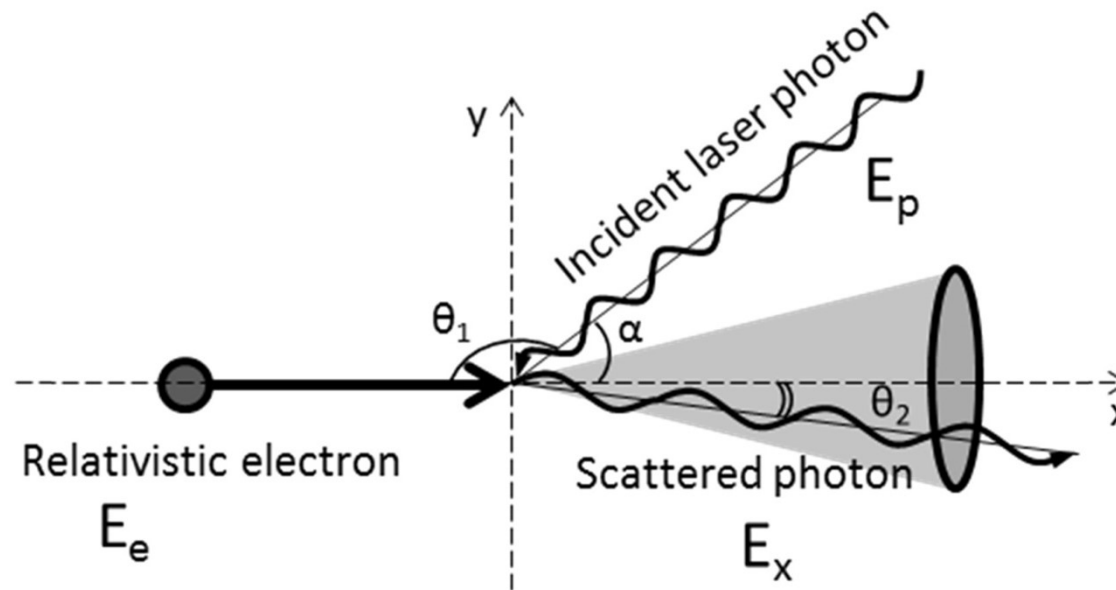


Методы расчёта и численного моделирования выходных параметров рентгеновского излучения комptonовских источников

И.А.Артюков, Н.Л.Попов,
Р.М.Фещенко

*Физический институт
им.П.Н.Лебедева РАН*

Обратное комптоновское рассеяние

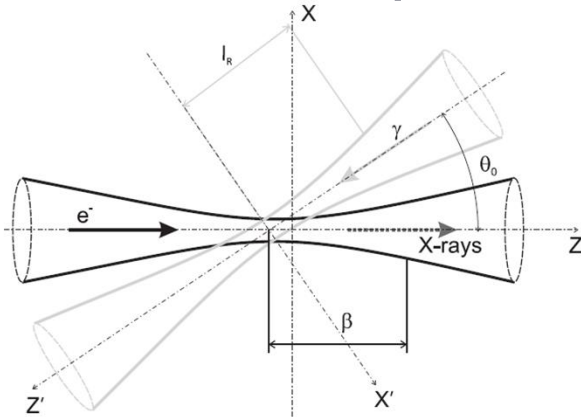


$$E_x = 4\gamma^2 E_p, \quad \gamma = \frac{E_e}{m_e c^2}$$

Модель 1 и её приближения

- Отсутствие квантовых и нелинейных эффектов в лазерно-электронных взаимодействиях
- Диаметры электронного и лазерного пучков относительно велики, $d \gg \lambda$. Волновые эффекты незначительны.
- Непрерывные пространственные и временные распределения фотонов и электронов в пучках.
- Профили электронного пучка и поперечного импульса электронов являются гауссовыми и определяются значениями эмиттанса и бета-функции.
- Лазерный импульс и электронный сгусток имеют гауссовы профили в продольном направлении.
- Энергетический спектр электронов описывается функцией Гаусса некоторой ширины.
- Лазерный и электронный лучи распространяются практически в противоположных направлениях («лобовое столкновение»).

Расчёт спектральной яркости и потоков (Р.М.Фещенко)



$$G = \frac{2}{\pi^{5/2}} \frac{s}{\sqrt{l_e^2 + l_{ph}^2}}$$

$$\times \int_V \exp \left\{ -\frac{(z + z' + z_0 - c\Delta t)^2}{l_e^2 + l_{ph}^2} - \left(\frac{x - x_0}{w_{e,x}(z - z_0)} \right)^2 - \left(\frac{y - y_0}{w_{e,y}(z - z_0)} \right)^2 \right\}$$

$$\times \exp \left\{ -\frac{x'^2 + y'^2}{w_{ph}^2(z')} \right\} \frac{dx dy dz}{w_{e,x}(z - z_0) w_{e,y}(z - z_0) w_{ph}^2(z')}$$

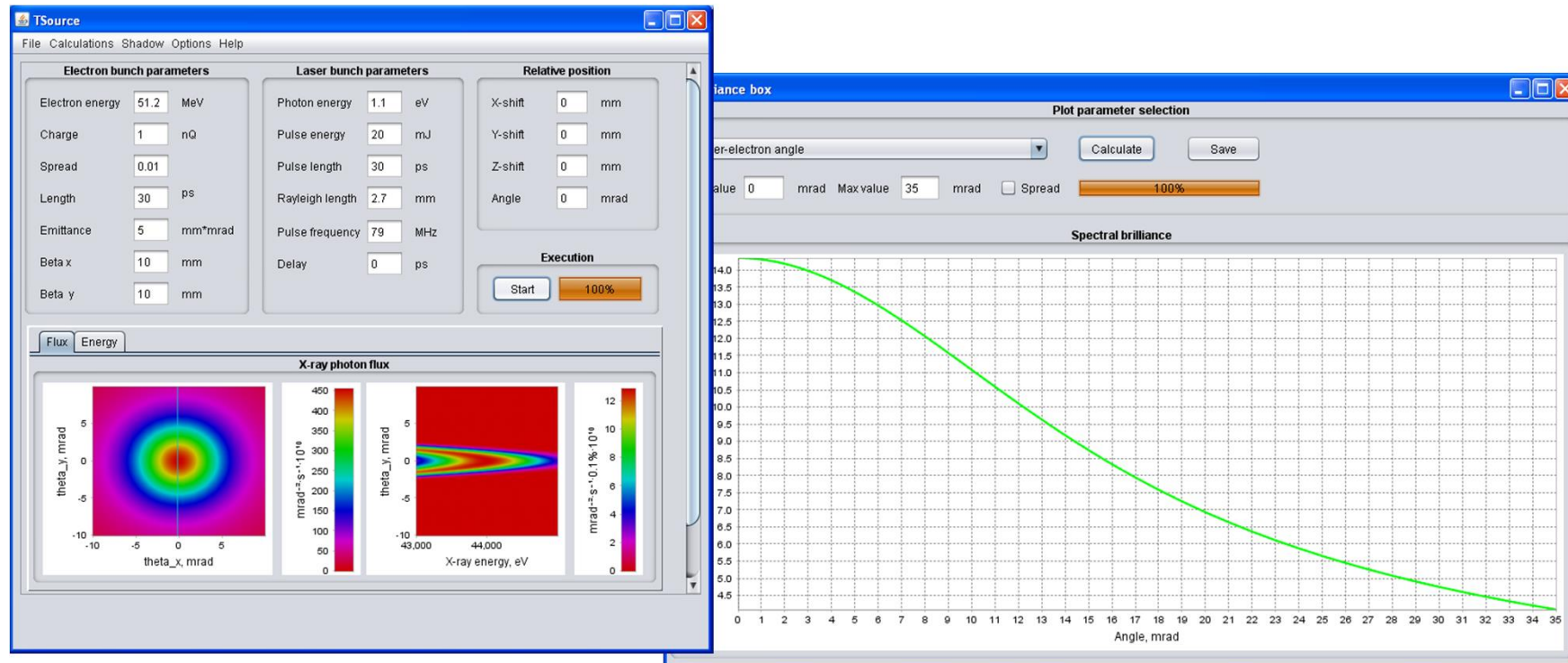
$$\mathbf{I}_{\Omega, \omega}(\mathbf{n}, \omega) =$$

