Лазеры на свободных электронах

Н.А. Винокуров

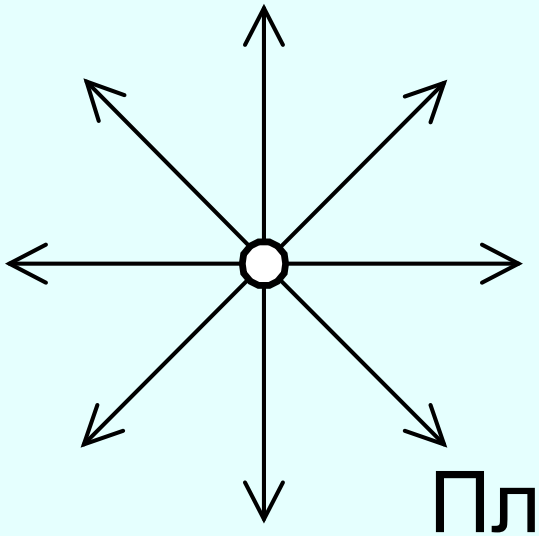
Институт ядерной физики
им. Г. И. Будкера СО РАН

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*.

Излучение электромагнитных волн точечным зарядом

Силовые линии электрического поля, выходящие из покоящегося заряда

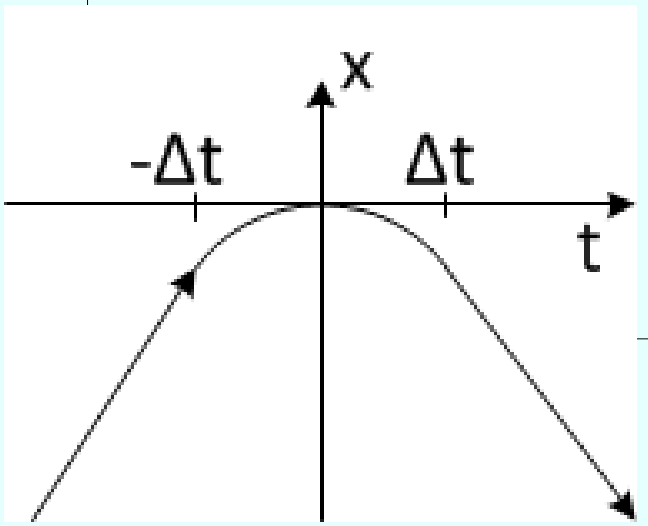


$$\mathbf{E} = \frac{e}{R^3}\mathbf{R}$$

Плотность силовых линий пропорциональна напряженности электрического поля

Пусть заряд равномерно движется с постоянной скоростью v слева направо, затем его скорость меняет знак за время $2\Delta t$, после чего заряд снова движется равномерно, но со скоростью $-v$:

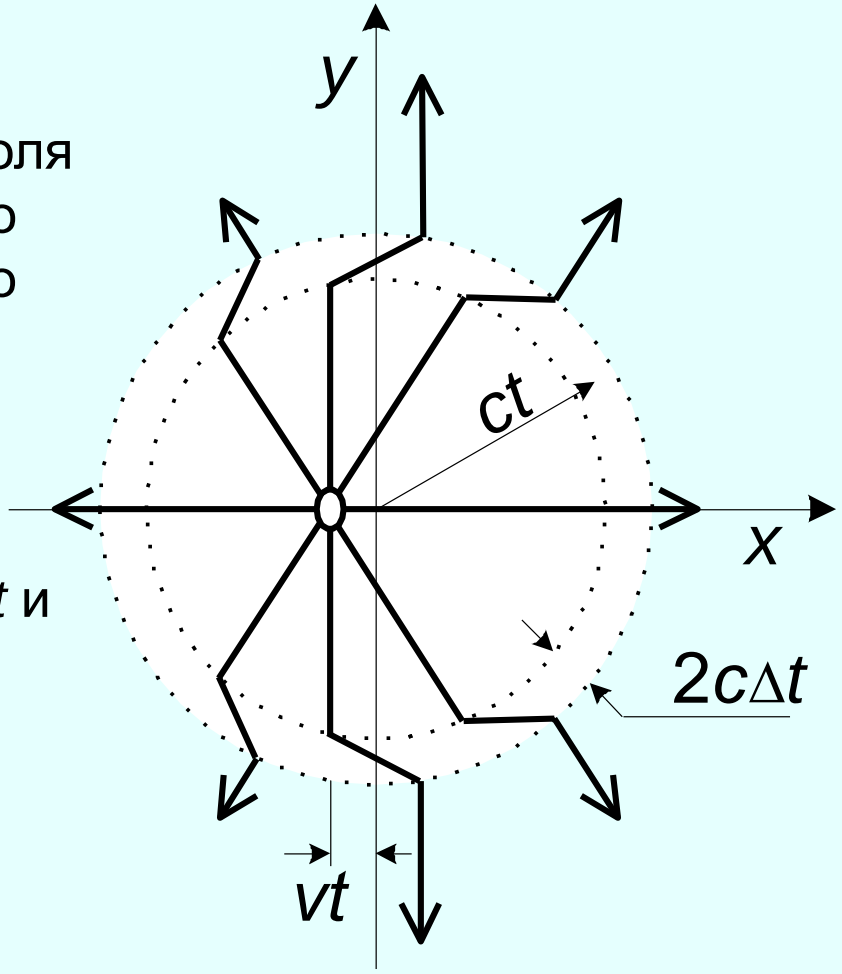
$$x = \begin{cases} vt & t < -\Delta t \\ -at^2/2 & -\Delta t \le t \le \Delta t \\ -vt & t > \Delta t \end{cases}$$



$$a = v/\Delta t$$

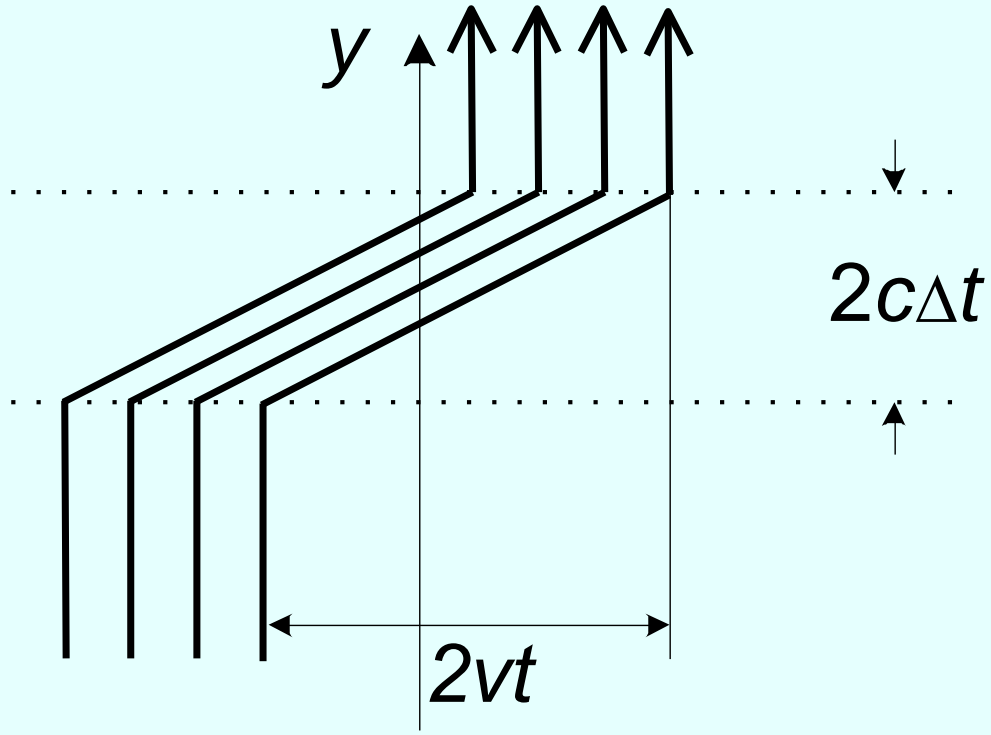
Поле равномерно движущегося заряда движется вместе с ним. При $t >> \Delta t$ в дальней зоне оно еще продолжает двигаться в направлении $+x$, а в ближней – уже движется вместе с зарядом в направлении $-x$.

Так как изменения поля распространяются со скоростью света c, то переходная зона представляет собой расширяющийся сферический слой средним радиусом ct и толщиной $2c\Delta t$.



Так как силовые линии непрерывны, то мы соединяем их концы на границах сферического слоя и получаем силовые линии внутри слоя.

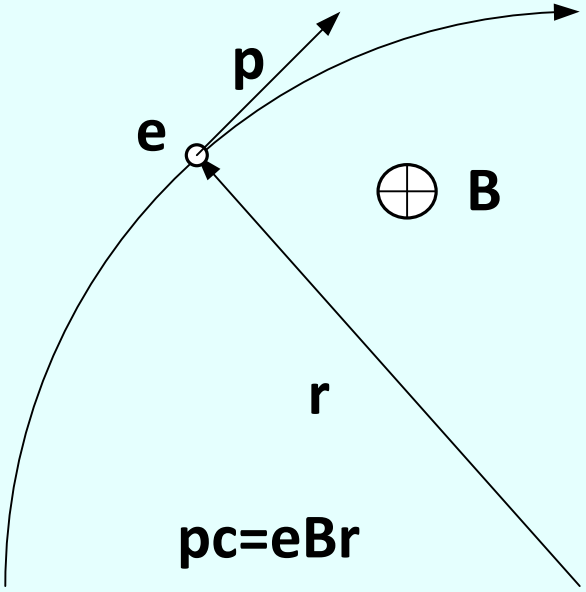
Поперечная компонента электрического поля превышает продольную в $vt/(c\Delta t)=aR/c^2$ раз.



$$E_x(t) = E_y(t)\frac{2vt}{2c\Delta t} = \frac{e}{R^2}\frac{vR}{c^2\Delta t} = -e\frac{a}{c^2R}$$

Это и есть поле излучения, уходящее от заряда. Оно пропорционально ускорению заряда a.

