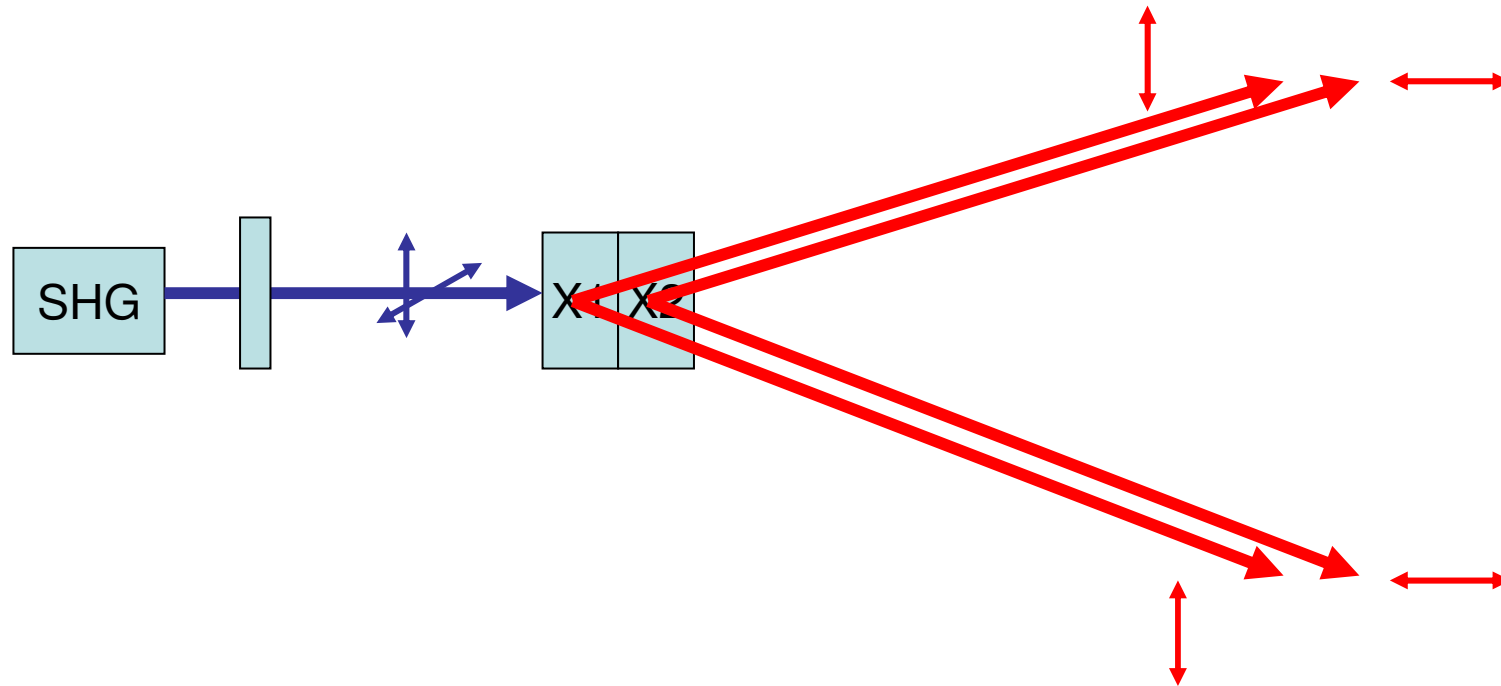
INNOWACYJNA GOSPODARKA
NARODOWA STRATEGIA SPÓJNOŚCI

UNIA EUROPEJSKA
EUROPEJSKI FUNDUSZ
ROZWOJU REGIONALNEGO



Projekt współfinansowany ze środków Europejskiego Funduszu Rozwoju Regionalnego w ramach Programu Operacyjnego Innowacyjna Gospodarka

