

Приглашение принять участие в

**Выездном совещании совета РАН по фундаментальной ядерной физике
в ИЯФ СО РАН (г. Новосибирск) 20-21 марта 2023 г.**

«Детализации научной программы и технический облик комптоновского источника монохроматических гамма-квантов НЦФМ (ИКИ НЦФМ)»

В качестве первого масштабного проекта НЦФМ рассматривается создание источника (квази)монохроматических гамма-квантов, основанного на эффекте обратного комптоновского рассеяния (Источник Комптоновского Излучения НЦФМ). Основной замысел комплекса проиллюстрирован на Рисунке 1.

К «сверхзадам» проекта ИКИ НЦФМ можно отнести

- (i) Утверждение «научного суверенитета» отечественной науки;
- (ii) Восстановление лидирующего положения в области фундаментальной ядерной физики;
- (iii) Подготовка научных кадров и сохранение научных школ.

Основными задачами совещания являются:

- (i) Обсуждение и уточнение научной программы ИКИ НЦФМ;
- (ii) Конкретизация параметров и технического облика ИКИ НЦФМ;
- (iii) Дать старт формированию научного сообщества ИКИ НЦФМ.

Приглашаем в качестве «наблюдателей» принять участие также ученых еще только рассматривающих перспективы присоединения к научной программе НЦФМ в целом и на комптоновских источниках в частности.

Сайт: <https://indico.inp.nsk.su/event/115/>

Организаторы:

Б.Ю. Шарков sharkov@jinr.ru,

Н.В. Завьялов nvzavyalov@vniief.ru

П.В. Логачев p.v.logatchov@inp.nsk.su

Л.В. Григоренко (программа) lgrigorenko@yandex.ru

тел. +79175616028

М.В. Кузин (организация) m.v.kuzin@inp.nsk.su

тел. +79139301703

Тезисы ИКИ НЦФМ выносимые на рассмотрение

– Основными научными задачами ИКИ НЦФМ являются задачи ядерной фотоники (фотоядерные реакции, фотоделение, физика изомеров, ядерная спектроскопия, высокоточное изучение областей ГДР и ПДР и т.д.).

– Минимальной эффективной энергией комплекса для этих задач является $E_e = 750$ МэВ – покрывается область ГДР вплоть до $E_\gamma \sim 20$ МэВ (лазер Yb:YAG $E_{ph} \sim 1.2$ эВ, вторая гармоника). При энергии $E_e = 1$ ГэВ область ГДР может покрываться эффективной генерацией с первой гармоникой.



Рисунок 1. Схематическая иллюстрация основного замысла ИКИ НЦФМ.

– При увеличении энергии до $E_e = 1.5-2$ ГэВ возникают дополнительные научные возможности в области адронной фотоники и ядерной физики высоких энергий (комптоновское рассеяние на нуклонах и ядерной материи, мезонные степени свободы в ядерной материи и т.д.) для исследований с E_γ вплоть до 300 МэВ. Однако, при этом не должна «компрометироваться» эффективность работы комплекса в востребованном для ядерной фотоники диапазоне $E_\gamma \sim 1-5$ МэВ.

– Реализации проекта ИКИ НИИЯФ возможна в две стадии.

– На **первой стадии** проекта вводится в эксплуатацию начальный участок линейного ускорителя и накопительное кольцо $E_e = 50-70$, МэВ позволяющее генерацию монохроматического рентгеновского излучения $E_\gamma \sim 10-100$ кэВ для работ в области материаловедения и биологии. Наличие такой установки является также важным для успешного старта эксплуатации «полного» ИКИ НЦФМ **второй стадии**.

– Для создания ИКИ НЦФМ первой стадии с $E_e = 50-70$ МэВ может быть весьма полезна коллаборация с проектами источников ИКИ НИИЯФ МГУ и МИФИ и проведение ключевых НИР «широким фронтом».

