

Особенности формирования когерентных фемтосекундных импульсов при дифракционном прохождении излучения рентгеновского лазера на свободных электронах в геометрии Брэгга

В.А. Бушуев¹, Л. Самойлова²



¹Московский государственный университет
им. М.В. Ломоносова, Москва, Россия

²European XFEL GmbH, 22607 Hamburg, Germany
vabushuev@yandex.ru



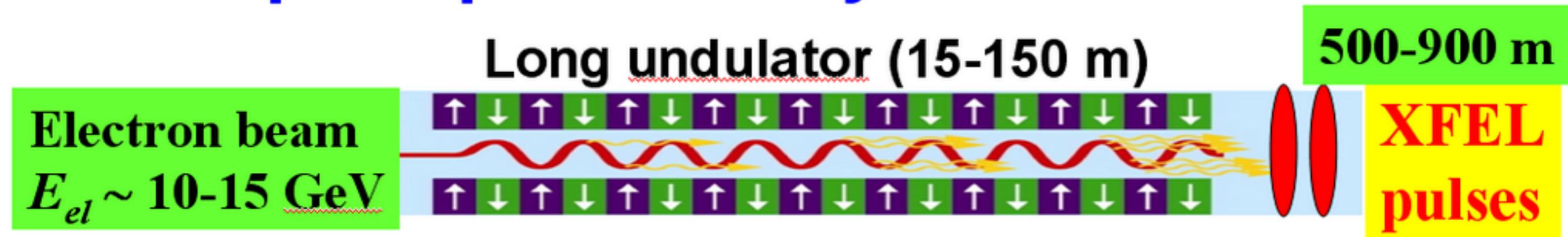
“Рентгеновская оптика - 2012”

Черноголовка - 2012

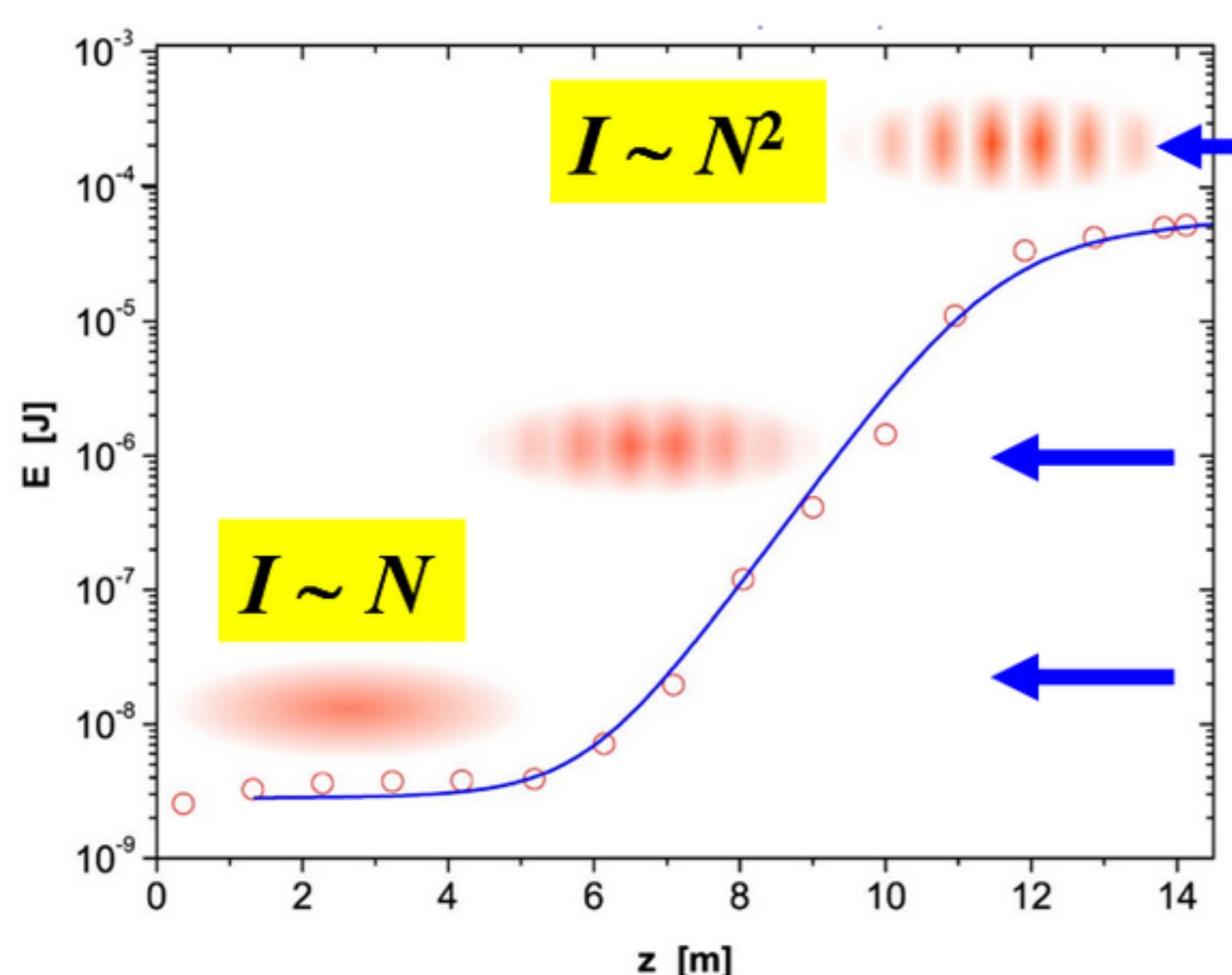
Содержание

- 1. Введение (XFEL, SASE)**
- 2. Статистические характеристики импульсов XFEL**
- 3. Прохождение когерентных и некогерентных импульсов через кристалл в геометрии дифракции Брэгга**
- 4. Схема self-seeding для получения узкого спектра импульсов XFEL (т.е. когерентных импульсов XFEL и снижения тепловой нагрузки на элементы РО)**

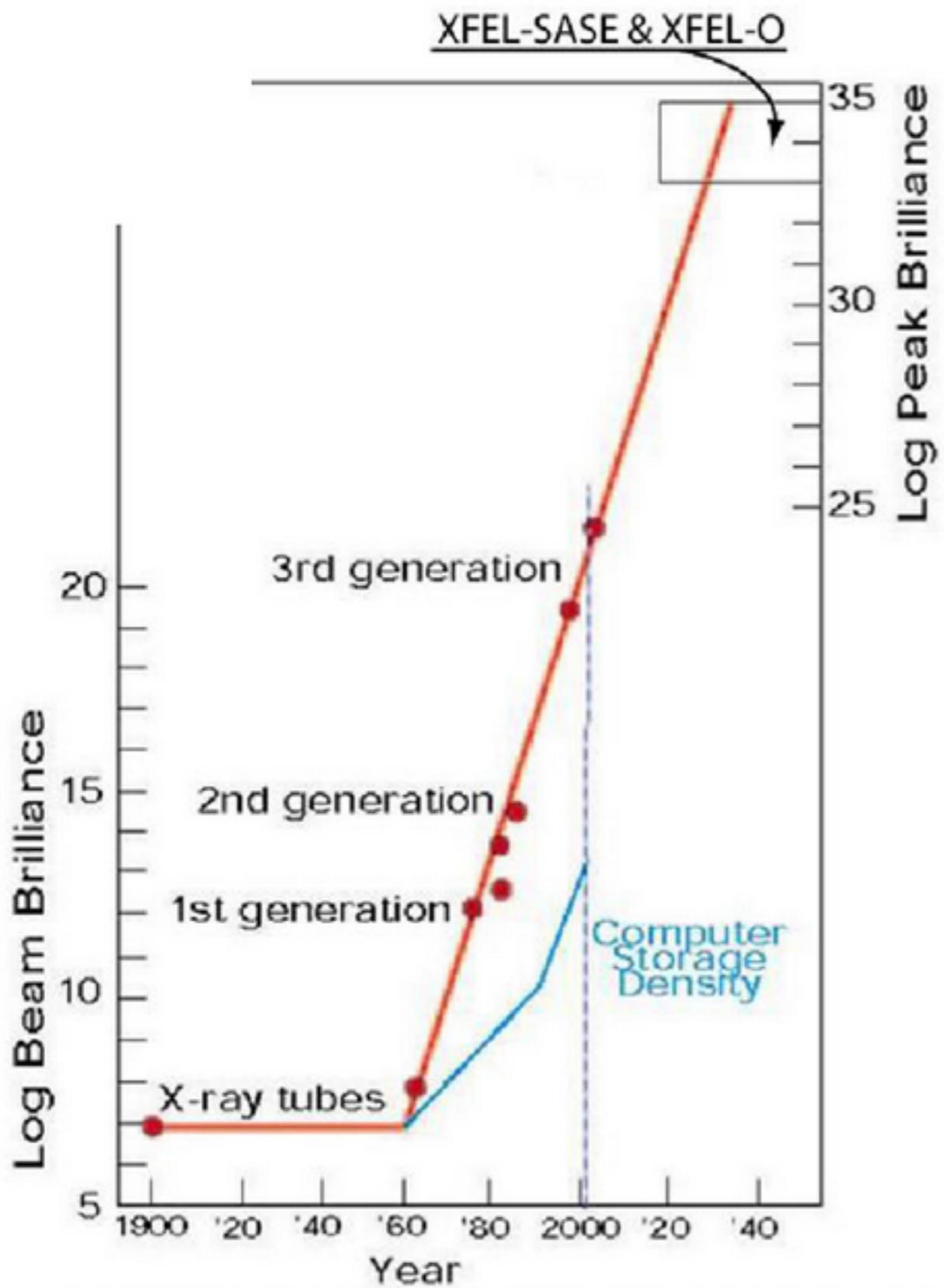
Basic principles of X-ray free electron lasers



Self-Amplified Spontaneous Emission (SASE)



1. All N electrons can be treated as individually radiating charges, and the resulting spontaneous emission is proportional to N .
2. The shot noise of the electron beam is amplified to complete micro-bunching.
3. With complete micro-bunching all electrons radiate in phase. This leads to a radiation power growth as N^2 .



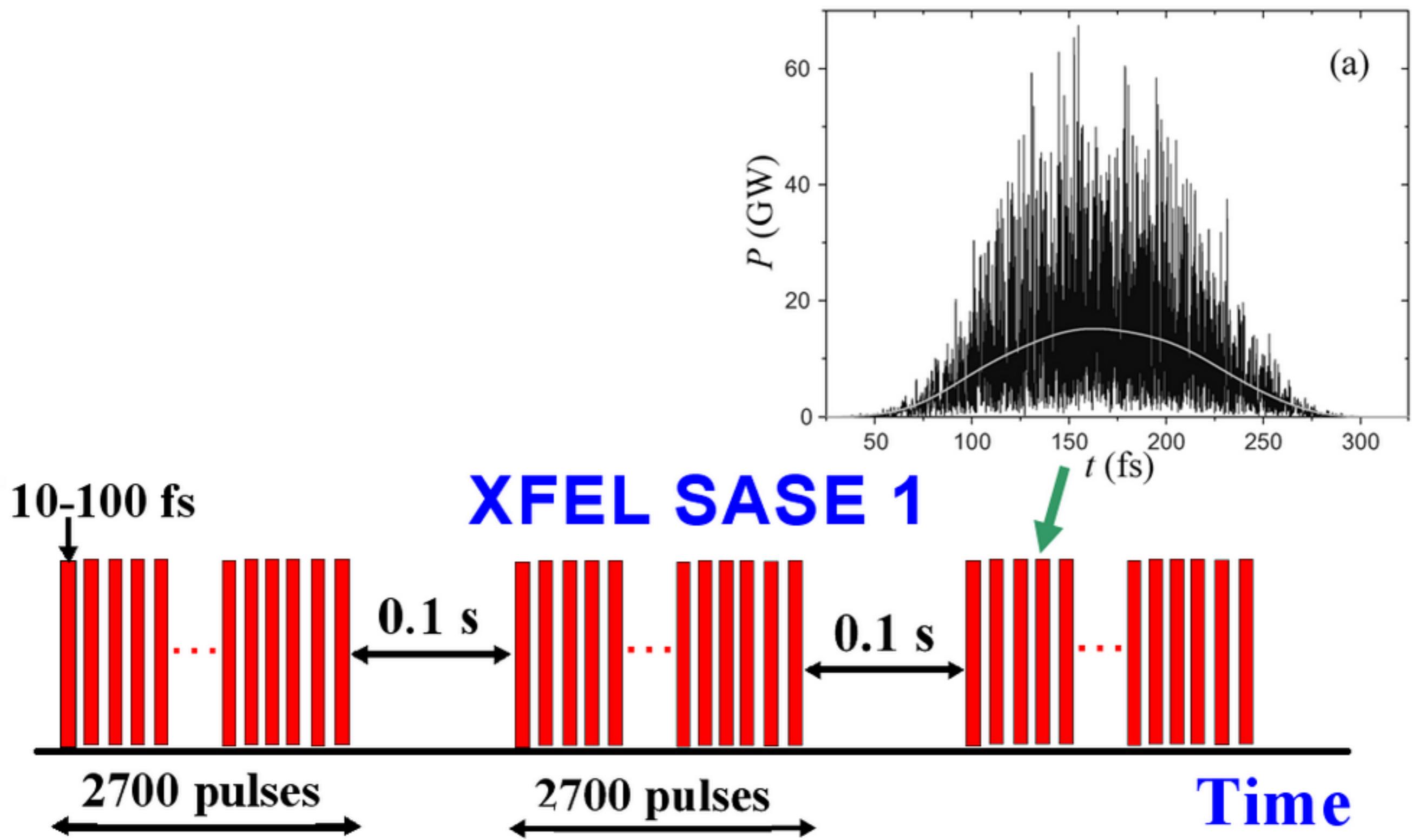
X-ray free electron laser starting from the shot noise in the electron beam has been proposed by [Derbenev, Kondratenko, and Saldin \(1979, 1982\)](#); and also by [Bonifacio, Pelegrini and Narducii \(1984\)](#).

