

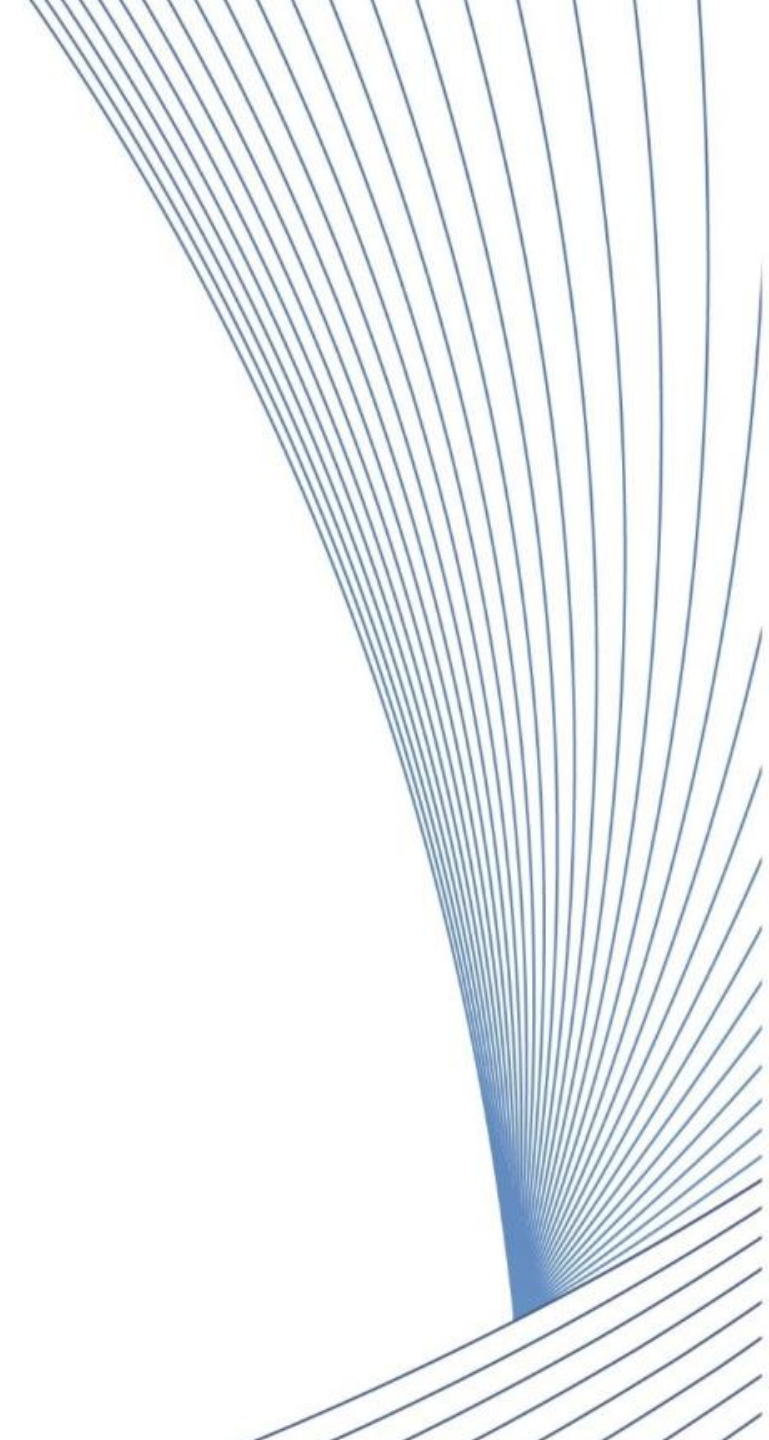


РФЯЦ-ВНИИЭФ  
РОСАТОМ

# Статус проекта комплекса ИКИ

Завьялов Николай Валентинович  
директор ИЯРФ ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ»,  
академик РАН

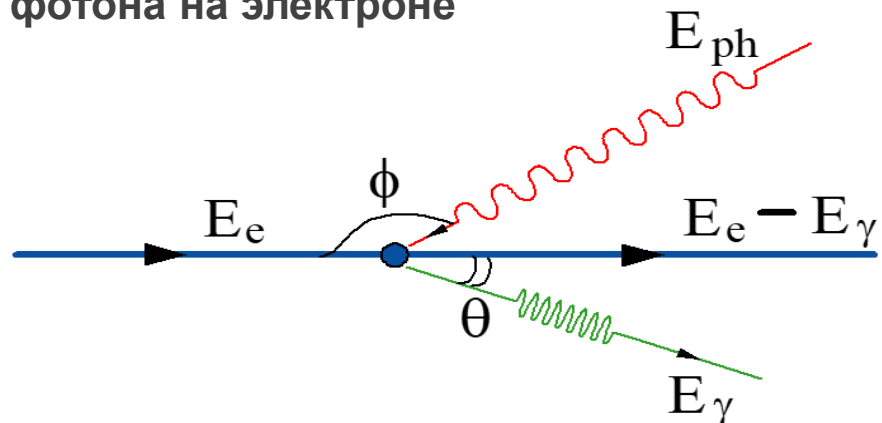
10.03.2026



# Генерация рентгеновского и гамма-излучения на основе обратного комптоновского рассеяния



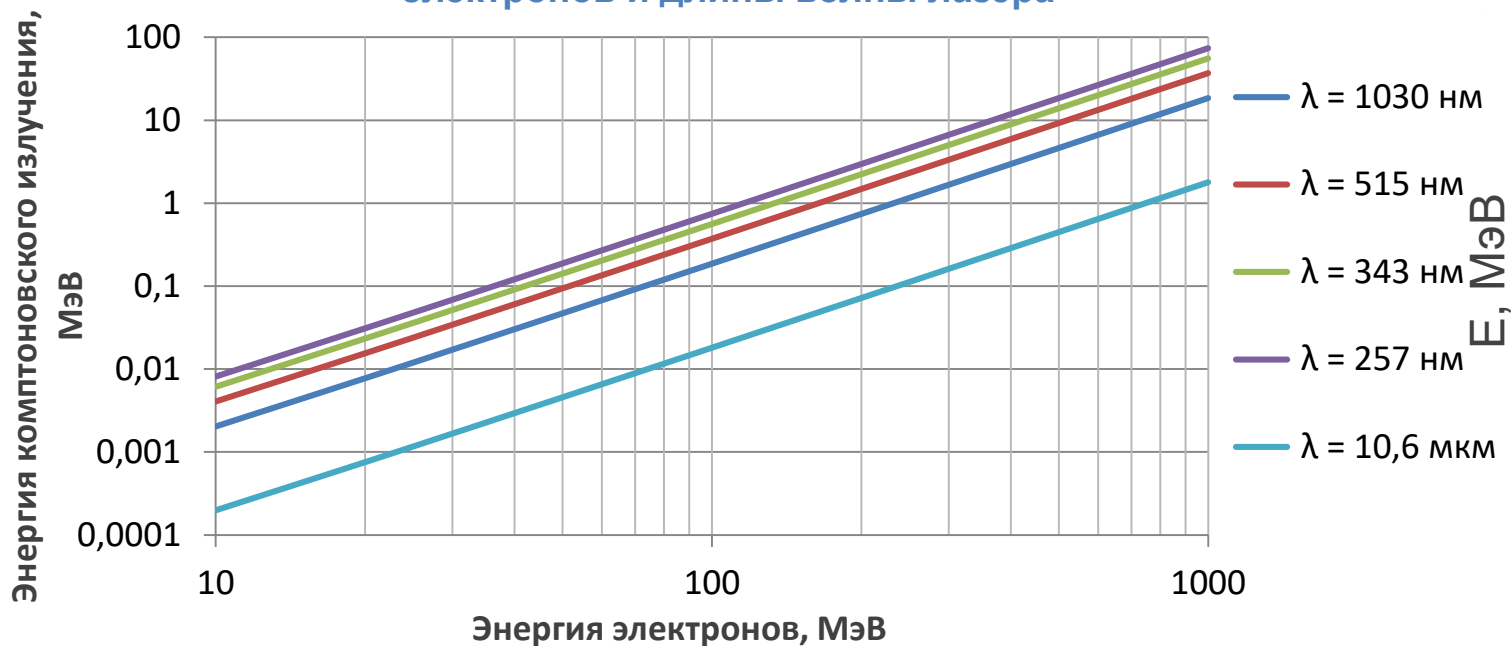
Кинематическая схема процесса комптоновского рассеяния лазерного фотона на электроне