- Для отработки экспериментальных методик, развития детекторной базы, подготовки кадров и формирования научного сообщества ИКИ НЦФМ видится важным развитие и реализация экспериментальной программы по обратному комптону на установке ВЭПП-4 ИЯФ СО РАН и создание ИКИ НИИЯФ МГУ и МИФИ.
- Весьма вероятно что реализация ИКИ НЦФМ будет иметь значительную синергию с перспективным проектом многофункционального электрон-позитронного коллайдера. Например, создание ИКИ НЦФМ подготовит инфраструктуру НЦФМ к строительству коллайдера, также возможно использование в проекте коллайдера ускорителя ИКИ НЦФМ (или части его инженерной инфраструктуры).

Краткая научная мотивация

Создание комплекса ИКИ НЦФМ для задач ядерной фотоники решает несколько важных задач и имеет *высокую синергию* с принципиальной задачей создания многофункционального электрон-позитронного коллайдера на площадке НЦФМ.

(1) В сложившихся условиях фактор времени реализации научных проектов начинает играть решающую роль для отечественной науки. ИКИ НЦФМ является важным «миди-сайенс» проектом в области низкоэнергетической ядерной физики с относительно небольшим сроком реализации. Состояние фундаментальной ядерной физики низких энергий в РФ характеризуется крайним устареванием экспериментальной базы не обновлявшейся, за редким исключением, с советских времен и деградацией кадрового потенциала. Масштаб отдельных успешно реализованных проектов в этой области не соответствует масштабам обновления требующегося в РФ в этой области науки. Новая серьезная «миди-сайенс» установка оживит фундаментальные исследования в РФ в области фотоядерной физики. Научная программа ИКИ НЦФМ также находится в области интересов РФЯЦ НИИЭФ – базовой организации НЦФМ.

(2) Фактор времени для многофункционального электрон-позитронного коллайдера. Для развития физики элементарных частиц в РФ весьма важным представляется скорейшая реализация ключевого для НЦФМ проекта многофункционального электрон-позитронного коллайдера. Проект коллайдера находится в активном обсуждении около двух десятилетий. Безусловно за это время первоначальный проект подвергся значительному пересмотру и развитию в соответствии с развитием данной области науки, и актуальным состоянием ускорительных технологий. Однако, существует активная научная конкуренция (например, китайский проект), которая может сделать проект коллайдера неактуальным при дальнейшем затягивании с началом строительства. Незамедлительное начало создания инжекционного комплекса, единого для комптоновского источника и коллайдера, потенциально позволят резко ускорить строительство электрон-позитронного коллайдера, если такое решение будет принято. При этом отсутствует риск «омертвления» этих вложений при отказе от проекта коллайдера.

(3) Эффективность использования ускорительной инфраструктуры. При работе электрон-позитронного коллайдера инжекционный комплекс «молчит» большую часть времени. И это время может быть использовано для других пользователей. В рамках

комптоновского источника значительная начальная часть инжектора коллайдера (или, по крайней мере, часть его инженерной инфраструктуры) могут использоваться с высокой эффективностью для исследований в области ядерной фотоники абсолютно без компромиссов для обеих научных программ.

(4) **Проблема кадров, «мягкий» старт.** Проблема кадров является крайне острой как для проектов ИКИ НЦФМ, многофункционального электрон-позитронного коллайдера, так и для любых других перспективных научных проектов. Комптоновский источник $E_e < 70$ МэВ может быть создан за 3-4 года. Комптоновский источник $E_e \sim 750 - 2000$ МэВ – за 6-8 лет. В соответствующие сроки начнется их научная эксплуатация «от малого к большому». Это означает, что технический и научный персонал начнет практическую подготовку, в том числе и на оборудовании общем с электрон-позитронным коллайдером в самом ближайшем будущем. Это является одним из важнейших методов решения кадровой проблемы которая стоит перед таким «мега-сайенс» проектом, как перспективный электрон-позитронный коллайдер: научное сообщество, научный и технический персонал не «дожидается» в течении десятилетия окончания строительства комплекса коллайдера, а включается в активную работу на ранней стадии и «мигрирует» с уже работающей установки.

Актуальные предложения и проекты по теме комптоновских источников в РФ

1. Предложение ИЯФ СО РАН по основному комплексу ИКИ НЦФМ

Комплекс ИКИ НЦФМ расположен в трёх одинаковых стандартных четырёхпролётных промышленных зданиях. В каждом здании установлено по четыре мостовых крана, с помощью которых проводится монтаж установки, включая бетонные блоки радиационной защиты. Схематический вид ИКИ НЦФМ показан на рисунке 1, а целевые параметры предлагаемого источника представлены ниже.

