

Лазеры на свободных электронах



Н.А. Винокуров
Институт ядерной физики
им. Г. И. Будкера СО РАН

Литература

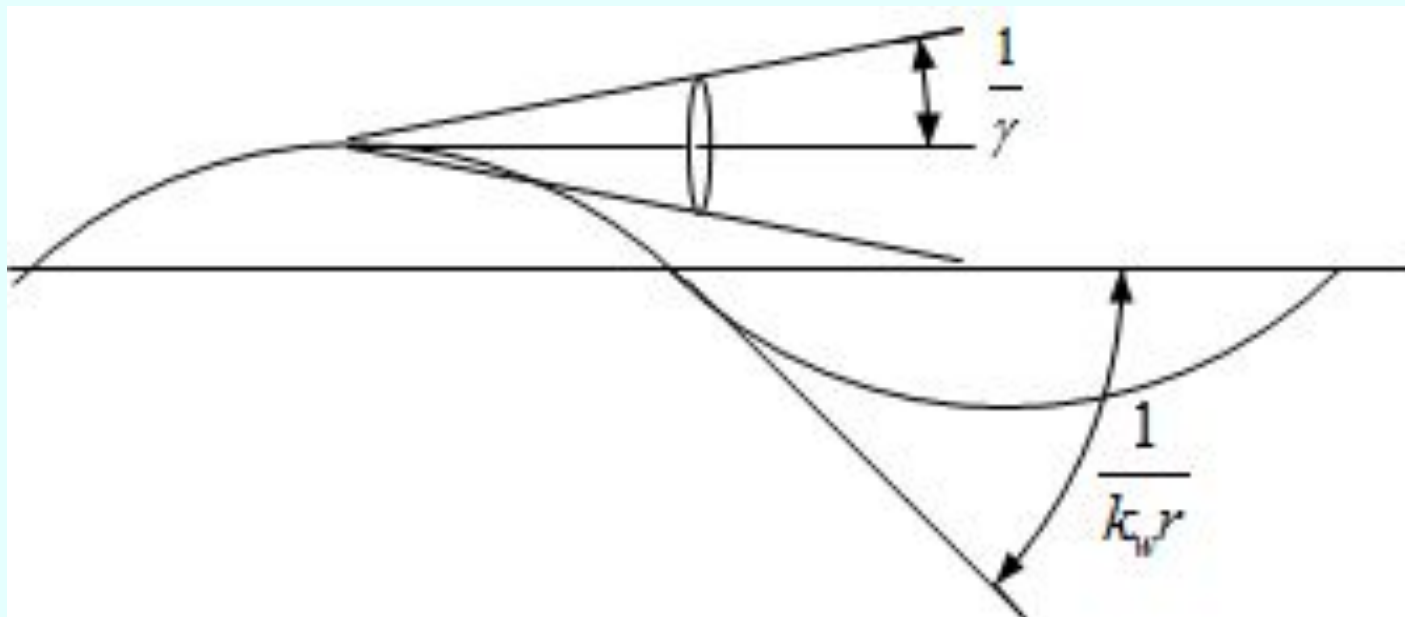
1. Н.А. Винокуров и Е.Б. Левичев. Ондюляторы и вигглеры для генерации излучения и других применений. Успехи физических наук. - 2015. - Т. 185, № 9. – С. 917–939.
2. Н.А. Винокуров и О.А. Шевченко. Лазеры на свободных электронах и их разработка в Институте ядерной физики им. Г.И. Будкера СО РАН. Успехи физических наук. - 2018. - Т. 188, № 5. - С. 493–507.

Лазеры на свободных электронах (ЛСЭ) позволяют получать монохроматическое излучение на любой заданной длине волны (0,1 нм – 1 мм) и плавно перестраивать длину волны. Средняя мощность излучения может быть порядка 100 кВт.

ЛСЭ используют явление *вынужденного* *ондуляторного* излучения.

Ондуляторное излучение

Синусоидальная траектория и излучение заряда, движущегося по ней



$$x = \frac{1}{k_w^2 r} \cos(k_w z), \quad y = 0$$

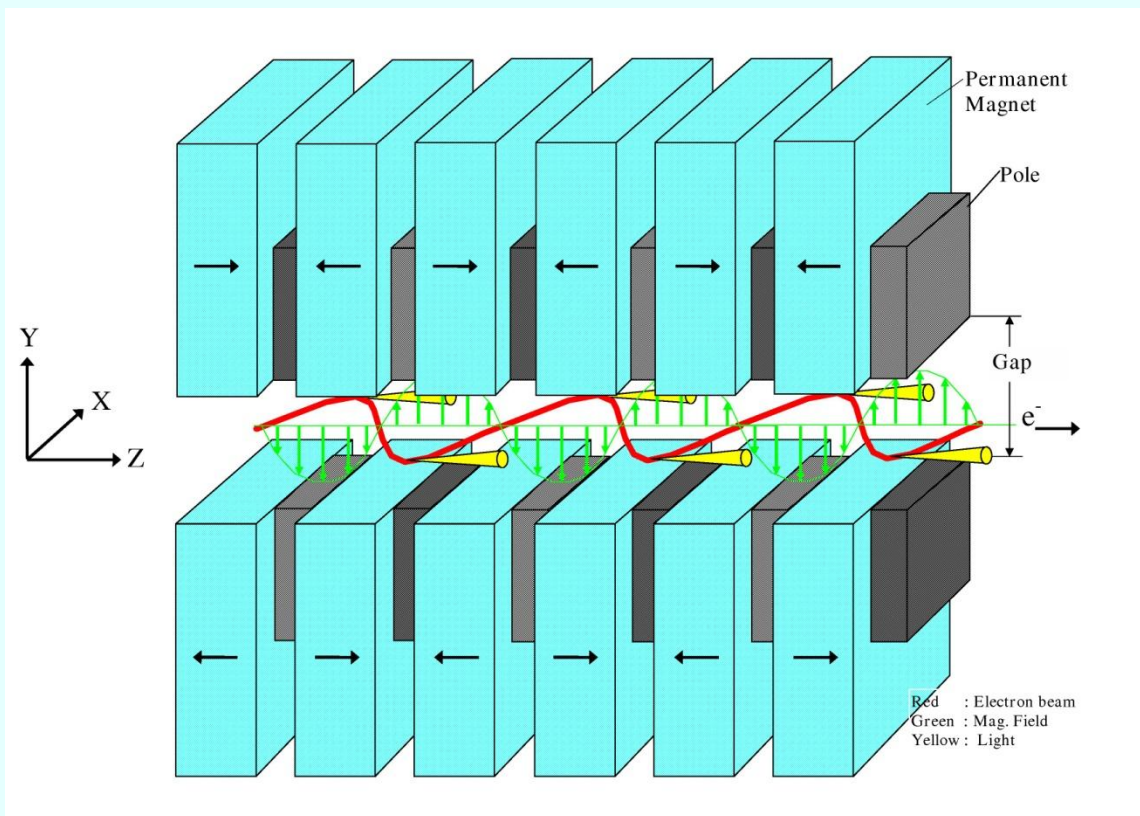
$$k_w = 2\pi / \lambda_w$$

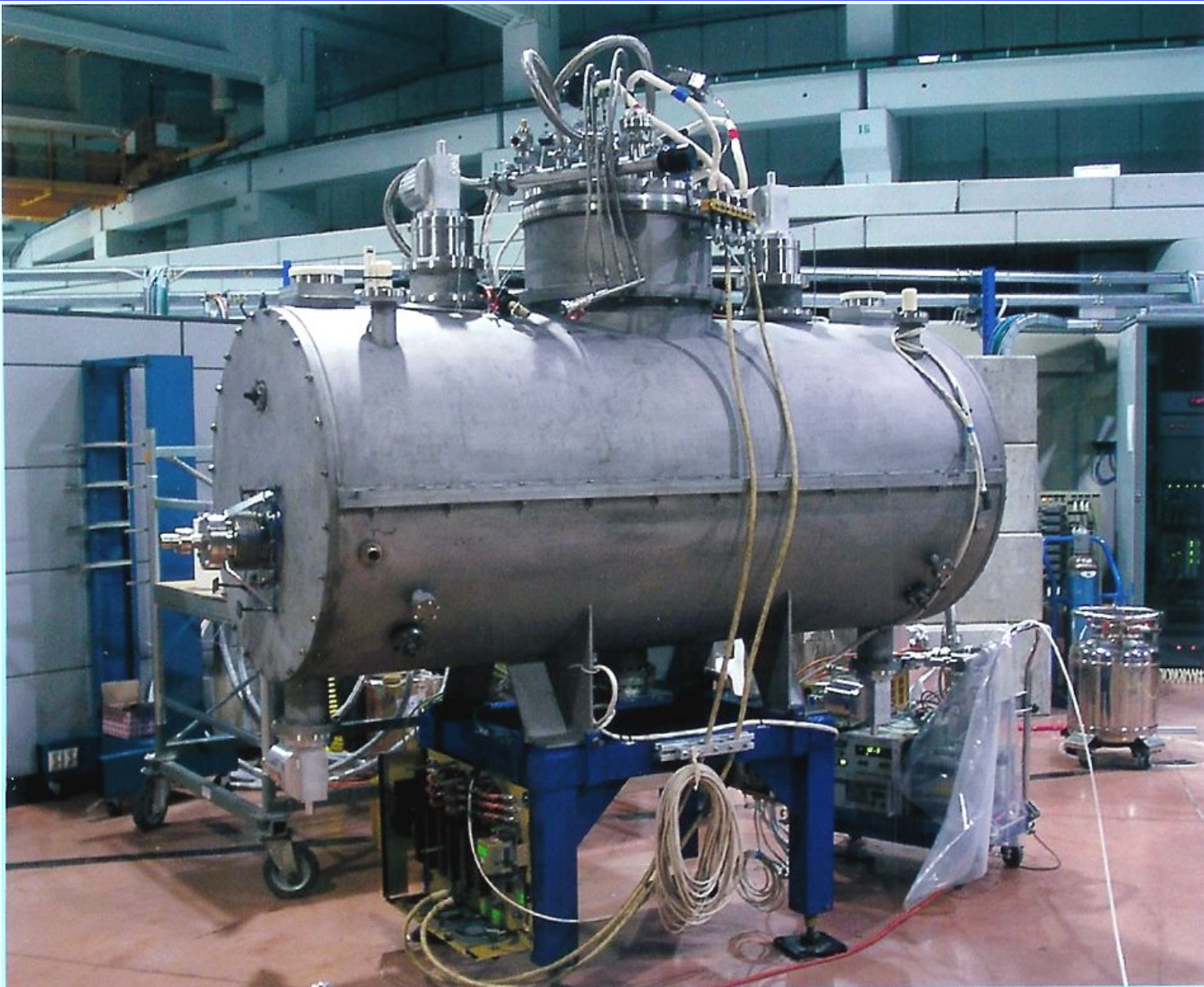
Ондулятором (вигглером) называется магнитная система, создающая пространственно периодическое поперечное магнитное поле. В таком поле ультрарелятивистский электрон может двигаться вдоль периодически изогнутой (синусоидально или спирально) траектории. Ондулятор был предложен В. Л. Гинзбургом в 1947 г.



Траектория электрона в плоском ондуляторе

Движение электрона в гибридном ондуляторе





49-полюсный вигглер с периодом 6 см и магнитным полем 3.5 Т для накопителя-источника СИ ELETTRA (Triest, Italy).

Оргстекло, прорезанное синхротронным излучением из сверхпроводящего вигглера

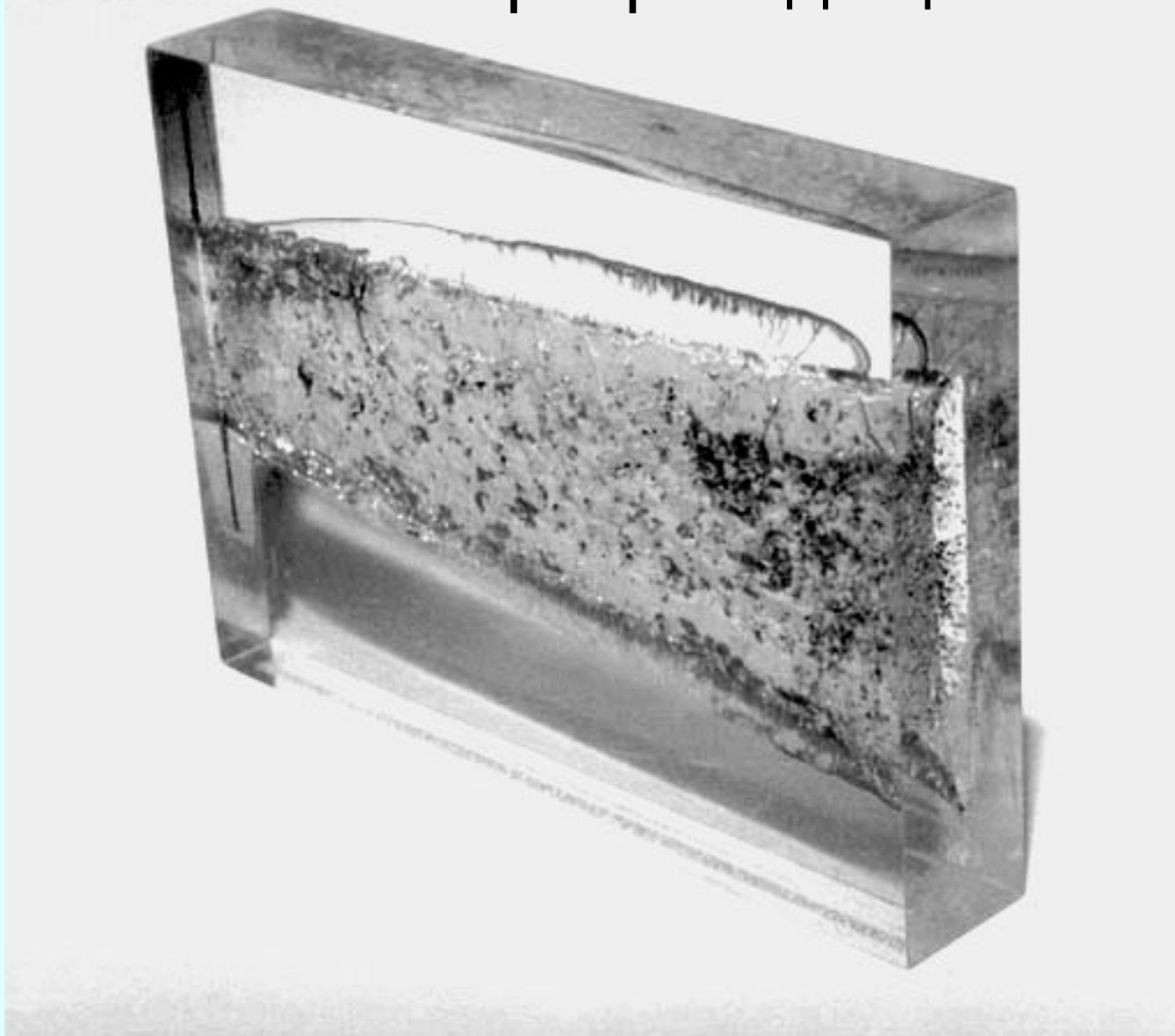
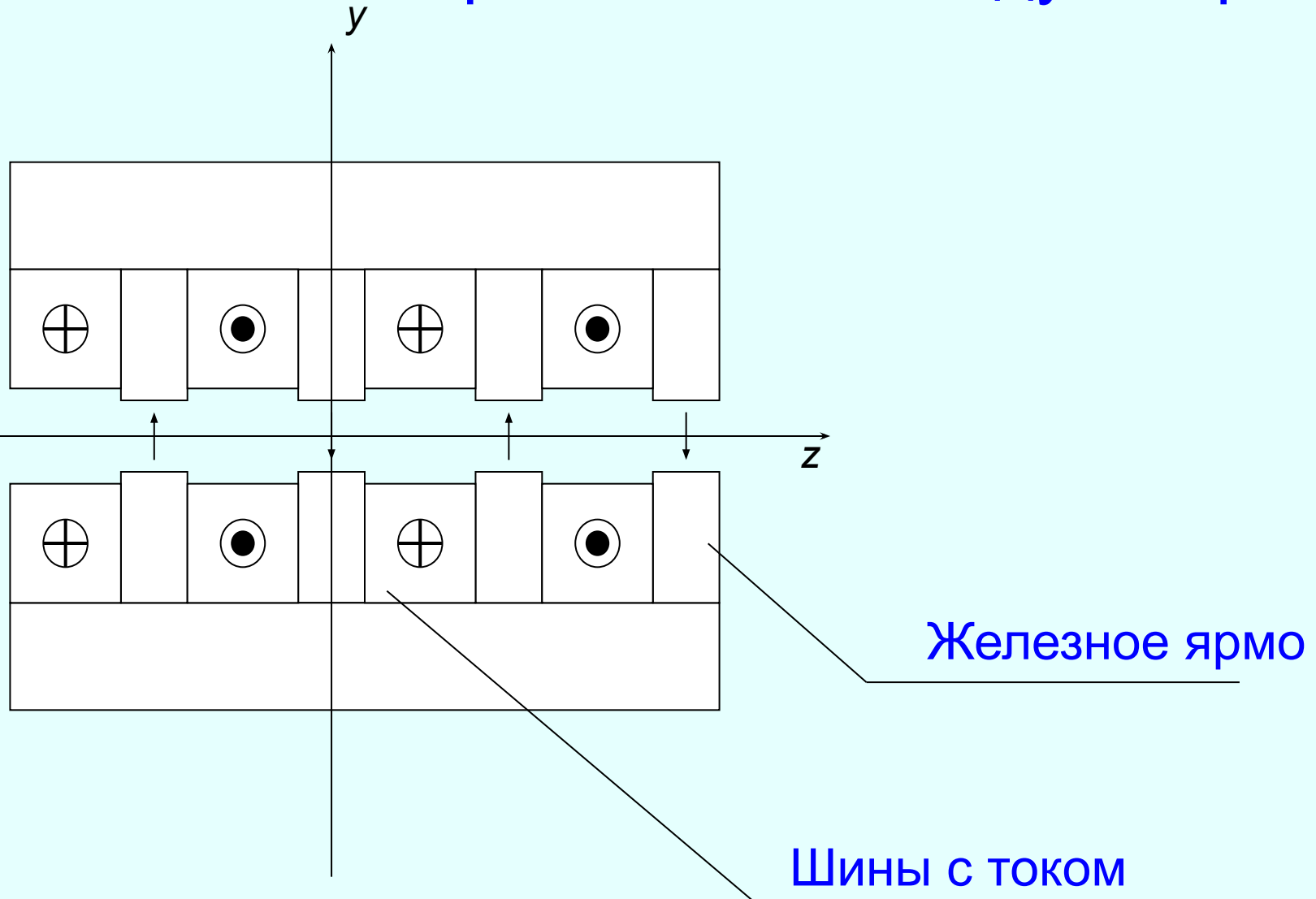
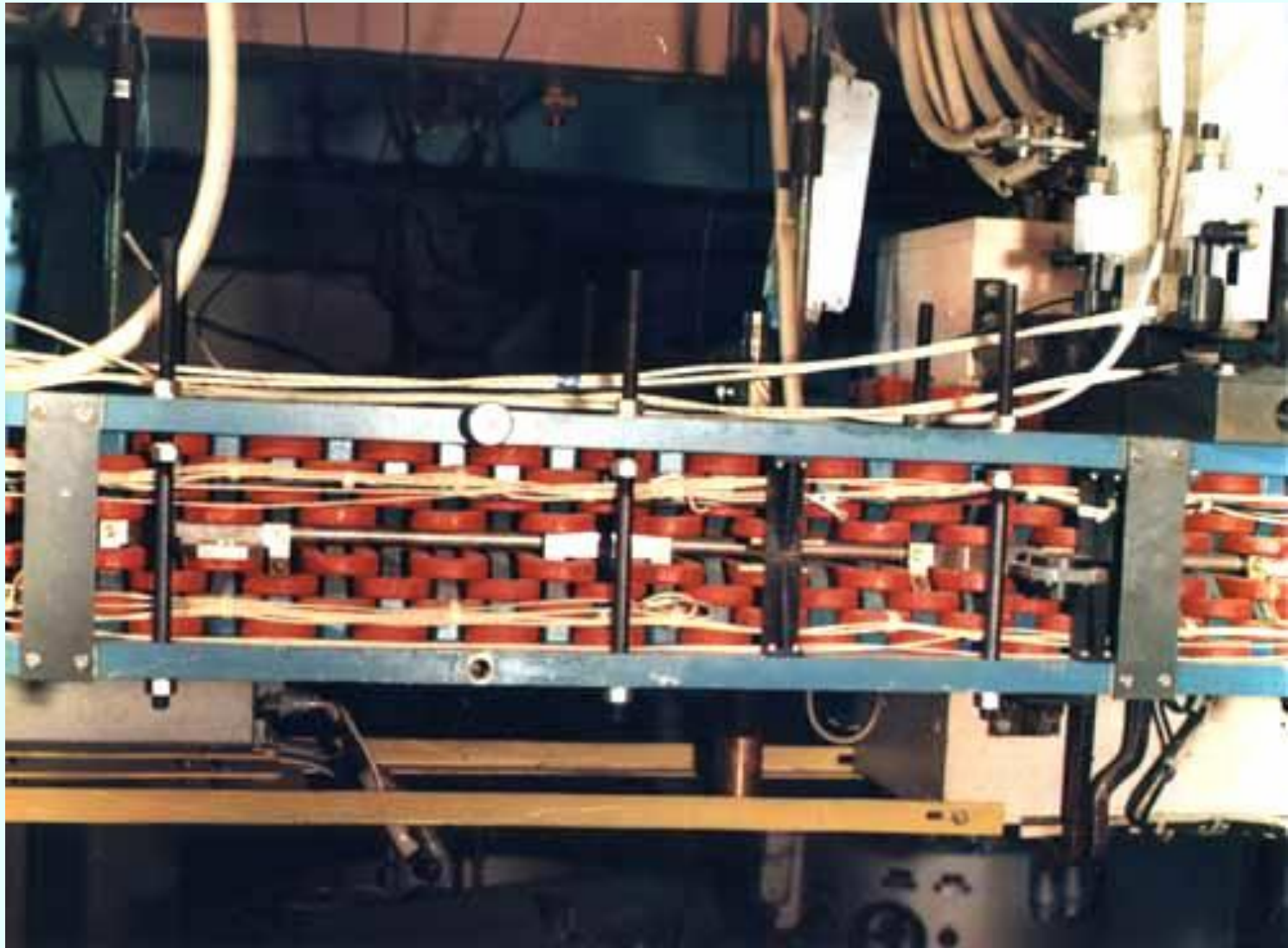


Схема электромагнитного ондулятора





Ондулятор ОК-4. С 1987 работал в ИЯФ СО РАН, с 1996 по н. вр. – в университете Дюка (США).

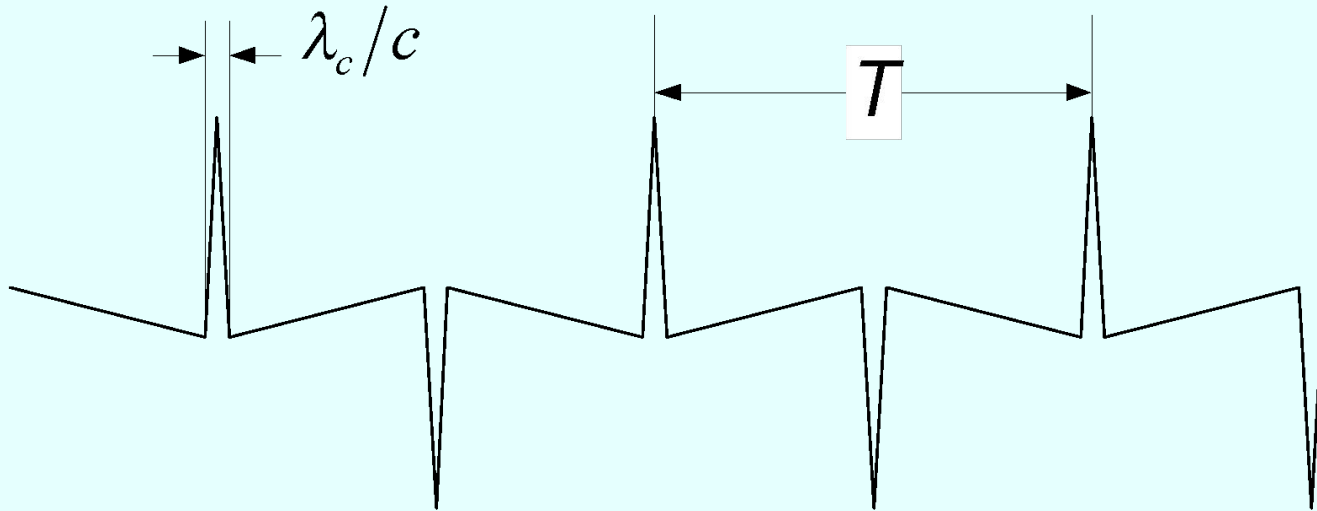


Спиральные ондуляторы ОК-5 для университета Дюка (США)



4 секции по 4 м; период – 12 см. апертура – 4 см.