Ratio of XFEL and SR brilliances:

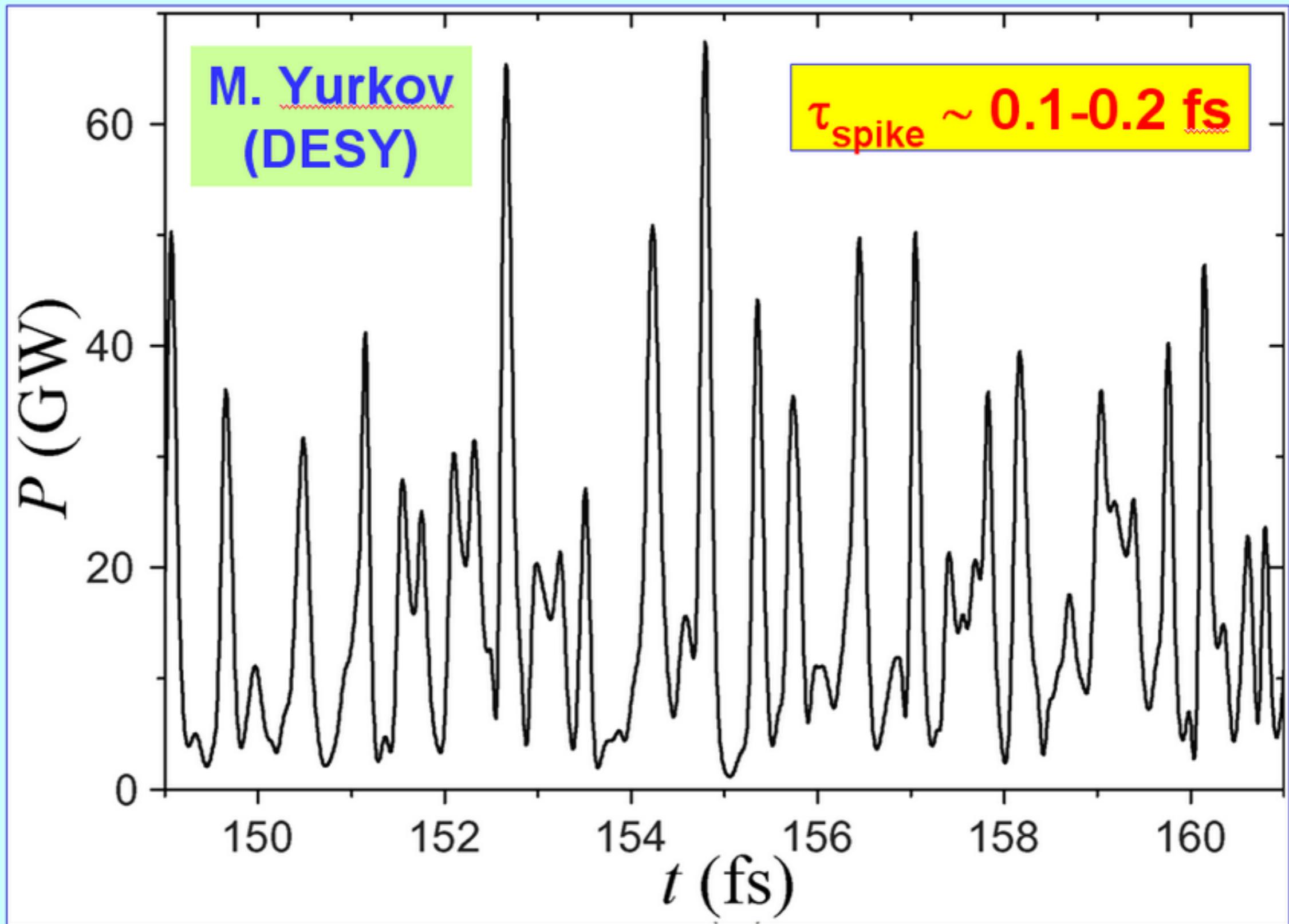
$$\frac{S_{\text{XFEL}}}{S_{\text{SR}}} = 10^9$$

!!

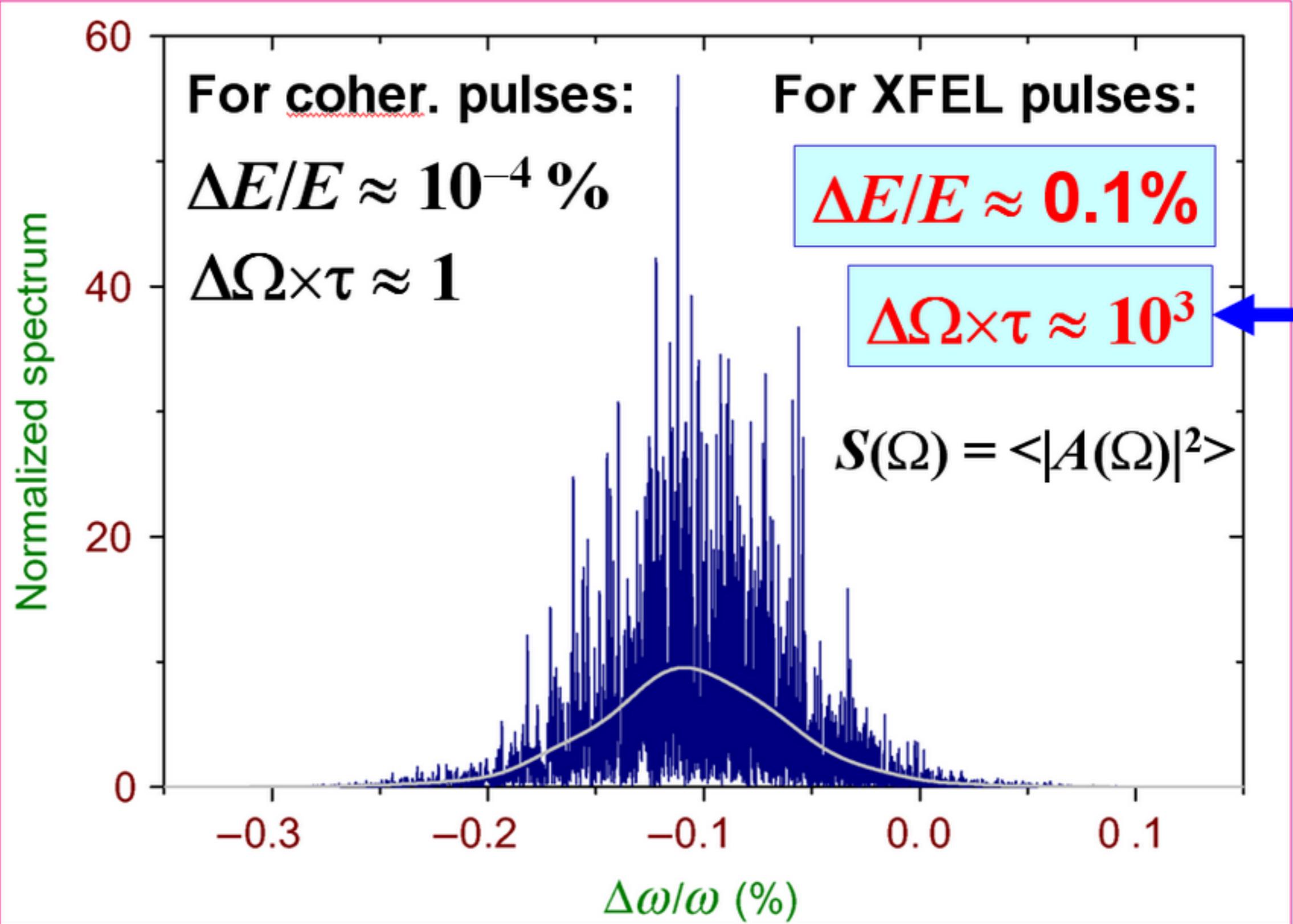
Общая временная структура излучения XFEL



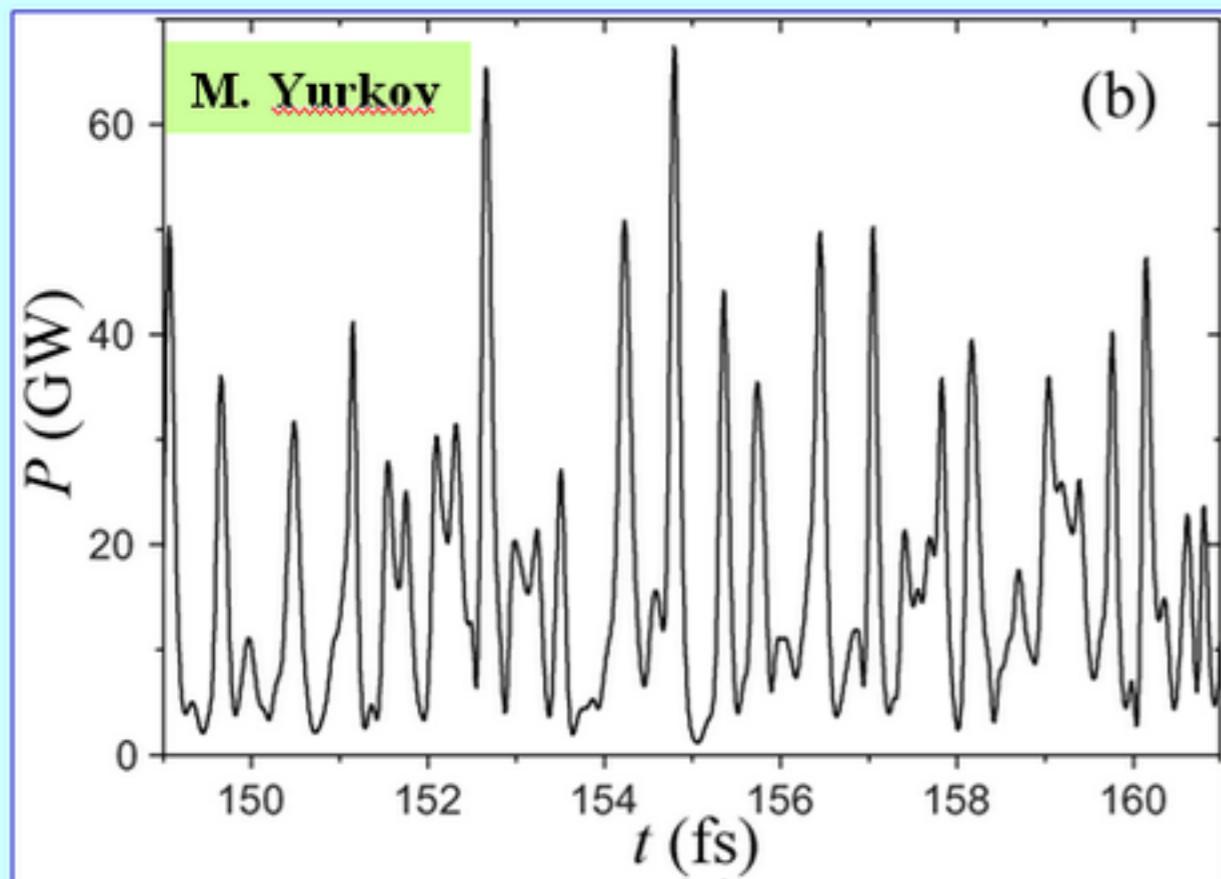
Временная структура фрагмента импульса XFEL



Спектр случайного импульса XFEL

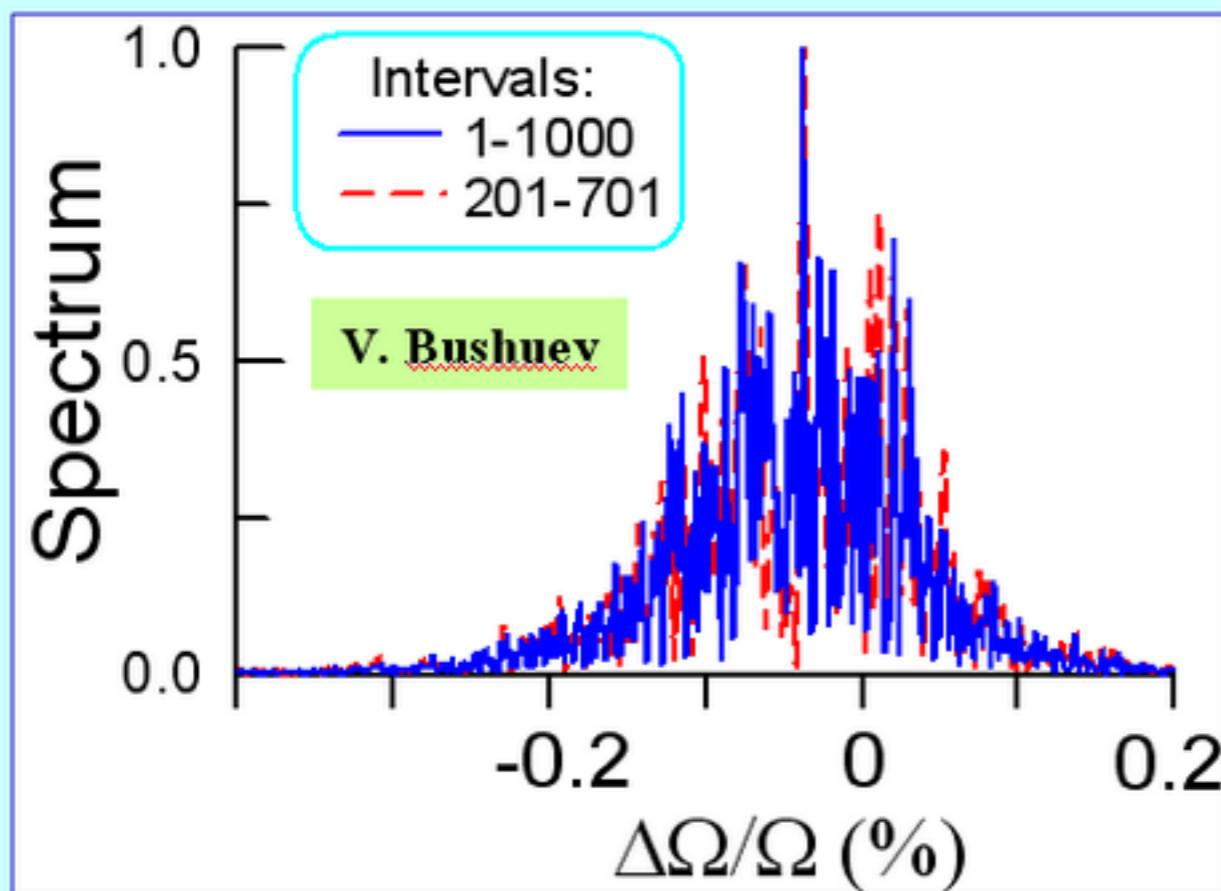


Функция временной когерентности



1. From the definition and calculated values of $A(t)$

$$\gamma(\tau) = \frac{\langle A(t)A^*(t + \tau) \rangle}{\sqrt{I(t)I(t + \tau)}}$$