$$\frac{\nu N_e N_{ph}}{s} G \int_{V_{P_{\perp}}} D\sigma_{\gamma}(\mathbf{p}_{\perp}) \exp \left\{ -\left(\frac{p_{\perp,x}}{\Delta p_{\perp,x}} \right)^2 - \left(\frac{p_{\perp,y}}{\Delta p_{\perp,y}} \right)^2 \right\} \frac{dp_{\perp}^2}{\pi \Delta p_{\perp,x} \Delta p_{\perp,y}}$$

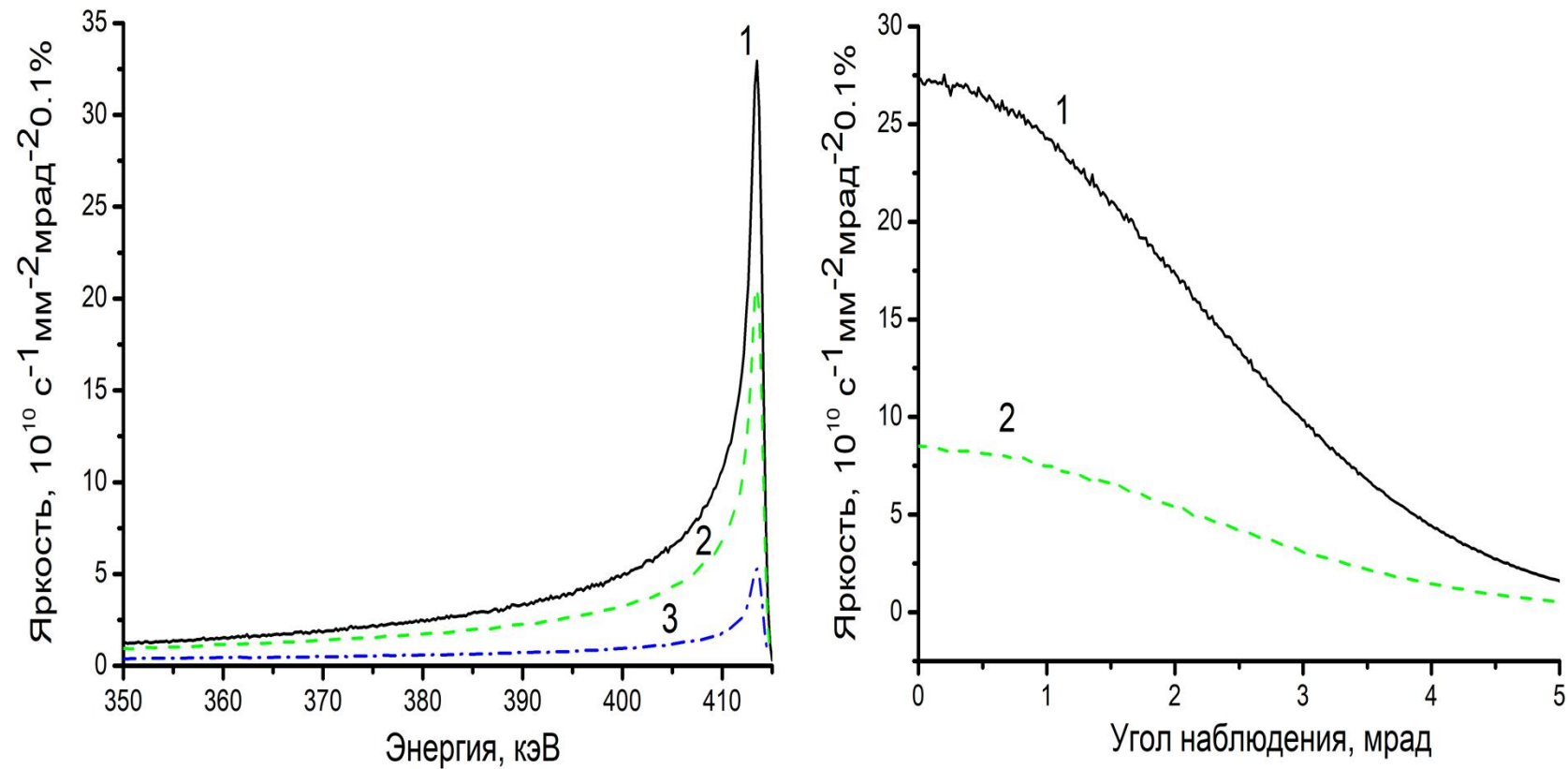
$$\frac{dN}{d\Omega d\omega dx^4 dp^3 dk^3} = D\sigma j_{ph}^k j_{k,e},$$

$$D\sigma_{\gamma}(\mathbf{n}\nu) = \frac{3\sigma_T}{64\pi\sqrt{\pi}\Delta\gamma\omega_l} \sqrt{\frac{\omega}{\omega_l}} \frac{\left(1 - \frac{\omega}{\omega_l} \frac{\theta^2}{2}\right)^2 + 1}{\sqrt{1 - \frac{\omega}{\omega_l} \frac{\theta^2}{4}}} e^{-K},$$

Компьютерная реализация в программном коде TSource (TSourceX, ...)



