

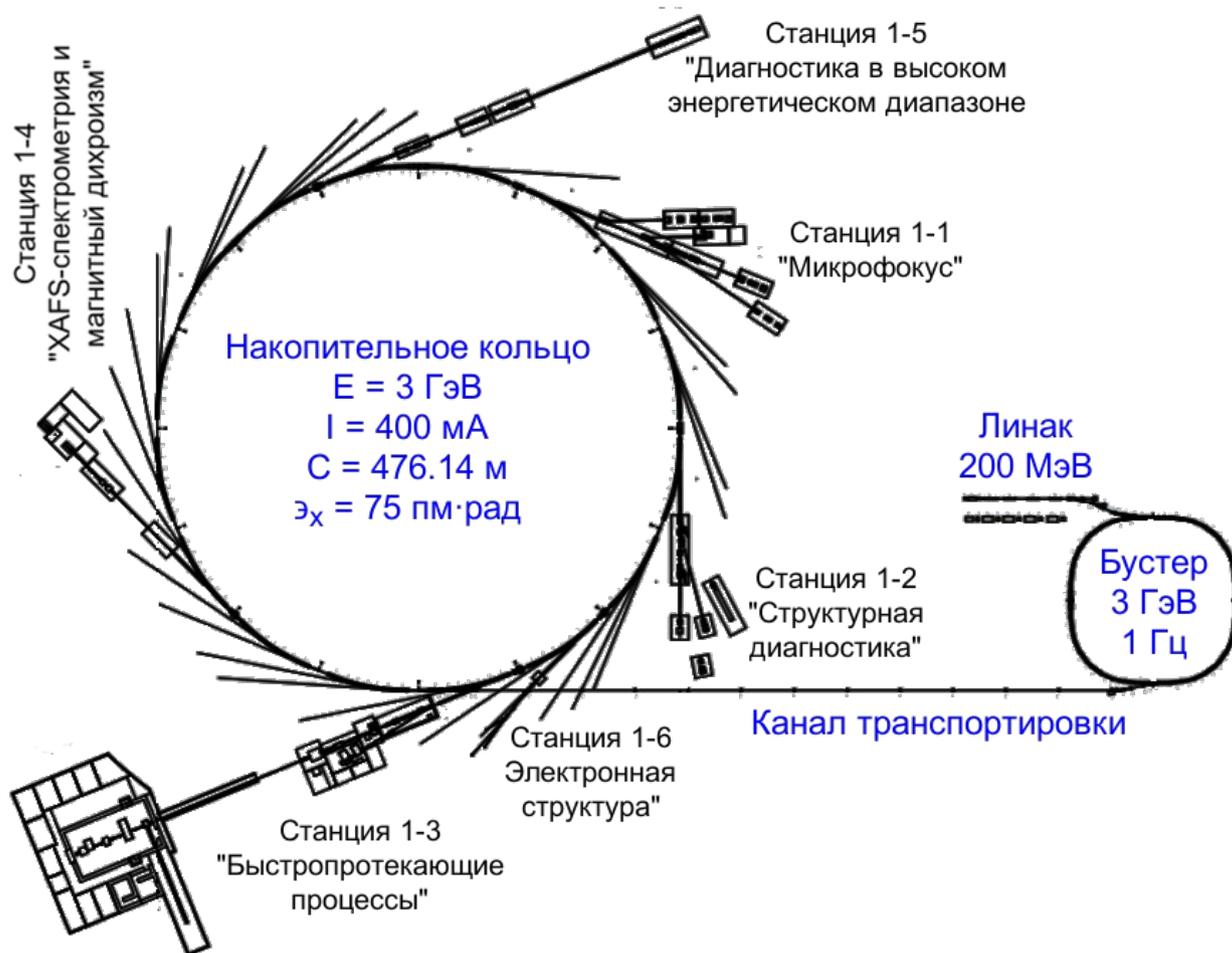
Источник комптоновских фотонов на СКИФ и его возможная синергия с ИКИ НЦФМ

Каминский Вячеслав Викторович

Институт ядерной физики им. Г.И. Будкера СО РАН

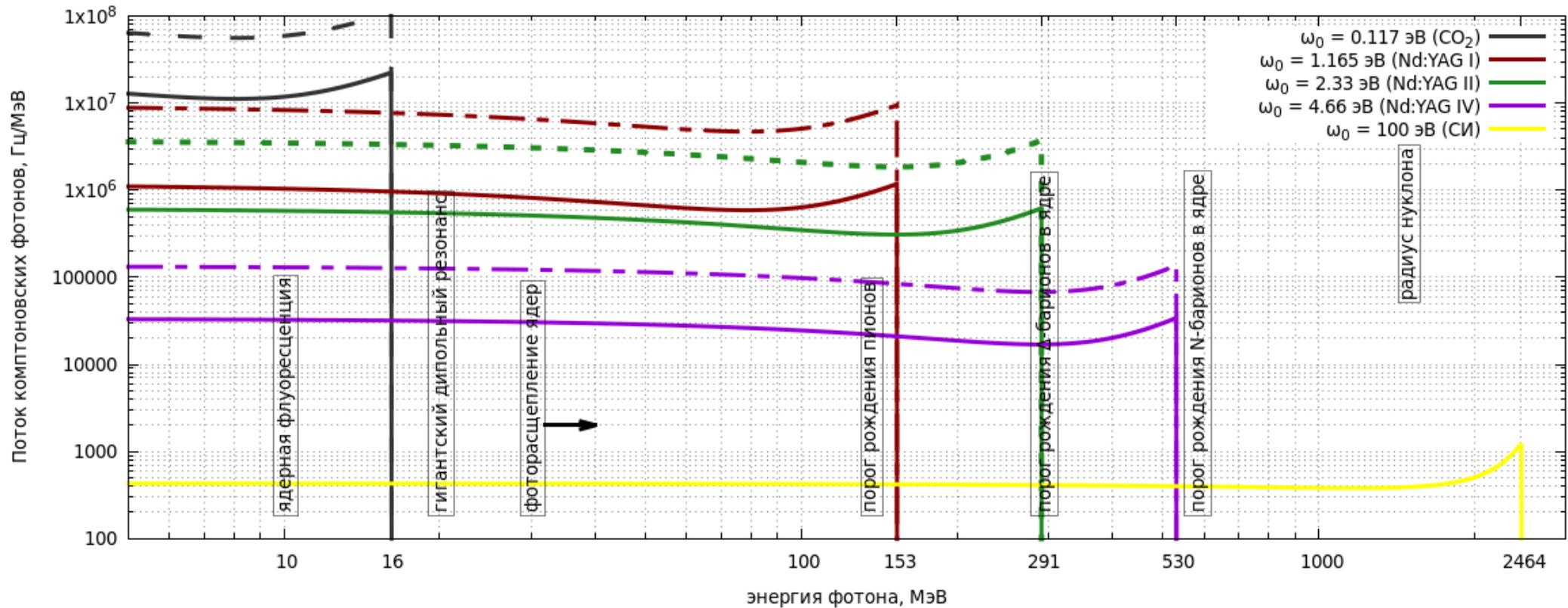
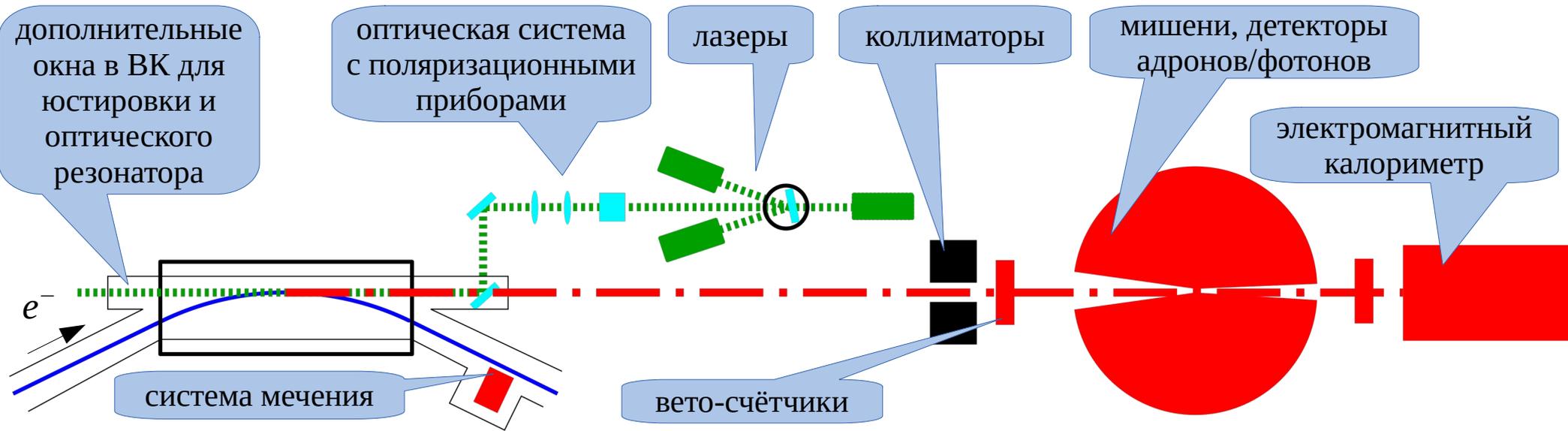
Выездное совещание совета РАН по
фундаментальной ядерной физике
г. Новосибирск 20-21 марта 2023 г.

