

Проект накопительного кольца ИКИ НЦФМ

Я.В. Гетманов, А.В. Васильев, Н.А. Винокуров, В.В. Каминский,

А.Е. Левичев, Д.А. Никифоров, А.В. Петренко, Ю.А. Тихонов

ИЯФ СО РАН

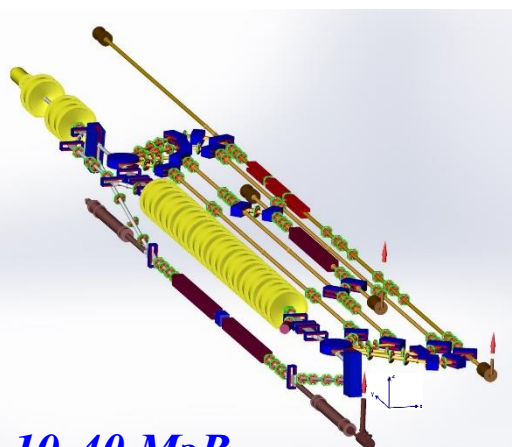
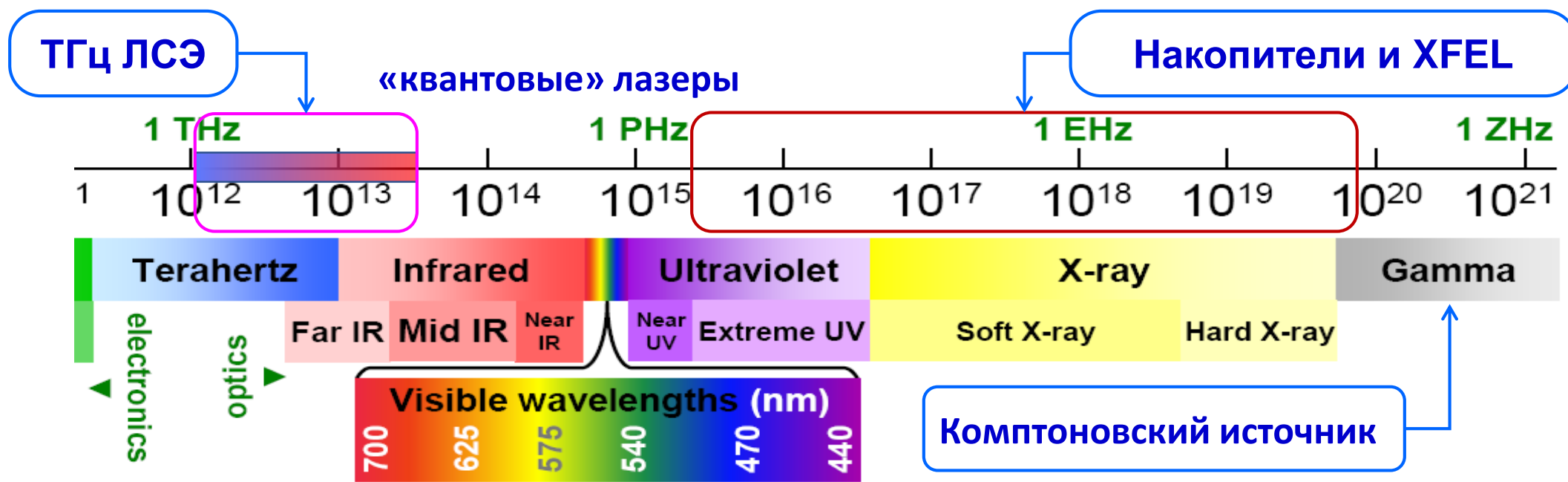
Новосибирск, 10.03.2026



- 1. Введение**
- 2. Требования к источнику излучения**
- 3. Комплекс генерации комптоновского излучения**
- 4. Накопитель электронов**
- 5. Генерация излучения**
- 6. Станции пользователей**
- 7. Дополнительные станции**
- 8. Заключение**

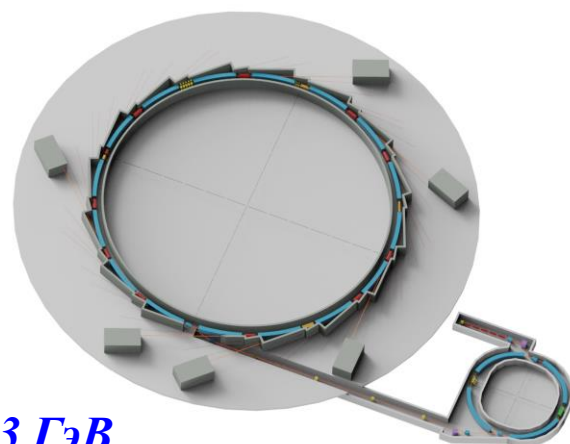


Диапазоны излучения современных источников излучения



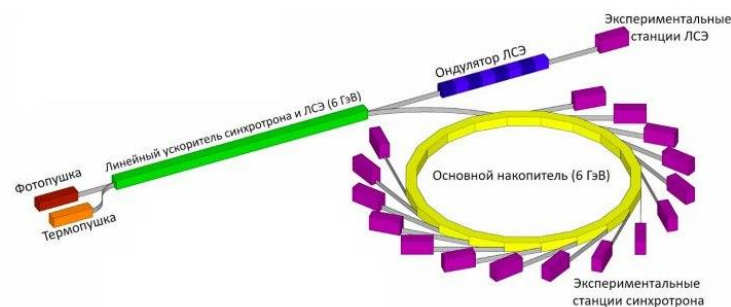
10-40 МэВ

Новосибирский ЛСЭ



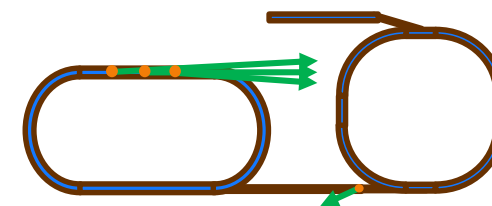
3 ГэВ

Источник СИ 4+ «СКИФ»



6 ГэВ

СИ и SASE ЛСЭ «СИЛА»



2 ГэВ

ИКИ НЦФМ



Требования к источнику излучения

Источник должен обеспечить следующие параметры, являющиеся рекордными

- энергия гамма-квантов (до 200 МэВ)
- поток фотонов (max 10^{11} ф/с)
- монохроматичность (до 0.5 %)
- «одновременная» работа нескольких станций пользователей

(* указаны предельные параметры)

| Установка | Страна | Статус | Энергия фотонов (МэВ) | Энергетический разброс (%) | Поток (фот./с) |
|------------------|---------|----------|-----------------------|----------------------------|----------------|
| New Subaru | Япония | работает | 0-76 | 1,2 | 10^5 |
| HIGS (Duke Univ) | США | работает | 0-100 | 0,8 | 10^{10} |
| ELI-NP (VEGA) | Румыния | запуск | 0,2-19,5 | 0,5 | 10^8 |
| ИКИ НЦФМ | Россия | проект | 0.2-200 | 0,5 | 10^{11} |

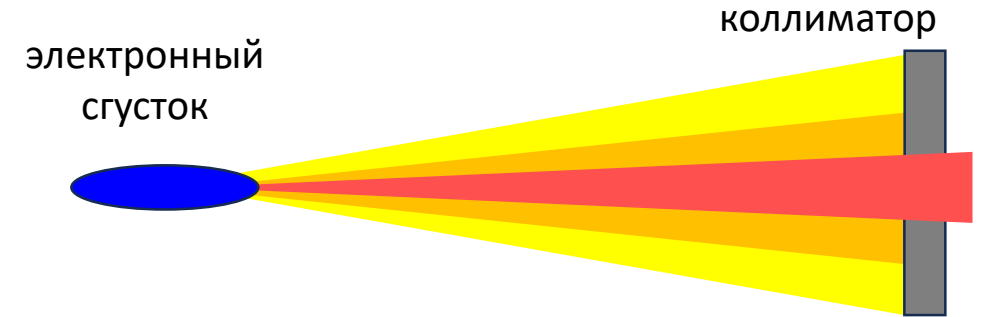
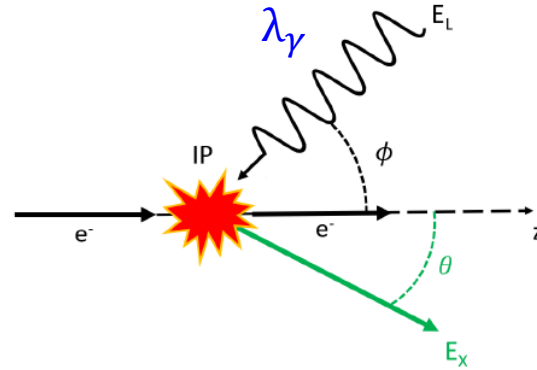
По сравнению с лучшей на сегодня американской установкой HIGS (Duke Univ.), ИКИ НЦФМ должен обеспечить больший поток гамма-квантов.



