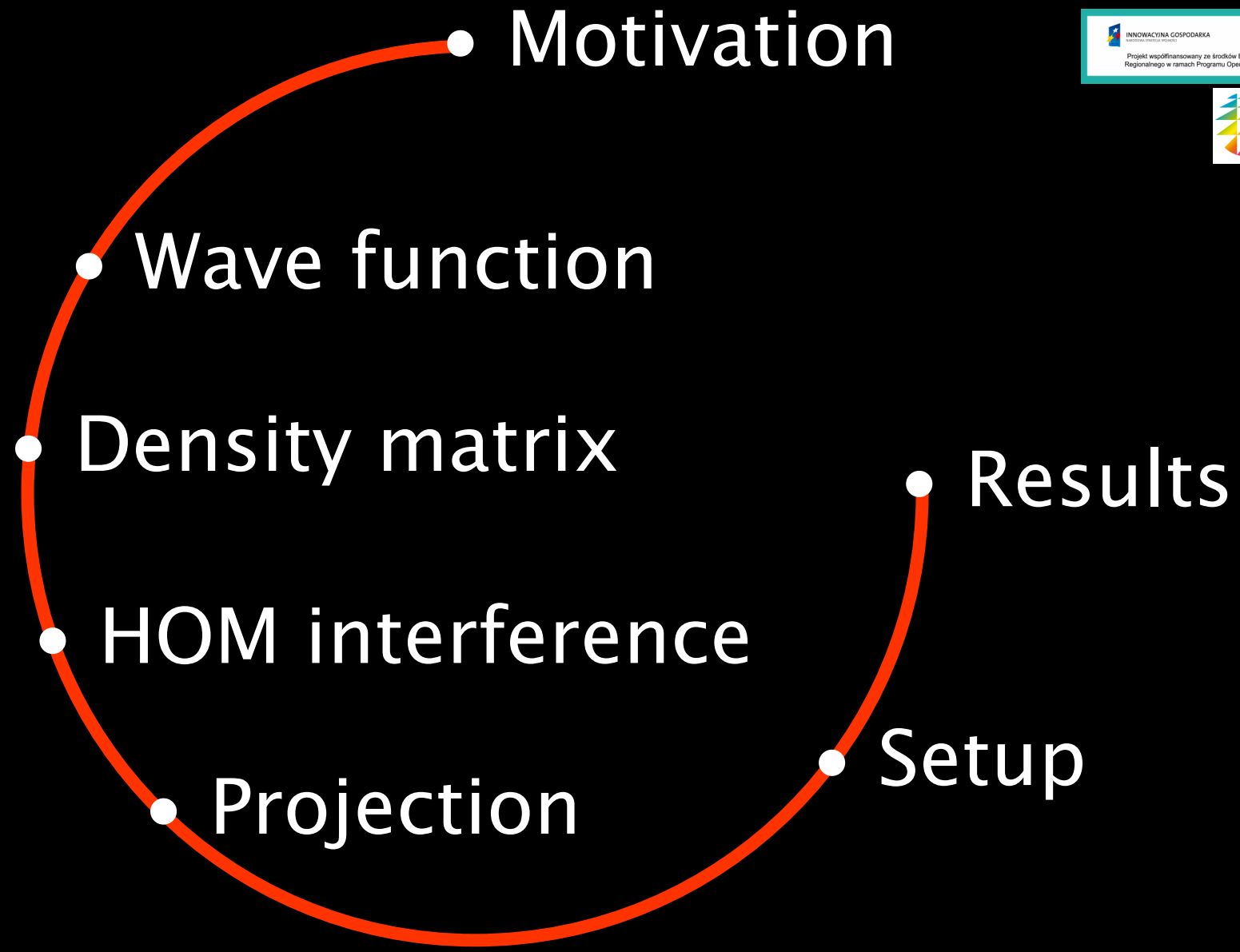
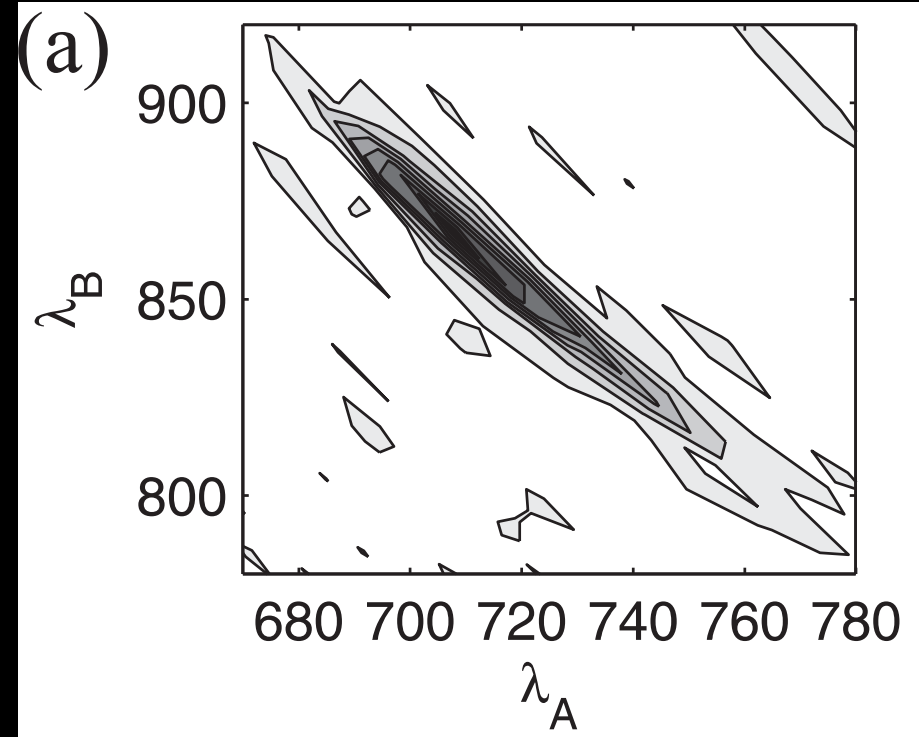
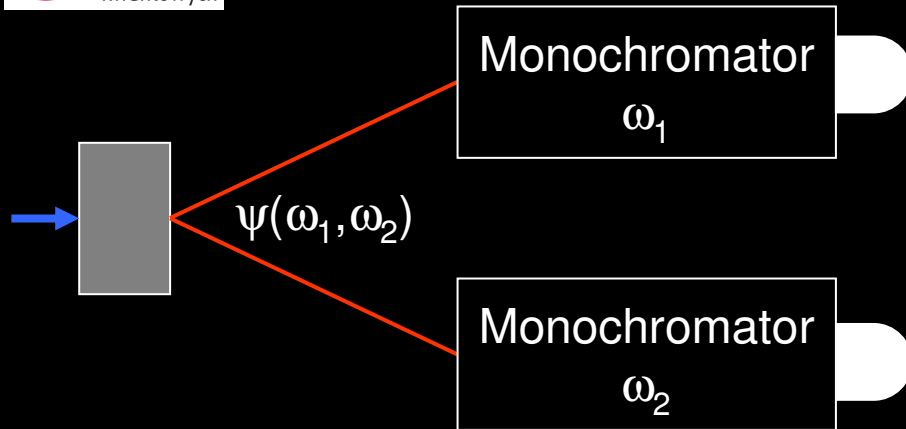




Spectral density matrix of a single photon measured



Agenda

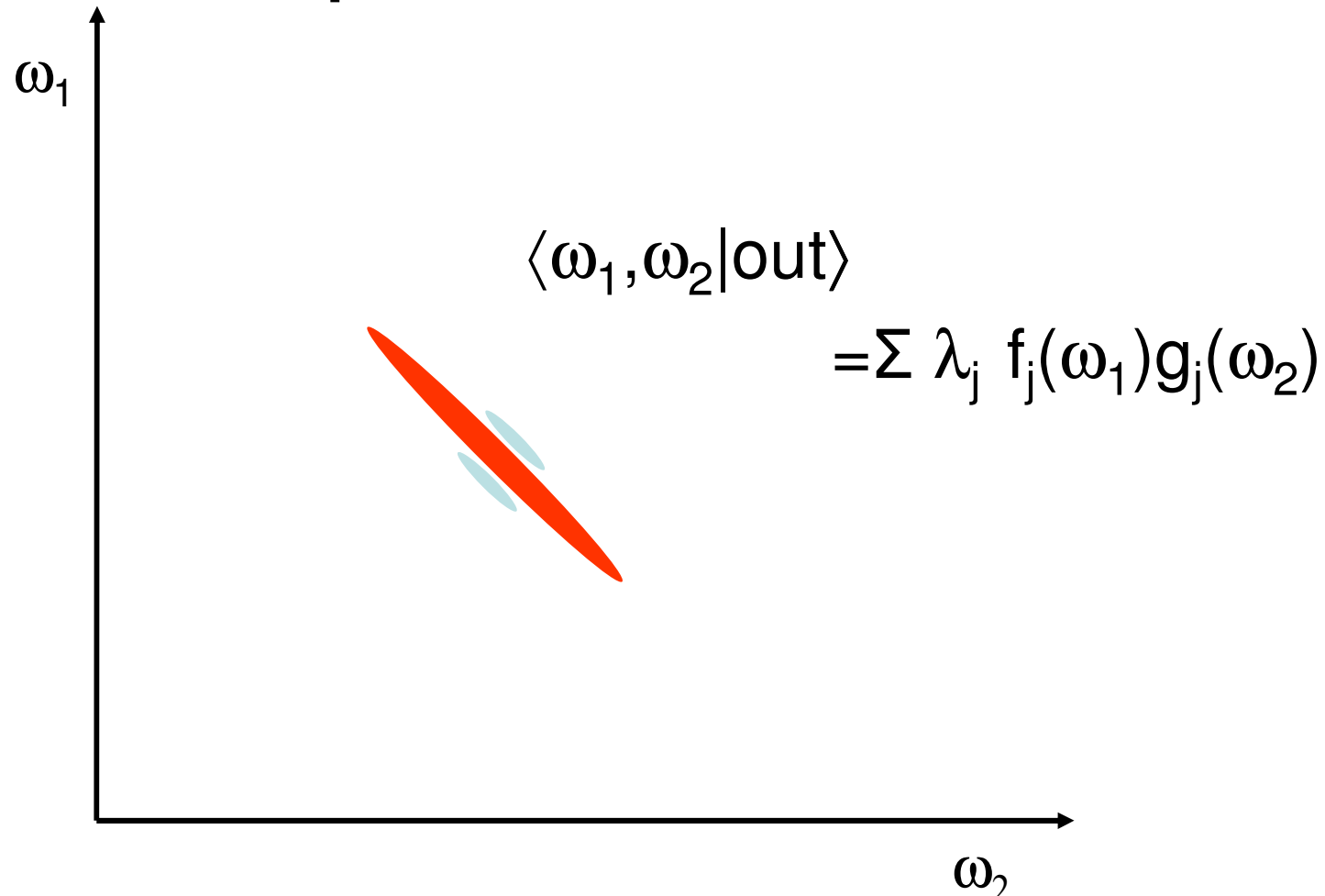


Y. Kim, W.P. Grice, Opt. Lett. **30**, 908, (2005)

WW, P. Wasylczyk, P. Kolenderski, K. Banaszek, C. Radzewicz,
Opt. Lett. **31**, 1130 (2006).

Yesterday

Biphoton wavefunction



Narodowe
Laboratorium
Technologii
Kwantowych



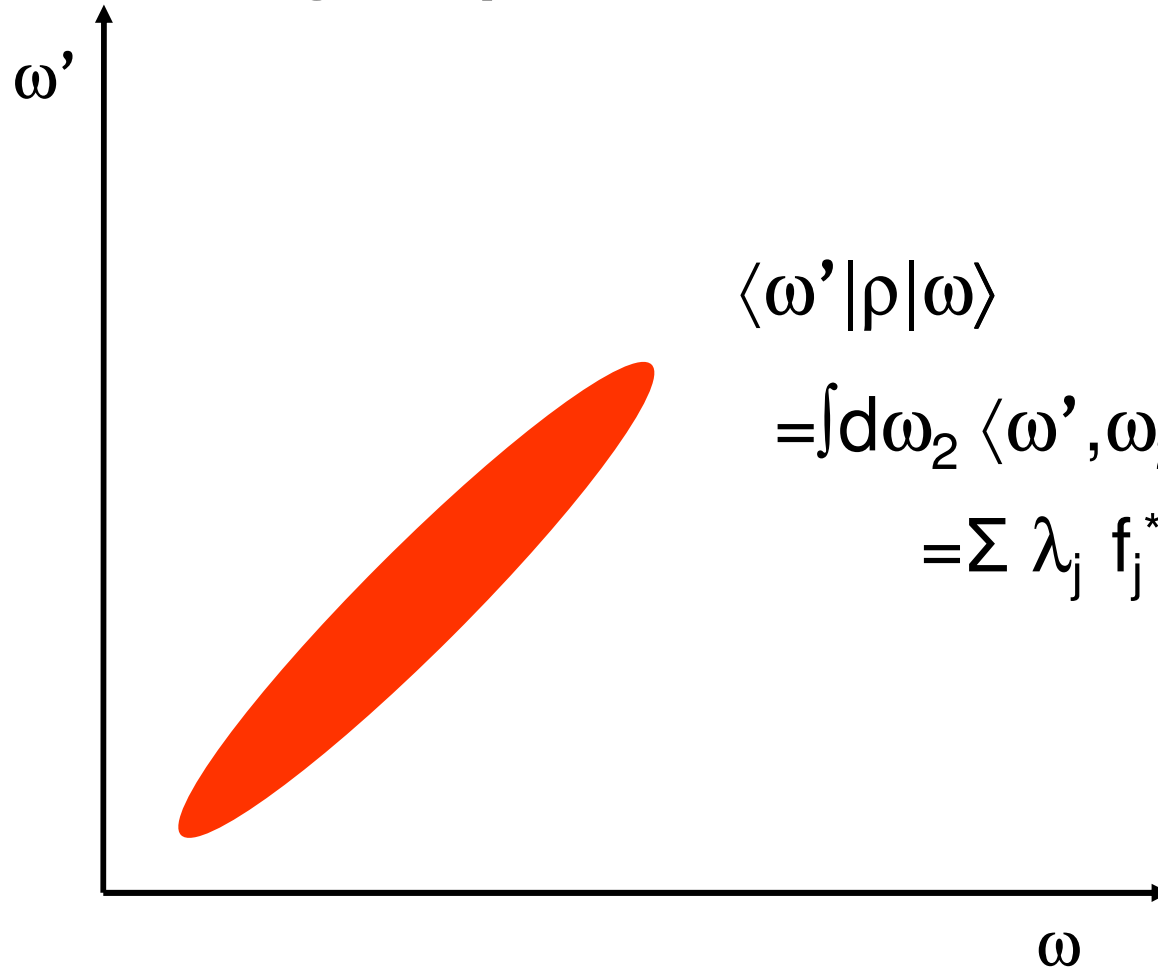
INNOWACYJNA GOSPODARKA
NARODOWA STRATEGIA SPÓJNOŚCI

UNIA EUROPEJSKA
EUROPEJSKI FUNDUSZ
ROZWOJU REGIONALNEGO



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

Single photon density matrix



$$\langle \omega' | \rho | \omega \rangle$$

$$= \int d\omega_2 \langle \omega', \omega_2 | \text{out} \rangle \langle \text{out} | \omega, \omega_2 \rangle$$