Движение электрона в однородном магнитном поле B

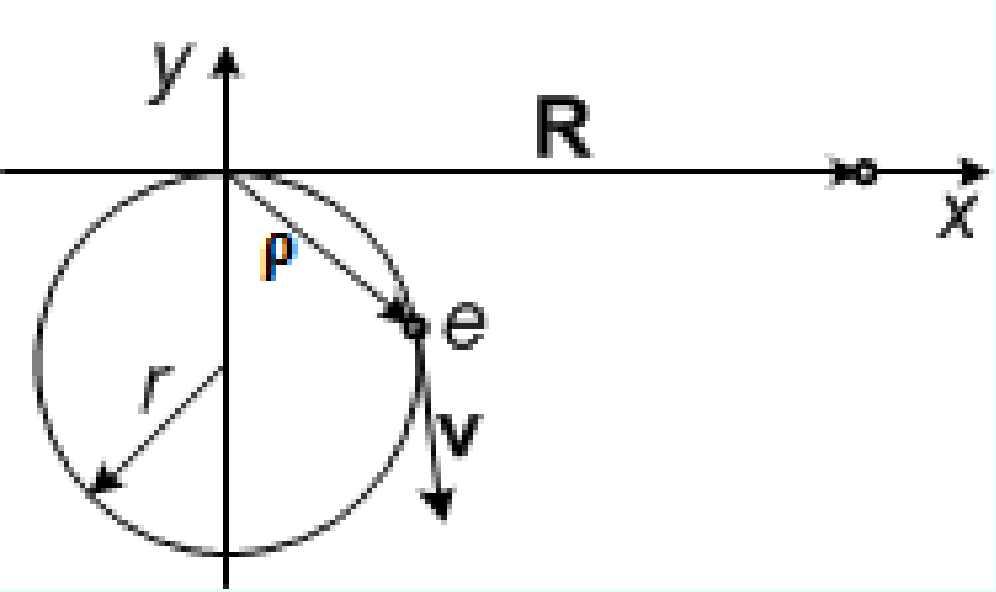


В мгновенно сопутствующей системе отсчёта

$$E_y = \gamma \frac{v}{c} B \approx \gamma B \qquad a = \frac{eE_y}{m}$$

$$(\Delta t)_{con} \approx \frac{2c}{a} = 2\frac{mc}{\gamma eB}$$

- длительность импульса излучения в сопутствующей системе отсчёта

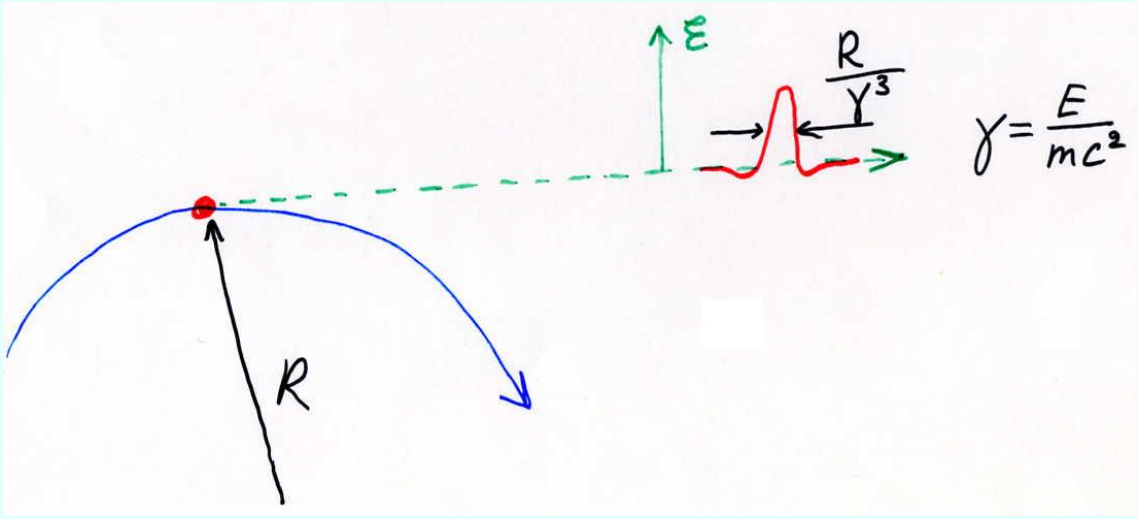


$$(\Delta t)_{лаб} = \frac{(\Delta t)_{con}}{2\gamma}$$

$$\approx \frac{mc}{\gamma^2 eB} \approx \frac{r}{c\gamma^3}$$

- длительность импульса излучения в лабораторной с. о.

Синхротронное излучение

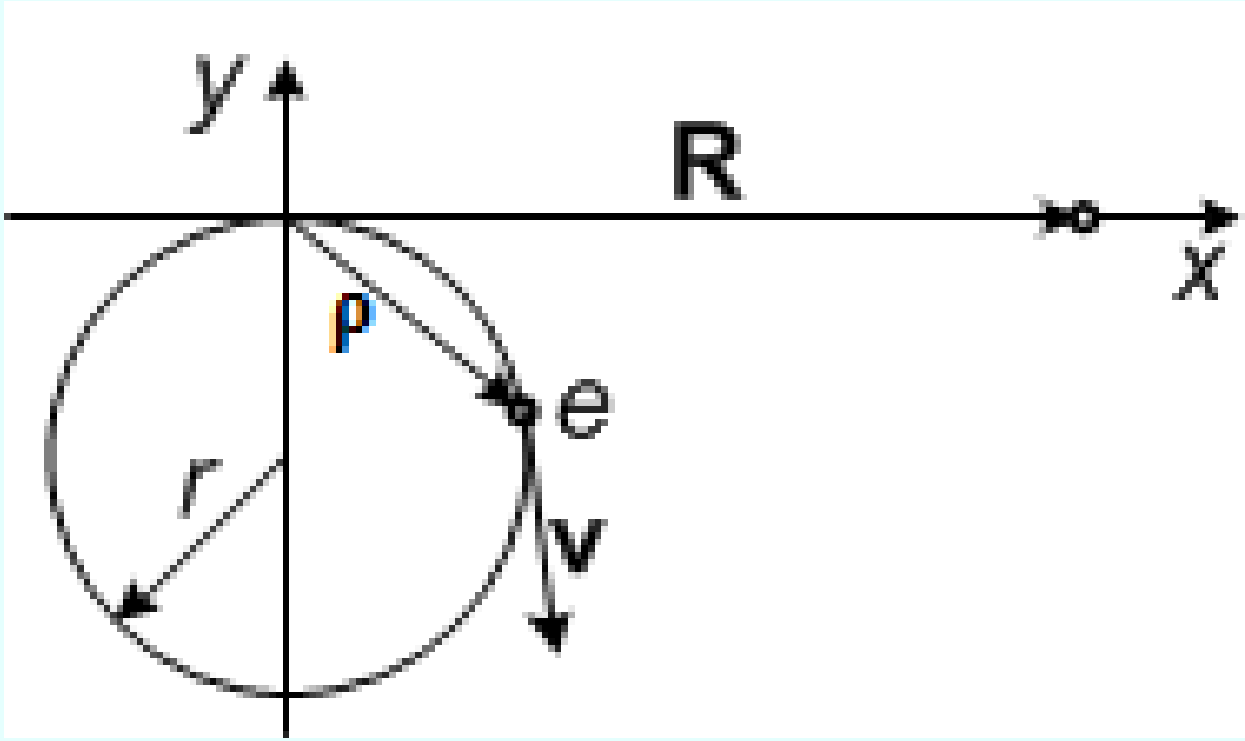


Пример: R=1м, λ =0,1нм

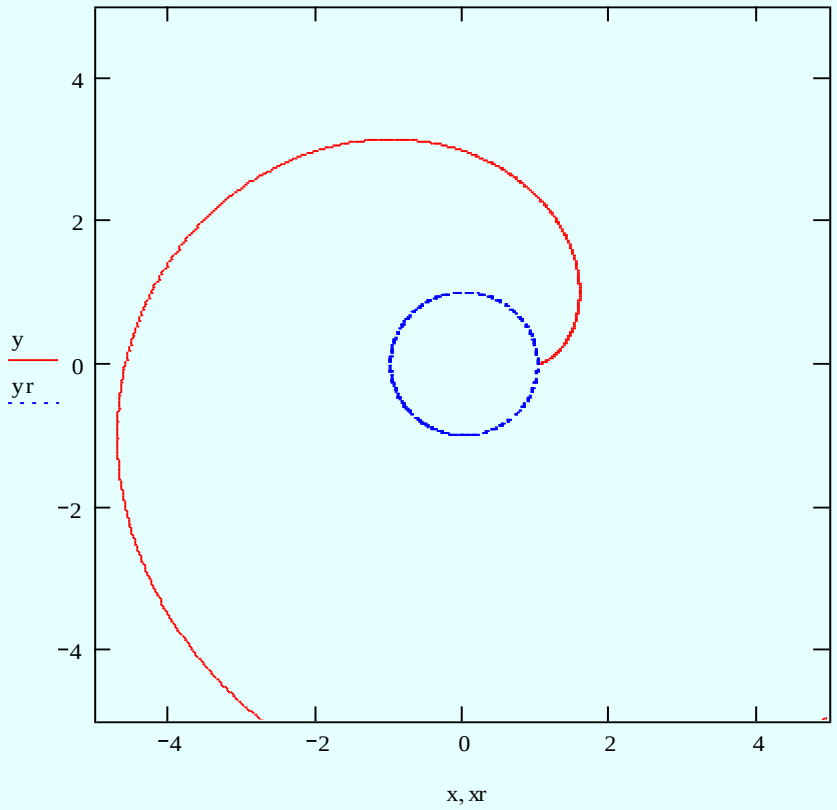
$$\gamma \sim \sqrt[3]{R/\lambda} \sim 2000 \qquad E = 2000 \times 511\text{кэВ} \approx 1\text{ГэВ}$$