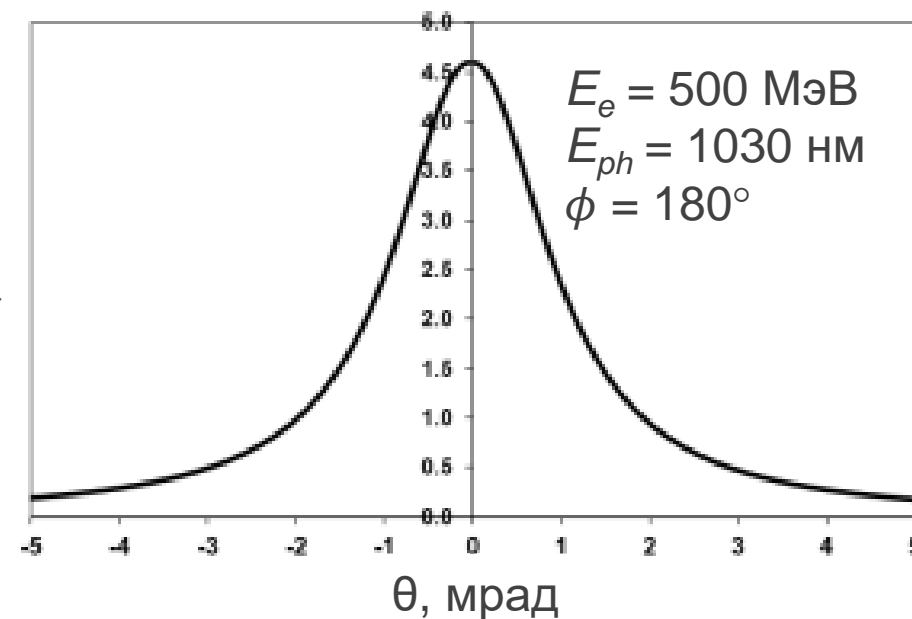
$$E_\gamma \approx \frac{2\gamma^2 E_{ph}}{1 + \gamma^2 \theta^2} (1 - \cos \phi)$$

- $E_\gamma$  – энергия рассеянного фотона,
- $\theta$  – угол рассеяния,
- $\phi$  – угол столкновения,
- $\gamma = (E_e + m_0 c^2) / m_0 c^2$ ,
- $m_0$  – масса покоя электрона,
- $c$  – скорость света в вакууме,
- $E_e$  – энергия электрона,
- $E_{ph}$  – энергия лазерного фотона.

Зависимость энергии комптоновского излучения от энергии электронов и длины волны лазера



Спектрально-угловое распределение комптоновского излучения





## Интенсивность

$$\frac{dN_\gamma}{dt} = \frac{\sigma_{Th} \cdot f_{rep} \cdot N_e \cdot N_{ph}}{2\pi \sqrt{\sigma_{ye}^2 + \sigma_{yL}^2} \cdot \sqrt{\sigma_{xe}^2 + \sigma_{xL}^2 + (\sigma_{ze}^2 + \sigma_{zL}^2) \tan^2 \frac{2\varphi}{2}}}$$

- $\sigma_{Th} = 6,65 \times 10^{-25} \text{ см}^2$  – сечение томсоновского рассеяния,
- $f_{rep}$  – частота столкновений электронных сгустков и импульсов лазерного излучения,
- $N_{ph}$  – число фотонов в импульсе,
- $N_e$  – число электронов в сгустке,
- $\varphi$  – угол столкновения электронного и лазерного пучков,
- $\sigma_{xe}, \sigma_{ye}, \sigma_{ze}, \sigma_{xL}, \sigma_{yL}, \sigma_{zL}$  – среднеквадратичные размеры электронного сгустка и лазерного импульса в горизонтальной, вертикальной и продольной плоскостях.