Обеспечение высокой монохроматичности излучения

Формула для рассеяния плоской монохроматической волны

$$\hbar\omega \approx \frac{4\gamma^2}{1+\gamma^2\theta^2} \frac{hc}{\lambda_\gamma} \left(1 + 4\gamma \frac{h}{mc\lambda_\gamma}\right)^{-1}$$



Зависимость энергии от угла позволяет создавать узкополосный поток фотонов с помощью коллимации.

Из-за наличия угловых и энергетических отклонений в электронном пучке спектр излучения дополнительно размывается. Ширина линии излучения (при параксиальном приближении)

$$\left(\frac{\sigma_\omega}{\omega}\right)^2 = 4 \left\langle \left(\frac{\Delta\gamma}{\gamma}\right)^2 \right\rangle + \gamma^4 \left[\frac{\theta_{max}^4}{12} + 2 \left(\frac{\varepsilon_x}{\beta_x}\right)^2 + \theta_{max}^2 \frac{\varepsilon_x}{\beta_x} \right]$$

(это уравнение определяет необходимый угол коллимации)

Требование монохроматичности значительно снижает поток фотонов

$$\frac{dN_\omega}{dt} = \frac{3}{2} \gamma^2 \theta_{max}^2 \frac{dN_{tot}}{dt}$$

функциональная зависимость ширины линии:

- γ^4 энергия электронов
- $\left\langle \left(\frac{\Delta\gamma}{\gamma}\right)^2 \right\rangle$ среднквад. энерг. разброс
- ε_x^2 эмиттанс пучка
- θ_{max}^4 угол коллимации излучения
- $1/\beta_x$ функция огибающей пучка

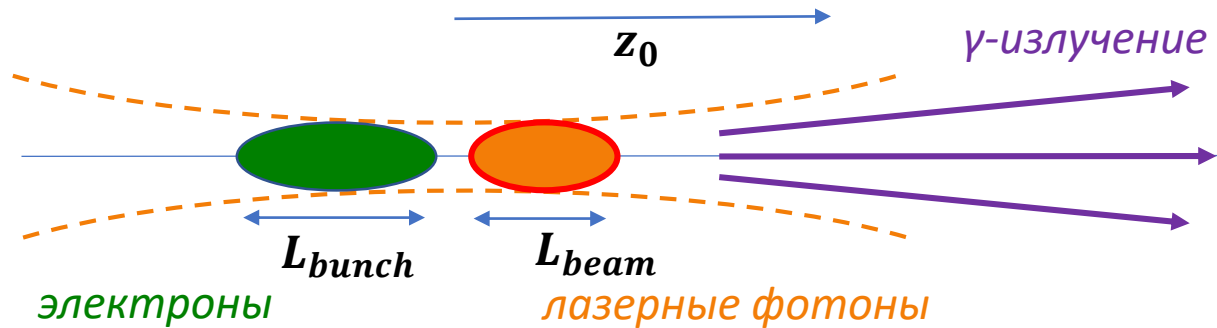


Взаимодействие электронного пучка с лазерным импульсом

Предыдущие формулы получены из взаимодействия с плоским волновым фронтом. Их можно использовать и для гауссова светового пучка с длиной Рэля z_0 , при условии

$$z_0 \gg L_{beam}, L_{bunch}$$

(длины лазерного и электронного сгустков)



Полный поток зависит от эффективного сечения

$$\frac{dN_{tot}}{dt} = \frac{I W \sigma_T}{e \hbar \omega S_{eff}} \approx \frac{8 I \alpha W}{3 I_A m c z_0} \frac{1}{\sqrt{1 + 4\pi \frac{\langle x^2 \rangle}{\lambda z_0}}}$$

Условие ненулевого потока при необходимой ширине спектра

$$\frac{\sigma_\omega}{\omega} > 2 \sqrt{\left\langle \left(\frac{\Delta\gamma}{\gamma} \right)^2 \right\rangle + \frac{1}{2} (\gamma^2 \varepsilon_x \gamma_x)^2}$$

$\langle (\Delta\gamma/\gamma)^2 \rangle$ Зависят от магнитной структуры

ε_x
 $\alpha_x, \gamma_x, \beta_x$ эл. оптика в месте ген.

Коллимированный поток

$$\frac{dN_{col}}{dt} = \frac{3}{2} \gamma^2 \theta_{max}^2 \frac{dN_{tot}}{dt}$$

При этом, угол коллимации определяется необходимой шириной спектра σ_ω/ω

$$\theta_{max}^2 = -6\varepsilon_x \gamma_x + 2\sqrt{3} \sqrt{\frac{(\sigma_\omega/\omega)^2}{\gamma^4} + (\varepsilon_x \gamma_x)^2 - 4 \frac{\langle (\Delta\gamma/\gamma)^2 \rangle}{\gamma^4}}$$

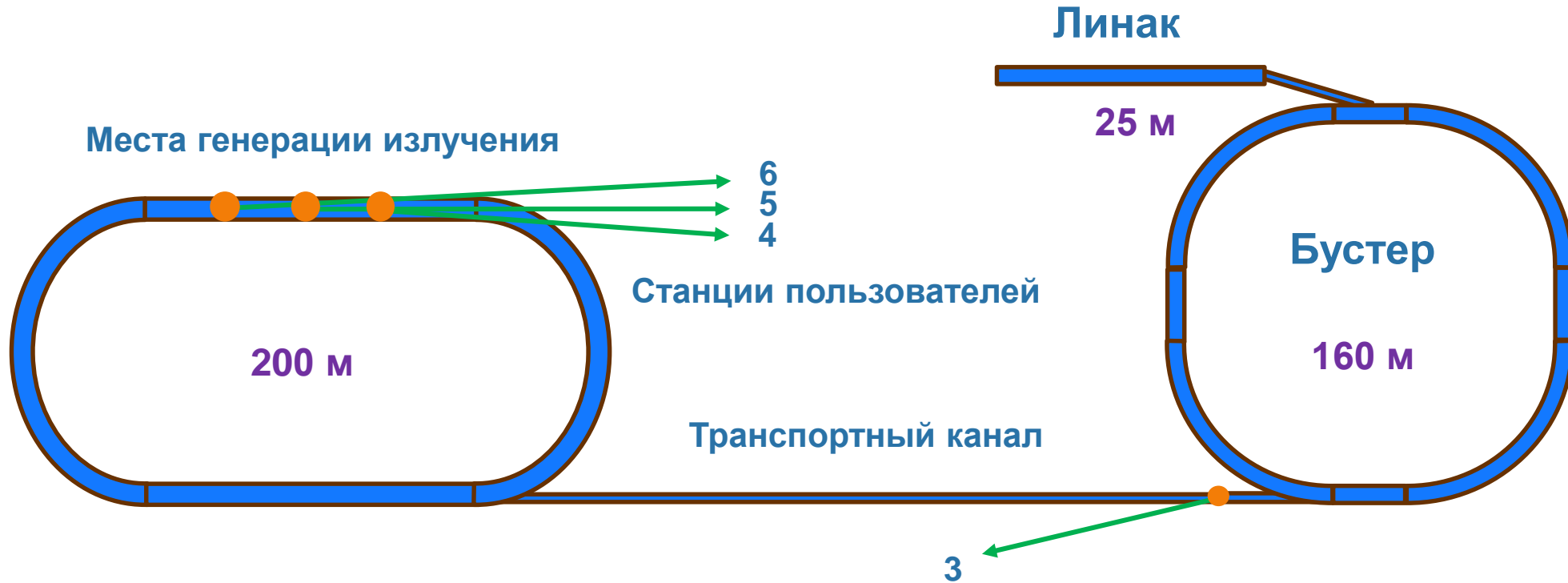


Требования к источнику излучения

- Энергетический разброс пучка фотонов может быть сужен до требуемых значений путем установки коллиматора для ограничения угла рассеяния θ .
- Энергетический разброс фотонов ограничен энергетическим разбросом электронного пучка.
- Коллимированный поток на несколько порядков меньше полного.
- Для одновременной работы нескольких пользователей на орбите накопителя должно быть несколько прямолинейных промежутков, где генерируются гамма-кванты.
- Бета-функции в местах взаимодействия должны быть достаточно большими (около 20 метров).
- Разумный компромисс по значению эмиттанса пучка электронов лежит в области 10 – 30 нм.
- Дальнейшее уменьшение эмиттанса ниже 10 нм приводит к существенному росту стоимости установки при незначительном улучшении монохроматичности.
- В точках взаимодействия требуется получить минимальную длину Рэлея.