$$= \sum \lambda_j f_j^*(\omega') f_j(\omega)$$



Narodowe
Laboratorium
Technologii
Kwantowych



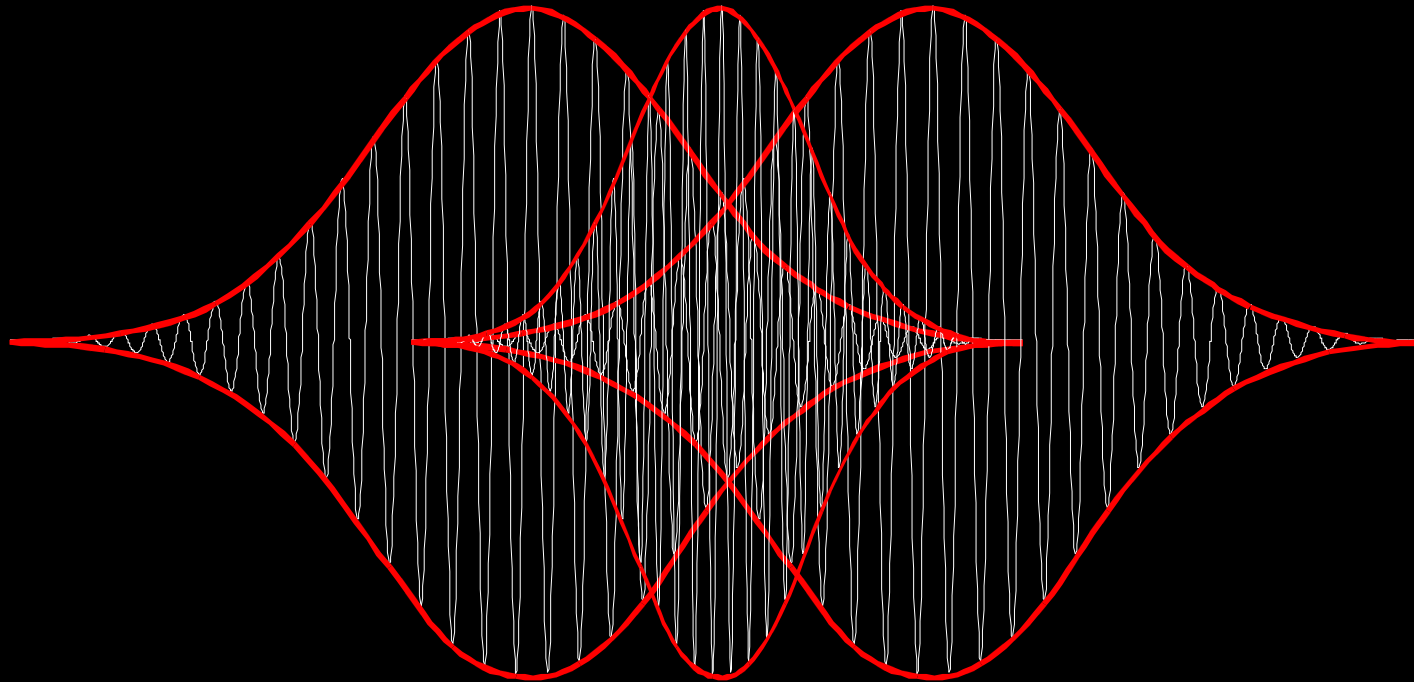
INNOWACYJNA GOSPODARKA
NARODOWA STRATEGIA SPÓJNOŚCI



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

$$|1\rangle = \sum c_k |1\rangle_k$$

$$\rho = \sum p_a |1_a\rangle\langle 1_a|$$



Narodowe
Laboratorium
Technologii
Kwantowych

INNOWACYJNA GOSPODARKA
INNOVATION ECONOMY

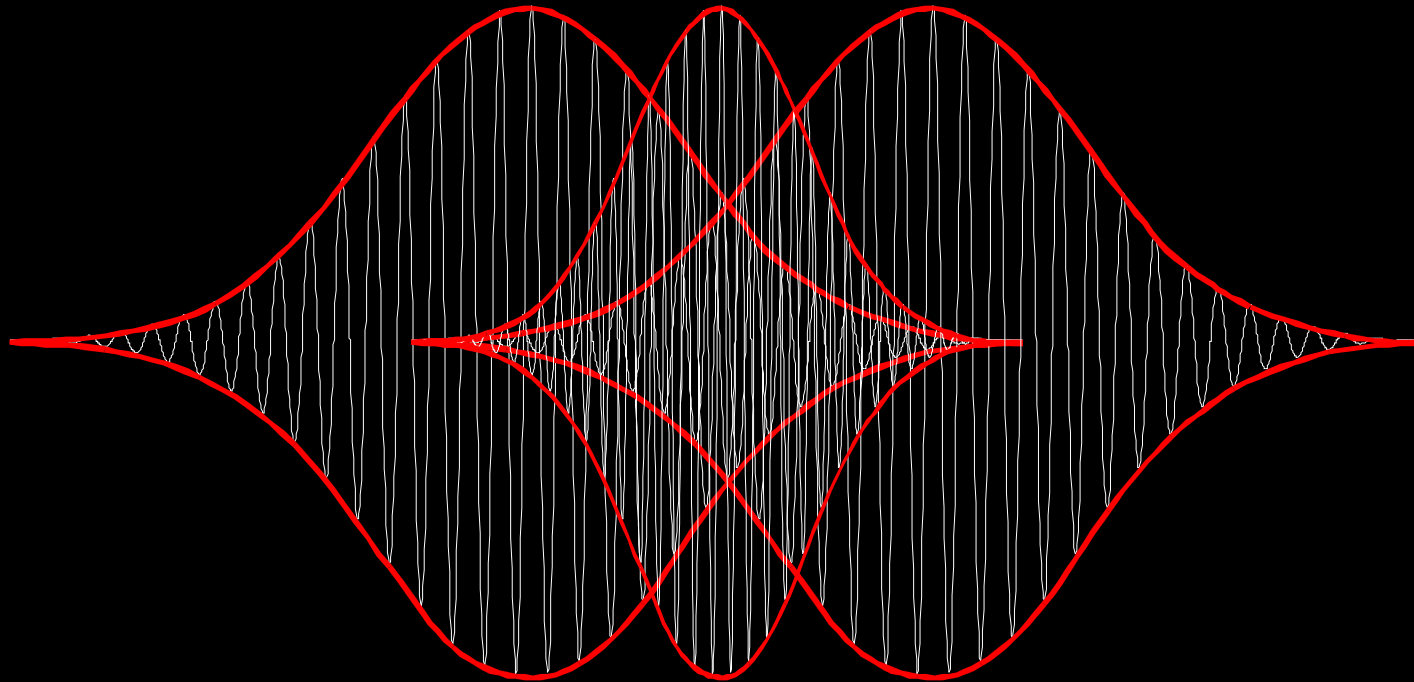
UNIA EUROPEJSKA
EUROPEAN UNION
ROZWÓJ REGIONALNY
REGIONAL DEVELOPMENT

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

Coherence?

$$|1\rangle = \sum c_k |1\rangle_k$$

$$\rho = \sum p_a |1_a\rangle\langle 1_a|$$



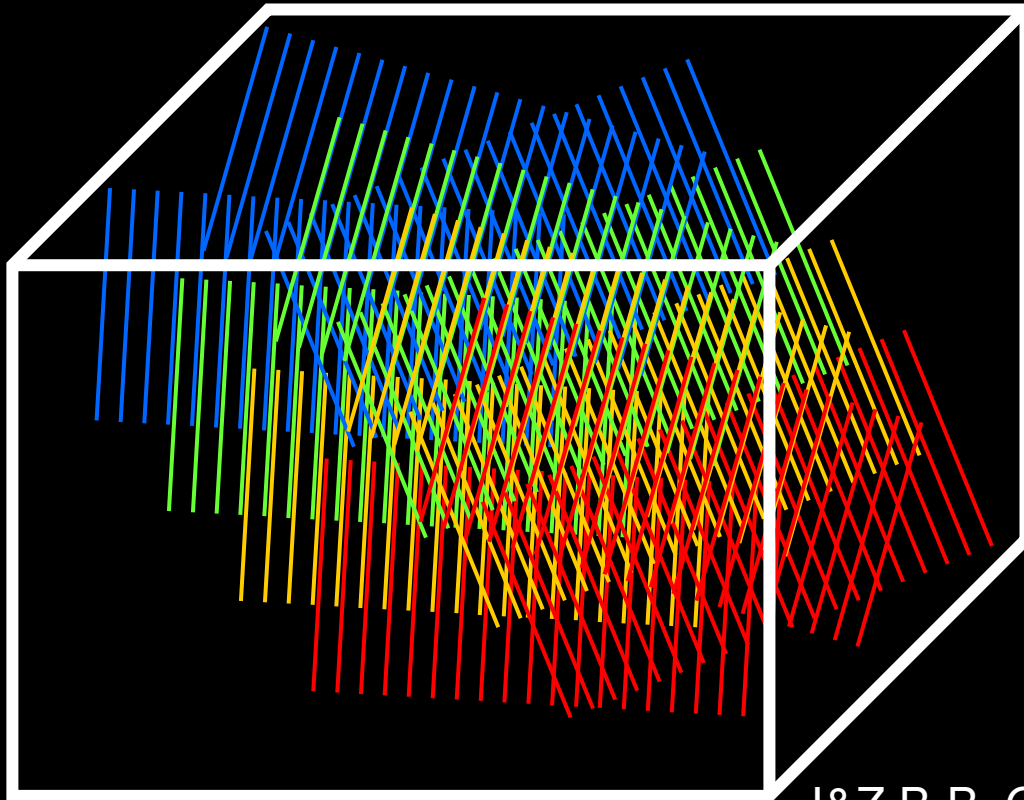
Coherence?

$$E(\mathbf{x},t) = \sum \mathbf{e}_k \exp(i\mathbf{k}\cdot\mathbf{x}) + \text{c.c.}$$

$$B(\mathbf{x},t) = \sum \mathbf{b}_k \dots$$

$$\dot{q} = p/m$$

$$\dot{p} = -m\omega^2 q$$



Narodowe
Laboratorium
Technologii
Kwantowych

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

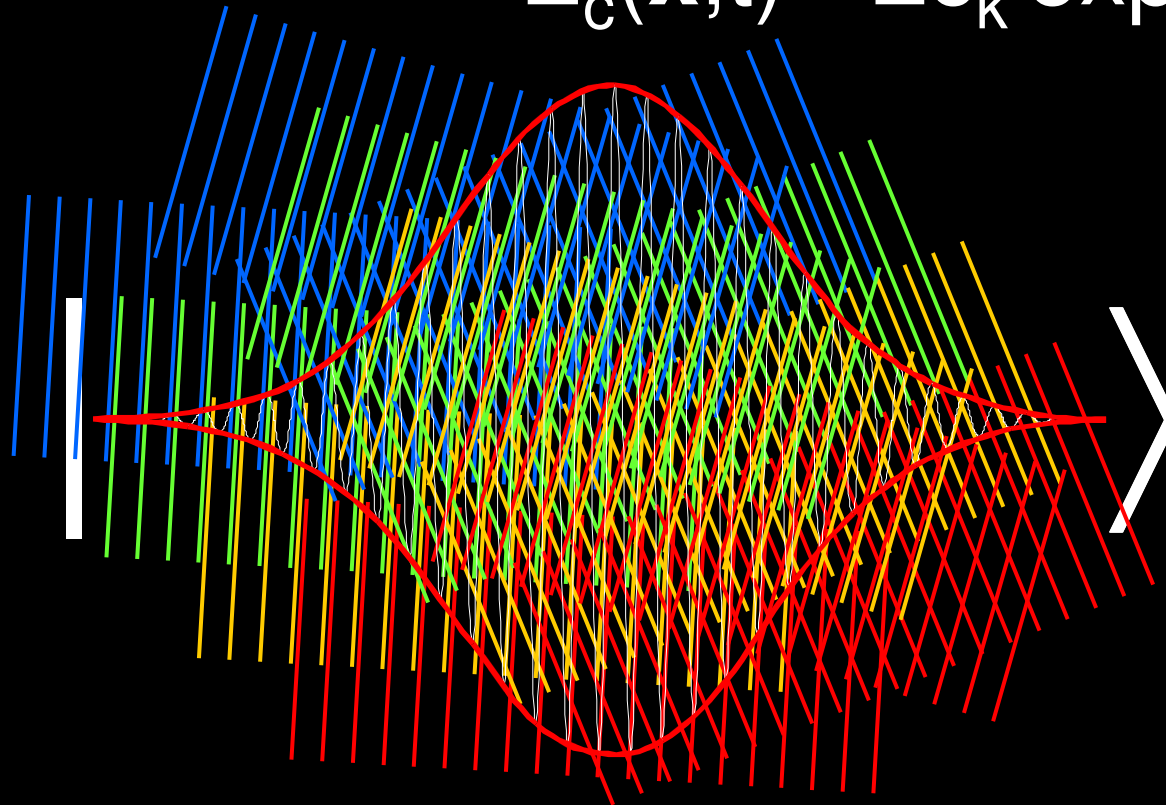
$$|1\rangle_k = a_k^\dagger |0\rangle$$

I&Z B-B, QED ..., Encyclopedia of Modern Optics

Quantization in a box

$$|1\rangle_c = \sum c_k |1\rangle_k$$

$$E_c(\mathbf{x}, t) = \sum c_k \exp(i\mathbf{k} \cdot \mathbf{x} - i\omega t)$$



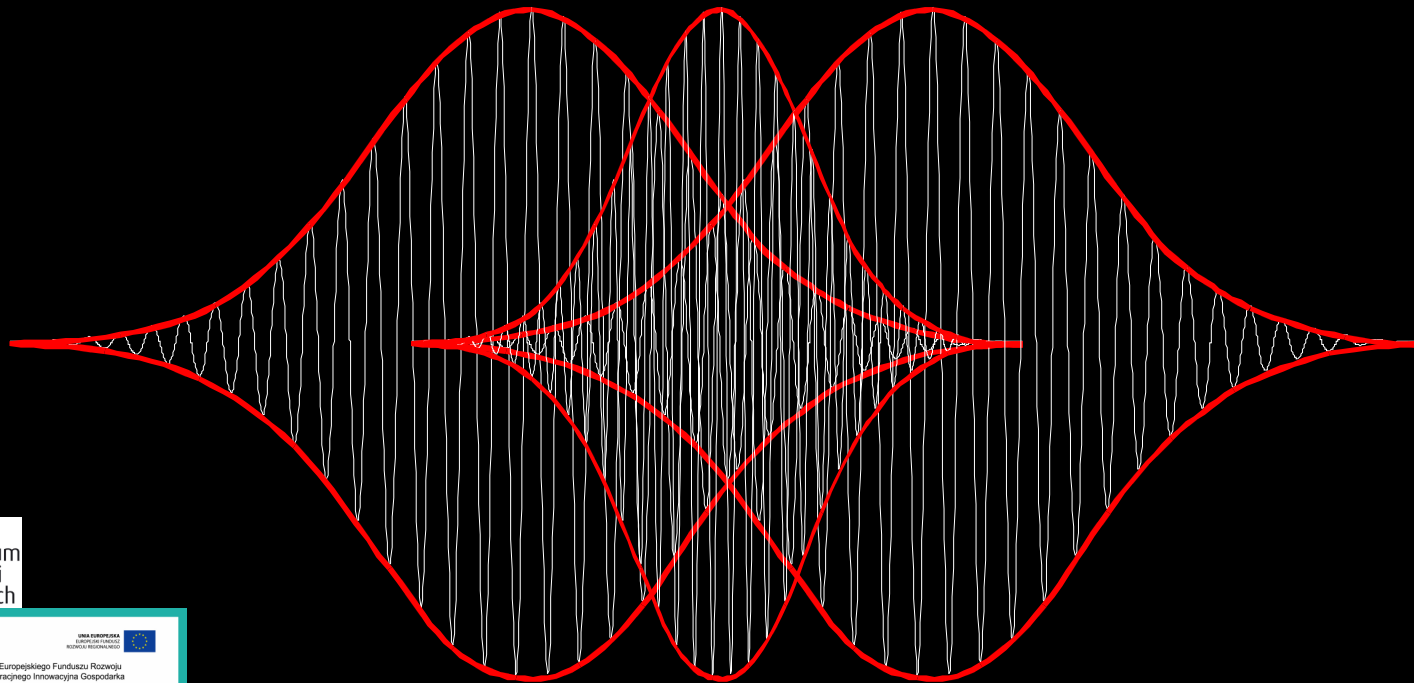
Single photon WF

$$|1\rangle = \sum c_k |1\rangle_k$$

$$E(\mathbf{x}) = \sum c_k \exp(i\mathbf{k}\cdot\mathbf{x} - i\omega t)$$

$$\rho = \sum p_a |1_a\rangle\langle 1_a|$$

$$\rho(t, t') = \sum p_a E_a^*(t) E_a(t')$$



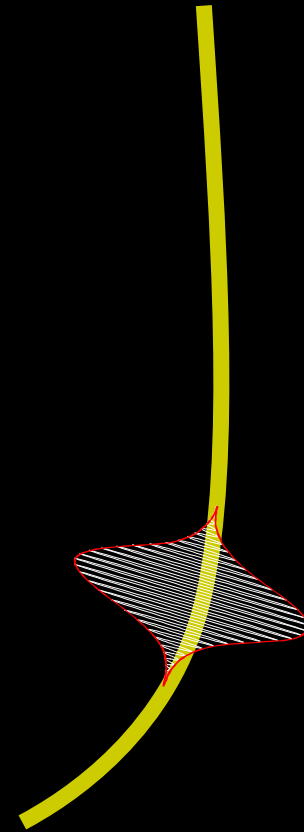
Single photon mixed

$$\hat{\rho} = \iint d\omega d\omega' \rho(\omega, \omega') \hat{a}^\dagger(\omega) |0\rangle \langle 0| \hat{a}(\omega')$$

