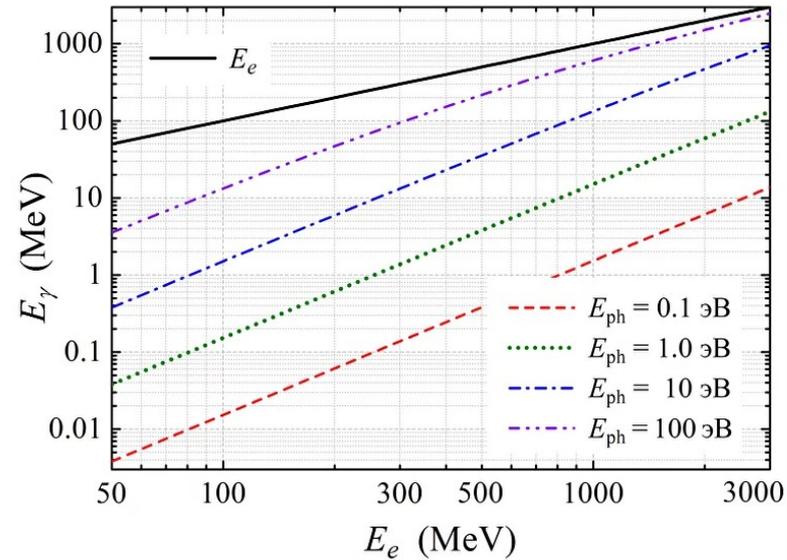
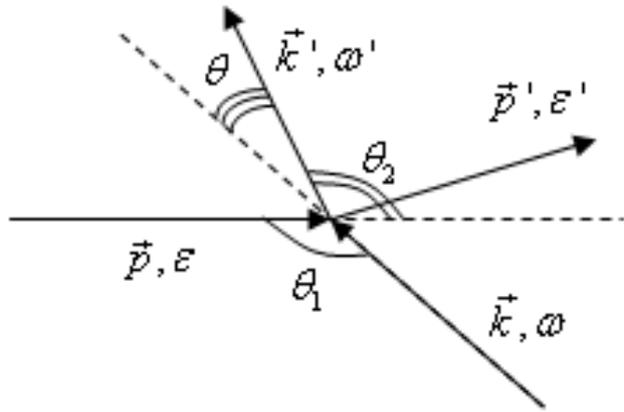


Динамика пучка в накопительном кольце «малого» ИКИ НЦФМ

Бобылев Дмитрий
НИИЯФ МГУ

25 апреля 2024 г.
Научный семинар ОЭПВАЯ

Обратное комптоновское рассеяние



$$E_\gamma = 4(E_e/m_e c^2)^2 E_{ph}$$

Источник Комптоновского Излучения (ИКИ) НЦФМ

Концепция комплекса ИНОК предусматривает этапность реализации проекта, которая минимизирует риски задержки старта научной программы. Каждой стадии проекта соответствует свой обширный научный домен.

Стадия 0

«Большой» электронный ускоритель.
Эксперименты на прямом электронном пучке.

Излучение ультравысокой интенсивности, фундаментальная электродинамика, задачи ВНИИЭФ по спецметатике.

Стадия 1

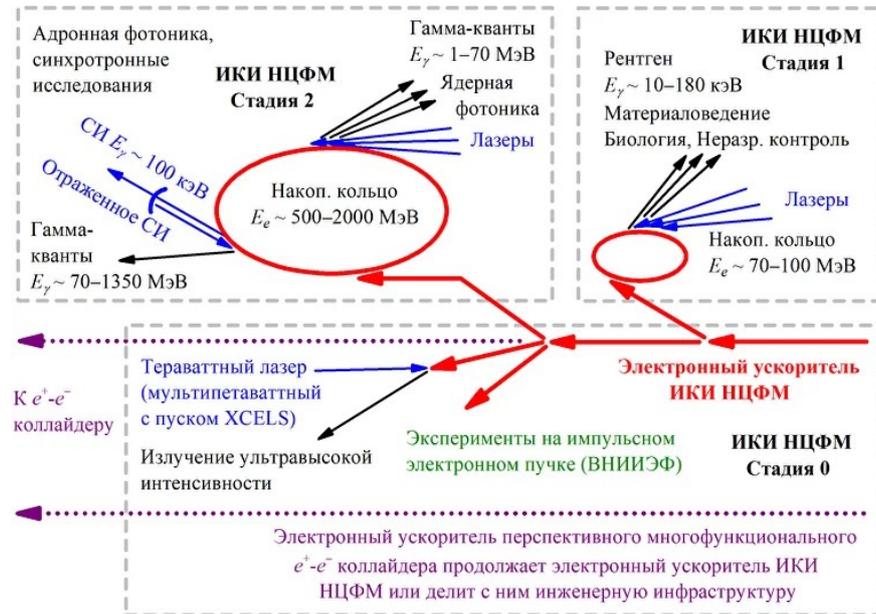
«Малый» комптоновский источник. Эксперименты с (квази)монохроматическим рентгеновским излучением 10-180 кэВ.

Материаловедение, неразрушающий контроль, задачи ВНИИЭФ по спецметатике.