Схема ускорительного комплекса ИКИ с энергией электронов до 2 ГэВ



Накопитель электронов
и станции генерации 4-6 (7)

Новая разработка

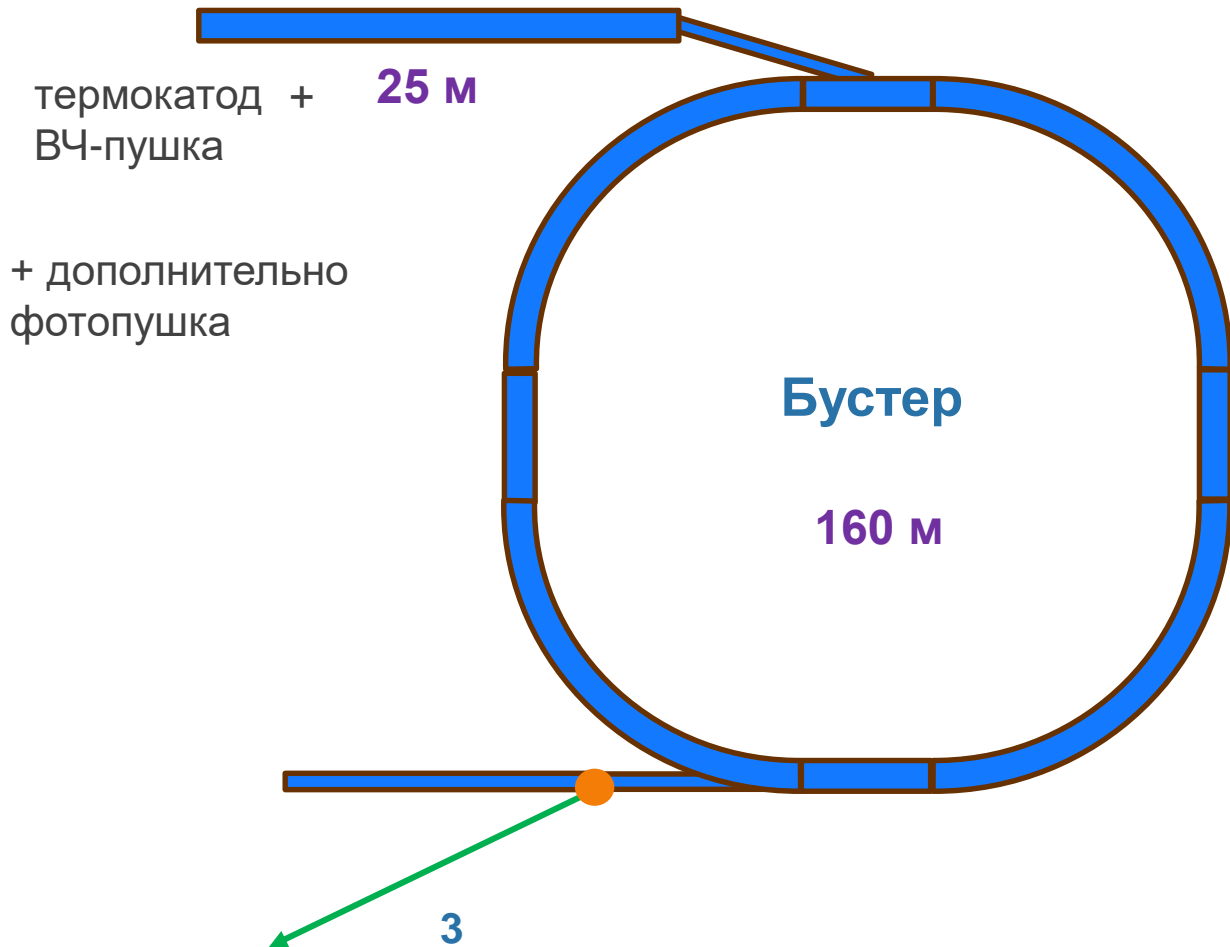
Инжекционный комплекс
и станция генерации 3

Используется задел комплекса СКИФ



Станция пользователей излучения в инжекторе

Линак



станция комптоновского излучения 3

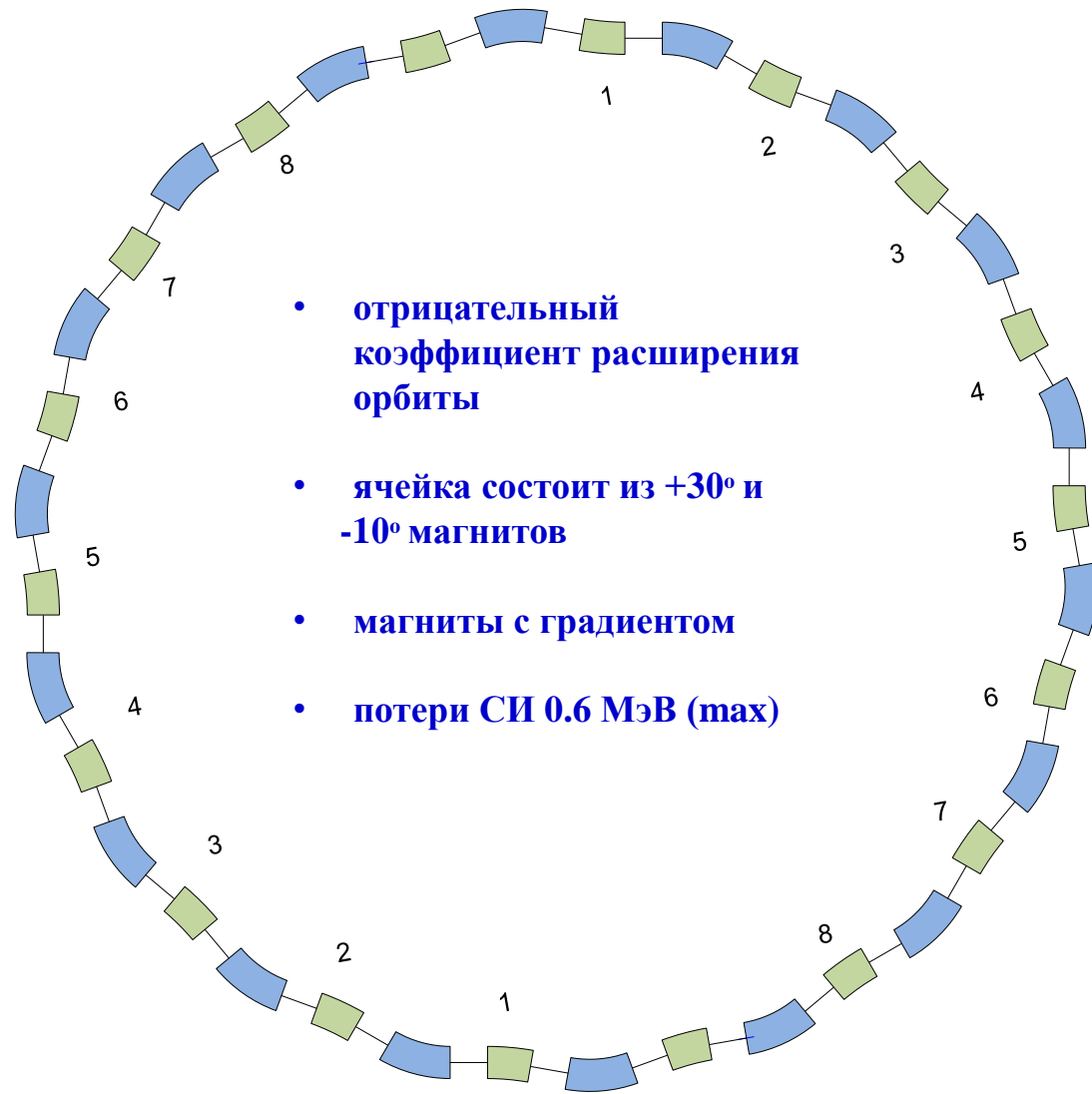
| Параметр | E_{min} | E_{max} |
|--|-----------|-----------|
| Энергия, ГэВ | 0.5 | 2 |
| Частота циклов работы, Гц, не менее | 0.1 | 1 |
| Максимальный заряд в сгустке, нКл не менее | 1 | |
| Длительность сгустка, пс, не более | 50 | 200 |
| Норм. эмиттанс, мм·мрад, не более | 10 | 100 |
| Периметр, м | 160 | |