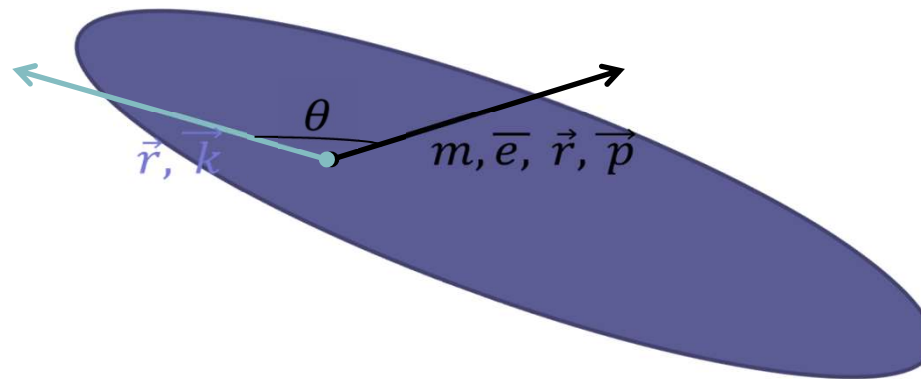
Feshchenko, R.; Vinogradov, A.; Artyukov, I. Influence of the electron beam emittance on the polarization of a laser-electron x-ray generator. *Phys. Rev. Accel. Beams* **2016**, *19*, 114702



Спектральная яркость КИ как функции энергии рентгеновских фотонов (слева) и угла наблюдения (справа) для электронного сгустка с зарядом 0,1 нКл. Цифры на графиках соответствуют разным углам наблюдения: 1 – 0 мрад, 2 – 2 мрад и 3 – 4 мрад (слева) и разным энергиям рентгеновских фотонов: 1 – 413 кэВ и 2 – 408 кэВ (справа)

Модель 2- метод Монте-Карло (Н.Л.Попов)

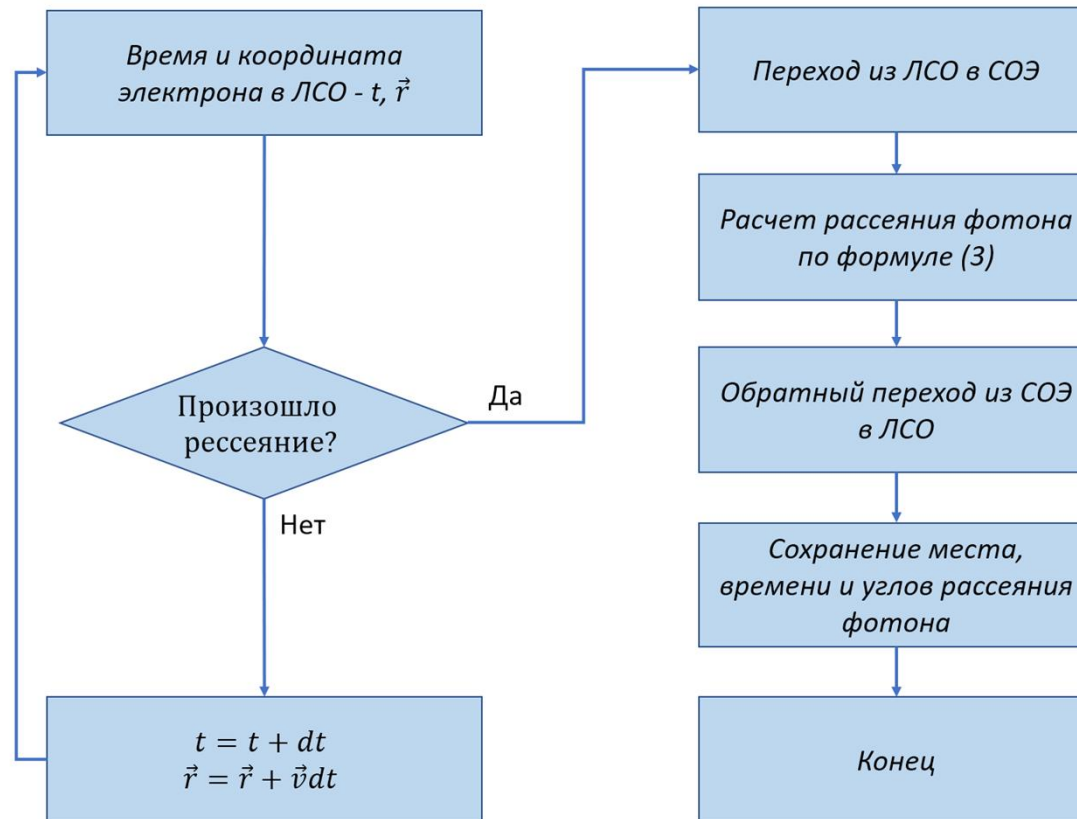
основан на представлении электронного пучка как дискретного ансамбля независимо излучающих электронов



$$dP = \frac{8\pi}{3} r_e^2 (1 - \beta \cos\theta) n_p(\vec{r}, t) dt$$

$$\frac{d\sigma}{dx} = \pi r_e^2 (1 + x^2), \quad x = \cos\theta$$

Блок-схема модели 2



ЛСО – лабораторная система отчета СОЭ – система отчета покоящегося электрона

Практически любое распределение электронов в фазовом пространстве, может быть привязана к данным по моделированию электронного пучка в ускорителе и накопительном кольце

Web интерфейса программы fiber

NUMERICAL LABORATORY

Home About

E-mail

Electron reduced energy (gamma)	<input type="text" value="293.54"/>
Electron delta gamma	<input type="text" value="0.64"/>
Electron normalized emittance (cm*rad)	<input type="text" value="483e-4"/>
Aspect ratio of emittance (y/x)	<input type="text" value="2.1e-4"/>
Electron beta function (cm/rad)	<input type="text" value="8.7"/>
Aspect ratio of beta function (y/x)	<input type="text" value="0.954"/>
Electron beam length (cm)	<input type="text" value="0.138"/>
Electron's path	<input type="button" value="Выберите файл"/> Файл не выбран