Two type I crystals



Narodowe
Laboratorium
Technologii
Kwantowych



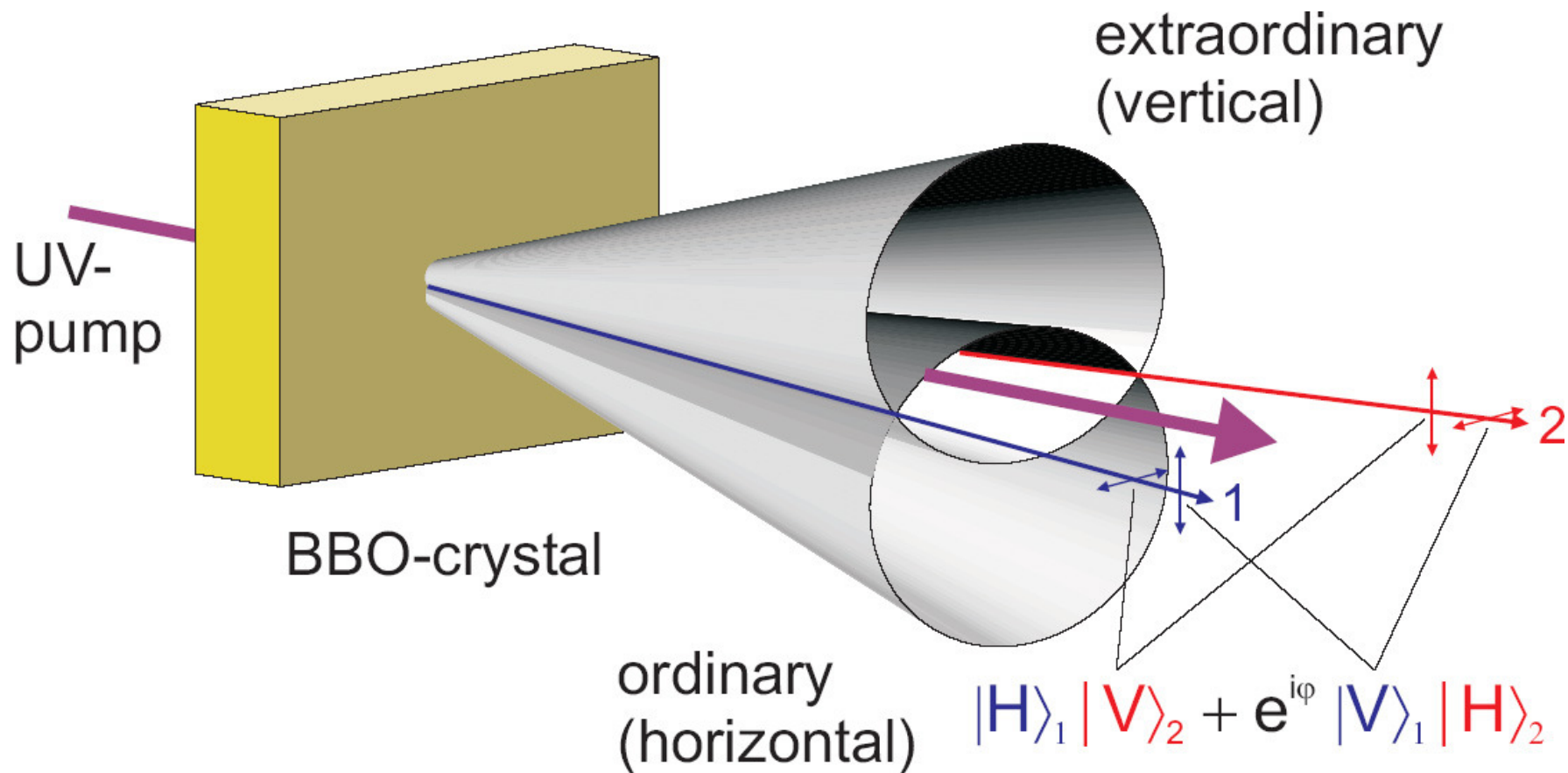
INNOWACYJNA GOSPODARKA
NARODOWA STRATEGIA SPÓJNOŚCI

UNIA EUROPEJSKA
EUROPEJSKI FUNDUSZ
ROZWOJU REGIONALNEGO



Projekt współfinansowany ze środków Europejskiego Funduszu Rozwoju Regionalnego w ramach Programu Operacyjnego Innowacyjna Gospodarka