| Параметры излучения на станции 3 | |
|-------------------------------------|--------|
| Энергия фотонов, МэВ | 4.5-70 |
| Полная интенсивность, ф/с, не менее | 10^9 |
| Длительность импульса, пс | 50 |

подробнее в докладе Петренко А.В.

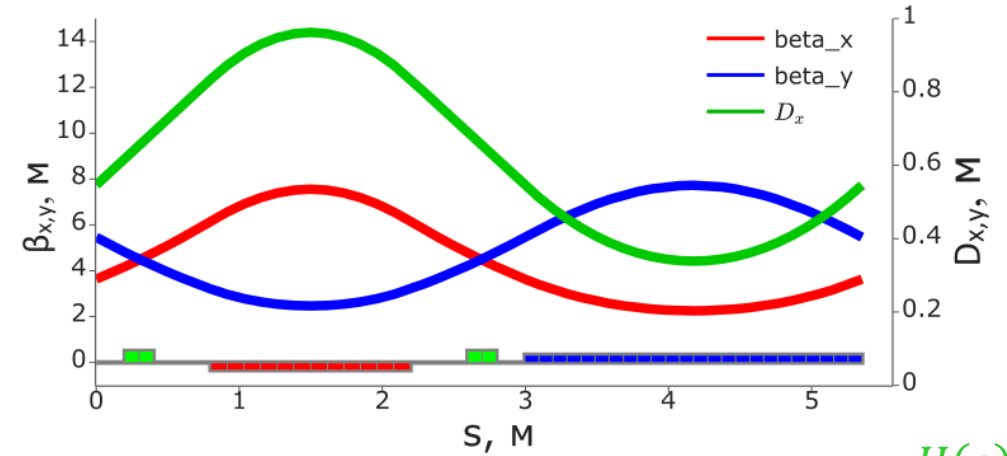


Основа накопителя – периодическая структура кольца



- отрицательный коэффициент расширения орбиты
- ячейка состоит из +30° и -10° магнитов
- магниты с градиентом
- потери СИ 0.6 МэВ (max)

дипольные магниты с градиентом + 2 секступоля



натуральный эмиттанс:

$$\epsilon_x = \frac{55}{32\sqrt{3}} \frac{\hbar}{mc} \gamma^2 \frac{1}{3 - J_E} \frac{\oint \frac{H(s)}{|\rho|^3} ds}{\oint \frac{1}{|\rho|^2} ds}$$

минимальный энергетический разброс:

$$\sqrt{\left\langle \left(\frac{\Delta\gamma}{\gamma} \right)^2 \right\rangle} = \gamma \left(\frac{55}{32\sqrt{3}} \frac{\hbar}{mc} \frac{1}{J_E} \frac{\oint \frac{ds}{|\rho|^3}}{\oint \frac{ds}{|\rho|^2}} \right)^{1/2}$$

длина пучка:

$$\sigma_l = \frac{|\alpha_c|c}{\Omega} \sqrt{\left\langle \left(\frac{\Delta\gamma}{\gamma} \right)^2 \right\rangle} \quad \alpha_c = \frac{1}{\Pi} \oint \frac{\eta}{\rho} ds$$

кольцо симметрично разрывается для установки мест встречи, инжекции и компенсации потерь на СИ



Накопитель электронов

5 град

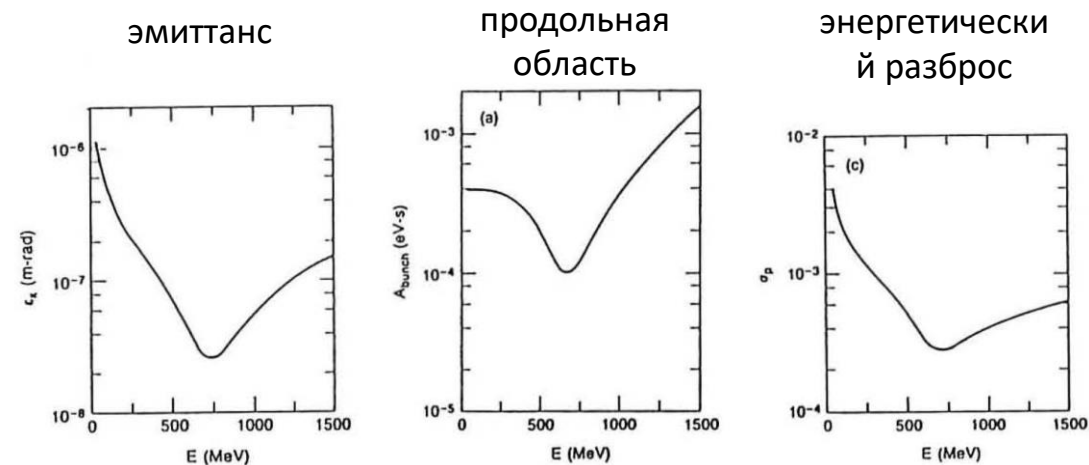


| Параметр | E _{optim} | E _{max} |
|------------------------------------|--------------------|------------------|
| Энергия, ГэВ | 0.6 | 2 |
| Средний ток, А, не менее | 0.1** | |
| Разброс по энергии, %, не более | 0.1 | 0.3 |
| Количество сгустков | 1-60 | |
| Заряд в сгустке, нКл | 1 | |
| Частота следования сгустков, МГц | 1.6-90* | |
| Длительность сгустка, пс, не более | 200 | |
| Периметр, м | ~200 | |
| Рабочая частота, МГц | 180* | |



Особенности работы

- Диапазон энергий от 500 МэВ до 2 ГэВ
изменение вкладов основных эффектов:
 - радиационное затухание
 - квантовые флуктуации
 - одночастичные эффекты
 - коллективные эффекты
- Воздействие генерации излучения на параметры электронного пучка
 - увеличение энергетического разброса
 - уменьшение времени жизни из-за потерь электронов при излучении высокоэнергетических фотонов
- Отрицательный коэффициент уплотнения орбиты
 - неустойчивости
- Влияние возмущений из-за выставки магнитов, наведённых и остаточных полей
 - коррекция орбиты