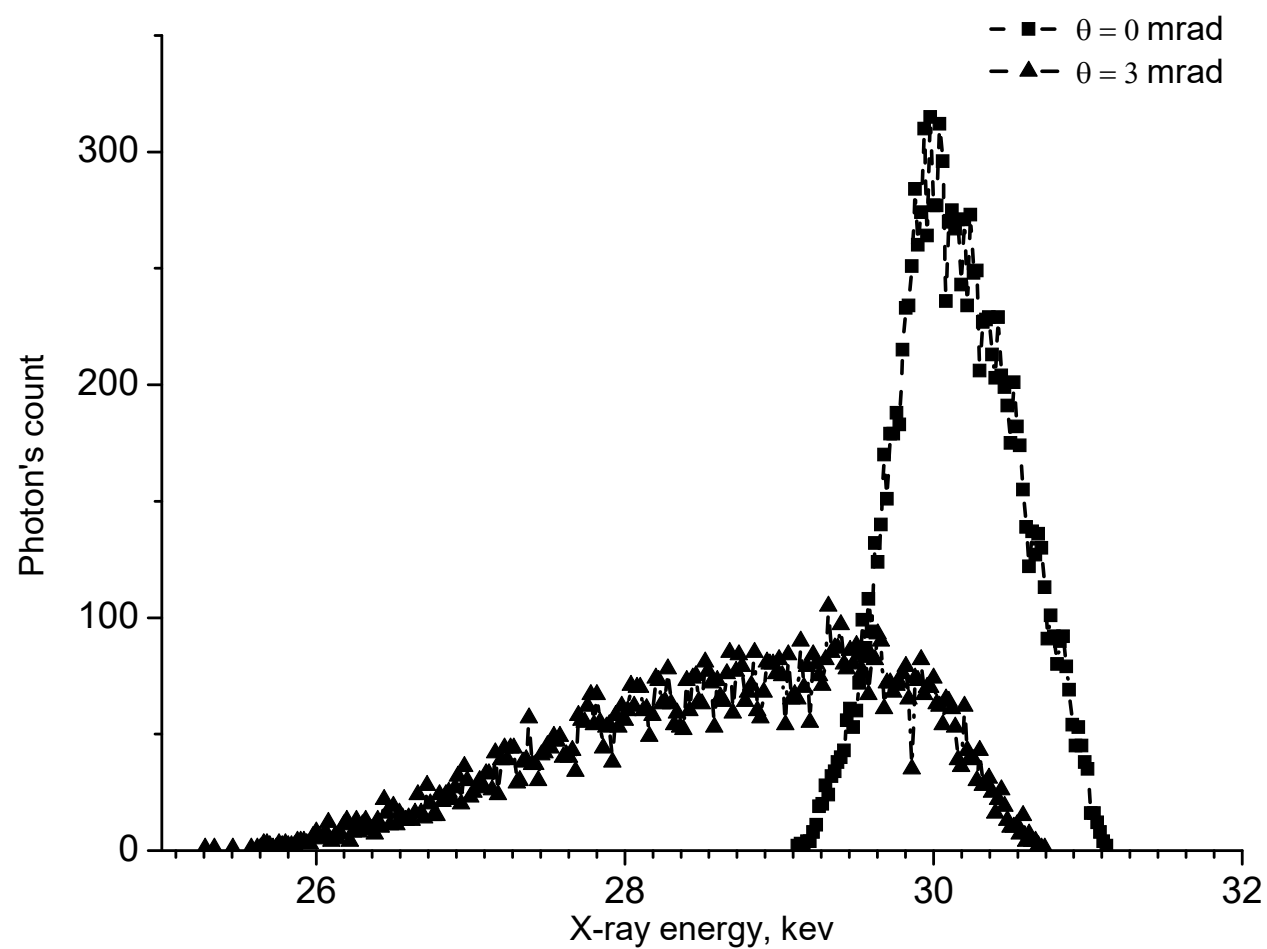
Gauss Model Ellipsoid Model

Photon beam length (cm)	<input type="text" value="0.16"/>
Photon beam radius (cm)	<input type="text" value="0.003"/>
Photon energy (Ev)	<input type="text" value="1.204"/>
Photon pulse energy (mJ)	<input type="text" value="1"/>
Collision angle (in yz plane) (rad)	<input type="text" value="0.052"/>
Electron count	<input type="text" value="6.25e9"/>
Time shift (cm)	<input type="text" value="0"/>

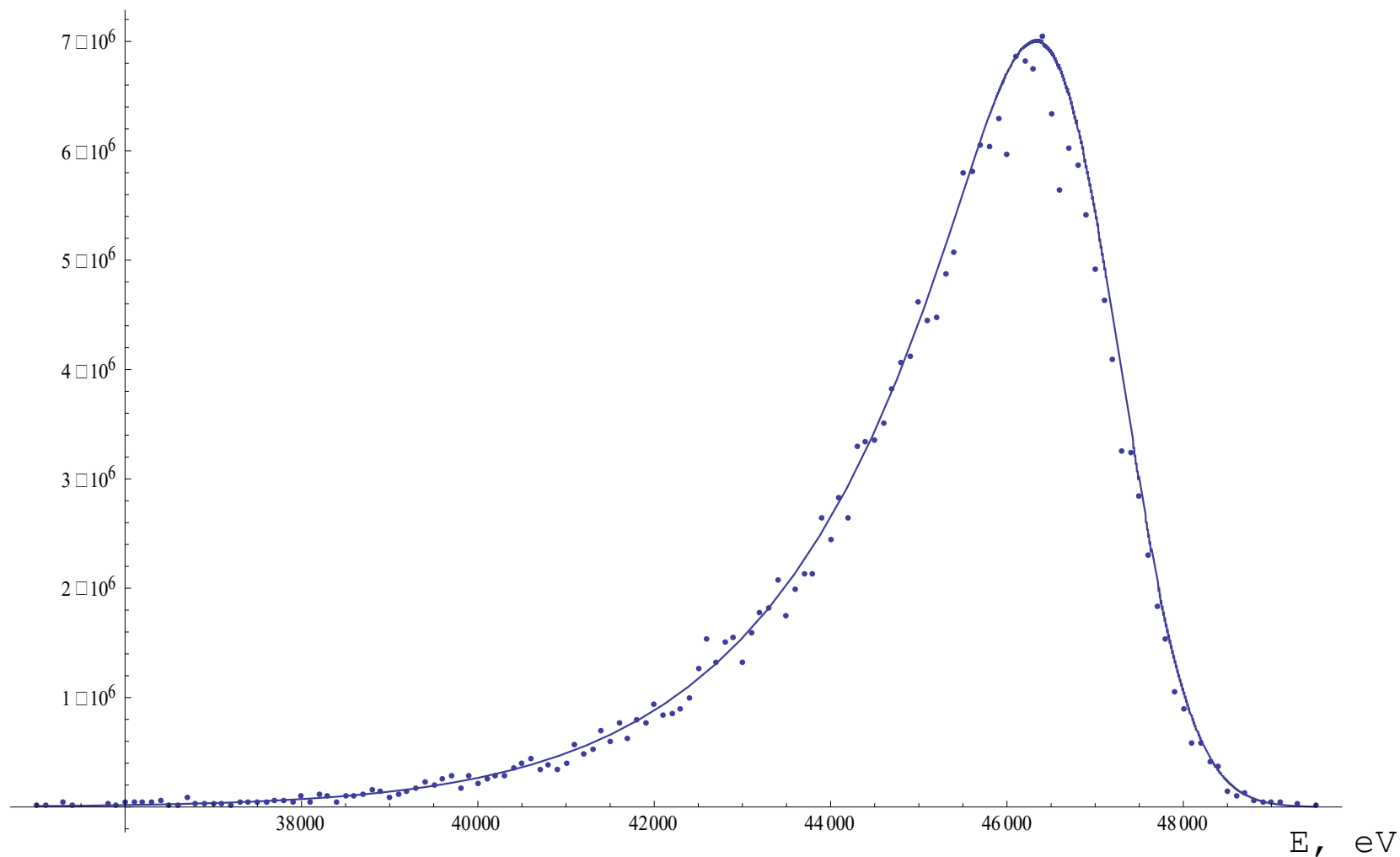
Energy step (Ev)	<input type="text" value="1000"/>
Tangent step	<input type="text" value="5e-4"/>
Coordinate step (cm)	<input type="text" value="5e-4"/>
Repeat count	<input type="text" value="1"/>