Зависимость электрического поля излучения от времени



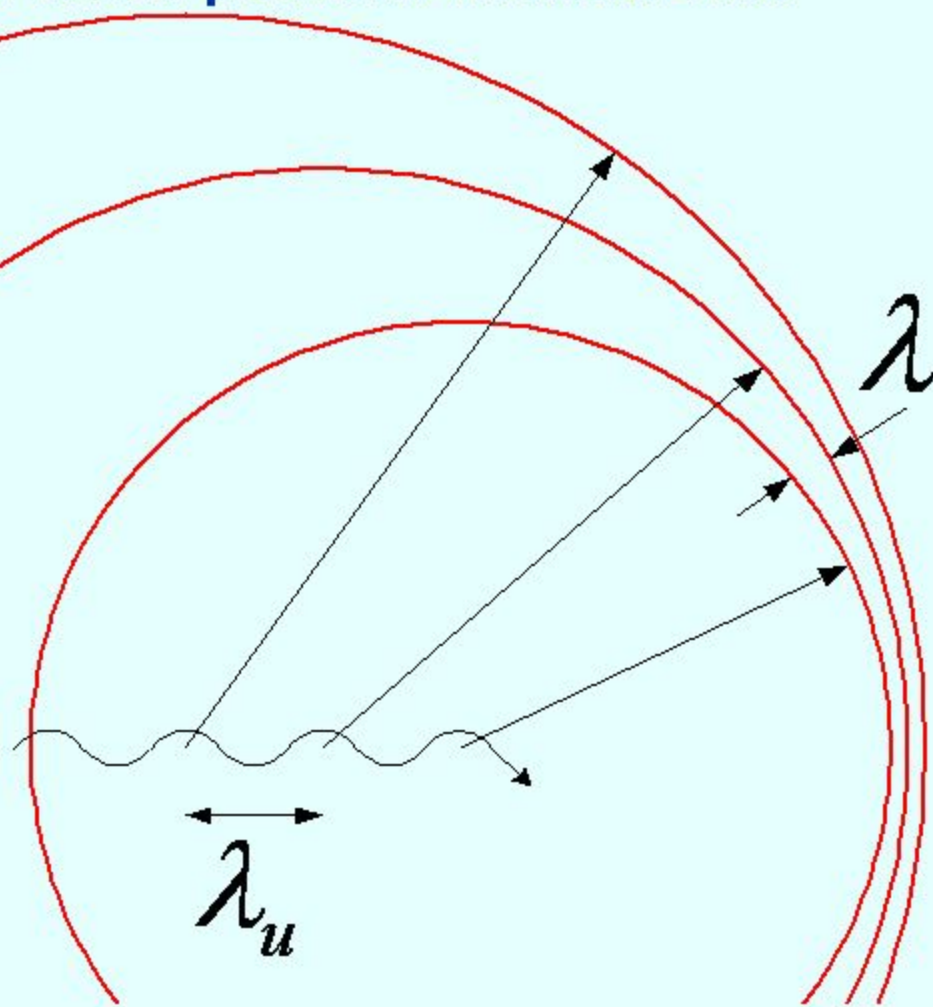
$$T = \int_0^{\lambda_w} \frac{dz}{v_z} - \frac{\lambda_w}{c} = \int_0^{\lambda_w} \sqrt{1 + \left(\frac{dx}{dz}\right)^2} \frac{dz}{v} - \frac{\lambda_w}{c} \approx$$

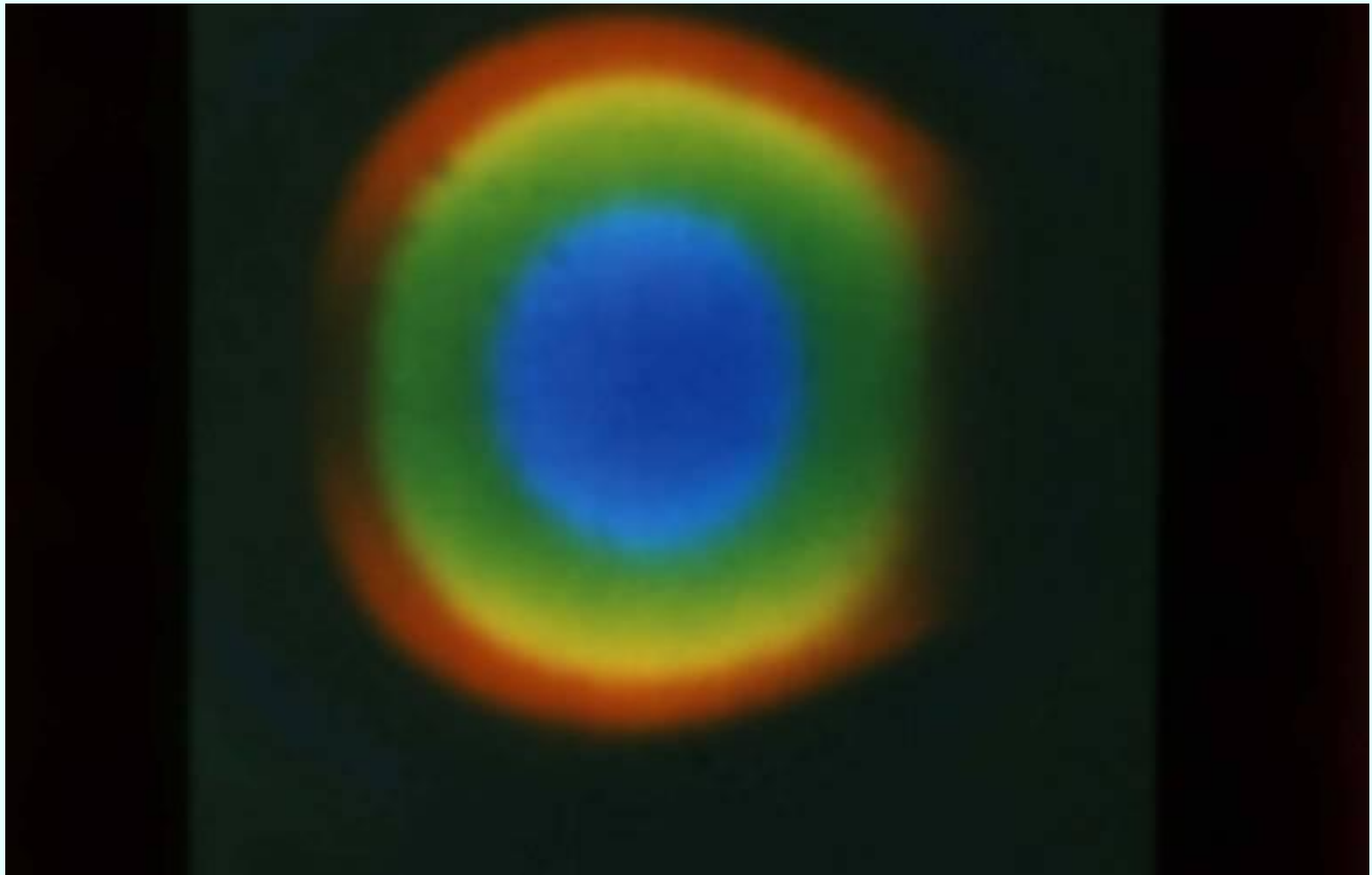
$$\frac{\lambda_w}{v} (1 - \beta) + \frac{1}{2} \int_0^{\lambda_w} \left(\frac{dx}{dz}\right)^2 \frac{dz}{v} = \frac{\lambda_w}{v} \left(1 - \beta + \frac{1}{4k_w^2 r^2}\right)$$

Волновые фронты, расходящиеся из различных точек максимального ускорения (максимумов магнитного поля ондулятора). Длина волны излучения λ в направлении движения электрона минимальна.

$$\lambda = \lambda_u \left(1 - \frac{v}{c} \cos \theta \right)$$

$$\approx \lambda_u \left(\frac{1}{2\gamma^2} + \frac{\theta^2}{2} \right)$$

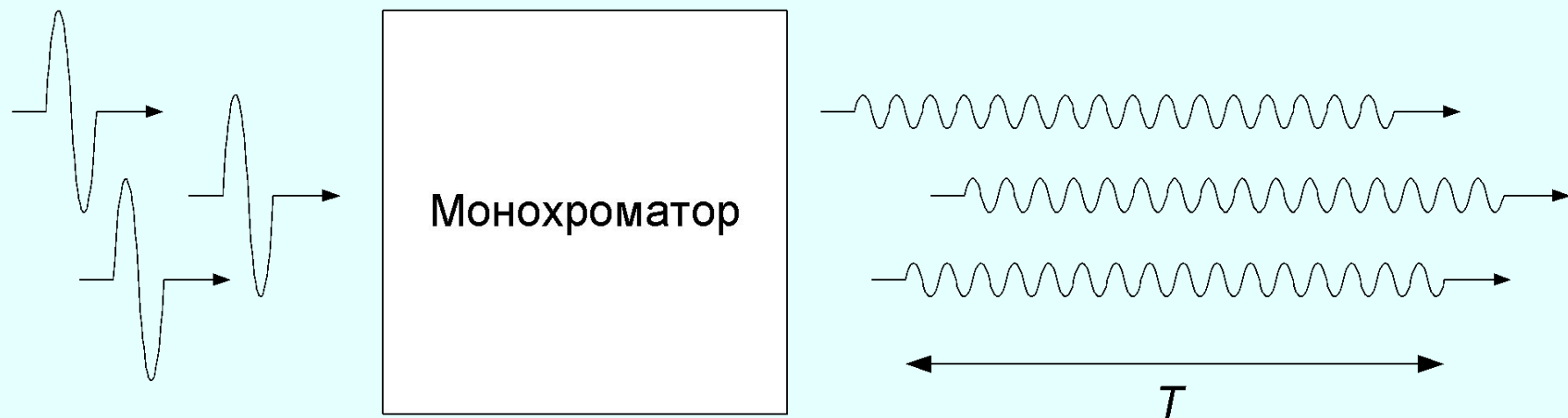




Ондуляторное излучение. Снято на электронном накопителе ВЭПП-3 ИЯФ СО РАН (1978).

Вынужденное излучение – синхронизация ансамбля излучателей внешней волной

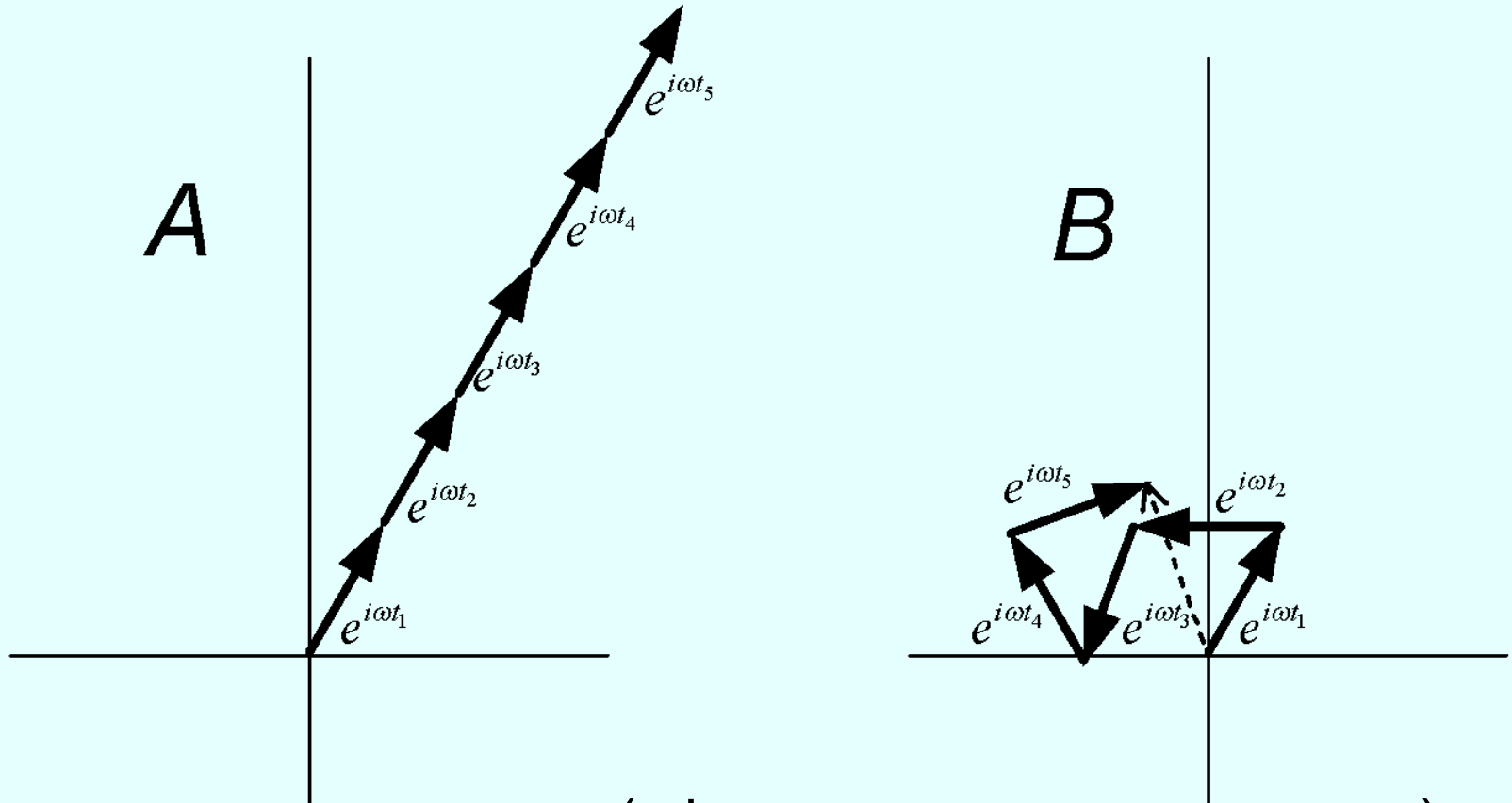
Прохождение импульсов излучения от разных излучателей через монохроматор



$$E_M(t) = a \sum_n \cos[\omega(t - t_n)] \mathcal{G}(t - t_n) \mathcal{G}(T - t + t_n) = \text{Re} \left[e^{-i\omega t} a \sum_n e^{i\omega t_n} \mathcal{G}(t - t_n) \mathcal{G}(T - t + t_n) \right]$$

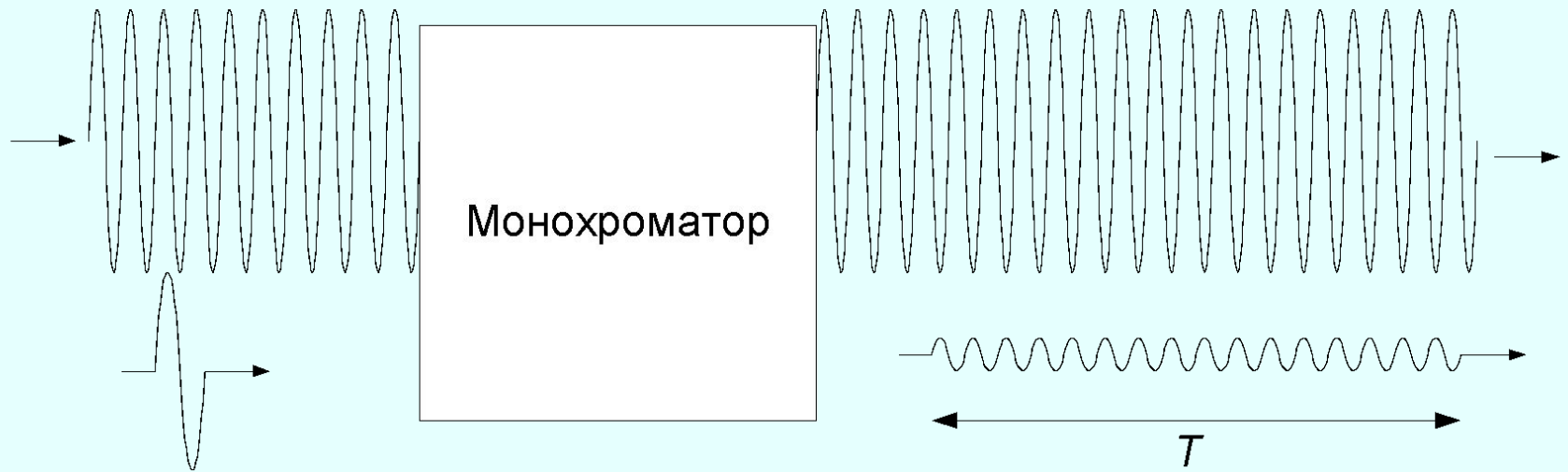
Мощность сигнала (спектральная плотность) пропорциональна квадрату амплитуды

$$\left| \sum_n a e^{i\omega t_n} \right|^2 = \sum_m \sum_n a^2 e^{i\omega(t_n - t_m)}$$



A – когерентное излучение (сфазированные излучатели)
B – некогерентное излучение

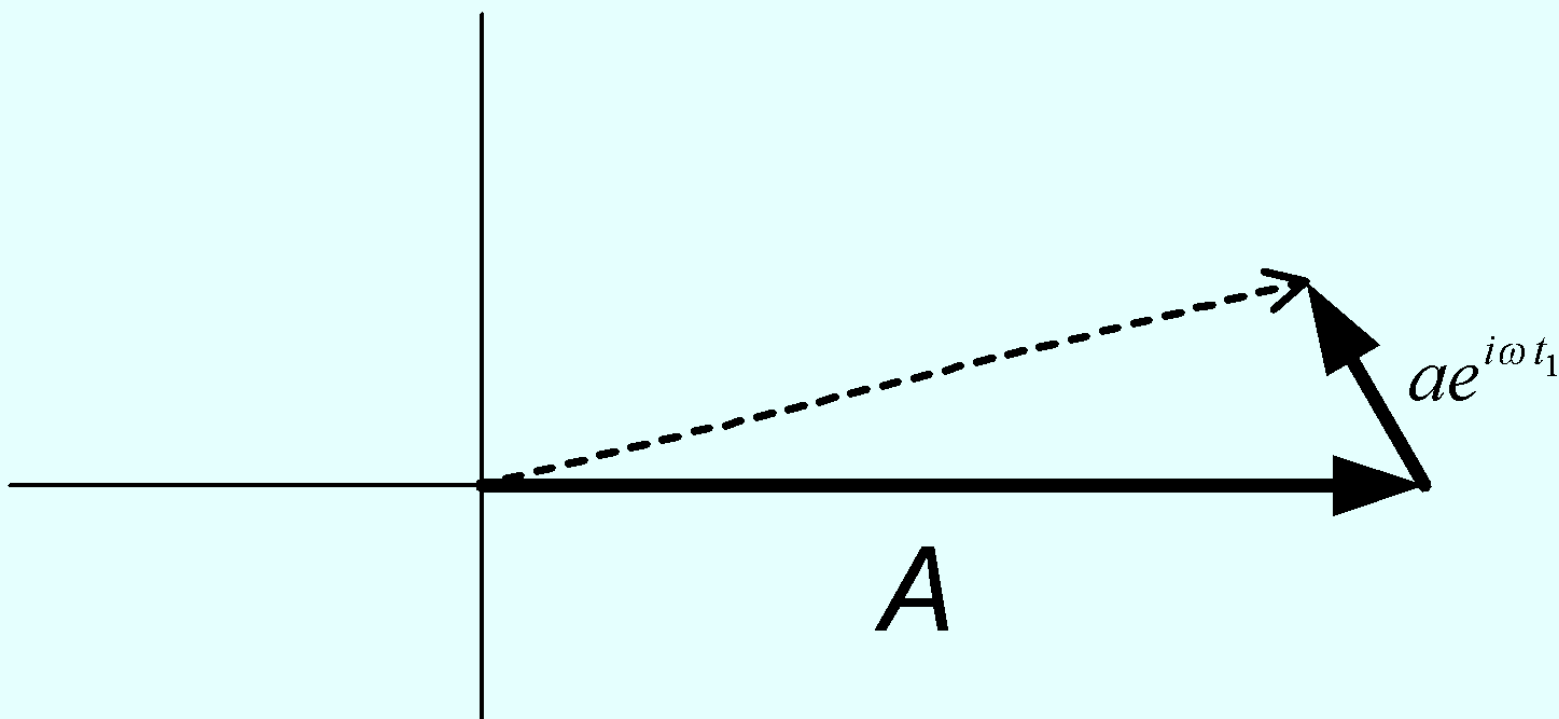
Сложение одного импульса излучения с полем монохроматической волны



$$\left| A + ae^{i\omega t_1} \right|^2 = |A|^2 + 2\operatorname{Re}\left(Aae^{-i\omega t_1} \right) + a^2$$

Изменение энергии волны

$$|A + ae^{i\omega t_1}|^2 T = |A|^2 T + 2 \operatorname{Re}(Aae^{-i\omega t_1})T + a^2 T$$



Вынужденное ондуляторное излучение вызвано синхронизацией отдельных излучателей. Для ЛСЭ такая синхронизация – это просто продольная группировка электронов, как в лампах бегущей волны. Первый ЛСЭ, построенный R. Phyllips в 1959 г., “ubitron”, был лампой бегущей волны с ондулятором.

Простейшая лампа бегущей волны использует вынужденное черенковское излучение.