Проект комптоновского источника на накопителе СКИФ



- СКИФ = “Сибирский кольцевой источник фотонов”, специализированный источник синхротронного излучения поколения «4+», центр коллективного пользования с 6 (32) станциями СИ, первые пучки в 2024-2025 гг.
- Частота обращения 629.63 кГц, макс. 567 сгустков: $357 \cdot 10^6$ сгустков в секунду, мин. 2.8 нс между сгустками
- Минимальный эмиттанс $75 \text{ пм}\cdot\text{рад}$ (нулевой ток): координатный и угловой разброс частиц малы по сравнению с $1/\gamma$.
- Возможные лазеры – непрерывные, мощность $>5 \text{ Вт}$, освоенные технологии: CO_2 : 10.6 мкм, гармоники Nd:YAG (или Nd:YLF): 1064 (1053) нм, 532 (527) нм, 266 (263) нм*
- Максимальные энергии комптоновских фотонов при лобовой встрече: 16 МэВ, 153 МэВ, 291 МэВ, 530 МэВ.

Проект комптоновского источника на накопителе СКИФ

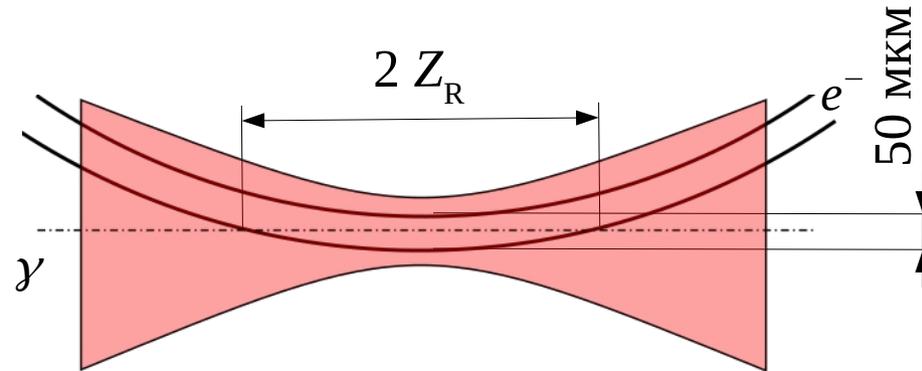


Возможности и особенности

- Основное назначение накопителя – СИ, поэтому нельзя сильно сокращать время жизни пучка и портить эмиттанс.
 - Поток ограничен $\sim 400 \cdot 10^6$ γ /с системой инжекции, если рассеянные электроны выходят из пучка (большая часть электронов от Nd:YAG лазеров).
 - Рассеянные электроны с потерей энергии до 78 МэВ (2.6% энергии пучка, все электроны от CO₂ лазера) остаются в накопителе, портят эмиттанс (предстоит исследовать).
- Энергию накопителя нельзя перестраивать
 - Использовать разные лазеры, в том числе, перестраиваемые
 - Использовать систему мечения (разрешение 0.6 . . . 0.8%, ~ 2 МэВ по фотонам для Nd:YAG лазеров)
- Высокая частота следования сгустков (357 МГц)
 - Множественность фотонов на сгусток < 1 \rightarrow качественная работа системы мечения и нет наложений событий
 - Непрерывные либо специализированные импульсные лазеры
- Малый эмиттанс, малый угловой и координатный разброс (ближайший аналог – MAX-IV)
 - хорошее пространственное разрешение в экспериментах
 - высокая степень поляризации фотонов. Закрученные фотоны?
 - эффективная коллимация гамма-квантов для монохроматизации или выделения нужной поляризации