One scatter

Моделирование спектра КИ методом Монте-Карло



Сравнение результатов расчётов спектра по моделям 1 и 2



Примеры расчётов по программе TSource

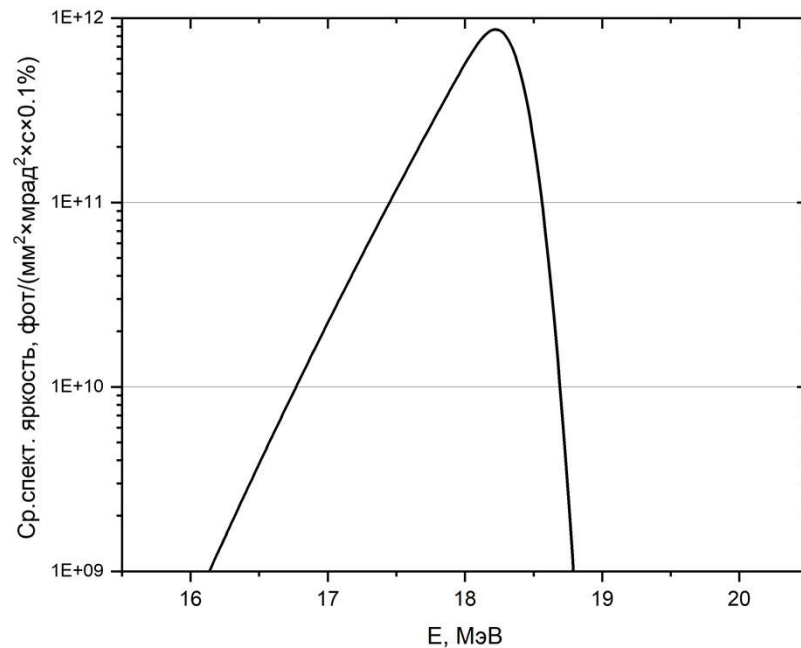
линейный ускоритель

Параметр	Величина
Энергия электронов	1 ГэВ
Заряд электронного сгустка	1 нКл
Относительный разброс энергии электронов	1 %
Длительность сгустка	10 пс
Нормализованный эмиттанс ($\epsilon_x = \epsilon_y$)	1 мм · мрад
Бета функция ($\beta_x = \beta_y$)	100 мм
Диаметр пучка ($2\sigma_x = 2\sigma_y$)	14 мкм
Частота	1 Гц

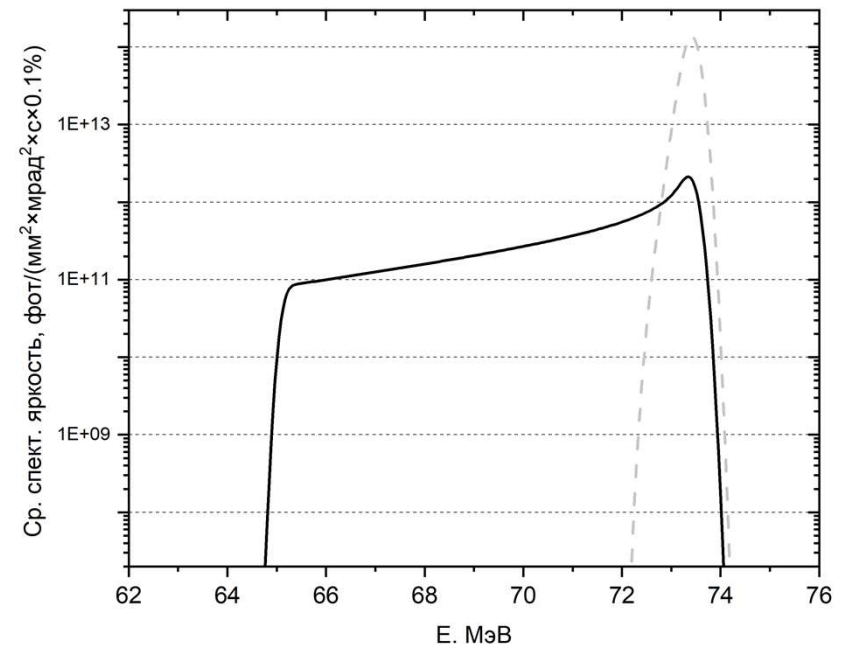
накопительное кольцо

Параметр	Величина
Энергия электронов	2 ГэВ
Заряд электронного сгустка	10 нКл
Относительный разброс энергий электронов	0,25%
Длительность сгустка	100 пс
Нормализованный эмиттанс (ϵ_x/ϵ_y)	120 мм · мрад/ 1,2 мм · мрад
Бета функция ($\beta_x = \beta_y$)	3000 мм
Диаметр пучка ($2\sigma_x/(2\sigma_y)$)	600 мкм/60 мкм
Частота	10 МГц

	Линейный ускоритель	Накопительное кольцо
Максимум энергии фотонов, МэВ	18,2	73,5
Ср. поток в угол $2^*1/\gamma$, фотон/с	$4 \cdot 10^8$	$1,3 \cdot 10^{11}$
Частота импульсов, Гц	1	10^6