Максимальная энергия электронов 1,5 ГэВ

Средний ток 0,1 А

Периметр электронного накопителя 150 м

Частота ускоряющего напряжения 90 МГц

Ускоряющее напряжение 600 кВ

Энергетический акцептанс 2 %

Коэффициент расширения орбит - 0,005

Длина линейного ускорителя-инжектора 150 м

Заряд в сгустке линейного ускорителя 1 нКл

Максимальный допустимый нормализованный эмиттанс 50 мкм

Максимальная частота повторения инъекции 25 Гц

Максимальный энергетический разброс 0,1 %

Общая потребляемая мощность 10 МВт

2. Предложение НИИЯФ МГУ по комплексу ИКИ НЦФМ

НИИЯФ МГУ предложено несколько схем создания основного комплекса ИКИ. Один из них предлагается создать на основе ускорителя электронов на энергию до 700 МэВ с инжекцией от 50 МэВного ускорителя, работающего в одноступковом режиме. Концептуальная схема ИКИ для гамма-излучения приведена на Рисунке 2. Согласно этой схеме, линейный ускоритель электронов на энергию 50 МэВ является инжектором линейного ускорителя на 500 – 750 МэВ. Поскольку однократное взаимодействие лазерного излучения с электронным сгустком слабо влияет на величину эмиттанса, ускорительный комплекс может одновременно работать как в режиме генерации рентгеновского, так и гамма-излучения. Энергия гамма-квантов при энергии электронов до 750 МэВ в зависимости от гармоника лазера может достигать 40 МэВ, что позволяет реализовать широкую программу исследований в области ядерной физики. В НИИЯФ МГУ совместно с ИЯИ РАН разработана физическая программа исследований как в области ядерной физики до 40 МэВ, так и на рентгеновском источнике в области химии, биологии, физики, наук о материалах. Разработаны проекты рабочих станций для этих исследований.