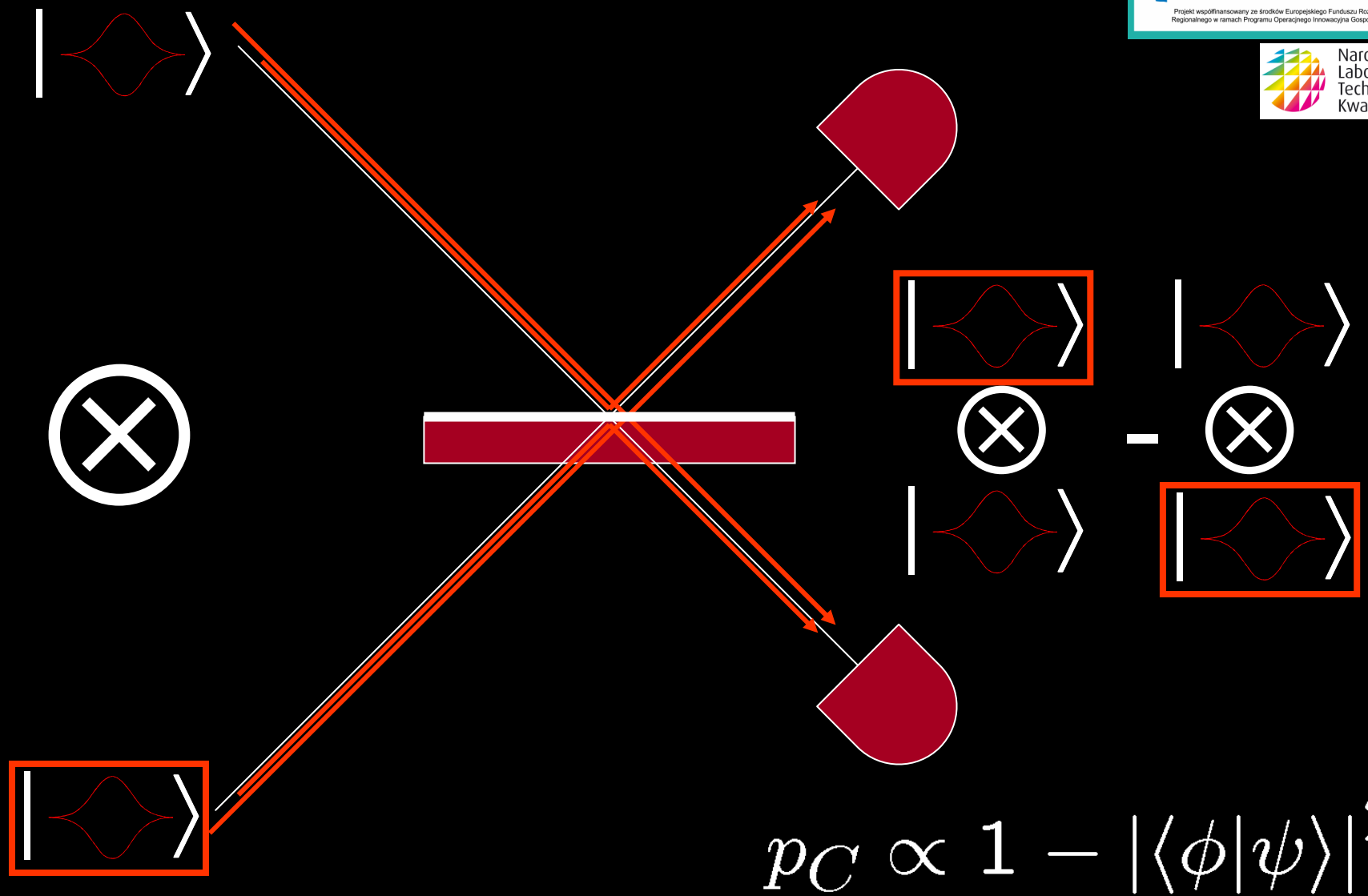
$$\rho(\omega, \omega') = \sum_n p_n f_n^*(\omega) f_n(\omega')$$

$$\hat{\rho} = \sum_n p_n |1_n\rangle \langle 1_n|$$

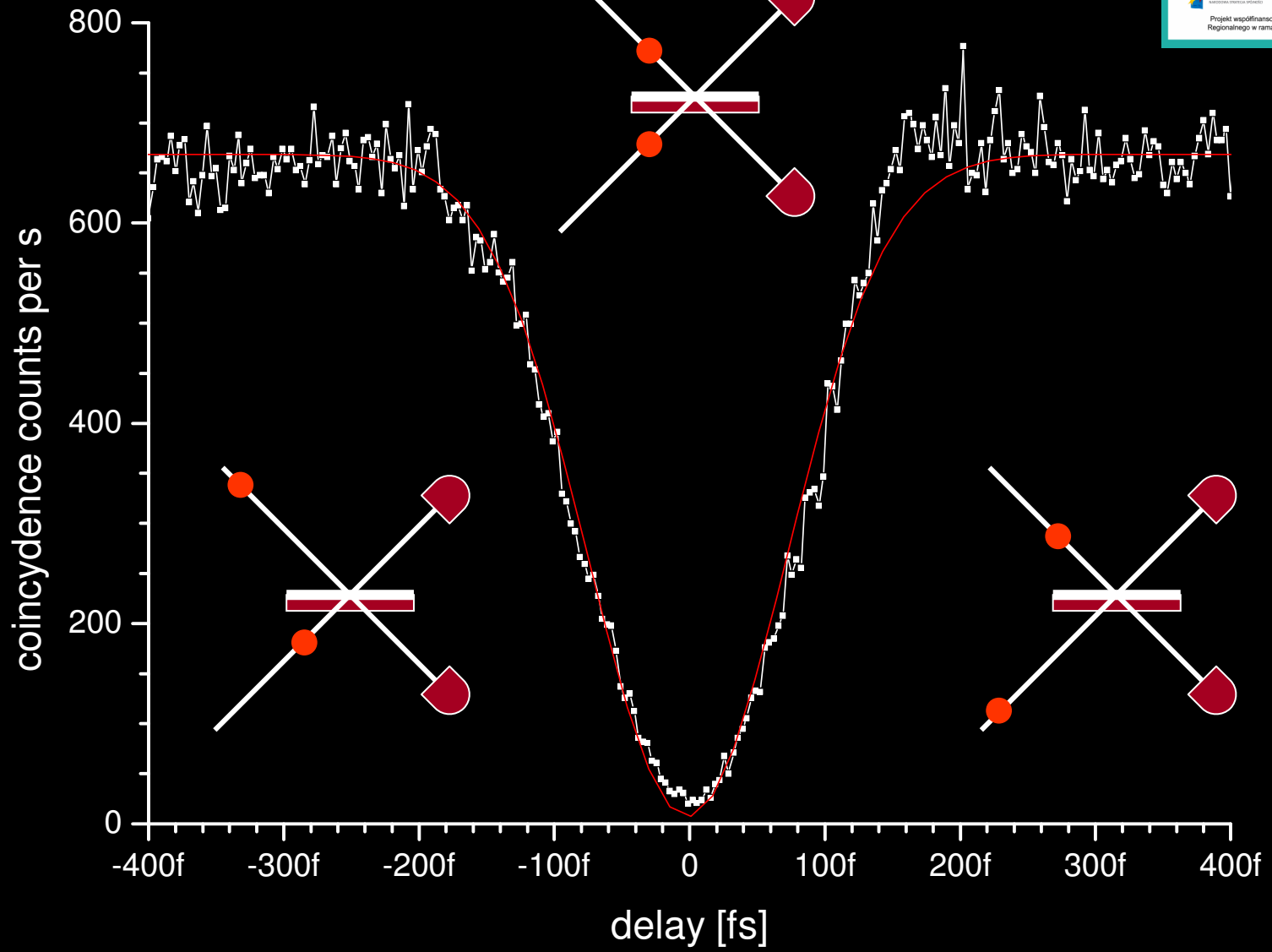
$$|1_n\rangle = \int d\omega f_n(\omega) \hat{a}^\dagger(\omega) |0\rangle$$