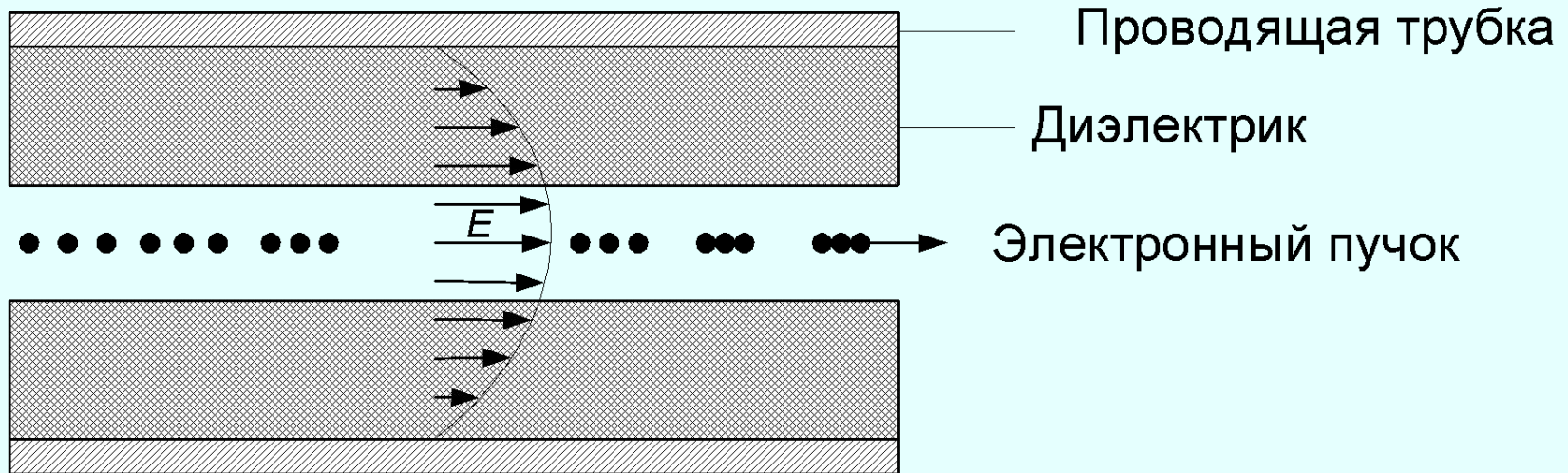
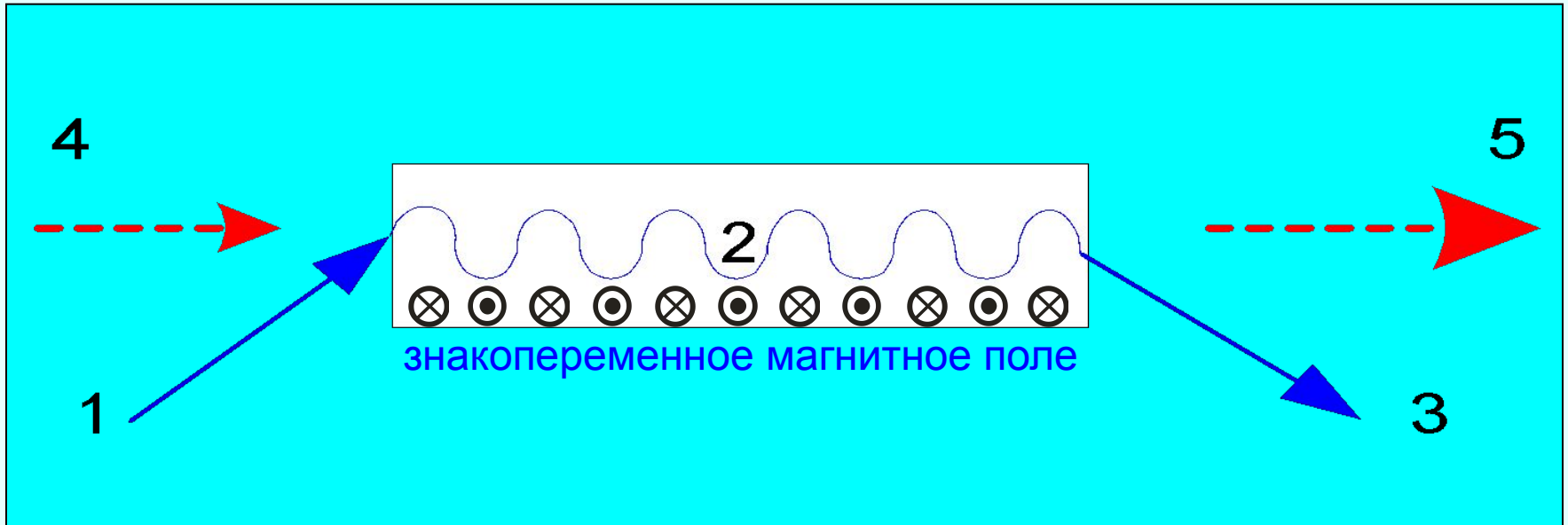
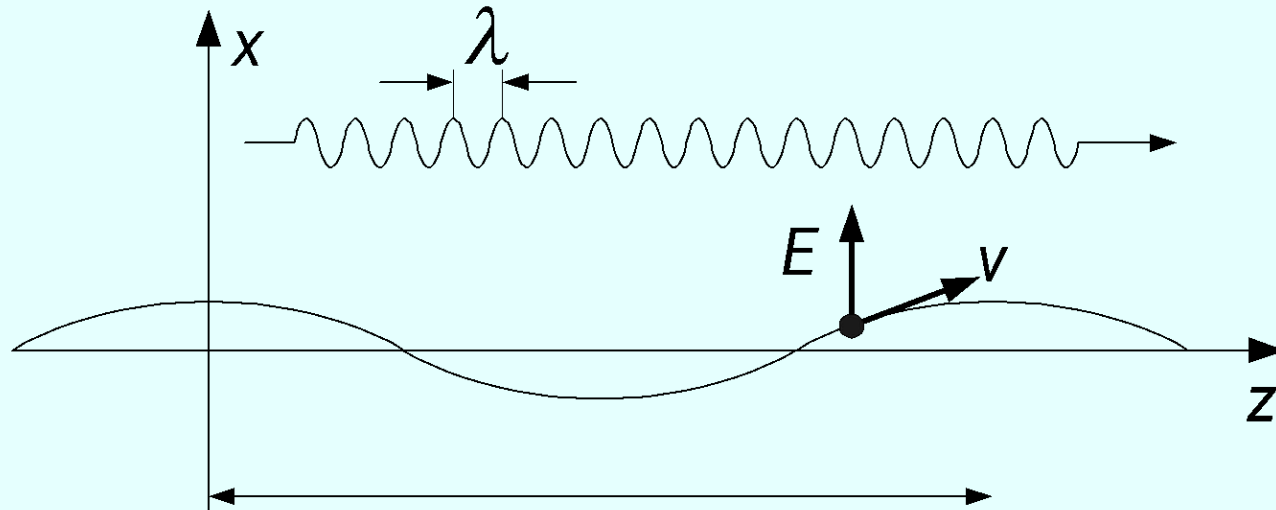


Схема ЛСЭ-усилителя



- 1 – входящий электронный пучок
- 2 – ондулятор
- 3 – отработанный электронный пучок
- 4 – входящее излучение
- 5 – усиленное излучение

Из-за того, что скорость электрона в ондуляторе имеет поперечную составляющую, поле волны меняет энергию электрона. Если за время прохождения электроном одного периода ондулятора он отстаёт от волны ровно на длину волны, то суммарное изменение энергии во всём ондуляторе может быть значительным.

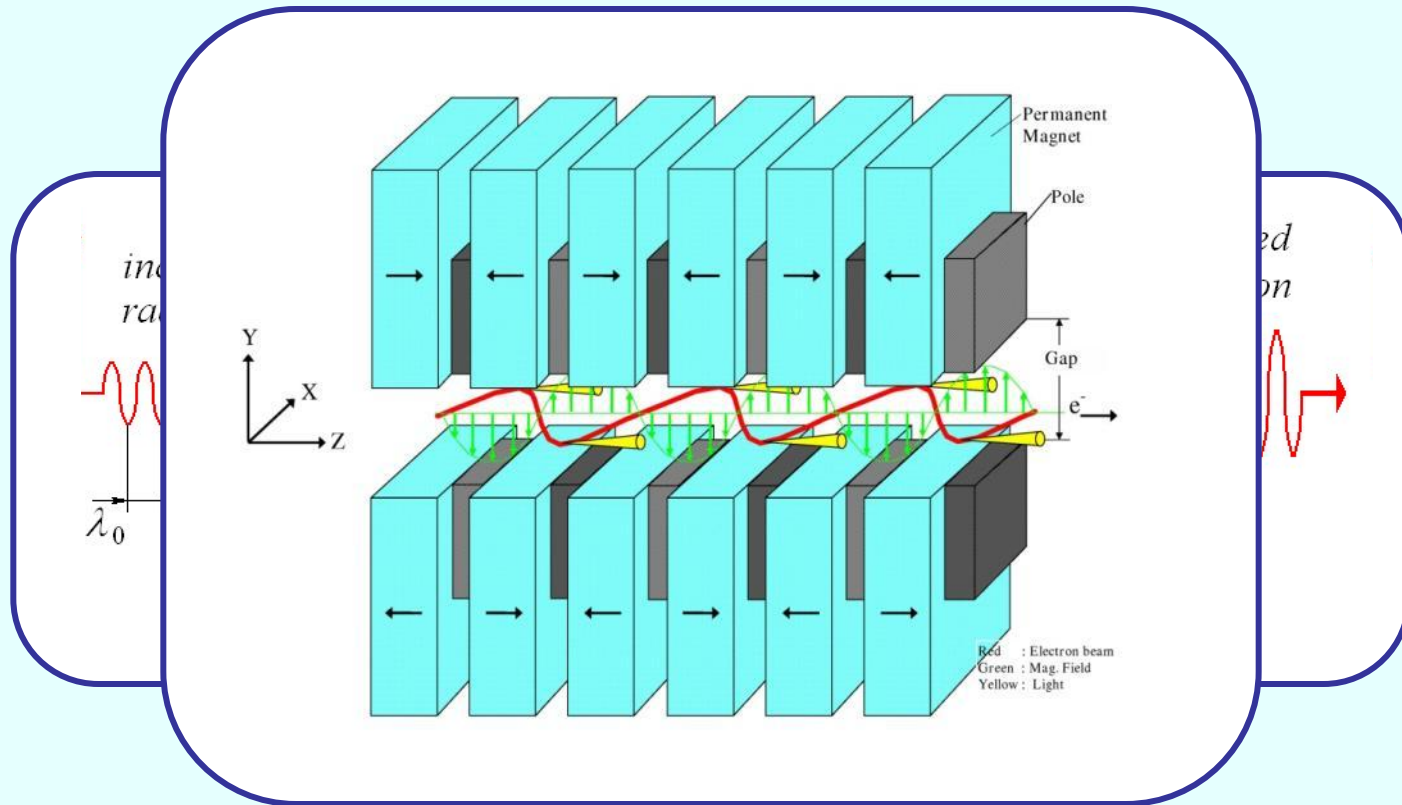


$$\frac{d\varepsilon}{dz} = eE_x \frac{dx}{dz} \approx -eE \cos(kz - \omega t) \alpha_0 \sin(k_u z) =$$

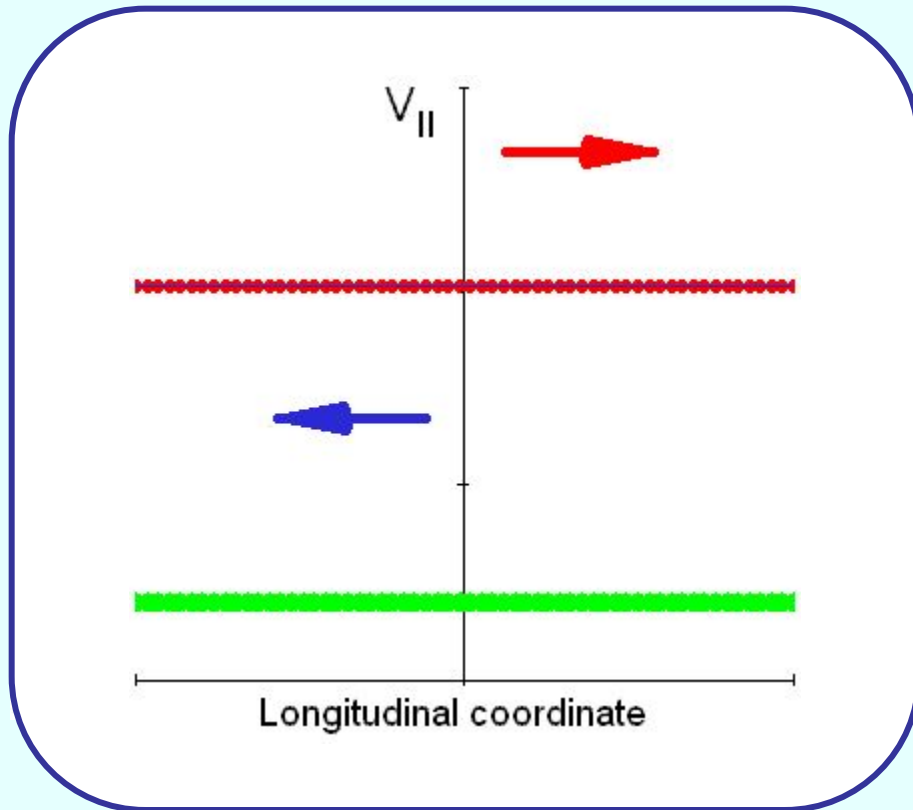
$$-\frac{eE\alpha_0}{2} \left\{ \sin[(k + k_u)z - \omega t] - \sin[(k - k_u)z - \omega t] \right\}$$

$$v_{\text{synchron}} = \frac{dz}{dt} = \frac{\omega}{k + k_u}$$

Принцип работы ЛСЭ



Принцип работы ЛСЭ



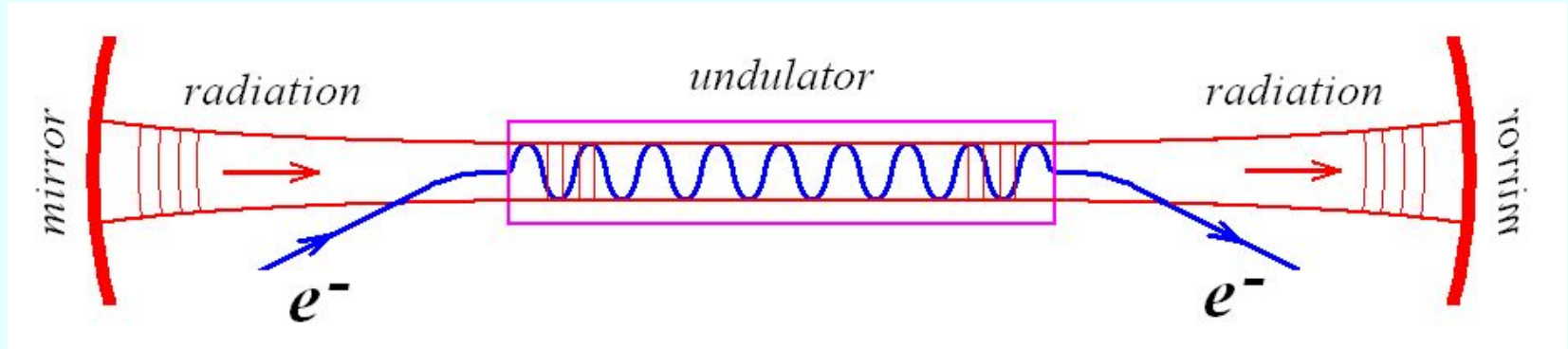
$$\lambda_0 \approx \frac{\lambda_w}{2\gamma^2} \left(1 + \frac{K^2}{2} \right)$$

synchronism condition
which is necessary for the
energy transfer

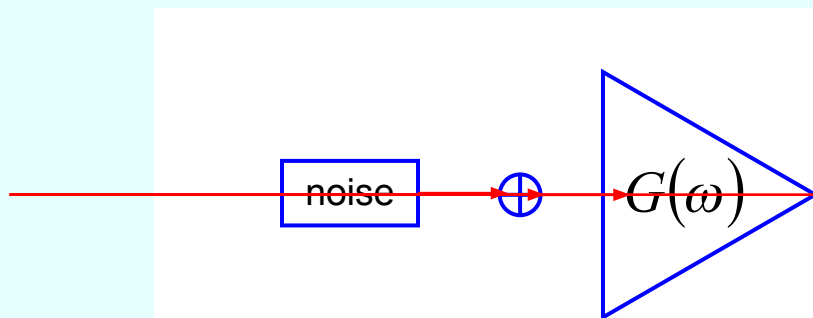
$$\left\langle \frac{d\gamma}{dz} \right\rangle = \frac{e}{mc^3} \langle \mathcal{E}_x V_x \rangle$$

Принцип работы ЛСЭ

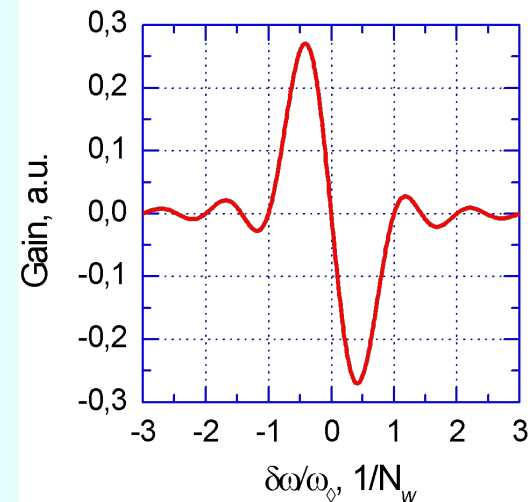
ЛСЭ - осциллятор



Эквивалентная схема



Narrow bandwidth amplifier with feedback



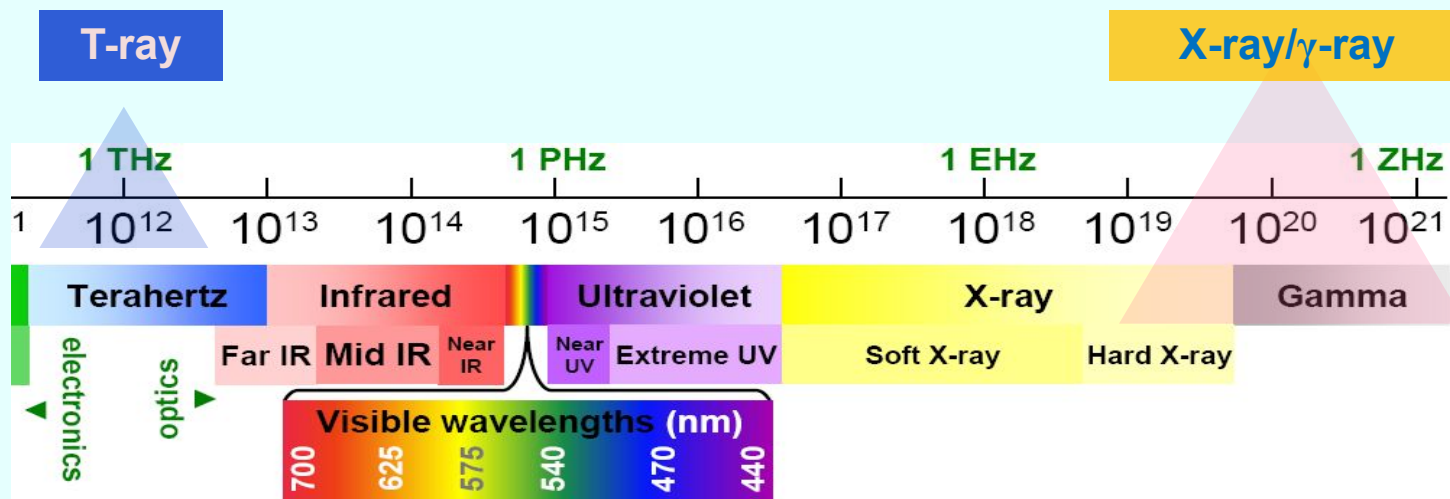
ЛСЭ перекрывают семь порядков по длинам волн излучения – от 1 мм до 0,1 нм.

ЛСЭ субмиллиметрового диапазона работают в России (ИЯФ СО РАН), Голландии (FELIX), США (UCSB), Ю. Корее (KAERI), Франции (CLEO), Японии и др. местах.

Рентгеновские ЛСЭ есть в США, Германии, Швейцарии, Италии, Китае, Ю. Корее и Японии.

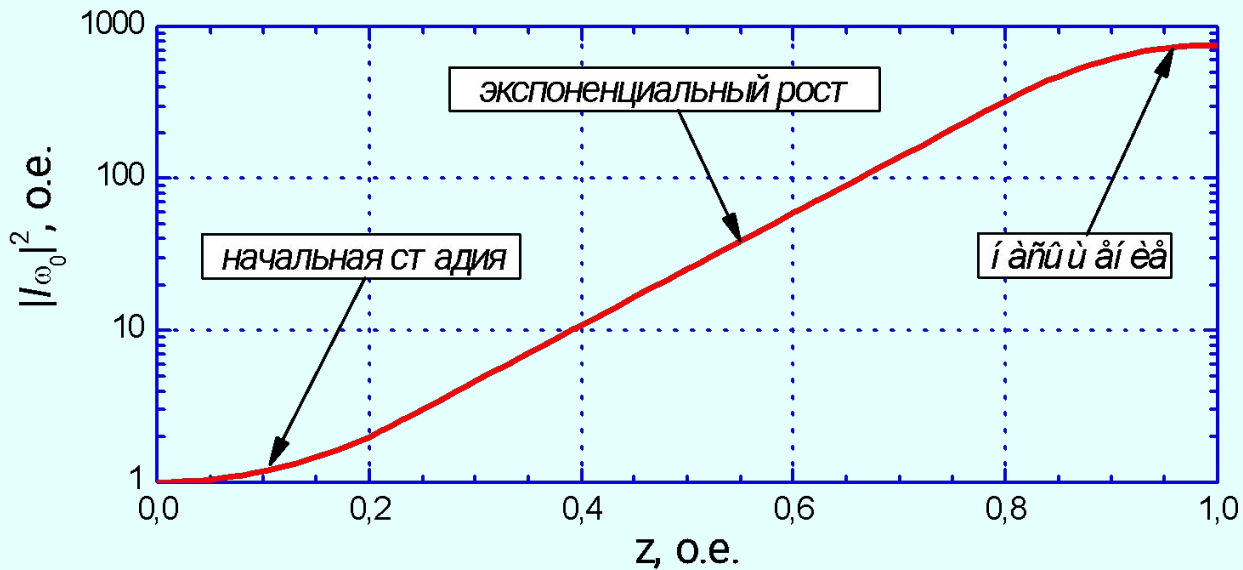
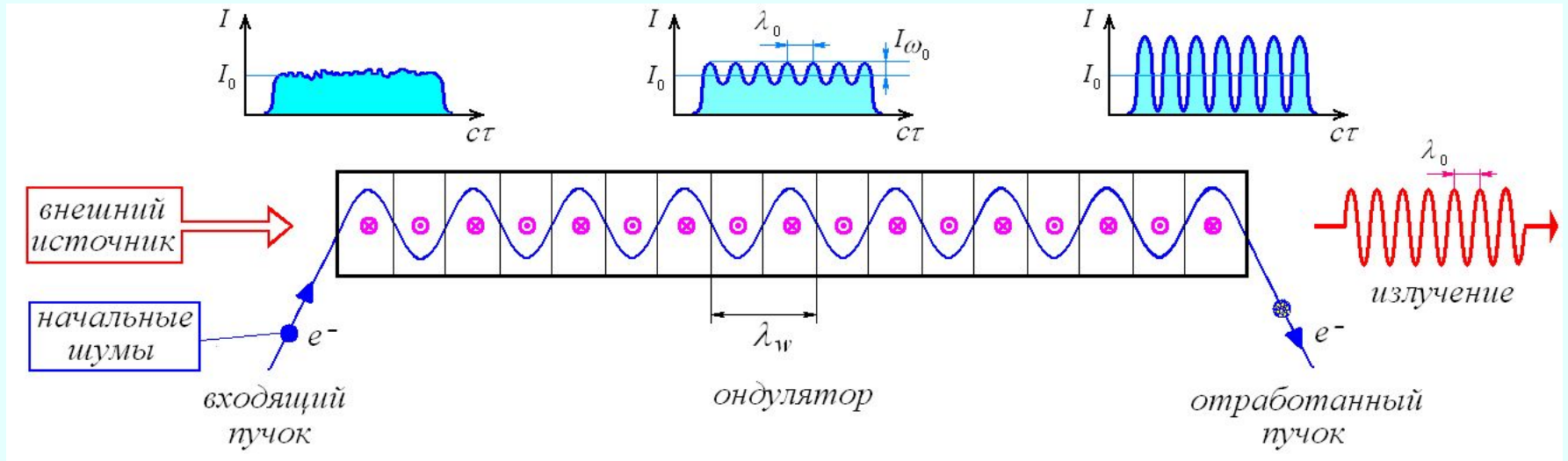
ЛСЭ университета Дюка (США) используется для генерации произвольно поляризованных фотонов с энергией до 100 МэВ (длина волны - 10^{-14} м).

Наиболее привлекательные диапазоны для ЛСЭ – рентгеновский и субмиллиметровый, где нет других мощных лазеров с плавно изменяемой длиной волны.