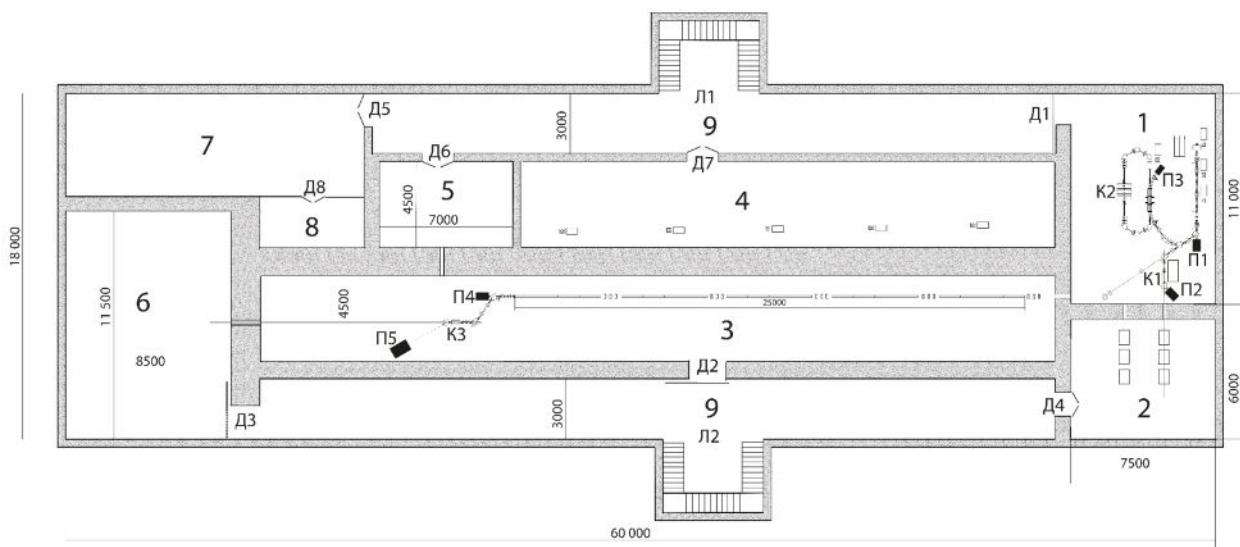


Рисунок 2. Концептуальная схема ИКИ гамма-излучения. Назначение помещений: 1 – ускоритель 50 МэВ, 2 – рабочие станции, 3 – ускоритель 500-750 МэВ, 4 – клистроны, 5 – лазер, 6 – экспериментальный зал, 7 - вспомогательное оборудование, 8 – склад, 9 – коридоры. Обозначения: Д1-Д3 – откатные двери радиационнозащищенные, Д4 – распашные двери радиационнозащищенные, Д5-Д8 – распашные двери, Л1, Л2 – грузовые лифты П1-П5 - поглотители пучка, К1-К3 – камеры взаимодействия.

Проект комптоновского источника рентгеновского излучения на основе ускорителя электронов с $E_e = 50$ МэВ с кольцом показан на Рисунке 3. Характеристики ускорителя электронов с $E_e = 50$ МэВ представлены ниже. Выходные параметры рентгеновского излучения ИКИ для двух энергий электронов на выходе линейного ускорителя с $E_e = 50$ МэВ и $E_e = 500$ МэВ показаны в Таблице 1.

Максимальная энергия ускоренного пучка 50 ± 2 МэВ
 Диапазон регулирования энергии $35 - 50$ МэВ
 Разброс по энергии $0,25 \pm 0,1\%$
 Нормализованный эмиттанс $1 \pm 0,5$ мм мрад
 Среднеквадратичный радиус пучка в точке взаимодействия 30 ± 10 мкм
 Заряд сгустка $100 - 0 + 100$ пКл
 Длительность сгустка 10 ± 4 пс
 Максимальная частота следования сгустков 1000 Гц