Quantities of interest



Hong-Ou-Mandel



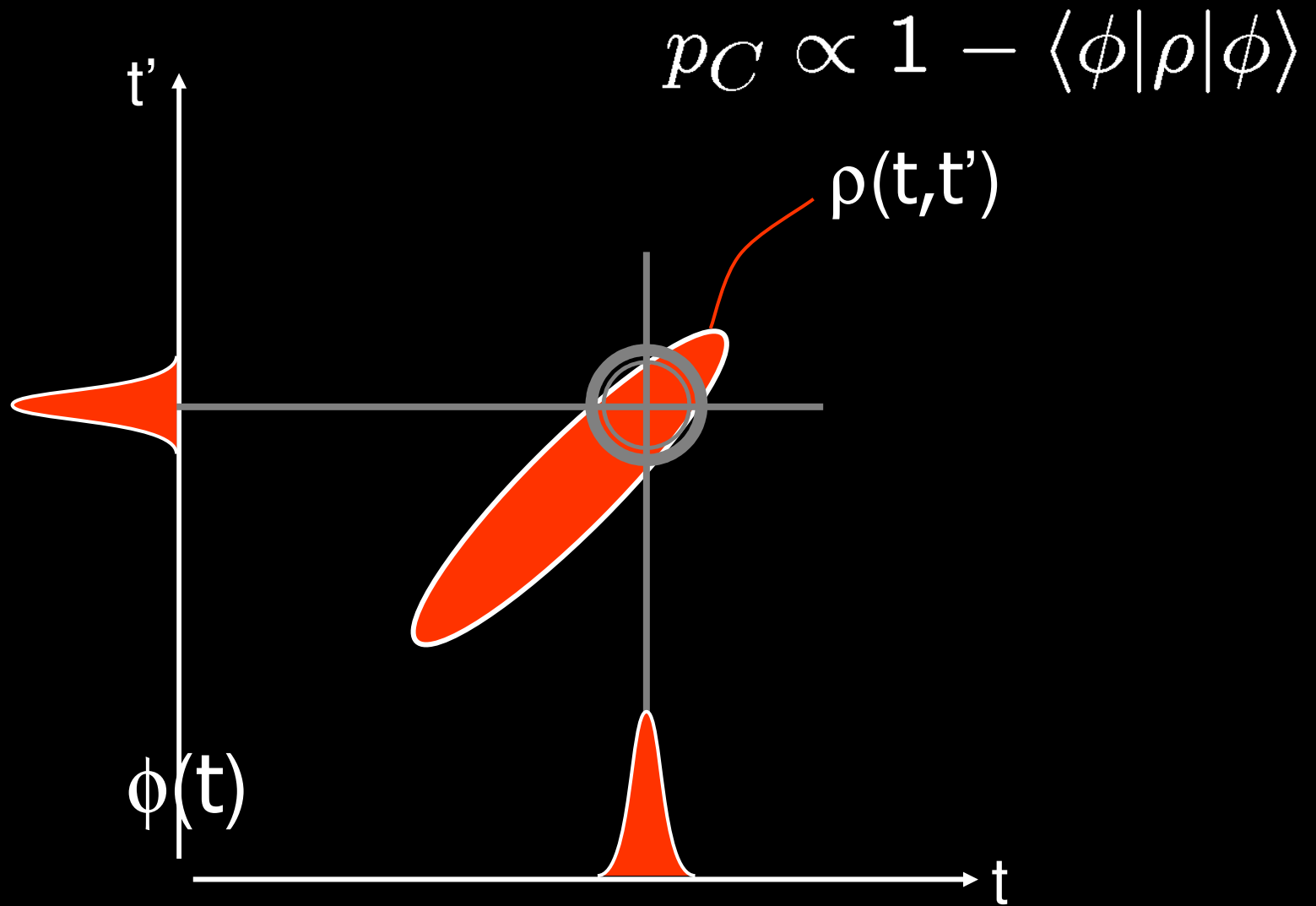
Houng-Ou-Mandel

$$\rho(t, t') = ?$$

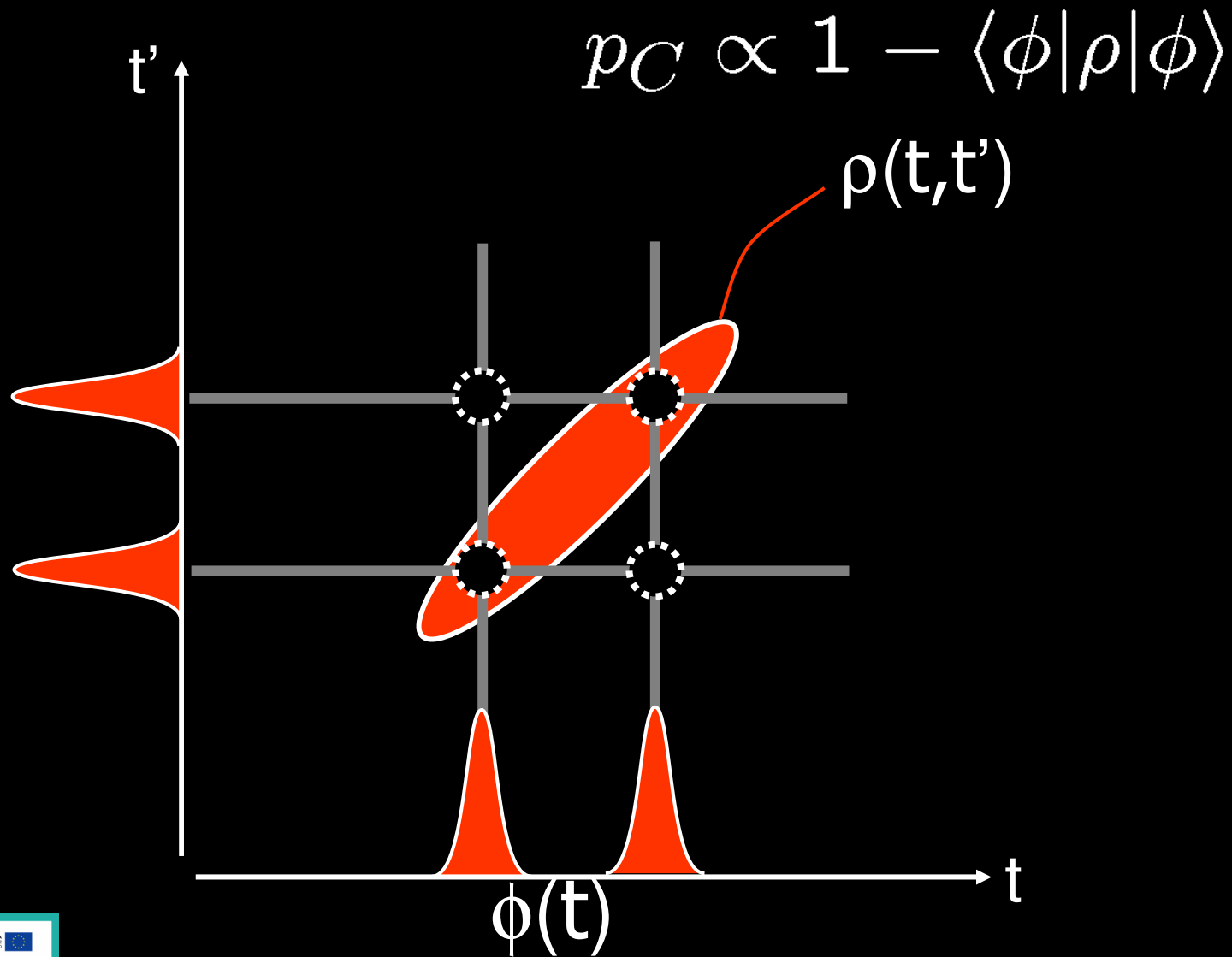
$$\phi(t)$$

$$p_C \propto 1 - \langle \phi | \rho | \phi \rangle$$

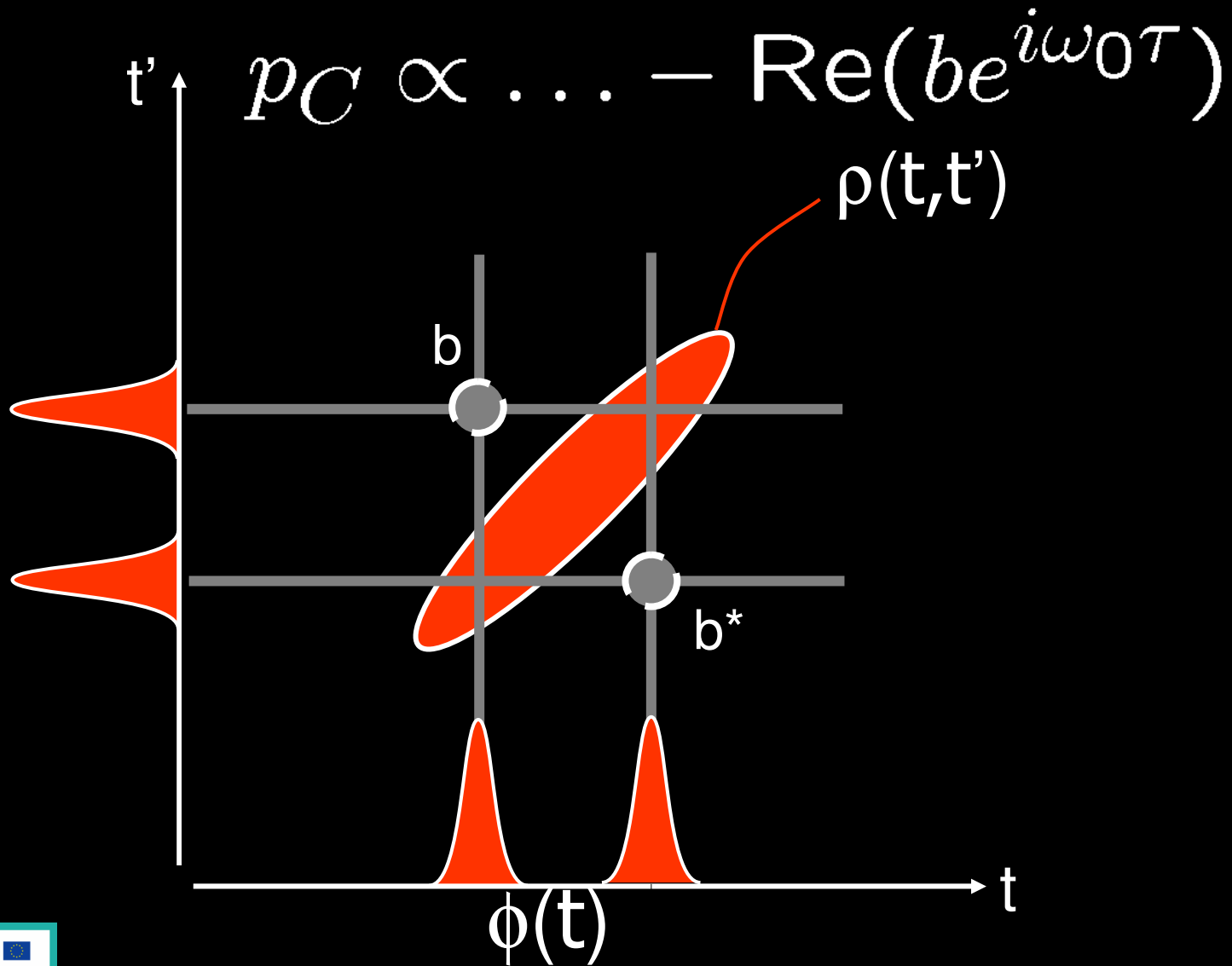
Multisided observation



Biased observation



Double pulse



Phase

$$\langle \phi | \rho | \phi \rangle$$

$$Q(\alpha) = \langle \alpha | \rho | \alpha \rangle$$



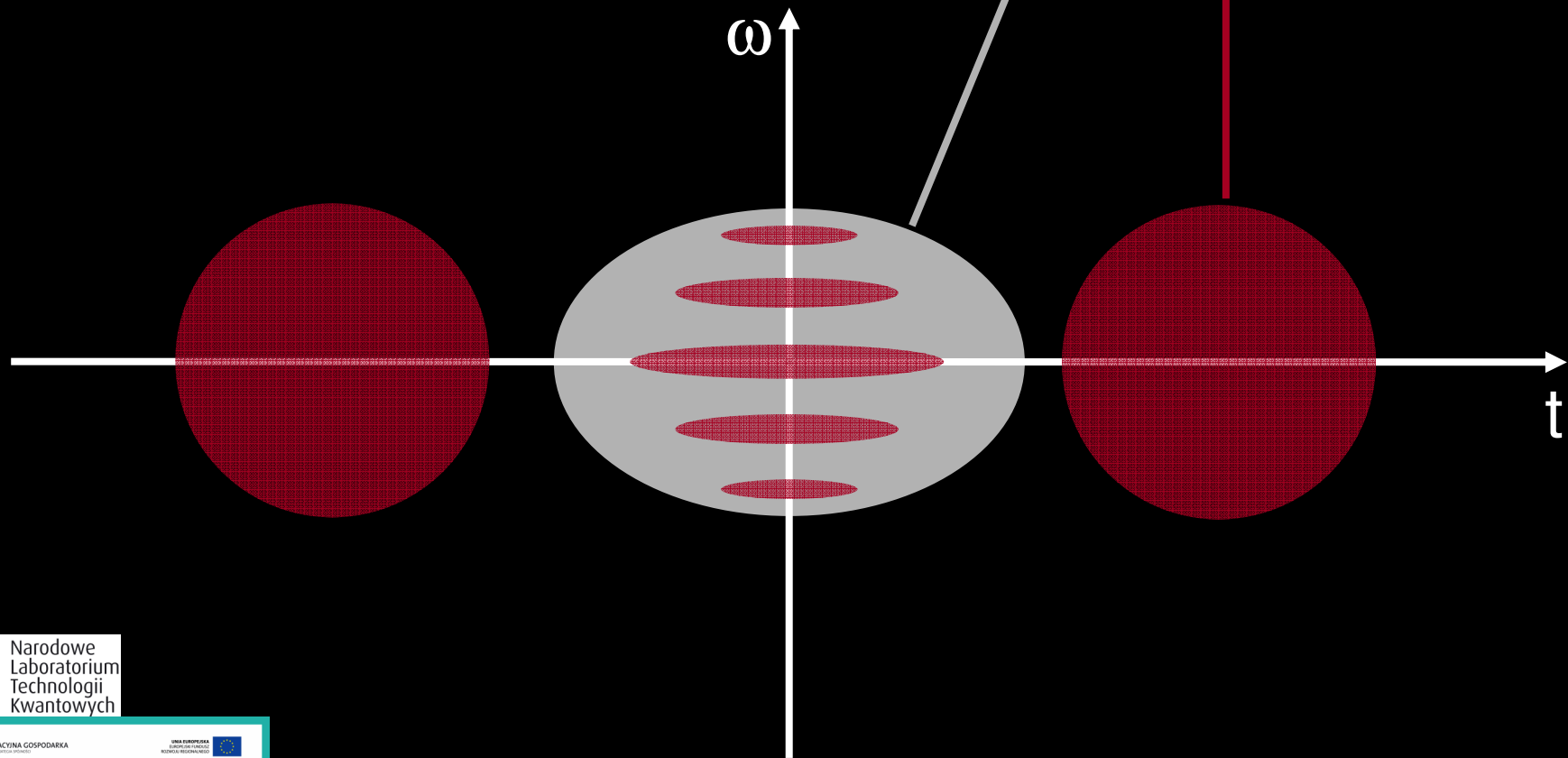
INNOWACYJNA GOSPODARKA
ROZWOJOWA I PRACOWNICZA

UNA EUROPEJSKA
KAPITAŁU REGIONALNEGO
ROZWOJU REGIONALNEGO

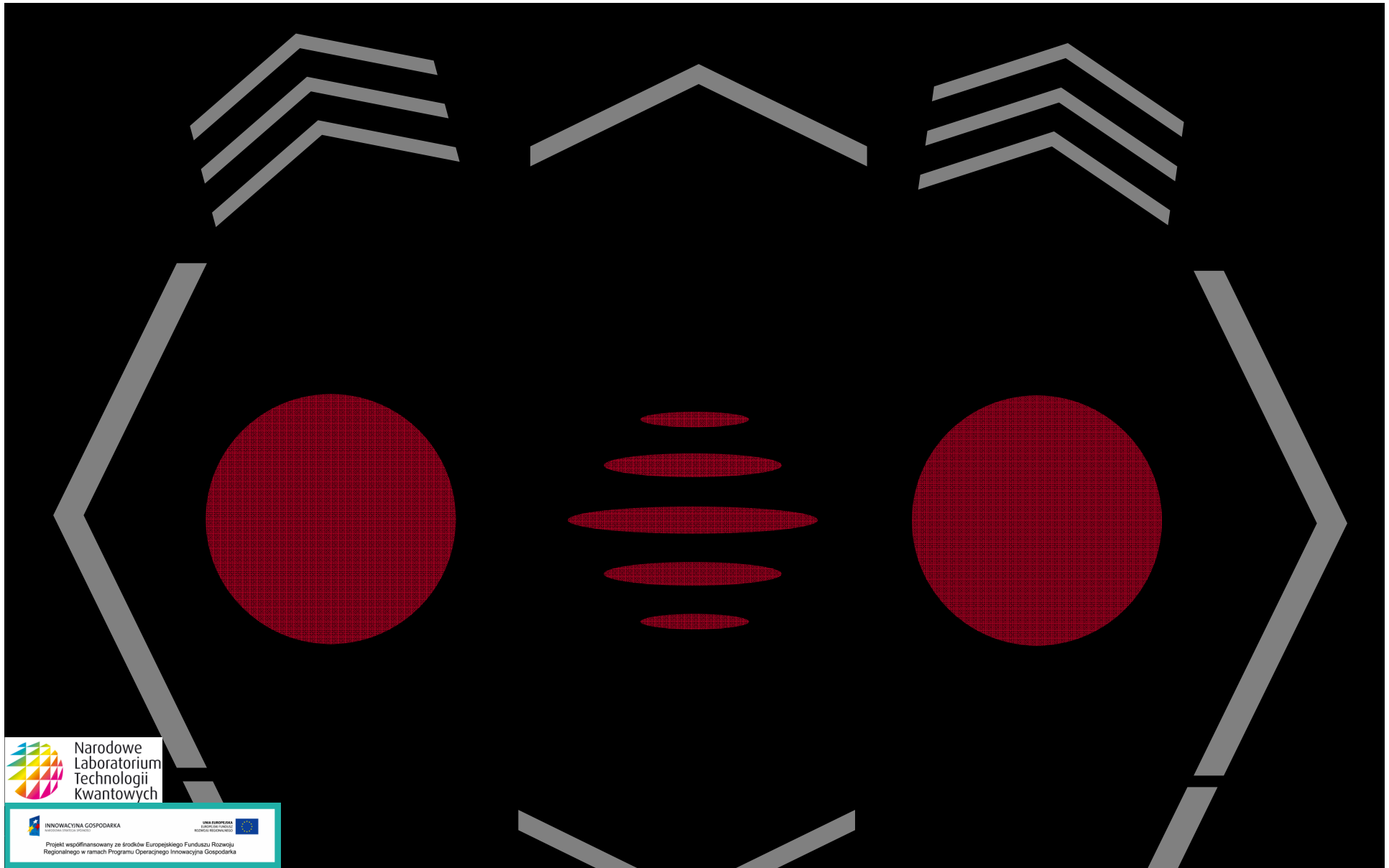
Projekt współfinansowany ze środków Europejskiego Funduszu Rozwoju Regionalnego w ramach Programu Operacyjnego Innowacyjna Gospodarka

Analogies

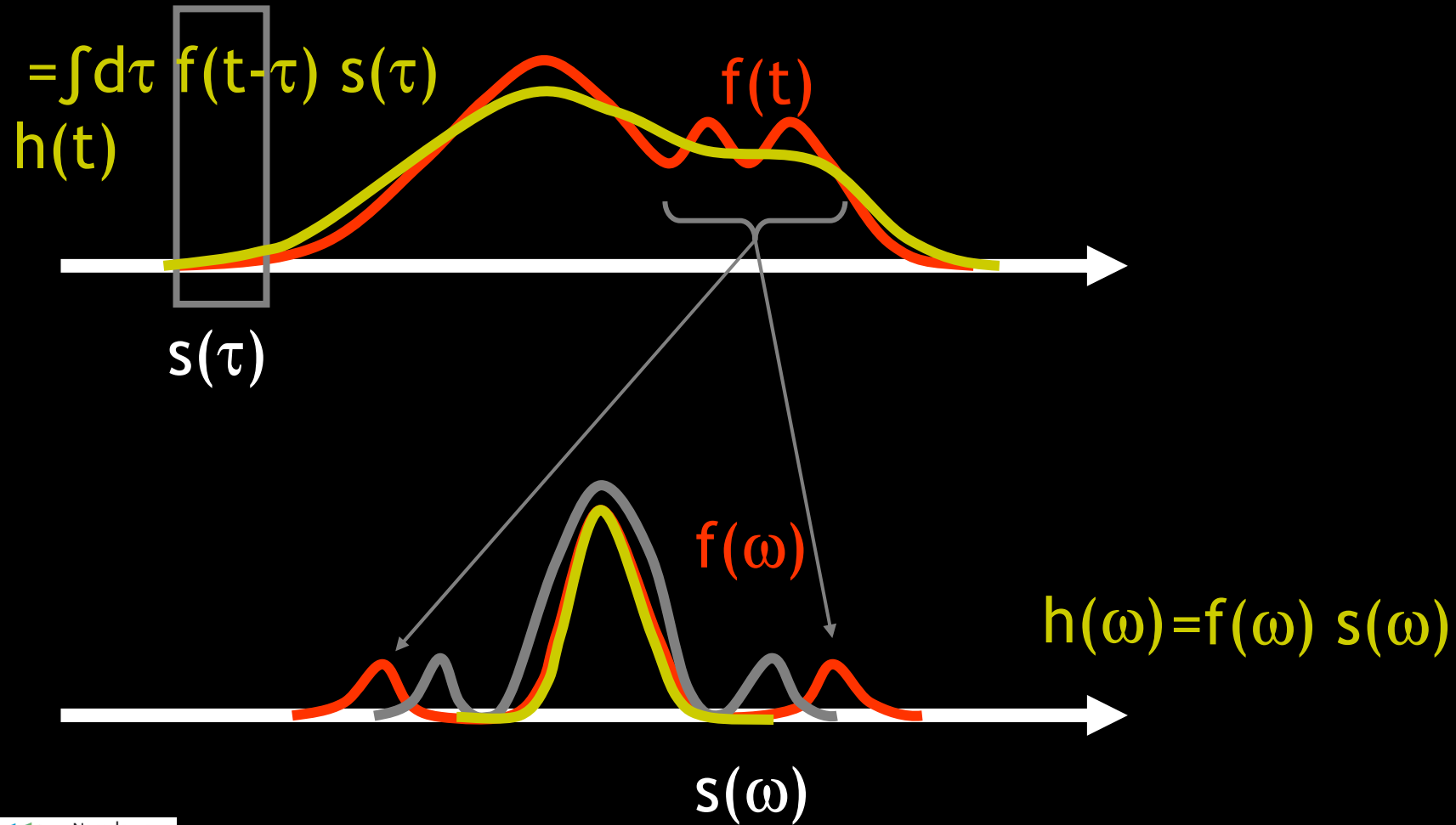
$$\langle \phi | \rho | \phi \rangle = \int dt d\omega W_{\rho} W_{\phi}$$