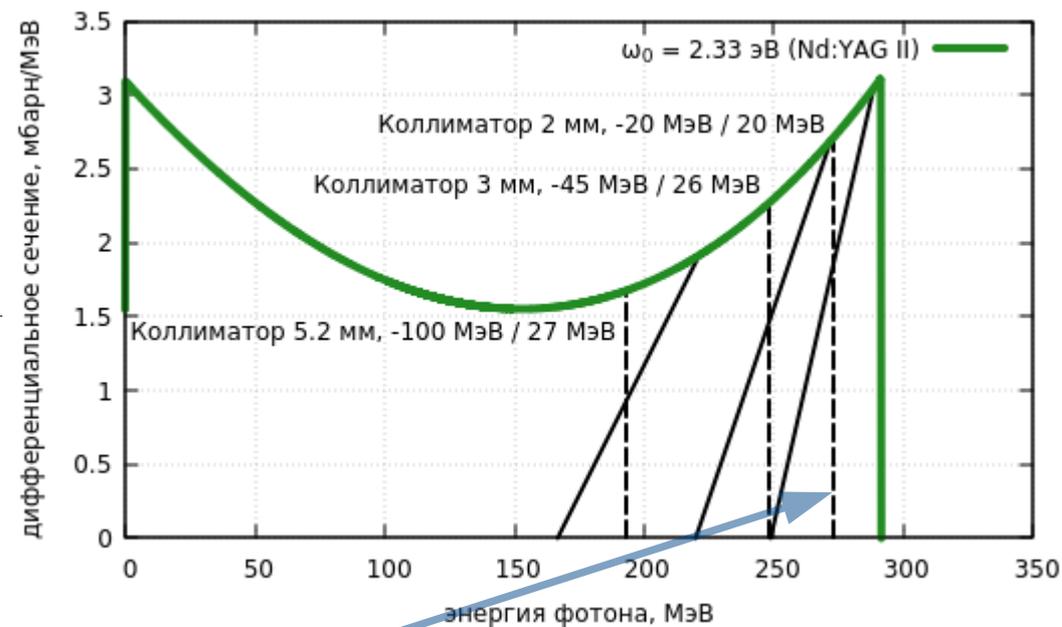
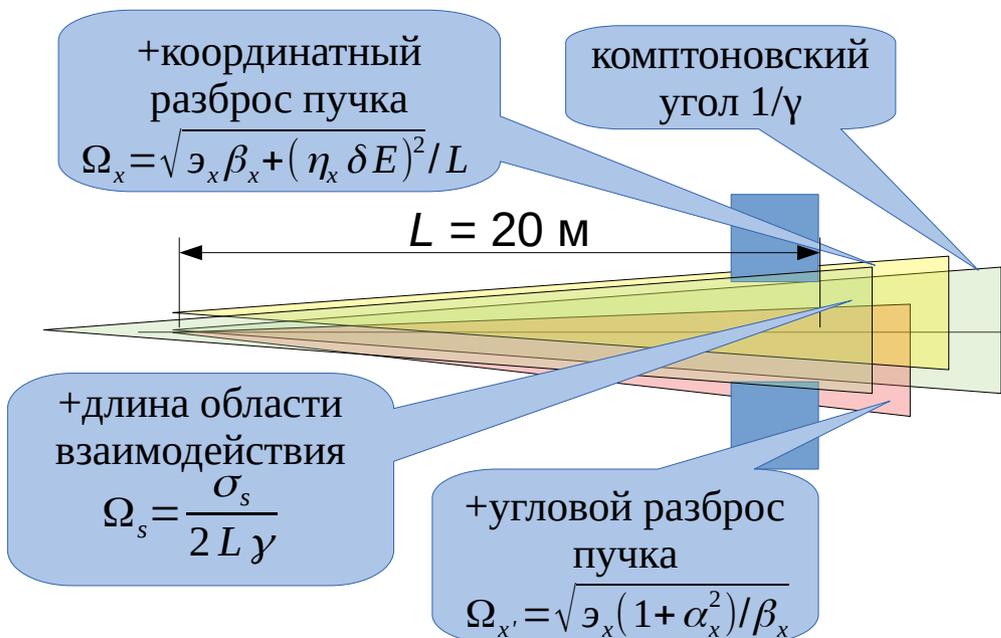
Поток комптоновских фотонов

- Место взаимодействия – мягкий диполь суперпериода СКИФ
- Размер перетяжки 50 мкм для $\lambda=527$ нм: удвоенная рэлеевская длина примерно равна длине хорды. Получится примерно **30 МГц на ватт** лазерной мощности. Для остальных лазеров можно так же.

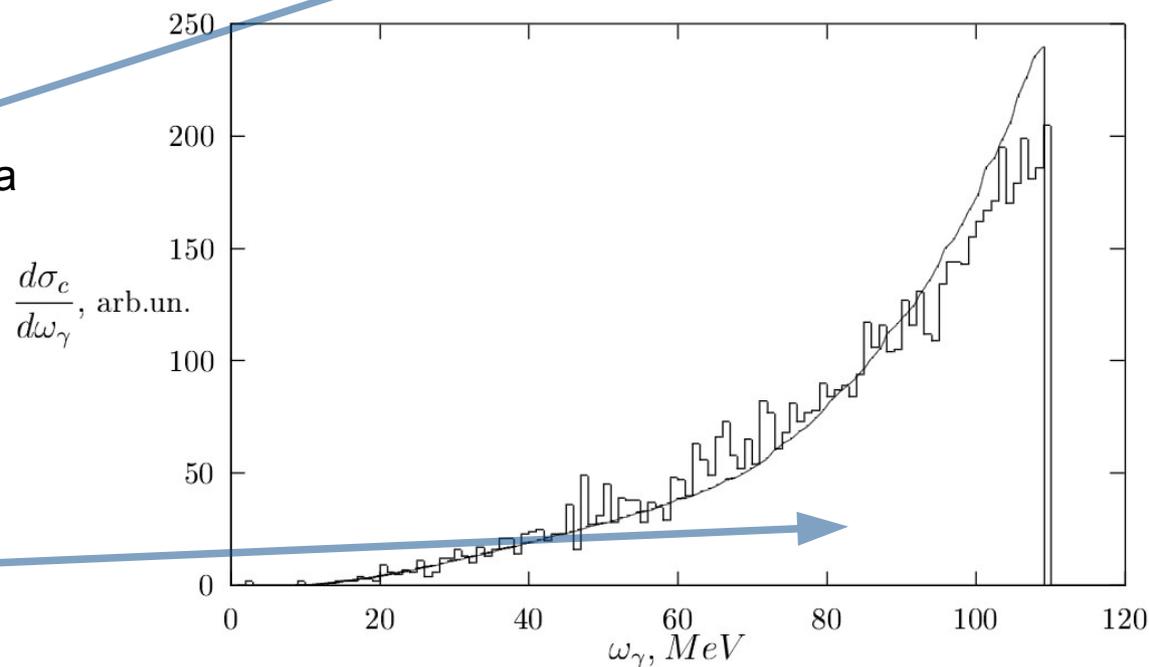


- Что от этого будет пучку электронов?
 - Часть комптоновских электронов выбывает из пучка в следующих магнитах (за исключением $E > 2922$ МэВ)
 - Время жизни за счёт ОКР: $\Delta N = N_0(1 - \exp(-t/\tau))$, $\tau = \frac{-1}{\ln(1 - \dot{N}/N_0)}$При счёте **100 МГц** (и потере комптоновских электронов) время жизни **~ 11 часов**. Инжекция рассчитана на время жизни около 1 часа (5% падение тока). Есть запас до 200-400 МГц.