Длина формирования синхротронного излучения

$$l_f = \gamma c(\Delta t)_{con} \approx \frac{mc^2}{eB} \approx \frac{r}{\gamma}$$



Область, где находится поле излучения, лежит вблизи плоскости вращения электрона и имеет вид спирали (эвольвенты окружности)

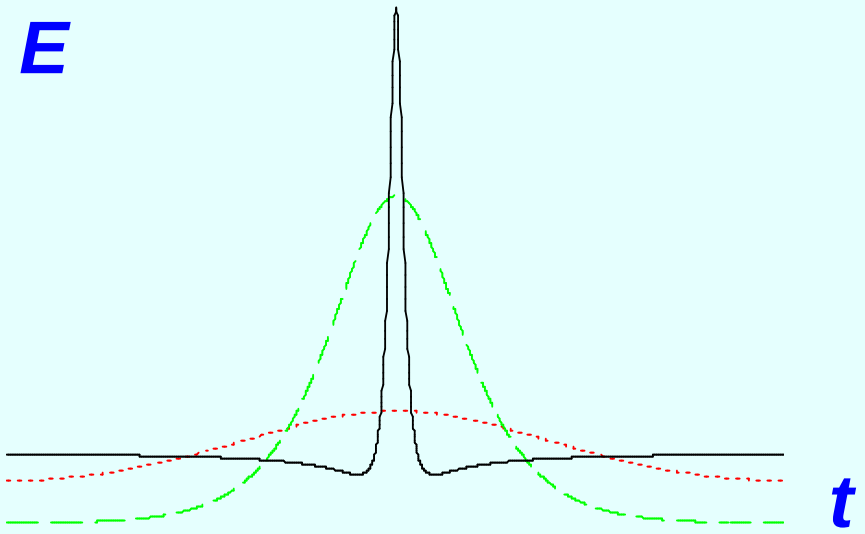


Зависимость электрического поля синхротронного излучения от времени.

Красая –v/c =0.05;

зелёная –v/c =0.3, поделено на 10;

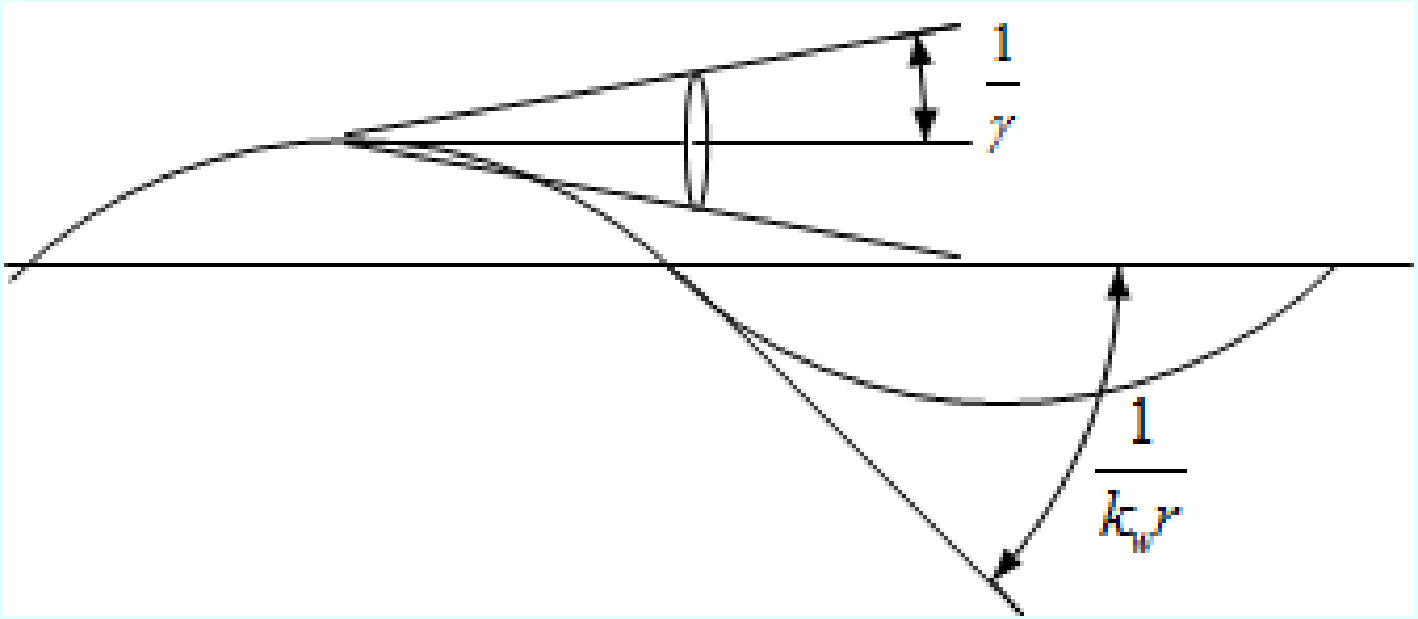
чёрная –v/c =0.8, поделено на 500.



$T=2\pi R/v$

Ондуляторное излучение

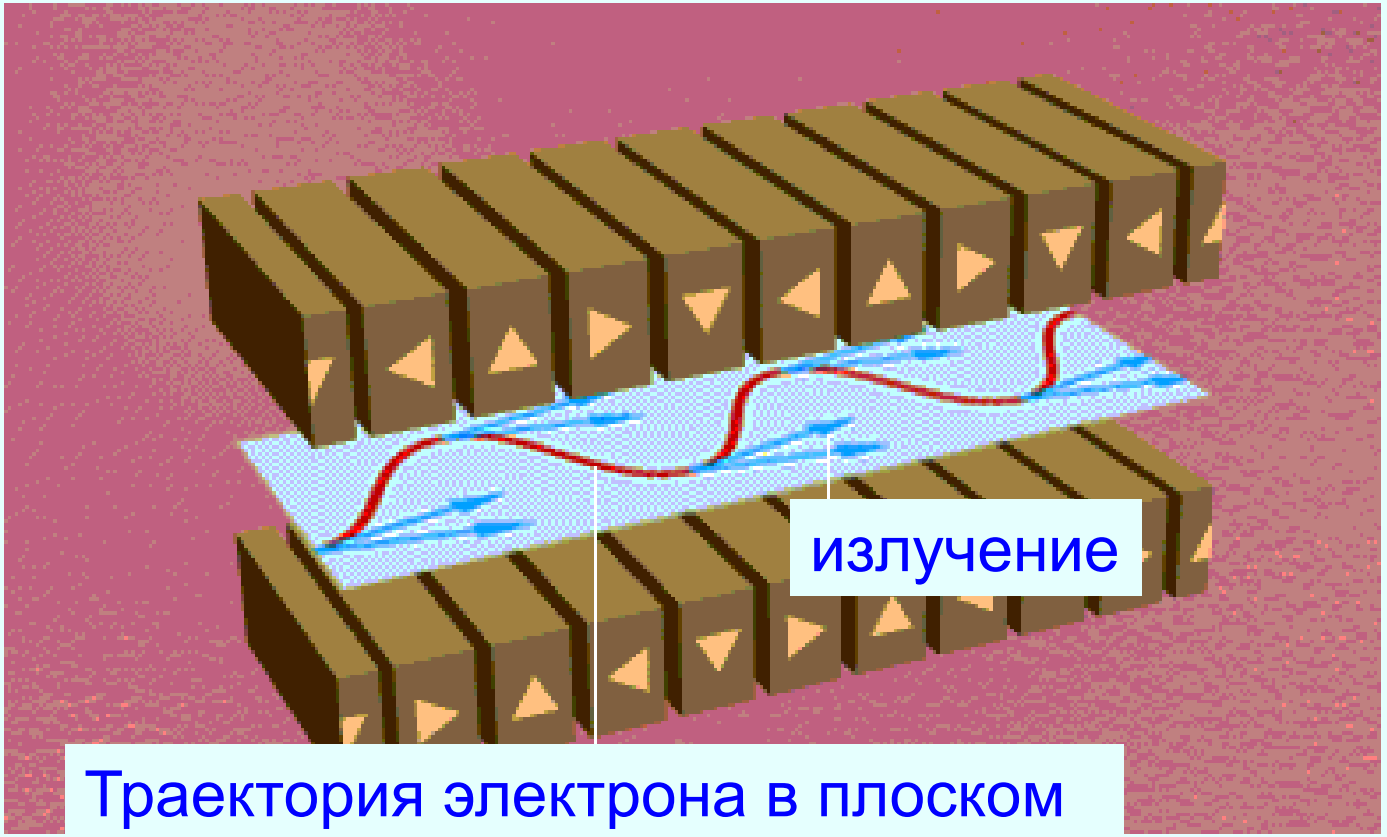
Синусоидальная траектория и излучение заряда, движущегося по ней