Phase space

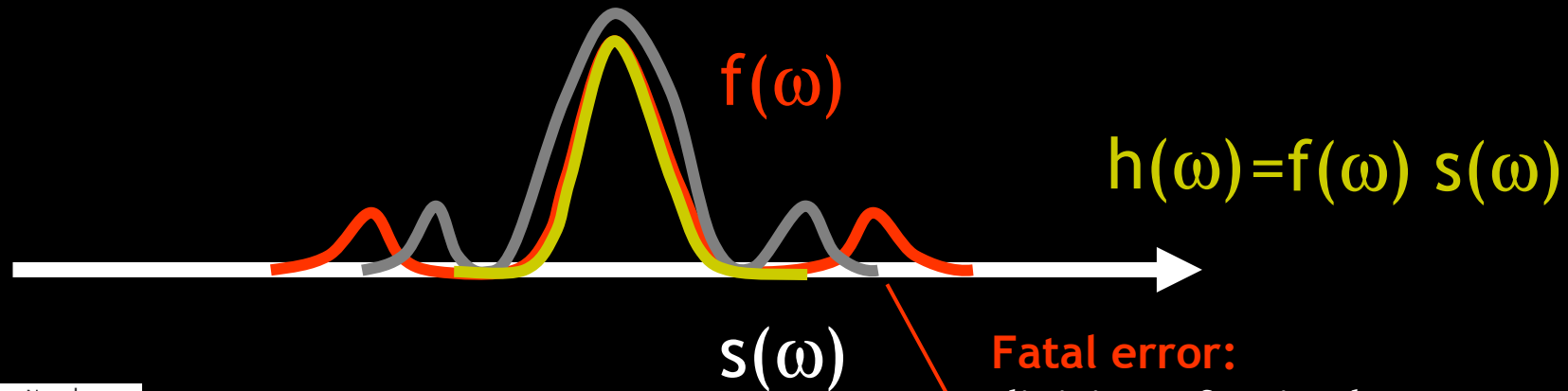
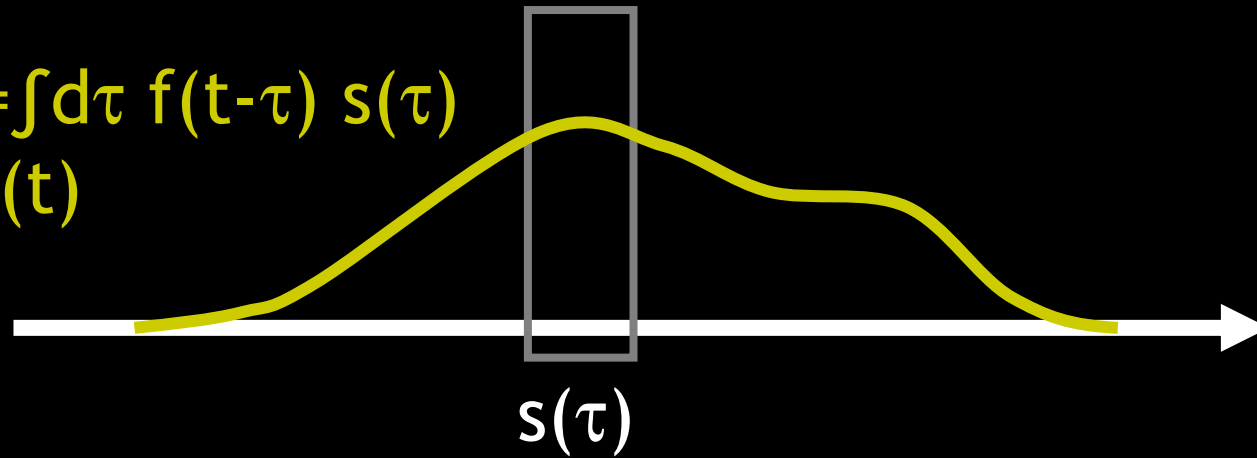