Коллимирование комптоновских фотонов



- Коллиматор СКИФ 2 мм на 20 м: полный разброс «лишних» углов, – **30 мкрад**, комптоновский угол **179 мкрад**: полоса 7% по энергии, ослабление потока в 15 раз
- Машина с большим эмиттансом, например, ВЭПП-4М, с коллиматором 4 мм на 18 м: «лишние» углы – **310 мкрад (!)**, комптоновский угол – **284 мкрад**: полоса 100% по энергии, ослабление потока в 15 раз



Конкуренты, диапазон энергий и интенсивностей

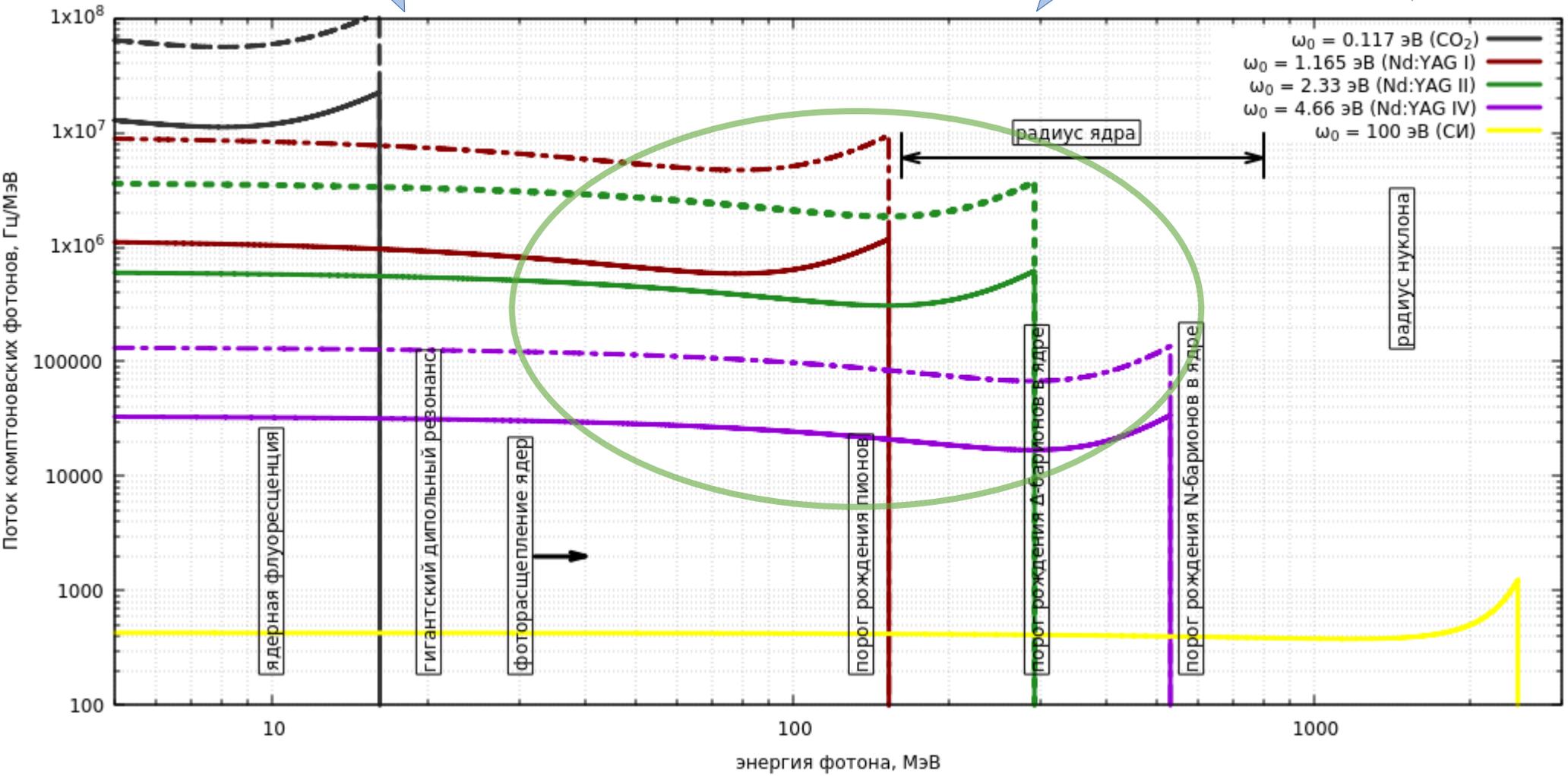
Сверхвысокие интенсивности, низкие энергии, электроны возвращаются в ускоритель: HiγS, Duke Univ. ...



Средние энергии: GRAAL (ESRF), LEGS (BNL), A2 (MAMI)...



Высокие энергии: LEPS (SPring-8)

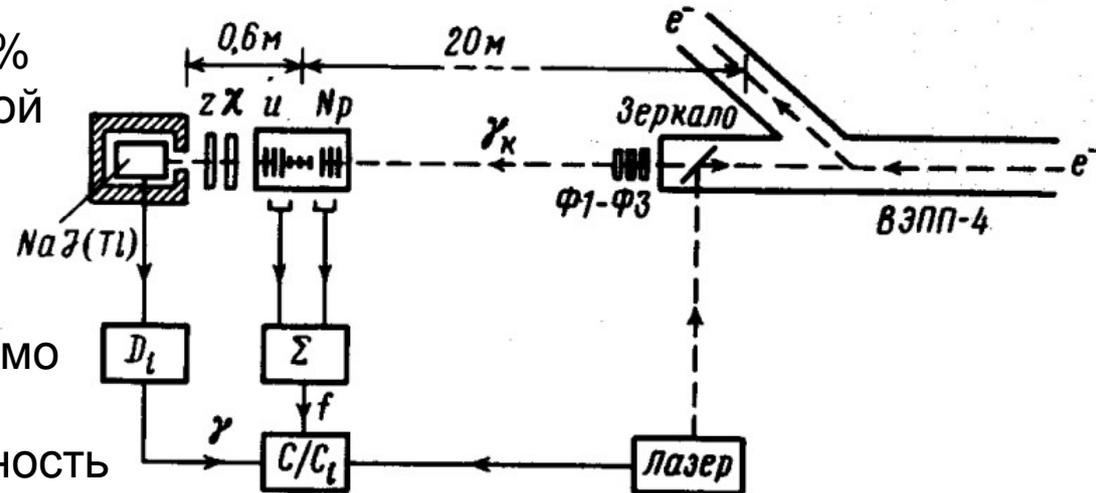


Первые эксперименты

- **Фотоделение ядер актинидов фотонами с энергиями 0.1 ... 0.7 ГэВ**

[А.А. Казаков, Г.Я. Кезерашвили, Л.Е. Лазарева, В.Г. Недорезов, А.Н. Скринский, А.С. Судов, Г.М. Тумайкин, Ю.М. Шатунов. Деление ядер ^{238}U и ^{237}Np γ -квантами промежуточных энергий. // Письма в ЖЭТФ 40, вып. 10 (1984) стр. 445]