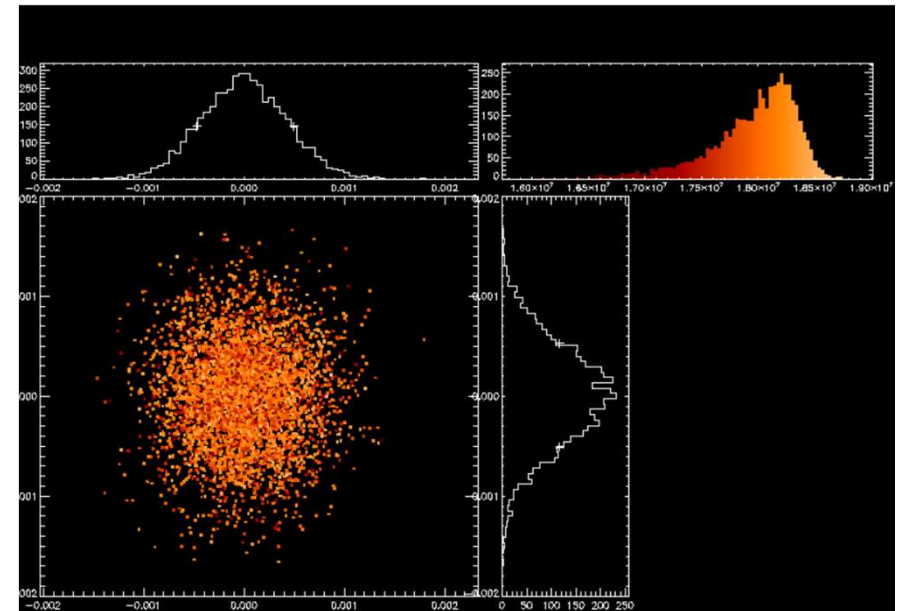
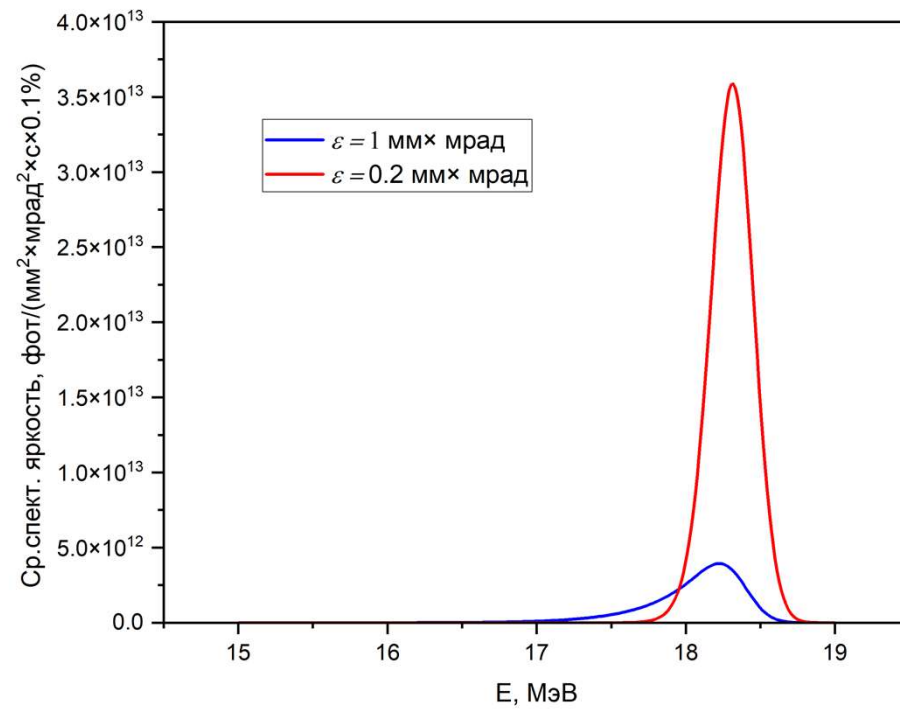
Спектральная яркость ИКИ в схеме линейного ускорителя 1 ГэВ



Спектральная яркость ИКИ в схеме накопительного кольца 2 ГэВ (для сравнения серым пунктиром показана кривая для ИКИ с низким эмиттансом 1 мм·мрад)

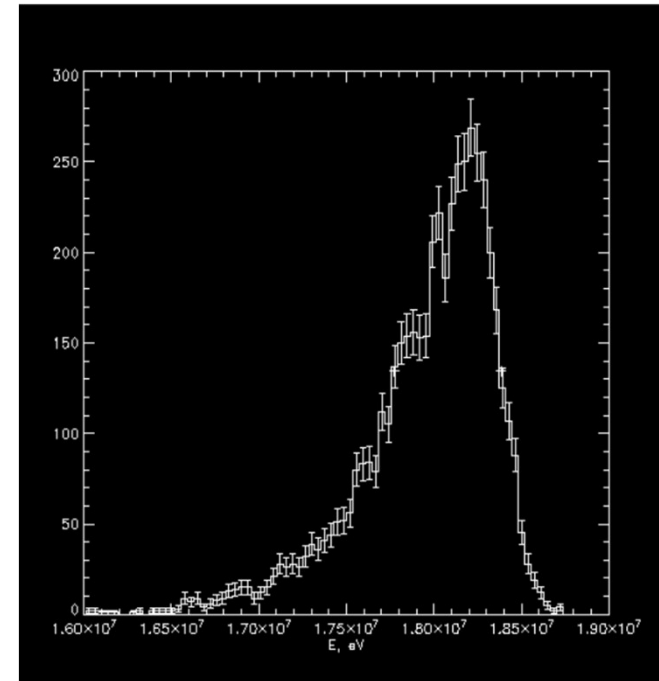
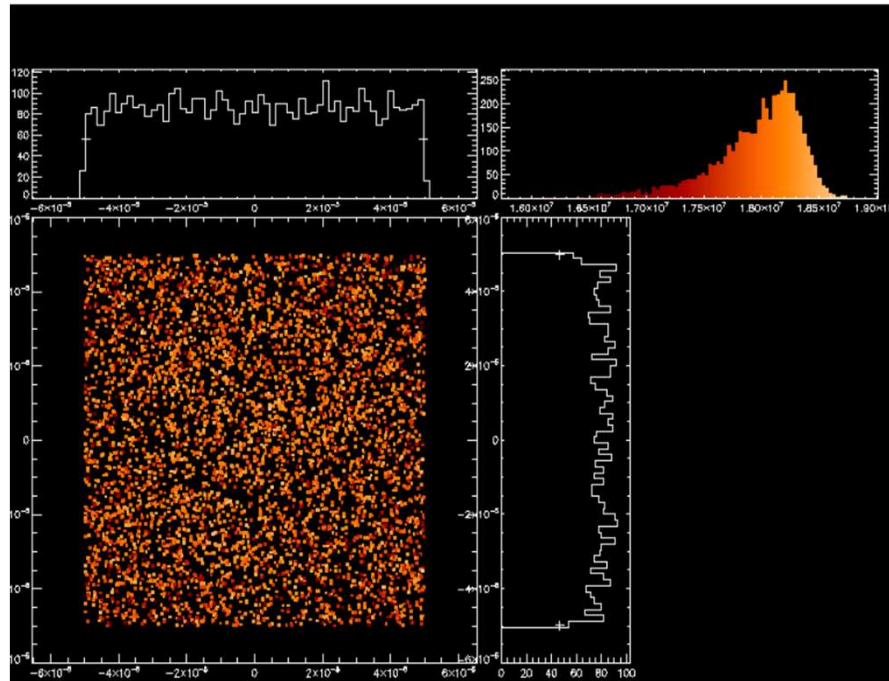
Угол наблюдения – строго вдоль электронного пучка