Type II crystal



DOI: 10.1117/2.1200803.1072



Narodowe
Laboratorium
Technologii
Kwantowych



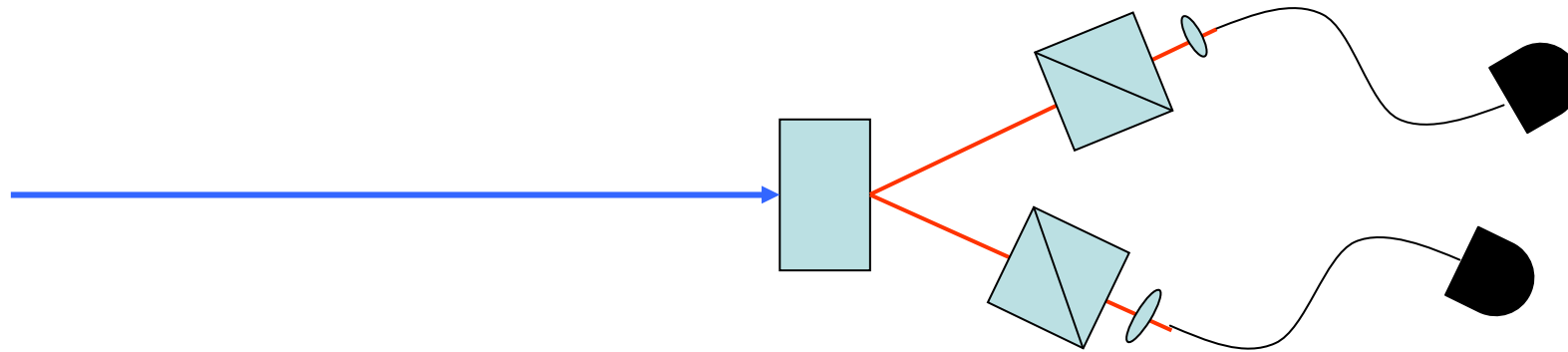
INNOWACYJNA GOSPODARKA
NARODOWA STRATEGIA SPÓJNOŚCI

UNIA EUROPEJSKA
EUROPEJSKI FUNDUSZ
ROZWOJU REGIONALNEGO

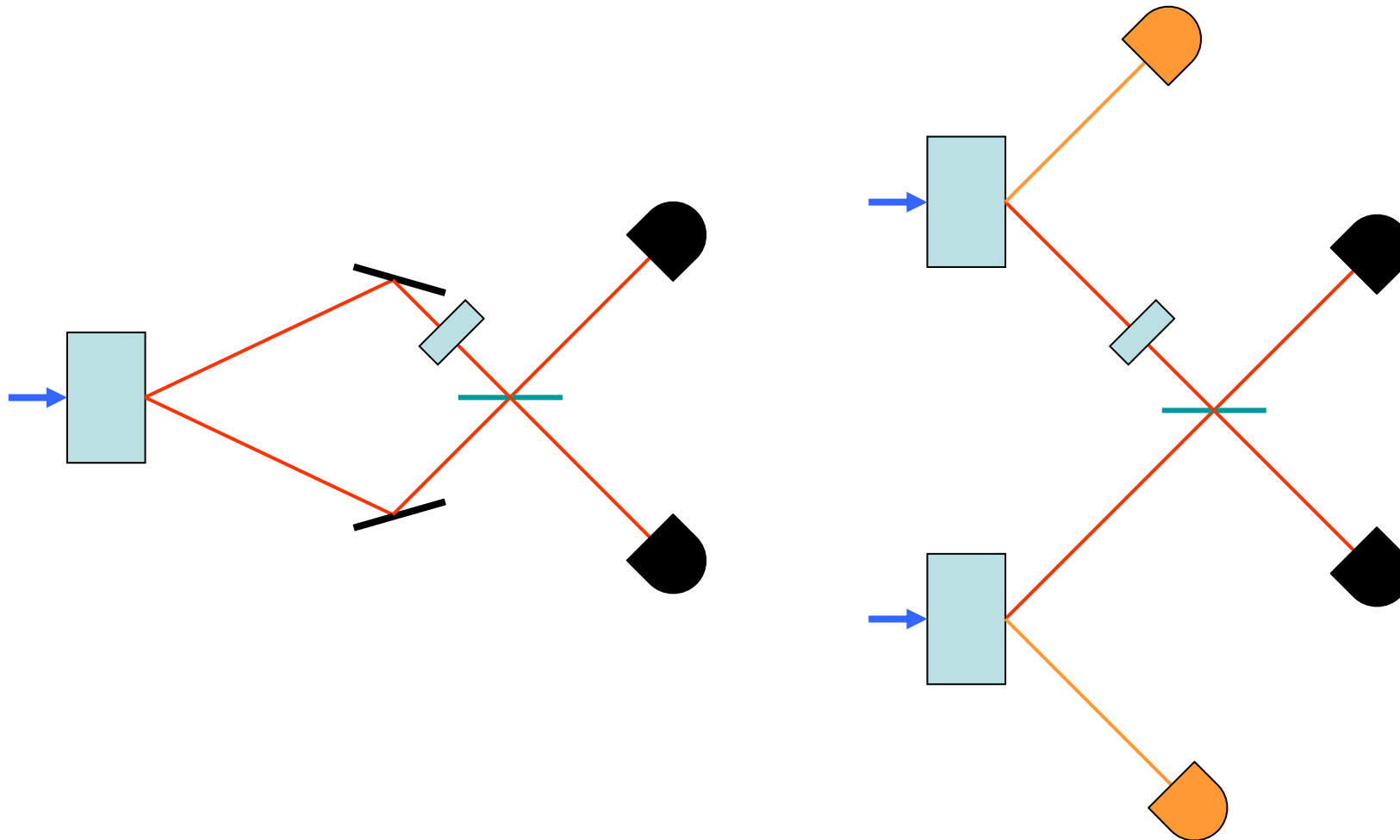


Projekt współfinansowany ze środków Europejskiego Funduszu Rozwoju Regionalnego w ramach Programu Operacyjnego Innowacyjna Gospodarka