## Спектральная плотность излучения от угла коллимации

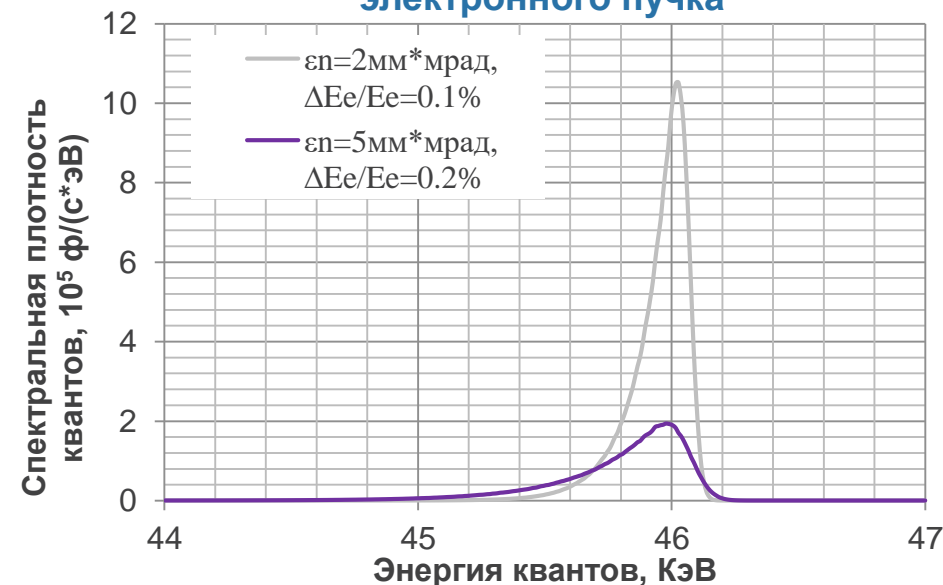


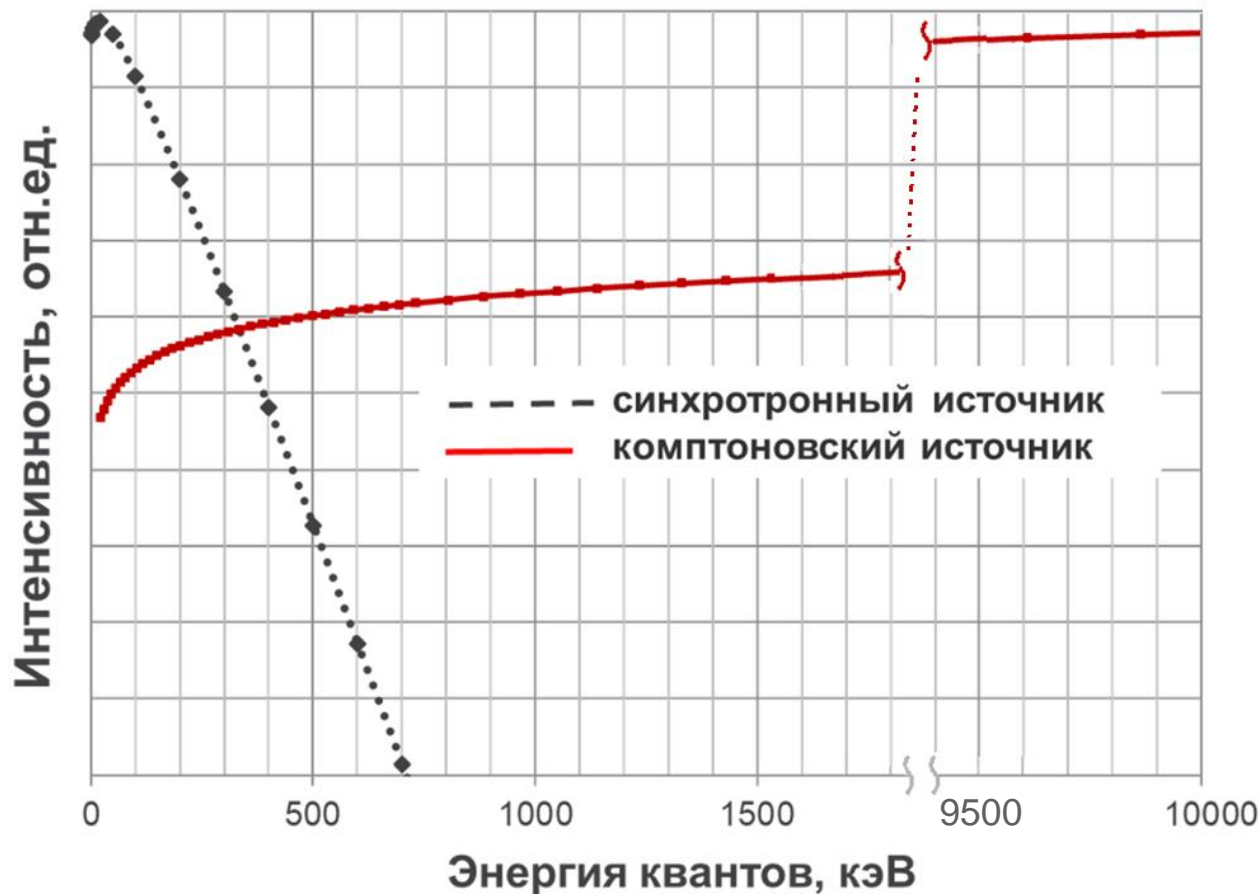
## Ширина энергетического спектра

$$\frac{\Delta E_\gamma}{E_\gamma} \approx \sqrt{(\gamma\theta)^4 + 4 \left(\frac{\Delta E_e}{E_e}\right)^2 + \left(\frac{\varepsilon_n}{\sigma}\right)^4 + \left(\frac{\Delta E_{ph}}{E_{ph}}\right)^2}$$

- $\frac{\Delta E_e}{E_e}$  и  $\frac{\Delta E_{ph}}{E_{ph}}$  – энергетический разброс электронного и лазерного пучков,
- $\varepsilon_n$  – нормализованный эмиттанс электронного пучка,
- $\sigma$  – среднеквадратичный размер электронного пучка,
- $\theta$  – угол коллимации.

## Спектральная плотность излучения от характеристик электронного пучка





## Синхротронное излучение

$$\frac{dN_{ph}}{d\theta d\omega dt} \sim \frac{E_{ph}}{E_{cr}} \cdot \exp\left(-\frac{E_{ph}}{E_{cr}}\right) \cdot \left(1 + a \frac{E_{cr}}{E_{ph}}\right)$$

$\frac{dN_{ph}}{d\theta d\omega dt}$  – спектрально-угловая плотность потока фотонов синхротронного излучения

$E_{ph}$  – энергия фотона синхротронного излучения

$E_{cr}$  – критическая энергия фотонов

$E_{cr} \sim E_e^2 \cdot B$  (так для  $E_e = 3$  ГэВ и  $B = 4,5$  Тл -  $E_{cr} = 26,5$  кэВ)