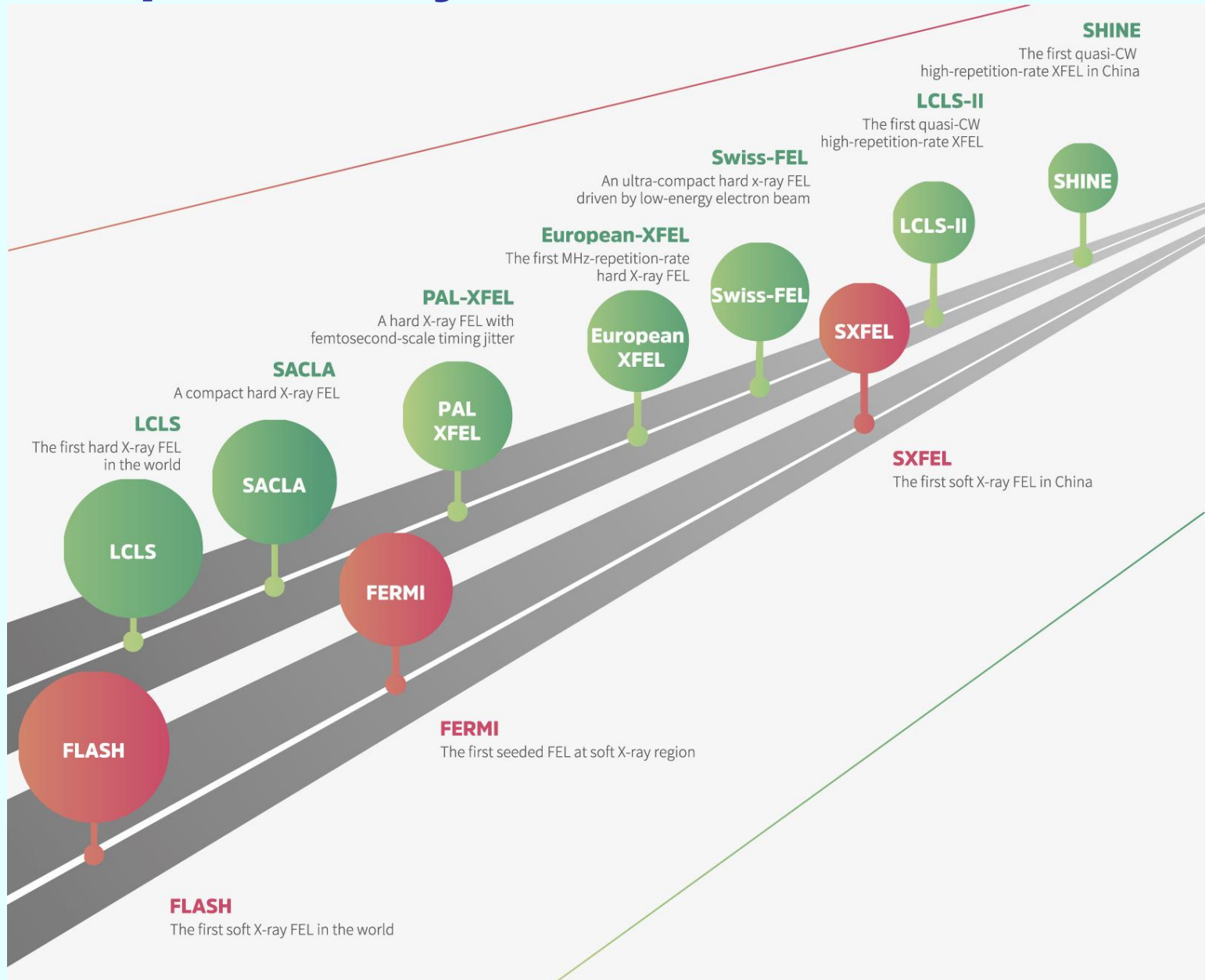
Рентгеновские ЛСЭ

Схема однопроходного ЛСЭ с большим усилением



Зависимость степени группировки пучка от его продольной координаты в длинном ондуляторе

Время запуска рентгеновских ЛСЭ



Параметры рентгеновских ЛСЭ

Facility	Beam energy (GeV)	Photon energy (eV)	Repetition rate (Hz)	Pulse duration (FWHM) (fs)
FLASH	0.35–1.25	14–620	4×10^3 to 10^6	10–200
LCLS	2.5–16.9	280–12,800	120	5–400
SACLA	5.1–8.5	4,000–20,000	60	2–10
FERMI	1–1.5	20–310	50	30–100
PAL-XFEL	3.5–10	275–20,000	60	5–100
SwissFEL	2.1–5.8	250–1,240	100	1–20
European XFEL	8.5–17.5	240–25,000	2.7×10^4	3–150
SXFEL	1.0–1.6	124–1,000	50	30–1,000
LCLS-II (HE)	4–15	200–25,000	$120/10^6$	1–500
SHINE	8	400–25,000	10^6	3–600

Ограничение энергии электронов для ЛСЭ с длиной волны излучения λ

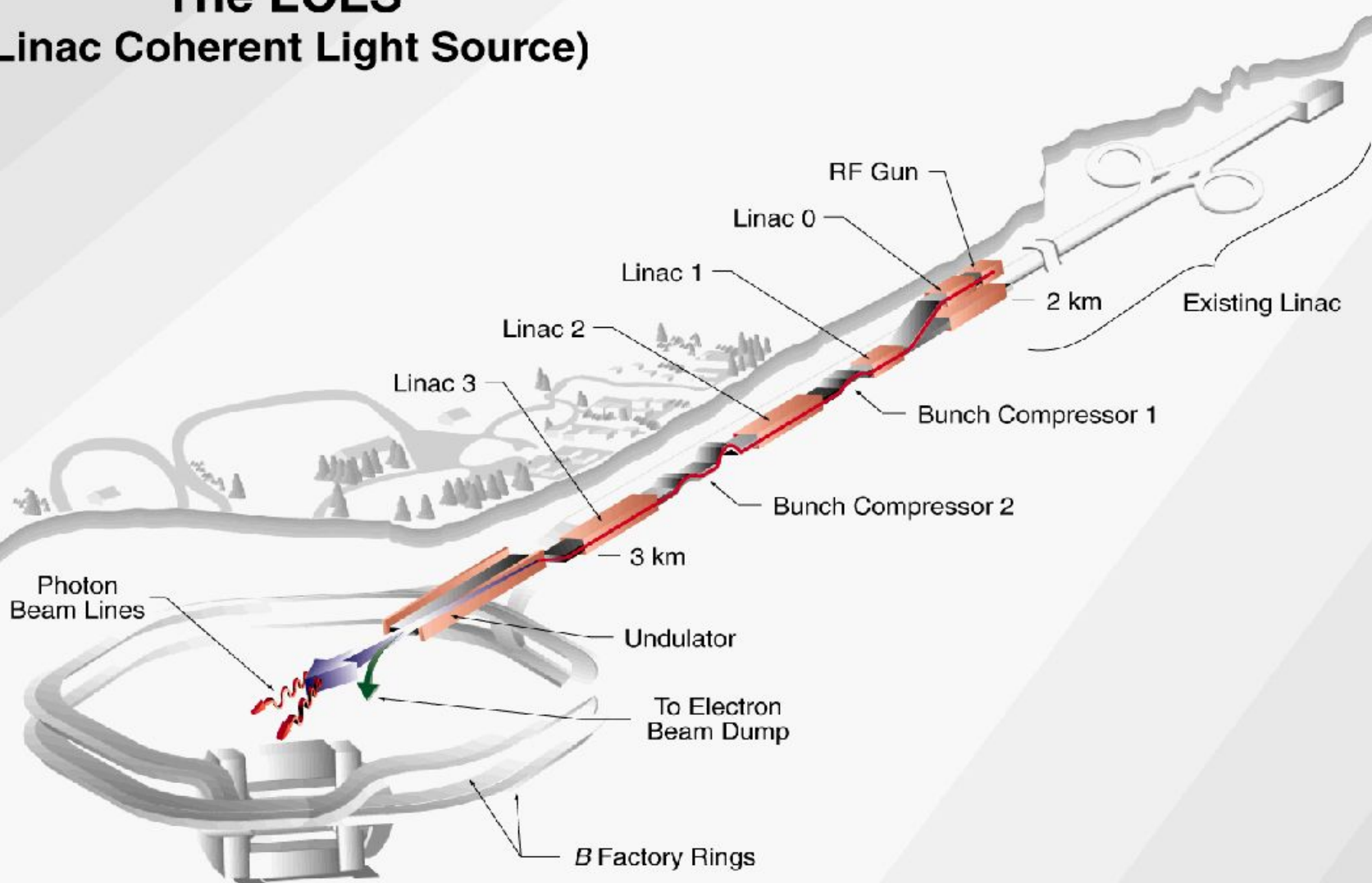
$$\varepsilon_{x,y} < \frac{\lambda}{2\pi} \quad \square \quad \gamma > \frac{2\pi\gamma\varepsilon_{x,y}}{\lambda}$$

Например,

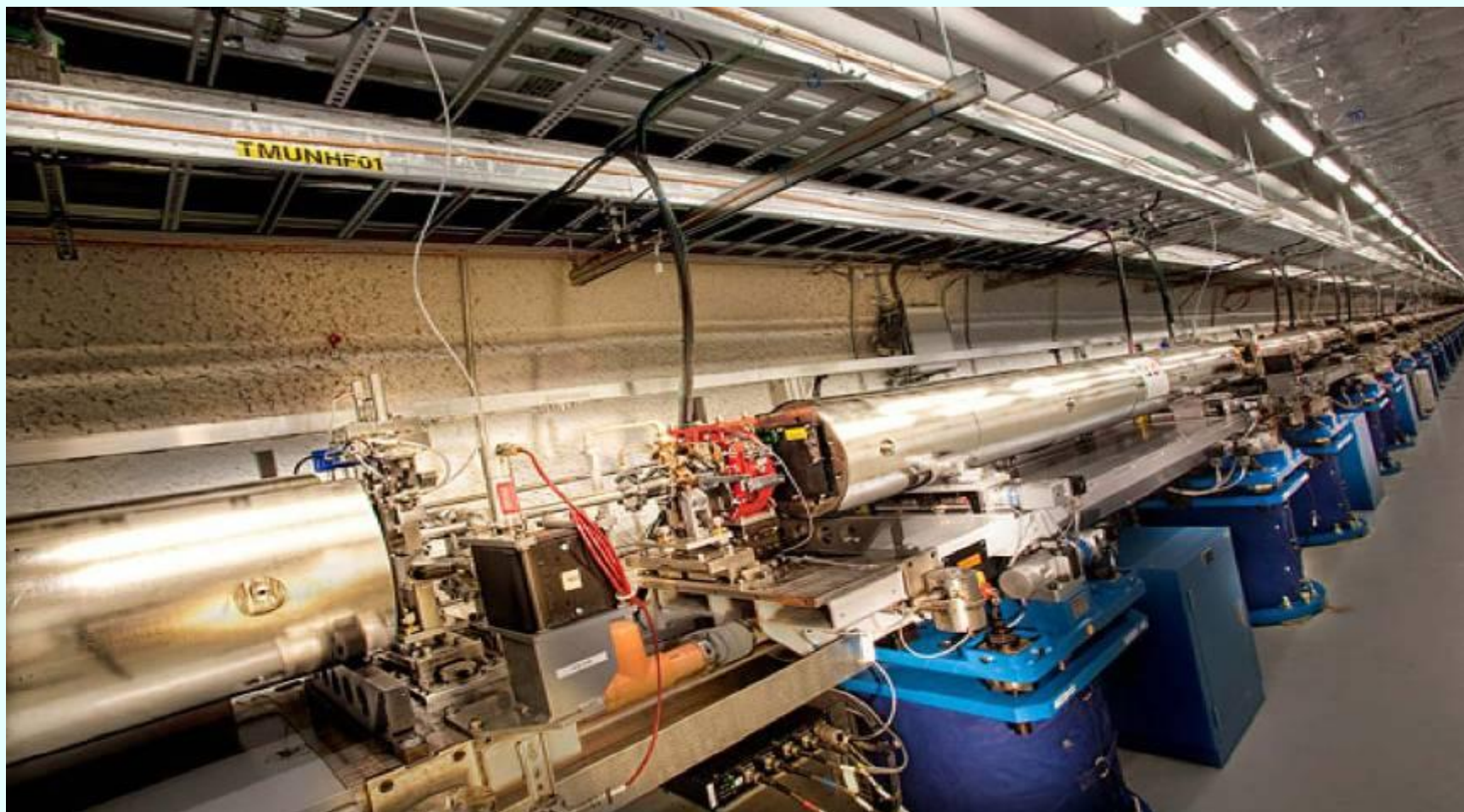
при $\lambda = 0,1$ нм и нормализованных эмиттансах $\square \square_{x,y} = 0,2$ мкм получим $E > 6$ ГэВ.

Рентгеновский ЛСЭ (SLAC, США, 2009)

The LCLS (Linac Coherent Light Source)



Ондулятор рентгеновского ЛСЭ LCLS (длина – около 100 м)





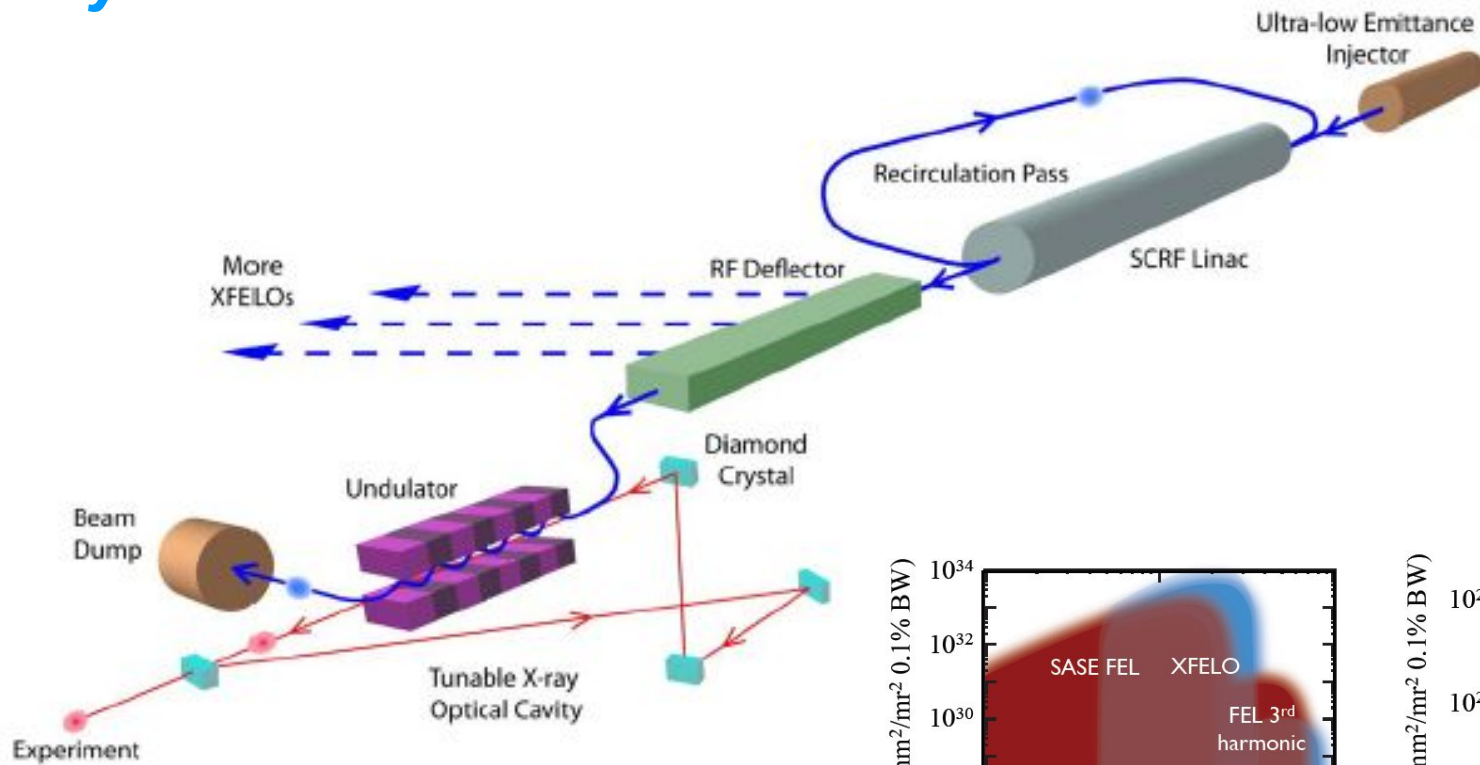
LCLS. Два новых ондулятора.

Таким образом, для создания рентгеновского ЛСЭ можно использовать любой линейный ускоритель с энергией несколько ГэВ, добавив туда высокочастотный фотоинжектор, магнитные группирователи и ондулятор.

В строящихся сейчас установках LCLS-II (США) и SHINE (Китай) используются сверхпроводящие линейные ускорители, работающие в непрерывном режиме.

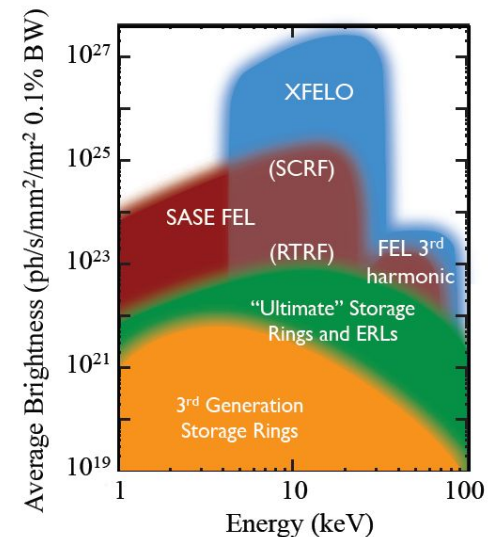
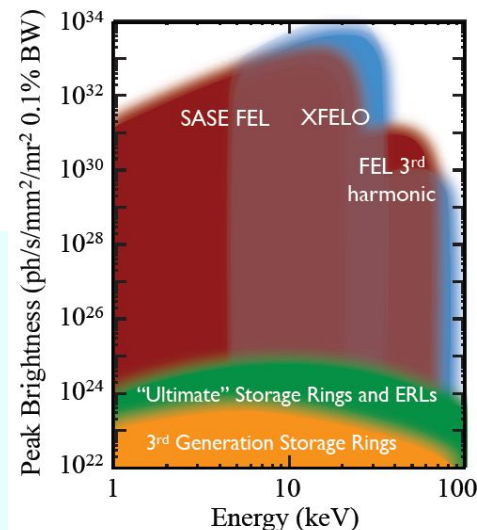
Это позволяет планировать на них создание очень узкополосных ЛСЭ с кристаллическими отражателями.

Рентгеновский ЛСЭ с кристаллическими отражателями - потенциальный источник монохроматического излучения



Optical Cavity:

- Proposed by Collela and Luccio, 1984.
- Revisited in 2008, K-J Kim, S. Reiche, Y. Shvyd'ko, PRL 100, 244802.



В США и Китае планируется создание такого ЛСЭ и разрабатываются необходимые элементы рентгеновской оптики.

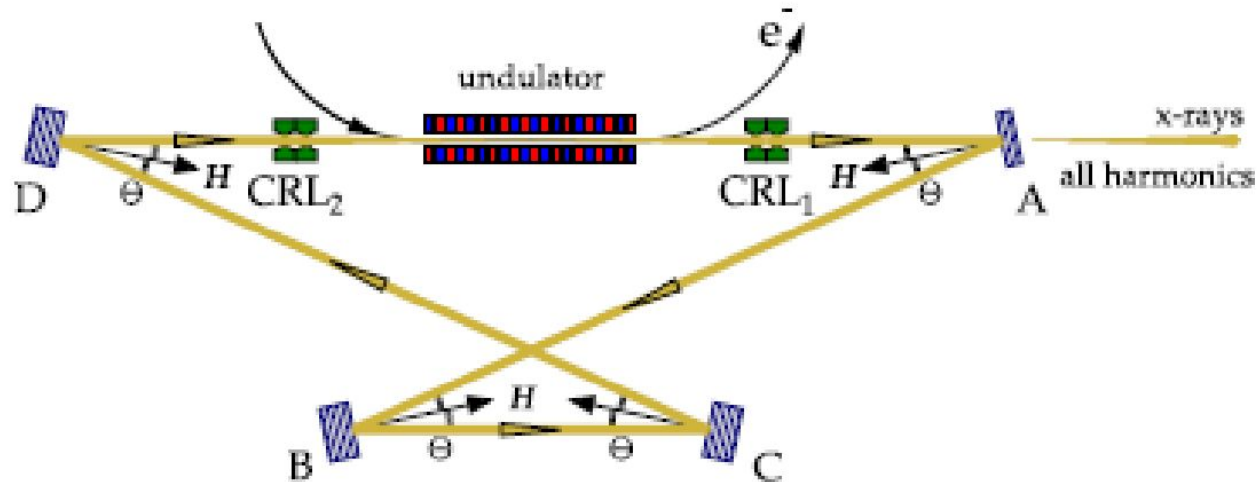


FIG. 1. Schematic of a cavity-based XFEL with a tunable optical cavity composed of four Bragg-reflecting flat-crystal mirrors (A,B,C, and D) and compound refractive lenses (CRLs) as focusing elements [6]. X-ray power is coupled out of the cavity through permeable thin crystal A with reduced reflectivity. The incidence and reflection angles $\Theta = \pi/2 - \theta$ are the same for all crystals, where θ is Bragg's angle.

Для создания ЛСЭ-генератора с брэгговскими резонаторами требуется импульсно-периодический электронный пучок с энергией несколько ГэВ. Источниками такого пучка могут быть ускорители со сверхпроводящими ускоряющими структурами.

Для создания таких ускорителей надо наладить производство сверхпроводящих ускоряющих структур. Последние нужны и для многих других применений.

Соответствующая технология разработана в США и использована в строящемся ЛСЭ LCLS-2.

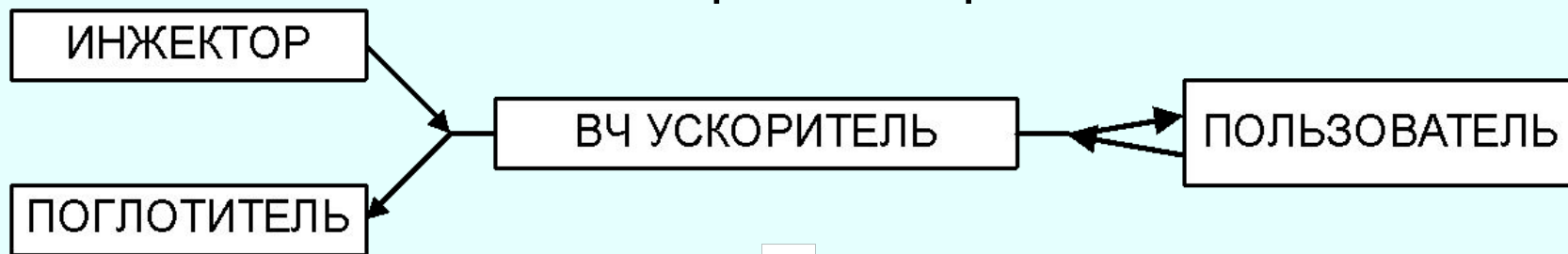
ЛСЭ
ИЯФ им. Г.И. Будкера СО РАН

Электронный к. п. д. ЛСЭ довольно низок (~1%), поэтому для мощных ЛСЭ необходимо применять рекуперацию энергии отработанного электронного пучка.

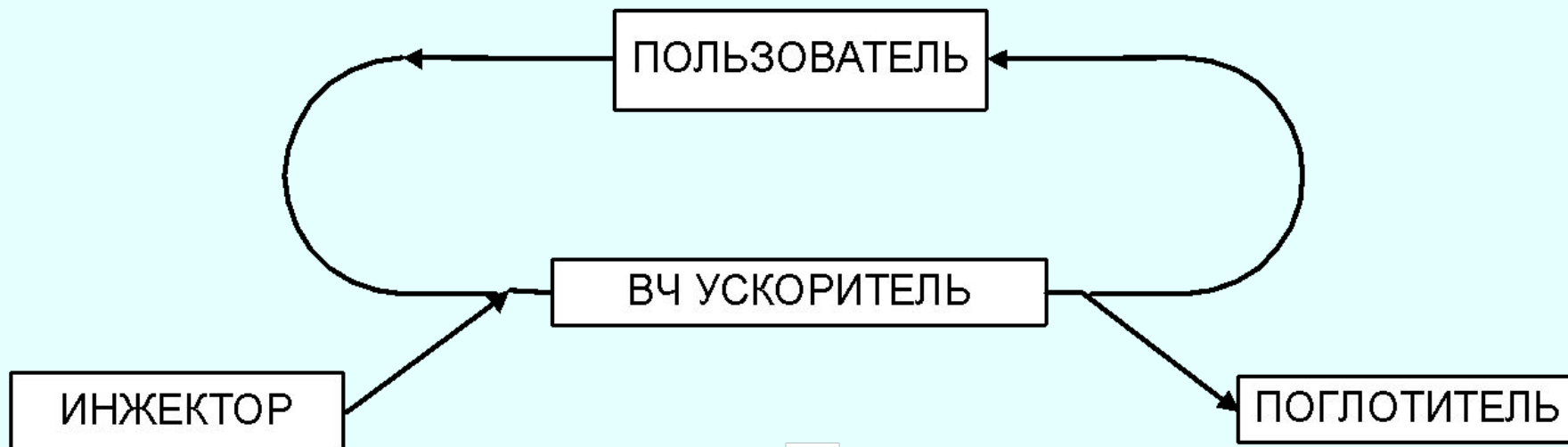
Рекуперация

- снижает радиационную опасность установки и**
- позволяет повысить средний ток электронного пучка.**

Схемы ВЧ рекуператоров с возвратом пучка в ускоряющие резонаторы



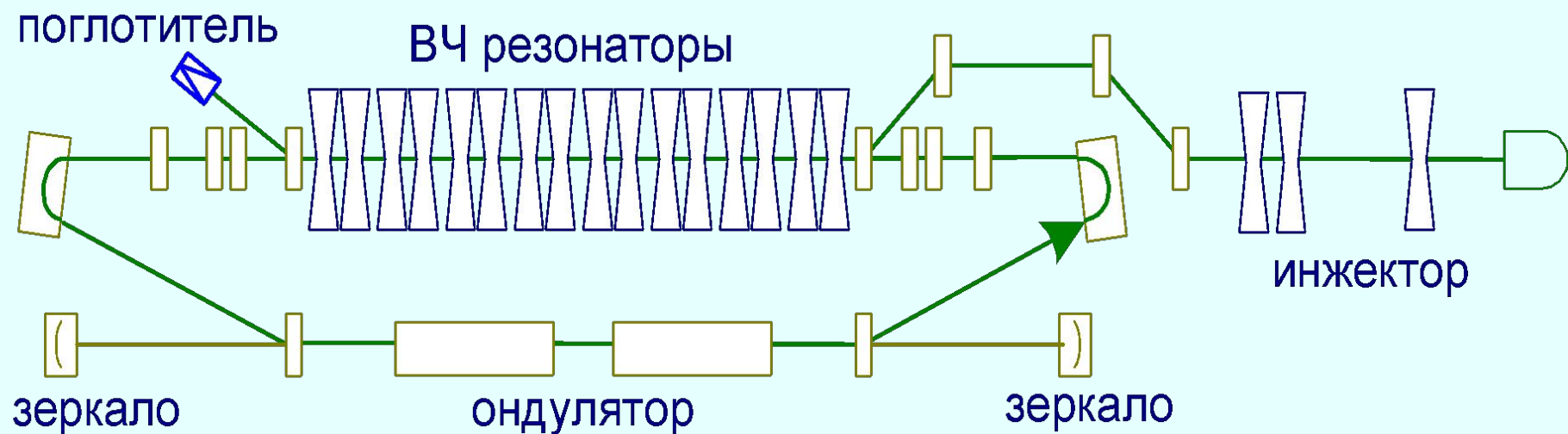
а



б

Проблемы: а – встречные пучки; б – фокусировка пучков с разной энергией внутри ускоряющей структуры.