Be aware of the fibers



Applications we have in mind



Narodowe
Laboratorium
Technologii
Kwantowych



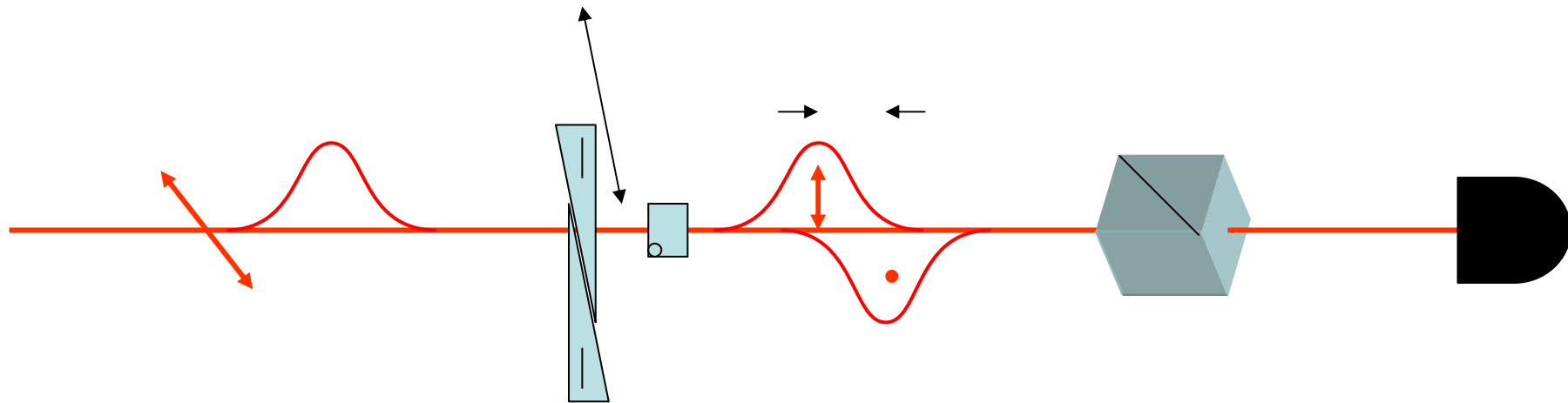
INNOWACYJNA GOSPODARKA
NARODOWA STRATEGIA SPÓJNOŚCI

UNIA EUROPEJSKA
EUROPEJSKI FUNDUSZ
ROZWOJU REGIONALNEGO



Projekt współfinansowany ze środków Europejskiego Funduszu Rozwoju Regionalnego w ramach Programu Operacyjnego Innowacyjna Gospodarka