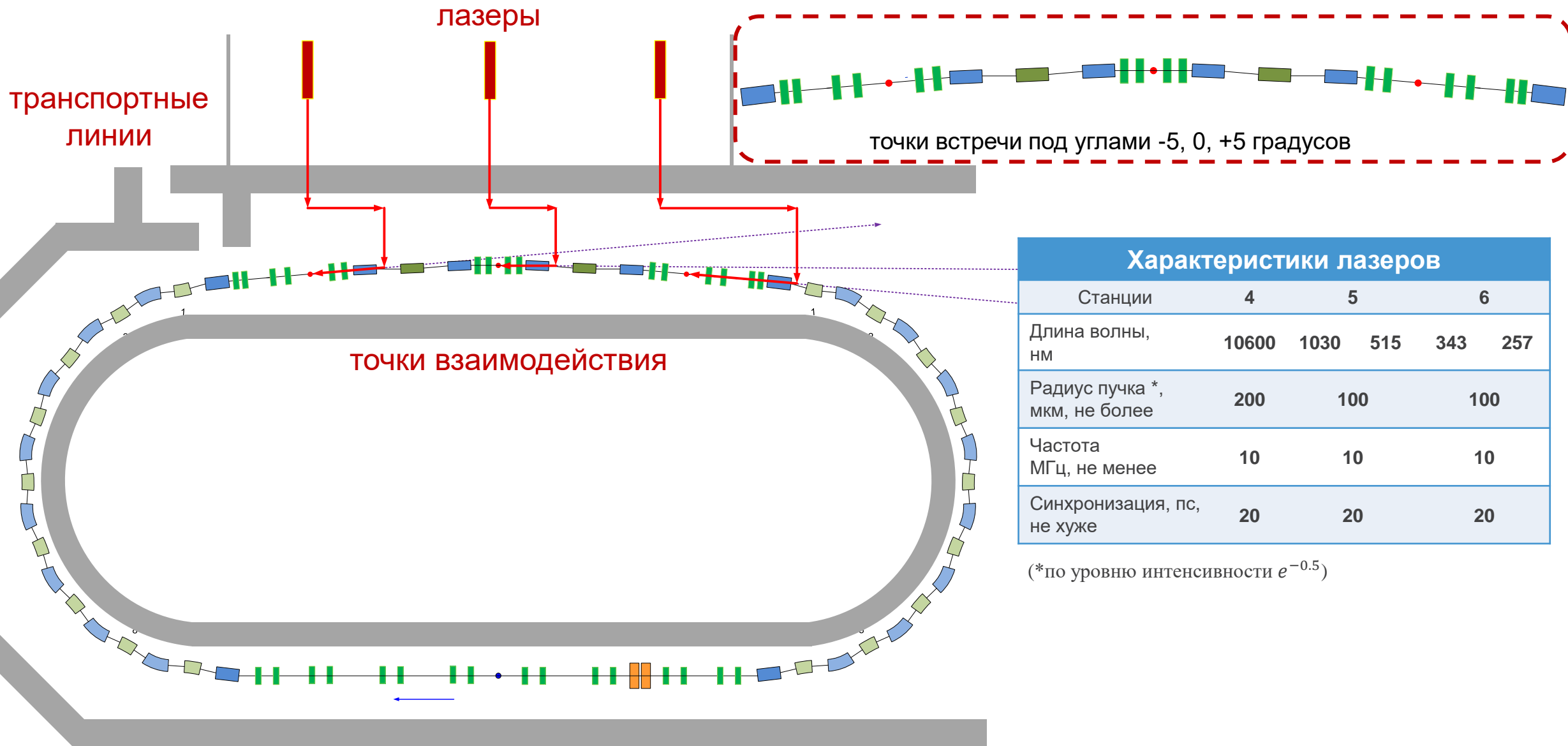


Изменение параметров в бустере во время рампа (LBL SR Source)

Injection system design for the LBL 1-2 GeV SRS



Генерация излучения



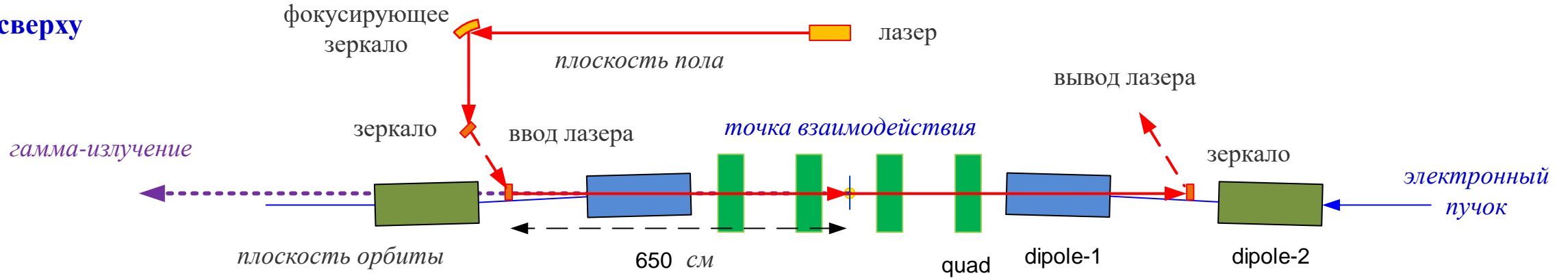
| Характеристики лазеров | | | | | |
|-------------------------------|-------|------|-----|-----|-----|
| Станции | 4 | 5 | 6 | | |
| Длина волны, нм | 10600 | 1030 | 515 | 343 | 257 |
| Радиус пучка *, мкм, не более | 200 | 100 | 100 | | |
| Частота МГц, не менее | 10 | 10 | 10 | | |
| Синхронизация, пс, не хуже | 20 | 20 | 20 | | |

(*по уровню интенсивности $e^{-0.5}$)