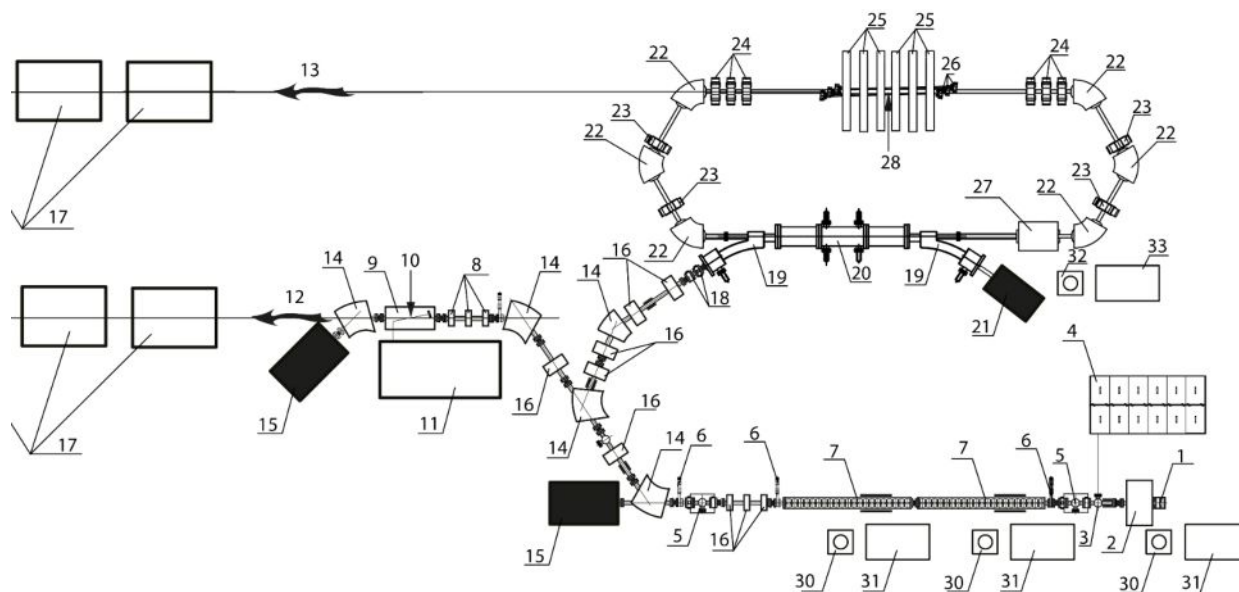


Рисунок 3. Состав ИКИ рентгеновского излучения с линейным ускорителем и кольцом. 13 – тракт рентгеновского пучка, 18 – станция диагностики инжектируемого пучка, 19 – септум магнит, 20 – киккер, 21 – поглотитель отработанного пучка, 22 – поворотные магниты кольца, 23 – секступольные линзы кольца, 24 – триплеты квадруполей кольца, 25 – триплеты точки взаимодействия, 26 – зеркала лазерного резонатора, 27 – ВЧ резонатор кольца, 28 – точка взаимодействия электронных сгустков с лазерным излучением. 32 – клистрон непрерывного действия, 33 – источник питания клистрона непрерывного действия.

Таблица 1. Выходные параметры рентгеновского излучения ИКИ для двух энергий электронов на выходе линейного ускорителя с $E_e = 50$ МэВ и $E_e = 500$ МэВ.

Параметр	50 МэВ	500 МэВ
Число рентгеновских фотонов в импульсе	$1,64 \times 10^7$	$3,78 \times 10^7$
Средний рентгеновский поток, фот/с	$1,64 \times 10^{10}$	$3,78 \times 10^{10}$
Пиковая спектральная яркость, $\text{с}^{-1} \text{мм}^{-2} \text{мрад}^{-0,1\%}$	$3,8 \times 10^{18}$	$0,62 \times 10^{21}$
Средняя спектральная яркость, $\text{с}^{-1} \text{мм}^{-2} \text{мрад}^{-0,1\%}$	$3,8 \times 10^{10}$	$0,62 \times 10^{13}$
Минимальная спектральная ширина без монохроматизации	350 эВ	180 кэВ
Минимальная угловая ширина без коллимации	1,8 мрад	0,5 мрад

3. Проект ИКИ $E_e = 55$ МэВ МИФИ

В НИЯУ МИФИ планируется создать источник, сочетающий в себе возможности компактного ЛСЭ на основе линейного ускорителя с фотопушкой и комптоновского источника, см. Рисунок 4. Источник излучения предполагается комбинированным, включающим ускоритель с фотопушкой – драйвер электронных сгустков с энергией 20-55 МэВ и накопительное кольцо. Один и тот же инжектор предполагается использовать для инжекции в малый накопитель и для генерации монохроматического ТГц и рентгеновского излучения в различных замедляющих системах (микроондулятор, черенковская замедляющая система, система для генерации излучения Смита-Парсела и т.д.). Предполагается возможность перестройки энергии фотонов в диапазоне 1-100 кэВ при спектре луче 1 % и яркость потока на уровне 10^{22} фот/с·мм²·мрад².