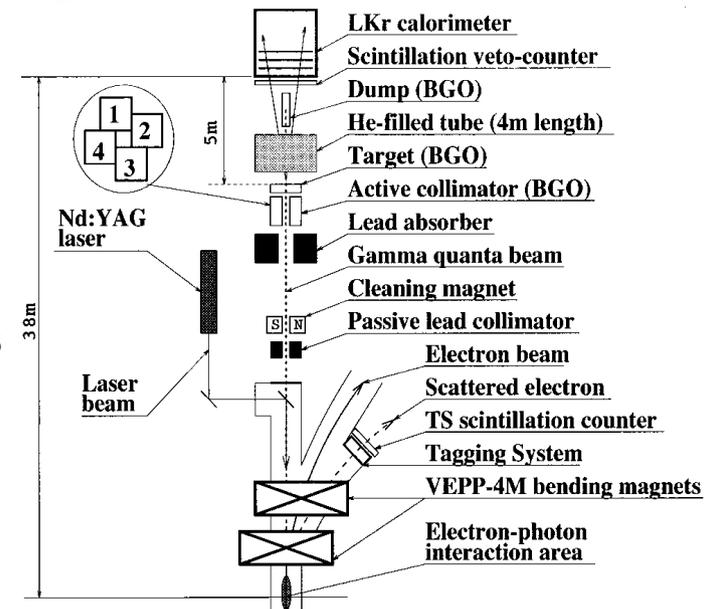
- Сечение фотоделения ^{237}Np на 60% больше ^{238}U , определяемого суммой сечений фоторождения мезонов на нуклонах \rightarrow отклонение от универсальности
- Электрон-позитронные пары помимо мезонов при возбуждении ядер? Наложение событий (множественность фотонов >1)?



- **Дельбрюкское рассеяние, расщепление фотона (+ неупругое рождение электрон-позитронных пар) в поле тяжёлых ядер**

[Sh. Zh. Akhmadaliev, et al. Delbrück scattering at energies of 140–450 MeV // Phys. Rev. C 58, 2844 (1998)]

[Sh. Zh. Akhmadaliev, et al. Experimental Investigation of High-Energy Photon Splitting in Atomic Fields // Phys. Rev. Lett. 89, 061802 (2002)]



Возможные эксперименты

- Первые эксперименты – улучшение результатов ВЭПП-4М: изучение фотоделения актинидов и нелинейной КЭД в диапазоне энергий до 500 МэВ.
- Возможные эксперименты:
 - фотоядерные реакции в «средней» области энергий: фотоделение, рождение гиперядер, пионов, гиперонов и т. п.
 - калибровка детекторов
 - фотоядерные реакции в «низкой» области энергий: пигми-резонансы, производство «обойдённых» ядер, ядерная флуоресценция и т.п.
 - гамма-томография, производство медицинских изотопов?
- Методические эксперименты:
 - внутренний лазерный резонатор,
 - использование СИ как источника начальных фотонов,
 - закрученные гамма-кванты (→ фабрика ядерных изомеров).

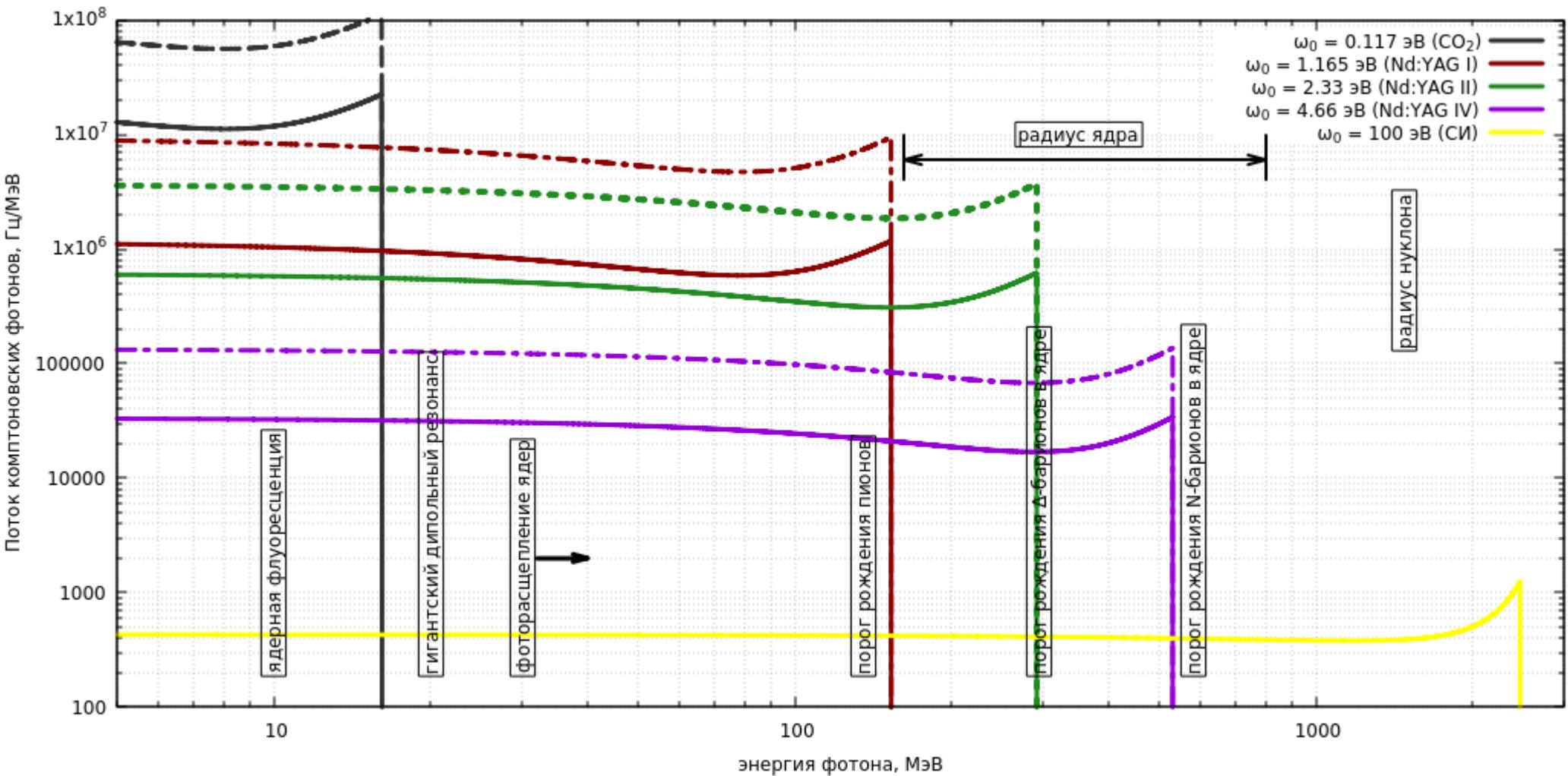
Возможное сотрудничество с ИКИ НЦФМ

- Тестирование компонентов до постройки ИКИ (накопитель будет готов к 2025 году, станция второй-третьей очереди):
 - детекторы гамма-квантов, мезонов и барионов, лептонов, атомных ядер;
 - оптические системы.
- Обмен опытом:
 - детекторы,
 - системы управления и сбора данных и т.п.;
- Кадры/обучение:
 - комптоновской станции на СКИФ нужны специалисты по фотоядерной физике,
 - в ИЯФе есть специалисты по комптоновским установкам.
- ???