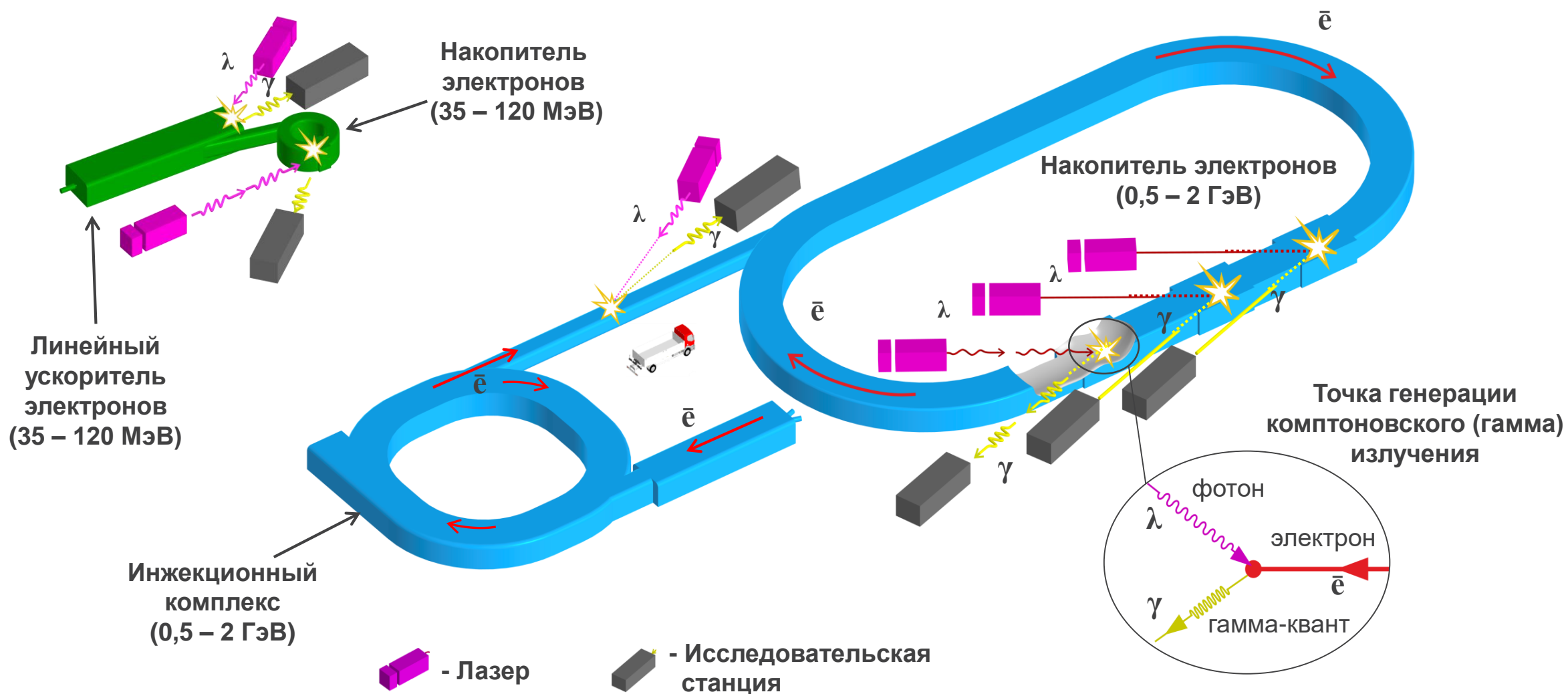
$E_e$  – энергия электронов  $B$  – магнитное поле

$$a = \frac{49}{162} \text{ – числовой коэффициент}$$

При  $E_{ph} \gg E_{cr}$  яркость СИ экспоненциально спадает

- В диапазоне 200-500 кэВ интенсивности источников синхротронного и комптоновского излучений соизмеримы.
- В диапазоне свыше 500 кэВ интенсивность комптоновских источников превосходит синхротронные комплексы
- Для получения монохроматического синхротронного излучения необходимы эффективные системы монохроматизации
- Комптоновский источник позволяет генерировать поляризованные гамма-кванты и кванты с заданным угловым моментом

# Физическая схема комплекса ИКИ

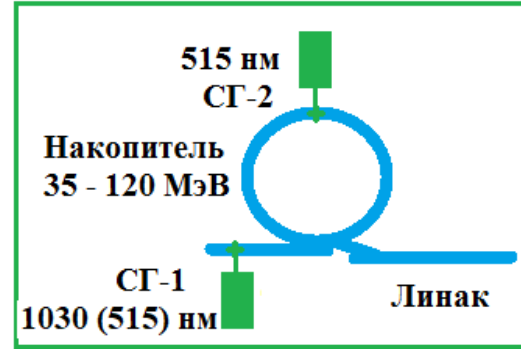
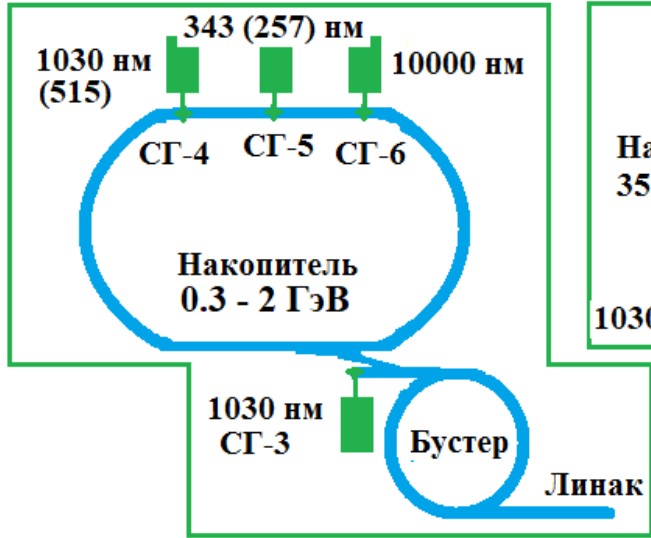