Experimental realisation



Narodowe
Laboratorium
Technologii
Kwantowych



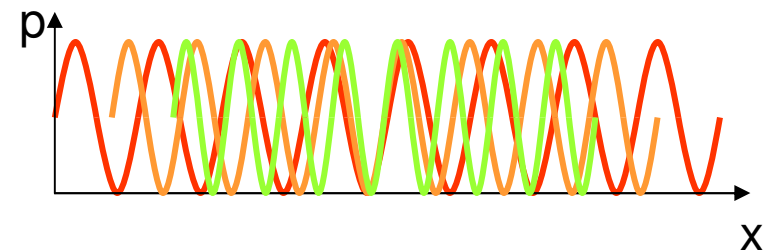
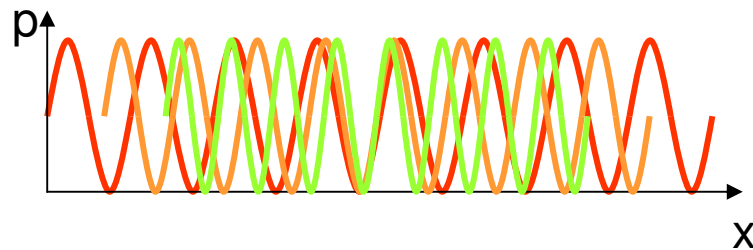
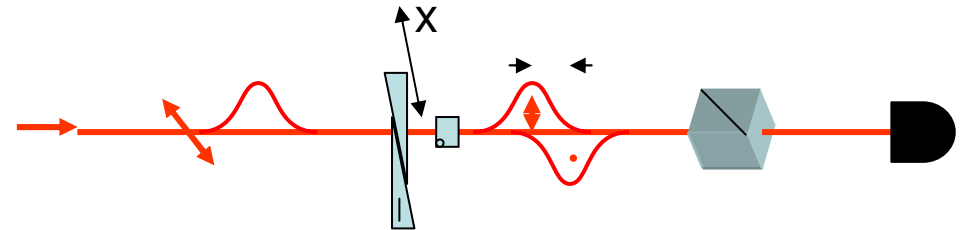
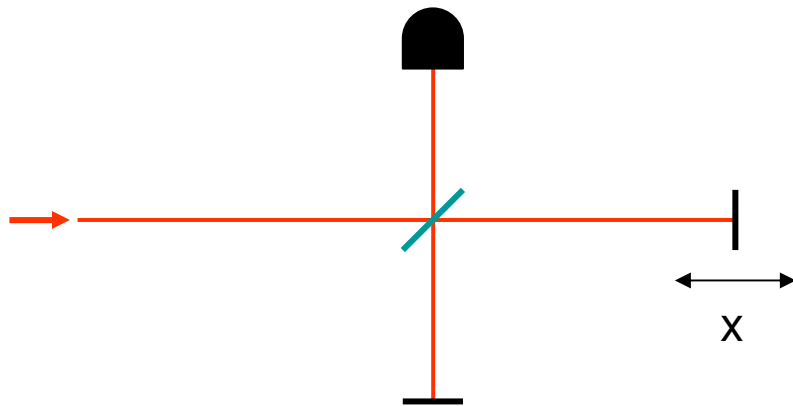
INNOWACYJNA GOSPODARKA
NARODOWA STRATEGIA SPÓJNOŚCI

UNIA EUROPEJSKA
EUROPEJSKI FUNDUSZ
ROZWOJU REGIONALNEGO



Projekt współfinansowany ze środków Europejskiego Funduszu Rozwoju Regionalnego w ramach Programu Operacyjnego Innowacyjna Gospodarka

How about material dispersion?

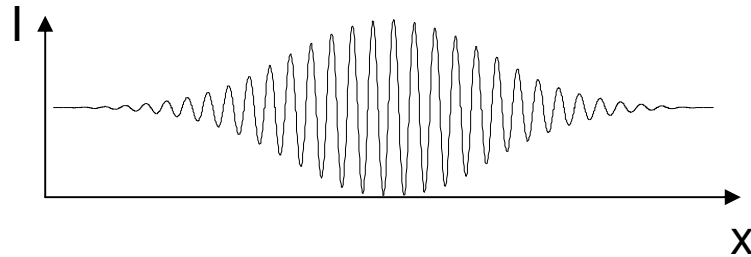


Narodowe Laboratorium Technologii Kwantowych ¹

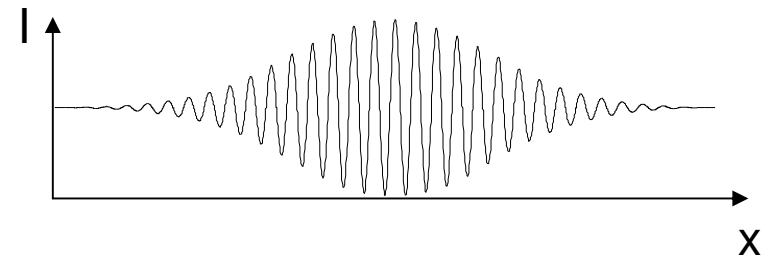


Projekt współfinansowany ze środków Europejskiego Funduszu Rozwoju Regionalnego w ramach Programu Operacyjnego Innowacyjna Gospodarka

