

Выпускная квалификационная работа

(магистерская диссертация):

«Оценка пространственной когерентности рентгеновского
лазера SACLA дифракционным методом»

Студент: Панэке Агилера Д.Х.

Научный руководитель: Артюков И. А.,

канд. физ.-мат. наук

Цель:

Предложить дифракционный метод для оценки пространственных характеристик когерентности мощного источника излучения высокой спектральной яркости

Мотивация:

- Знание реальных параметров когерентности источника для описания взаимодействия частично когерентных пучков с различными объектами крайне важно для таких приложений, как восстановление структурной информации объектов в экспериментах по когерентной визуализации CDI, малоугловому рассеянию SAXS, рентгеновской биологической кристаллографии и т.п..
- Измерение размера пространственной когерентности ЛСЭ является сложной экспериментальной задачей. Высокая пиковая мощность и проникающая способность жёсткого рентгеновского излучения не позволяют использовать стандартные интерферометрические методы типа схемы щелей Юнга. Рентгеновский пучок лазера легко повреждает микроотвестия и прожигает тонкие металлические листы.

Рентгеновский лазер SACLA (XFEL)



Схема эксперимента SACLA

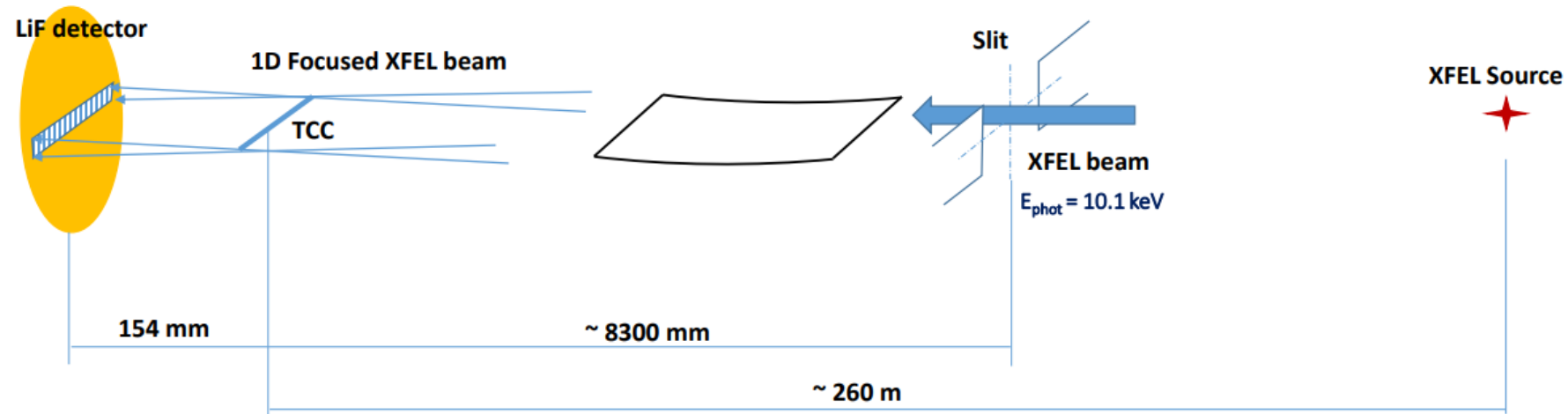
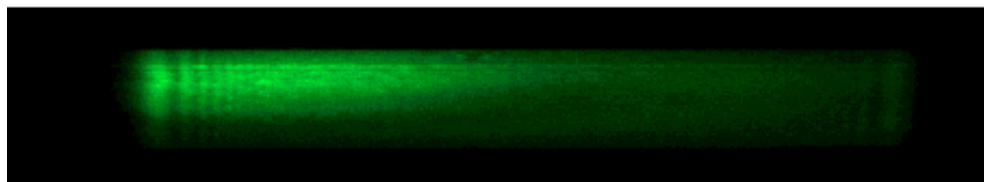


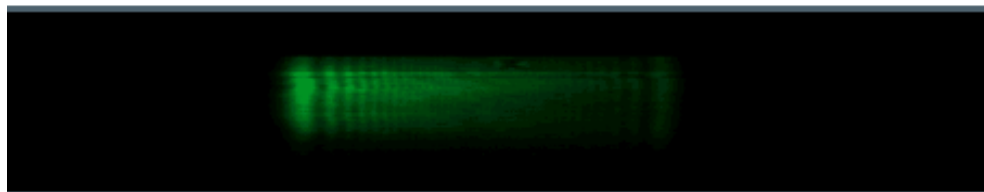
Таблица 1. Основные параметры эксперимента

Энергия электронов	8 ГэВ
Энергия рентген. фотонов	10.1 кэВ
Энергия в импульсе (без ослабления)	~ 0.5 мДж
Длительность импульса	< 20 фс
Ширина спектра	0.01%
Частота	30 Гц
Детектор	Кристалл LiF
Экспозиция	~ 10 импульсов

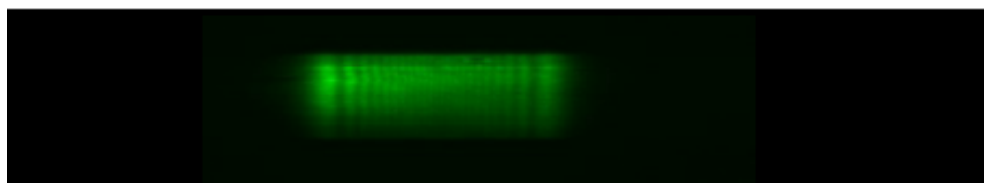
Полученные при помощи детектора LiF дифракционные картины на SACLA