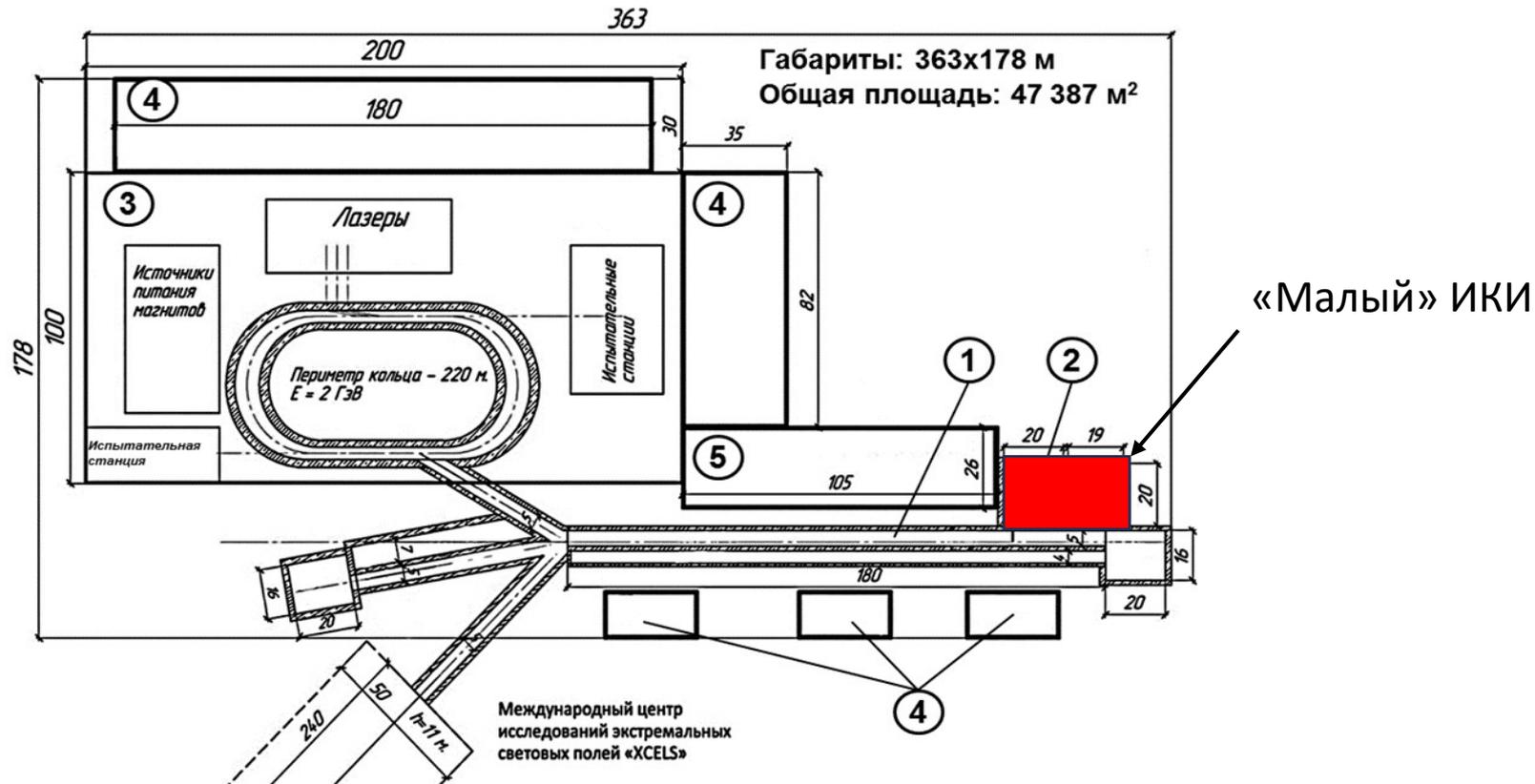
Стадия 2

«Большой» комптоновский источник. Эксперименты с (квази)монохроматическими гамма-квантами 1-300 МэВ.

Ядерная фотоника, адронная фотоника, синхротронные исследования.

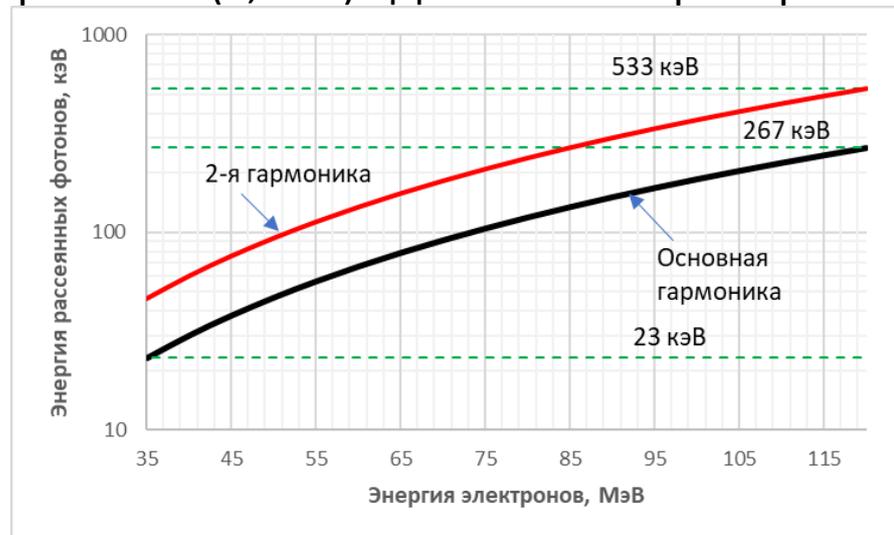


Источник Комптоновского Излучения (ИКИ) НЦФМ

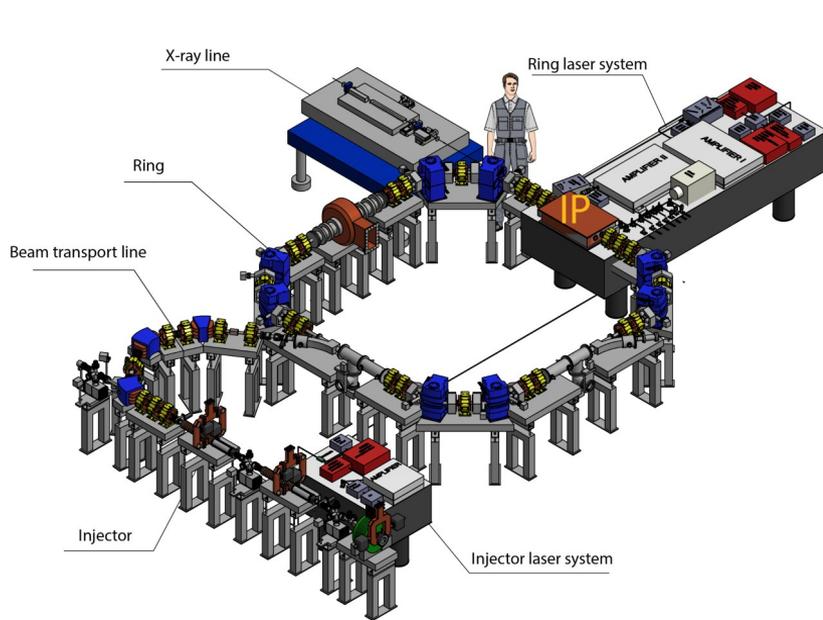


Основные положения «малого» ИКИ НЦФМ

1. Принцип перекрытия по энергии с «большим» ИКИ.
2. Энергия электронов на выходе линейного ускорителя регулируется в диапазоне 35...120 МэВ. Лазерная система работает в режиме отдельных импульсов на основной гармонике (1,2 эВ). Диапазон энергий рентгеновских фотонов 23...267 кэВ.
3. Кольцо работает в диапазоне энергий 35...120 МэВ. Оптический резонатор работает на второй гармонике (2,4 эВ). Диапазон энергий рентгеновских фотонов 46...533 кэВ.