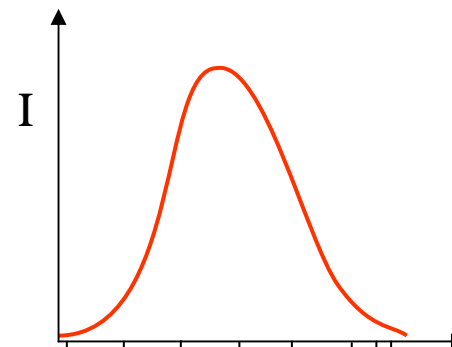
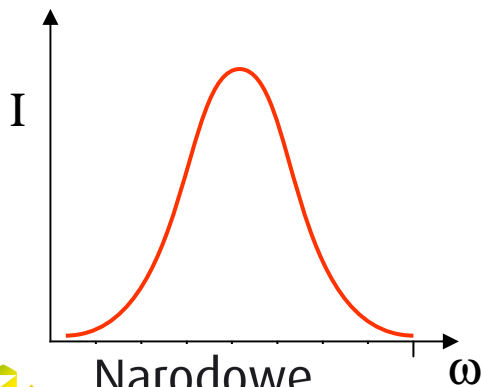
How about material dispersion?



$$I \sim \sum I(\omega) \cos(2\omega x/c) + 1$$



$$I \sim \sum I(\omega) \cos(2\Delta n \omega x/c) + 1$$



Narodowe
Laboratorium
Technologii
Kwantowych

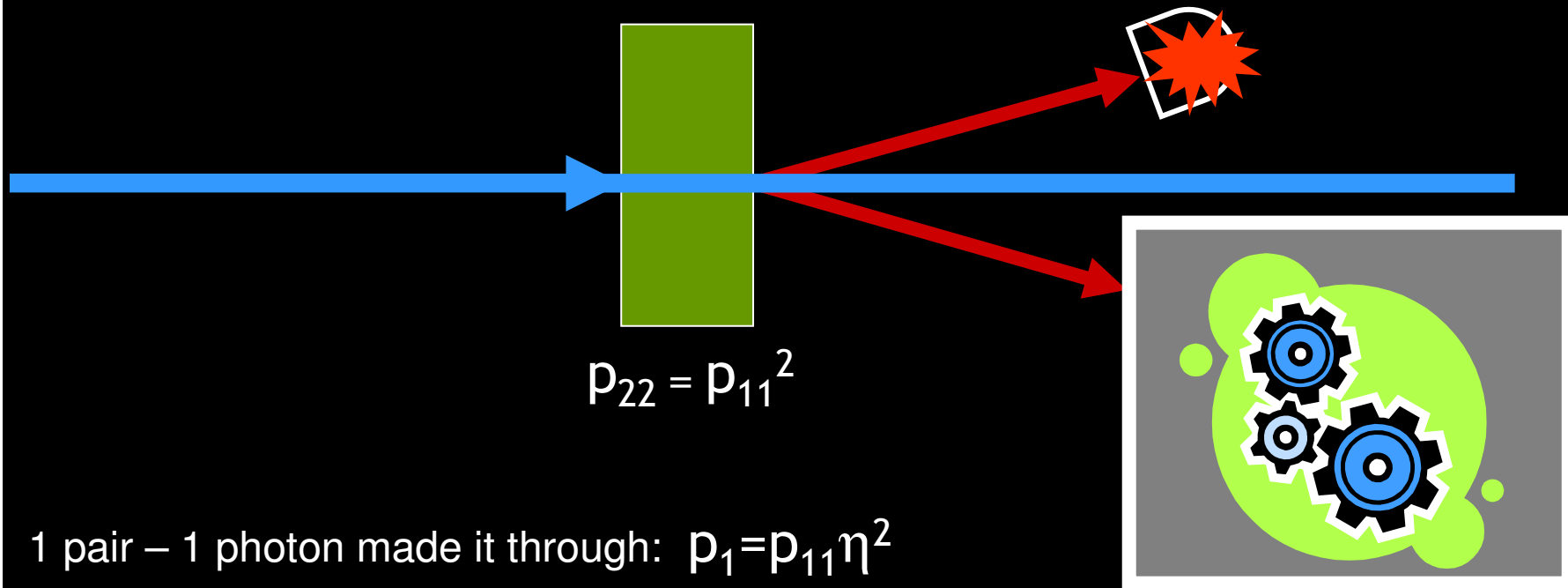


INNOWACYJNA GOSPODARKA
NARODOWA STRATEGIA SPÓJNOŚCI

UNIA EUROPEJSKA
EUROPEJSKI FUNDUSZ
ROZWOJU REGIONALNEGO



Projekt współfinansowany ze środków Europejskiego Funduszu Rozwoju Regionalnego w ramach Programu Operacyjnego Innowacyjna Gospodarka