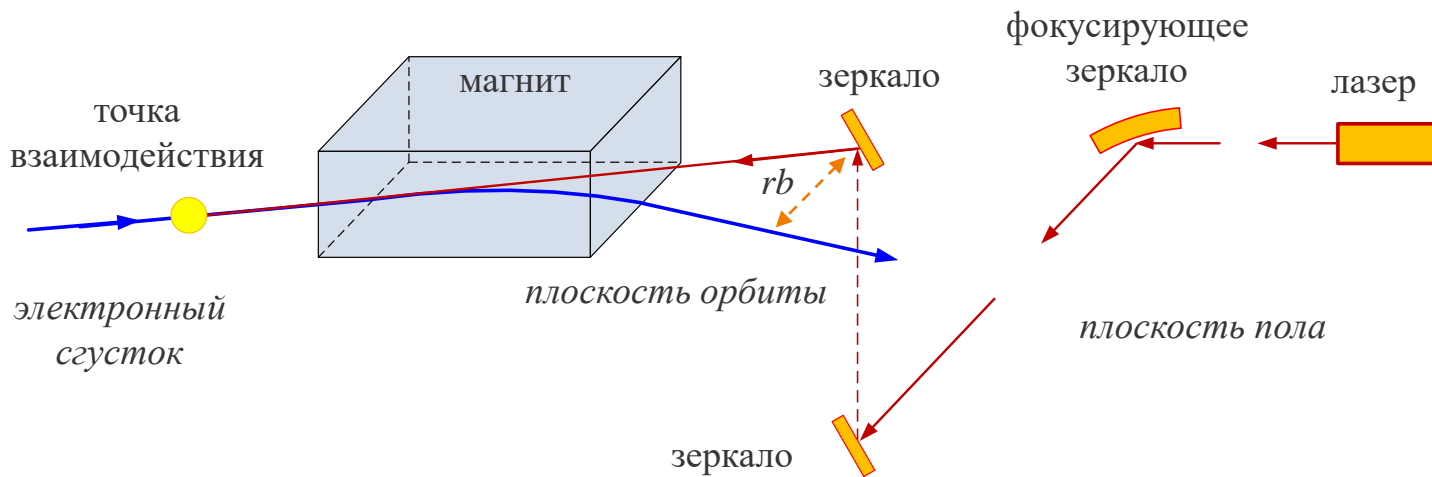


Схема генерации излучения

вид сверху

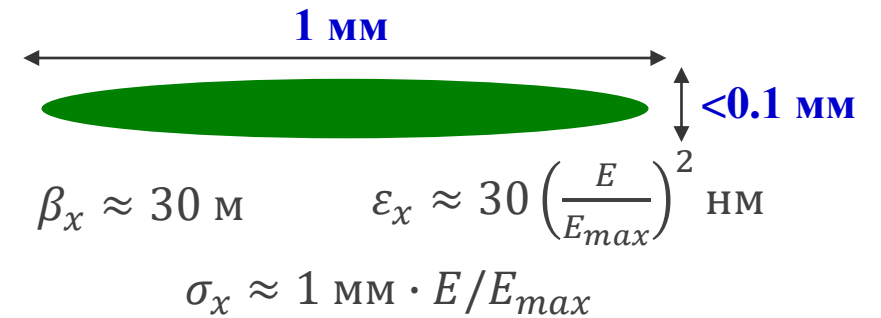


вид сбоку



расстояние от зеркала до орбиты $rb = 200 \text{ мм}$

место встречи
электронный сгусток



световой импульс

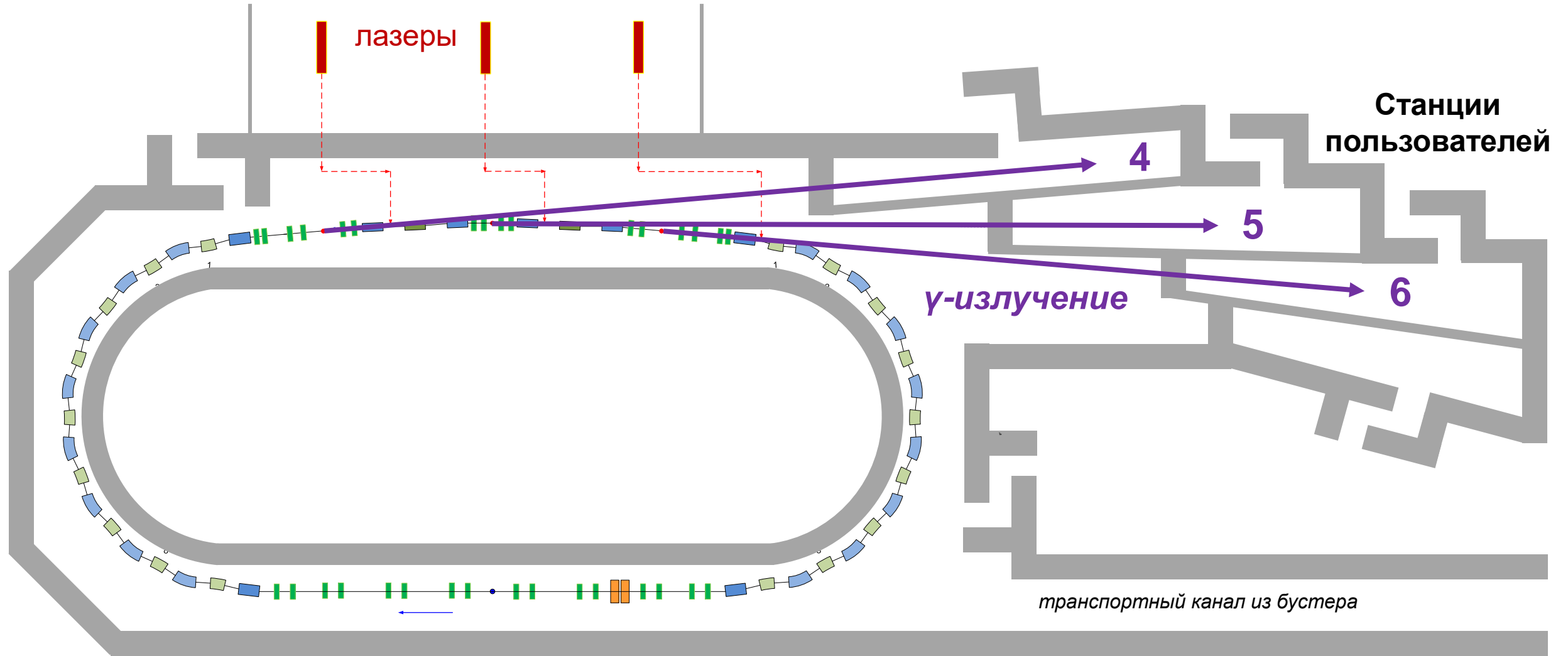
400 мкм (по уровню интенсивности $e^{-0.5}$)

$$w_0 = 2r \quad z_R = \frac{\pi w_0^2}{\lambda} = 47$$

размер на зеркале $r_m = 48$



Три основных станции излучения

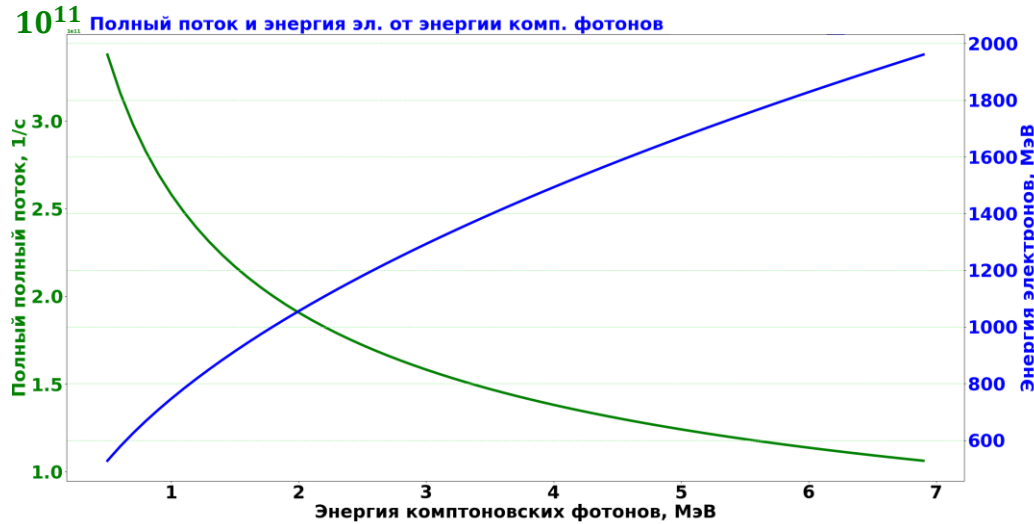


Необходимые для получения малой (**0,5%**) относительной ширины спектра углы коллимации составляют **несколько сотых мрад**. Коллиматоры должны располагаться на расстоянии около **50 м** от источника излучения, а образцы – на расстоянии более **60 м**.

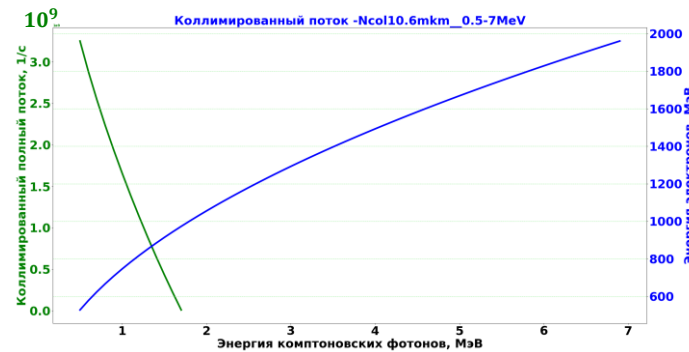
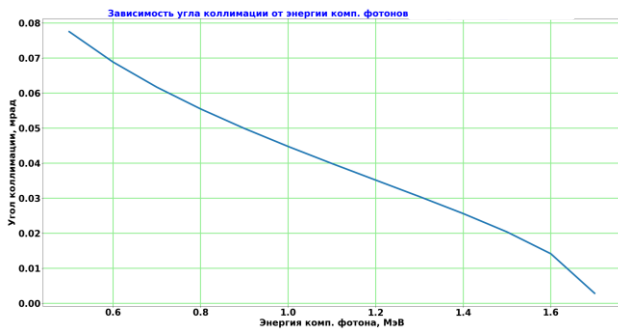


Режимы генерации потоков гамма-квантов

пример для станции 4



фиксированная ширина спектра, $\sigma_{FWHM} = 0.5\%$,



фиксированный угол коллимации $\theta_{max} = 0.04$ мрад

Параметры излучения на станциях накопителя

| Станция | 4 | 5 | 6 | | |
|-------------------------------------|-----------|-----------|--------|--------|--------|
| Длина волны лазера, нм | 10600 | 1030 | 515 | 343 | 257 |
| Энергия фотонов, МэВ | 0.5-7 | 4.5-70 | 9-140 | 14-200 | 18-250 |
| Полная интенсивность, ф/с, не менее | 10^{11} | 10^{10} | 10^9 | 10^9 | 10^8 |
| диапазон энергии фотонов, МэВ | 0.5-1.6 | 4.5-16 | 9-30 | 14-50 | 8-23 |
| Длительность импульса, пс, не более | 200 | 200 | 200 | | |