Проект LEXG. ЛЭУ МГУ – Цилинский университет. Максимальная энергия 50 МэВ.



$$\frac{1}{2} \beta_{x,z} \beta_{x,z}'' - \frac{1}{4} (\beta_{x,z}')^2 + (\beta_{x,z})^2 K_{x,z} = 1$$

$$\eta_{x,z}'' + K_{x,z} \eta_{x,z} = \frac{1}{\rho}$$

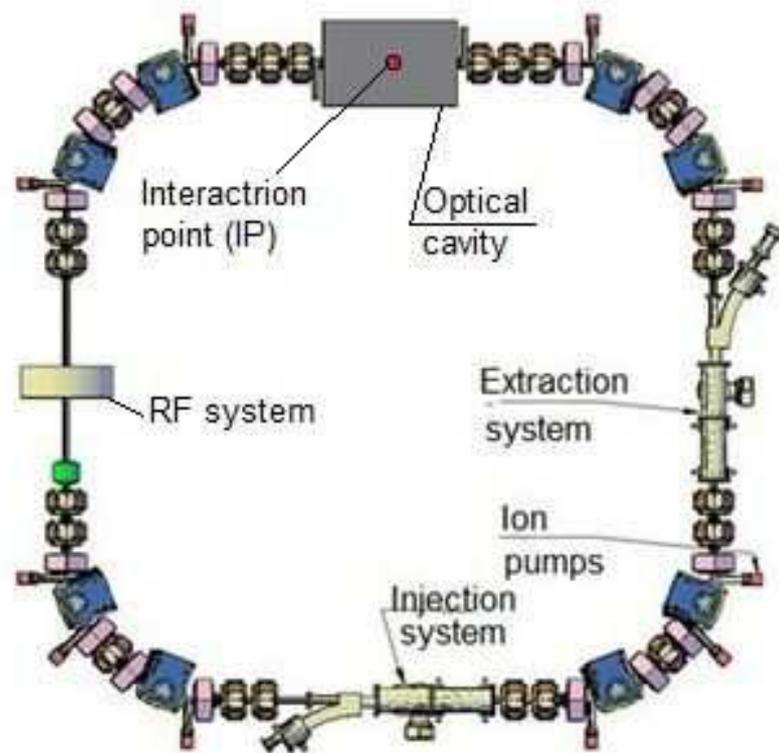
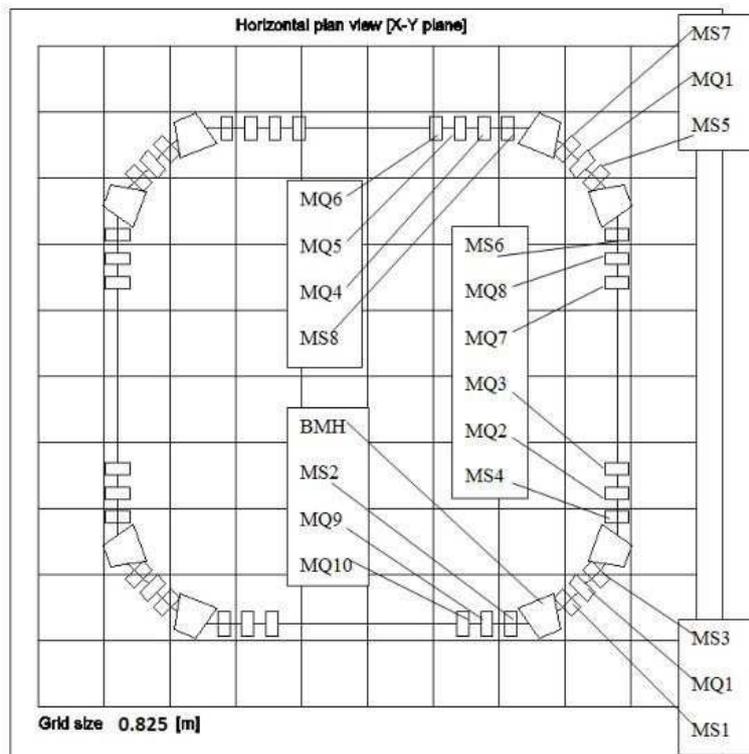
$$\xi_x = -\frac{1}{4\pi} \int_0^{C_0} \beta_x (hk_0 + k_1 - \eta_x k_2) ds,$$

$$\xi_y = \frac{1}{4\pi} \int_0^{C_0} \beta_y (k_1 - \eta_x k_2) ds.$$

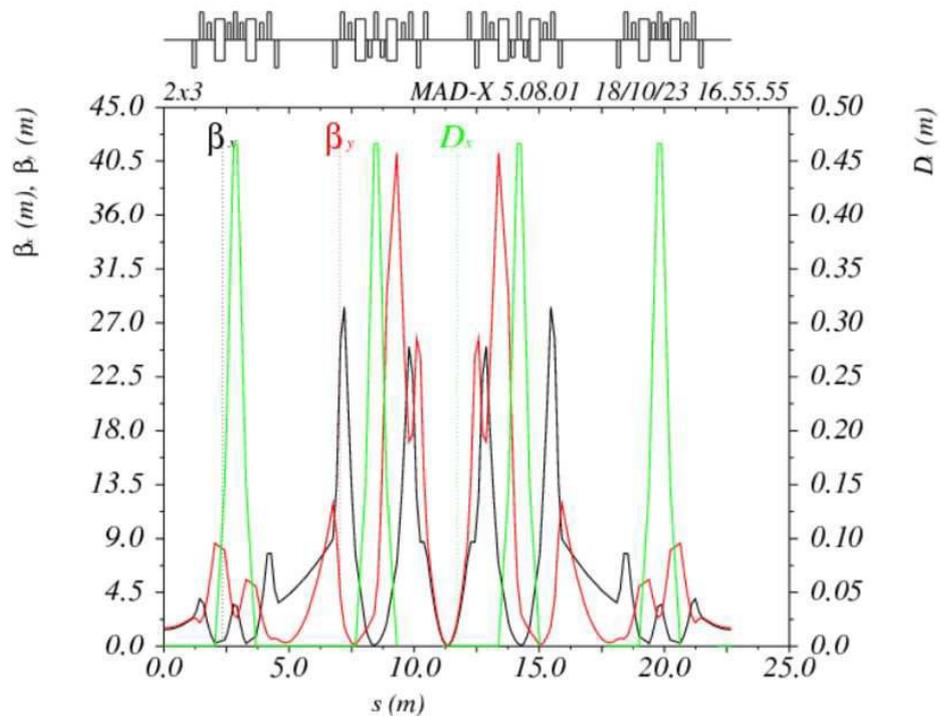
Для работы кольца LEXG при энергии 120 МэВ необходимо:

- 1) Пропорционально увеличить ВСЕ размеры всех элементов в 1.5 раза,
- 2) Сохранить поля (токи) в квадрупольях и секступольях неизменными,
- 3) Увеличить поля поворотных магнитов до 0.8 Тл.