Терагерцовый (субмиллиметровый) ЛСЭ. Работает с 2003 г.



Электроны из инжектора с энергией 2 МэВ ускоряются в ВЧ резонаторах до энергии 11 МэВ, отдают часть энергии в ЛСЭ, а затем – замедляются в тех же ВЧ резонаторах. При этом энергия возвращается в резонаторы. Электроны с низкой (2 МэВ) энергией отводятся в поглотитель.



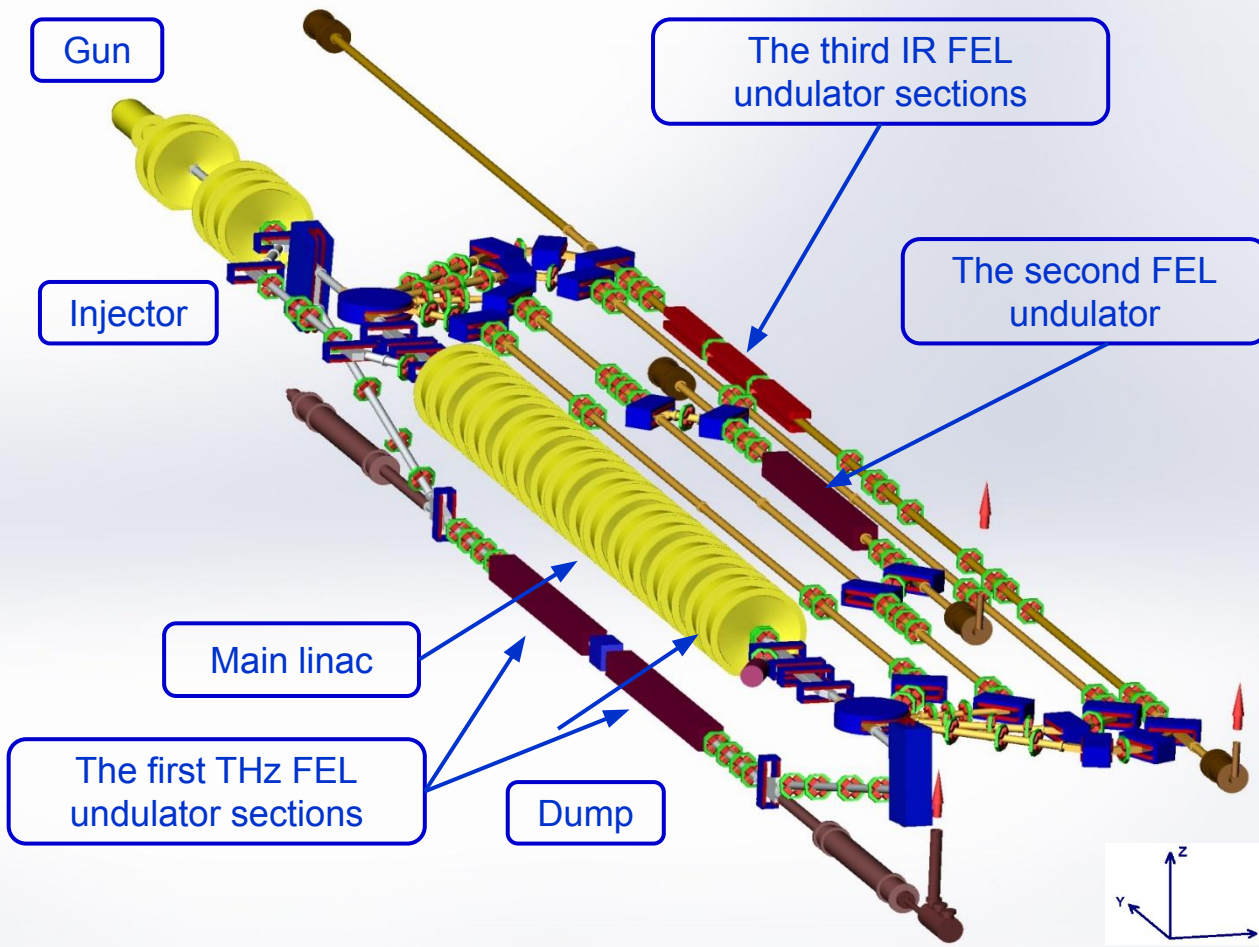
Novosibirsk FEL Facility Based on Non-suprconducting Multiturn ERL

The Novosibirsk FEL facility has three FELs, installed on the first, second and fourth orbits of the dedicated energy recovery linac (ERL). The first FEL covers the wavelength range of 90 – 340 μm at an average radiation power of up to 0.5 kW with a pulse repetition rate of 5.6 or 11.2 MHz and a peak power of up to 1 MW. The second FEL operates in the range of 15 - 120 μm at an average radiation power of up to 0.5 kW with a pulse repetition rate of 7.5 MHz and a peak power of about 1 MW. These two FELs are the world's most powerful (in terms of average power) sources of coherent narrow-band (less than 1%) radiation in their wavelength ranges. The third FEL covers the wavelength range of 8 – 11 μm . The Novosibirsk ERL is the first multiturn ERL in the world. Its peculiar features include the normal-conductive 180 MHz accelerating system, the DC electron gun with the grid thermionic cathode, three operation modes of the magnetic system, and a rather compact (6 \times 40 m²) design. The facility has been operating for users of terahertz radiation since 2004.

FEL #	1	2	3
Energy, MeV	12	22	42
Current, mA	30	10	3
Wavelength, μm	90-340	15-120	8-11
Radiation power, kW	0.5	0.5	0.1
Electron efficiency, %	0.6	0.3	0.2

Radiation parameters of the Novosibirsk FEL facility (3 FELs)

Laser	Terahertz	Far-Infrared	Infrared
Status	In operation since 2003	In operation since 2009	In operation since 2015
Wavelength, μm	90 – 340	37 – 80	8 – 11
Relative line width (FWHM), %	0.2 – 2.0	0.2 - 1	0.1 - 1
Maximum average power, kW	0.5	0.5	0.1
Maximum peak power, MW	0.5	2.0	10
Pulse duration, ps	30 - 120	20 - 40	10 - 20
Pulse repetition rate, MHz	2.8 - 5.6 - 11.2 - 22.4		
Linear polarization degree, %	> 99.6		
<ul style="list-style-type: none"> Tunability High power Relatively narrow line width 	<p>178 ns & $f = 5.6$ MHz</p> <p>100 ps</p>		

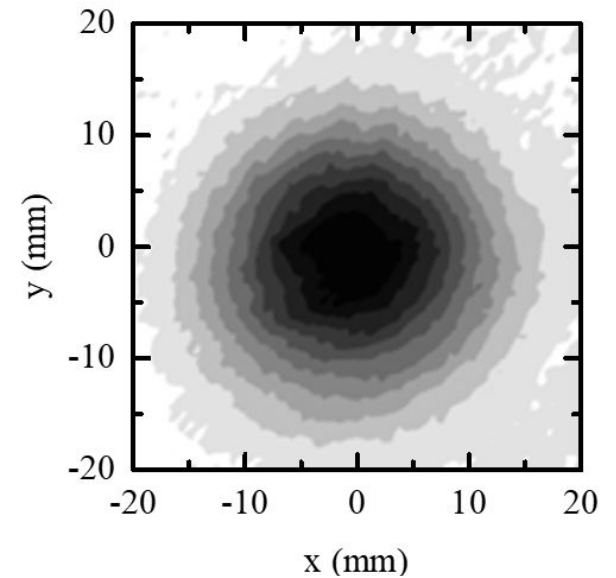


All three laser systems of the NovoFEL facility are now in operation covering the wavelength range from 8 to 340 micron. 11 workstations are in operation and more two are under construction.

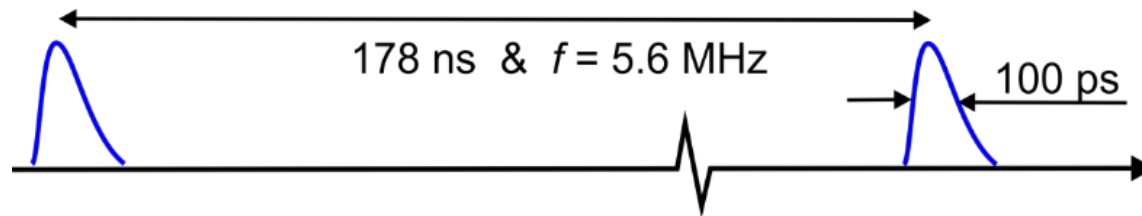
The workstations are well equipped with instrumentation which is available to users.

We invite researchers to apply for beam time to perform experiments at the NovoFEL.

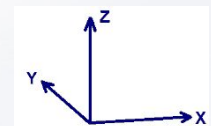
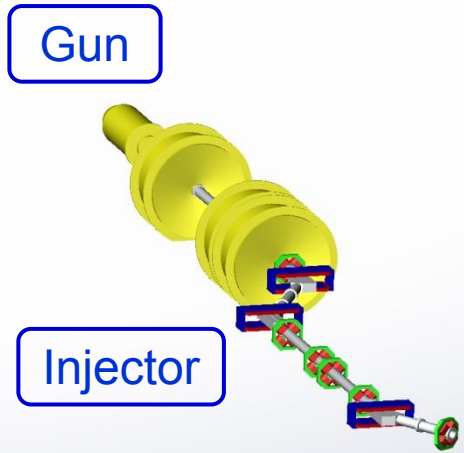
Beam characteristics