# Станции генерации. Характеристики комптоновского излучения

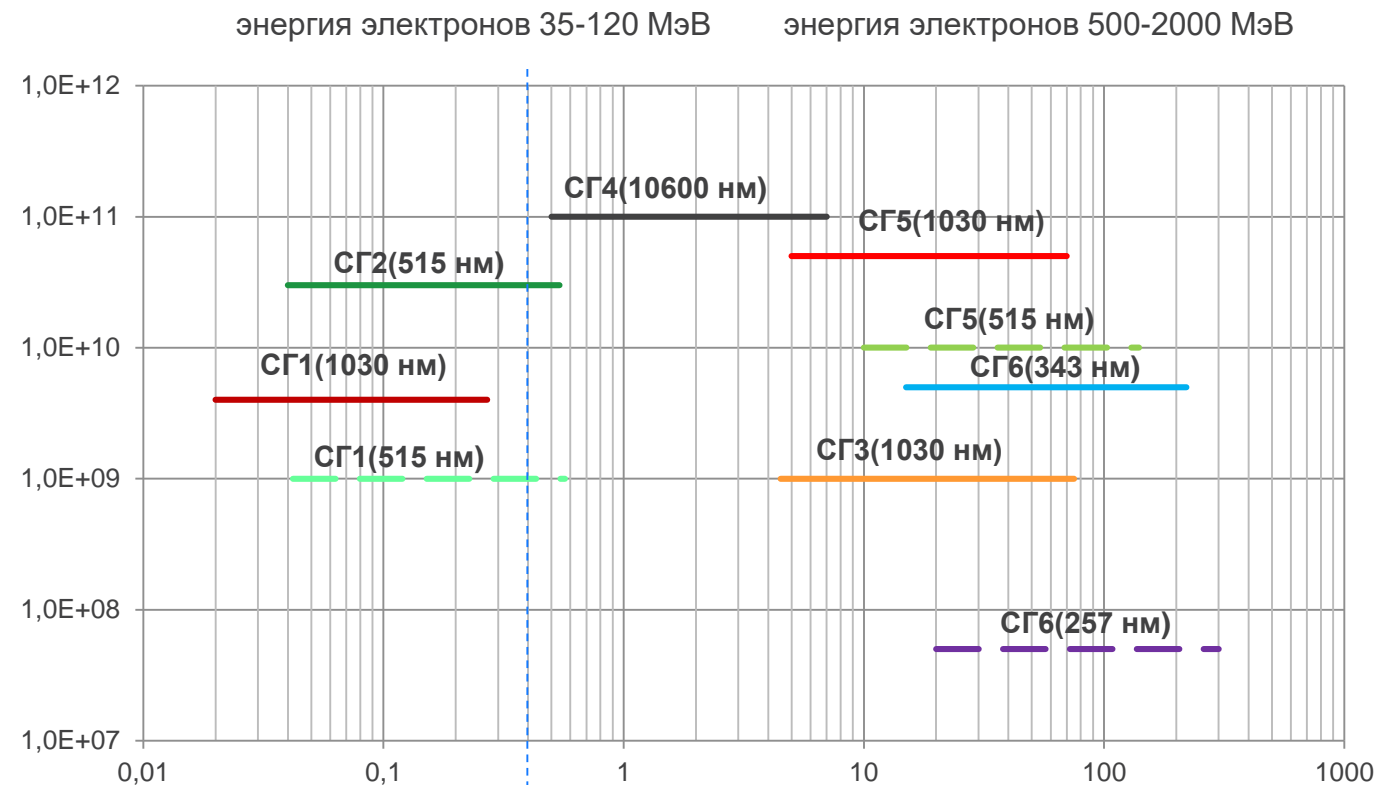


Ускорительный комплекс с энергией электронов 0.5 - 2 ГэВ

Ускорительный комплекс с энергией электронов 35 - 120 МэВ

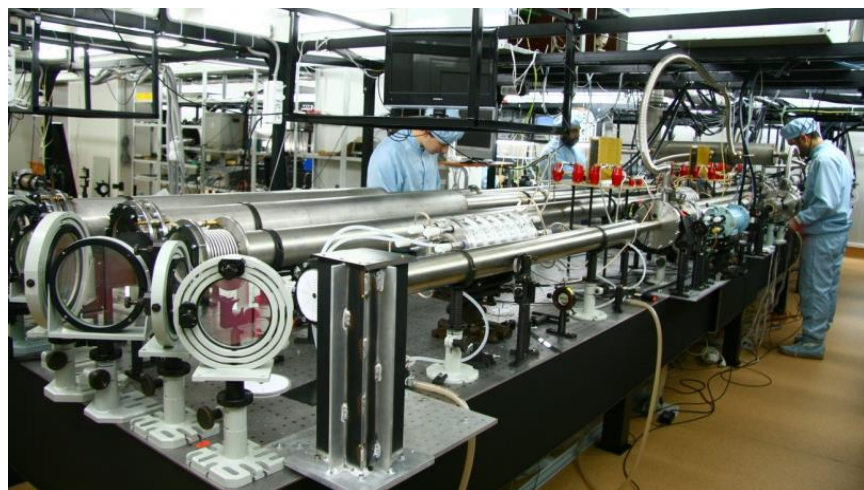


СГ – станции генерации  
комптоновского излучения



Характеристика	СГ-1	СГ-2	СГ-3	СГ-4	СГ-5	СГ-6
Длина волны, нм	1030, (515) *	515	1030	1030, (515) *	343, (257) *	10600
Энергия импульса, мДж	100, (40)*	1	5000	$1 \cdot 10^{-1}$ , $(4 \cdot 10^{-2})$ *	$2 \cdot 10^{-2}$ , $(5 \cdot 10^{-4})$ *	$1 \cdot 10^{-1}$
Радиус пучка излучения в точке взаимодействия, мкм	20	50	10	200	100	100
Длительность импульса, пс	10	30	20	200	200	200
Частота повторения импульсов, Гц	400	$1.2 \cdot 10^7$	1	$1 \cdot 10^7$	$1 \cdot 10^7$	$1 \cdot 10^7$
Тип лазера	Твердотельный Yb дисковый лазер	Волоконный Yb лазер	Твердотельный Yb лазер CPA	Гибридный Yb (волоконный + твердотельный)	Гибридный Yb (волоконный + твердотельный)	Гибридный CO <sub>2</sub> (параметрический с газовым усилителем)

\*- дополнительный режим работы лазера



Параметр	Значение
Энергия электронов, МэВ	35-120
Разброс по энергии электронов, полн. %	до 0.2
Норм. эмиттанс в ЛУЭ, мм·мрад	1
Норм. эмиттанс в накопителе, мм·мрад	5
Заряд в сгустке, нКл	0,1
Частота повторения в ЛУЭ, Гц	до 400
Частота повторения в накопителе, МГц	12