Накопительное кольцо «малого» ИКИ



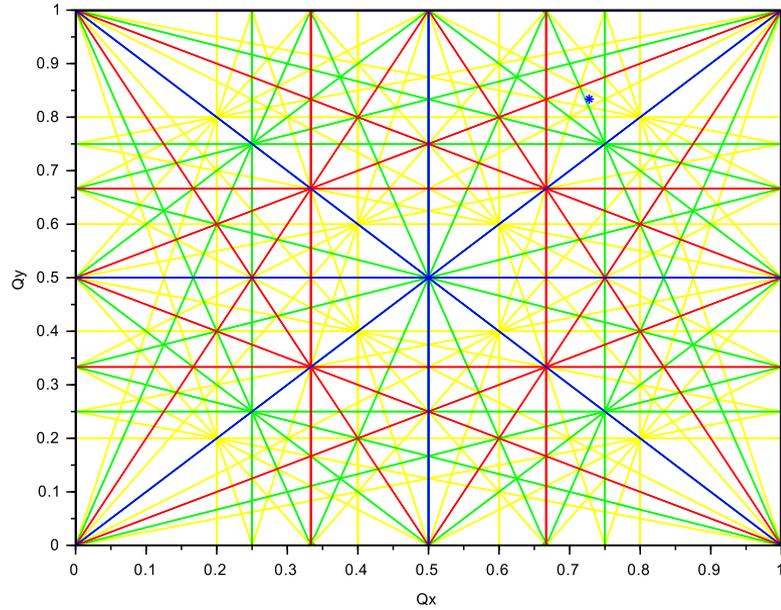
Параметры накопительного кольца «малого» ИКИ



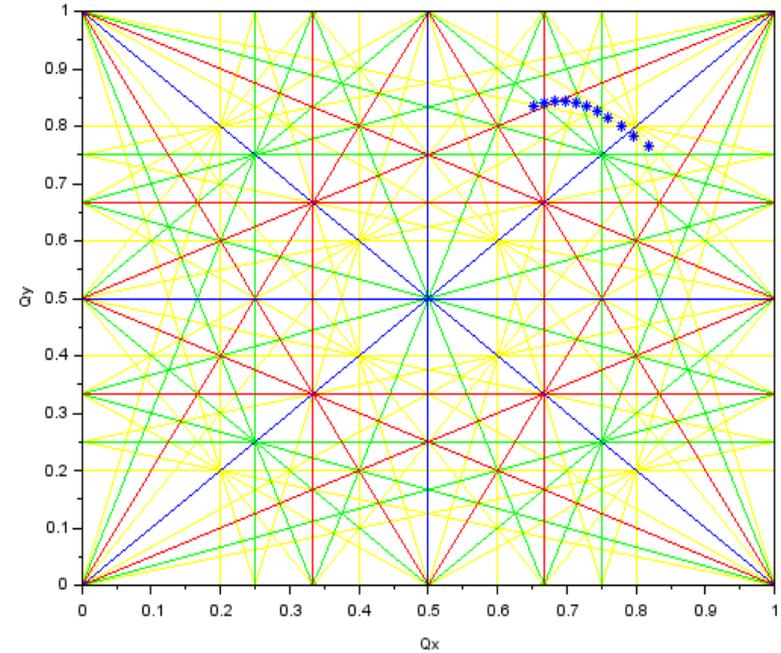
Параметр кольца	Единица	Значение
Энергия пучка	МэВ	35–120
Длина орбиты	м	22.6734
Коэффициент расширения орбит		0.0139
Бетатронные частоты Q_x, Q_y		3.7277/2.8338
Естественные хроматичности ξ_x, ξ_y		-20.9/-36.2
Скорректированные хроматичности ξ_x, ξ_y		-11.1/-10.3
Бета-функция в IP β/β_y	м	0.087/0.073
Мах бета-функции β/β_y	м	28.35/41.22
Дисперсия мах	м	0.4664
Период/частота обращения	нс/МГц	75.6/13.23
Количество дипольных магнитов		8
Количество квадрупольных линз		22
Количество секступольных линз и корректоров		16

Рабочая точка на карте резонансов

Карта резонансов, желтые - 5 порядок, зелёные - 4 порядок, красные - 3 порядок, синие - 2 порядок, чёрные - 1 порядок



Карта резонансов, желтые - 5 порядок, зелёные - 4 порядок, красные - 3 порядок, синие - 2 порядок, чёрные - 1 порядок



Основные эффекты

- Радиационное затухание
- Внутрипучковое рассеяние
- Лазерное затухание

- *Эффект Тушека*

Радиационное затухание

$$\epsilon_x(t) = \epsilon_x(0) e^{-2t/\tau_x}$$

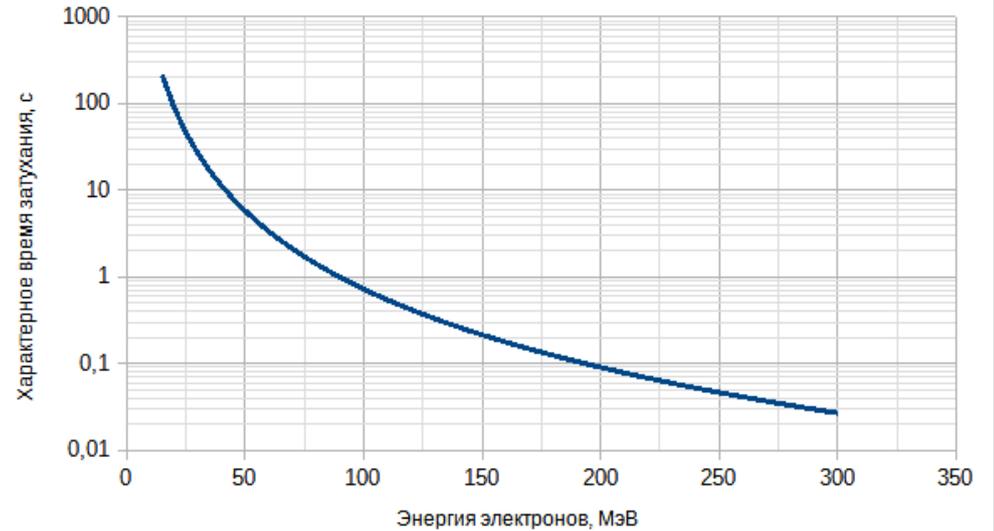
$$\epsilon_y(t) = \epsilon_y(0) e^{-2t/\tau_y}$$