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

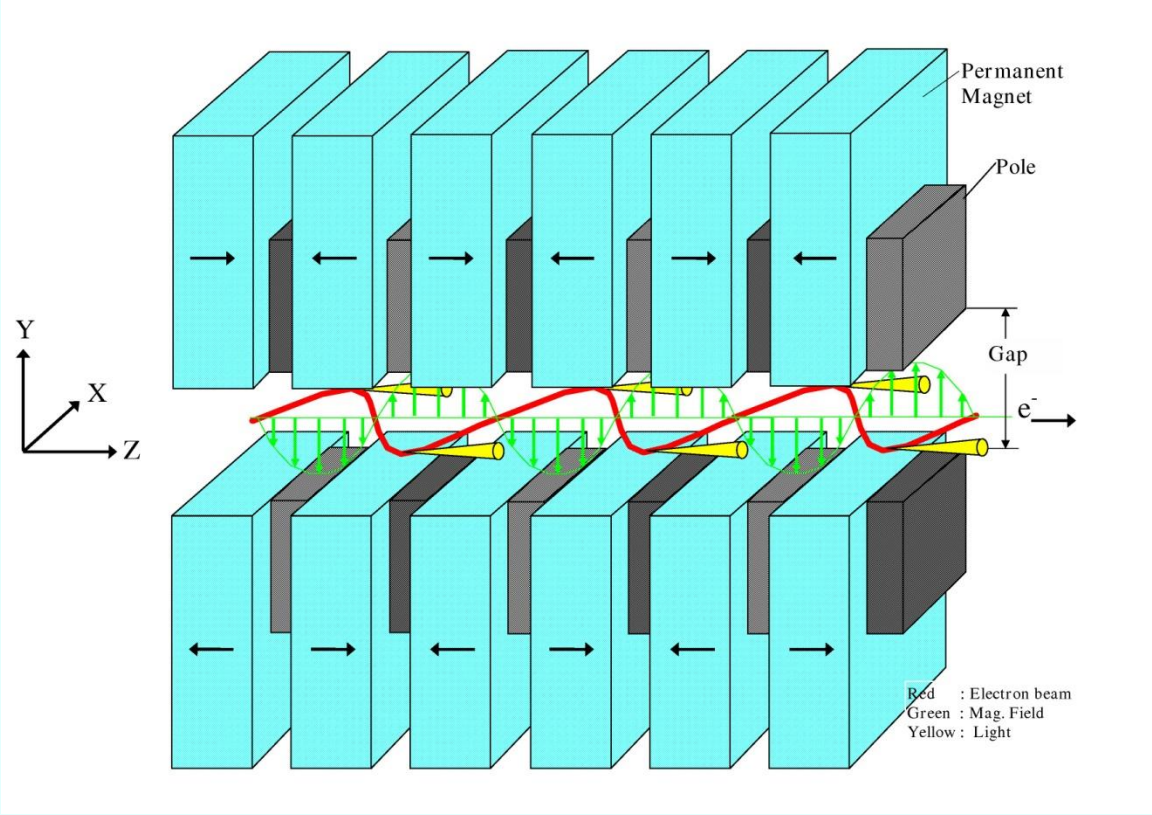
$$k_w = 2\pi/\lambda_w$$

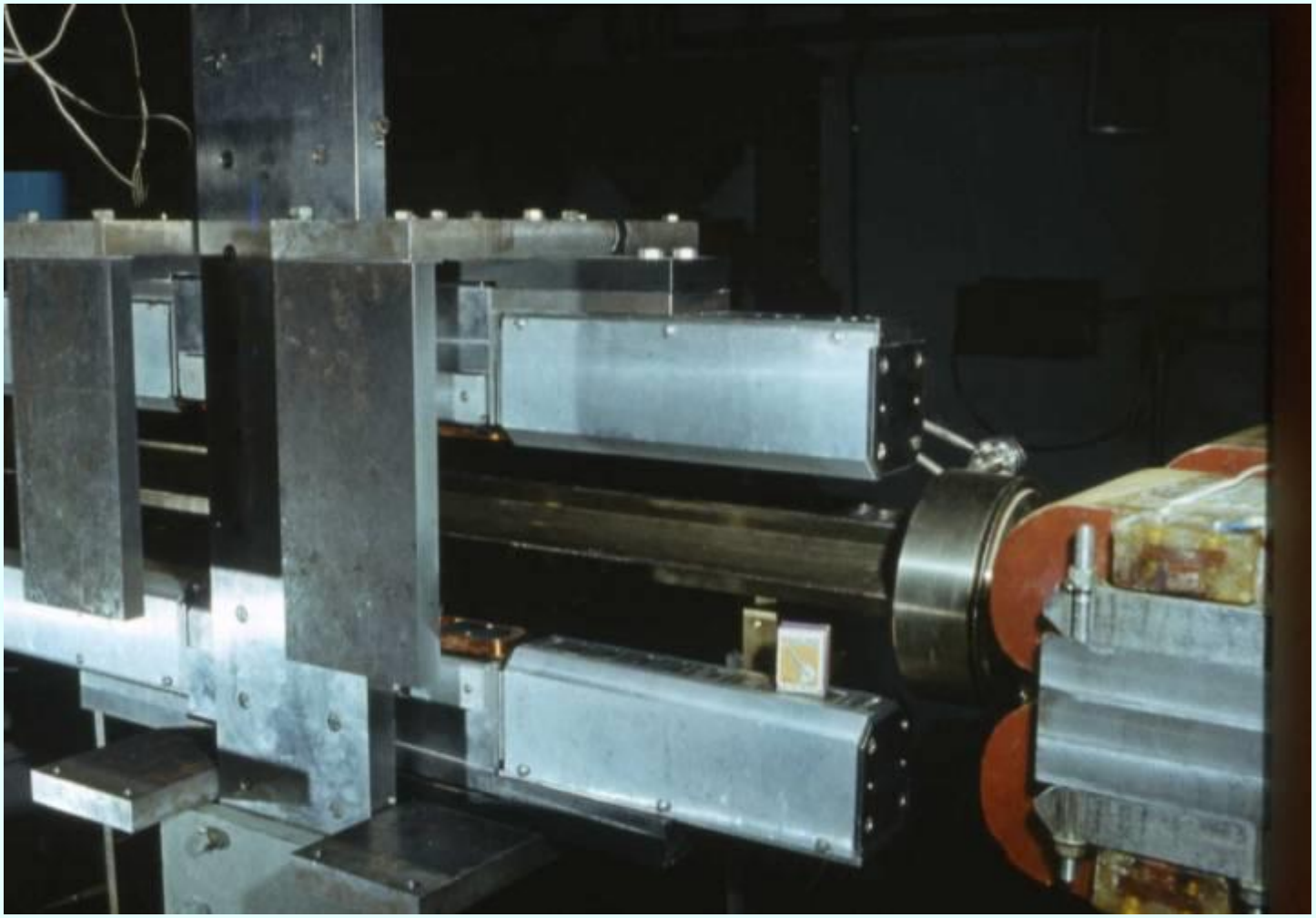
Ондулятором (вигглером) называется магнитная система, создающая пространственно периодическое поперечное магнитное поле. В таком поле ультрарелятивистский электрон может двигаться вдоль периодически изогнутой (синусоидально или спирально) траектории. Ондулятор был предложен В. Л. Гинзбургом в 1947 г.