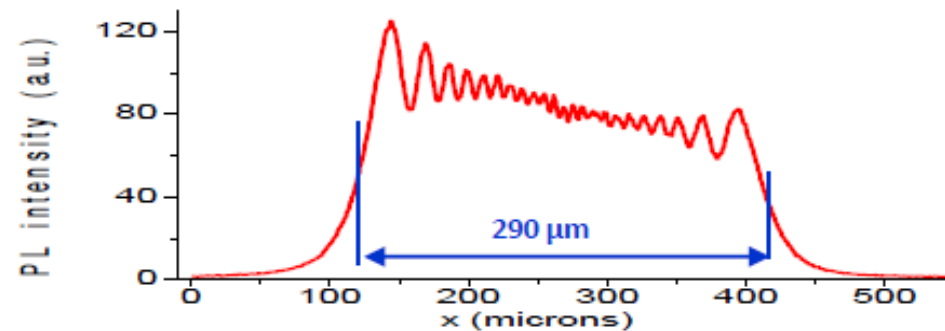
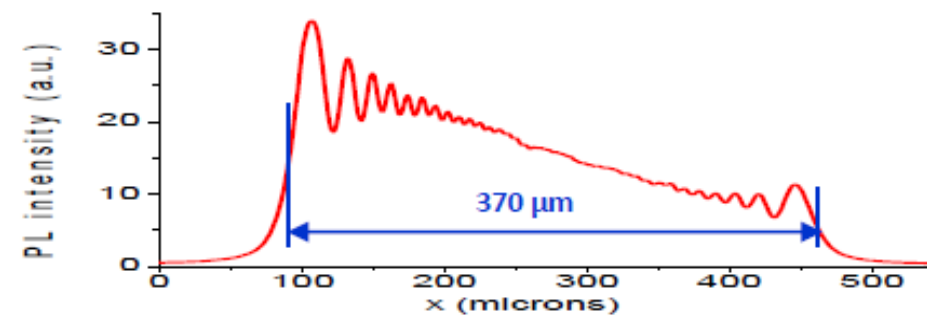
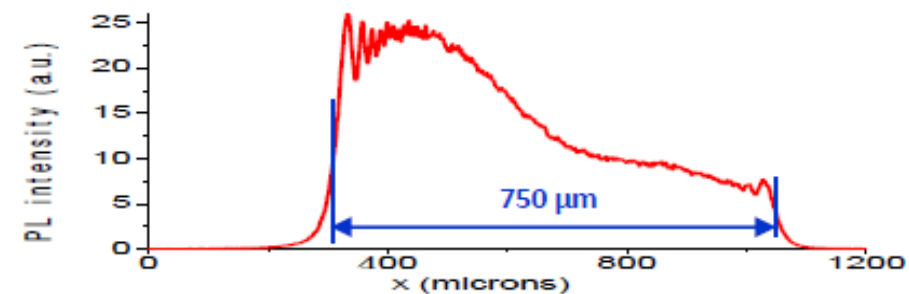
750 мкм



370 мкм



290 мкм



Функция взаимной интенсивности

$J(x_1, x_2)$ - функция взаимной интенсивности светового поля в точках с координатами x_1, x_2

$$J(x_1, x_2) = \langle E(x_1, t) E^*(x_2, t) \rangle$$

$I(x) = J(x, x)$ - интенсивность светового поля в точке x

$$\nabla_2^2 J(x_1, x_2) + k^2 J(x_1, x_2) = 0$$

- пара уравнений Гельмгольца в свободном пространстве

$$\nabla_1^2 J(x_1, x_2) + k^2 J(x_1, x_2) = 0$$

Когерентные моды в свободном пространстве

$$J(x_1, x_2) = \sum_{n=0}^{\infty} \beta_n J^{(n)}(x_1, x_2)$$

- вид когерентных мод и их вклады в полную функцию взаимной интенсивности определяются из

$$J^{(n)}(x_1, x_2) = \Psi_n^*(x_1) \Psi_n(x_2).$$

интегрального уравнения Фредгольма.

$$\int_{-\infty}^{\infty} J(x_1, x_2) \Psi_n(x_1) dx_1 = \beta_n \Psi_n(x_2) \text{ — уравнение Фредгольма.}$$