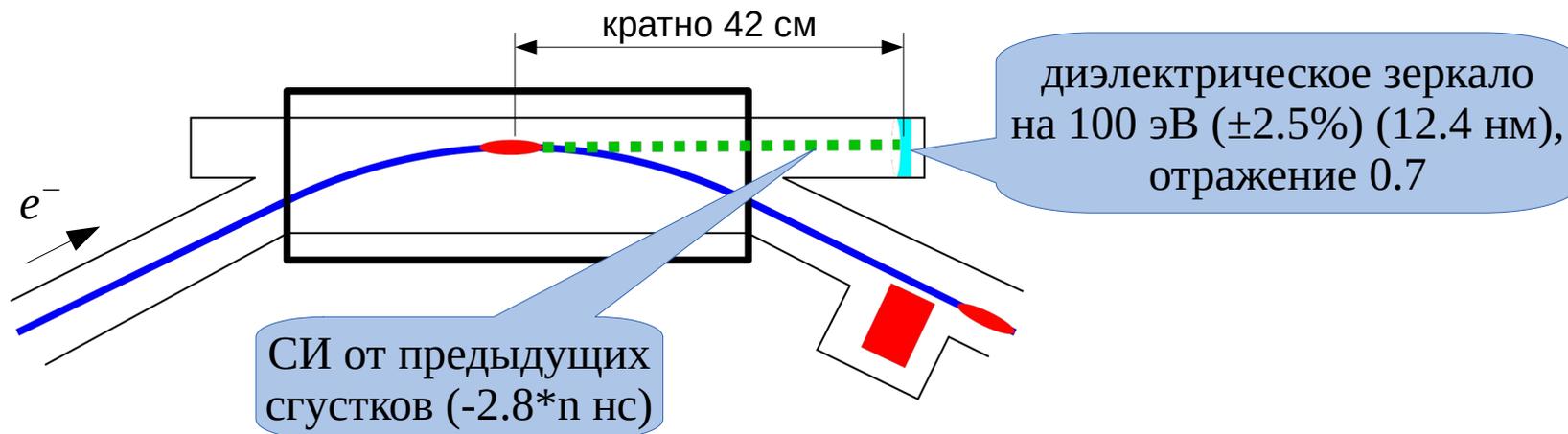
Заключение

- Источник поляризованных гамма-квантов из обратного комптоновского рассеяния на СКИФ:
 - Энергии от единиц МэВ до 500 МэВ
 - Интенсивность: десятки-сотни МГц (в полном спектре), но при этом низкая вероятность наложений событий
 - Возможность монохроматизации спектра с помощью коллимирования пучка комптоновских гамма-квантов и мечения по энергии электронов отдачи
 - Высокая степень поляризации рассеянных фотонов
- Первые эксперименты – улучшение результатов ВЭПП-4М.
- Последующие эксперименты в области энергий 100-500 МэВ, где СКИФ имел бы преимущество. Нужны идеи.
- В ИЯФ есть большой опыт в экспериментах с обратным комптоновским рассеянием, но почти нет специалистов по фотоядерным реакциям.
- Возможно взаимно полезное взаимодействие с ИКИ НЦФМ.

Спасибо за внимание!

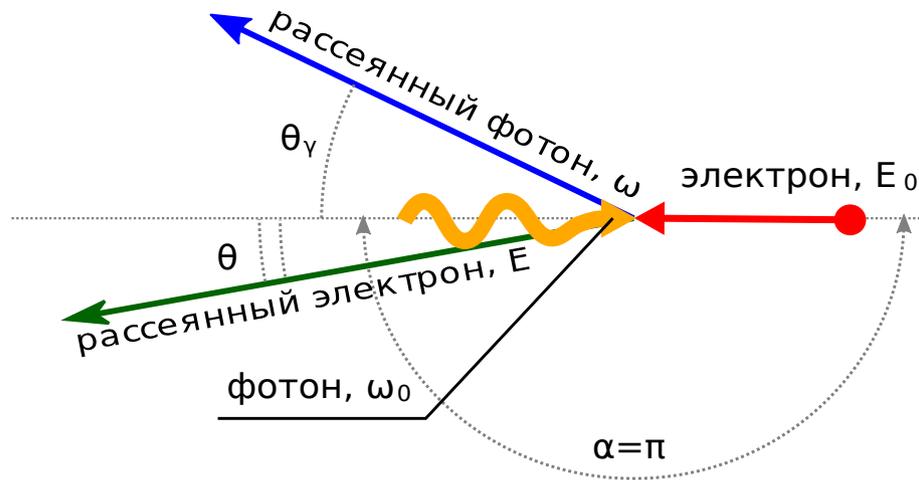


Дополнение: синхротронное излучение как источник начальных фотонов



- Максимальная энергия рассеянного фотона от 100 эВ – 2464 ± 11 МэВ (!)
- Если зеркало $\varnothing 40$ мм фокусирует СИ в размер пучка, его излучившего, ~ 12 мкм, тогда $Z_R = 15$ см, и поток комптоновских гамма-квантов ~ 3.3 МГц (с учётом коэффициента отражения 70% и сечения 29% от томсоновского).
- Выдержит ли такое зеркало мощность полного потока СИ ~ 800 Вт в полосе порядка 0.4 мм?