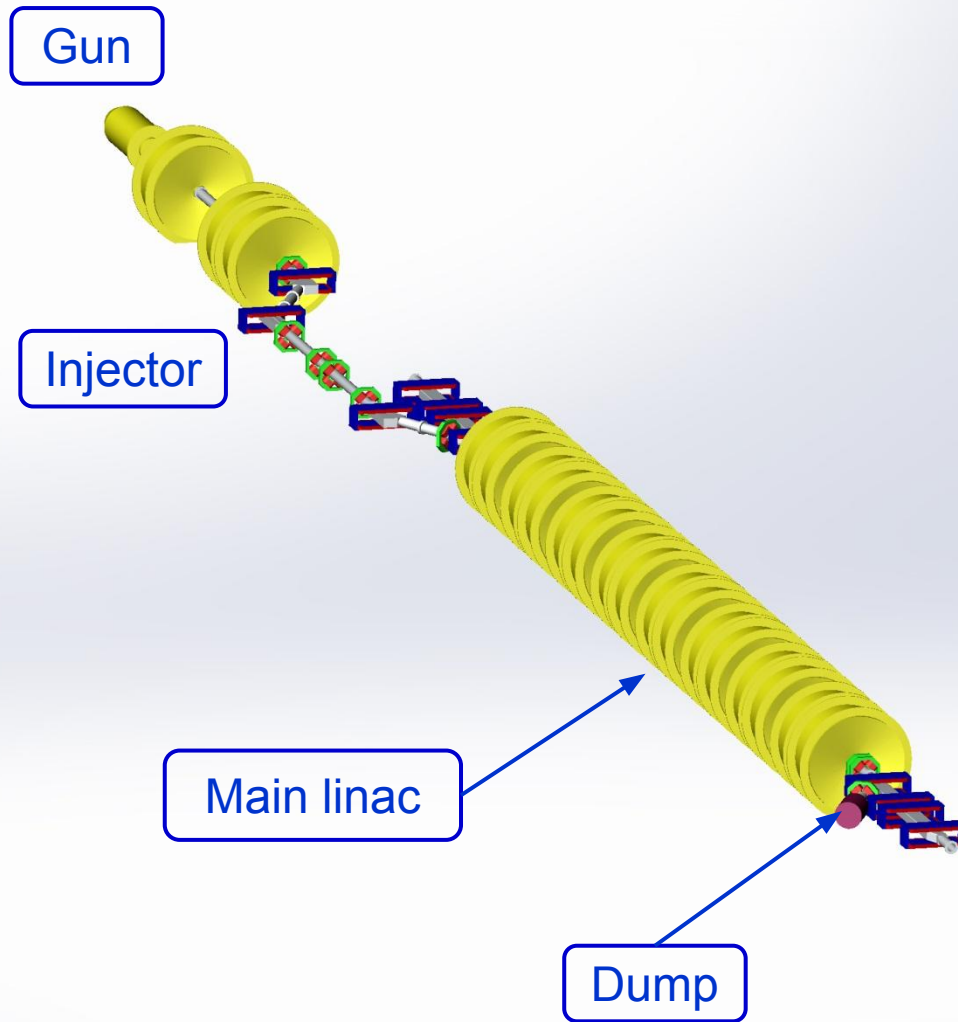
1 FEL



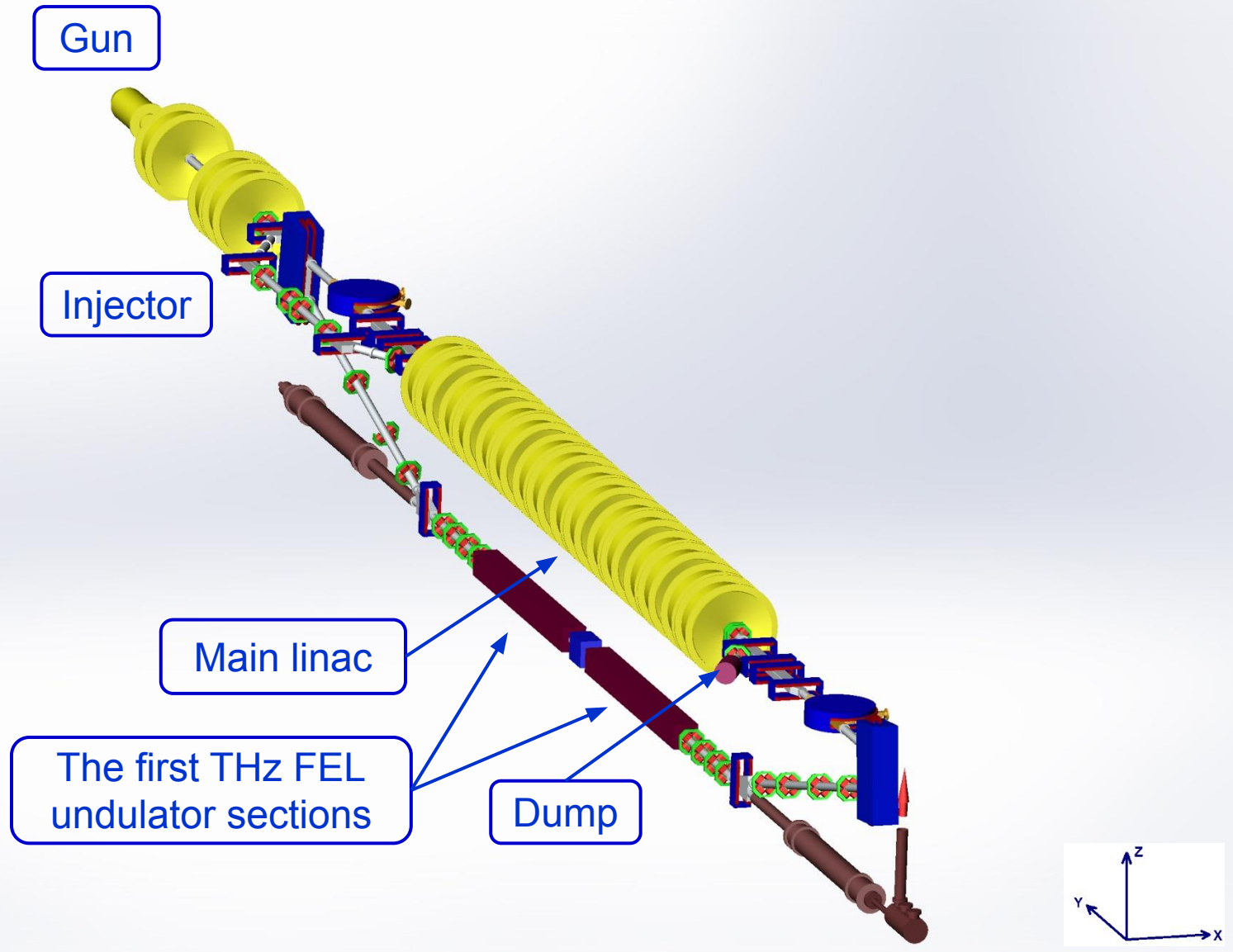
NovoFEL Accelerator Design



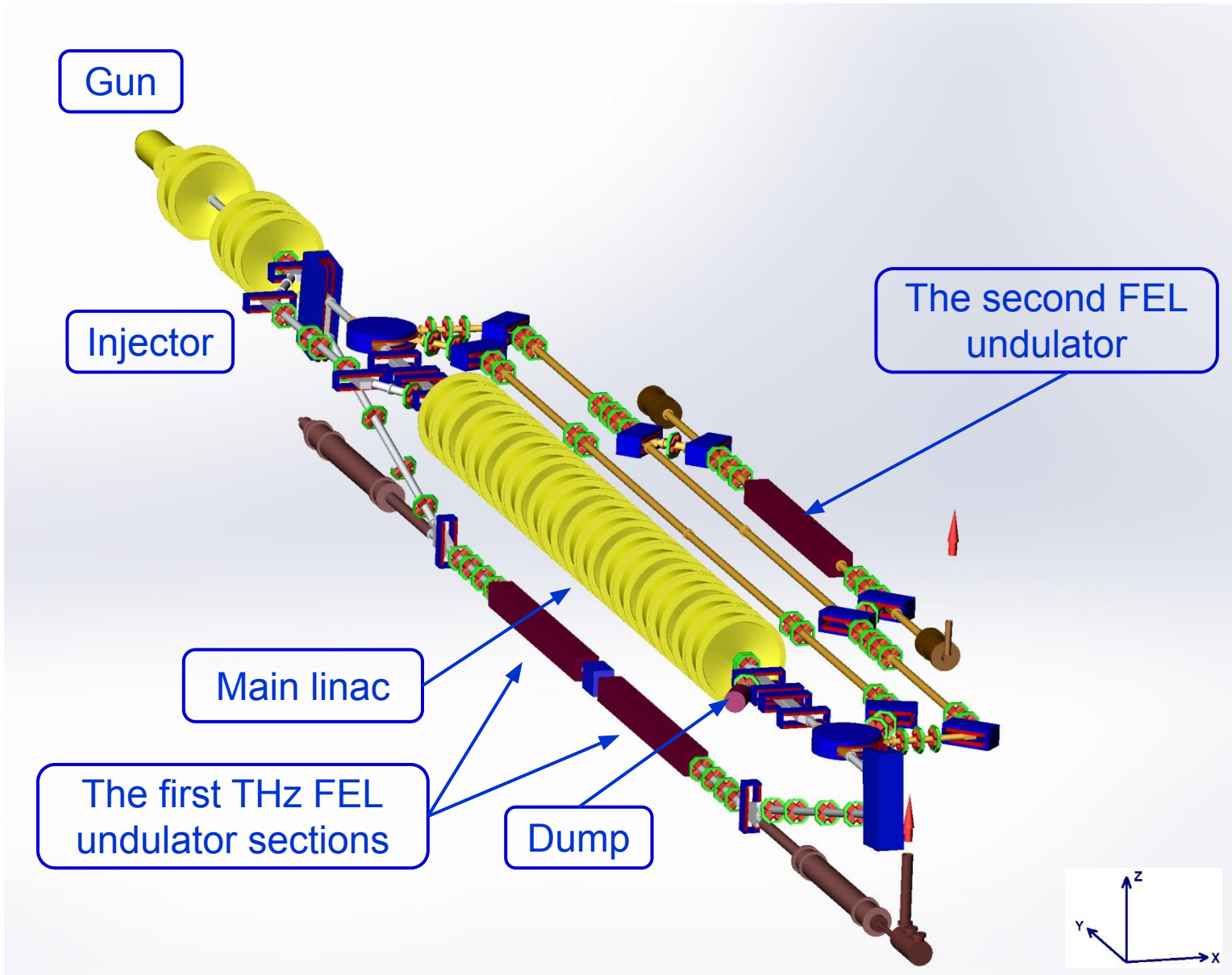
NovoFEL Accelerator Design



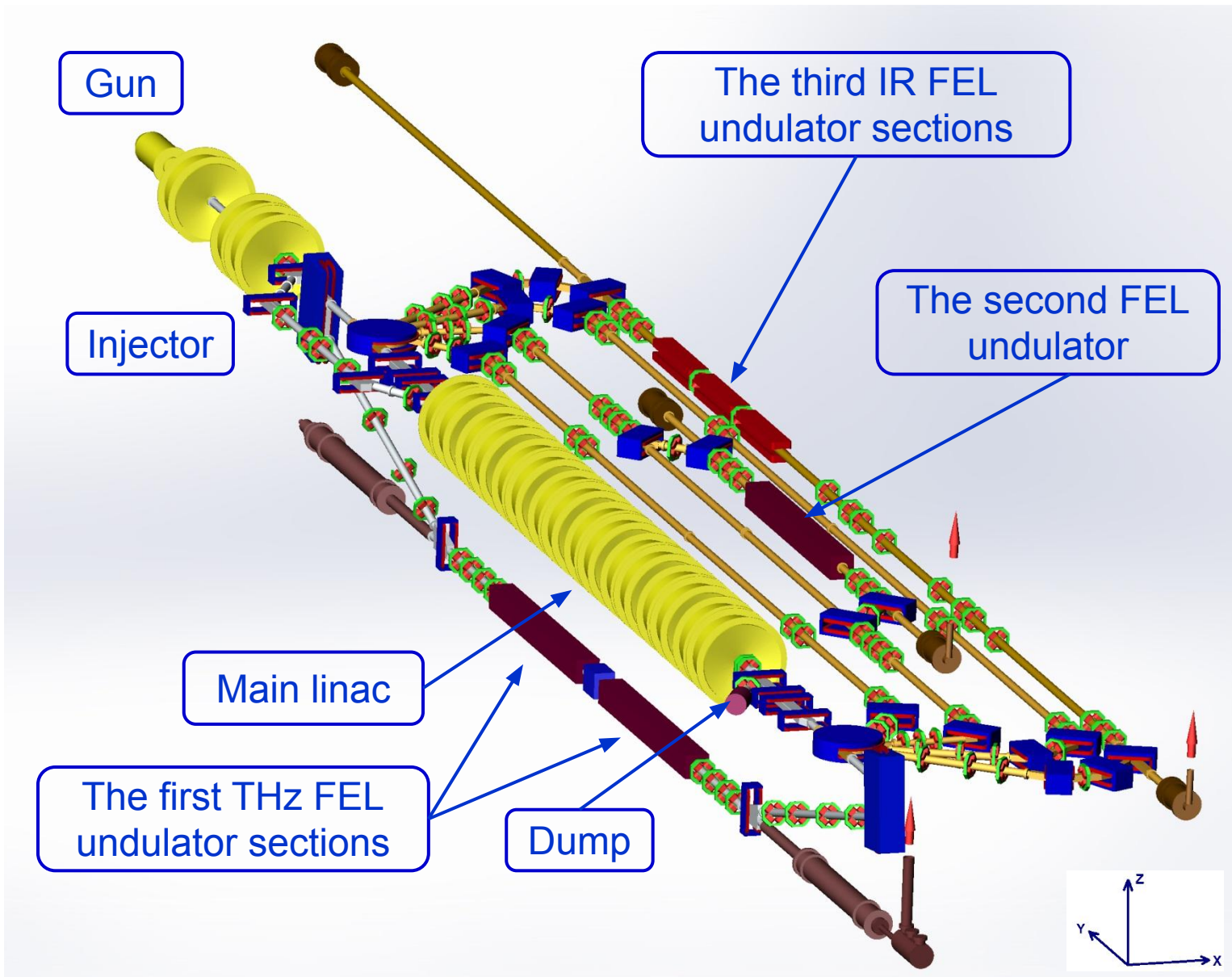
NovoFEL Accelerator Design

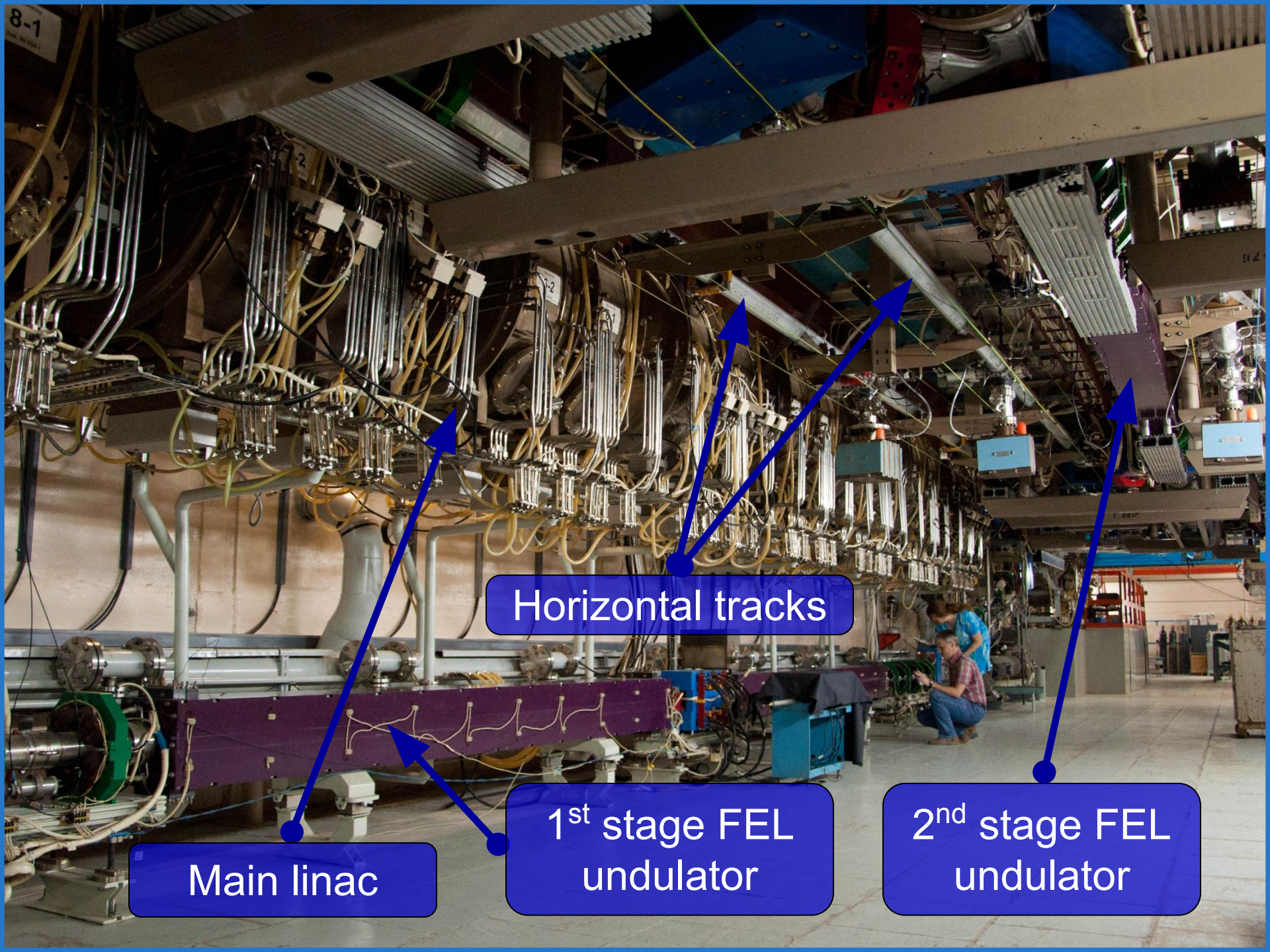


NovoFEL Accelerator Design



NovoFEL Accelerator Design





8-1

2

2

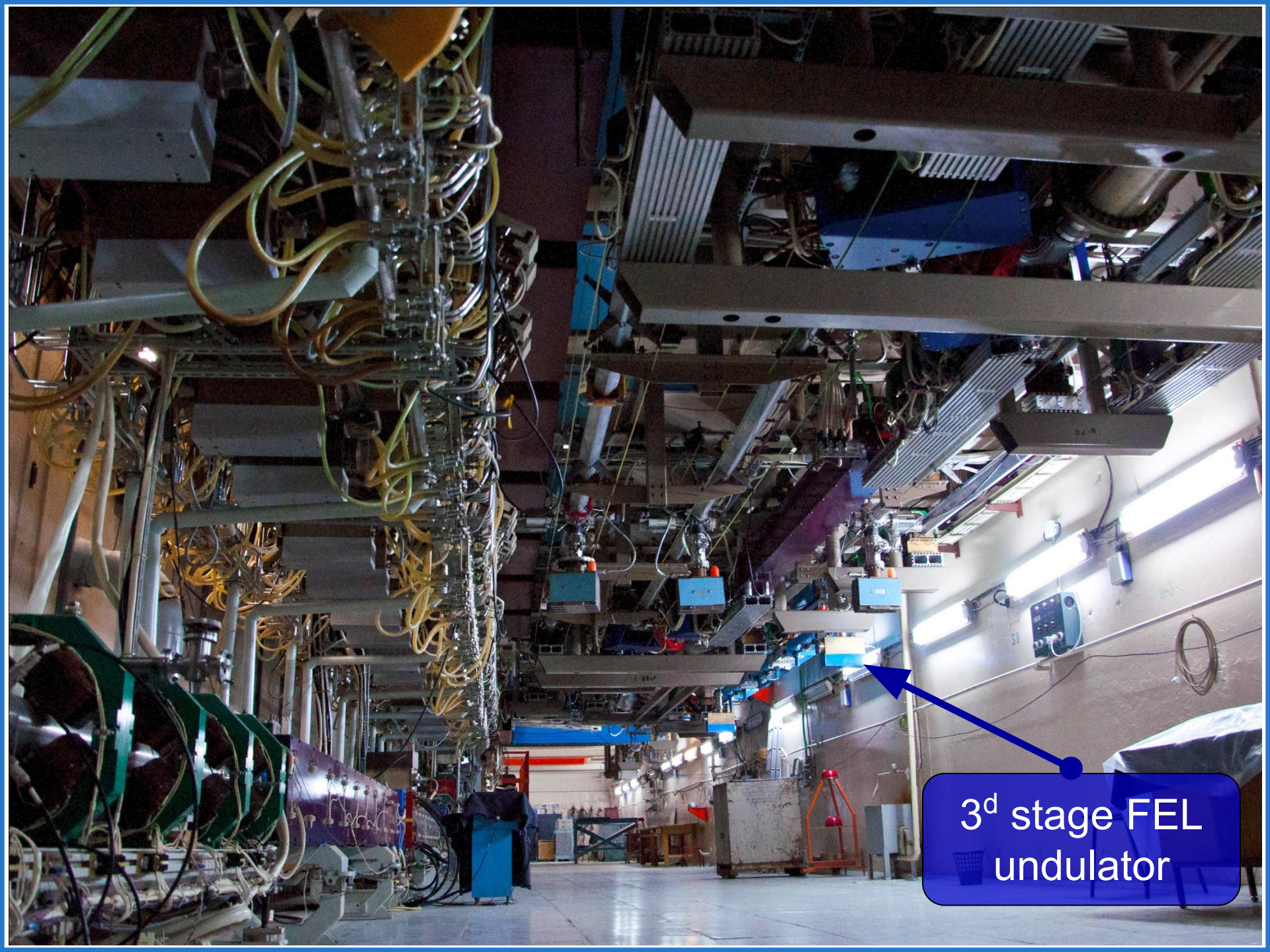
912

Horizontal tracks

Main linac

1st stage FEL undulator

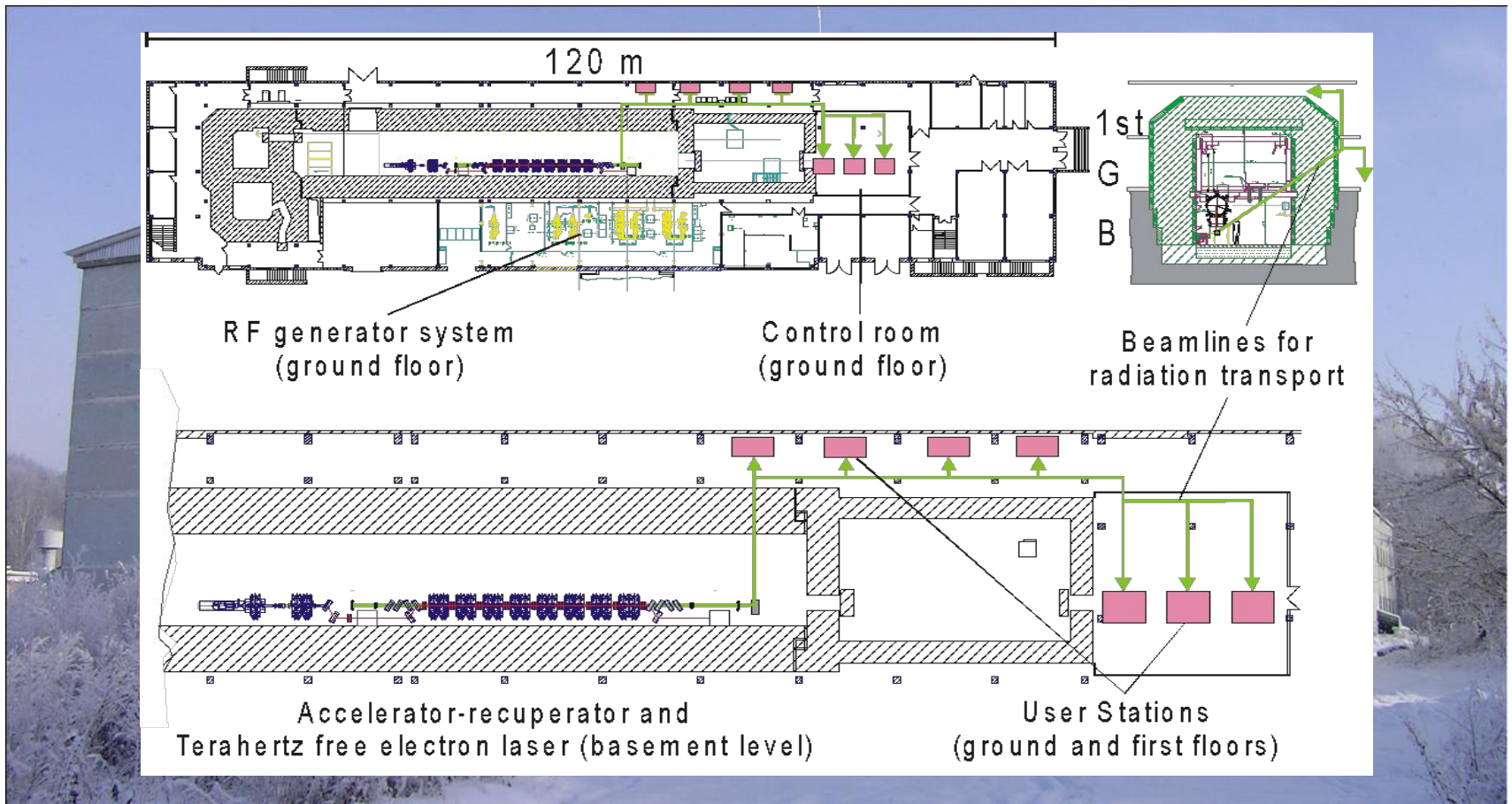
2nd stage FEL undulator



3^d stage FEL
undulator



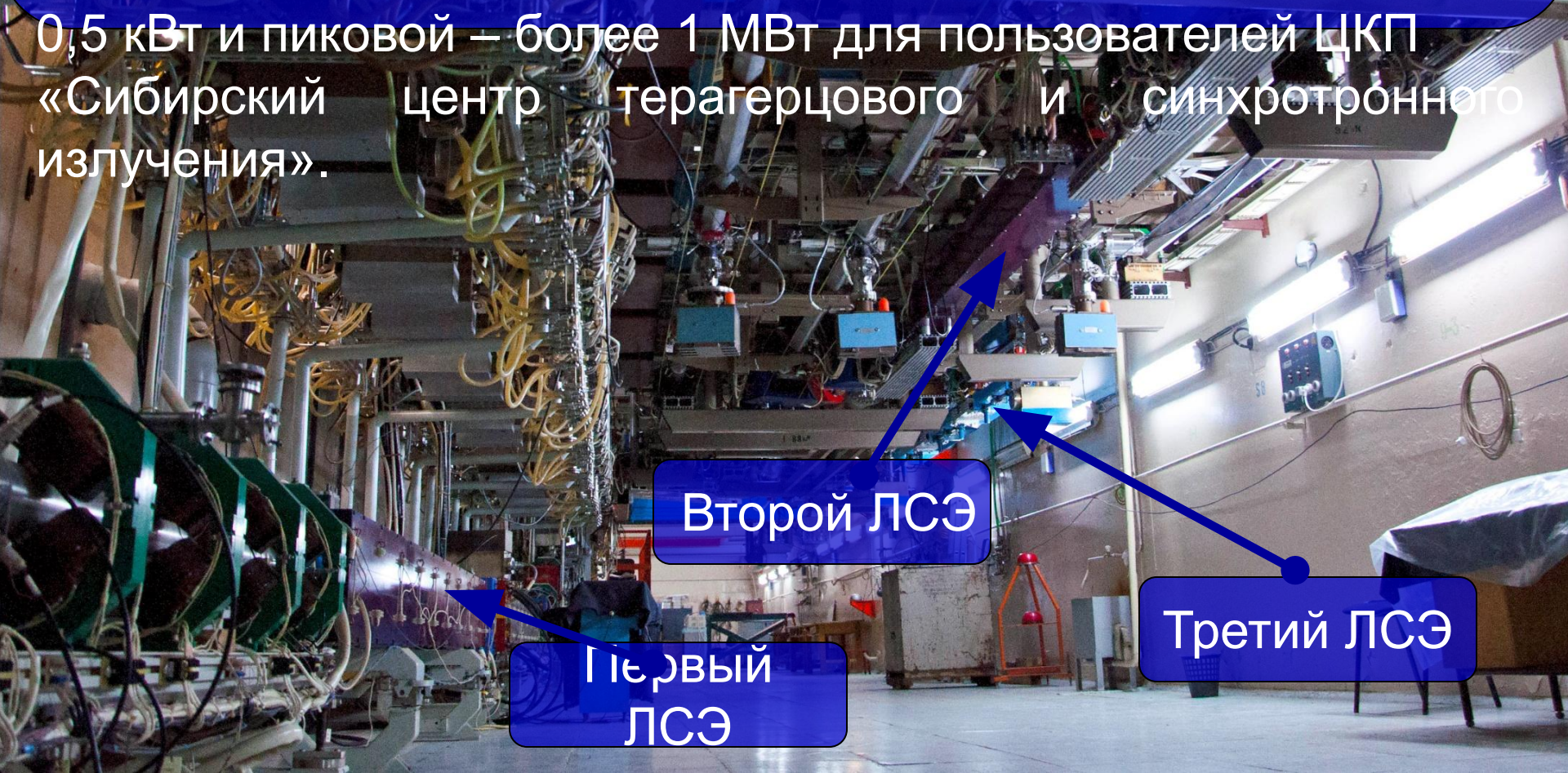
Siberian Center of Photochemical Research



Субмиллиметровый ЛСЭ (2003)



ускорителе-рекуператоре ИУФ им. Г. И. Будкера СО ГАГП
запущен
третий лазер на свободных электронах (ЛСЭ).
Все три ЛСЭ УНУ «Новосибирский ЛСЭ» обеспечивают
излучение в
диапазоне длин волн 8 -240 микрон со средней мощностью
до
0,5 кВт и пиковой – более 1 МВт для пользователей ЦКП
«Сибирский центр терагерцового и синхротронного
излучения».

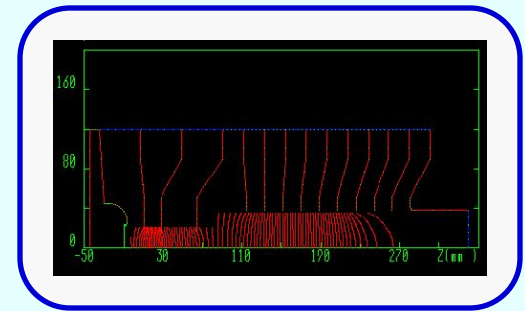
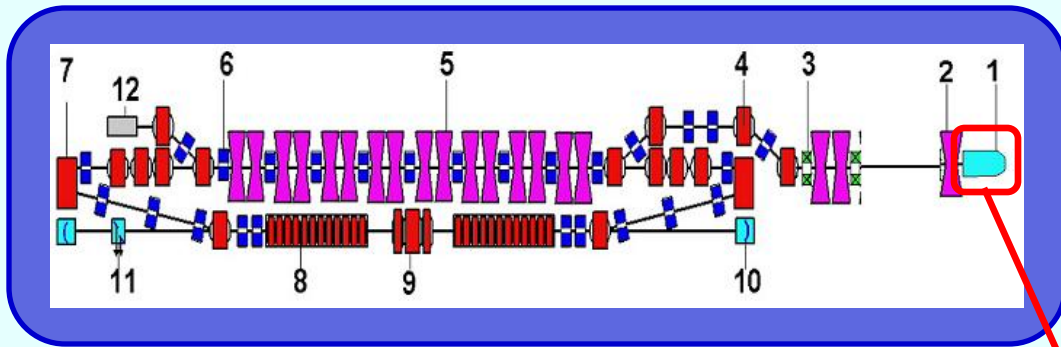


Второй ЛСЭ

Первый
ЛСЭ

Третий ЛСЭ

Electrostatic gun



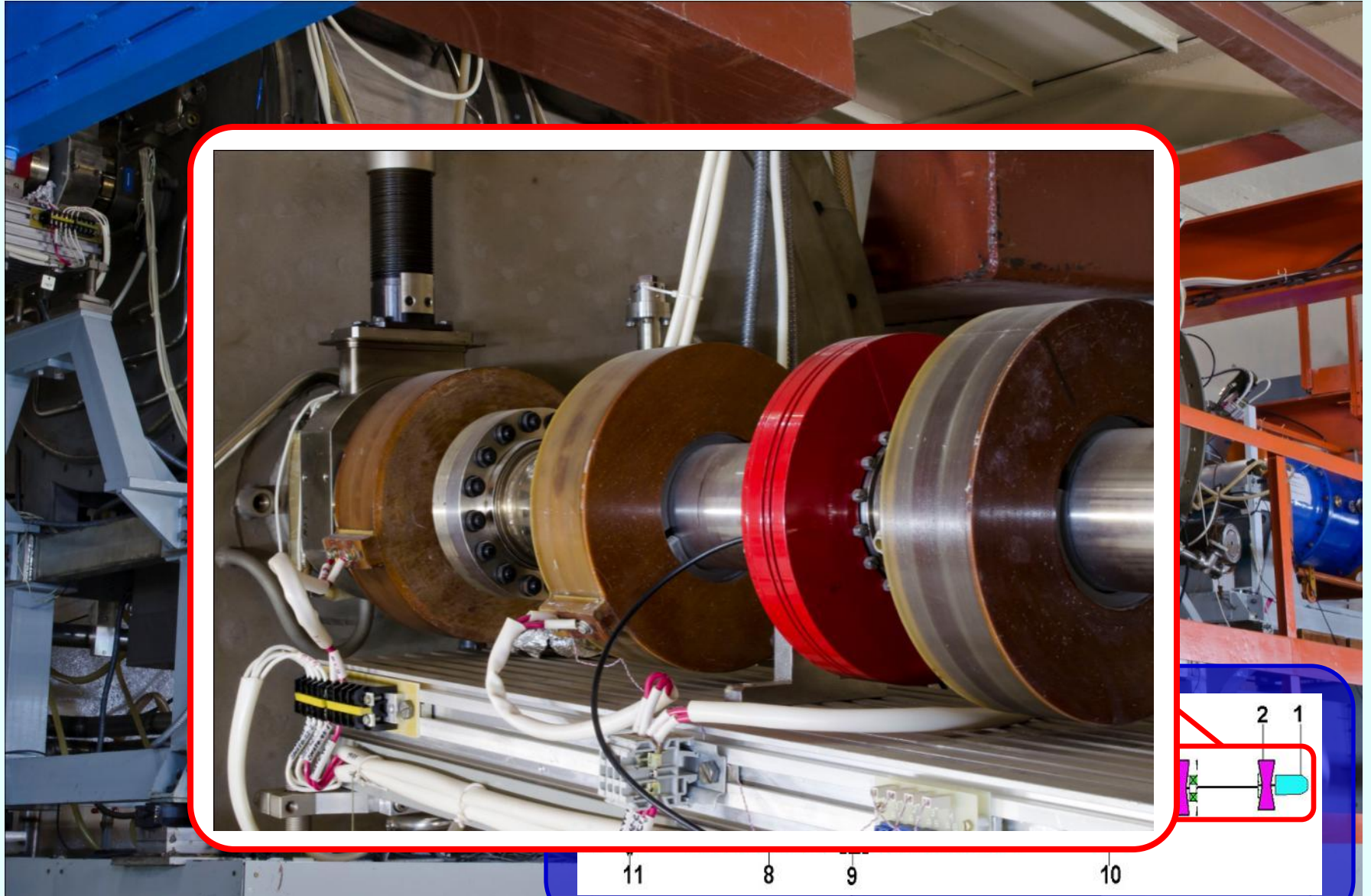
Power supply:

$$U_{\max} = 300 \text{ kV}$$

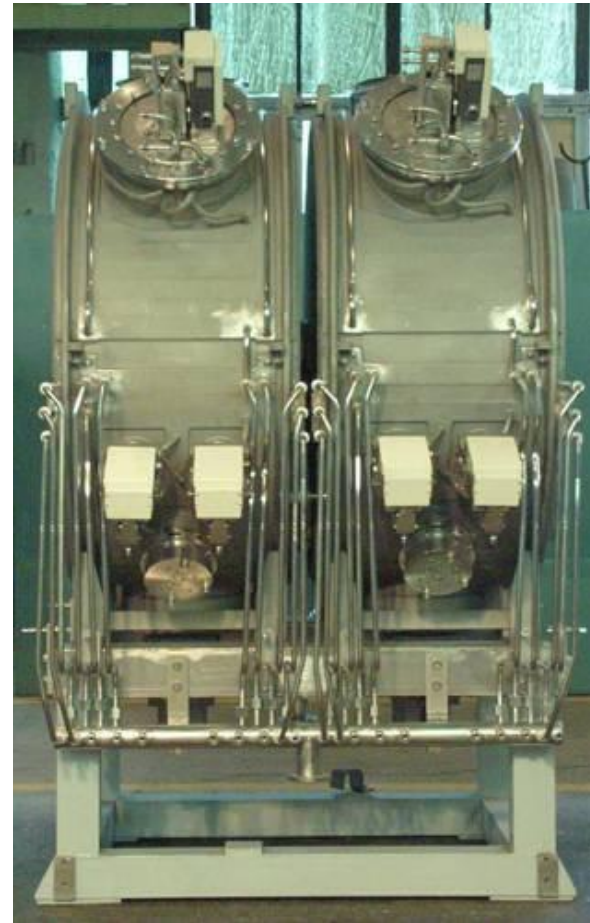
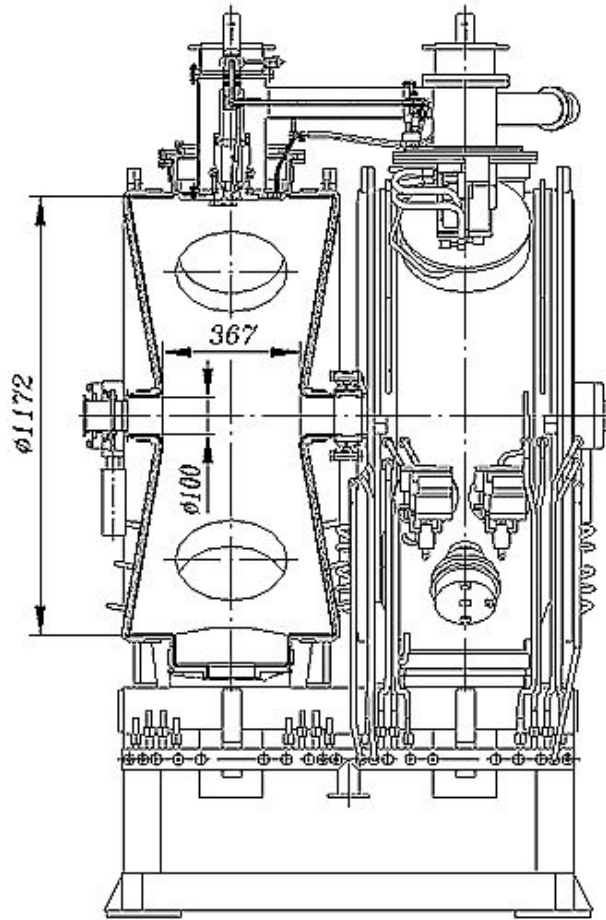
$$I_{\max} = 50 \text{ mA}$$