Исследовательская станция №1

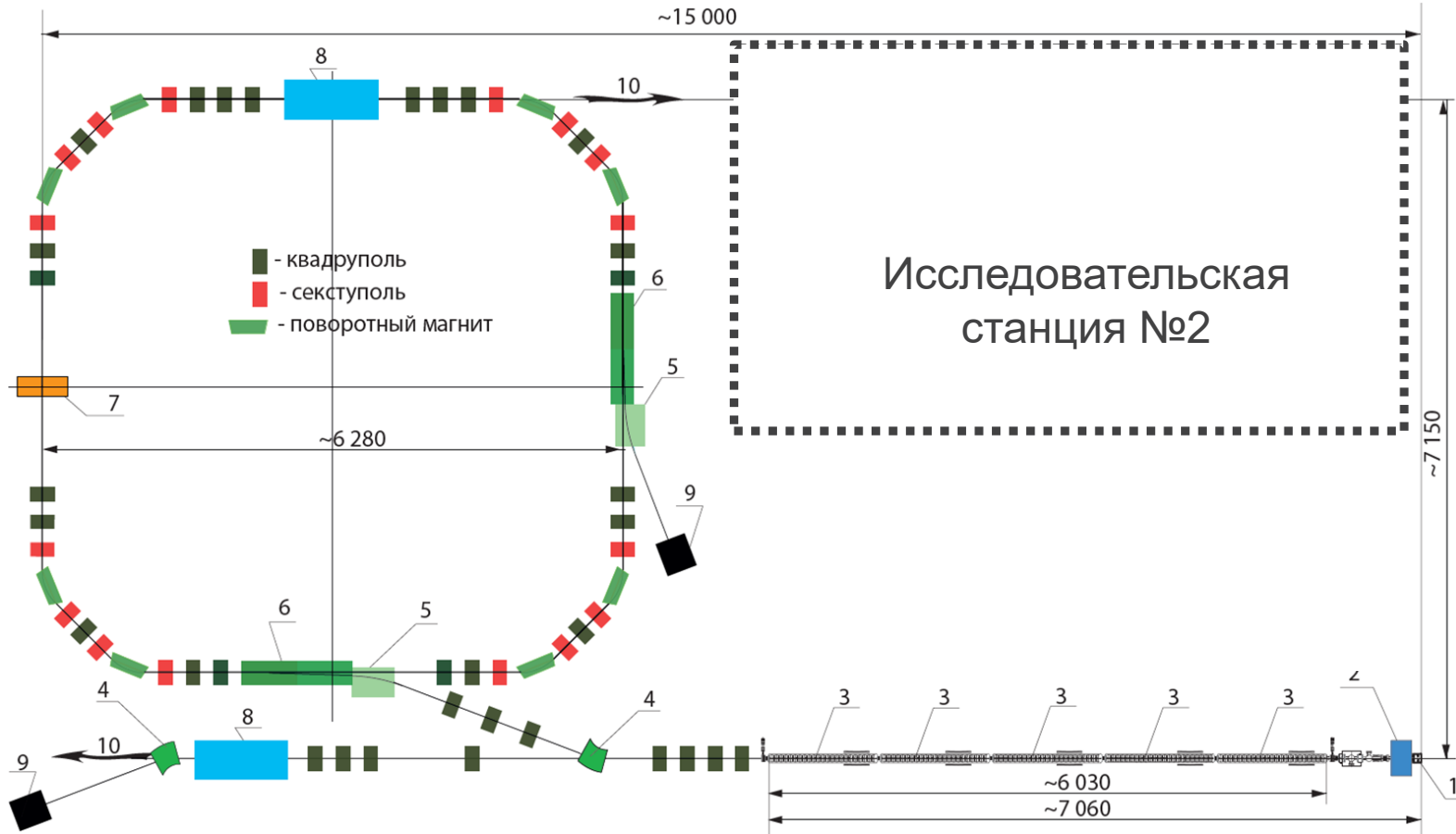


Схема ускорительного комплекса ИКИ на энергию 120 МэВ

1 – СВЧ пушка, 2 – соленоид, 3 – секция ускоряющей структуры, 4 – поворотный магнит, 5 – септум-магнит, 6- кикер, 7 – ВЧ резонатор, 8 – станция генерации, 9 – поглотитель пучка, 10 – комптоновское излучение



	Станция генерации 1	Станция генерации 2
Диапазон энергии квантов	23-540 кэВ	46-540 кэВ
Максимальная интенсивность	$10^9$ ф/с	$10^{10}$ ф/с
Монохроматичность излучения на оси, ПШПВ	0,6 %	0,7%
Диапазон энергии электронов	35 – 120 МэВ	
Заряд электронов в сгустке	100 пКл	
Нормализованный эмиттанс	1 мм*мрад	5 мм*мрад
Максимальная частота сгустков	400 Гц	12 МГц
Длина волны лазерного излучения	1030(515) нм	515 нм
Энергия лазерного импульса	100 мДж	1 мДж
Длительность лазерного импульса	10 пс	30 пс

Параметр	Значение
Энергия электронов, МэВ	500-2000
Разброс по энергии электронов, полн. %	0.1-0.3
Норм. эмиттанс на накопителе, мм·мрад	5-150
Заряд в сгустке, нКл	1
Частота повторения в ЛУЭ и бустере, Гц	1
Частота повторения в накопителе, МГц	1,6-90

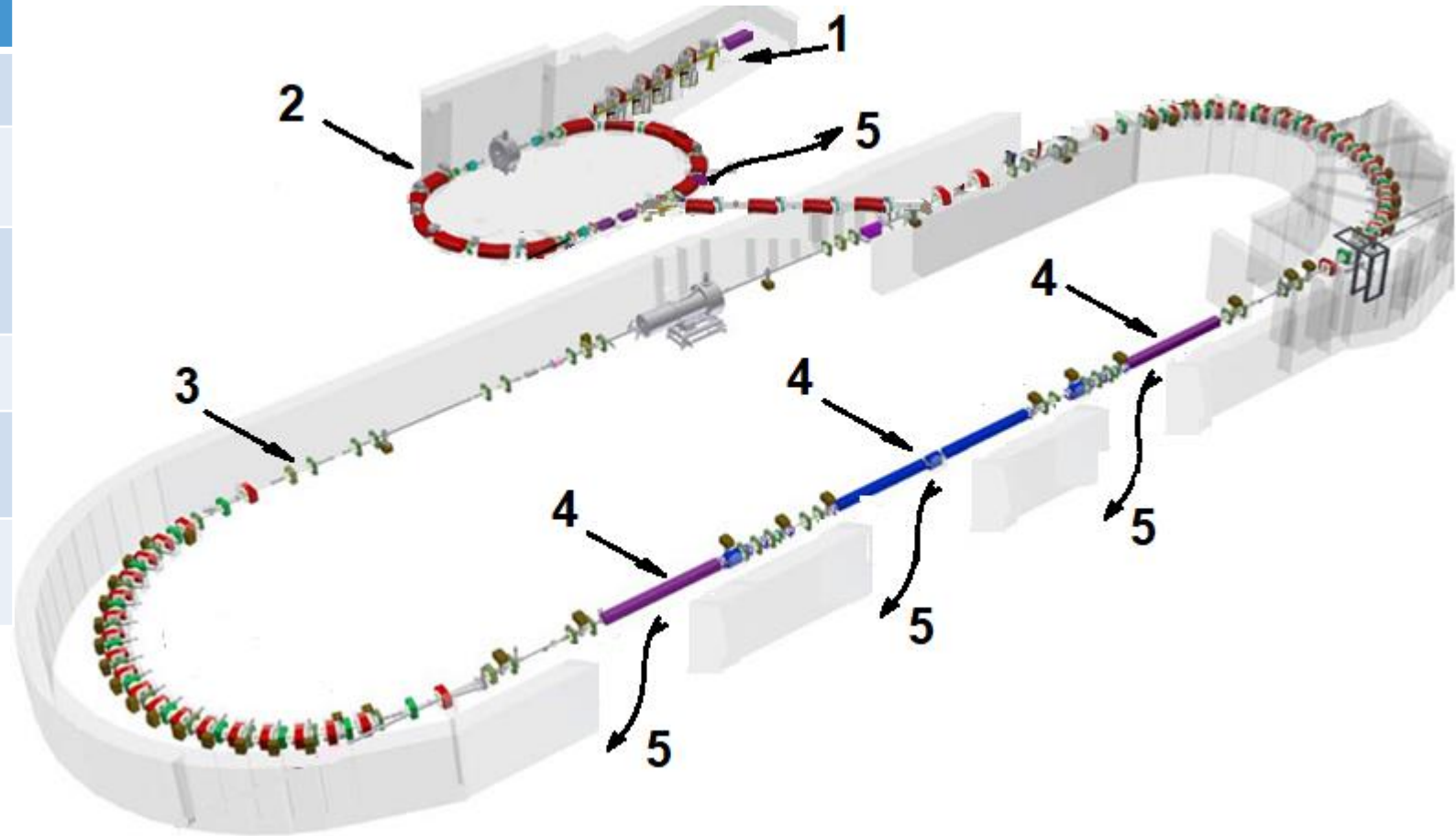


Схема ускорительного комплекса ИКИ на энергию 2 ГэВ

1 – линейный ускоритель электронов, 2 – бустерный синхротрон (0.5 – 2 ГэВ),  
3 – накопитель электронов (0.3 – 2 ГэВ), 4 – станция генерации, 5 – комptonовское излучение