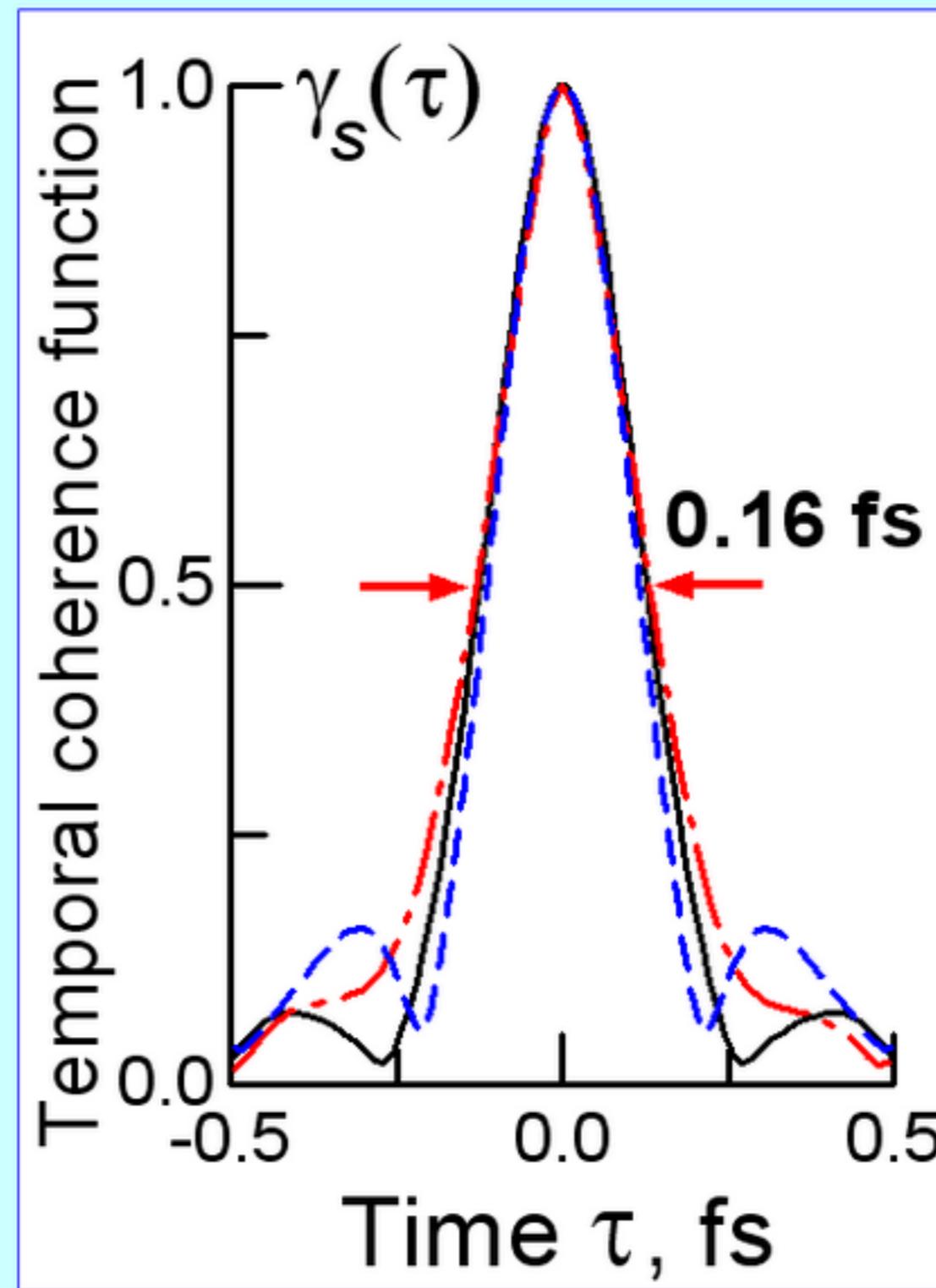


2. As the Fourier-transformation of the pulse spectrum

$$\gamma(\tau) = \int_{-\infty}^{\infty} S(\omega) e^{i\omega\tau} d\omega$$

Функция временной когерентности XFEL

(as a result of various realizations of the complex XFEL SASE1 field amplitude according to calculations of M. Yurkov at al.)



**Излучение SASE XFEL почти полностью
пространственно (поперечно) когерентно**

$$\rho_{coh}^{spatial} \approx 100 - 300 \mu m,$$

Временная (продольная) когерентность очень низкая из-за старта от дробового шума

$$\rho_{coh}^{temporal} \approx 0.05 \mu m,$$

$$\Delta E/E \sim 10^{-3}, \Delta E \sim 10\text{-}30 \text{ эВ}$$

Поле импульса XFEL

$$E(\mathbf{r}, z, t) = A(\mathbf{r}, z, t) \exp(ik_0 z - i\omega_0 t)$$

where $A(\mathbf{r}, z, t)$ is the **slowly varying random and complex pulse amplitude**; $\mathbf{r} = (x, y)$ is the point coordinate at an arbitrary plane at a distance z ; $k_0 = \omega/c = 2\pi/\lambda_0$.

$$\Gamma_{tot}(\mathbf{r}, \rho; t, \tau) = \langle A(\mathbf{r}, z, t) A^*(\mathbf{r} + \rho, z, t + \tau) \rangle$$

is the so-called **mutual coherence function** (MCF), that **describes the correlation between electric field at different points** \mathbf{r} and $\mathbf{r} + \rho$ and **at different times** t and $t + \tau$.

The **mutual coherence function** of the pulse can be written as a product of two correlation functions (spatial and temporal):

$$\Gamma_{tot}(\mathbf{r}, \rho; t, \tau) = \Gamma_\rho(\mathbf{r}, \rho) \Gamma(t, \tau)$$

Дифракции случайных импульсов в монокристаллах (Фурье-формализм)

Slowly varying amplitudes of R - and T -pulses are defined as

$$A_C(\mathbf{r}, z, t) = \iint C(\mathbf{q}, \Omega) A_{in}(\mathbf{q}, \Omega) e^{i\varphi_S + i\varphi_D} d\mathbf{q} d\Omega$$

where complex amplitude coefficients $C = R(\mathbf{q}, \Omega)$ is for reflection, and $C = T(\mathbf{q}, \Omega)$ is for transmission of a plane monochromatic waves. Phases φ_S and φ_D describe the pulse propagation and diffractive broadening in the free space after reflection and transmission.

Spectral amplitudes $A_{in}(\mathbf{q}, \Omega)$ **are also random**.

V.A. Bushuev, J. Synchrotron Rad. 15, 495 (2008).

V. Bushuev, L. Samoylova, Nucl. Instr. and Meth. A., 635, S19 (2011).

Временная корреляционная функция отраженного (R) и прошедшего (T) импульсов:

$$\Gamma_R(t, \tau) = \langle A_R(t) A_R^*(t + \tau) \rangle$$

$$\Gamma_R(t, \tau) = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} g(\Omega, \Omega') R(\Omega) R^*(\Omega') \Phi(\Omega, \Omega'; t, \tau) d\Omega d\Omega'$$

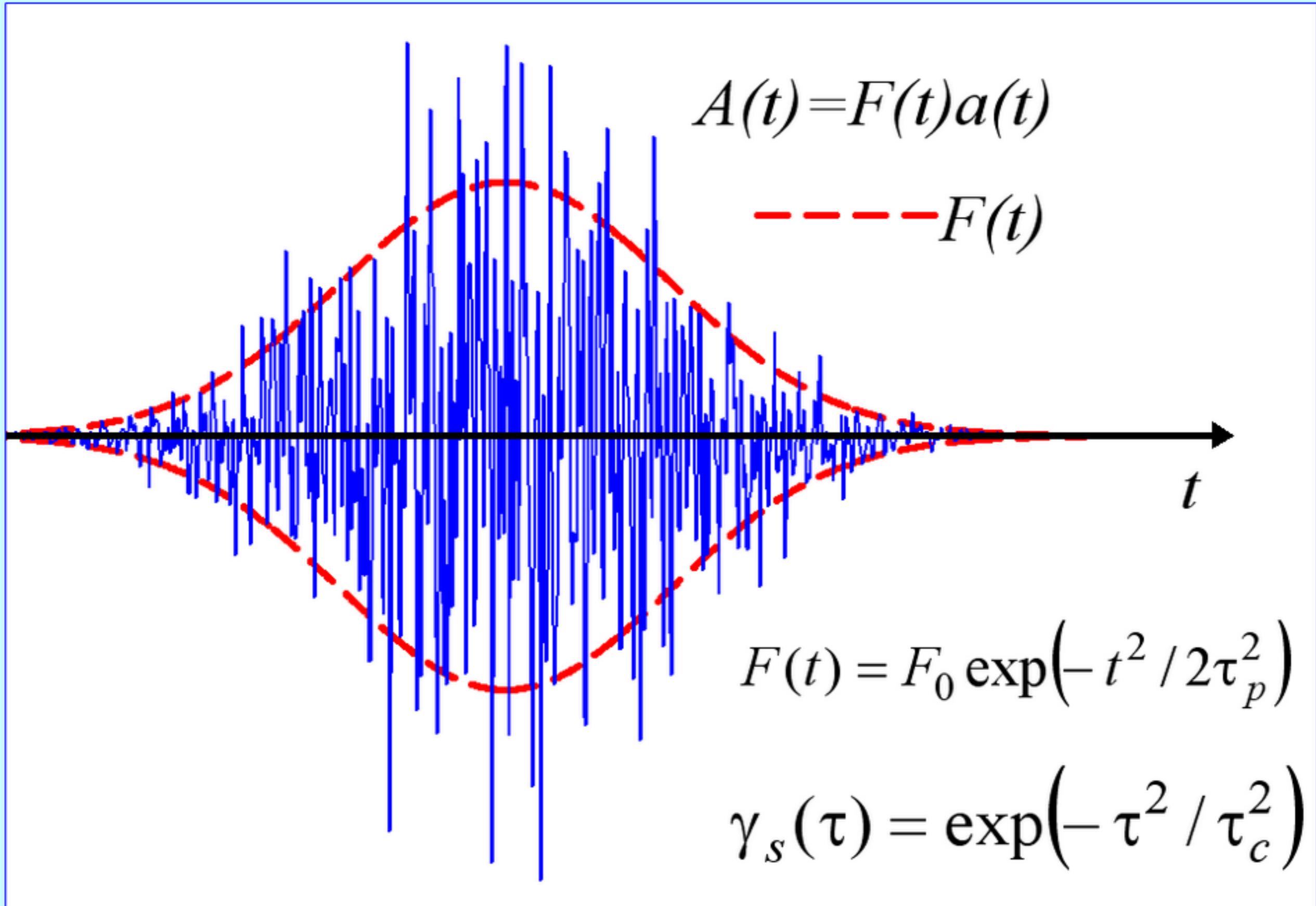
где $g(\Omega, \Omega')$ – **спектральная корреляционная функция** падающего импульса, которая совпадает с корреляционной Функцией излучения на выходе из XFEL:

$$g(\Omega, \Omega') = \langle A(\Omega) A^*(\Omega') \rangle$$

See in more details in our papers:

1. V. Bushuev, L. Samoylova, Nucl. Instr. and Meth. A., 635, S19 (2011).
2. V. Bushuev, L. Samoylova, Cryst. Rep., 56(5), 819 (2011).

Статистическая модель импульса XFEL



$$g(\Omega, \Omega') = \frac{\tau_0 \tau_c}{4\pi \sqrt{1+\xi}} \exp \left[-\frac{(\Omega - \Omega')^2 \tau_0^2}{4(1+\xi)} - \frac{(\Omega^2 + \Omega'^2) \tau_c^2}{8(1+\xi)} \right]$$

где $\xi = \tau_c^2 / (4\tau_0^2)$, τ_0 - длительность импульса, τ_c - время когерентности.

Два предельных случая

1. $\tau_c \gg \tau_0$ - практически **полная когерентность**:

$g(\Omega, \Omega') \approx F(\Omega)F(\Omega')$, где $F(\Omega)$ – спектр огибающей импульса,

$$F(\Omega) = \frac{\tau_0}{\sqrt{2\pi}} \exp(-\Omega^2 \tau_0^2 / 2)$$

2. $\tau_c \ll \tau_0$ – **слабая когерентность**:

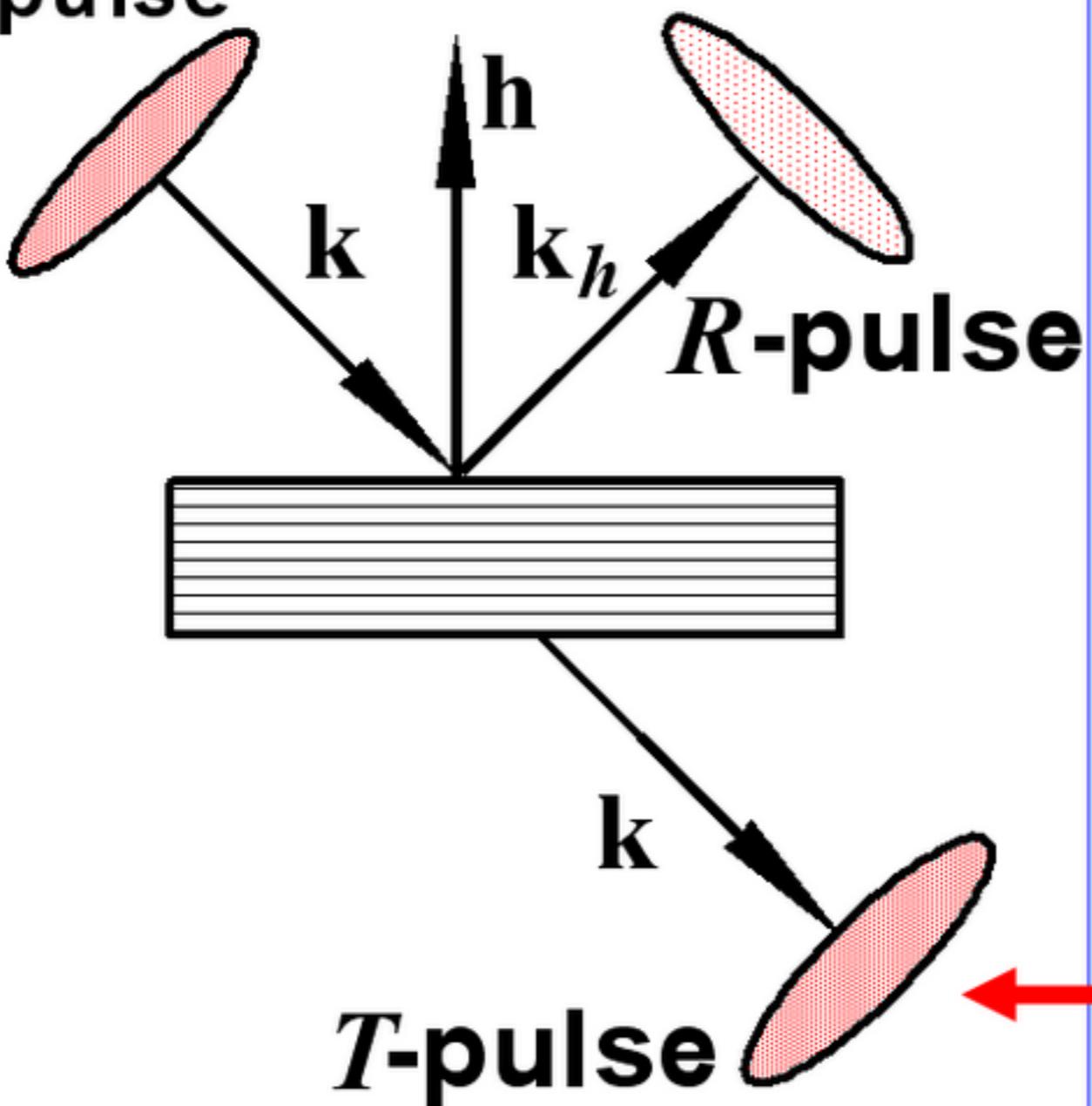
$g(\Omega, \Omega') \approx \delta(\Omega - \Omega')G(\Omega)$, где $G(\Omega)$ – спектр спайков,

$$G(\Omega) = \frac{\tau_c}{2\sqrt{\pi}} \exp(-\Omega^2 \tau_c^2 / 4)$$

Схема дифракции в геометрии Брэгга

Bragg case

Incident XFEL
pulse



Функция временной когерентности прошедших импульсов

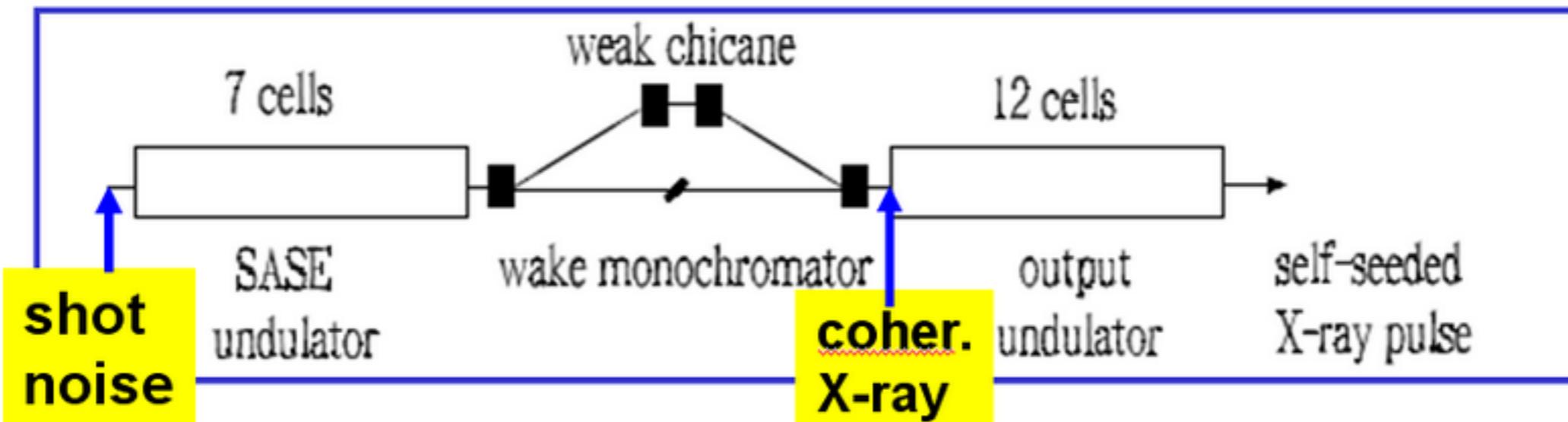
$$\gamma_T(t, \tau) = \frac{\Gamma_T(t, \tau)}{\sqrt{I_T(t)I_T(t + \tau)}}$$