Injector



Main linac



11

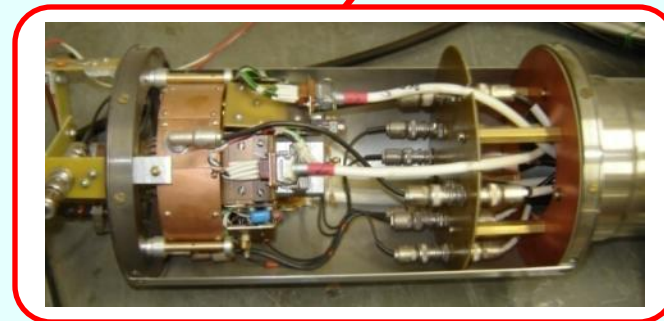
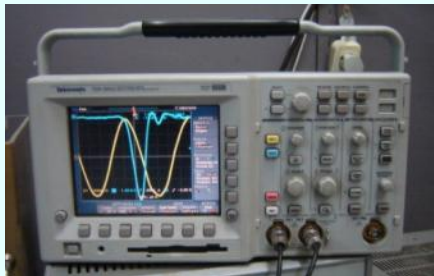
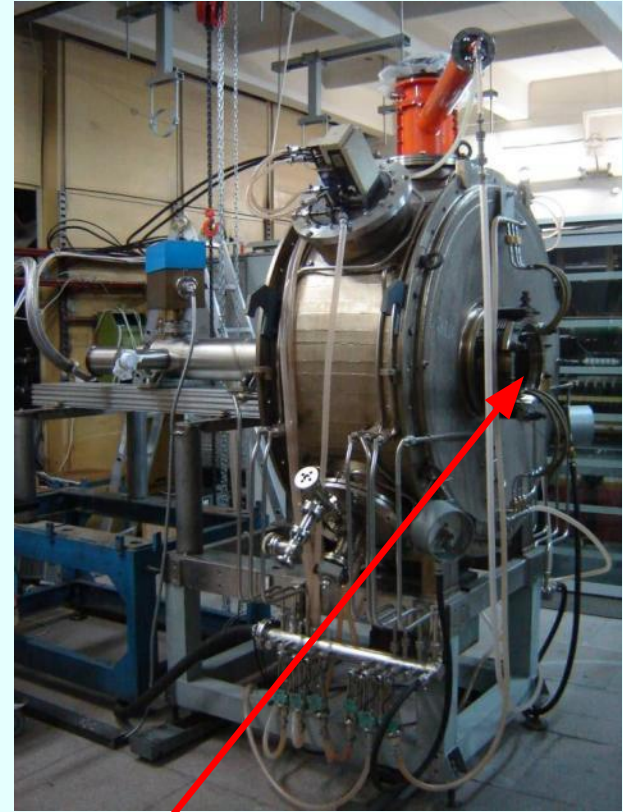
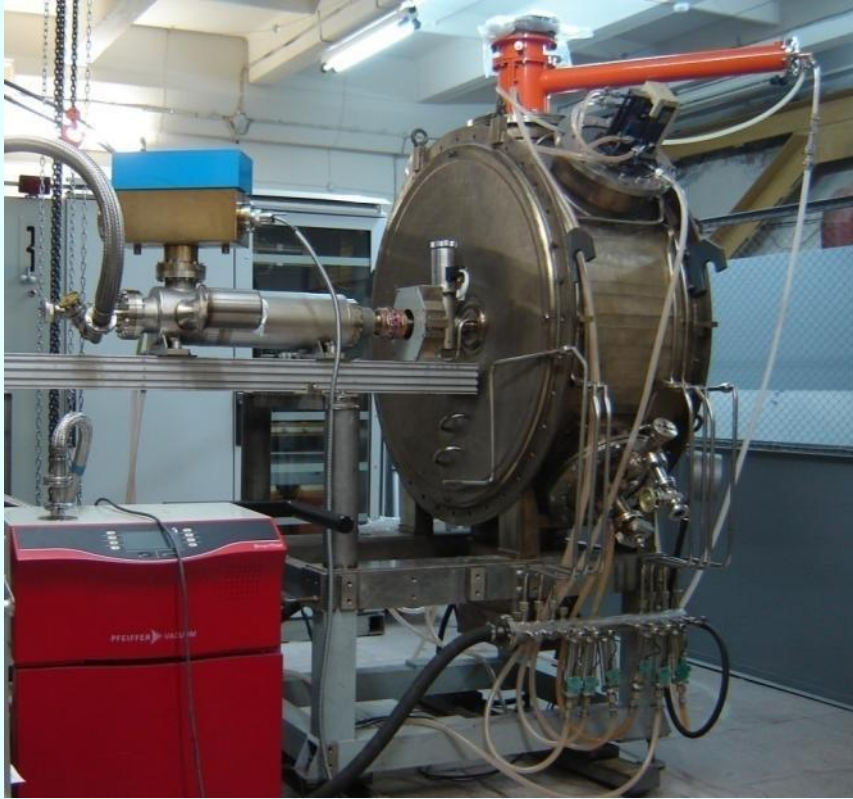
8

9

10

1

90 MHz RF gun



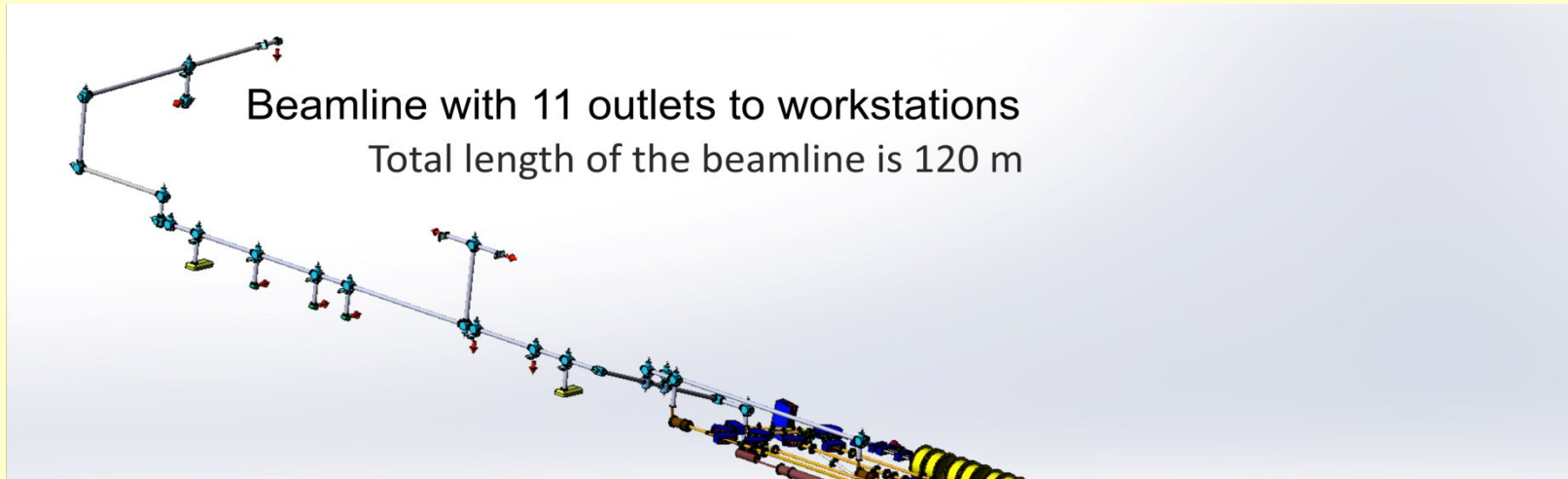
По средней мощности излучения (0,5 кВт) Новосибирский ЛСЭ значительно превосходит аналогичные зарубежные установки в своих диапазонах длин волн (40 – 80 и 110 – 240 микрон).

Новосибирский ЛСЭ является уникальным источником когерентного электромагнитного излучения. Рекордно высокая мощность ЛСЭ обусловлена использованием оригинального ускорителя-рекуператора электронов со средним током пучка 30 мА и энергией электронов до 40 МэВ.

Сибирский центр фотохимических исследований, создан институтами ядерной физики и химической кинетики и горения СО РАН



Novosibirsk FEL user facility has three FELs, installed on the first, second and fourth orbits of the dedicated energy recovery linac (ERL). These FELs are the world's most powerful (in terms of average power) sources of coherent narrow-band (less than 1%) radiation in their wavelength ranges. The Novosibirsk ERL is the first multiturn ERL in the world. The facility has been operating for users of terahertz radiation since 2004. It is one of the partners of FELs of Europe collaboration.

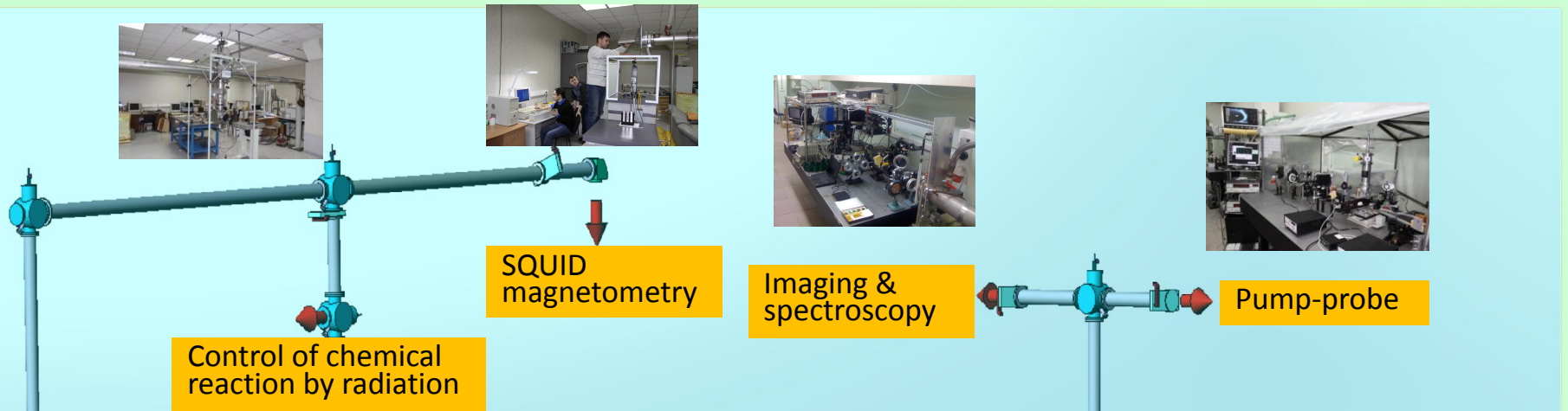


Laser	Terahertz	Far-Infrared	Infrared
Wavelength, μm	90 – 340	15 – 120	8 – 1
Relative line width (FWHM), %	0.2 – 2	0.2 - 1	0.1 - 1
Maximum average power, kW	0.5	0.5	0.1
Maximum peak power, MW	0.5	2.0	10
Pulse duration, ps	30 - 120	20 - 40	10 - 20
Pulse repetition rate, MHz	2.8 - 5.6 - 11.2 - 22.4		

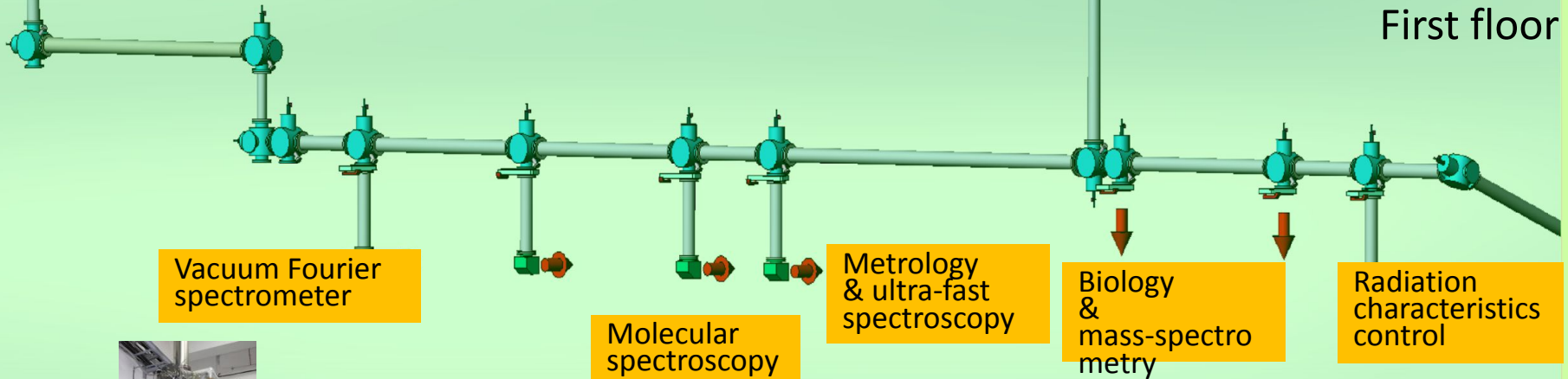
Multiturn energy recovery linac with three individual laser systems

NovoFEL workstations

Second floor



First floor



Effect of radiation on materials



EPR spectroscopy





Канал вывода излучения на
новые пользовательские станции.

Канал вывода излучения на новые пользовательские станции (продолжение)



Текущие работы и перспективы

Ондулятор с переменными периодом и числом периодов

(Vinokurov N.A., Shevchenko O.A., Tcheskidov V.G. Variable-period permanent magnet undulators // Physical review special topics – accelerators and beams. – 2011. – Vol. 14, No 4. – 040701-1 – 040701-7)

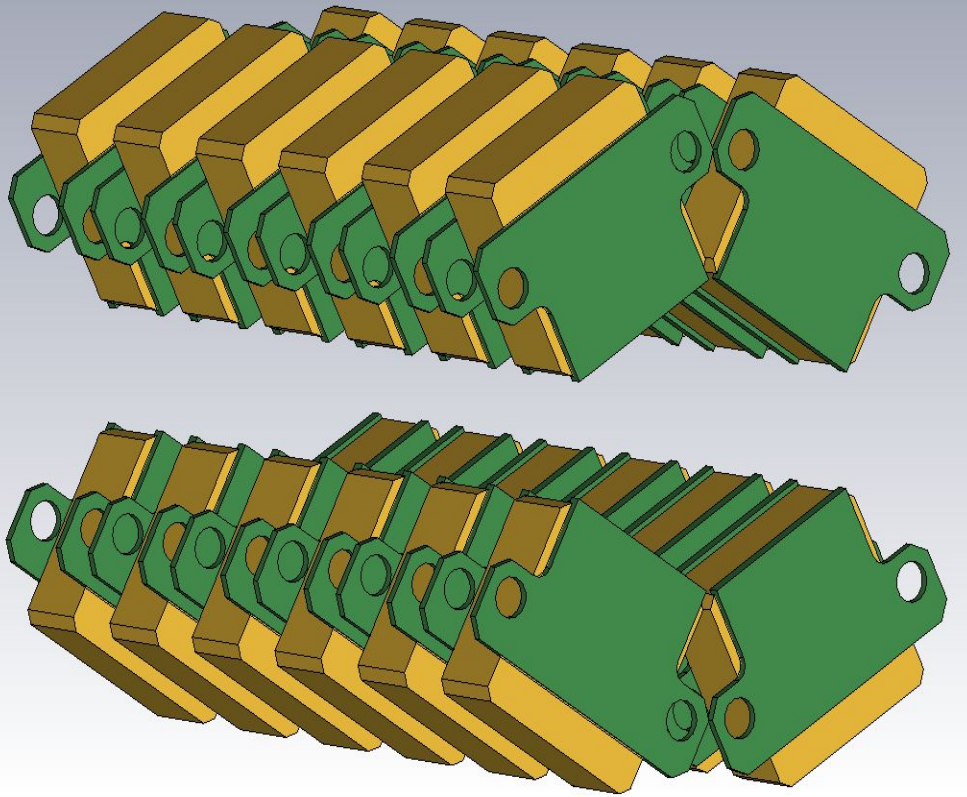


Схема ондулятора

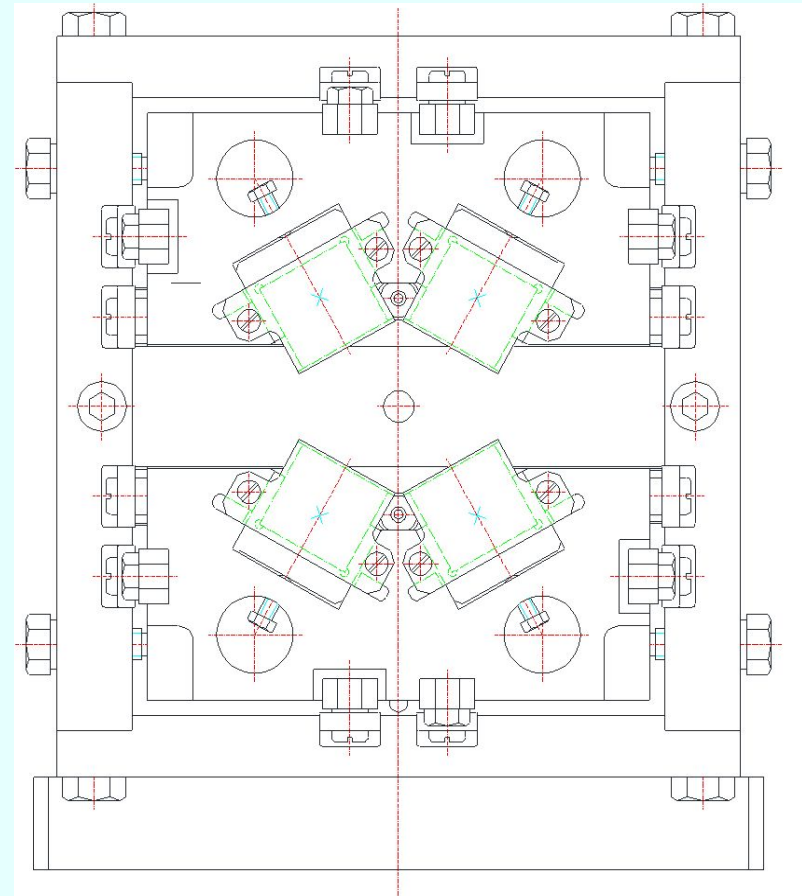
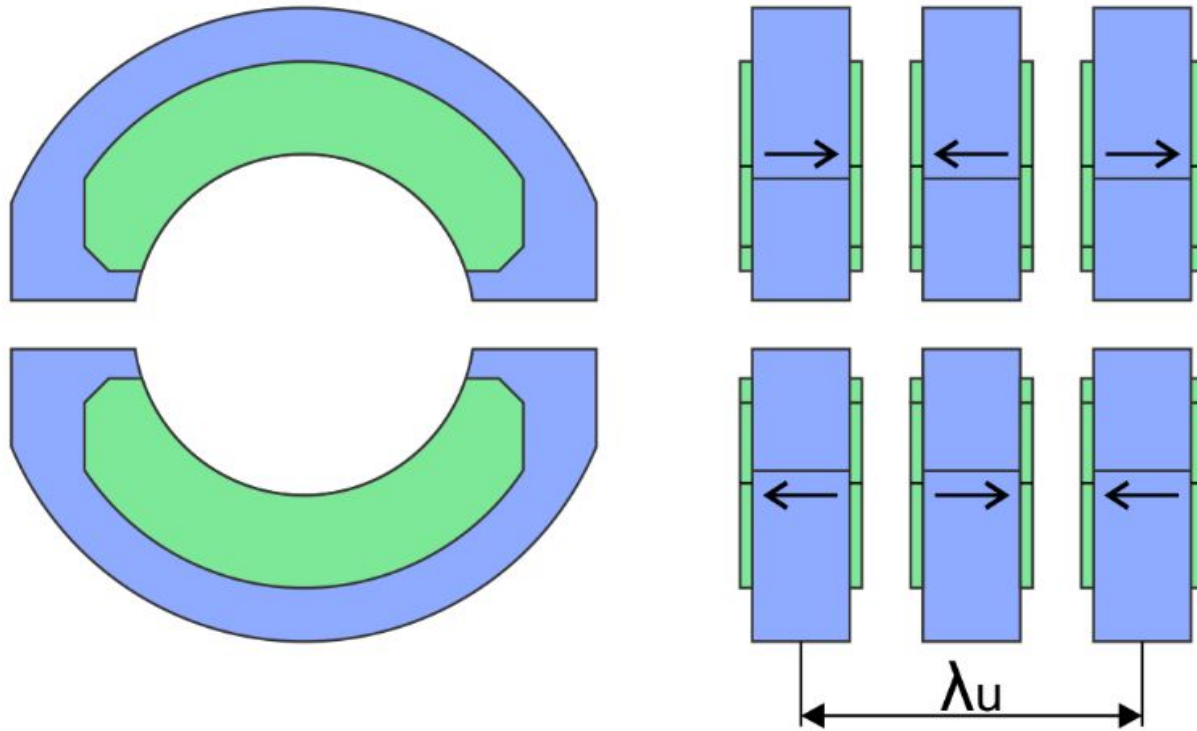


Чертёж прототипа

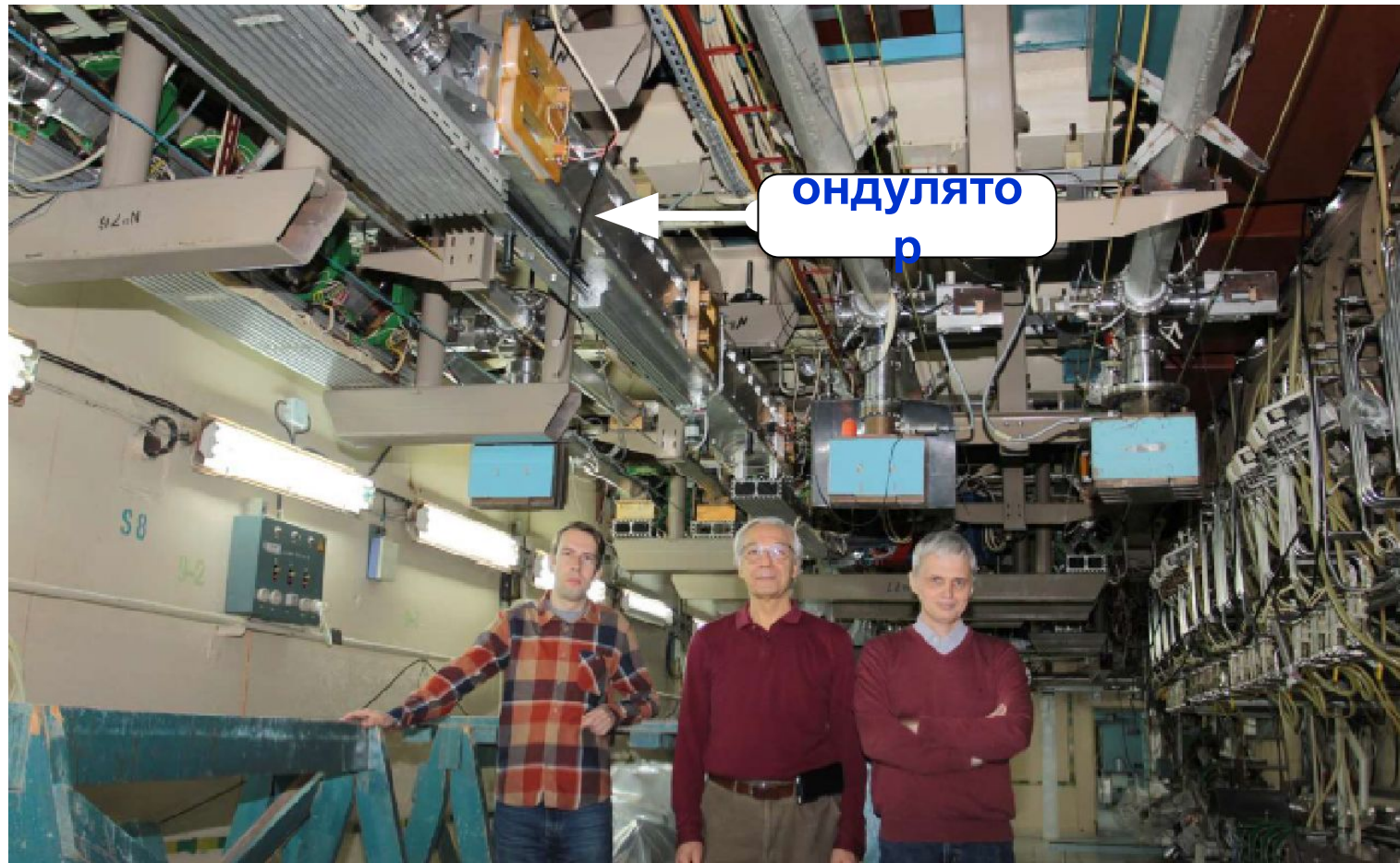
Magnetic structure of new variable-period undulator



Minimum period is 100 mm, inner diameter is 140 mm, total length is 8 m.