$$p_{22} = p_{11}^2$$

1 pair – 1 photon made it through: $p_1 = p_{11} \eta^2$

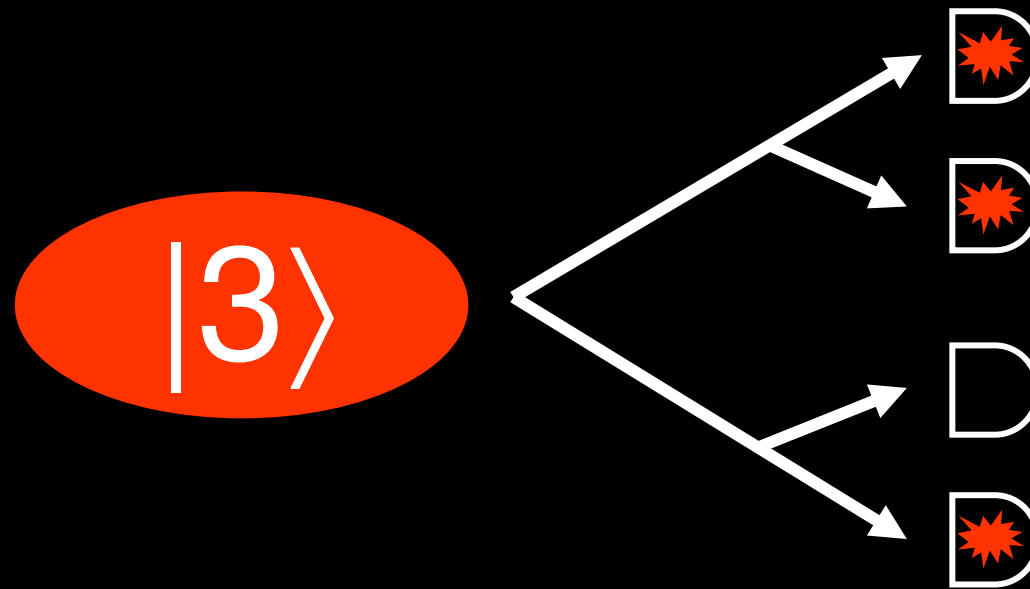
2 pairs – 1 photon observed: $p_1' = 4p_{11}^2 \eta^2$