Интегральное время когерентности (Мандель):

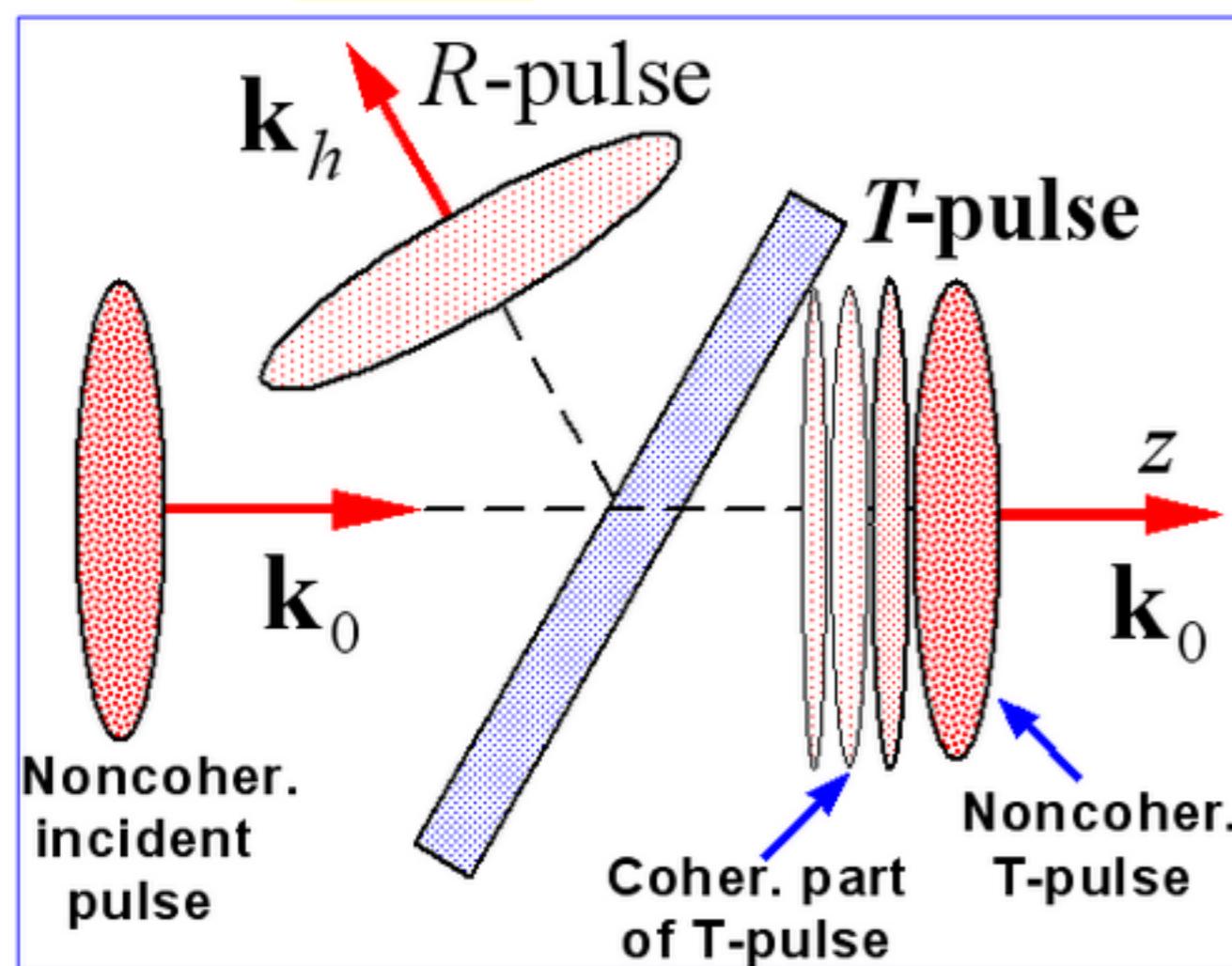
$$\tau_{Tcoh}(t) = \int_{-\infty}^{\infty} |\gamma_T(t, \tau)|^2 d\tau$$

Self-seeding scheme with wake monochromator for narrow-bandwidth X-ray FELs

[1] G. Geloni, V. Kocharyan, E. Saldin, DESY 10-053 (2010)



Bandwidth down to 10^{-5}



Отметим, что какой-либо анализ функции временной когерентности импульсов, прошедших через кристалл в геометрии Брэгга, в работе [1] и др. публикациях **отсутствует**.

G. Geloni, V. Kocharyan, E. Saldin, A simple method for controlling the line width of SASE X-ray FELs, DESY 10-053 (2010).

R. R. Lindberg, and Yu. V. Shvyd'ko, Time dependence of Bragg forward scattering and self-seeding of hard x-ray free-electron lasers // ArXiv: 1202.1472v3 (9 Mar 2012) (Advanced Photon Source, Argonne National Laboratory, Argonne, IL 60439, USA).

**nature
photonics**

ARTICLES

PUBLISHED ONLINE: 12 AUGUST 2012 | DOI: 10.1038/NPHOTON.2012.180

Demonstration of self-seeding in a hard-X-ray free-electron laser

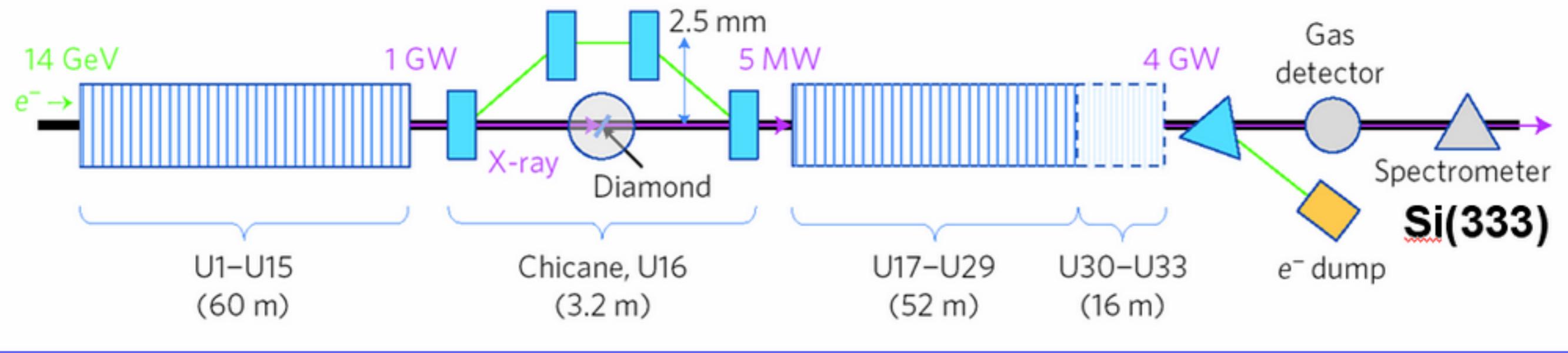
J. Amann¹, W. Berg², V. Blank³, F.-J. Decker¹, Y. Ding¹, P. Emma^{4*}, Y. Feng¹, J. Frisch¹, D. Fritz¹, J. Hastings¹, Z. Huang¹, J. Krzywinski¹, R. Lindberg², H. Loos¹, A. Lutman¹, H.-D. Nuhn¹, D. Ratner¹, J. Rzepiela¹, D. Shu², Yu. Shvyd'ko², S. Spampinati¹, S. Stoupin², S. Terentyev³, E. Trakhtenberg², D. Walz¹, J. Welch¹, J. Wu¹, A. Zholents² and D. Zhu¹

1. SLAC National Accelerator Laboratory, Stanford, California 94309, USA,

2. Argonne National Laboratory, Argonne, Illinois 60439, USA,

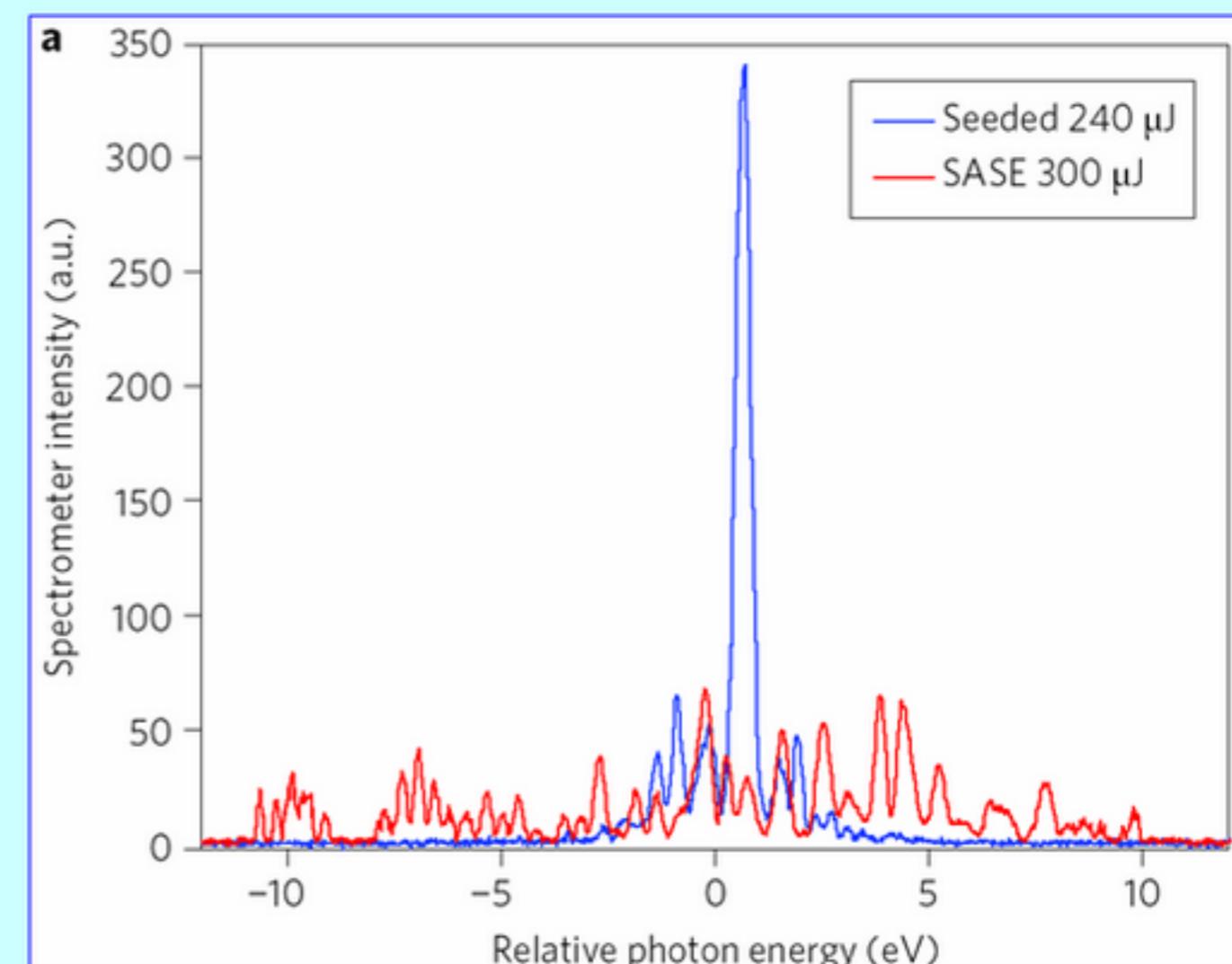
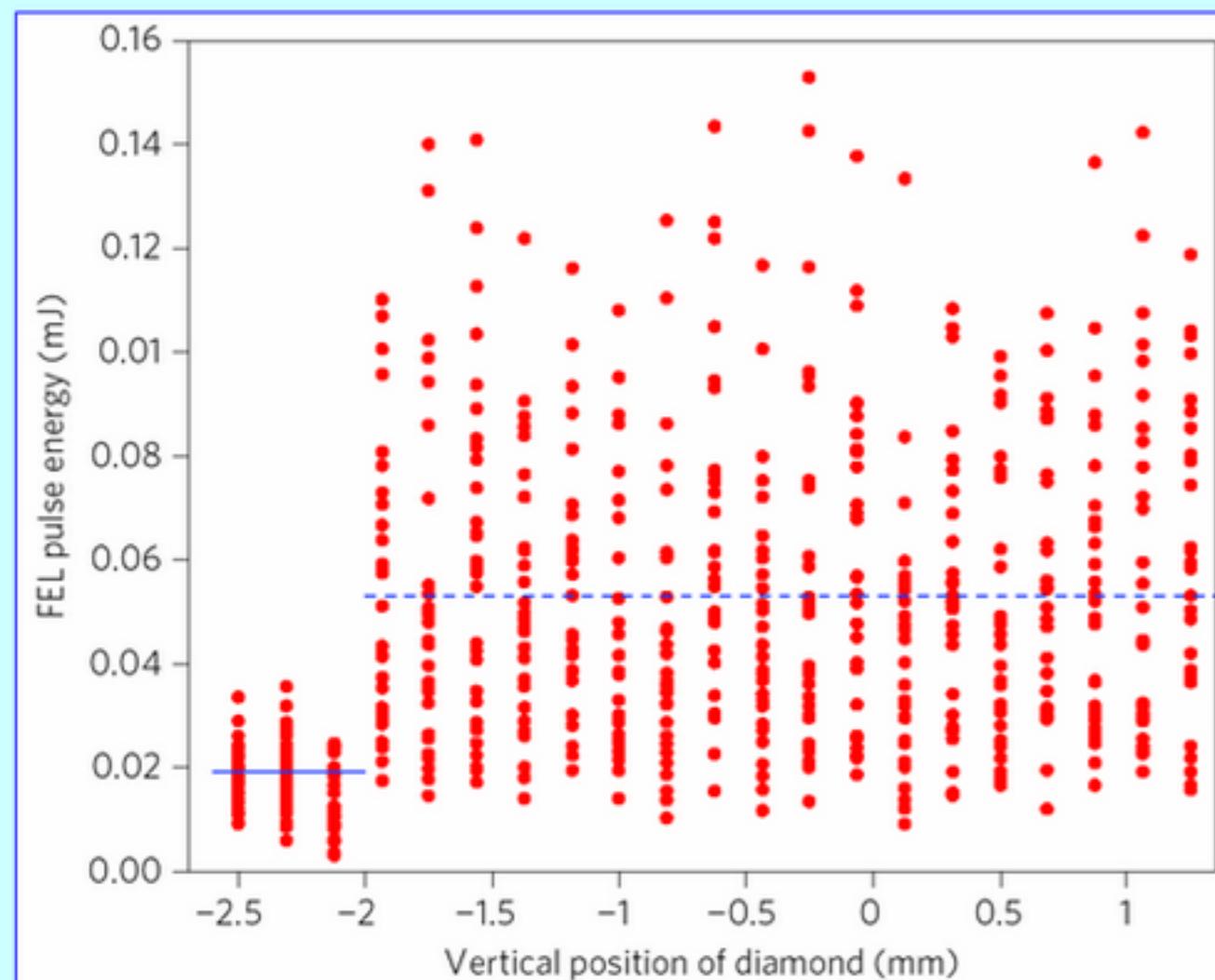
3. Technical Institute for Superhard and Novel Carbon Materials, Troitsk, Russia 142190,