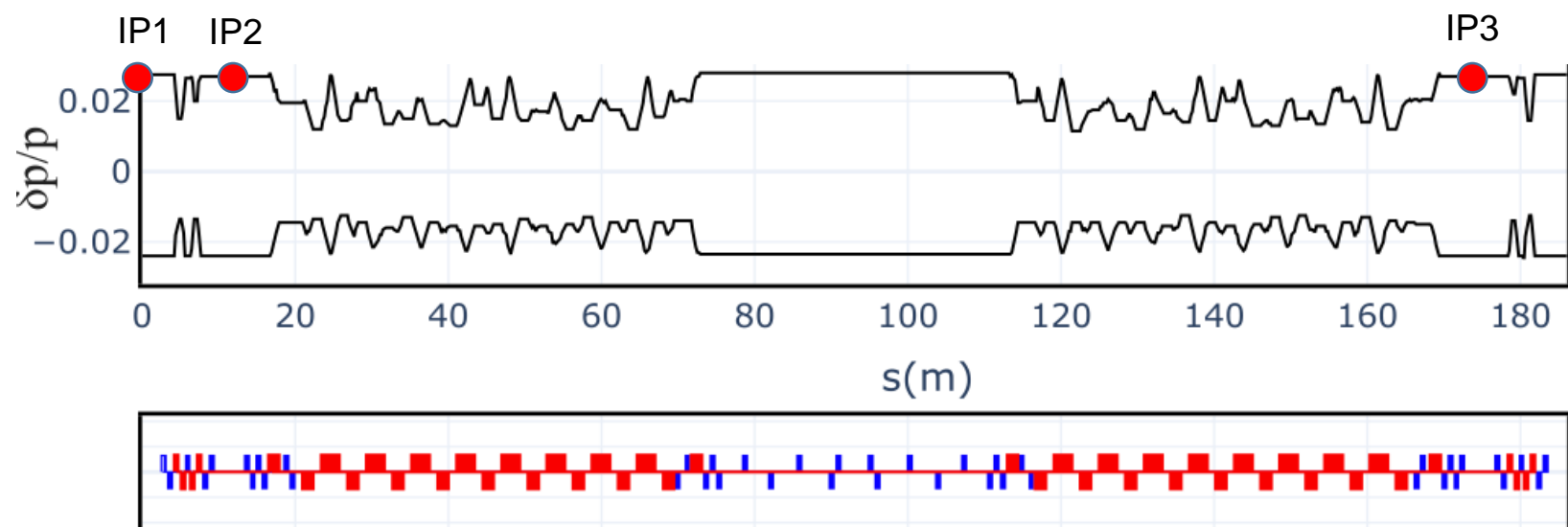
Малая (**0,5%**) относительная ширина спектра достигается только при энергиях электронов менее **1 ГэВ** в диапазонах энергий гамма-квантов **0,5 – 1,5 МэВ** и **5 – 50 МэВ**.



Время жизни и энергетический акцептанс

После рассеяния фотона электрон теряет энергию. При достаточно большом изменении энергии электрона его траектория значительно отклоняется от равновесной орбиты накопителя и электрон теряется. На основе данных о работающих электронных накопителях примем для оценок максимальное допустимое отклонение энергии равным 2%.

Локальный энергетический акцептанс вдоль всего кольца накопителя:



| E (МэВ) | 400 | | 1000 | |
|----------------|-----|-----|------|---|
| Q_bunch (нКл) | 1 | 7 | 1 | 7 |
| t_lifetime (ч) | 3.5 | 0.7 | - | 3 |

Refined Tracking Procedure for the SOLEIL Energy Acceptance Calculation,” Proceedings of PAC 2003, p 896

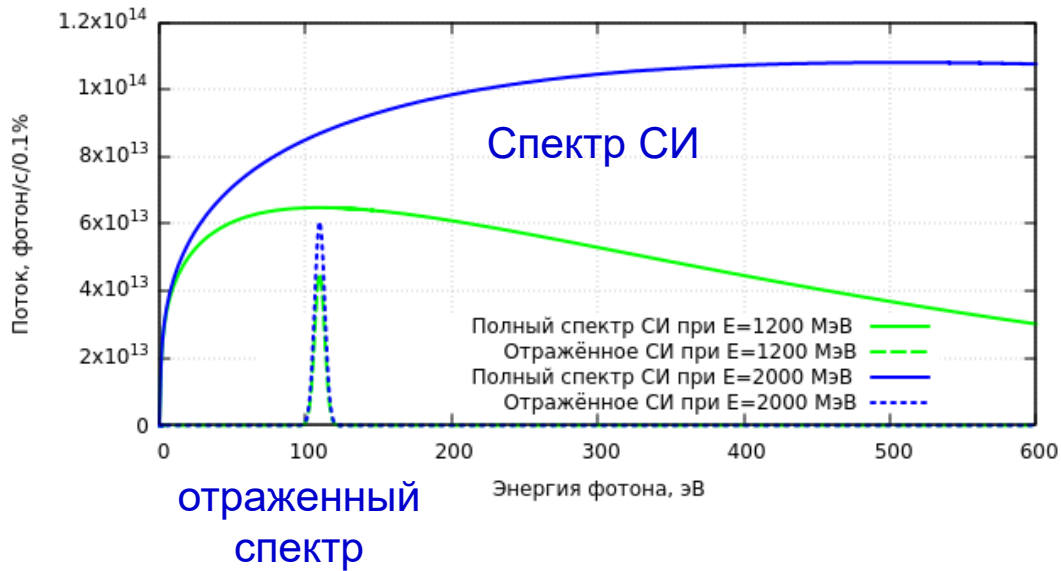
Взаимодействие электронного пучка с фотонным приводит к потерям электрона, если отклонение энергии превышает 2%. В этом случае, время жизни обратно пропорционально полному потоку фотонов

$$\tau_{las} = \frac{\pi I}{c e N_{tot}}$$

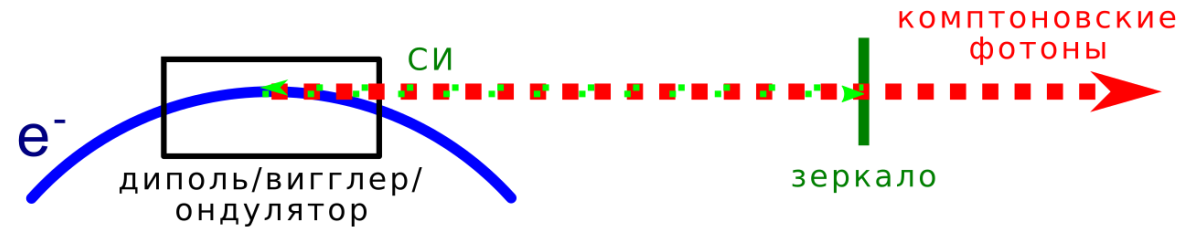
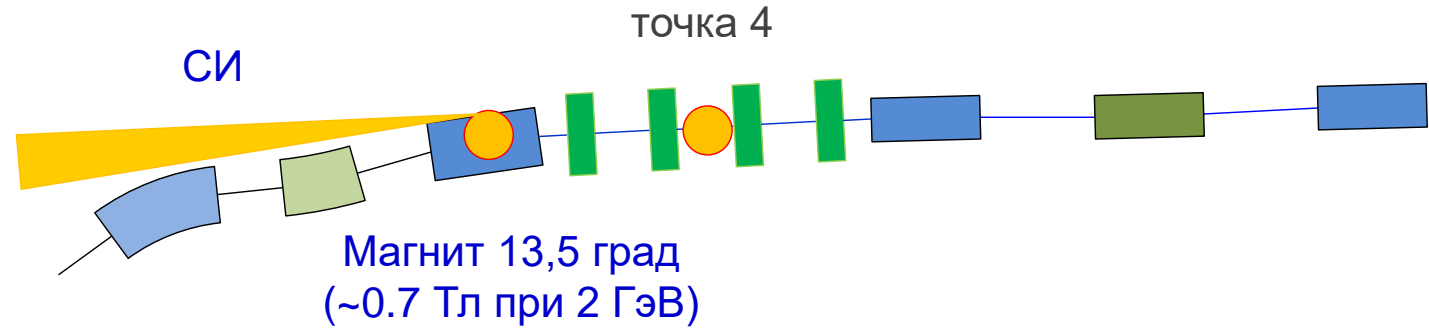
и составляет примерно 1 час в зависимости от режима работы.