Траектория электрона в плоском ондуляторе

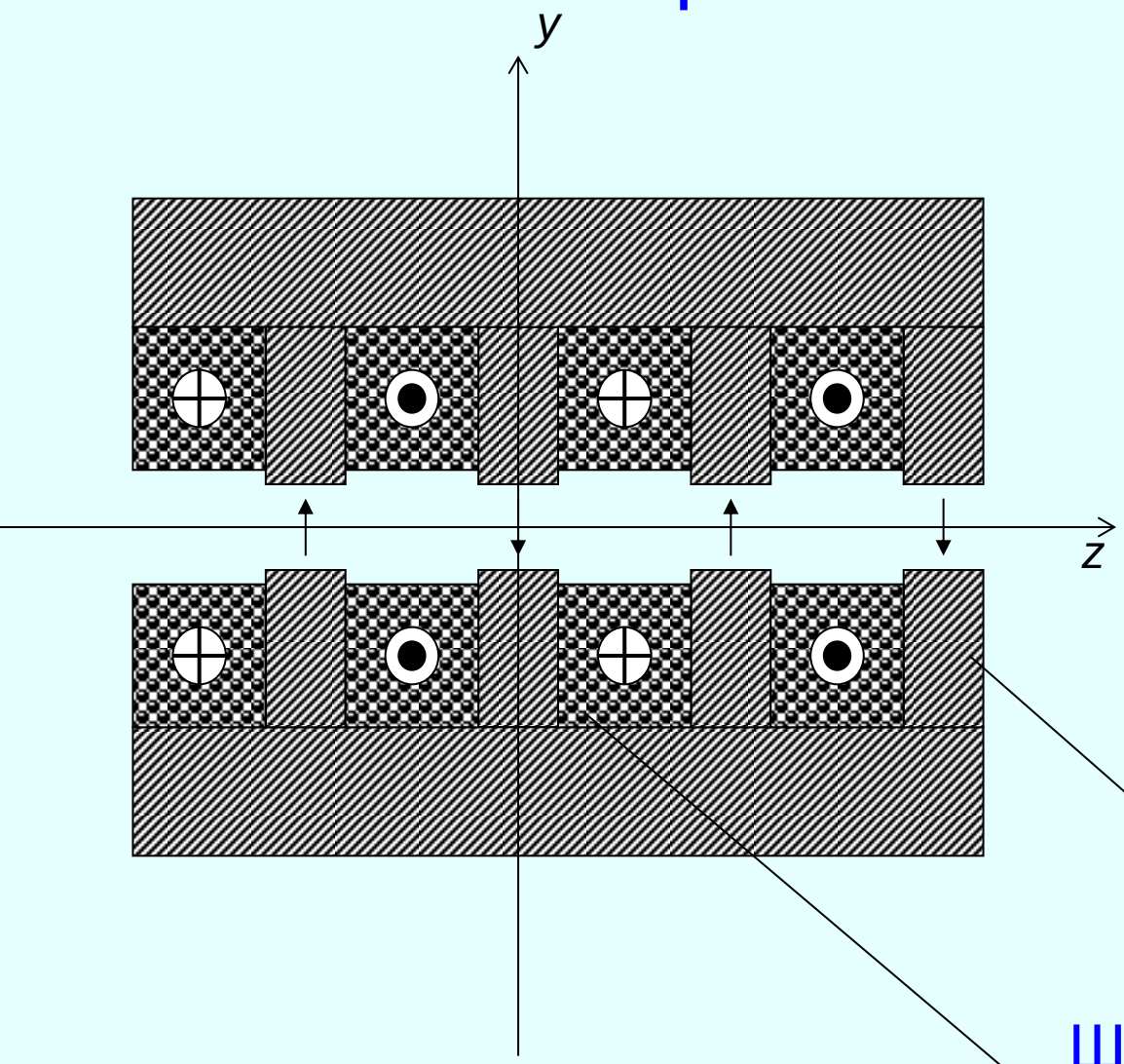
Движение электрона в гибридном ондуляторе





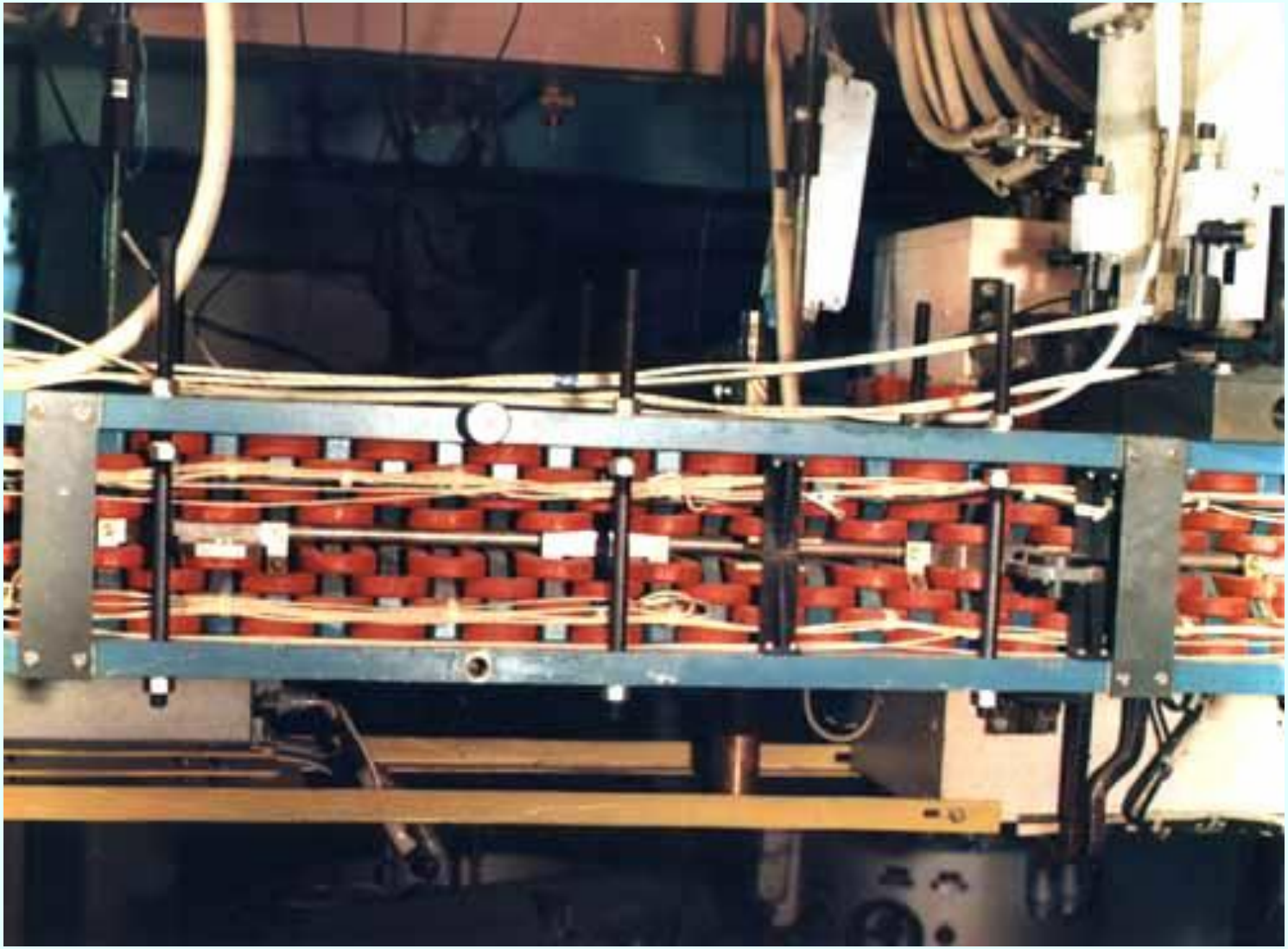
Первый в мире гибридный ондулятор на постоянных магнитах (1982). Работал на электронном накопителе ВЭПП-3 ИЯФ СО РАН.

Схема электромагнитного ондулятора



Железное ярмо

Шины с током

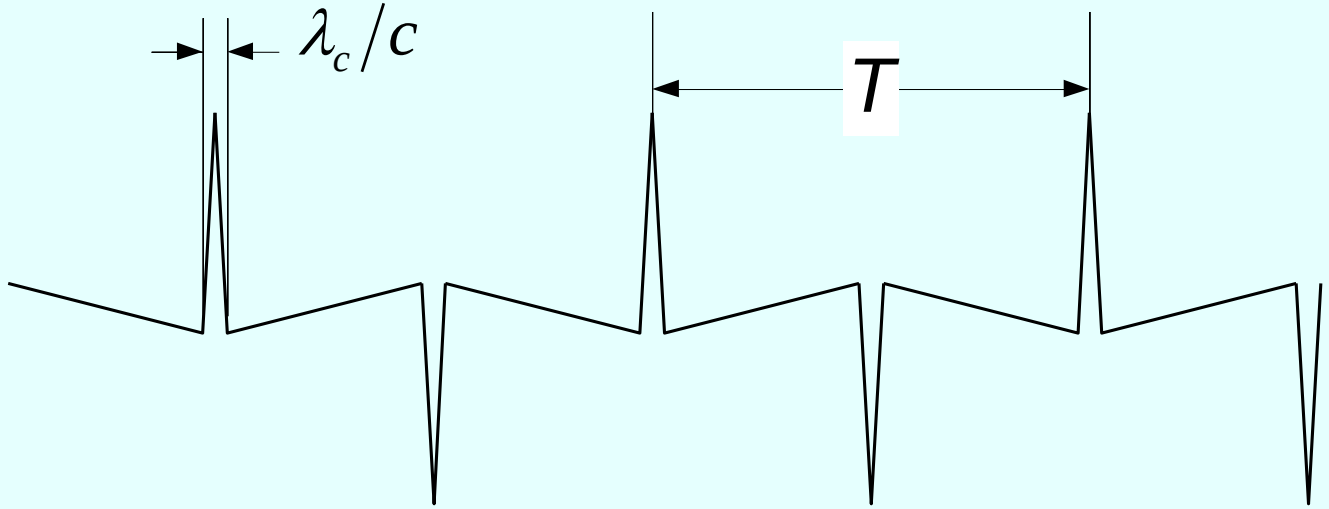


Ондулятор ОК-4. С 1987 работал в ИЯФ СО РАН, с 1996 по н. вр. – в университете Дюка (США).