4. Lawrence Berkeley National Laboratory, Berkeley, California 94720, USA.



0.15 nm, 10 fs, diamond(400), 110 μ m

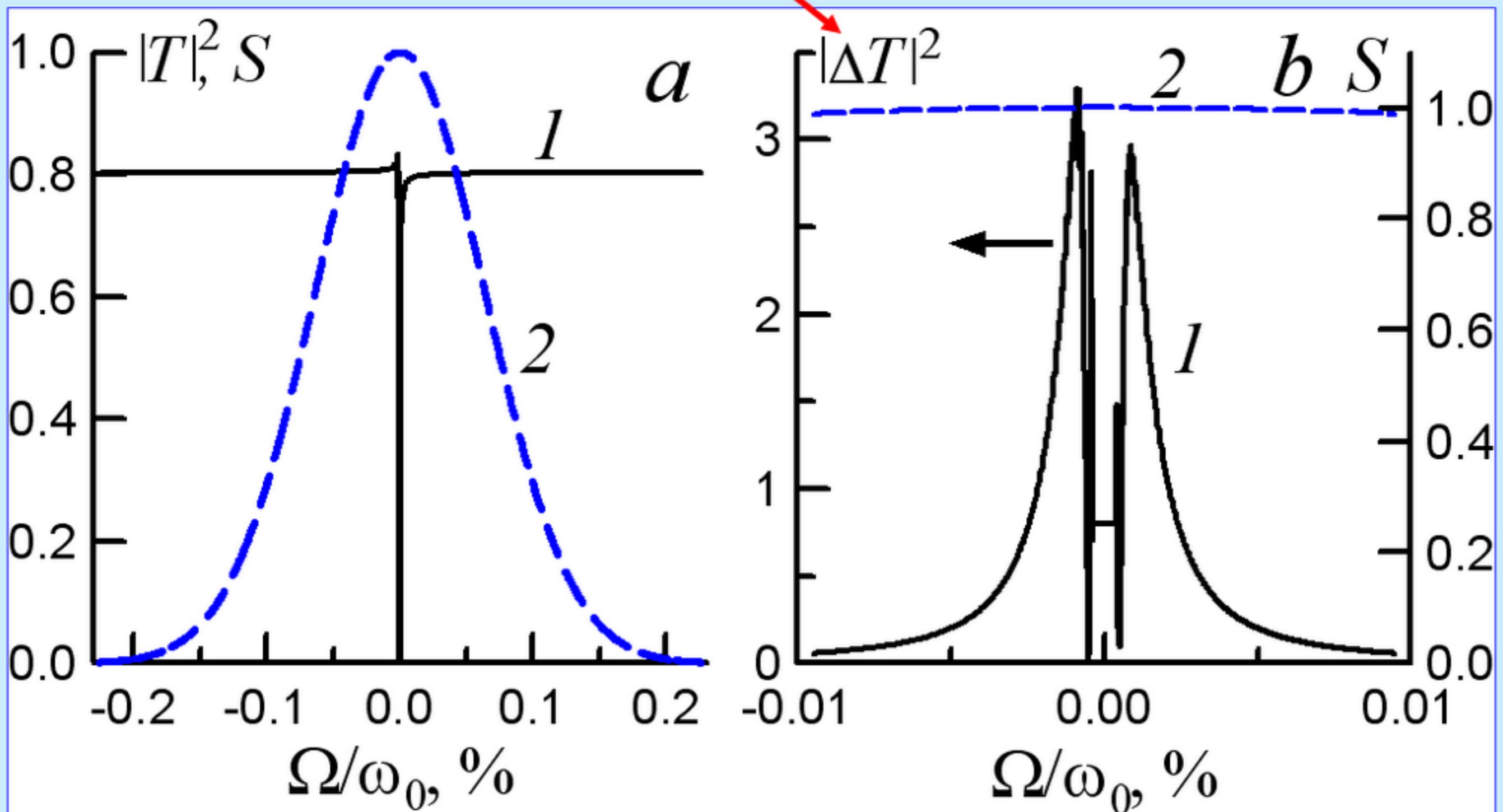
20 eV → 0.4 eV



Прохождение в случае Брэгга

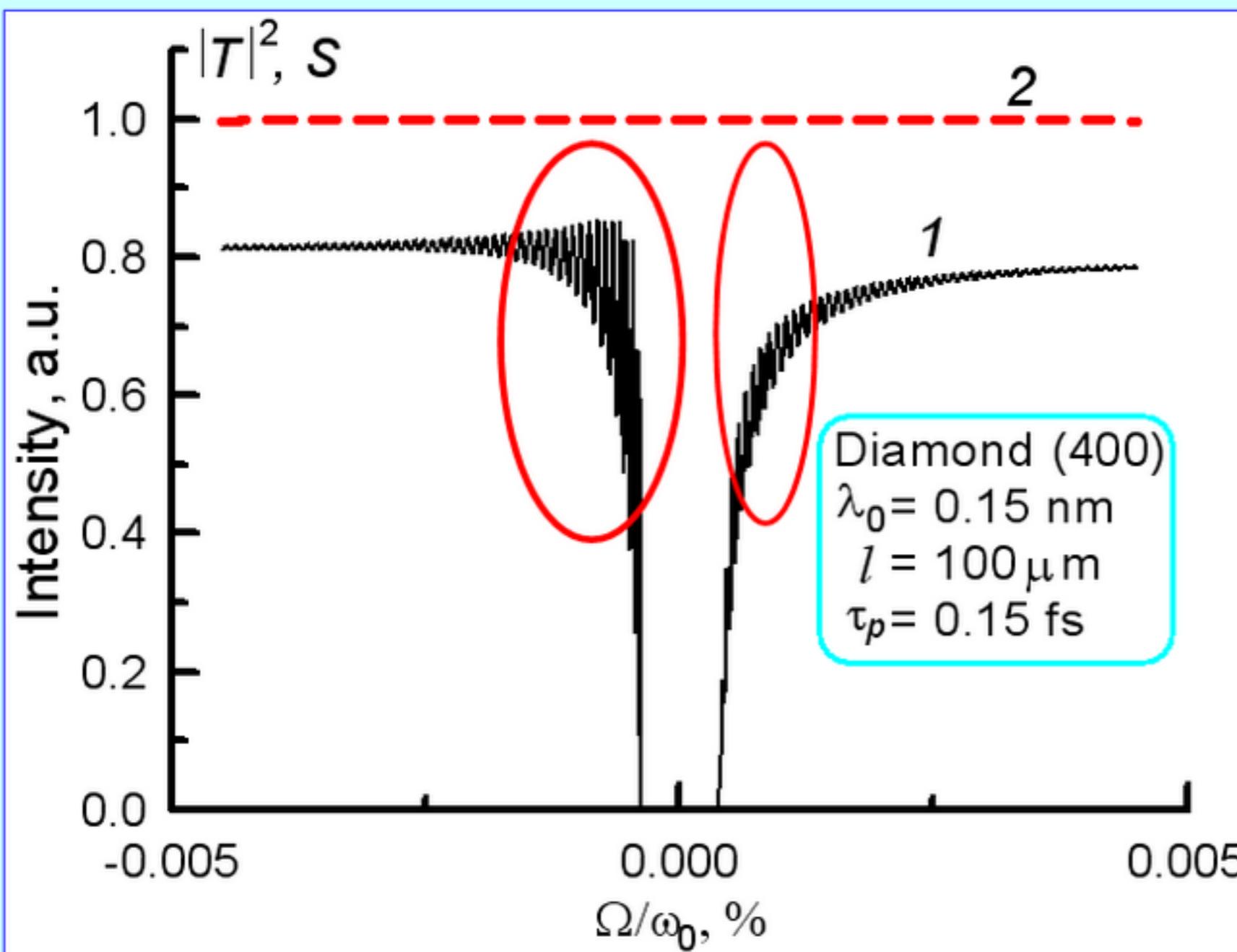
$$\Delta T(\Omega) = T(\Omega) - T_{\infty}$$

Bragg case

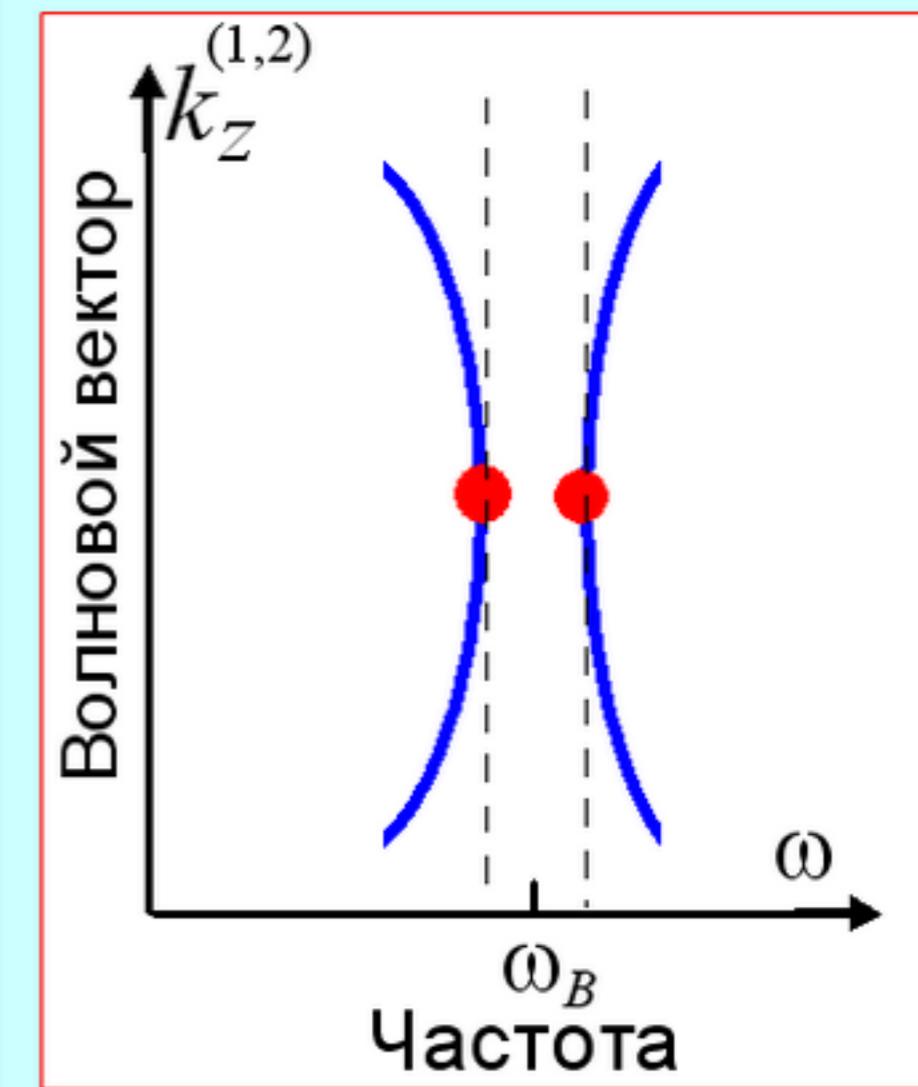


Spectral transmission curve $|T(\Omega)|^2$ (1) and a spectrum of the incident pulse $S(\Omega)$ (2). Parameters: $\lambda_0 = 0.15 \text{ nm}$, $\tau_p = 0.15 \text{ fs}$; diamond, reflection (400), crystal thickness $l = 100 \mu\text{m}$.