$$\delta(t) = \delta_0 e^{-t/\tau_z}$$

$$\tau_{x,y,z} = \frac{2}{j_{x,y,z}} \frac{E_e}{U_0} T_0$$

$$\tau_{x,y} [c] \approx 12000 \frac{L [M] l [M] n}{E_e [MэВ]^3}$$

$$\tau_z [c] \approx 6000 \frac{L [M] l [M] n}{E_e [MэВ]^3}$$



Внутрипучковое рассеяние

$$\frac{1}{T_x} = \frac{\pi^2 \alpha^2 MN(\log)}{y\Gamma} \left[\frac{y^2 \eta^2}{\epsilon_x \beta_x} + \frac{\beta_x}{\epsilon_x} y^2 \phi^2 \right] \int_0^\infty \frac{\sqrt{\lambda}(2a\lambda+b)d\lambda}{(\lambda^3+a\lambda^2+b\lambda+c)^{3/2}}$$

$$\frac{1}{T_l} = \frac{\pi^2 \alpha^2 MN(\log)}{y\Gamma} \left[\frac{y^2}{\sigma_\eta^2} \right] \int_0^\infty \frac{\sqrt{\lambda}(2a\lambda+b)d\lambda}{(\lambda^3+a\lambda^2+b\lambda+c)^{3/2}}$$

$$T \sim E^3$$

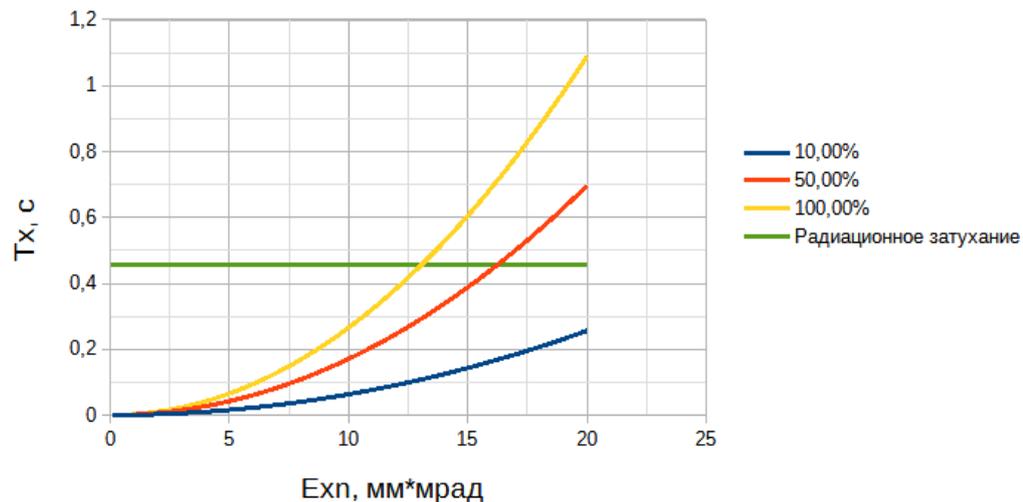
Модуль IBS MAD-X

Внутрипучковое рассеяние

Сильная зависимость от размера пучка в вертикальной плоскости, то есть от величины бетатронной связи, которая определяется, в основном, ошибками сборки кольца.

Время роста радиального эмиттанса

Энергия 100 МэВ, Заряд 0,1 нКл, Длина сгустка 5,3 мм, Энергетический разброс 0,24%

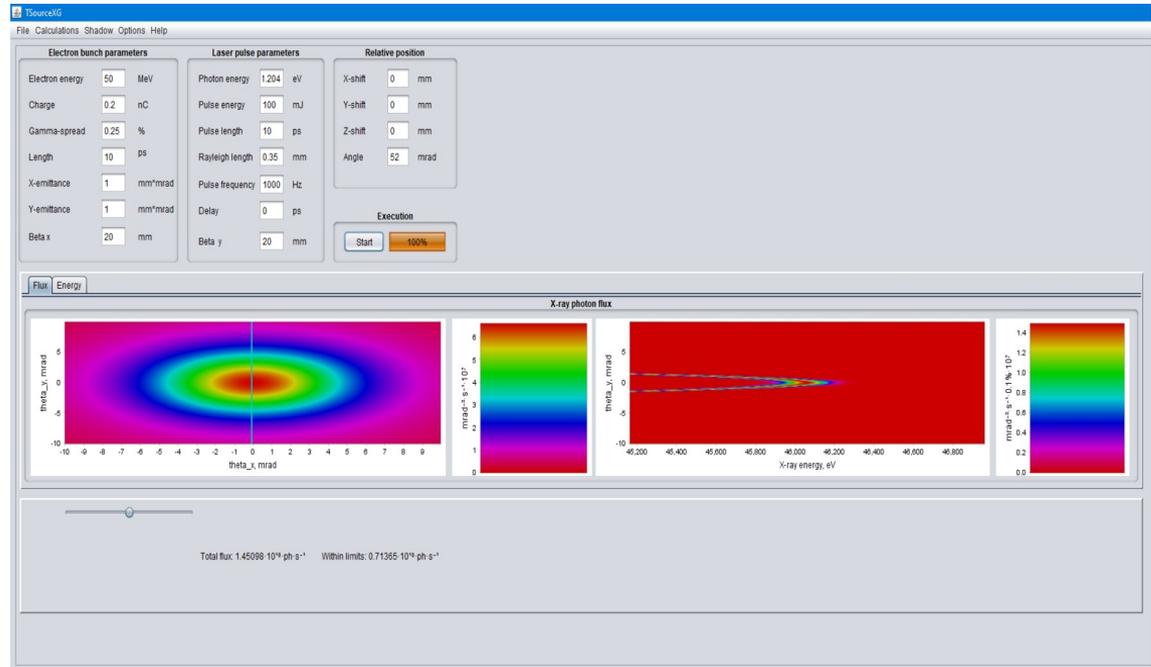


Лазерное затухание

$$\alpha_i = j_i \frac{L \sigma_c \langle E_Y \rangle}{2 E_e}$$

$$L = N_{ph} f \frac{\cos \phi}{2\pi} \frac{1}{\sqrt{\sigma_{y,e}^2 + \sigma_{y,y}^2} \sqrt{(\sigma_{x,e}^2 + \sigma_{x,y}^2) \cos^2 \phi + (\sigma_{z,e}^2 + \sigma_{z,y}^2) \sin^2 \phi}}$$