Projection onto cat's state



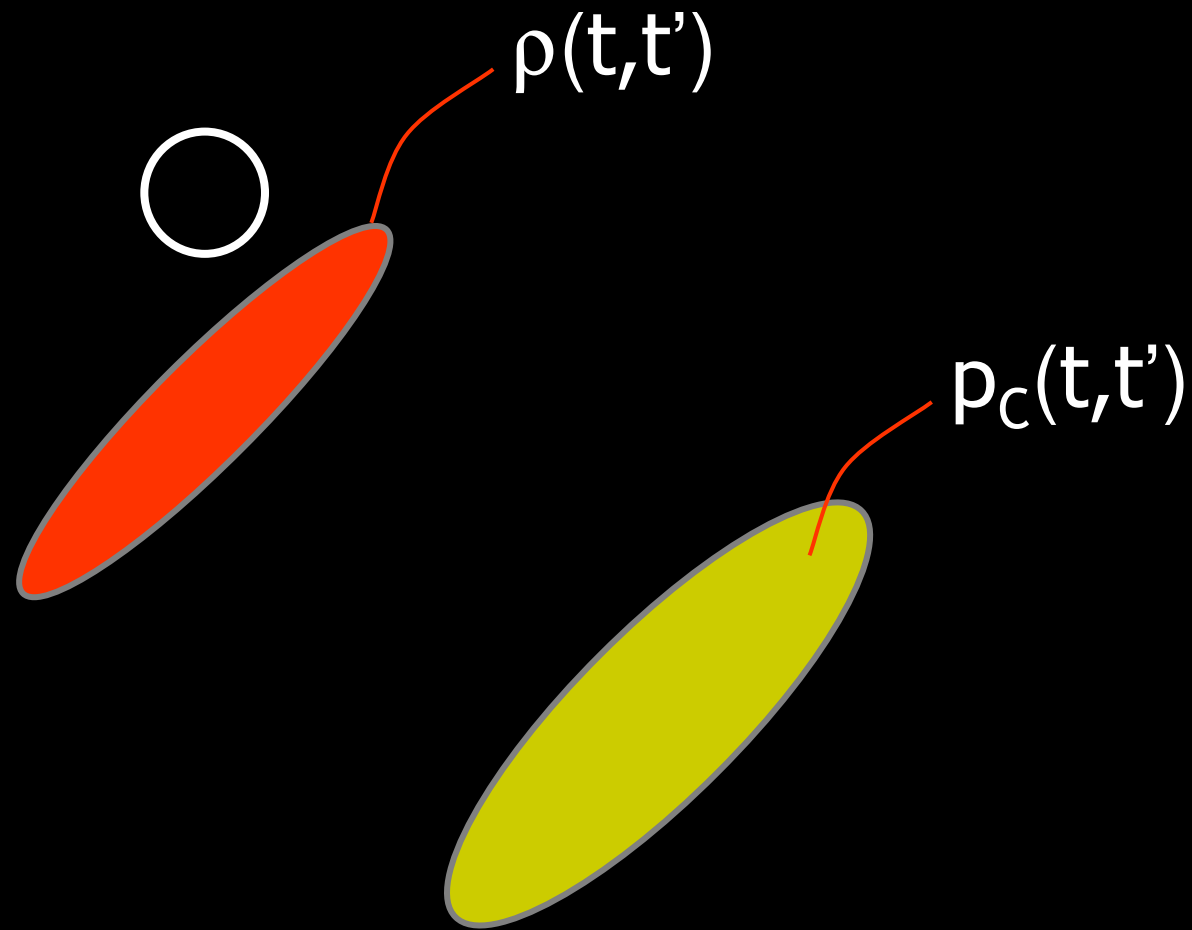
Slit function

$$h(t) = \int d\tau f(t-\tau) s(\tau)$$

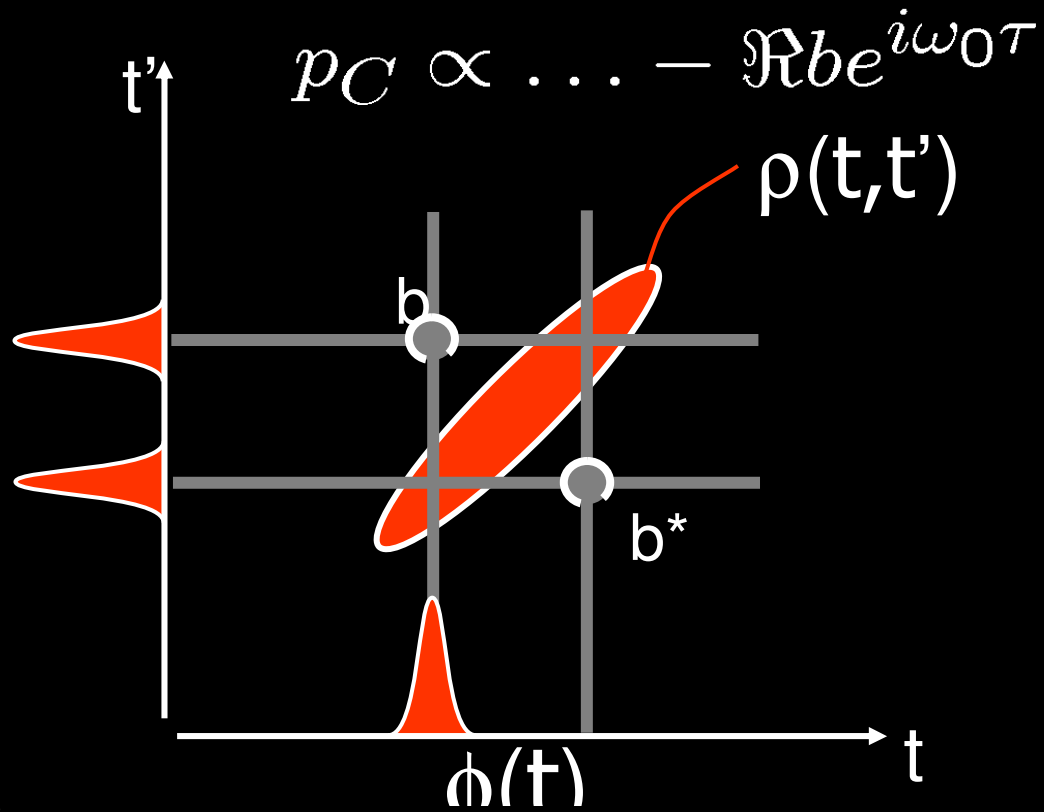


Fatal error:
division of noise by \sim zero

Deconvolution



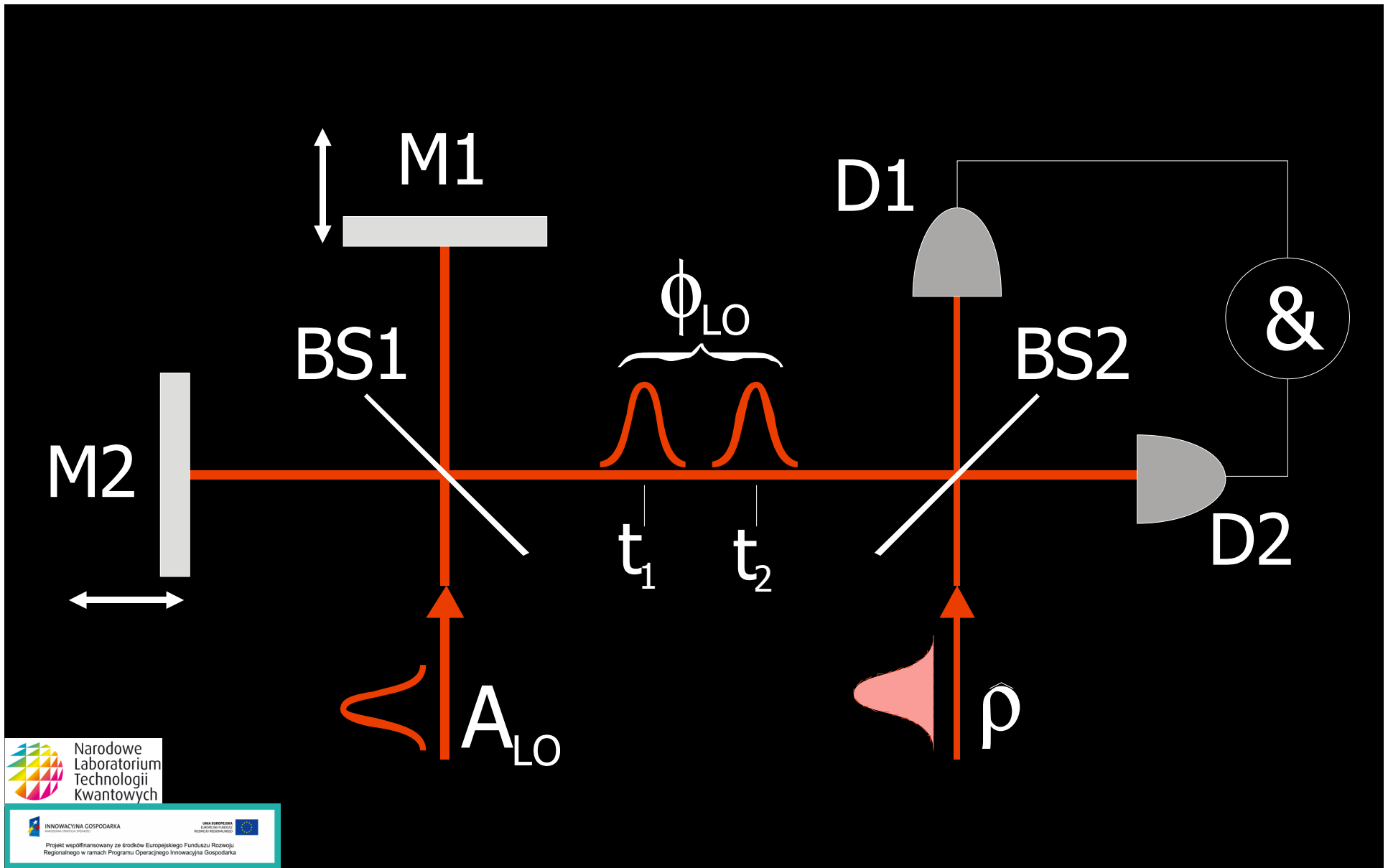
2D slit function



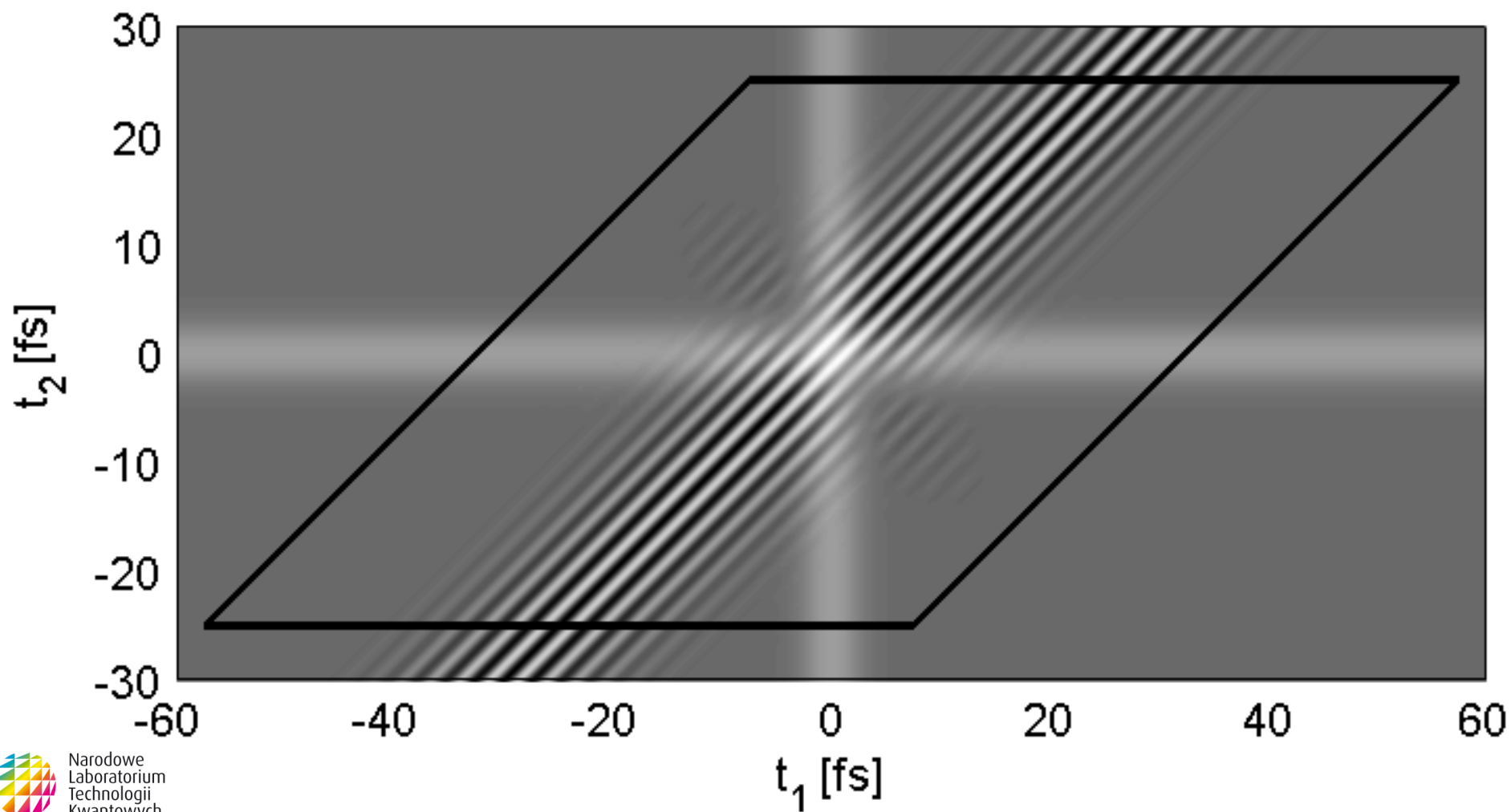
$$p(\omega, \omega') \propto \frac{A_I(\omega) A_I^*(\omega')}{\mathcal{F} p_C(t, t')} \Big|_{\omega, \omega' \approx \omega_0}$$



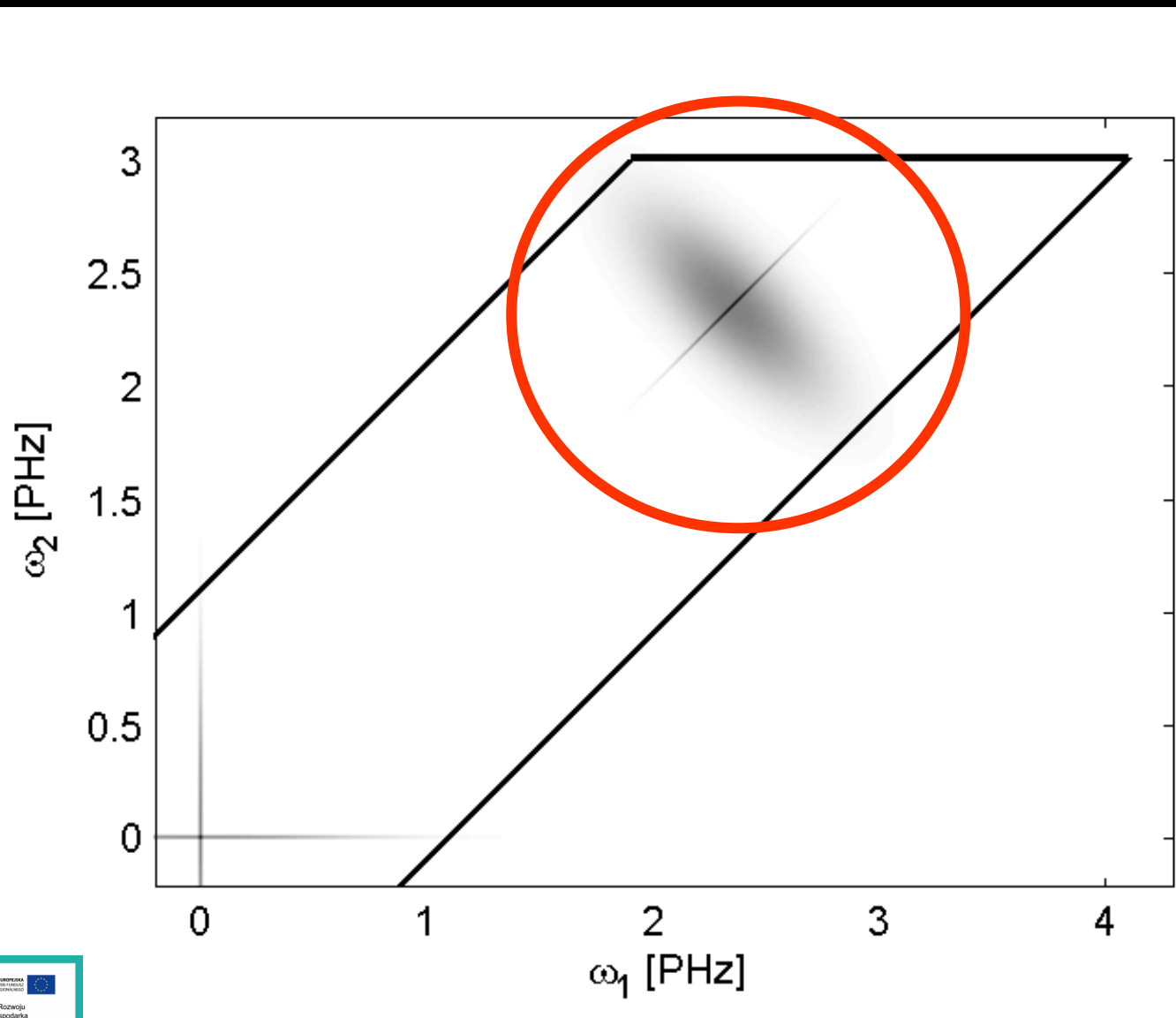
Retrieval



Experimental scheme

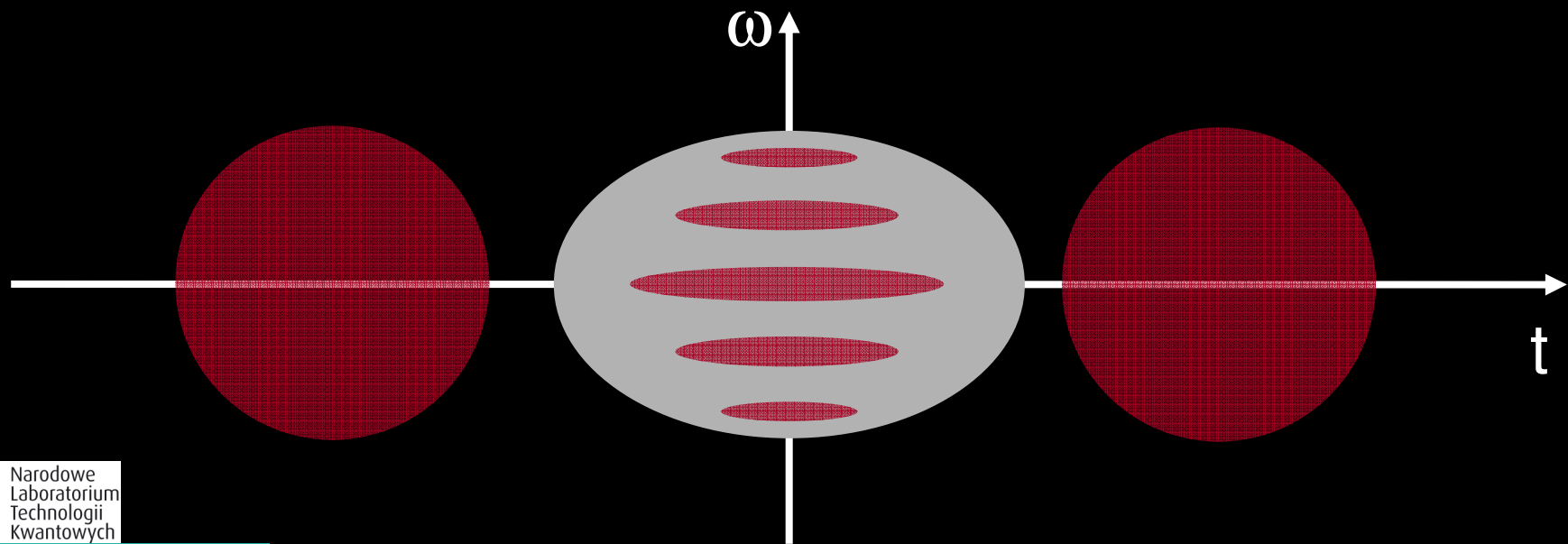


Simulated result

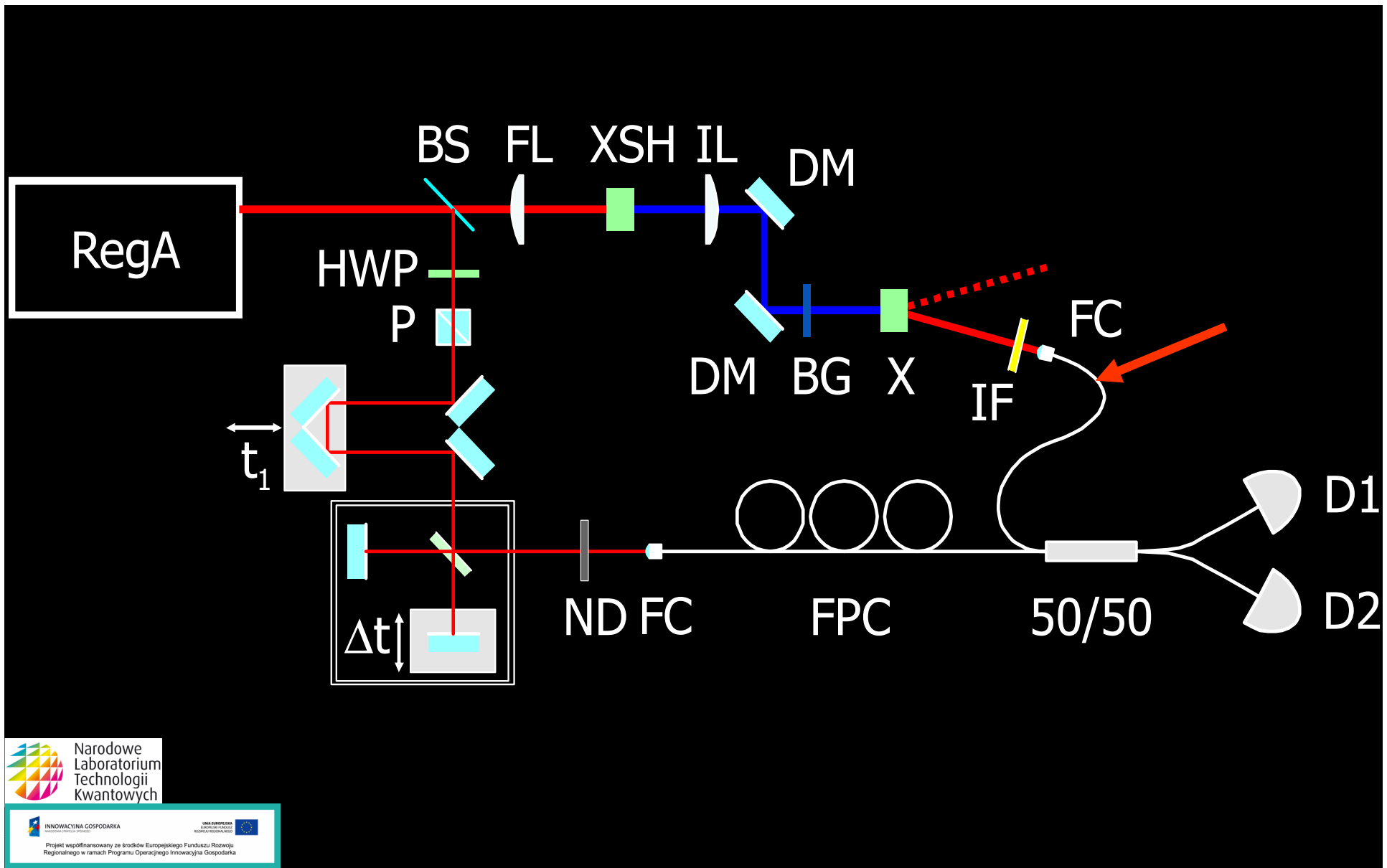


Fourier transform

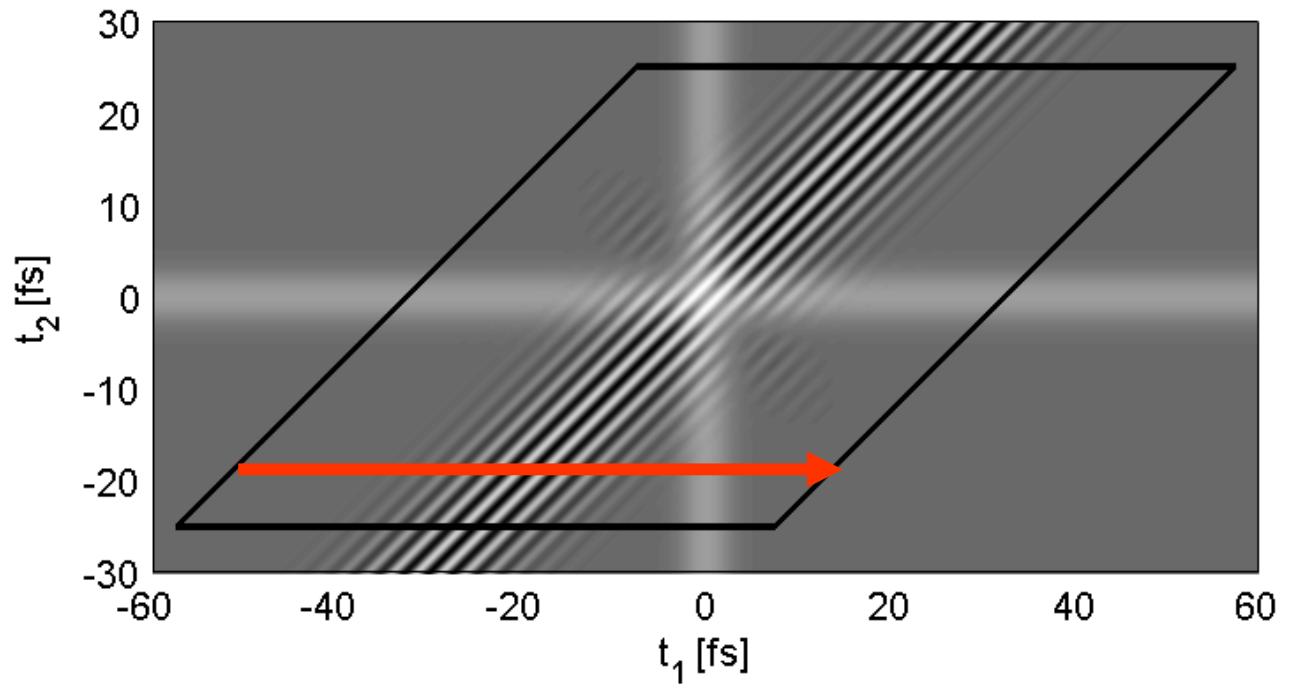
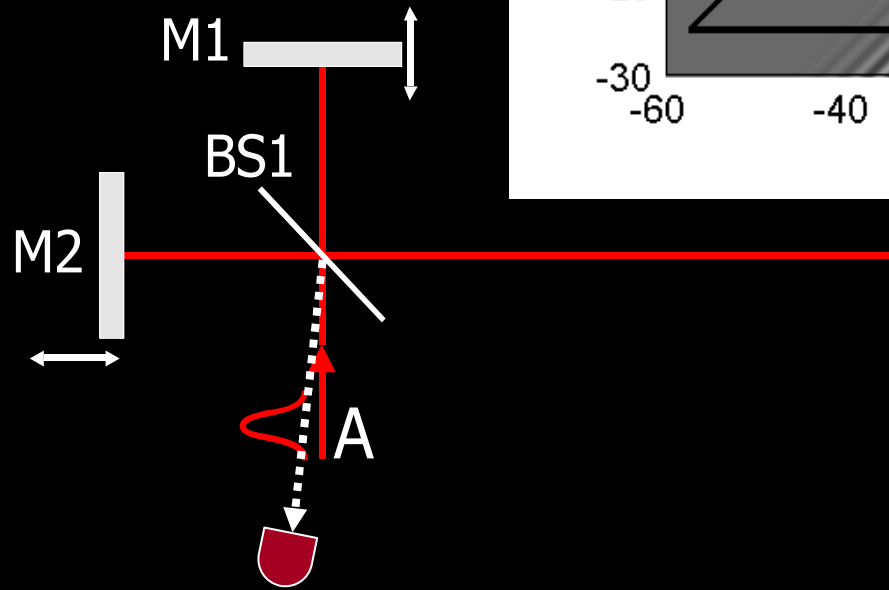
$$\rho(\omega, \omega') \propto \frac{\mathcal{F} p_C(t, t')}{A_L(\omega) A_L^*(\omega')} \Big|_{\omega, \omega' \simeq \omega_0}$$