Распространение функции когерентности в свободном пространстве

$$J(x_1, x_2, z) = \sum_{n=0}^{\infty} \beta_n \Psi_n^*(x_1, z) \Psi_n(x_2, z)$$

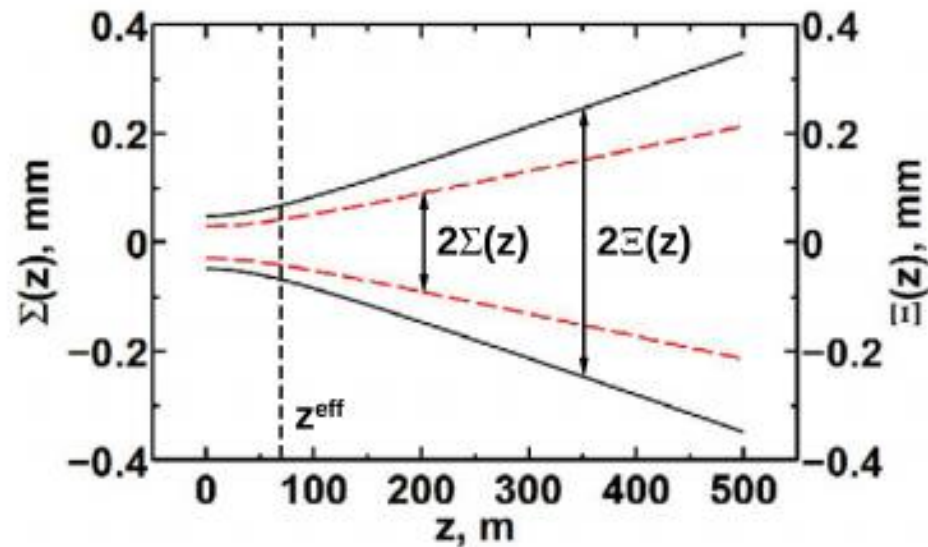
- функция когерентности на расстоянии z

$$\Psi_n(x, z) = \int_D \Psi_n(x', 0) G(x - x', z) dx'$$

- вычисление собственных функций на расстоянии z от источника

$$G(x - x', z) = \frac{1}{i\lambda z} \exp\left(\frac{ik}{2z}(x - x')^2\right)$$

- пропагатор свободного пространства



Изменение с расстоянием размера пучка (черный) и радиуса когерентности (красный)

I.A. Vartanyants and A Singer 2010 New J. Phys. 12 035004

Гауссов источник модели Шелла

$$J(x_1, x_2) = \sqrt{I(x_1)}\sqrt{I(x_2)}\mu(x_2 - x_1)$$

- функция когерентности для источника модели Шелла.
Степень когерентности считается однородной (зависит только от разности координат)

$$I(x) = I_0 \exp\left(-\frac{x^2}{2\sigma^2}\right)$$

- в гауссовых источниках модели Шелла интенсивность и степень когерентности имеют вид гауссовых функций.
Степень когерентности зависит от разности координат

$$\mu(x_2 - x_1) = \exp\left(-\frac{(x_2 - x_1)^2}{2\xi^2}\right).$$

$$\Psi_n(x, z) = \left(\frac{k}{\pi z_{eff} \Delta^2(z)}\right)^{\frac{1}{4}} \frac{1}{\sqrt{2^n n!}} H_n\left(\sqrt{\frac{k}{z_{eff} \Delta^2(z)}} x\right) \exp\left(-\frac{kx^2}{2z_{eff} \Delta^2(z)}\right) \exp\left[i\left(kz - (n+1) \arctan\left(\frac{z}{z_{eff}}\right)\right) + \frac{ikx^2}{2R(z)}\right]$$

- собственные функции известны и выражаются через полиномы Эрмита

$$J(x_1, x_2, z) = \frac{I_0}{\Delta(z)} \exp\left(-\frac{(x_1 + x_2)^2}{8\sigma^2 \Delta^2(z)}\right) \exp\left(-\frac{(x_2 - x_1)^2}{2\delta^2 \Delta^2(z)}\right) \exp\left(\frac{ik(x_2^2 - x_1^2)}{2R(z)}\right)$$

- функция взаимной интенсивности светового поля на расстоянии z от источника

Поиск функции взаимной когерентности в области щели по нескольким картинам дифракции

$$J(x_1, x_2, z_{sl}) = \left[I_g^{(m)} \left(\frac{x_1 + x_2}{2} \right) + I_g^{(a)} \left(\frac{x_1 + x_2}{2} \right) \right] \exp \left(-\frac{(x_2 - x_1)^2}{2\delta_z^2} + \frac{ik(x_2^2 - x_1^2)}{2R(z)} \right)$$

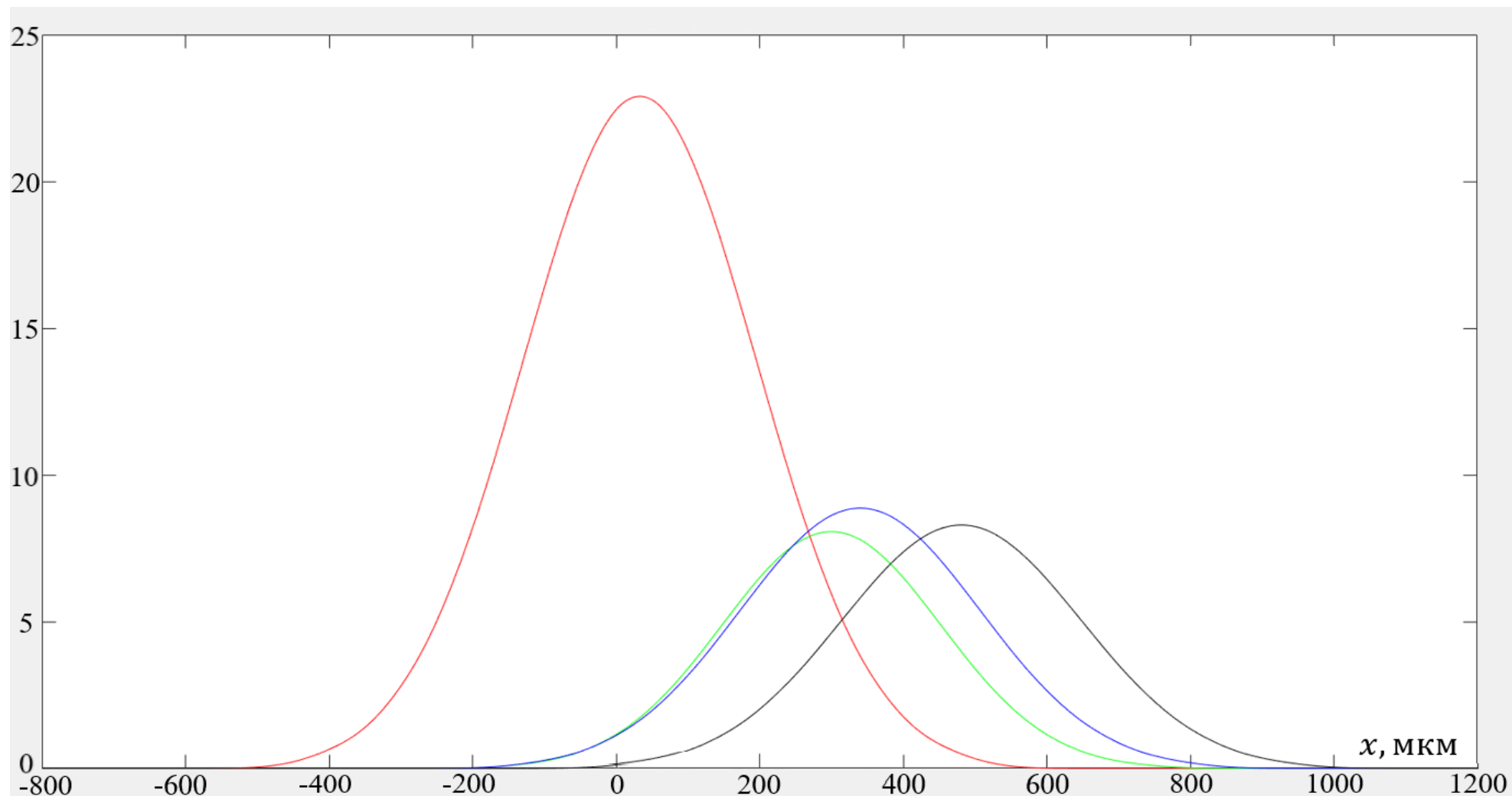
Задаем интенсивность пучка в области щели в виде суммы двух гауссиан, основной с параметрами основного пика $a = 23$, $b = 33$ мкм, $c = 230$ мкм и дополнительной