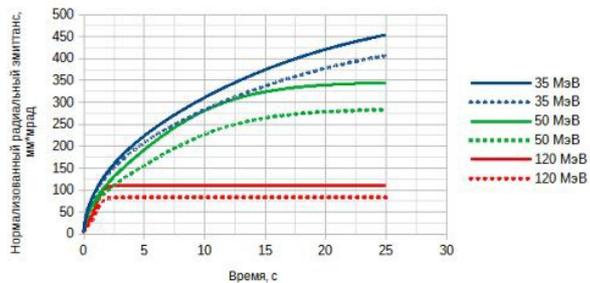
TSourceXG



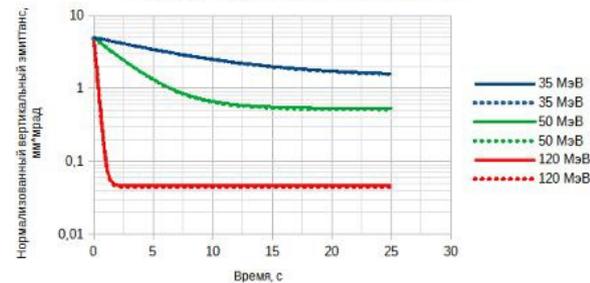
Vinogradov A., Feshchenko R., Shvedunov V., Artyukov I.
 // Ray tracing simulation of X-ray microdiffraction beamline
 on the inverse Compton source. *Symmetry* 2023. 15. 1068.

Отсутствие бетатронной связи

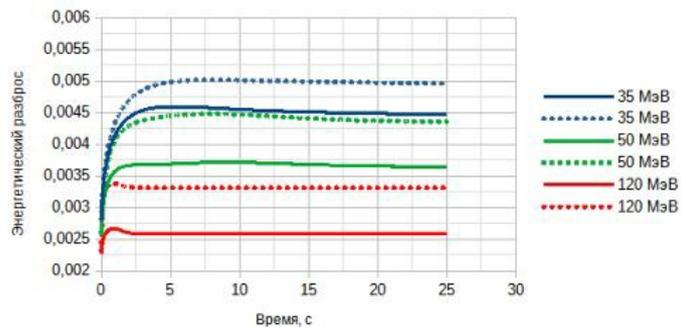
Нормализованный радиальный эмиттанс



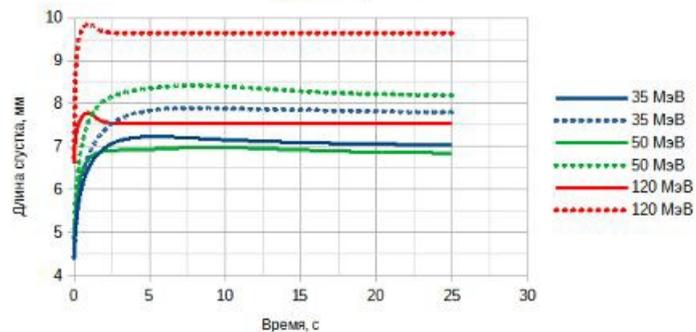
Нормализованный вертикальный эмиттанс



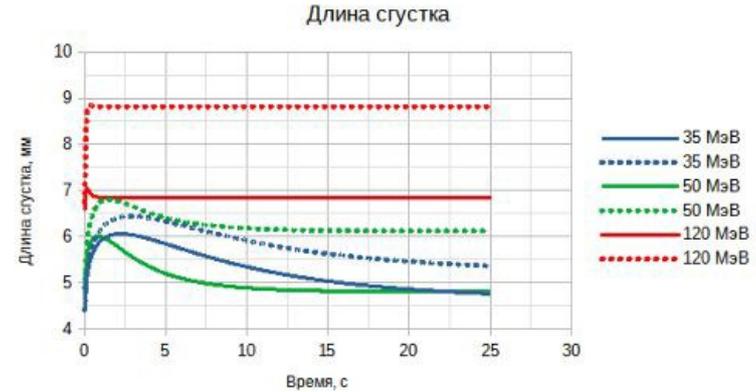
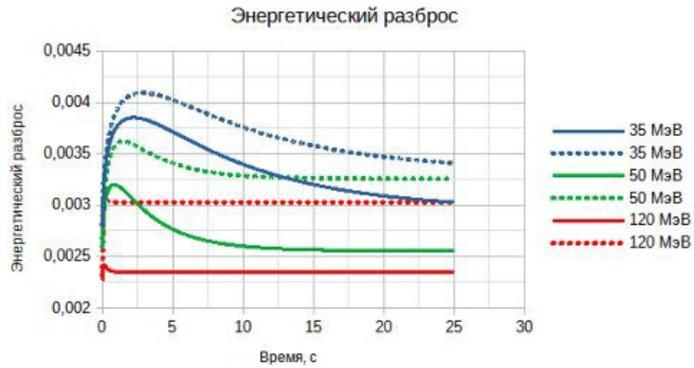
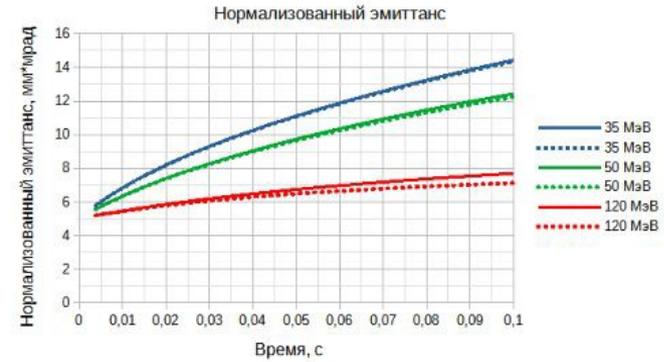
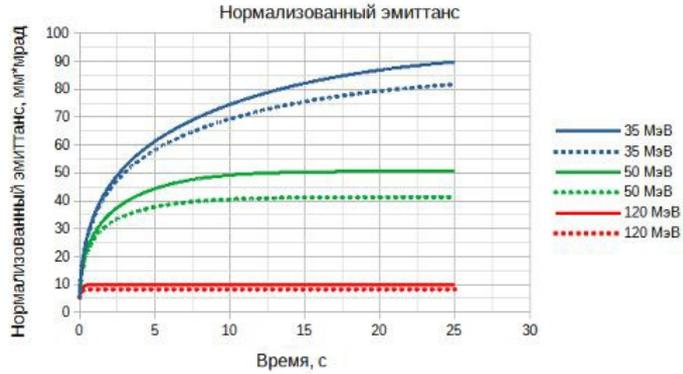
Энергетический разброс