Прохождение в геометрии Брэгга

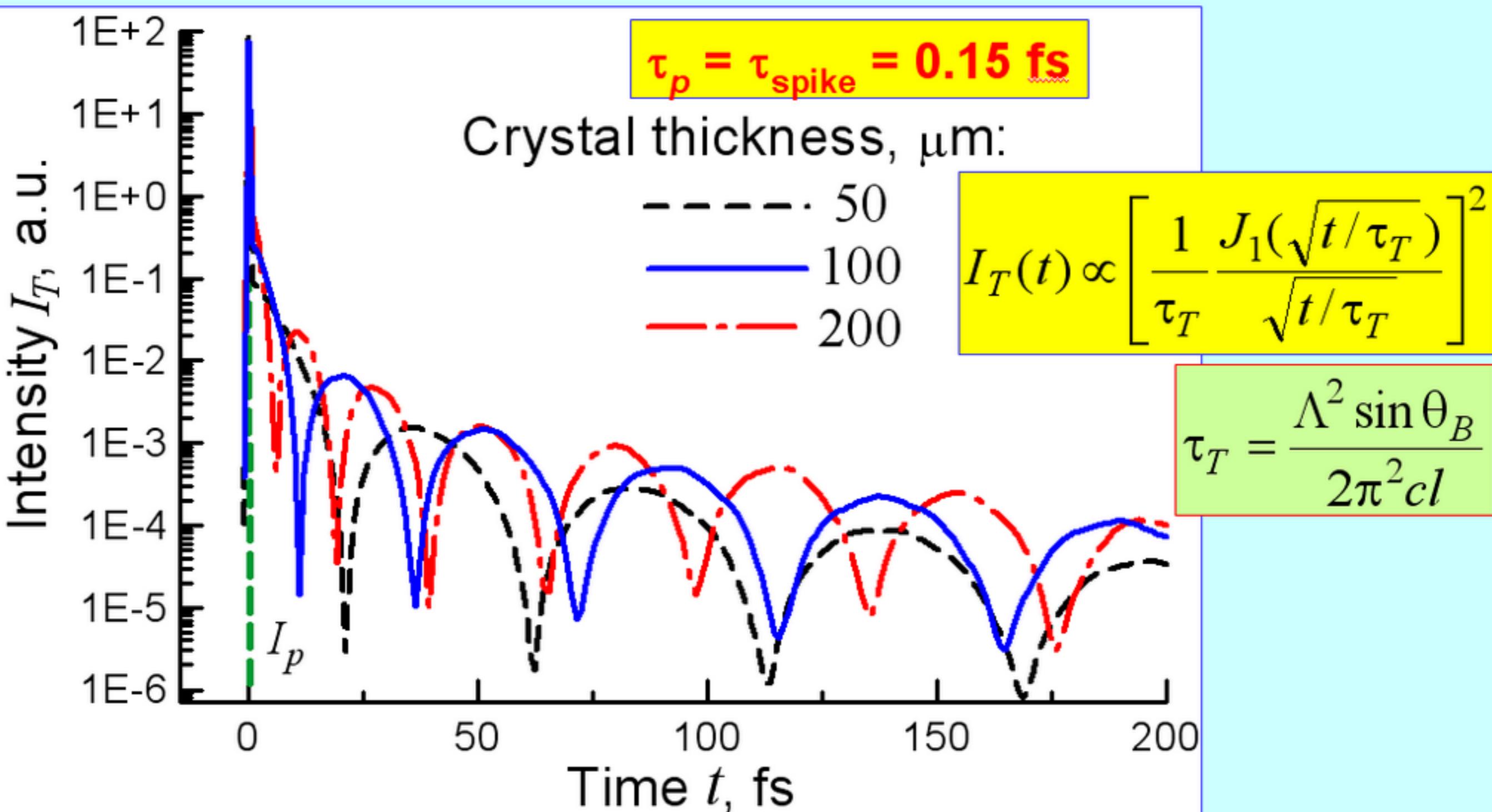


$$V_{gr}^{(1,2)} = \frac{\partial k_z^{(1,2)}}{\partial \omega}$$



Spectral transmission curve $|T(\Omega)|^2$ (1) and a spectrum of the incident pulse $S(\Omega)$ (2). Parameters: $\lambda_0 = 0.15 \text{ nm}$, $\tau_p = 0.15 \text{ fs}$; diamond, reflection (400), crystal thickness $l = 100 \mu\text{m}$.

Прохождение ультра-короткого импульса



Intensity of pulses $I_T(t)$, transmitted through the crystals with various thickness in conditions of ultra-short incident pulse with time duration $\tau_p = \tau_{\text{spike}} = 0.15 \text{ fs}$.

А теперь о самом главном...

$$I_{\text{когер}}(t) = |A_1 + A_2 + \dots|^2; \quad I_{\text{некогер}}(t) = I_1 + I_2 + \dots$$

В нашем случае:

$$A_T(t) = T_\infty A_{in}(t) + \int_{-\infty}^{\infty} A_{in}(\Omega) \Delta T(\Omega) e^{-i\Omega t} d\Omega$$

$$\Delta T(\Omega) = T(\Omega) - T_\infty$$

В области $t \geq (2 \div 3)\tau_p$, где $A_{in}(t) \approx 0$

$$\langle A_T(t) A_T^*(t + \tau) \rangle \approx \int_{-\infty}^{\infty} S_{in}(\Omega) |\Delta T(\Omega)|^2 e^{i\Omega\tau} d\Omega$$

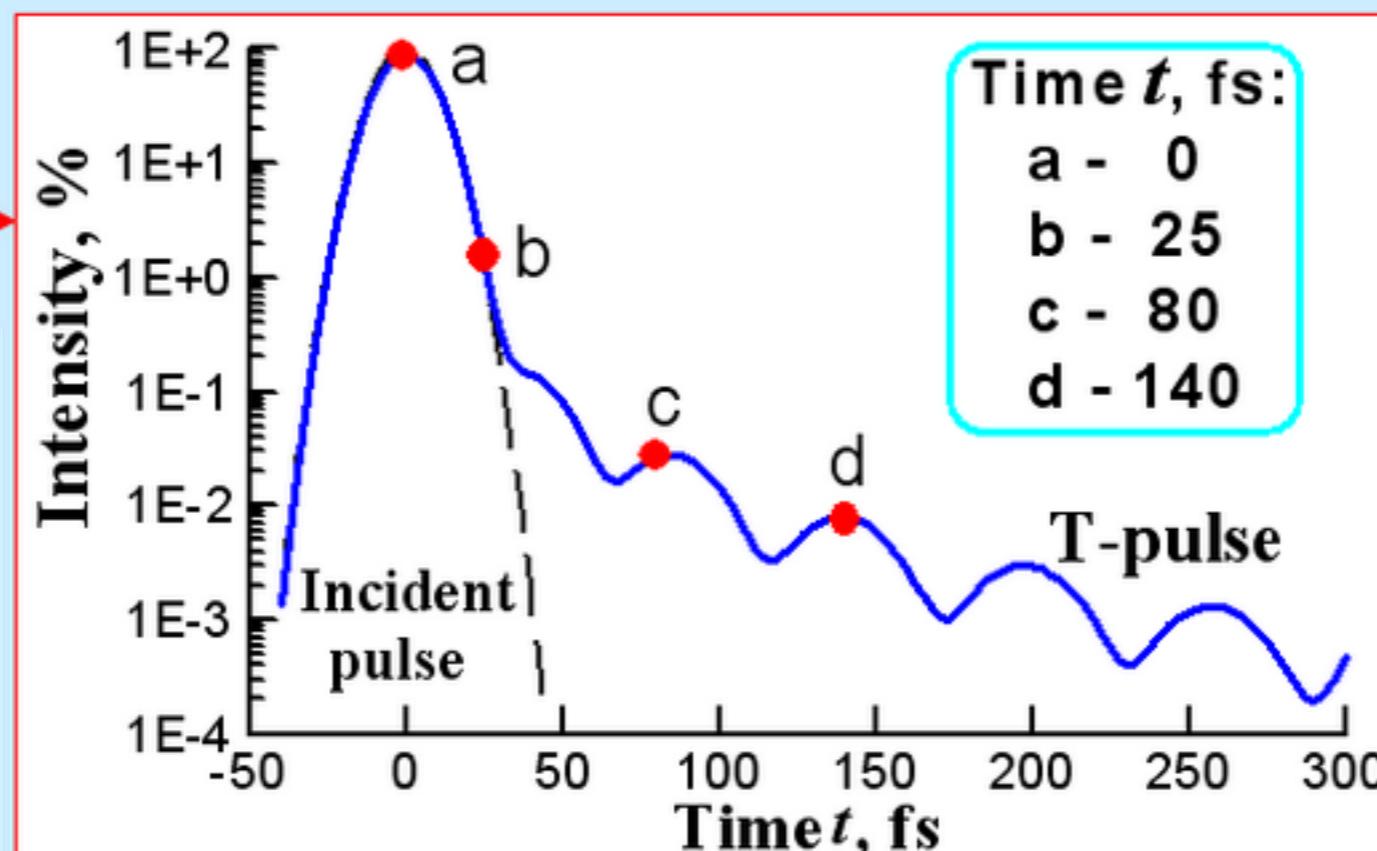
Время когерентности прошедшего импульса

$$\tau_{cT} \approx \frac{1}{\Delta\Omega_B} \approx (20 \div 25) \text{ fs}$$

**Зависит от времени
(см. след. слайд)**

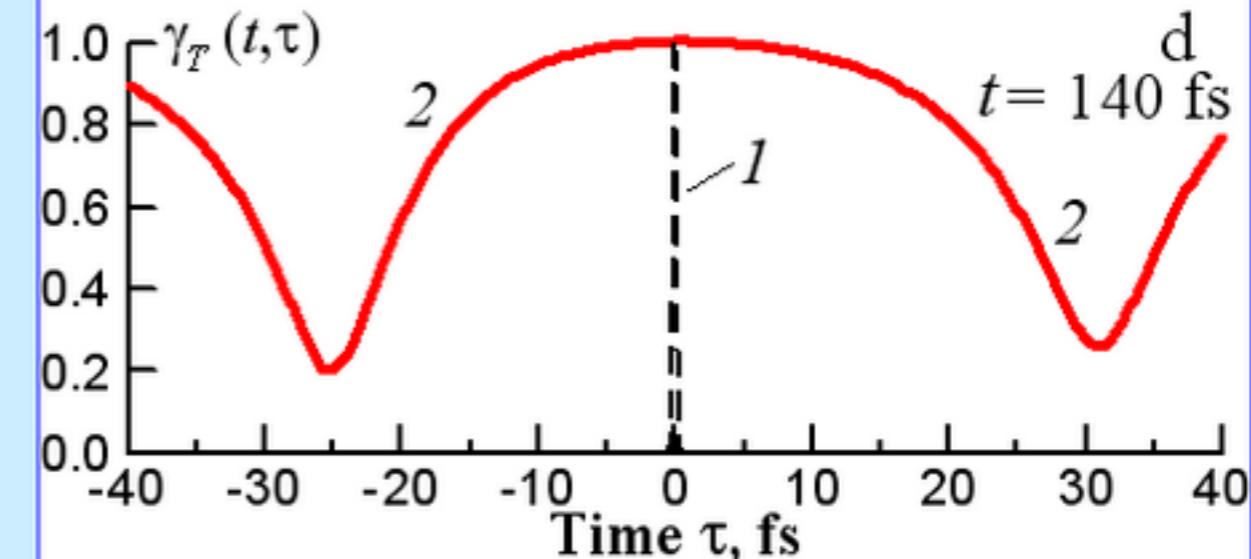
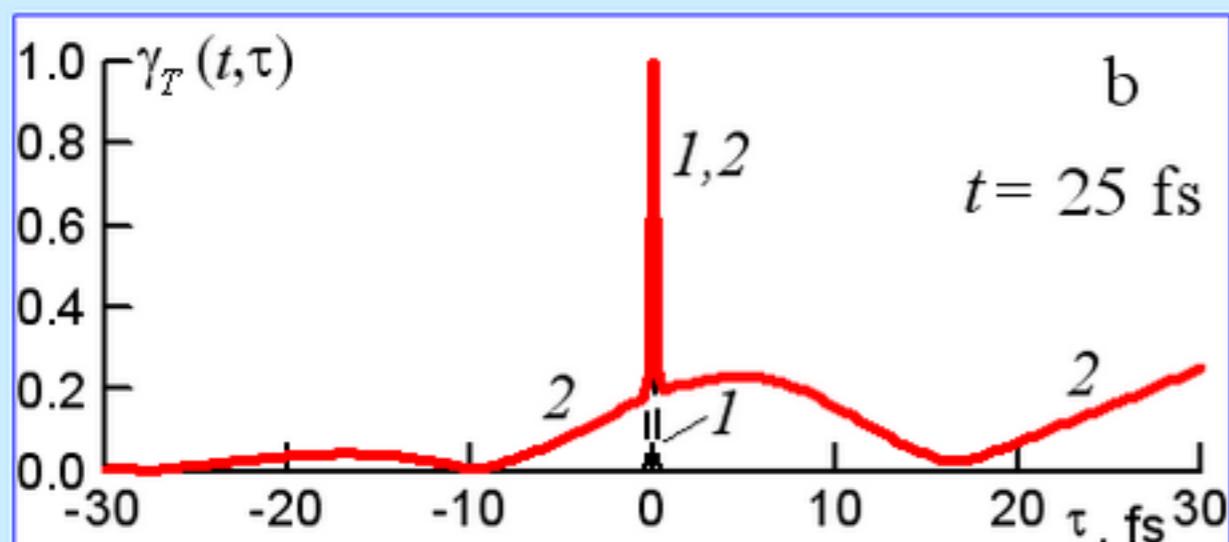
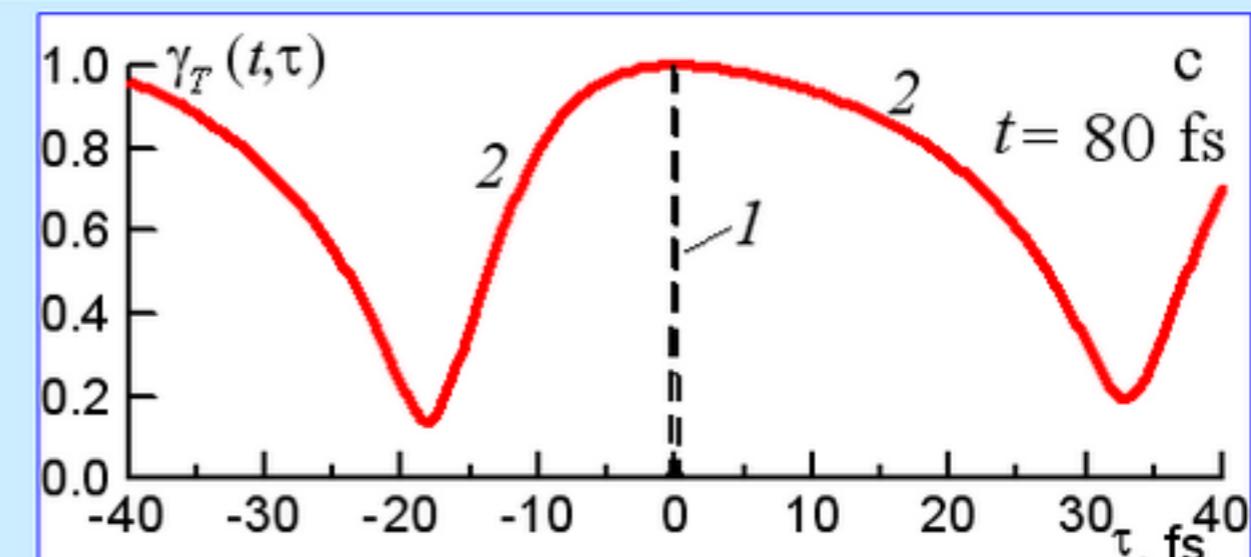
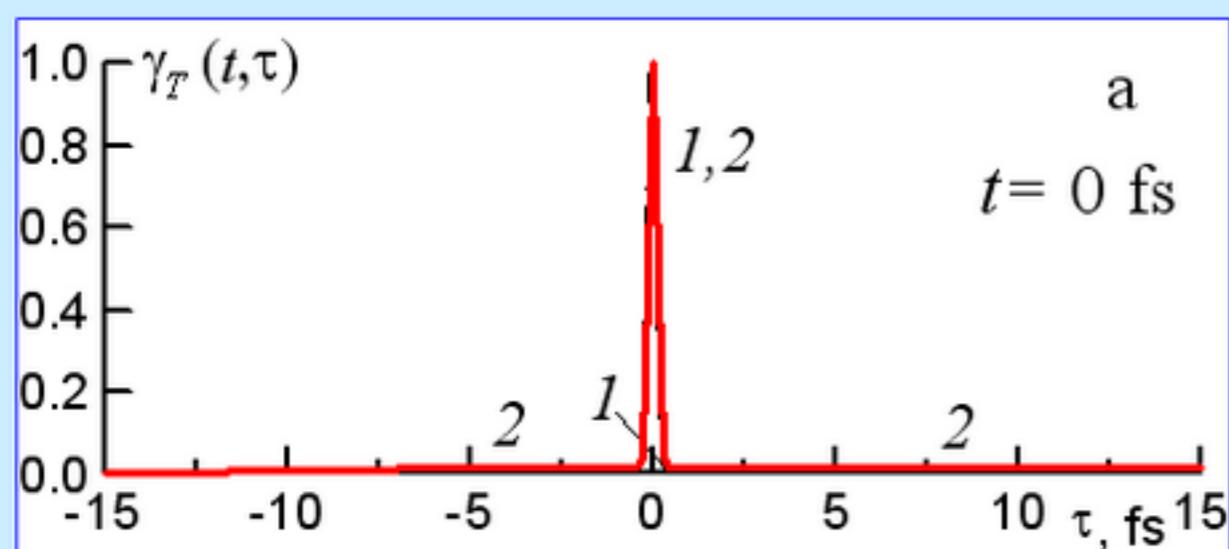
**Transmitted
pulse** →