Дополнение: обратное комптоновское рассеяние



- Максимальная энергия гамма-кванта

$$\omega_{\max} = \frac{E_0 \lambda}{1 + \lambda} \stackrel{\lambda \ll 1, \alpha \approx \pi}{\approx} 4 \gamma^2 \omega_0, \quad \lambda = \frac{4 E_0 \omega_0}{m^2} \sin^2 \alpha / 2$$

- Угол рассеяния гамма-кванта

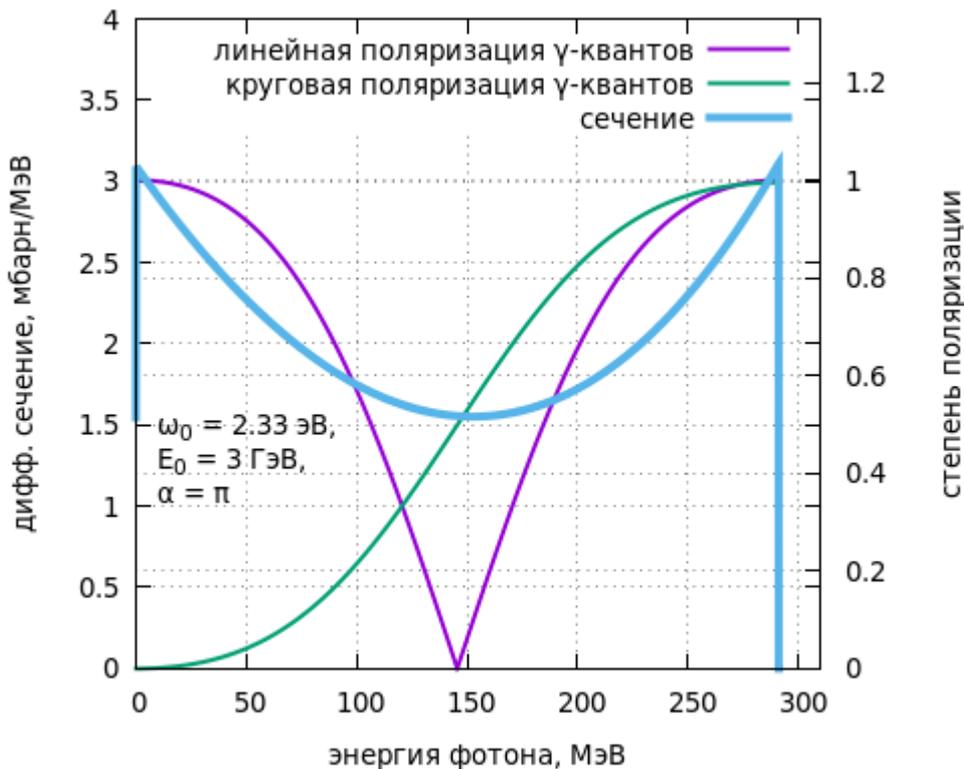
$$\omega(\theta) = \frac{\omega_{\max}}{1 + (\theta / \theta_c)^2}, \quad \theta_c(\omega) = \frac{m_e}{E_0} \sqrt{1 + \frac{4 E_0 \omega}{m^2}}$$

- Энергия электрона отдачи

$$E = E_0 - \omega, \quad E_{\min} = \frac{E_0}{1 + \lambda}$$

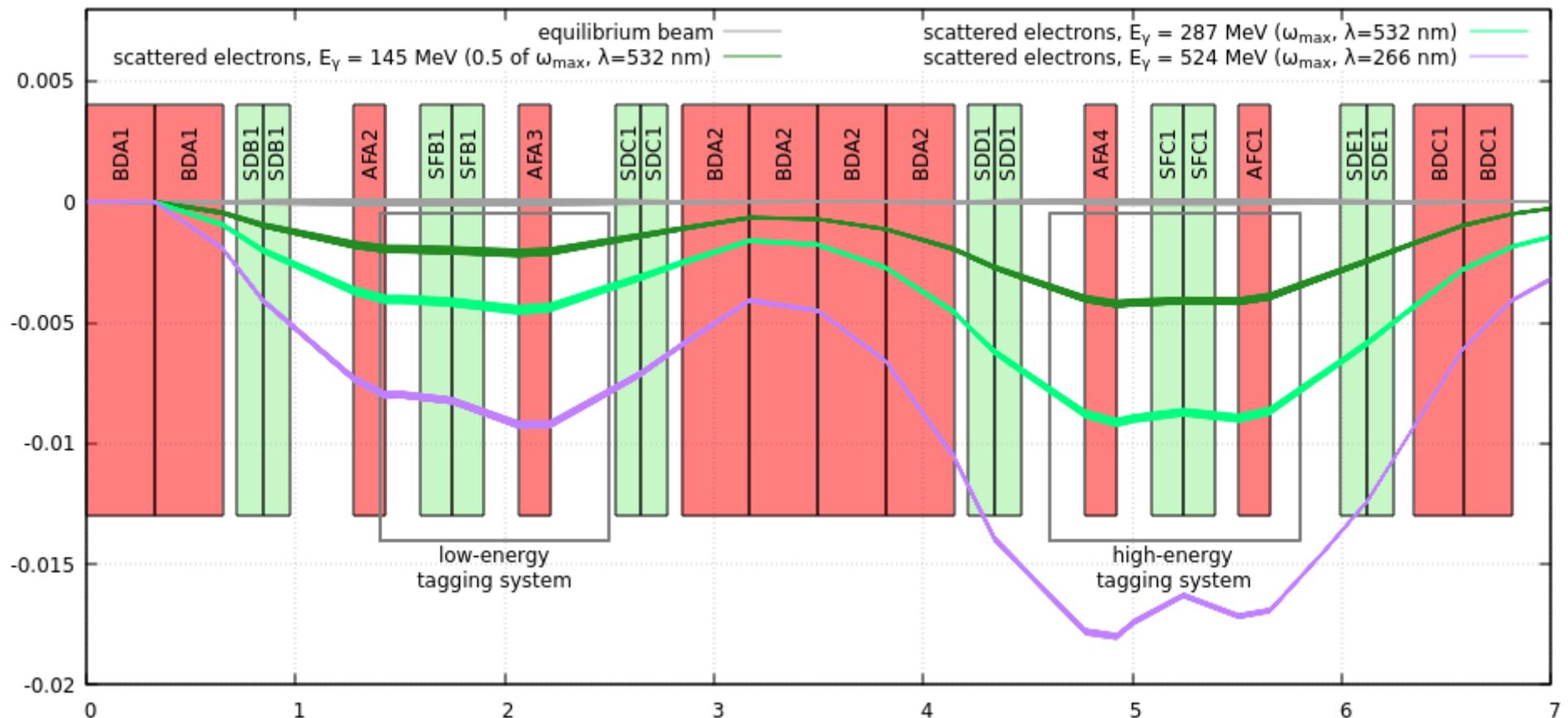
- Для фотоядерных реакций

- + большая доля высоких энергий
- + монохроматизация
- + поляризация
- низкая интенсивность по сравнению с ОТИ