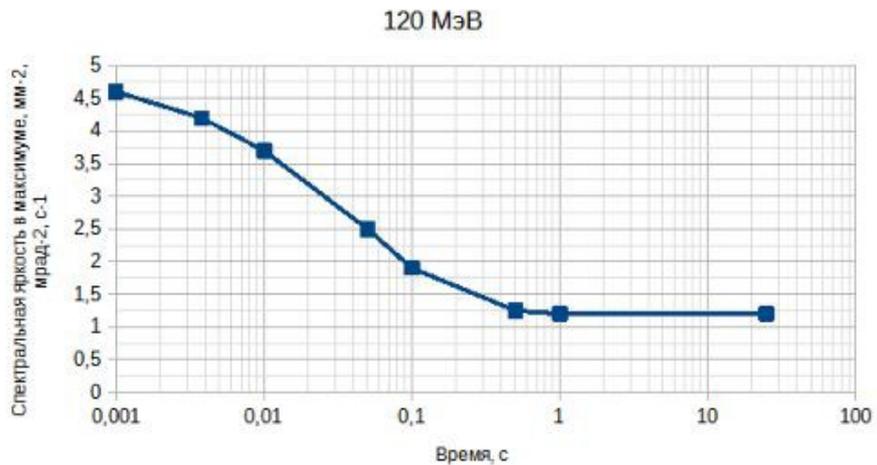
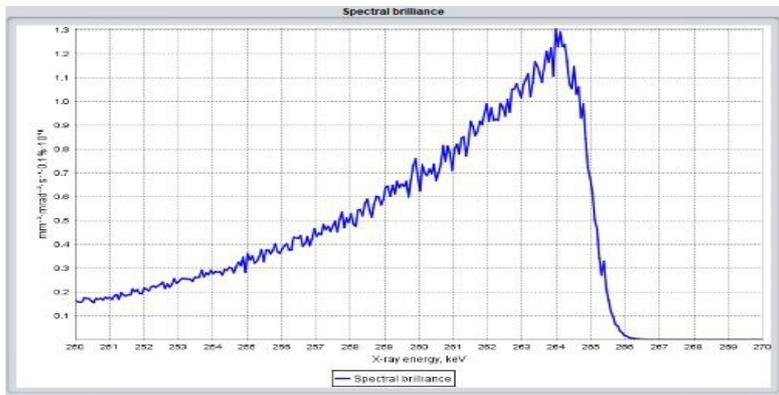
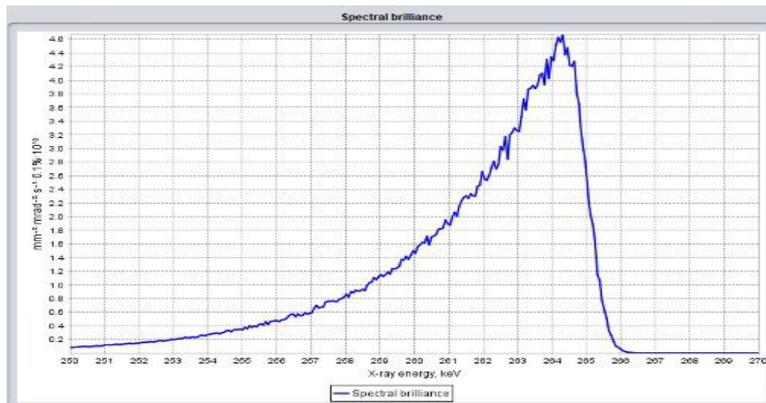
Длина сгустка



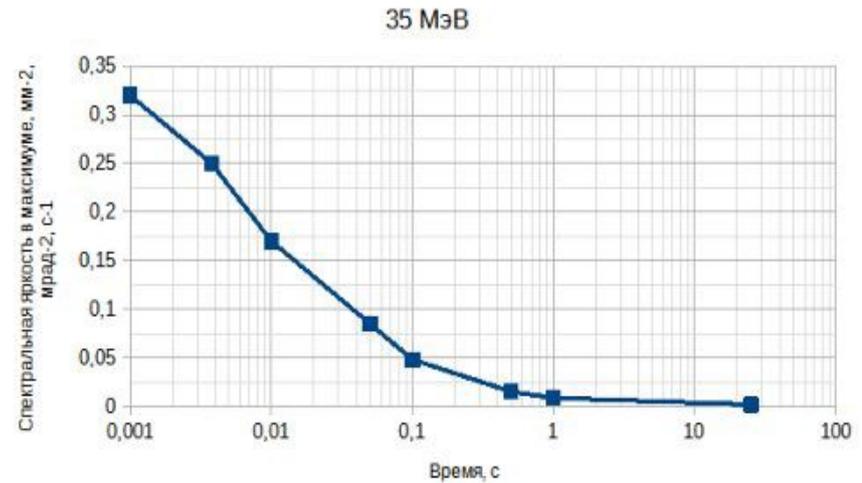
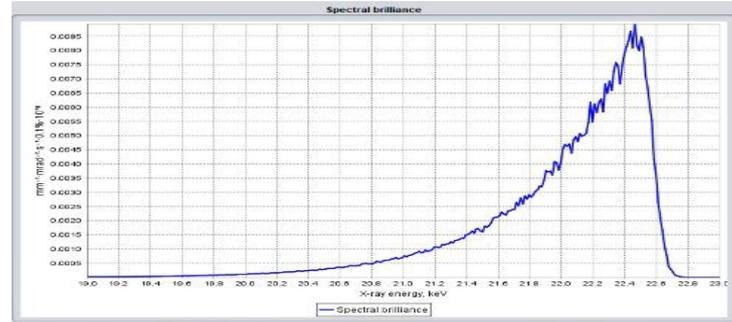
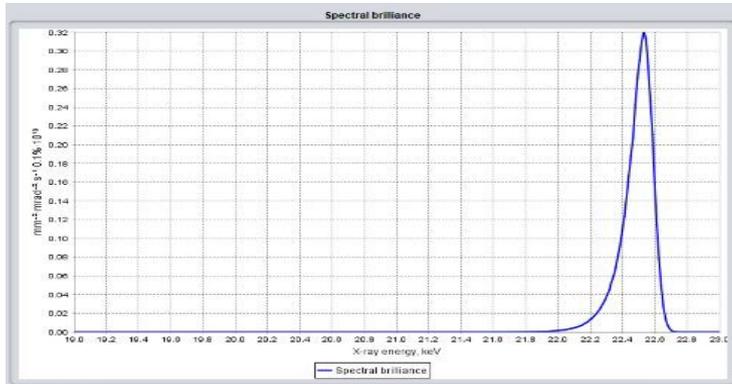
100% бетатронная связь