$$I_g(x) = a \exp \left(-\frac{(x - b)^2}{c^2} \right)$$

Таблица 2. Рассчитанные ширины щелей и параметры дополнительных гауссовых функций, определяющих пространственный профиль интенсивности пучка

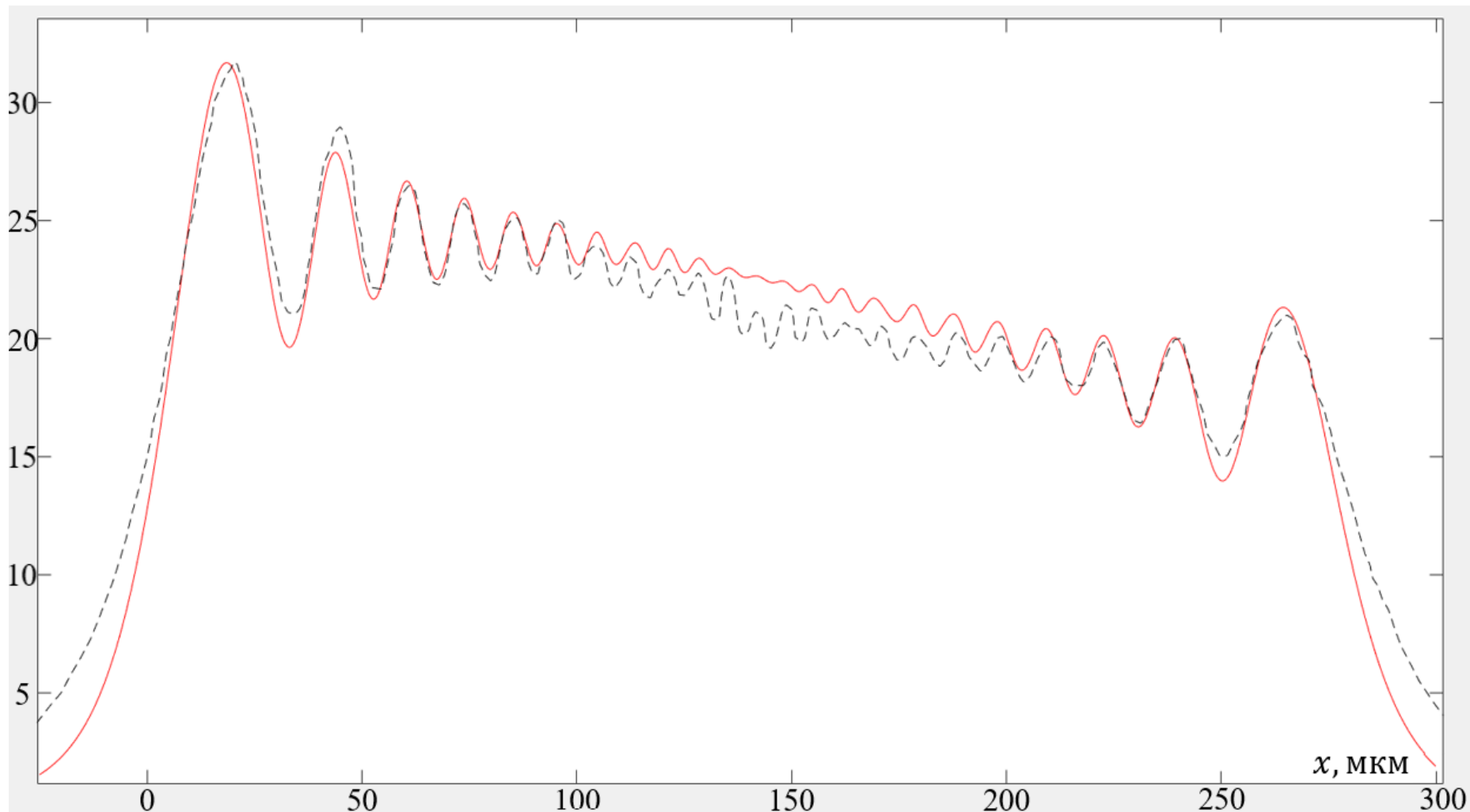
Заданная ширина щели, мкм	Рассчитанная ширина щели, мкм	a	b, мкм	c, мкм
750	735	8	481	237
370	383	9	340	237
290	294	8	300	215