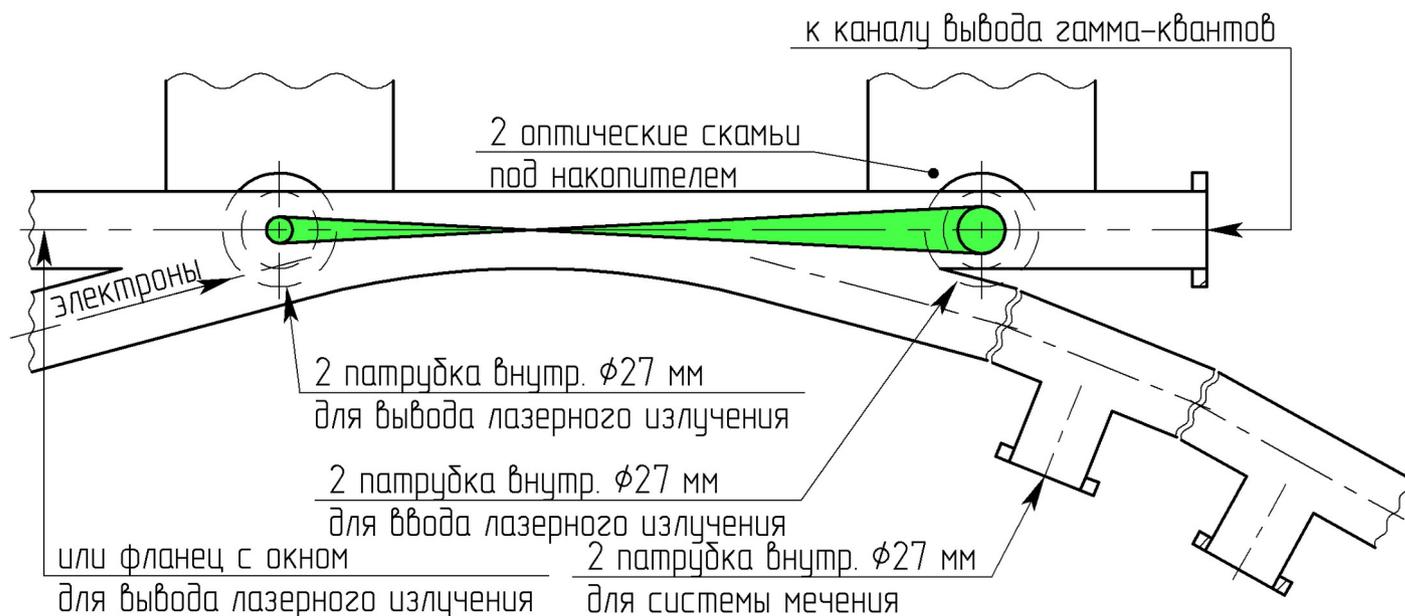
Дополнение: система мечения

- Система мечения размещается в том же суперпериоде, 1.2 ... 2.4 м и 4.6 ... 5.8 м от места встречи, рассеянные электроны отклоняются до 13 мм.
- Два Si/GaAs полосковых подвижных однокоординатных детектора внутри вакуумной камеры для “зелёного” и “ультрафиолетового” лазеров.
- Разрешение 0.6 ... 0.8% (около 2 МэВ по фотонам), полосы детектора с шагом 50 мкм.
- Множественность < 0.5 → нет наложений событий

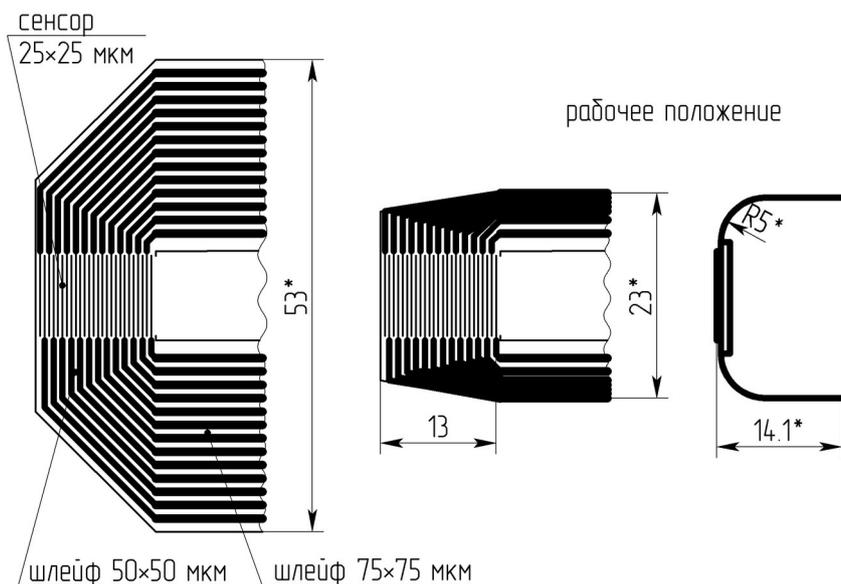


Дополнение: концепции компонентов станции

- Место встречи



- Координатный детектор системы мечения



Дополнение: поток комптоновских фотонов

- Число комптоновских фотонов в секунду:

полное сечение ОКР

$$\dot{N} = \sigma_C \frac{N_e N_b f_e n_y}{2\pi} \int_{s_{\min}}^{s_{\max}} \frac{\exp\left[-\frac{x_0^2}{2(\sigma_x^2 + \sigma_l^2)} - \frac{z_0^2}{2(\sigma_z^2 + \sigma_l^2)}\right]}{\sqrt{\sigma_x^2 + \sigma_l^2} \sqrt{\sigma_z^2 + \sigma_l^2}} ds$$

сдвиги и повороты

размер лазерного пучка
 $\sigma_l(s) = \sigma_0 \sqrt{1 + s^2 / Z_R^2}$

рэлеевская длина
 $Z_R = 4\pi\sigma_0^2 / \lambda$

число электронов в банче, число банчей, частота обращения

линейная плотность лазерных фотонов
 $n_y = \frac{\partial N_y}{\partial s} = \frac{P}{h\nu c^2}$

- Как проверить? Оценка вероятности взаимодействия электрона с фотонной мишенью (Н.Ю. Мучной)

$$W = \frac{P}{\pi P_c} \left[\arctg\left(\frac{s_{\max}}{Z_R}\right) - \arctg\left(\frac{s_{\min}}{Z_R}\right) \right], \quad P_c = \frac{\hbar c^2}{2\sigma_T} \approx 71 \text{ ГВт}, \quad \dot{N} = W N_e N_b f_e (\sigma_C / 665 \text{ нб})$$

- Почти всё рассеяние происходит на рэлеевской длине, поэтому не обязательно иметь длинный прямолинейный промежуток (и в диполе удобнее сделать короткую лазерную систему с малой перетяжкой).

Дополнение: инжекция, режим работы, время жизни

- Средний ток электронов ~ 400 мА держится с точностью $\sim 5\%$
- Бустер выпускает ~ 10 мА электронов за выстрел, частота 1 Гц
- Можно использовать $>97\%$ времени пучка, так же, как у пользователей СИ.
- Время жизни пучка 1-10 часов, в основном, за счёт внутрисгусткового (IBS)/Тушековского рассеяния \rightarrow ежесекундно теряется до 10^9 электронов (против $4 \cdot 10^{12}$ во всех банчах). При ОКР будет теряться до 10^8 электронов.