	Станция генерации 3	Станция генерации 4	Станция генерации 5	Станция генерации 6
Диапазон энергии квантов	4,5-70 МэВ	0,45-7 МэВ	4,5-140 МэВ	13,5 -250 МэВ
Максимальная интенсивность	$10^9$ ф/импульс	$10^{11}$ ф/с	$10^{10}$ ф/с	$10^9$ ф/с
Монохроматичность излучения на оси, ПШПВ	5 %	0,5 %	0,5 %	0,5 %
Диапазон энергии электронов	0,5-2 ГэВ			
Заряд электронов в сгустке	1 нКл			
Нормализованный эмиттанс	10-100 мм*мрад	5 -150 мм*мрад		
Максимальная частота сгустков	1 Гц	90 МГц		
Длина волны лазерного излучения	1030(515) нм	10,6 мкм	1030(515) нм	343(257) нм
Энергия лазерного импульса	5 Дж	100 мкДж	100 (40) мкДж	20(0.5) мкДж
Длительность лазерного импульса	20 пс	200 пс	200 пс	200 пс



Название	HIGS	NewSUBARU	SLEGS	ELI-NP	Комплекс ИКИ
Месторасположение	США	Япония	Китай	ЕС	Россия
Энергия электронов, МэВ	240-1200	500-1500	3500	234-742	35-120, 500-2000
Длина волны лазерного излучения, нм	1060-190	532-10 600	10 640	1030, 515	257, 343, 515, 1030,10 600
Энергия гамма-квантов, МэВ	1-100	1-40	0,66-22	1-19,5	0,02-250
Ширина спектра на полувысоте	0,8-10%	10%	2-15%	<0,5%	0,5-1,5%
Поток гамма-квантов, $\gamma \cdot c^{-1}$	$10^6-3 \cdot 10^{10}$	$10^7-4 \cdot 10^7$	$10^4-10^7$	$10^{11}$	$10^{10}-10^{11}$
Статус, год ввода в эксплуатацию	1996	2005	2023	Проектируется	Проектируется

**Комплекс ИКИ по совокупности параметров не уступает, а по отдельным параметрам превосходит существующие и проектируемые установки в мире**

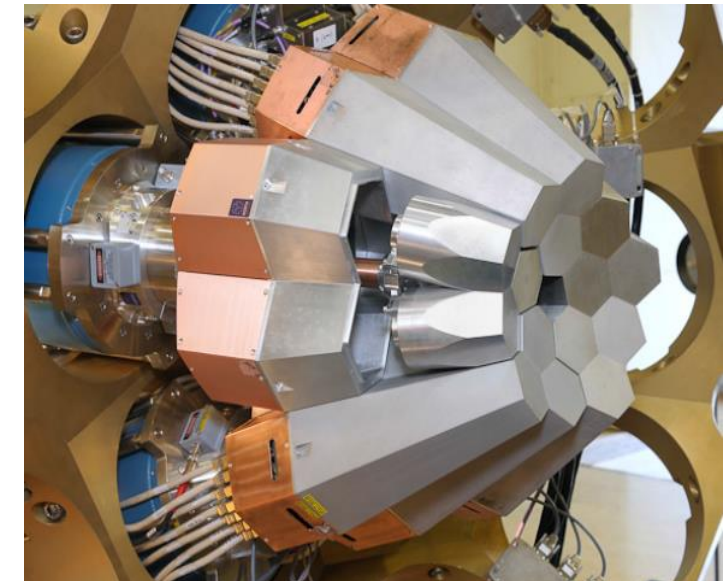
Области исследований (номер станции)	Методическое оснащение
Ядерная изомерия, энергетическая структура ядра, изучение ядерных и конструкционных материалов (И6)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• гамма-спектрометрия</li> <li>• томография</li> </ul>
Ядерная изомерия, изучение ядерных и конструкционных материалов (И2)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• гамма и рентгеновская спектрометрия</li> <li>• томография</li> </ul>
Ядерная изомерия, энергетическая структуры атомных ядер (И5)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• гамма-спектрометрия</li> <li>• спектрометрия нейтронов</li> <li>• спектрометрия заряженных частиц</li> </ul>
Быстропротекающие процессы, эффект нелинейного Комптона (И3)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• гамма-спектрометрия</li> <li>• рентгенография</li> </ul>
Энергетическая структура атомных ядер, фотоядерные реакции (И4)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• гамма-спектрометрия</li> <li>• спектрометрия нейтронов</li> <li>• спектрометрия заряженных частиц</li> </ul>
Изучение конструкционных материалов, биофизика (И1)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• гамма- и рентгеновская спектрометрия</li> <li>• томография и рентгенография</li> <li>• рентгенофазовый анализ</li> </ul>

## Требования к гамма-спектрометрии

- диапазон от 50 кэВ до 10 МэВ;
- энергетическое разрешение не хуже 1.75 кэВ;
- эффективность регистрации не менее 50%.

## Требования для рентгеновской спектрометрии

- диапазон от 3 кэВ до 3 МэВ;
- энергетическое разрешение не хуже 300 эВ;
- эффективность регистрации не менее 50%.



# Внешний облик комплекса зданий ИКИ



РФЯЦ-ВНИИЭФ  
РОСАТОМ



# Посадка зданий комплекса ИКИ на местности



Рассматриваемая территория пригодна для размещения комплекса ИКИ:

- лесной массив;
- промышленная зона ВНИИЭФ;
- свободна от застройки;
- минимальный перепад высот;
- инженерная инфраструктура в шаговой доступности.