Diamond(400),
 $\lambda_0 = 0.15 \text{ nm}$,
 $\tau_p = 20 \text{ fs}$,
 $\tau_c = 0.22 \text{ fs}$,
 $l = 50 \mu\text{m}$

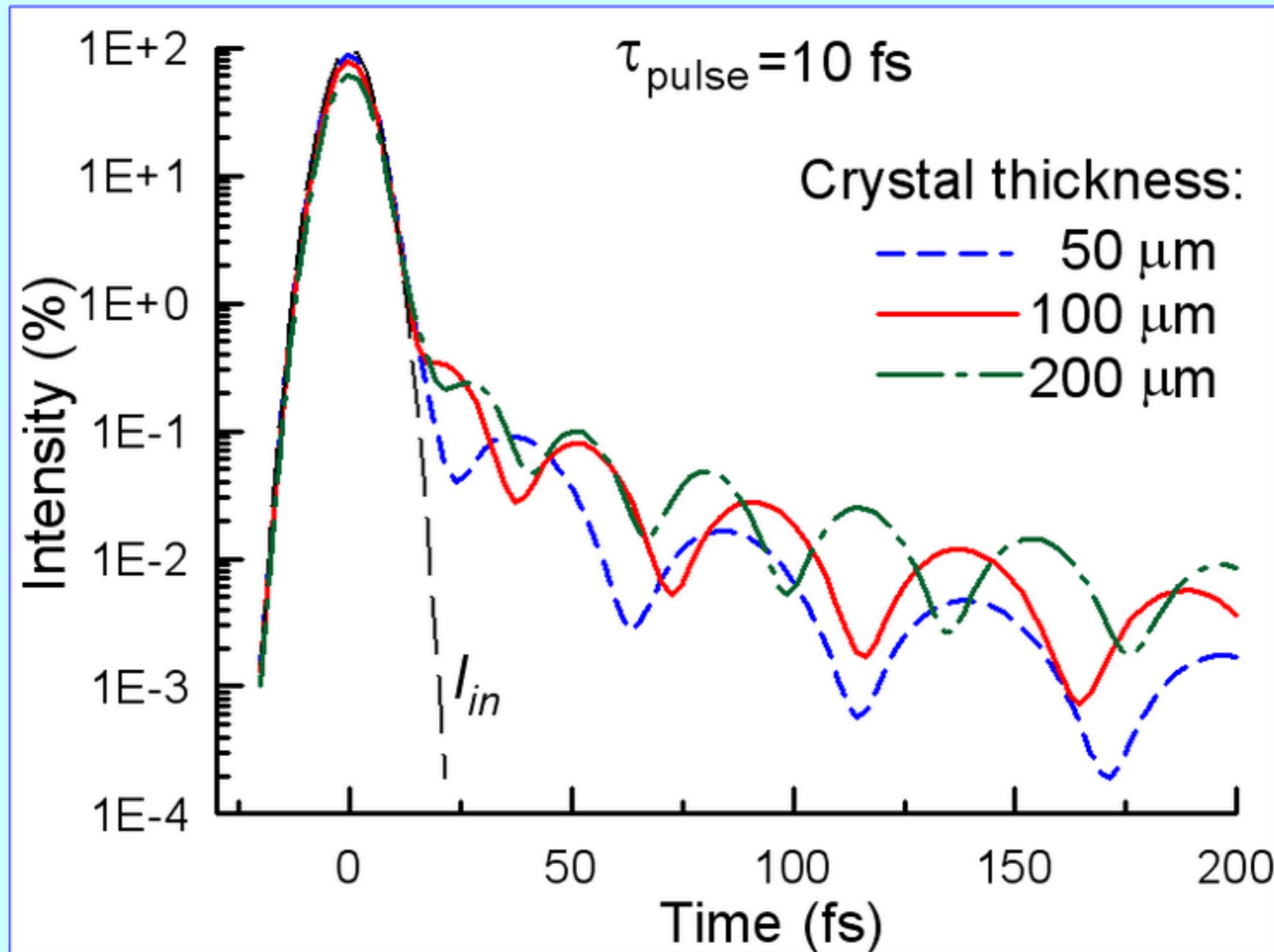


Bragg case

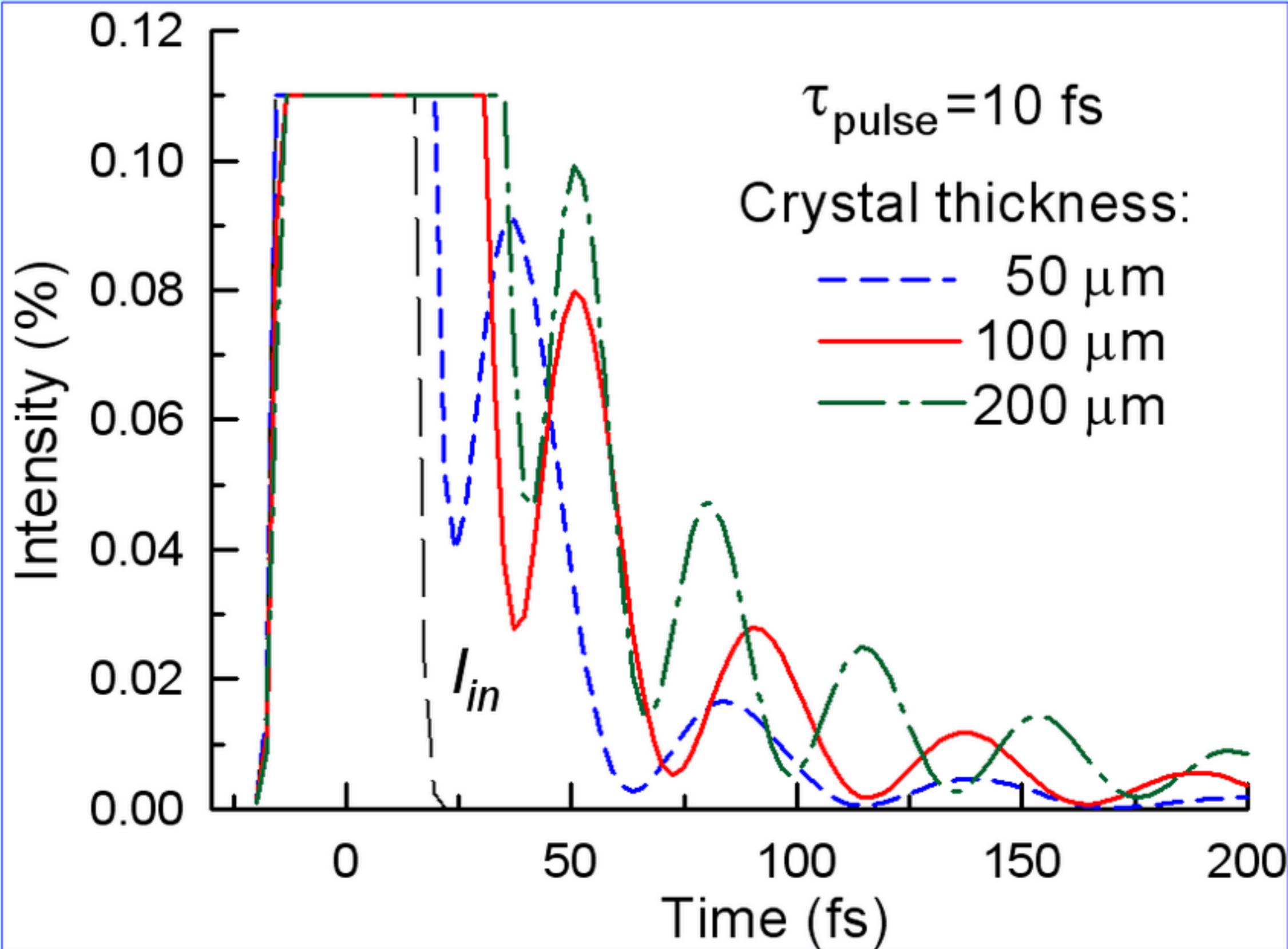
Temporal coherence functions for incident (1) and transmitted (2) pulses at the various time moments t (see below).



Влияние толщины кристалла (короткий импульс)

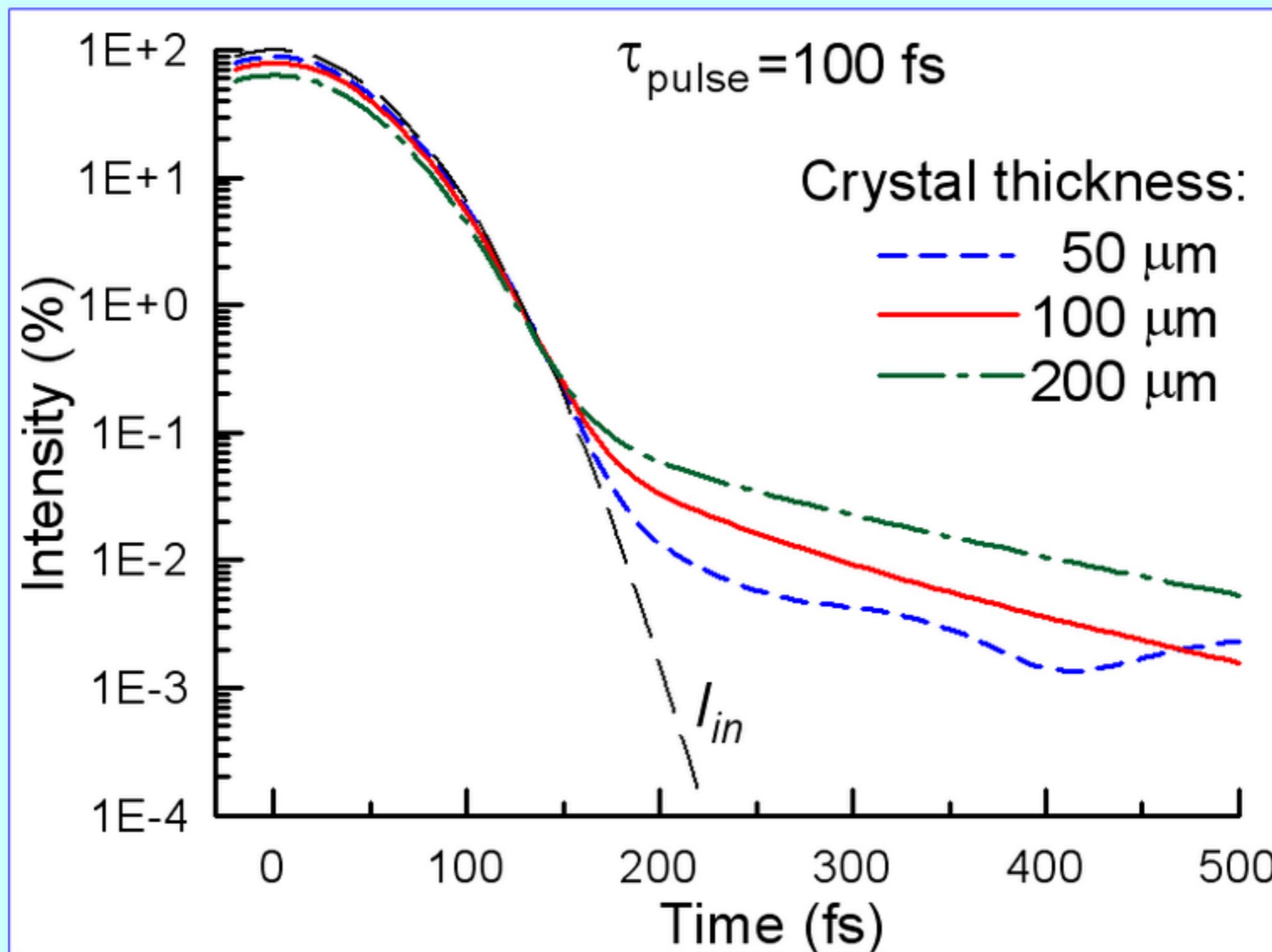


Интенсивности импульсов $I_T(t)$, прошедших через кристаллы с толщинами 50, 100 и 200 мкм. Длительность импульса 10 фс, время когерентности 0.22 фс.

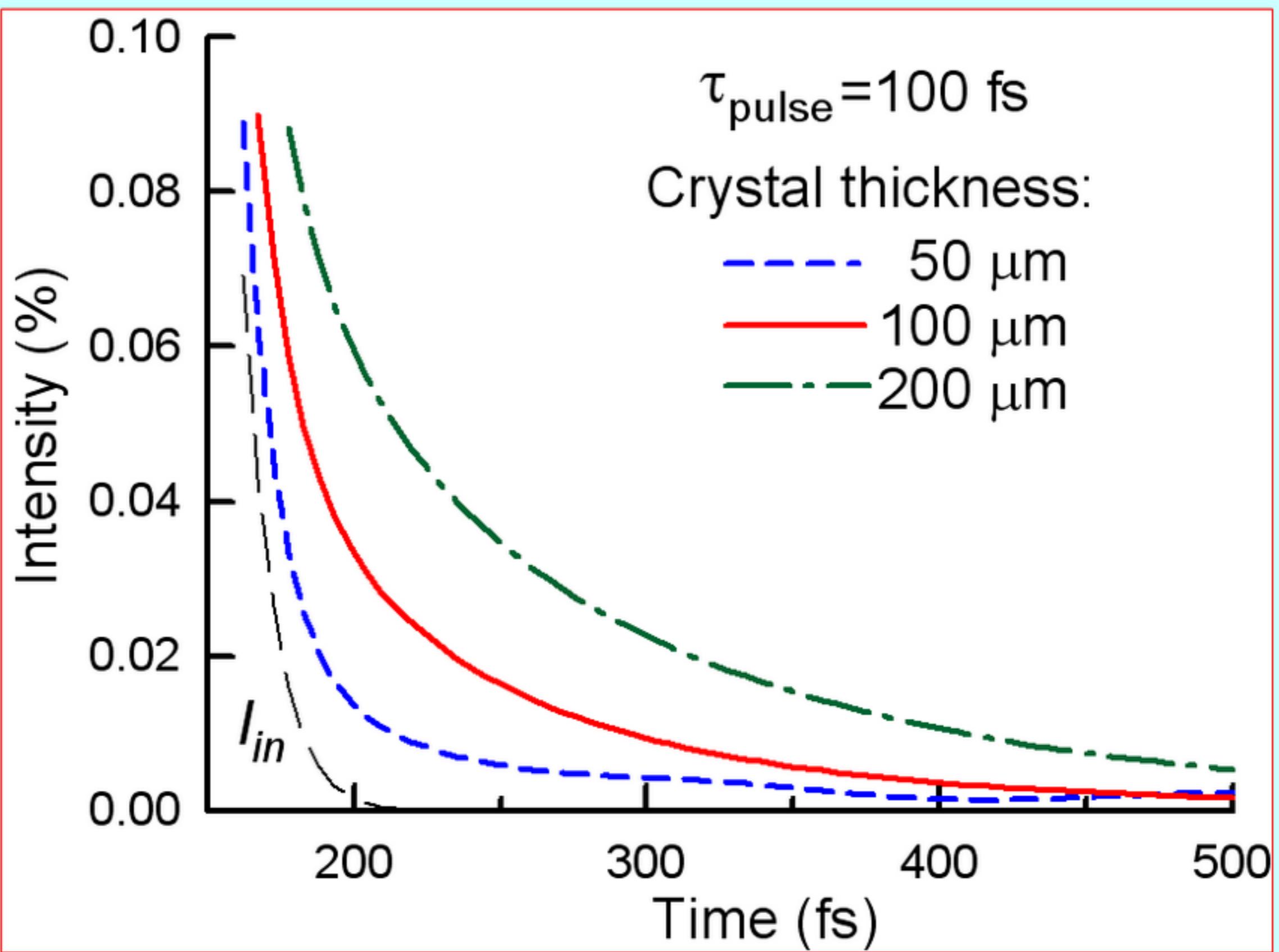


То же самое, что и на предыдущем рис., но в линейном масштабе для интенсивности.