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

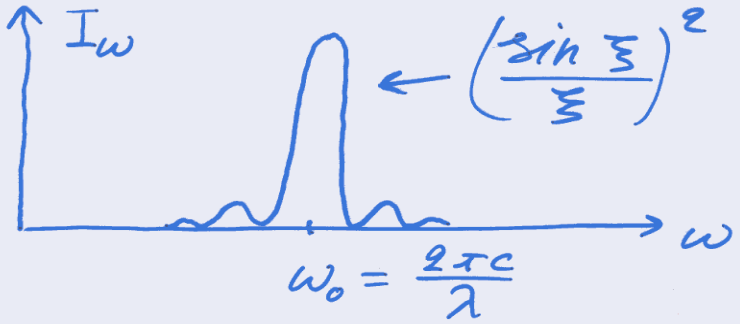


$$T = \int_0^{\lambda_w} \frac{dz}{v_z} - \frac{\lambda_w}{c} = \int_0^{\lambda_w} \sqrt{1 + \left(\frac{dx}{dz}\right)^2}\, \frac{dz}{v} - \frac{\lambda_w}{c} \approx$$

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

Спектр спонтанного ондуляторного излучения

The spectrum of u.r.



$$\xi = \frac{\omega-\omega_0}{\omega_0}\pi N$$

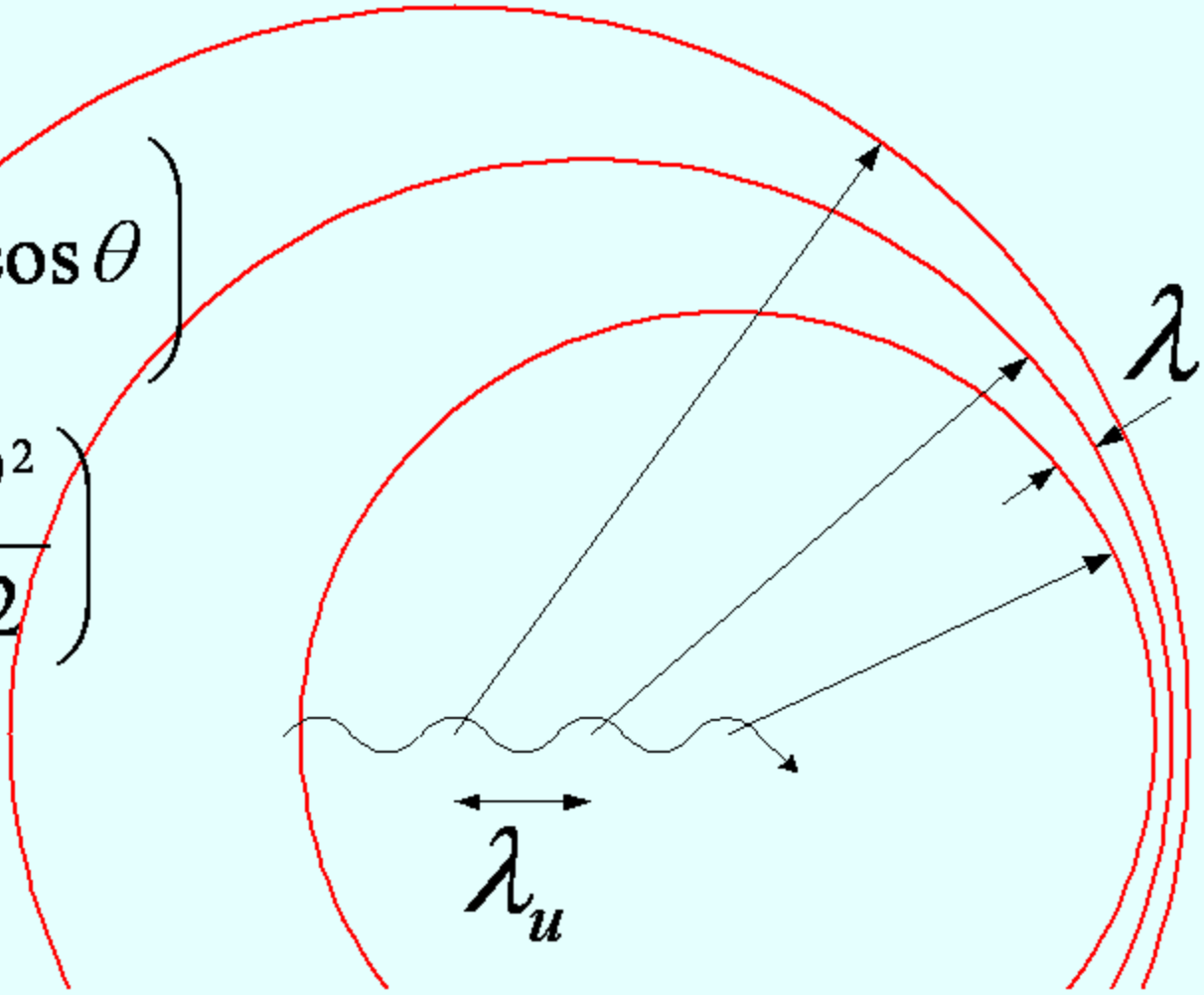
$$dI_\omega = \frac{c}{2\pi}|\mathcal{E}_{x\omega}|^2 R^2 do \frac{d\omega}{2\pi}$$

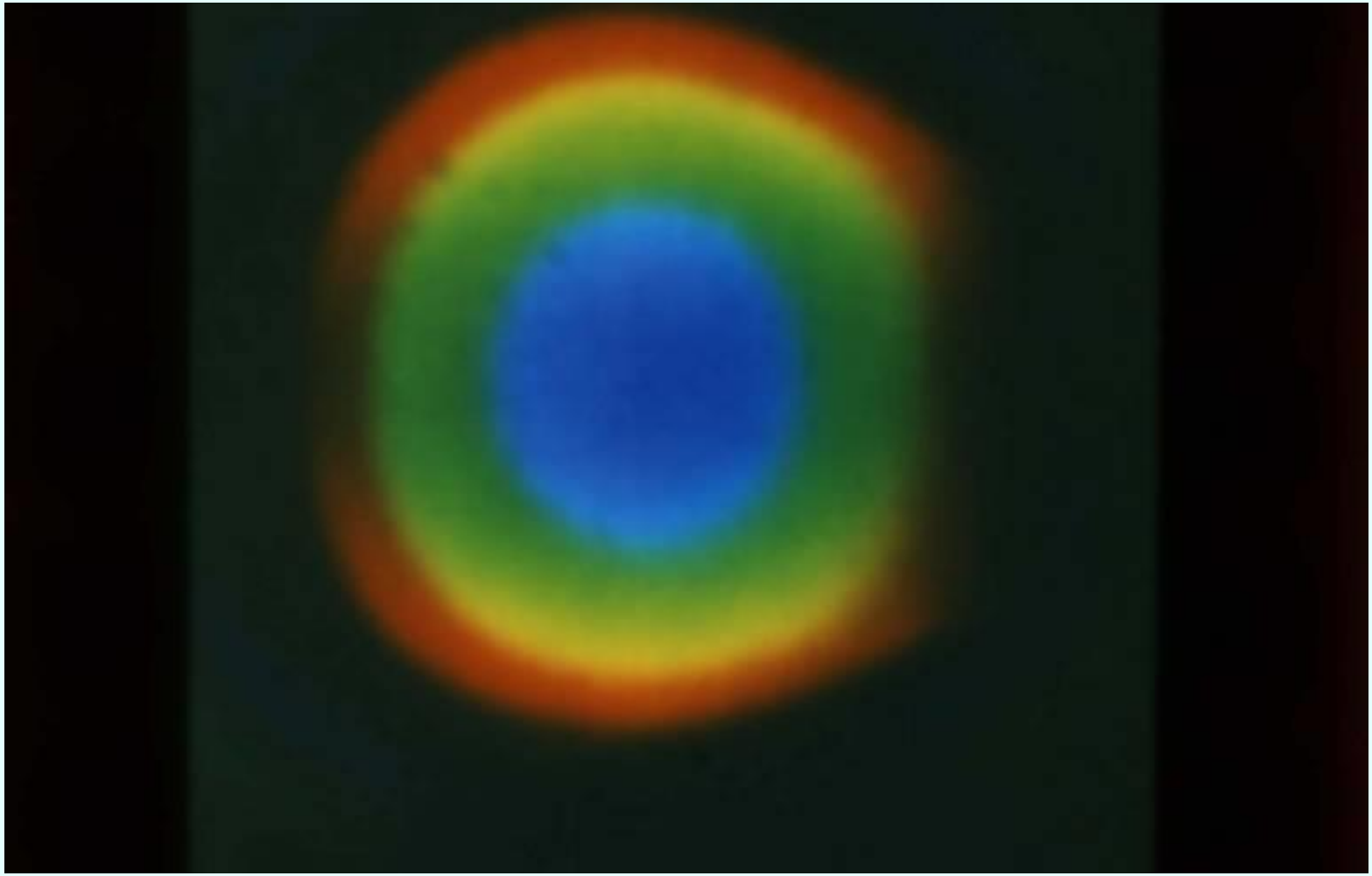
$$\left(\frac{\Delta\omega}{\omega}\right)_{FWHM} \approx \frac{1}{N}$$