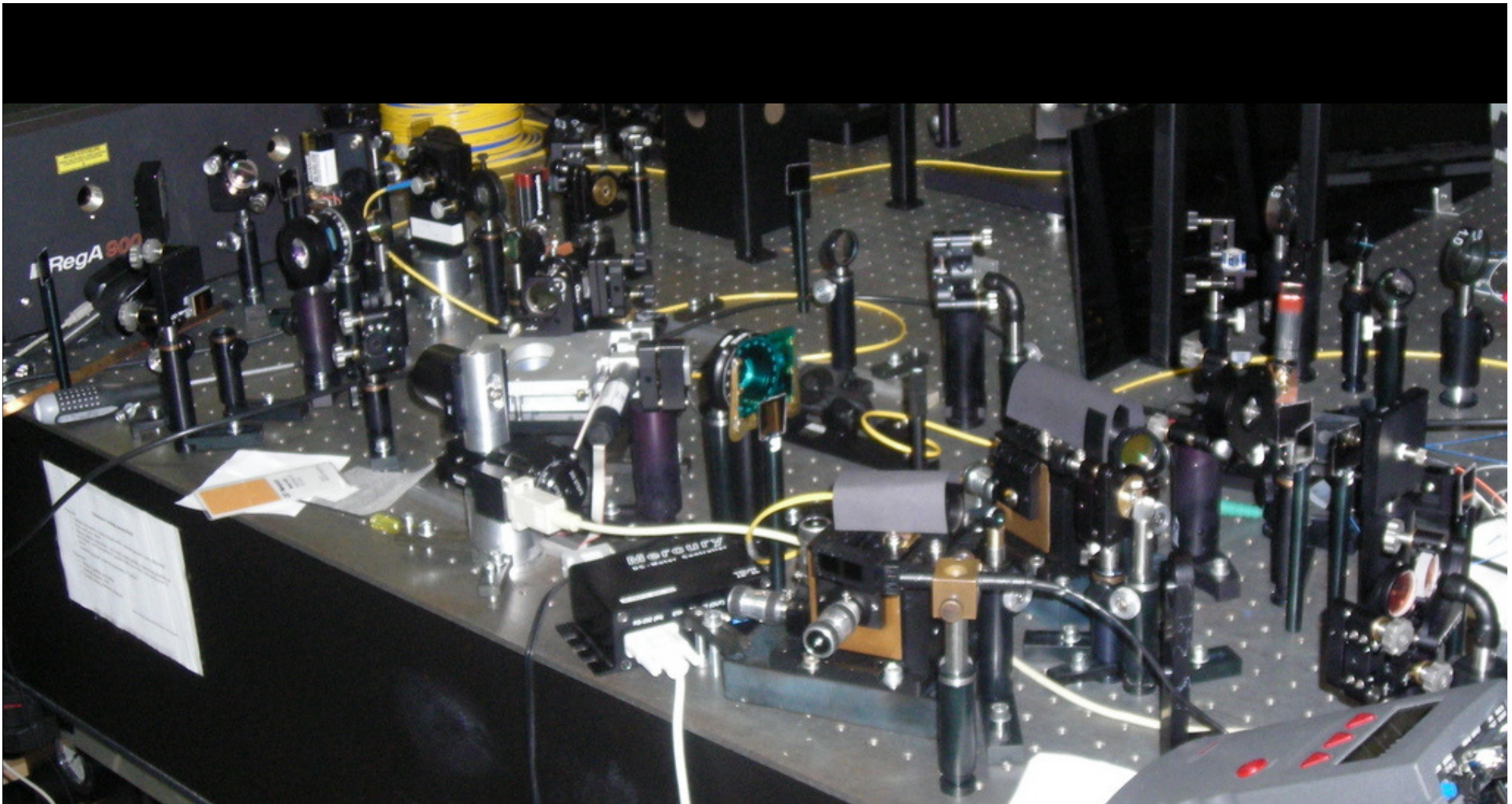
Retrieval



Setup



Passive stabilization



 Narodowe
Laboratorium
Technologii
Kwantowych

 INNOWACYJNA GOSPODARKA
ROZWOJOWA PARTNERIA ODPORNOŚĆ

 UNIA EUROPEJSKA
KROK W PRZECIWKU
ROZWOJOWI REGIONALNEMU

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

Setup

$$\rho(\omega, \omega') \propto \frac{\mathcal{F} p_C(t, t')}{A_L(\omega) A_L^*(\omega')} \Big|_{\omega, \omega' \simeq \omega_0}$$

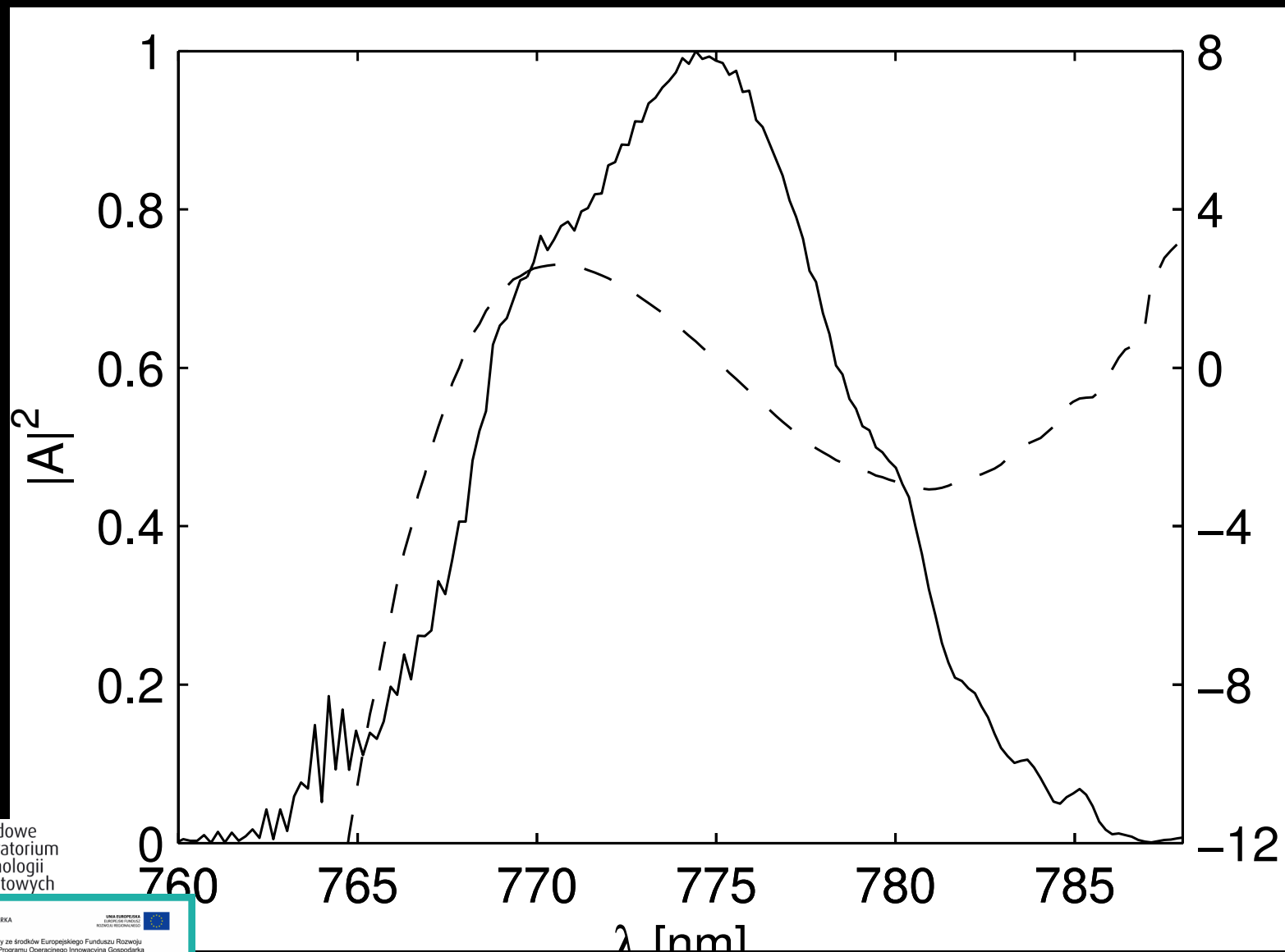


 Narodowe
Laboratorium
Technologii
Kwantowych

 INNOWACYJNA GOSPODARKA
INNOVATION THROUGH KNOWLEDGE
Projekt współfinansowany ze środków Europejskiego Funduszu Rozwoju Regionalnego w ramach Programu Operacyjnego Innowacyjna Gospodarka

 UNIA EUROPEJSKA
EUROPEAN UNION
ROZWOJ REGIONALNY

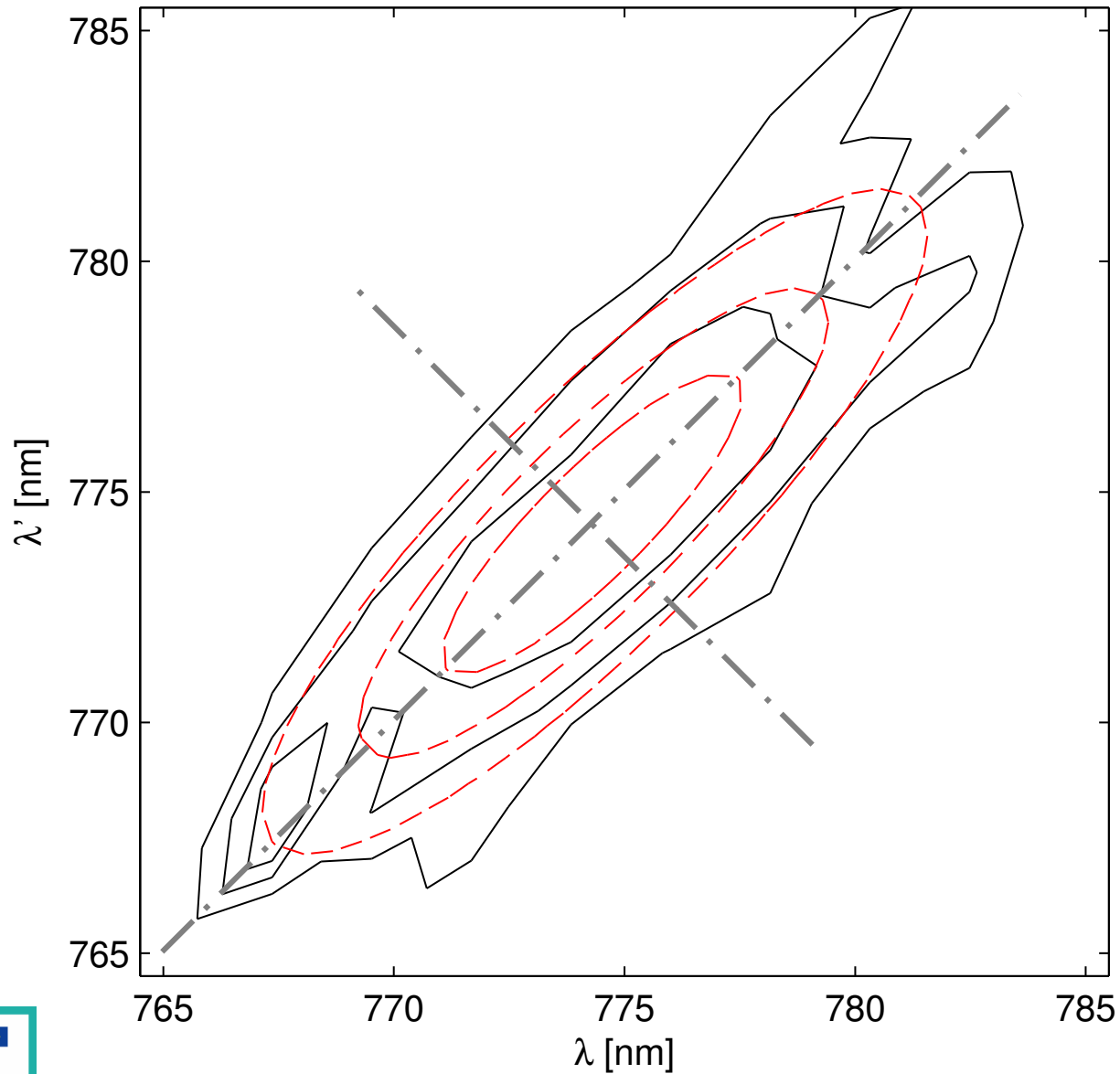
Reference



Narodowe
Laboratorium
Technologii
Kwantowych

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

Reference pulses



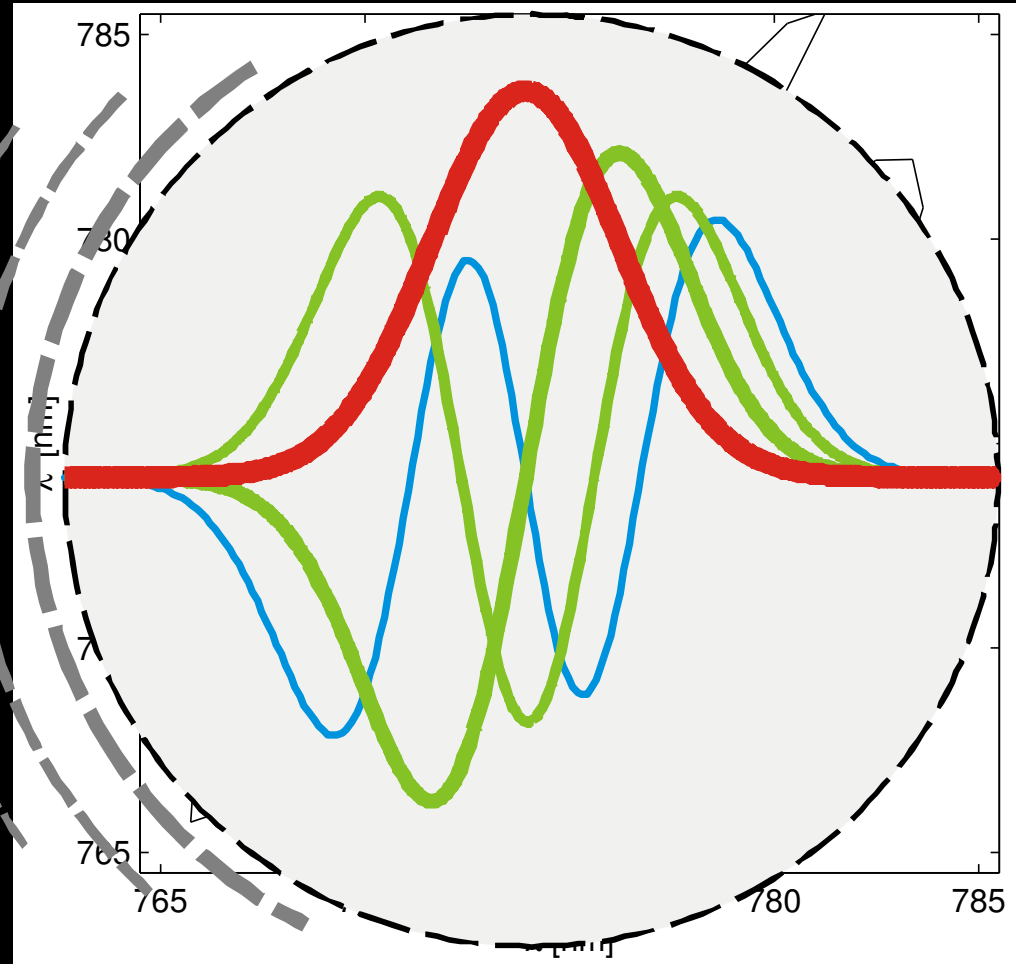
Result – $\rho(\lambda, \lambda')$

$$\hat{\rho} = \iint d\omega d\omega' \rho(\omega, \omega') \hat{a}^\dagger(\omega) |0\rangle \langle 0| \hat{a}(\omega')$$