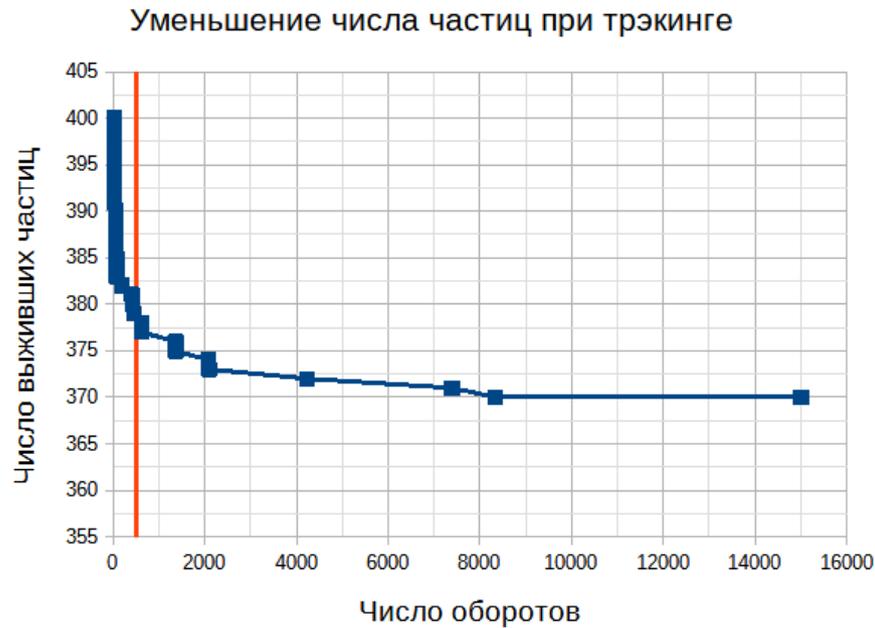
Изменение спектральной яркости, 120 МэВ



Изменение спектральной яркости, 35 МэВ



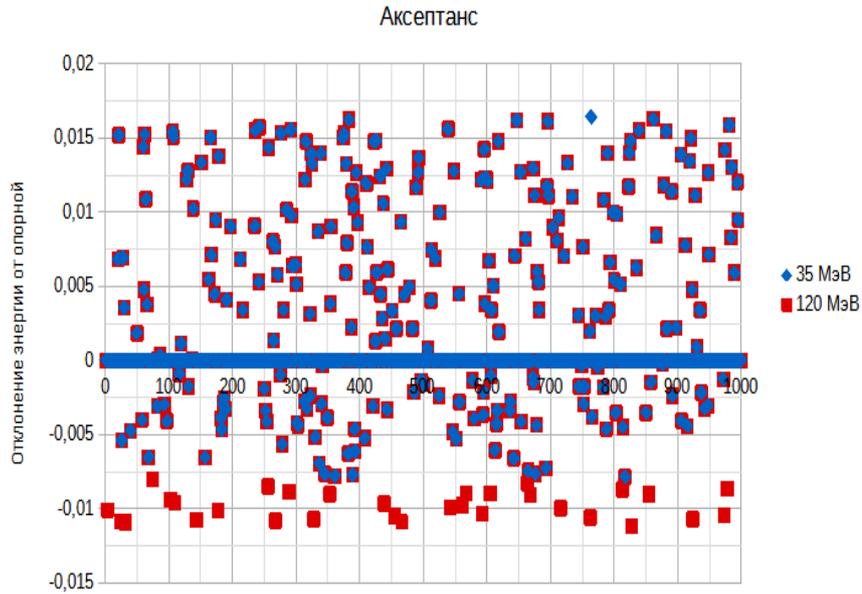
Акцептанс и динамическая апертура



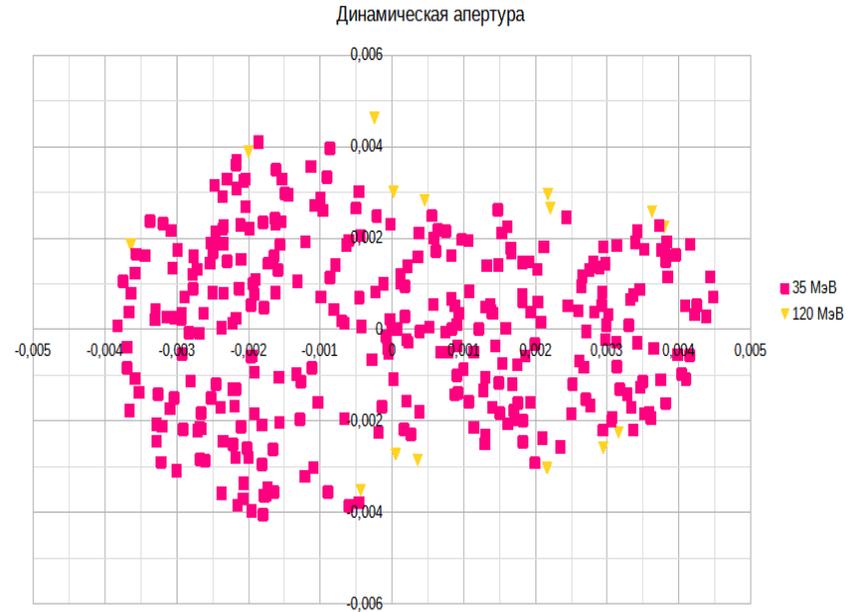
500 оборотов ~ 40 мкс ~
~10 периодов синхротронных колебан

Модуль PTC_TRACK MAD-X

Акцептанс и динамическая апертура



При комптоновском рассеянии электрон не выпадает за акцептанс



Достаточно большая динамическая апертура, но можно и лучше!

Направления дальнейшей работы

Увеличение динамической апертуры

Более точный расчёт радиационного затухания

Улучшение характеристик комптоновского излучения

Спасибо за внимание!