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

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

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



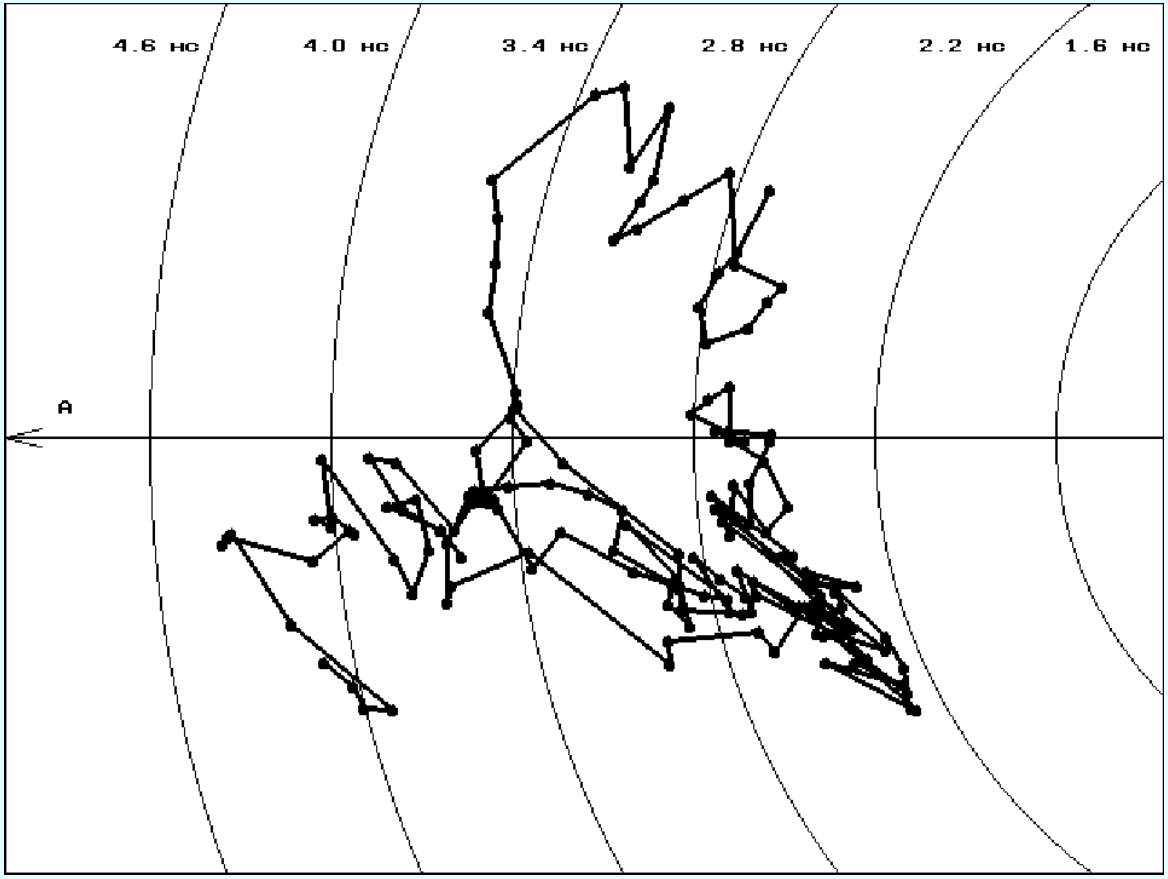


Ондуляторное излучение. Снято на электронном накопителе ВЭПП-3 ИЯФ СО РАН (1978).

Интенсивность ондуляторного излучения может быть довольно велика

Оргстекло, прорезанное синхротронным излучением из сверхпроводящего вигглера

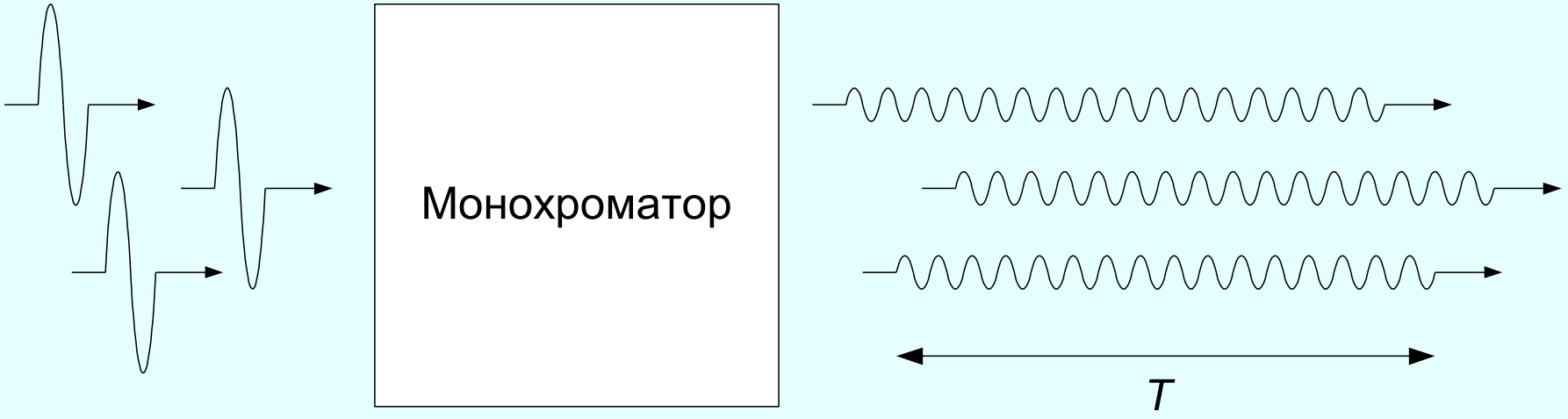
•Результат экспериментов по изучению влияния квантовых флуктуаций синхротронного излучения на движение одного электрона в накопителе



Измеренная фазовая траектория электрона. «Истинно случайный» процесс.

Вынужденное излучение – синхронизация ансамбля излучателей внешней волной

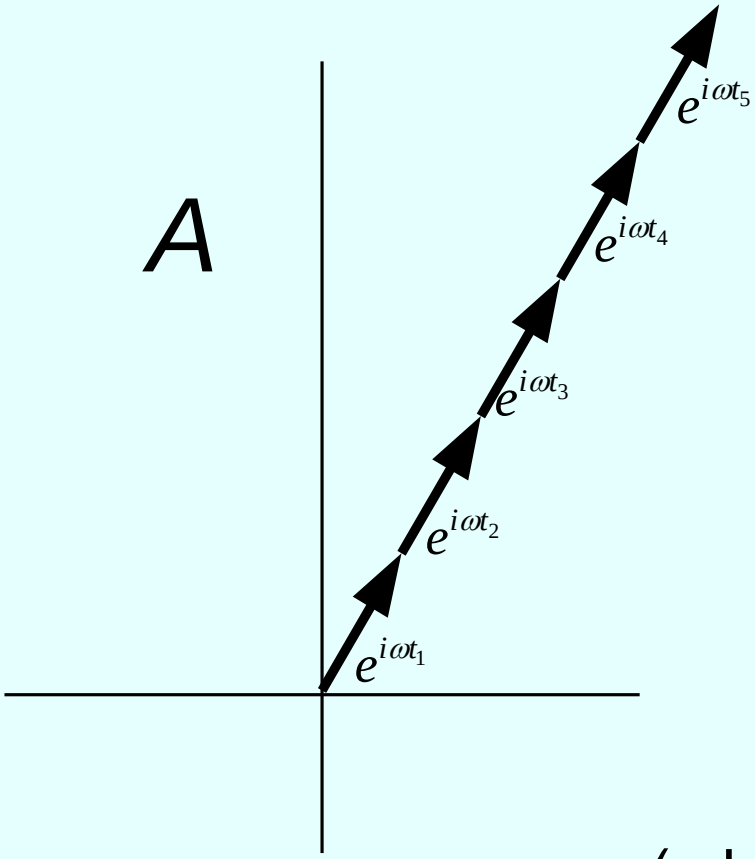
Прохождение импульсов излучения от разных излучателей через монохроматор

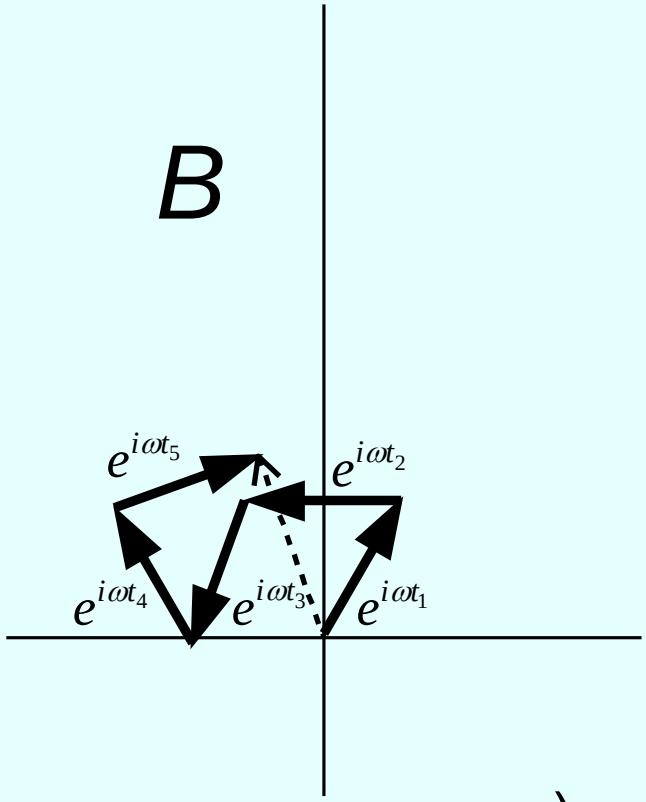


$$E_M(t) = a\sum_n \cos\left[\omega\left(t-t_n\right)\right]\vartheta\left(t-t_n\right)\vartheta\left(T-t+t_n\right) = \mathrm{Re}\left[e^{-i\omega t}a\sum_n e^{i\omega t_n}\vartheta\left(t-t_n\right)\vartheta\left(T-t+t_n\right)\right]$$