Общая площади зданий комплекса ~ 38 000 м<sup>2</sup>

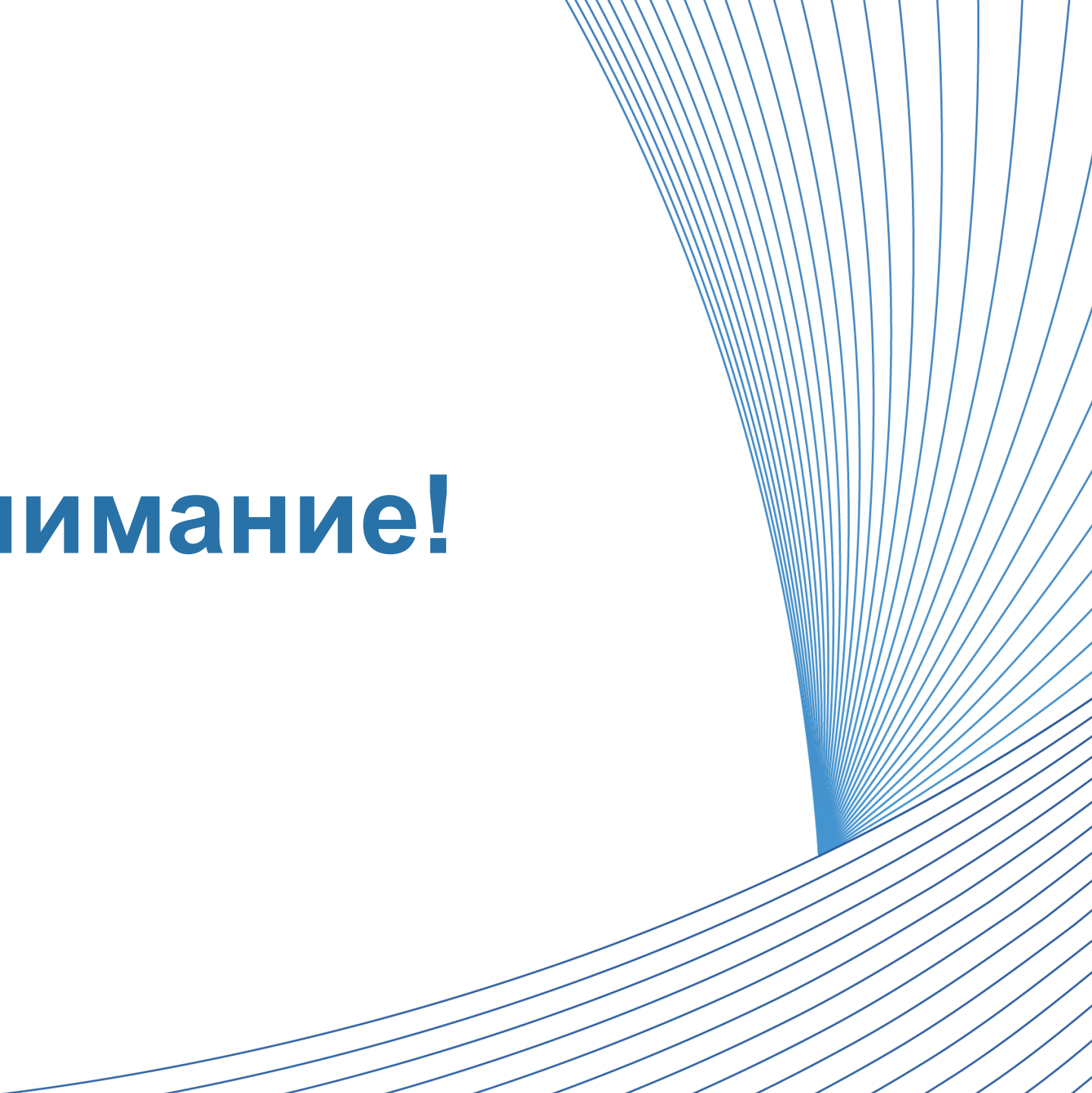
# Дорожная карта по созданию ИКИ в период 2026-2031 г.



		2025				2026				2027				2028				2029				2030				2031																												
		1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4																									
ОКР	Комплекс ИКИ	ТЗ на ИКИ																								ТП																												
																										Разработка РКД																												
																										Изготовление																												
																										СМР и ПНР																												
	Источник с диапазоном энергий квантов 25-540 кэВ	ТП	Разработка РКД																																																			
		Изготовление																																																				
		СМР и ПНР																																																				
		Предварительные испытания																											Приемочные испытания																									
	Источник с диапазоном энергий квантов 0,5-250 МэВ	ТП	Разработка РКД																																																			
		Изготовление																																																				
		СМР и ПНР																																																				
		Предварительные испытания																												Приемочные испытания																								
Строительство	Этап 1	ТЗ на проектирование ИКИ				ПИР, ГГЭ	Строительство инженерной инфраструктуры (без энергетики)																																															
	Этап 2					ПИР, ГГЭ	Строительство инжекционного комплекса, техническое перевооружение здания 416, технологическое присоединение 5 МВт																																															
	Этап 3					ПИР, ГГЭ	Строительство здания ускорителя электронов на энергию 120 МэВ																																															
	Этап 4					ПИР, ГГЭ	Строительство здания ускорителя электронов на энергию до 2 ГэВ, корпус инженерного обеспечения																																															
	Этап 5					ПИР, ГГЭ	Строительство ИТК, главной понижающей подстанции (ГПП)																																															

- **В соответствии с принятыми решениями в стране начато создание комплекса комптоновского излучения на основе отечественных технологий**
- **Комплекс по совокупности параметров не уступает, а по отдельным параметрам превосходит существующие и проектируемые установки в мире**
- **Создание комплекса позволит проводить фундаментальные и прикладные исследования в области ядерной физики и ядерной фотоники, материаловедения, биологии и медицины**

**Спасибо за внимание!**



# Характеристики станций генерации на ускорительном комплексе 120 МэВ



	Станция генерации 1	Станция генерации 2
Диапазон энергии квантов	23-540 кэВ	46-540 кэВ
Максимальная интенсивность	10 <sup>9</sup> ф/с при 23 кэВ 10 <sup>8</sup> ф/с при 540 кэВ	10 <sup>10</sup> ф/с при 46 кэВ 10 <sup>10</sup> ф/с при 540 кэВ
Монохроматичность излучения на оси, ПШПВ	0,6 % при 23 кэВ 1,0 % при 540 кэВ	0,7% при 46 кэВ 1,5% при 540 кэВ
Диапазон энергии электронов	35 – 120 МэВ	
Заряд электронов в сгустке	100 пКл	
Нормализованный эмиттанс	1 мм*мрад	5 мм*мрад
Максимальная частота сгустков	400 Гц	12 МГц
Длина волны лазерного излучения	1030(515) нм	515 нм
Энергия лазерного импульса	100 мДж	1 мДж
Длительность лазерного импульса	10 пс	30 пс

# Характеристики станций генерации на ускорительном комплексе 2 ГэВ



	Станция генерации 3	Станция генерации 4	Станция генерации 5	Станция генерации 6
Диапазон энергии квантов	4,5-70 МэВ	0,45-7 МэВ	4,5-140 МэВ	13,5 -250 МэВ
Максимальная интенсивность	10 <sup>9</sup> ф/импульс при 4,5 МэВ 10 <sup>8</sup> ф/импульс при 70 МэВ	10 <sup>11</sup> ф/с при 0,45 МэВ 10 <sup>10</sup> ф/с при 7 МэВ	10 <sup>10</sup> ф/с при 4,5 МэВ 10 <sup>8</sup> ф/с при 140 МэВ	10 <sup>9</sup> ф/с при 13,5 МэВ 10 <sup>6</sup> ф/с при 250 МэВ
Монохроматичность излучения на оси, ПШПВ	5 % при 4,5 МэВ >50 % при 70 МэВ	0,4 % при 0,45 МэВ 13,4 % при 7 МэВ	0,4 % при 4,5 МэВ 7 % при 140 МэВ	0,4 % при 13,5 МэВ 7 % при 250 МэВ
Диапазон энергии электронов	0,5-2 ГэВ			
Заряд электронов в сгустке	1 нКл			
Нормализованный эмиттанс	10-100 мм*мрад	5 -150 мм*мрад		
Максимальная частота сгустков	1 Гц	90 МГц		
Длина волны лазерного излучения	1030(515) нм	10,6 мкм	1030(515) нм	343(257) нм
Энергия лазерного импульса	5 Дж	100 мкДж	100 (40) мкДж	20(0.5) мкДж
Длительность лазерного импульса	20 пс	200 пс	200 пс	200 пс