Интенсивность излучения в плоскости щели



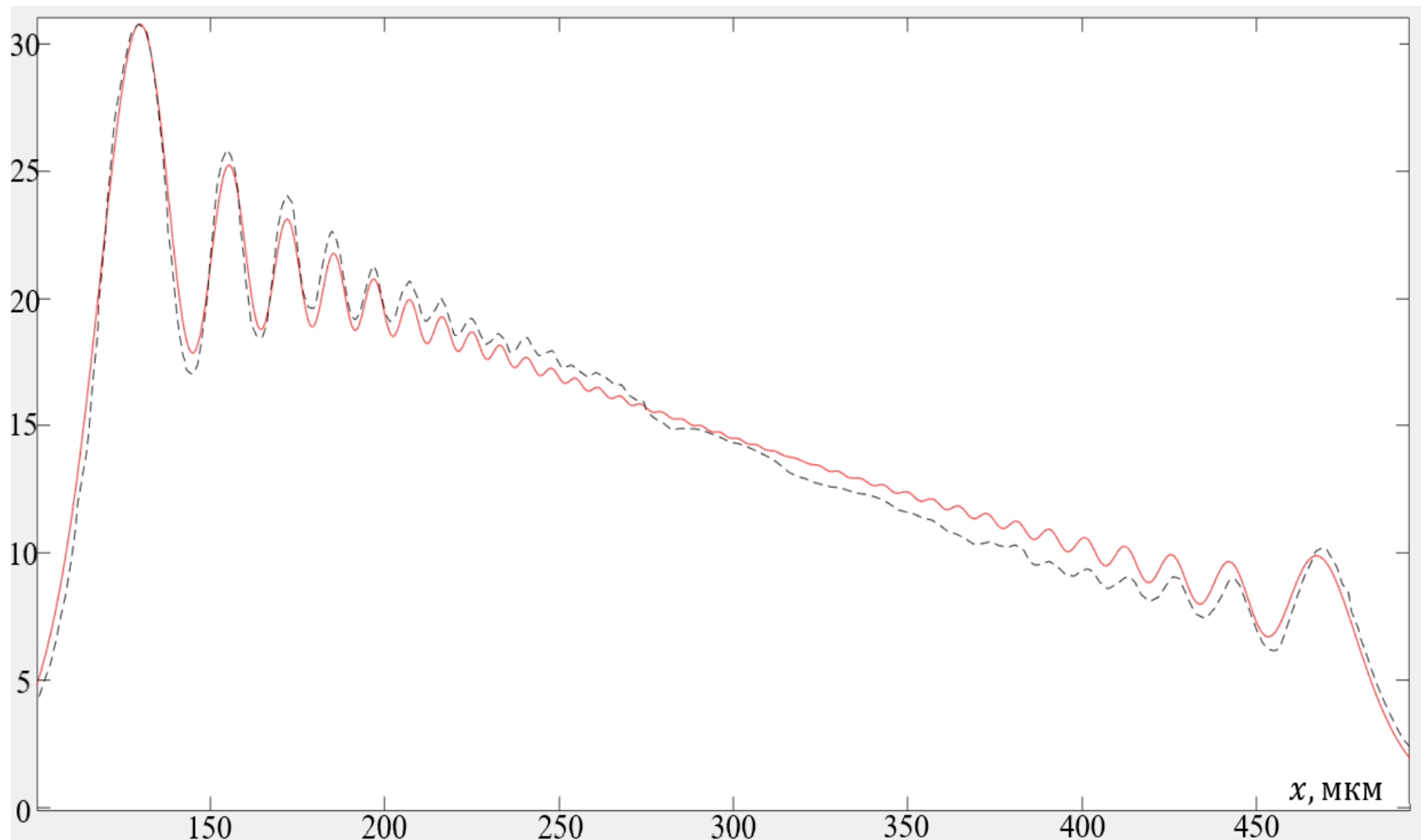
Основная гауссиана (красный) и дополнительные гауссианы, описывающие интенсивность профиля пучка в экспериментах для щели 290 мкм (зеленый), для щели 370 мкм (синий) и для 750 мкм (черный).