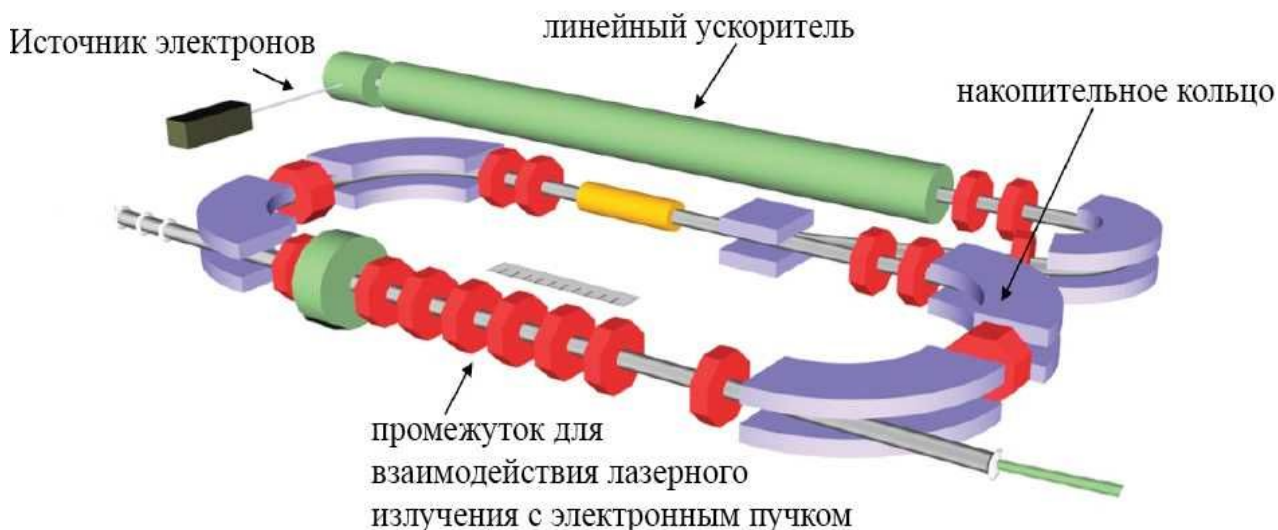


Рисунок 4. Схема источника излучения МИФИ: ускоритель с фотопушкой – драйвер электронных сгустков с энергией 20-55 МэВ и накопительное кольцо

Максимальная энергия ускоренного пучка 55 МэВ

Диапазон регулирования энергии 20 – 55 МэВ

Разброс по энергии 0,05 - 0,1% (в зависимости от энергии)

Нормализованный поперечный эмиттанс $0,3 \pm 0,5$ мм мрад

Среднеквадратичный радиус пучка в точке взаимодействия 30 ± 10 мкм

Заряд сгустка 300-400 пКл

Длительность сгустка 2-3 пс

Время жизни пучка в кольце 2-60 мс (в зависимости от энергии)

Максимальная частота следования сгустков 100 Гц

4. Прототип ИКИ $E_e = 50$ МэВ НИИЯФ МГУ

На базе НИИЯФ МГУ разработан проект и идут работы по созданию прототипа ИКИ рентгеновского излучения использованием ускорителя электронов с перестраиваемой энергией до $E_e = 50$ МэВ (см. Рисунок 5), работающего в одногустковом режиме. На прототипе могут быть отработаны узлы ИКИ НЦФМ.

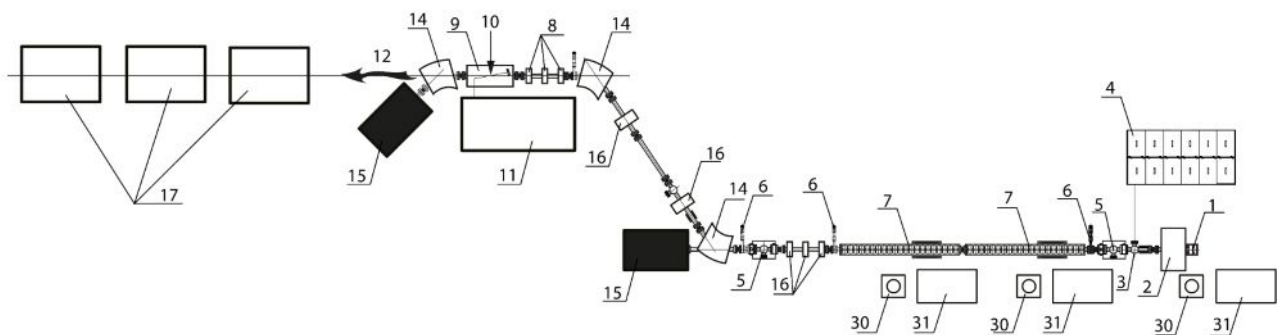


Рисунок 5. Состав ИКИ рентгеновского излучения на основе линейного ускорителя. 1 – СВЧ пушка с фотокатодом, 2 – соленоид, 3 – окно ввода лазерного излучения, 4 – лазер фотокатода, 5 – станция диагностики пучка, 6 – вакуумный затвор, 7 – ускоряющая структура, 8 – триплет квадрупольных линз, 9 – камера взаимодействия, 10 – точка взаимодействия, 11 – основной лазер, 12, 13 – рентгеновское излучение, 14 – поворотный магнит, 15 – поглотитель пучка, 16 – квадрупольная линза, 17 – рабочая станции, 30 - импульсный клистрон, 31 – модулятор