Дополнительно: станция с фотонами с энергиями до 1500 МэВ



- Синхротронное излучение сгустка отражается от зеркала и взаимодействует со следующими сгустками
- Максимальная энергия фотона 1500 МэВ (при 2000 МэВ)
- Ширина спектра при коллимации не менее 3% → должна быть система мечения

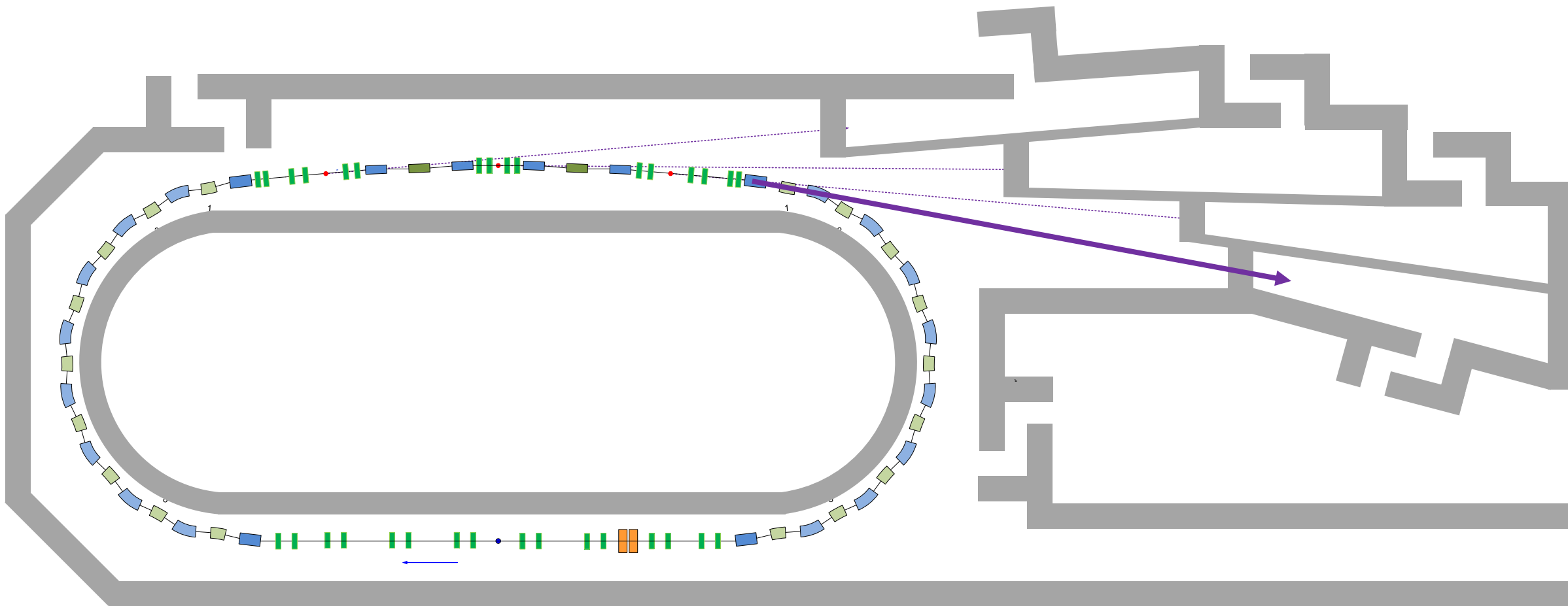


Mo/Be зеркало:
 11.3±0.35 нм (109.7±3.4 эВ),
 отражение 70% под 90° (!)
 (группа Н.И. Чхало, нижегородский Институт физики микроструктур РАН)

подробнее в докладе Каминского В.В.



Дополнительно: станция генерации фотонов с энергией до 1500 МэВ



Синхротронное излучение сгустка отражается от зеркала и взаимодействует со следующими сгустками

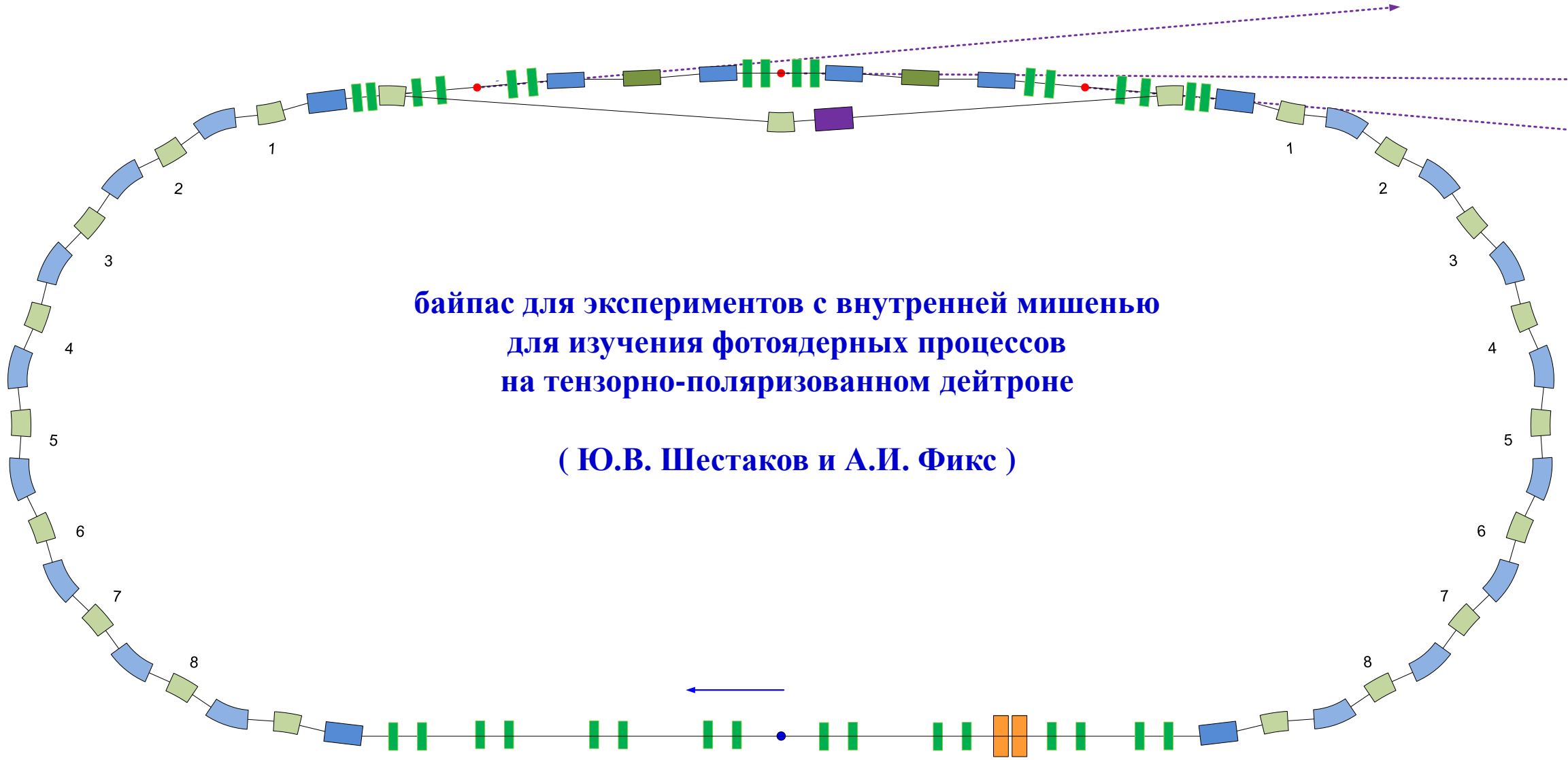
Максимальная энергия фотона 1500 МэВ (при 2000 МэВ)



Дополнительно: байпас для станции ядерных исследований

**байпас для экспериментов с внутренней мишенью
для изучения фотоядерных процессов
на тензорно-поляризованном дейтроне**

(Ю.В. Шестаков и А.И. Фикс)





Заключение

- Разработан вид комплекса источника комптоновского излучения:
 - Инжекционный комплекс использует задел СКИФа
 - Накопитель разрабатывается и станции генерации КИ - новые разработки
- Станции пользователей гамма-излучения:
 - 1 станция в транспортном канале бустер-накопитель
 - 3 станции в накопительном кольце
- Дополнительно:
 - 1 станция гамма-излучения в накопителе использованием СИ
 - байпас в накопите для экспериментов с электронным пучком

Спасибо за внимание!