Расчет для щели шириной 290 мкм, $\xi_z = 75$ мкм



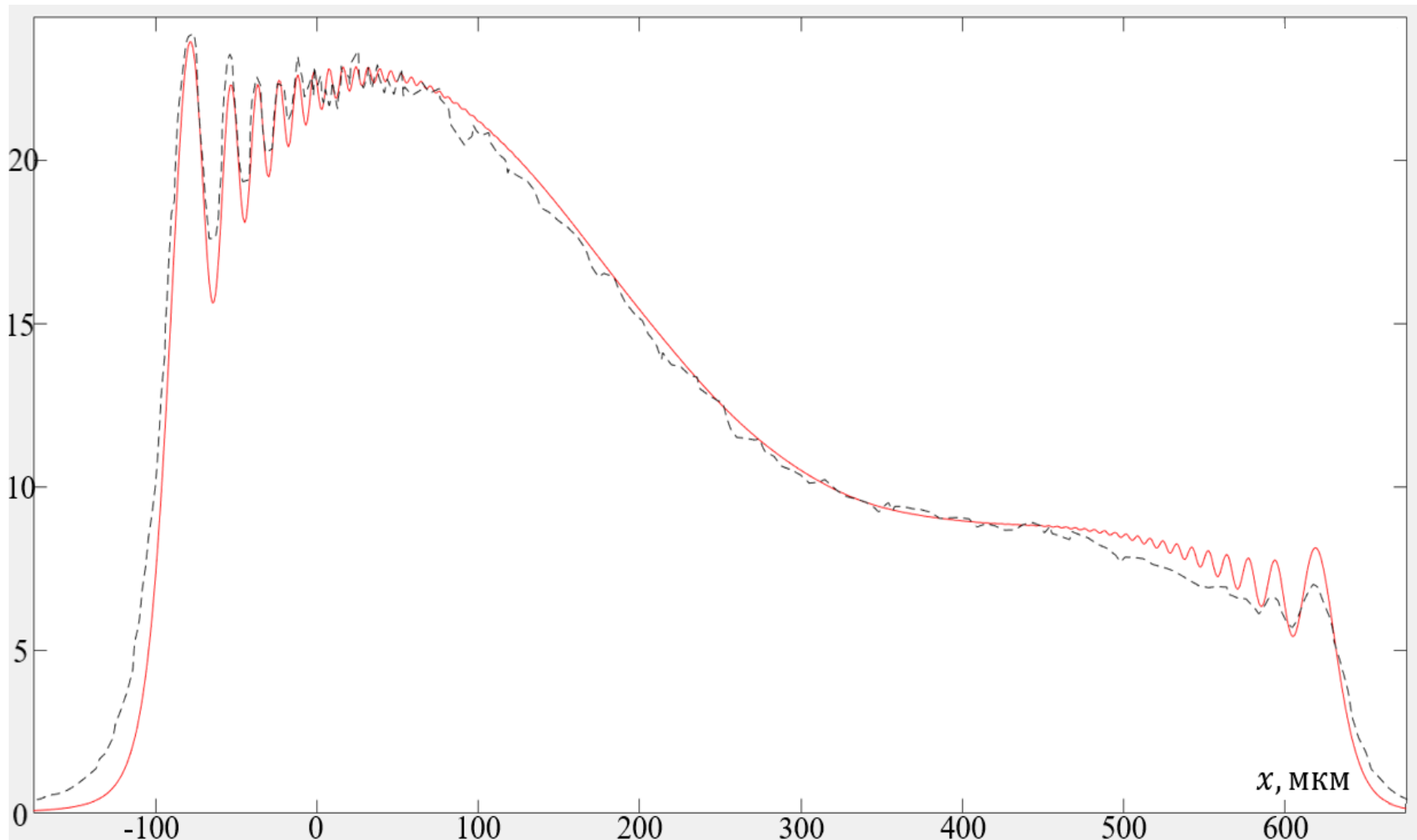
Измеренная и рассчитанная интенсивности дифракционной картины в экспериментах со щелью шириной 290 мкм, радиус когерентности 75 мкм. Черный – эксперимент, красный – расчет.

Расчет для щели шириной 370 мкм, $\xi_z = 75$ мкм



Измеренная и рассчитанная интенсивности дифракционной картины в экспериментах со щелью шириной 370 мкм. Черный – эксперимент, красный – расчет.