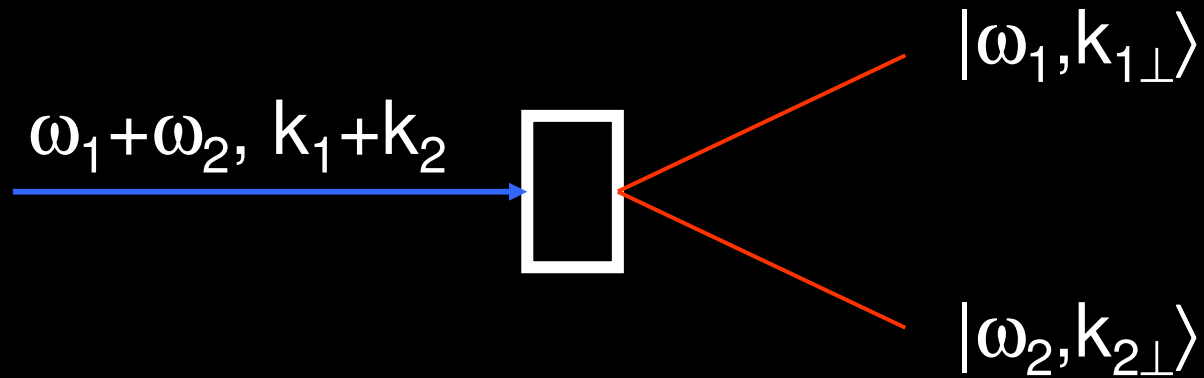
$$\rho(\omega, \omega') = \sum_n p_n f_n^*(\omega) f_n(\omega')$$

$$\hat{\rho} = \sum_n p_n |1_n\rangle \langle 1_n|$$

$$|1_n\rangle = \int d\omega f_n(\omega) \hat{a}^\dagger(\omega) |0\rangle$$

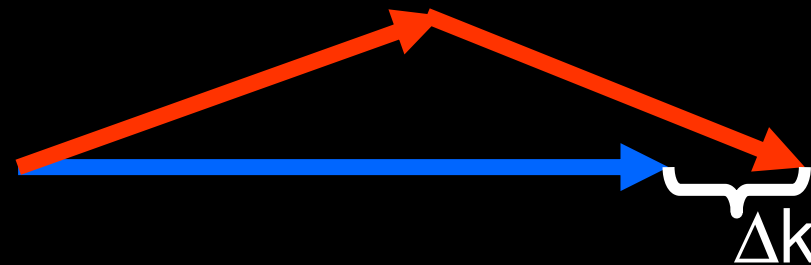


Spectral density matrix

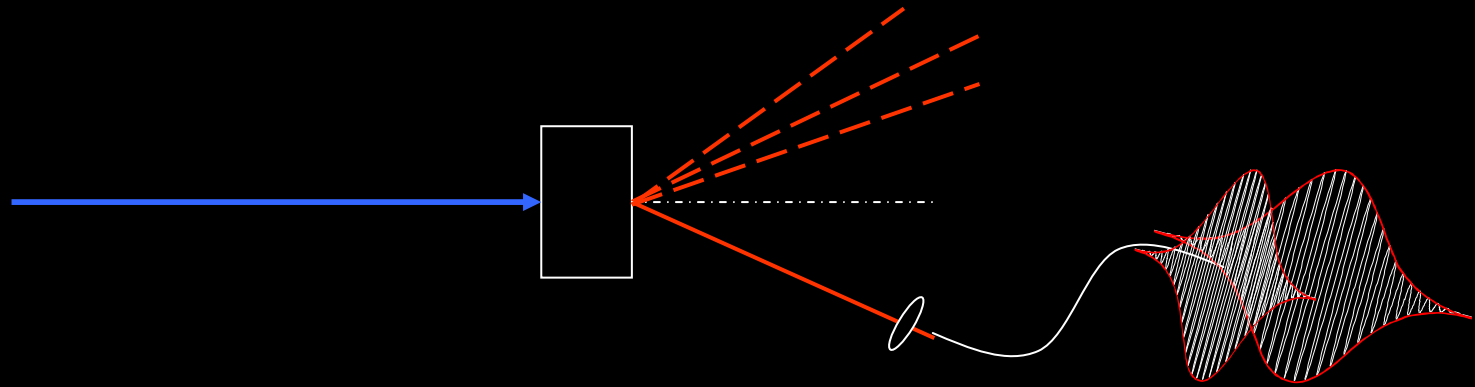


$$\langle \omega_1, k_{1\perp}, \omega_2, k_{2\perp} | \text{out} \rangle =$$

$$A_p(\omega_1 + \omega_2, k_1 + k_2) \sin(\Delta k L/2) / \Delta k$$



Theoretical model



$$\rho(\omega, \omega') = \sum p_a |1_a\rangle\langle 1_a|$$



Narodowe
Laboratorium
Technologii
Kwantowych

INNOWACYJNA GOSPODARKA
INTELEKTUALNA WŁAŚCIWOŚĆ

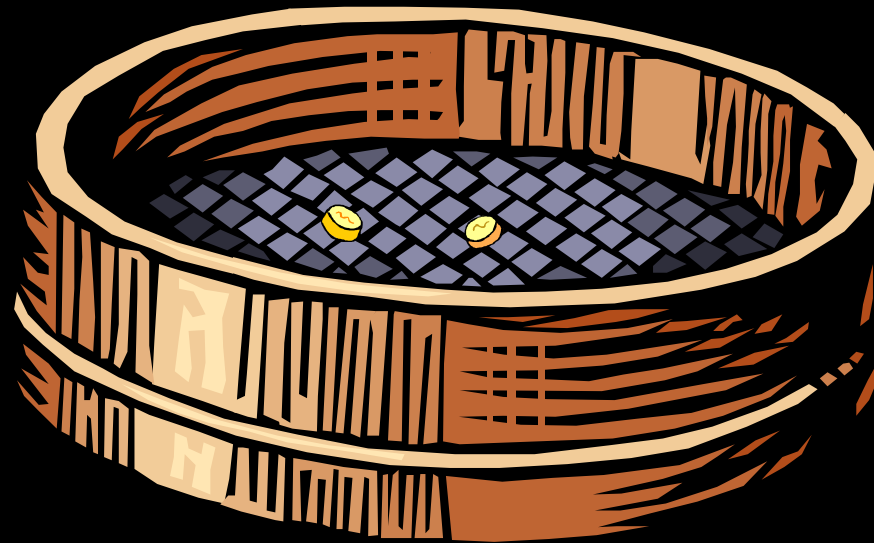
UNA EUROPEJSKA
KONKURENCYJNOŚĆ I
ROZWOJ

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

Mixedness

$$|1\rangle = \sum c_k |1\rangle_k$$

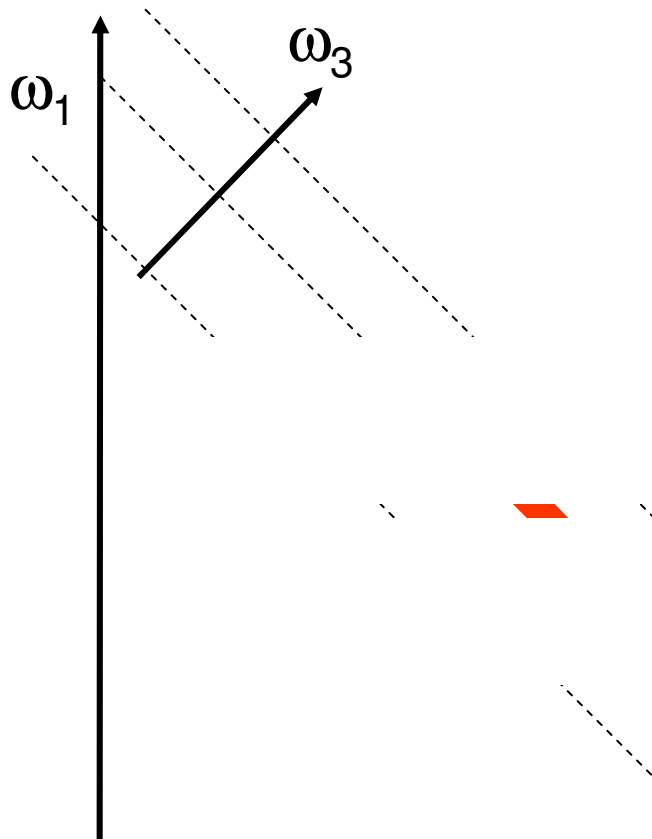
$$\rho = \sum p_a |1_a\rangle\langle 1_a|$$



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

Sieving

Filtering



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

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

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



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

$$\rho(\omega, \omega') = \sum p_a |1_a\rangle\langle 1_a|$$

$$|1\rangle_\phi$$

$$p_C \propto 1 - \langle \phi | \rho | \phi \rangle$$

Quantum HOMi

$$\begin{aligned}
 & \sum_a |0_a\rangle\langle 0_a| \\
 & + p_a |1_a\rangle\langle 1_a| \\
 & + p_a^2 |2_a\rangle\langle 2_a| \\
 & + \dots
 \end{aligned}$$

thermal state

coherent state

$$|0\rangle_\phi + \alpha |1\rangle_\phi + \frac{\alpha^2}{\sqrt{2}} |2\rangle_\phi + \frac{\alpha^3}{\sqrt{6}} |3\rangle_\phi + \dots$$

Semicalssical HOMi

0 photons: probability ~ 1 , no clicks

1 photon: either

$|0\rangle \otimes |1\rangle$: probability α^2 , no coincidences

or $|1\rangle \otimes |0\rangle$, probability $\sum_a p_a$, no coincidences

2 photons: either

$|1\rangle \otimes |1\rangle$: probability $\alpha^2 \cdot \sum_a p_a$

or $|2\rangle \otimes |0\rangle$, probability $\sum_a p_a^2$

or $|0\rangle \otimes |2\rangle$, probability $\alpha^4/2$

3 photons:

probability $\sim \max(\alpha^2, p_a)^3$ – negligible for both $\ll 1$

Semicalssical HOMi

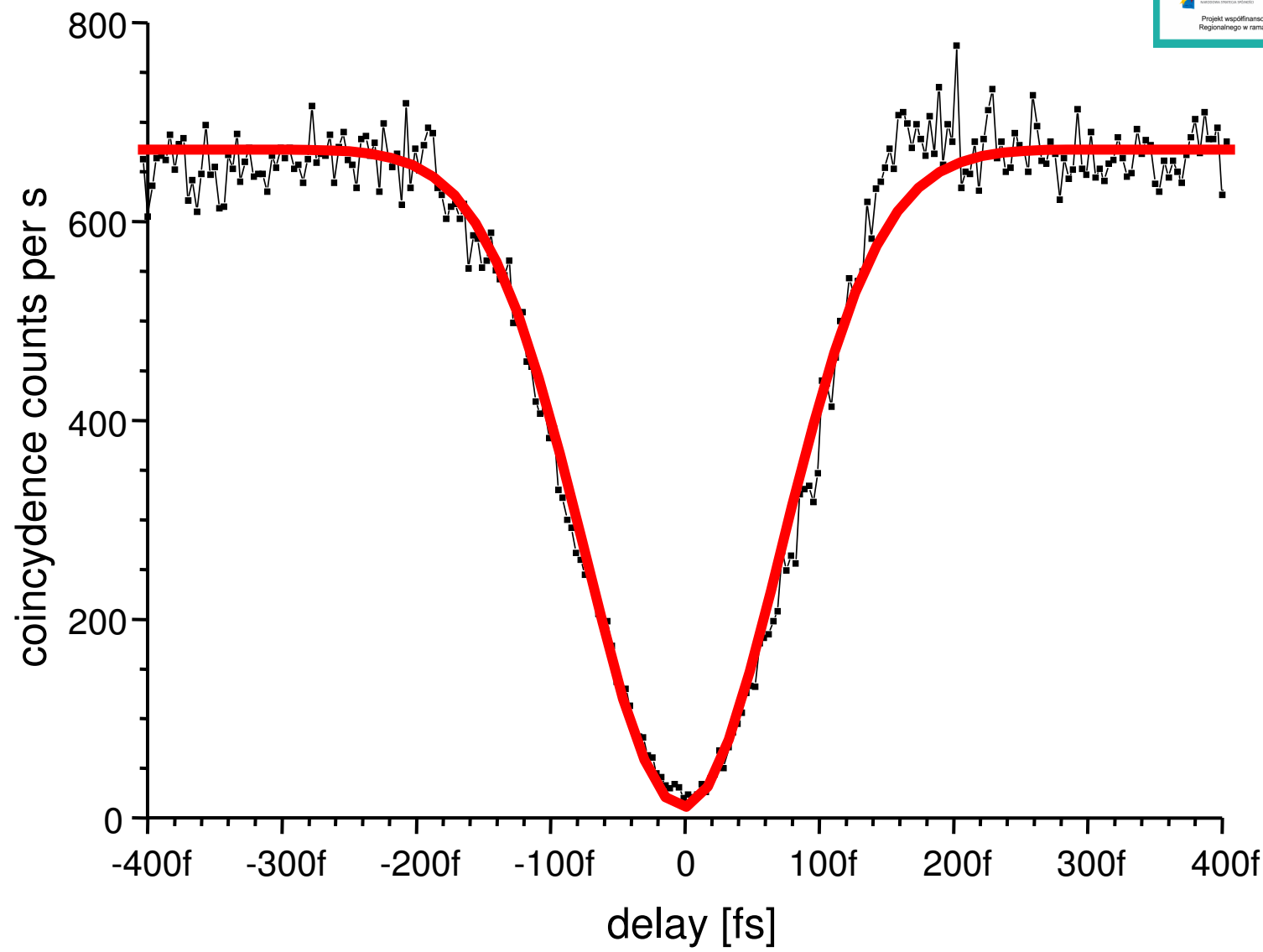
$|1\rangle \otimes |1\rangle$: probability $\alpha^2 \cdot \sum_a p_a$

leads to coincidences in
 $\frac{1}{2} - \frac{1}{2} \langle \rho | \phi | \rho \rangle$ cases

$|2\rangle \otimes |0\rangle$, probability $\sum_a p_a^2$
 $|0\rangle \otimes |2\rangle$, probability $\alpha^4/2$

leads to coincidences in $\frac{1}{2}$ cases

Semicalssical HOMi



HOMi burried

- Real photons have some shape
- Or even a few ‘eigenshapes’ with nonzero probabilities
- First full temporal characterization of a single photon
- Result agrees with the model



Narodowe
Laboratorium
Technologii
Kwantowych

WW, P. Kolenderski, R. Frankowski
quant-ph/0702200

INNOWACYJNA GOSPODARKA
ROZWOJOWA PARTNERIA UNIWERSYTETÓW
UNA EUROPEJSKA
KOMPONENTA
ROZWOJU REGIONALNEGO

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

Summary



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