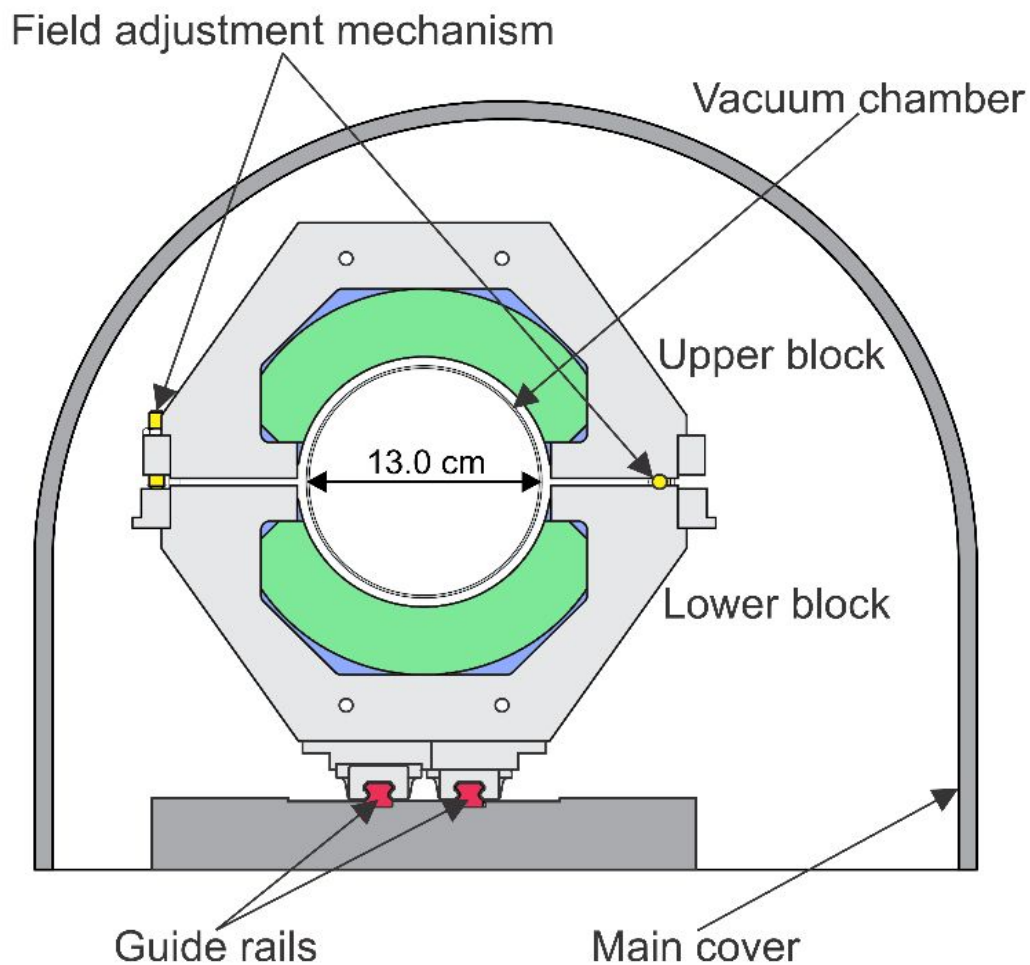


**Я. И. Горбачёв – измерения и окончательна настройка поля
ондулятора с переменным периодом**



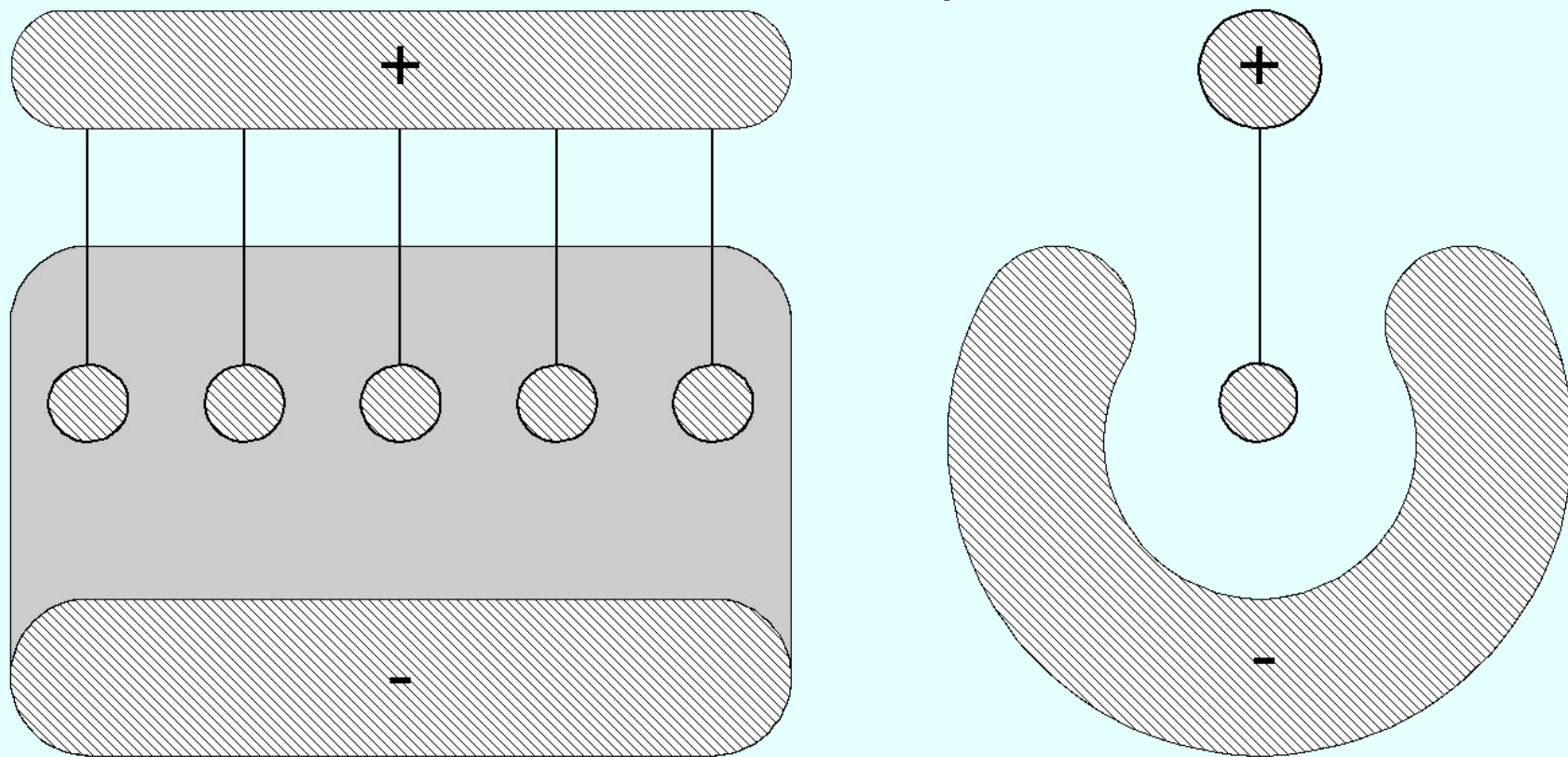
**Новый диапазон изменения длины волны излучения
второго ЛСЭ – 15-120 микрон (в 8 раз).**

Широкоапертурный ондулятор с переменным периодом для замены старого электромагнитного ондулятора первого ЛСЭ



Large-aperture variable-period undulators may also be used for new x-ray sources. For example, for 5-mm aperture (diameter) one can built such undulator with minimum period of 4 mm.

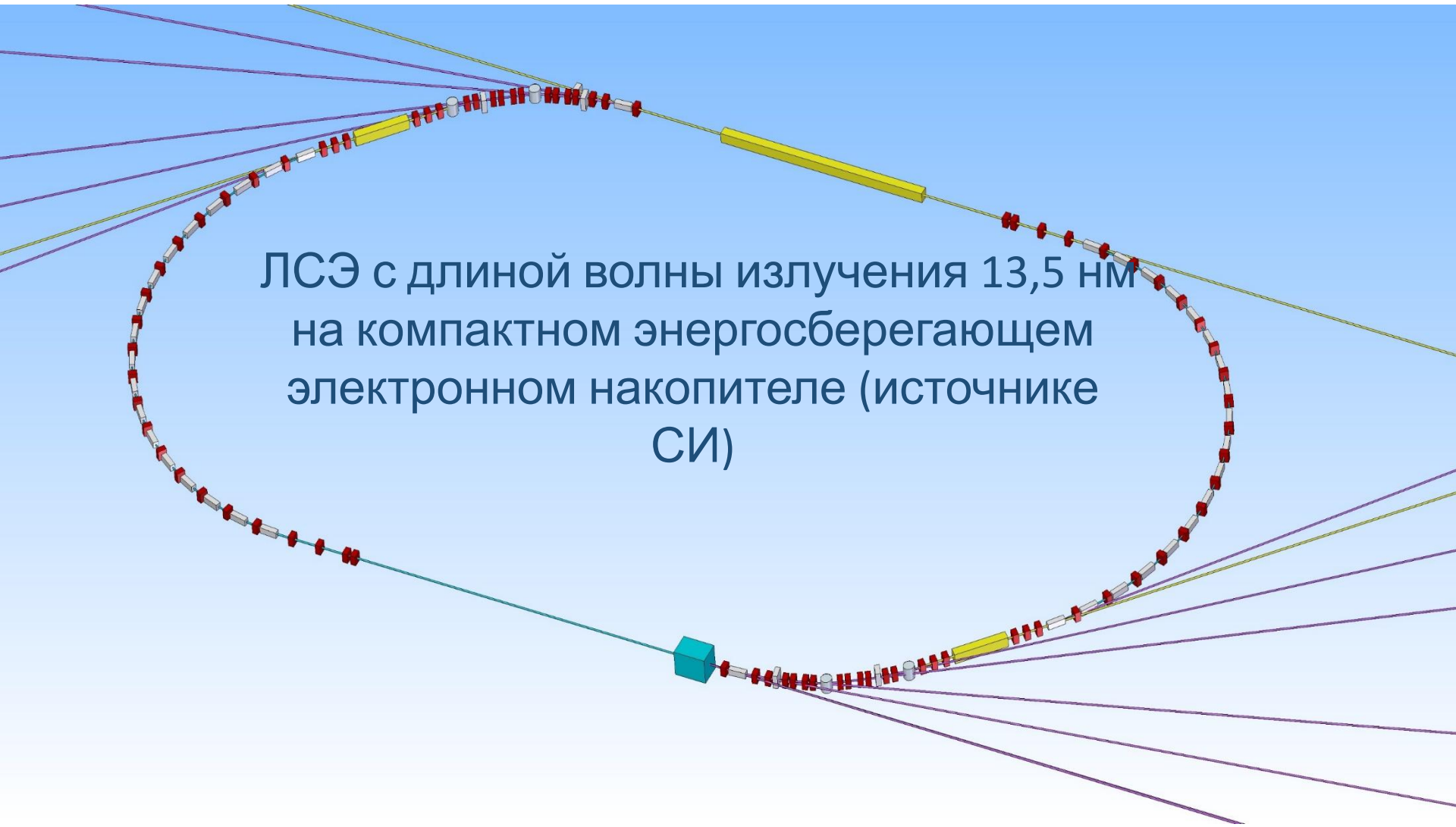
Схема электростатического ондулятора, сагиттальный и фронтальный разрезы. Показаны знаки потенциала электродов.



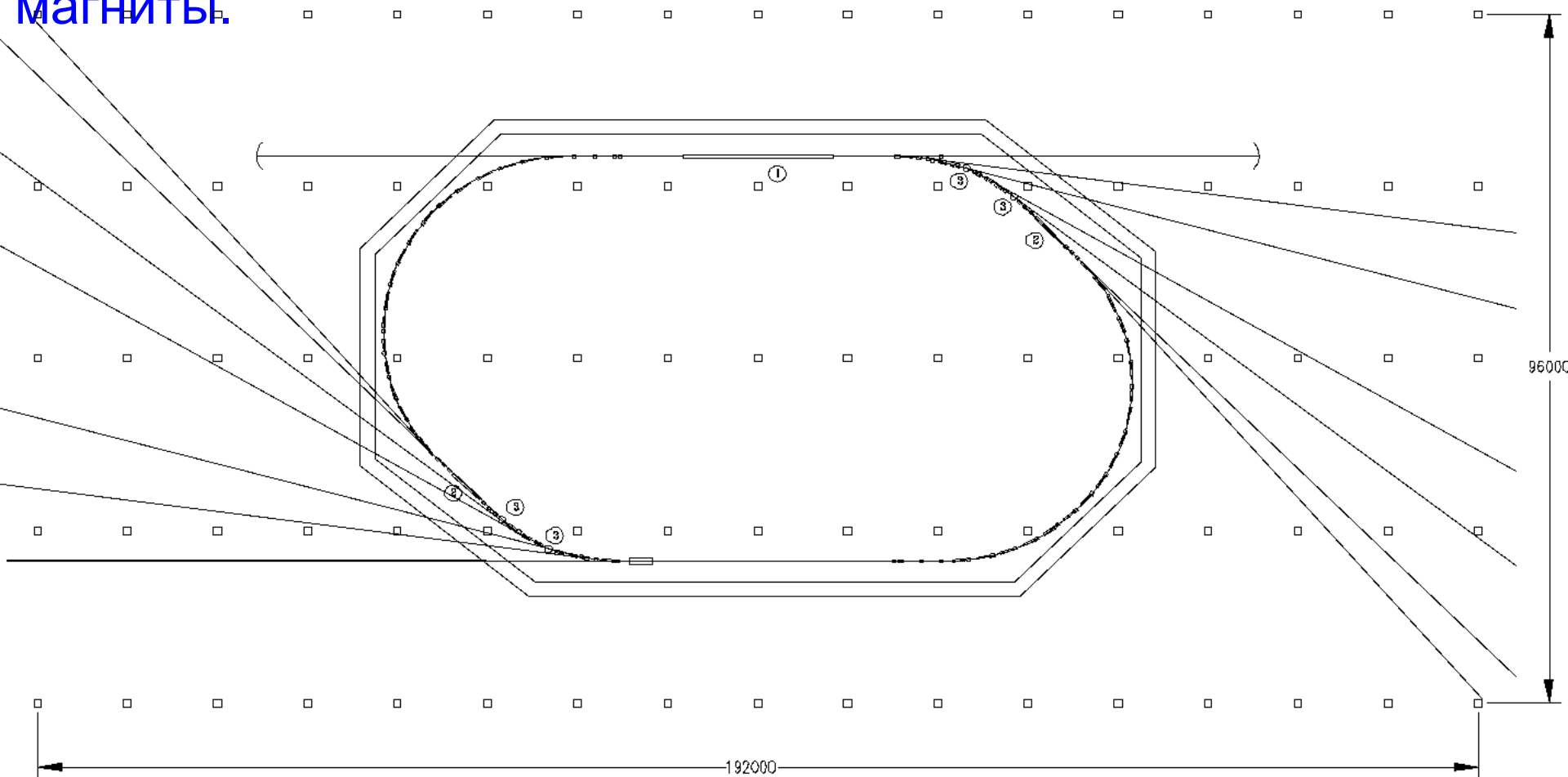
Подав ± 300 кВ на электроды, получим напряжение 600 кВ и поле на расстоянии (по вертикали) 1 мм 5 кГс. Минимальный период – 3 мм.

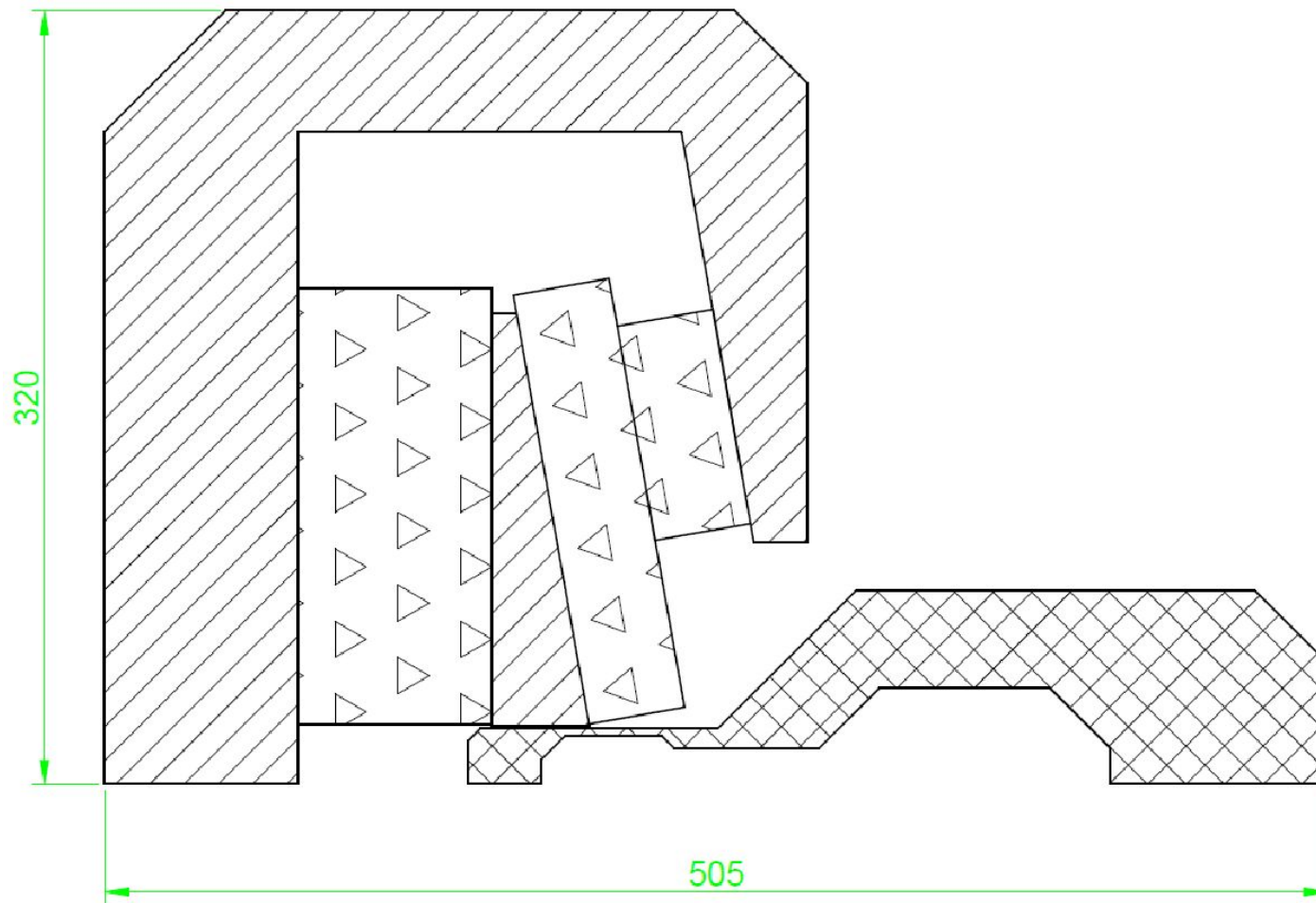


ЛСЭ с длиной волны излучения 13,5 нм
на компактном энергосберегающем
электронном накопителе (источнике
СИ)

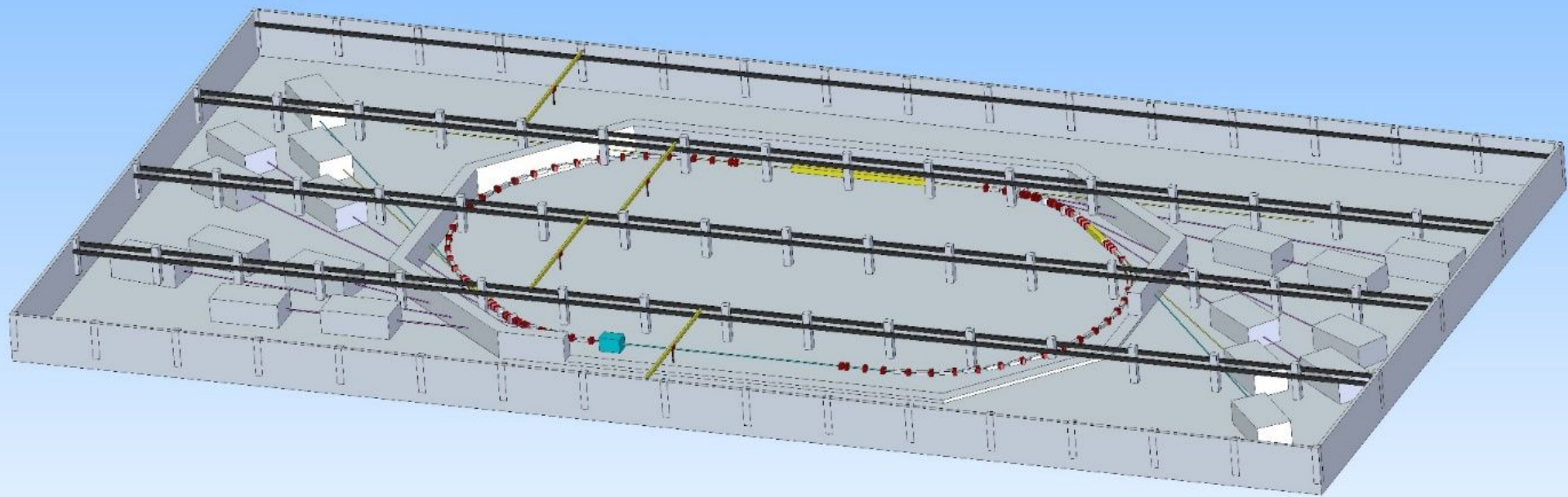


Рейстрек с ЛСЭ в одном из прямолинейных промежутков и излучателями, установленными в началах полуколец вместо регулярных элементов периодичности. 1- ондулятор ЛСЭ, 2 – ондуляторы для мягкого рентгена, 3 – сверхпроводящие магниты.





Фокусирующий магнит: треугольная штриховка – постоянные магниты, клетчатая – алюминиевая вакуумная камера, косая – железный магнитопровод.



Electron energy	1.5 GeV
Длина орбиты	300 – 400 м
Horizontal emittance	1 nm
Beam current	500 mA
RF frequency	30 MHz (3rd harmonics – 90 MHz)
Radiation sources	Bending magnets, SC wigglers, undulators
Photon energy	0.01–50 keV
FEL wavelength	10 – 15 nm
FEL average power	100 W

Установка размещается в стандартном промышленном здании с мостовыми кранами и разборными бетонными стенами внутри. Это тоже значительно понижает стоимость.

Спасибо