Расчет для щели шириной 750 мкм, $\xi_z = 75$ мкм

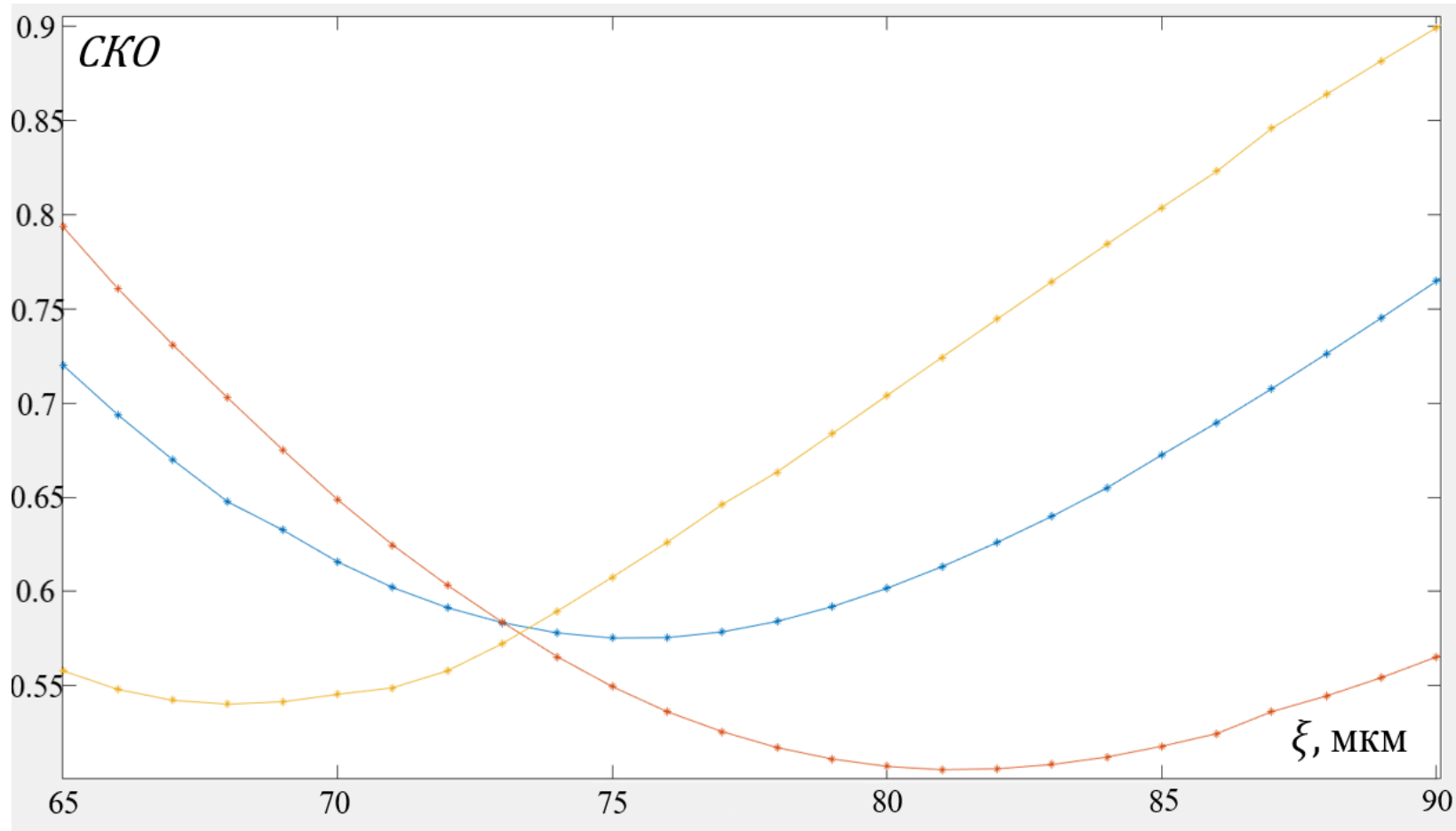


Измеренная и рассчитанная интенсивности дифракционной картины в экспериментах со щелью шириной 750 мкм. Черный – эксперимент, красный – расчет.

Определение радиуса когерентности подгонкой формы осцилляции

$$CKO(\xi) = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (A_i - A_{ref,i})^2}{n}}$$

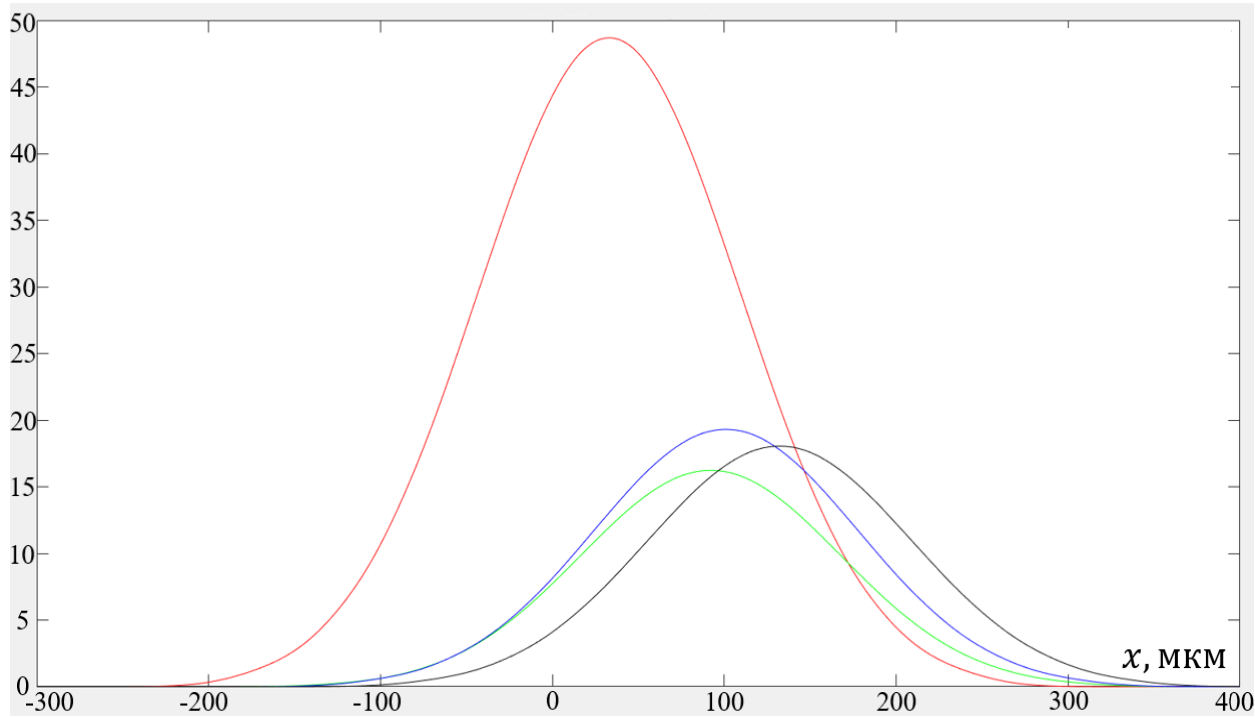
- Среднеквадратичное отклонение расчетной амплитуды от экспериментальной



Среднеквадратичное значение
трех минимумов ~ **75** мкм.

CKO, рассчитанное для трех щелей: синий – 290 мкм, красный – 370 мкм, желтый – 750 мкм.

Профили интенсивности пучка в выходной плоскости источника



Профили интенсивности пучка в выходной плоскости источника. Основная гауссиана (красный) и дополнительные для щели 290 мкм (зеленый), для щели 370 мкм (синий) и для 750 мкм (черный).