$$p_1' \ll p_1$$

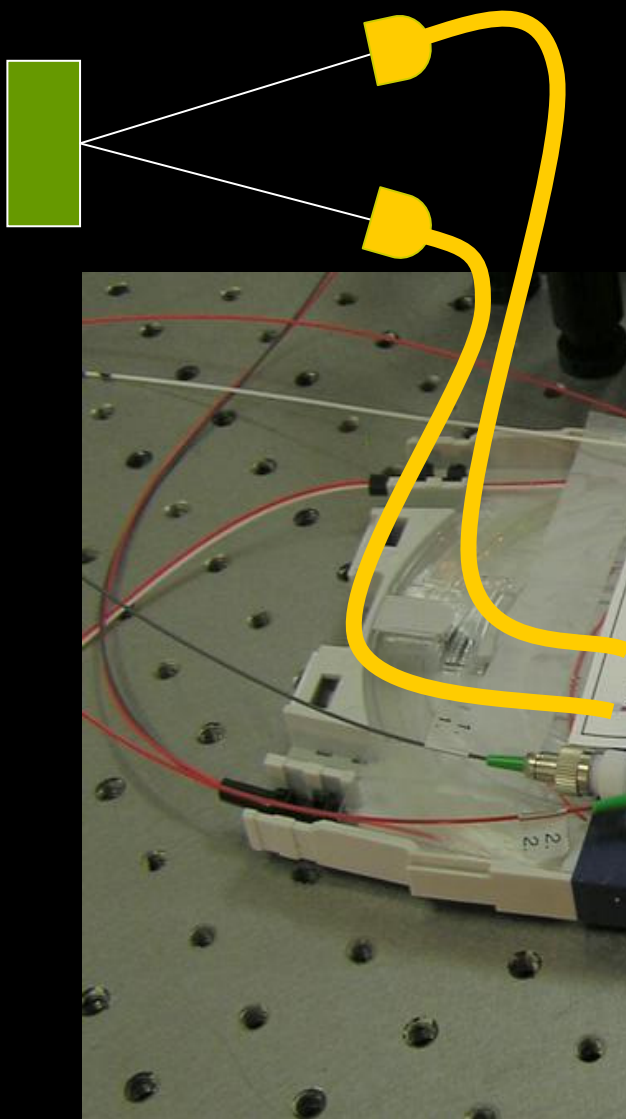
$$p_{11} \ll 1/2$$

$$p_1 \ll \eta^2/4 \\ \sim 10^{-3}$$

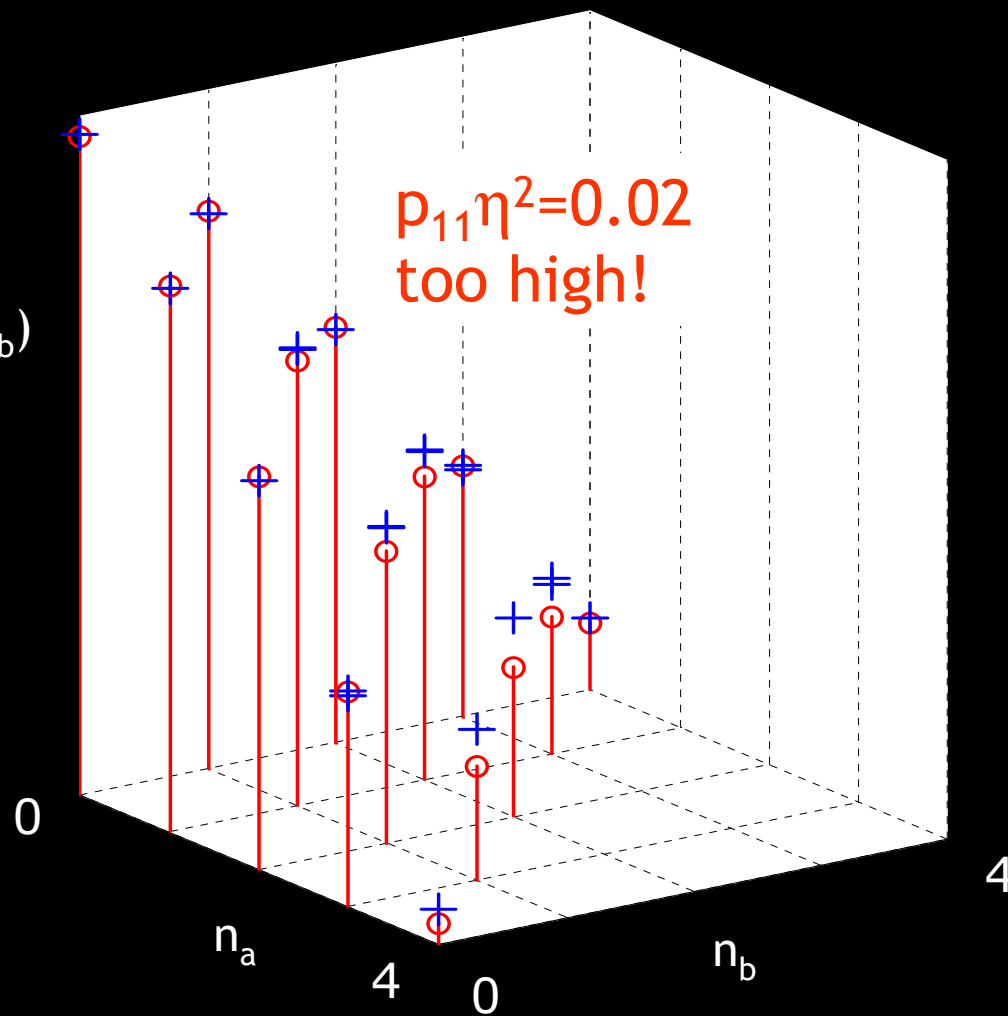
Pain of losing



Ultrafast statistics



$\log p(n_a, n_b)$



Count Statistics

Summary

- properties of photons generated in SPDC are given by phase matching and pump spectrum
- typically it is enough to know group velocities, walkoffs, and second order dispersion
- only indistinguishable photons interfere perfectly
- indistinguishability can be easily destroyed by improper handling
- losses limit applications of SPDC