Линейный ускоритель 1 ГэВ



Спектральная яркость ИКИ в схеме линейного ускорителя для двух величин нормализованного эмиттанта ε

Линейный ускоритель 1 ГэВ

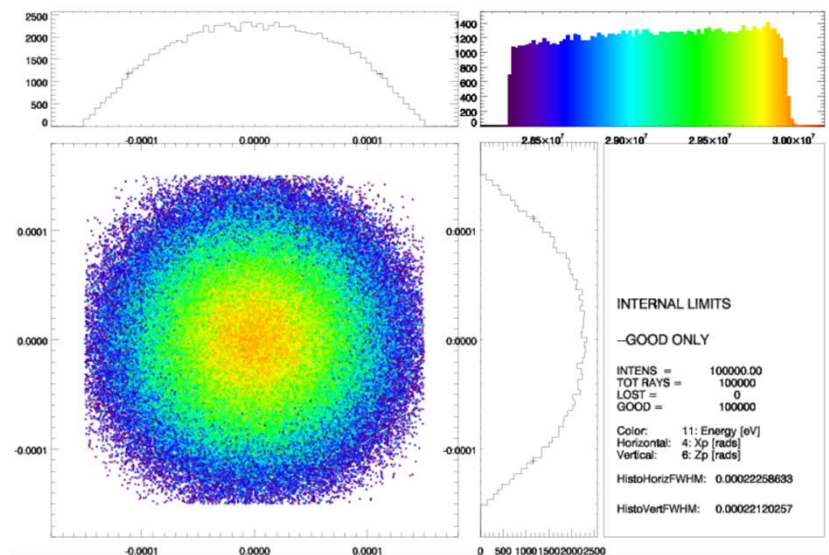


Моделирование ограничивающей квадратной щели 5 мм x 5 мм на расстоянии 50 м от ИКИ (угловой размер 0,05 мрад x 0,05 мрад): спектральная плотность, попадающие на площадь апертуры. Общий поток в угол щели: $1,7 \cdot 10^7$ фотон/с. Цвет фотона соответствует его энергии

Накопительное кольцо 0.903 ГэВ

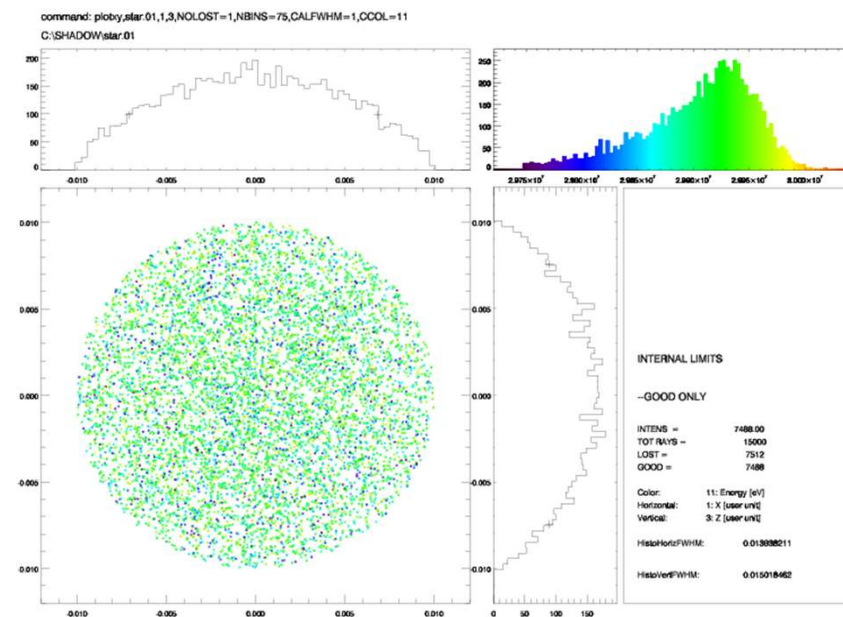
Electron central energy	0.903 GeV
Total charge	7 nC
Normalized emittance	11 mm·mrad
Beta function	10 m
Relative energy spread	0.001
Duration	130 ps
Repetition rate	17 MHz
Derived quantities (for checking):	
Lorentz gamma factor	1768
Number of electrons	$4.38e^{10}$
Geometric emittance	$6.2e^{-9}$
Spot size (sigma)*	250 μ m
Longitudinal size	0.04 m

Laser pulse energy	30 J
Wavelength (2ω)	0.515 m
Photon energy	2.408 eV
Electron-laser beam collision angle	0° (head-on collision)
Spot size (sigma)*	250 m
Rayleigh length	95 mm
Pulse duration	10 ps
Repetition rate (w optical cavity)	17 MHz
Polarization	linear