Влияние толщины кристалла (длинный импульс)

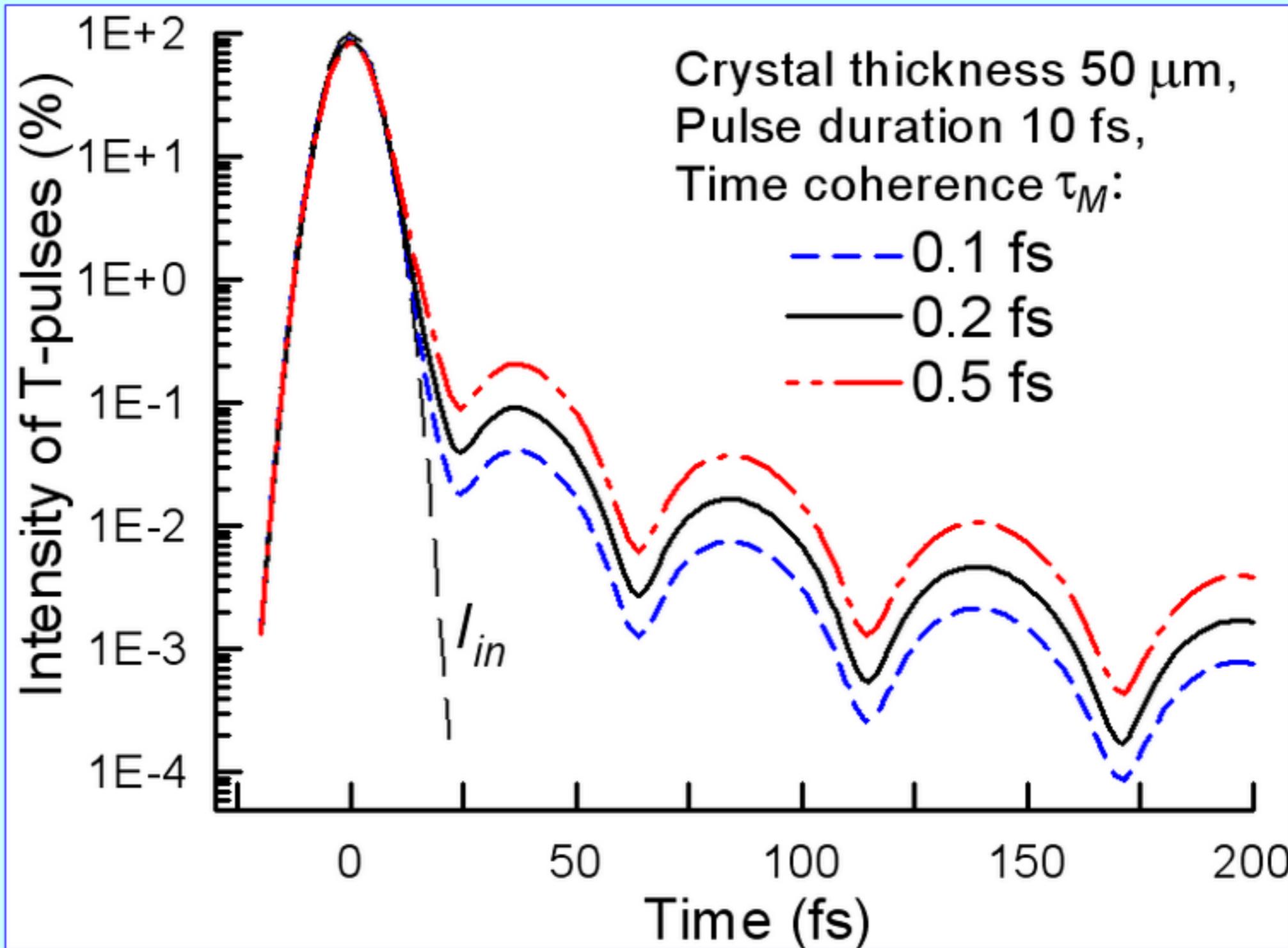


Интенсивности импульсов $I_T(t)$, прошедших через кристаллы с толщиной 50, 100 и 200 мкм. Длительность падающего импульса **100 фс**, время когерентности **0.22 фс**.



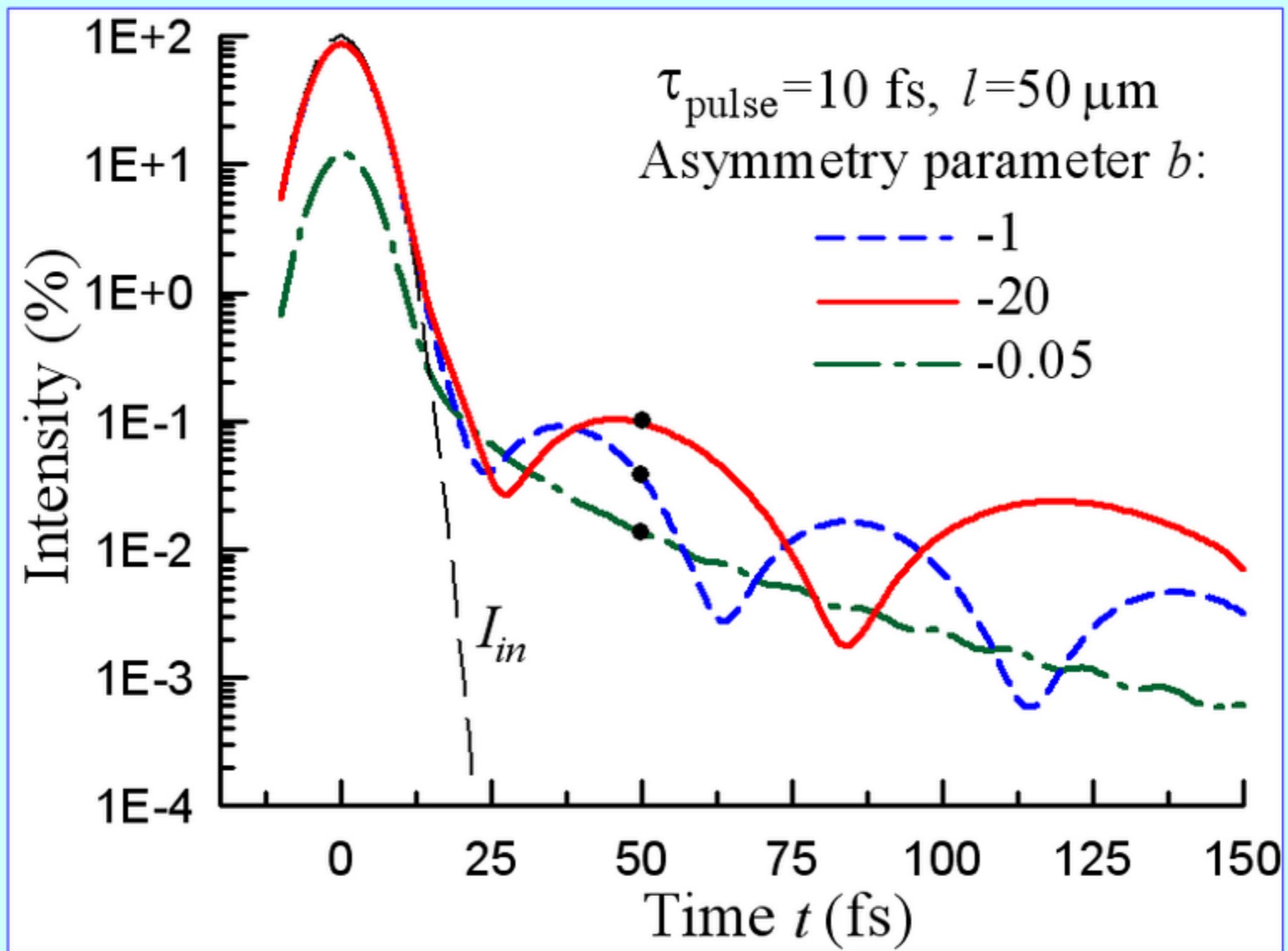
Тоже самое, что и на предыдущем Рис., но в линейном масштабе (фрагмент при $t > 150$ фс).

Влияние времени когерентности

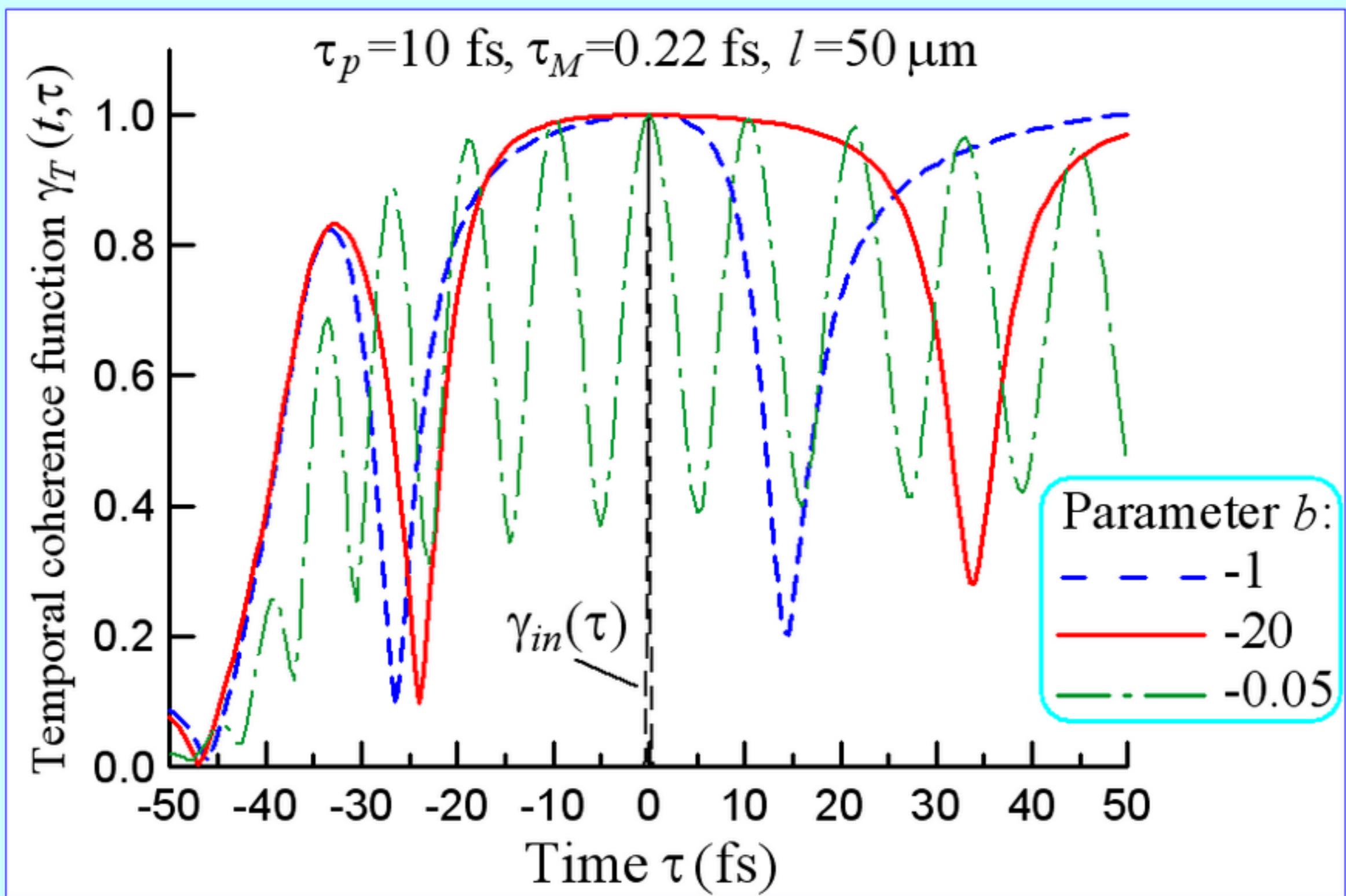


Влияние времени когерентности на интенсивность T -импульса.
Толщина кристалла $l = 50$ мкм, длительность импульса
 $\tau_p = 10$ фс, время когерентности $\tau_M = 0.1, 0.2$ и 0.5 фс.

Влияние коэффициента асимметрии отражения



Влияние величины коэффициента асимметрии на интенсивность и форму прошедшего импульса XFEL.



Влияние величины коэффициента асимметрии отражения b на функции временной когерентности прошедших импульсов в окрестности момента времени $t = 50 \text{ фс}$, показанного черными кружками на предыдущем рисунке.

Основные результаты:

1. В рамках статистической оптики рассмотрено влияние дифракции на функцию временной когерентности случайных импульсов РЛСЭ, прошедших через кристалл в геометрии Брэгга
2. Динамическая дифракция в кристаллах существенно изменяет форму проходящих импульсов и вид функции временной когерентности по сравнению с гауссовыми функциями для падающих импульсов, а также приводит к увеличению на 2 порядка времени когерентности.
3. Функция временной когерентности проходящих импульсов зависит не только от разности аргументов $\tau = t - t'$, но также и от времени t .

Благодарности

- 1. Dr. L. Samoylova, H. Sinn, Th. Tschentscher and I. Vartanyants for helpful discussions;**
- 2. Dr. M. Yurkov for delivering the 3D FAST calculation results for SASE 1 XFEL pulses;**
- 3. Российский Фонд Фундаментальных Исследований, проекты № 10-02-00768, 12-02-00924;**
- 4. The German Federal Ministry of Education and Research (BMBF), project no. 05K10CHG.**

**Спасибо
за внимание !!**