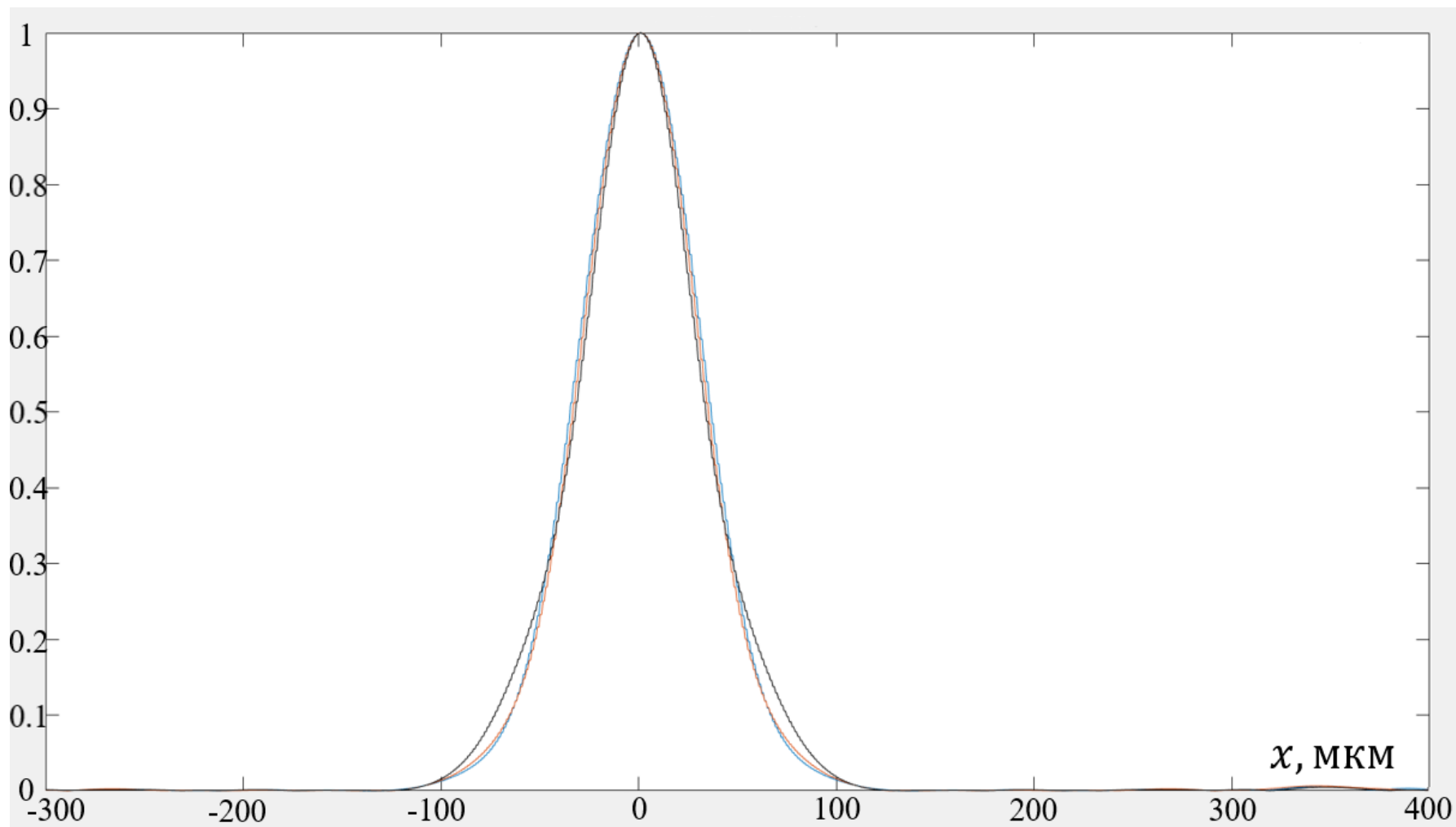
Параметры основного пика

$$a = 49, b = 33 \text{ мкм}, c = 108 \text{ мкм}$$

Таблица 3. Параметры дополнительных гауссовых функций, определяющих профиль интенсивности пучка в выходной плоскости источника.

Размер щели, мкм	a	b, мкм	c, мкм
750	18	132	109
370	19	101	109
290	16	92	107

Степень когерентности источника



Радиус когерентности
(дисперсия гауссианы)
~ 30 мкм

Степень когерентности $g(x, \Delta x) = \mu\left(x - \frac{\Delta x}{2}, x + \frac{\Delta x}{2}\right)$ в плоскости источника от расстояния между точками.

Глобальная степень когерентности источника

$$\zeta = \frac{\int |J(x_1, x_2)|^2 dx_1 dx_2}{\left[\int I(x, \omega) dx \right]^2}$$

- глобальная степень когерентности, используется для характеристики когерентности волнового поля источника одним числом

$0 \leq \zeta(\omega) \leq 1$, где также $\zeta = 0$ означает полную некогерентность, а $\zeta = 1$ – полную когерентность

Таблица 3. Глобальная степень когерентности источника, оцененная по каждой щели

Размер щели, мкм	Глобальная степень когерентности
750	15%
370	17%
290	19%

Выводы

- На основе экспериментальных данных, полученных на рентгеновском лазере SACLA (Япония), был разработан метод по оценке когерентных характеристик источника в приближении модели Шелла и представлением профиля интенсивности пучка в виде суммы двух гауссовых функций.
- На основе указанной модели источника были определены параметры профиля интенсивности излучения и функции когерентности источника. Для определения профилей интенсивности пучка использовались данные нескольких экспериментов с разными размерами щелей. Было получено, что профиль интенсивности пучка является суммой основной (общей для всех экспериментов) и дополнительной гауссиан. Различия в дополнительных гауссианах говорит о возможных флуктуациях положения рентгеновского пучка в разных сериях экспериментов.
- Используя полученные профили интенсивности и функции когерентности, были оценены начальный радиус когерентности рентгеновского лазера ~ 30 мкм и глобальная степень когерентности $\sim 17\%$.
- Таким образом, впервые предложен метод определения начальной когерентности пучка по дифракции излучения на одномерной щели, который может быть полезным при измерении пространственной когерентности мощного рентгеновского излучения высокой спектральной яркости.