Угол раствора	0.15 x 0.15 мрад
Поток	$2.7 \cdot 10^9$ photon/s

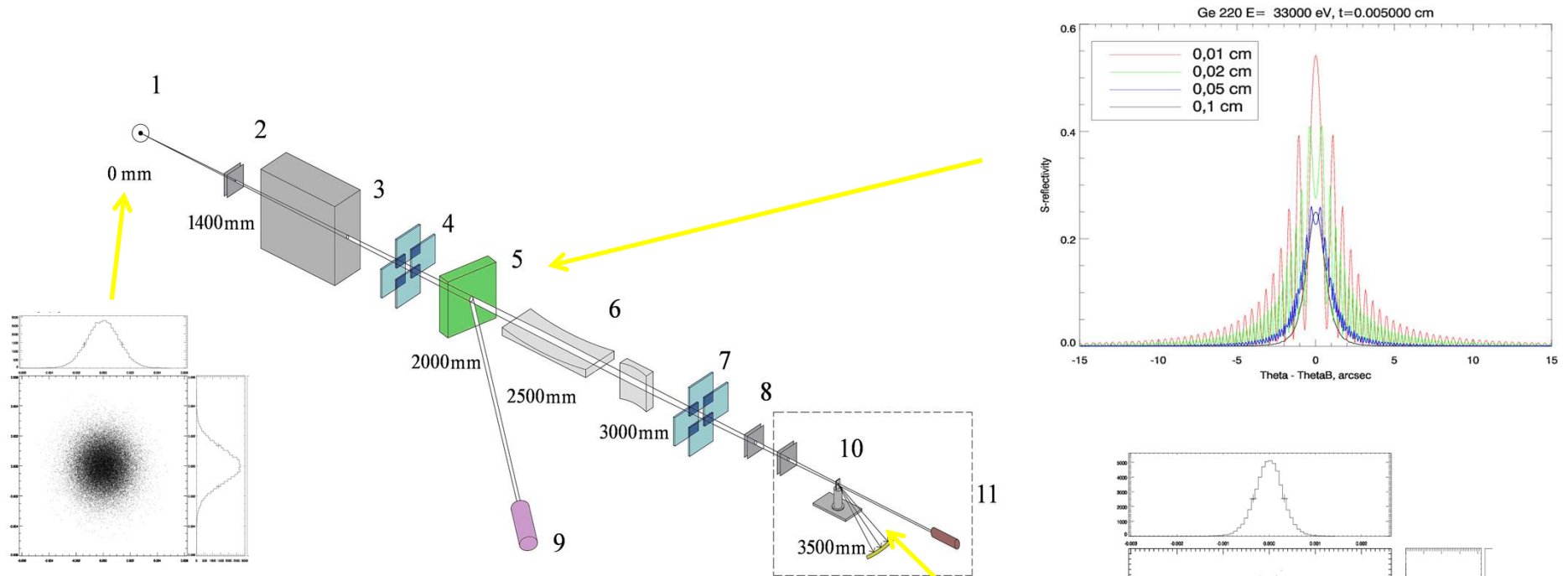
Mean, eV	StDev	StDev*2.35
2.92E+007	4.75E+005	1.12E+006



Угол раствора (коллимация)	0.02 мрад ²
Поток	$1.7 \cdot 10^7$ photon/s

Mean, eV	StDev	StDev*2.35
2.99E+007	5.03E+004	1.18E+005

Моделирование рентгенооптического канала ИКИ



Принципиальная схема линии формирования рентгеновского пучка ЛЭГ: 1 – источник рентгеновского излучения; 2 – окно выхода излучения из кольца; 3 – блок диагностики; 4 – щели-ограничители пучка; 5 – кристалл-монокроматор; 6 – зеркала Киркпатрик–Баеза; 7 – щелевая система; 8 – выходное окно линии формирования; 9 – детектор системы мониторинга. 10 – образец; 11 – рабочая станция (камера образца).

Vinogradov, A., Feshchenko, R., Shvedunov, V., & Artyukov, I. (2023). Ray Tracing Simulation of X-ray Microdiffraction Beamline on the Inverse Compton Source. *Symmetry*, 15(5), 1068.

Заключение

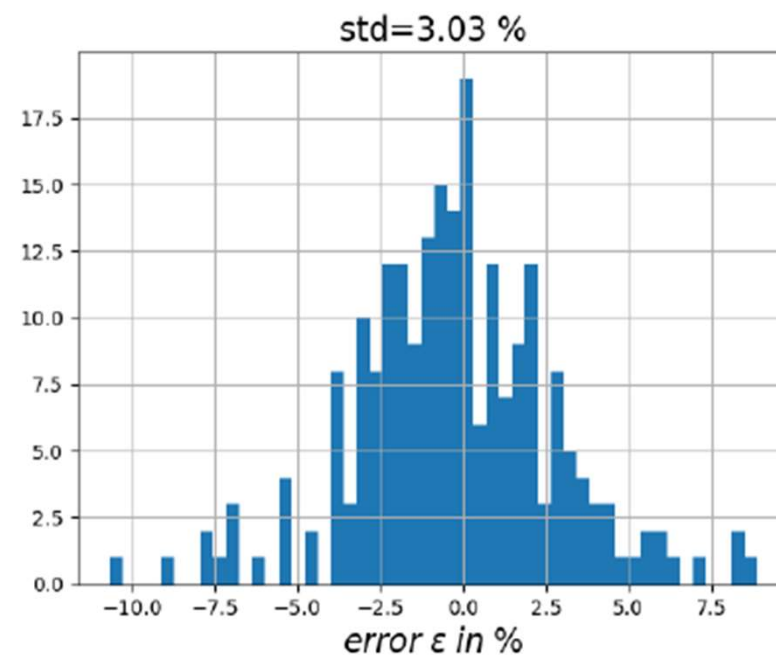
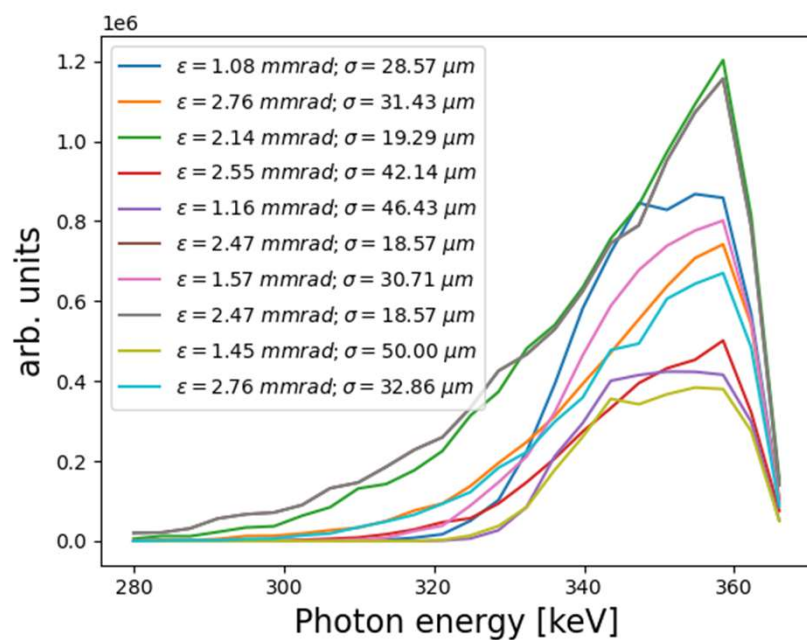
- В ФИАН разработаны программы для численного моделирования как основных выходных параметров излучения ИКИ, так и параметров рабочего пучка после линии формирования (тракта) пучка
- Спектр и интенсивность выходного излучения сильно от параметров электронного пучка (особенно, эмиттанса).
- Для получения полезных и надёжных результатов требуется максимально точная информация об электронных и лазерных пучках в точке их взаимодействия, а также верификация используемых моделей в простых экспериментах.

NON-DESTRUCTIVE DEFINITION OF EMITTANCE USING THE COMPTON BACK-SCATTERING AND AI MACHINE LEARNING

I. Drebot*, L. Serafini, INFN-Milano, Milan, Italy

V. Petrillo¹, UNIMI, Milan, Italy

¹also at INFN-Milano, Milan, Italy



Sklearn model random forest regressor was chosen as Machine learning system