Мощность сигнала (спектральная плотность) пропорциональна квадрату амплитуды

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

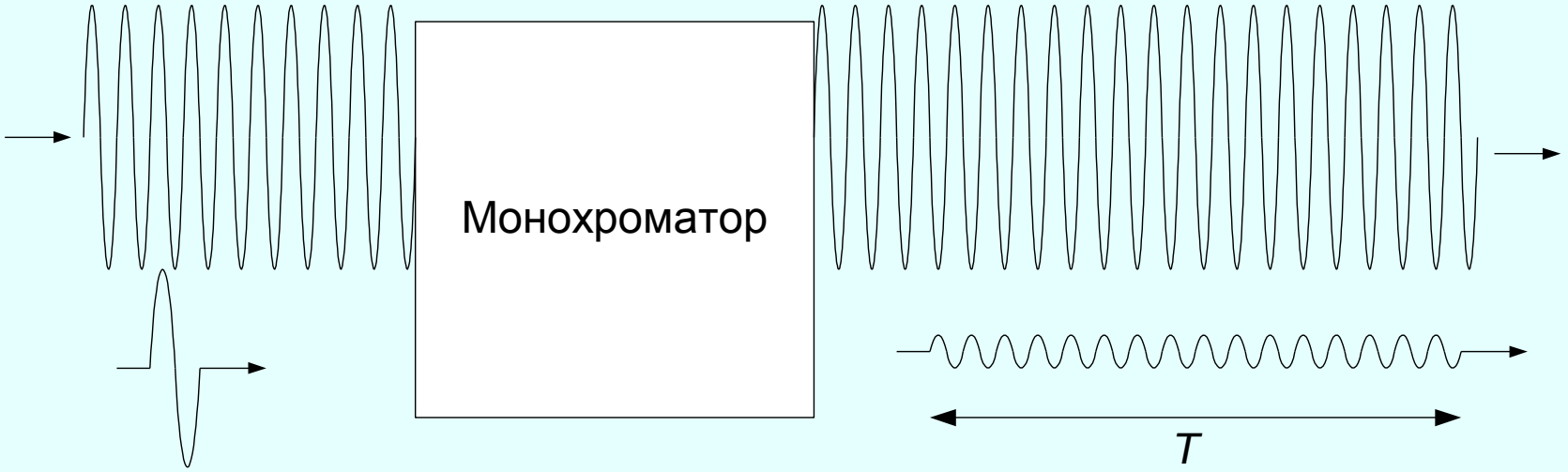




A – когерентное излучение (сфазированные излучатели)

B – некогерентное излучение

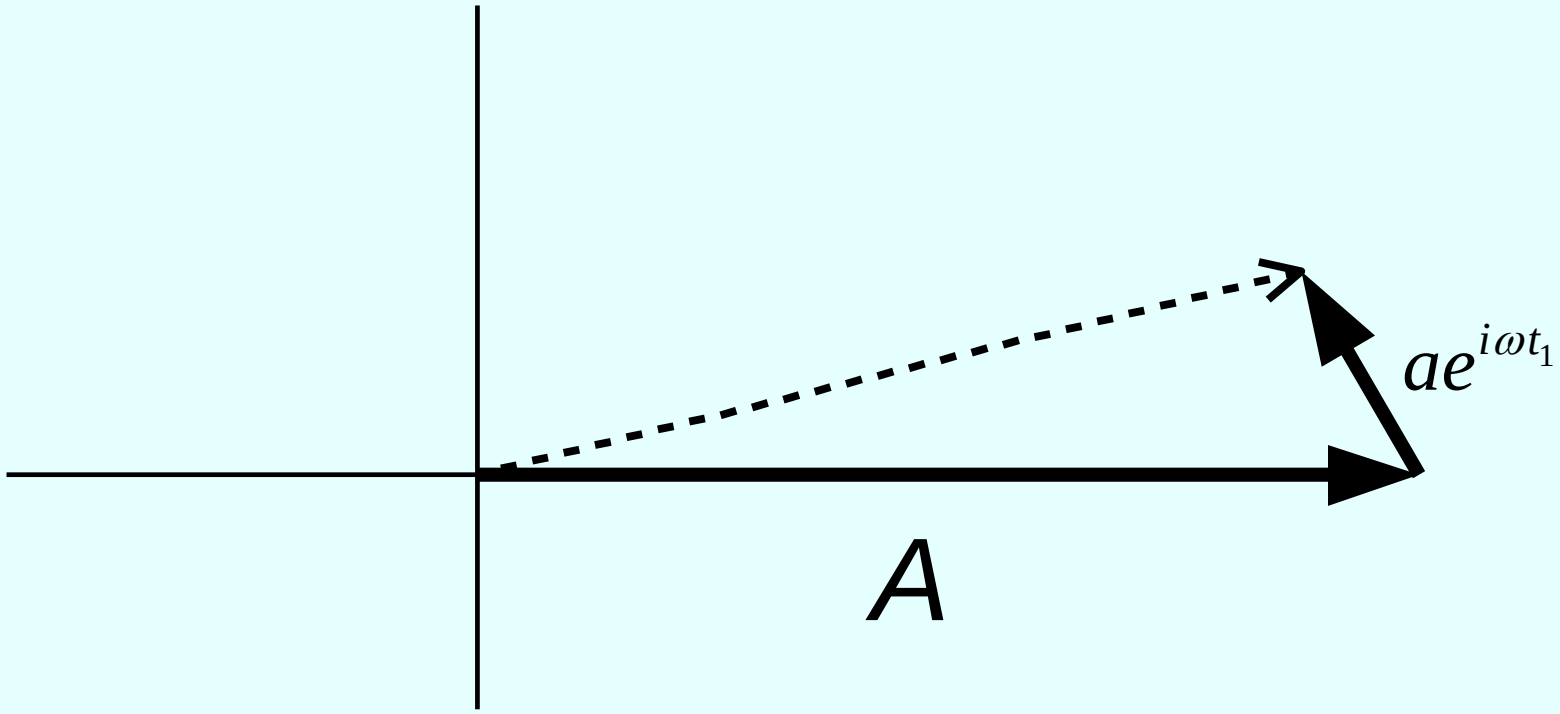
Сложение одного импульса излучения с полем монохроматической волны



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

Изменение энергии волны

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



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.

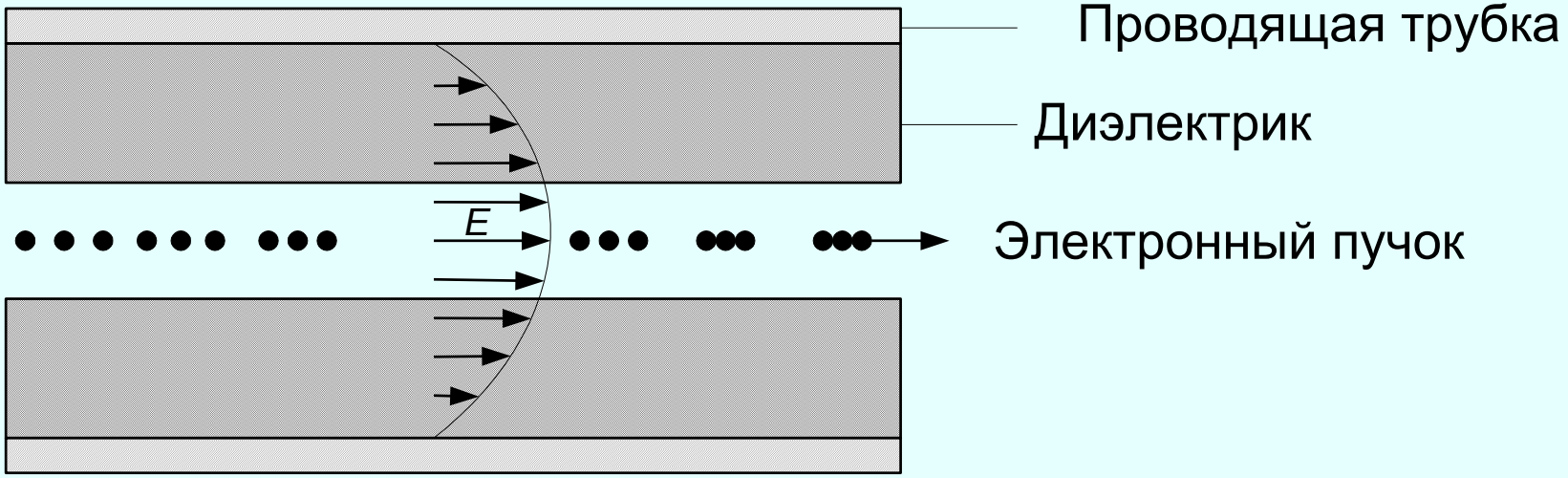
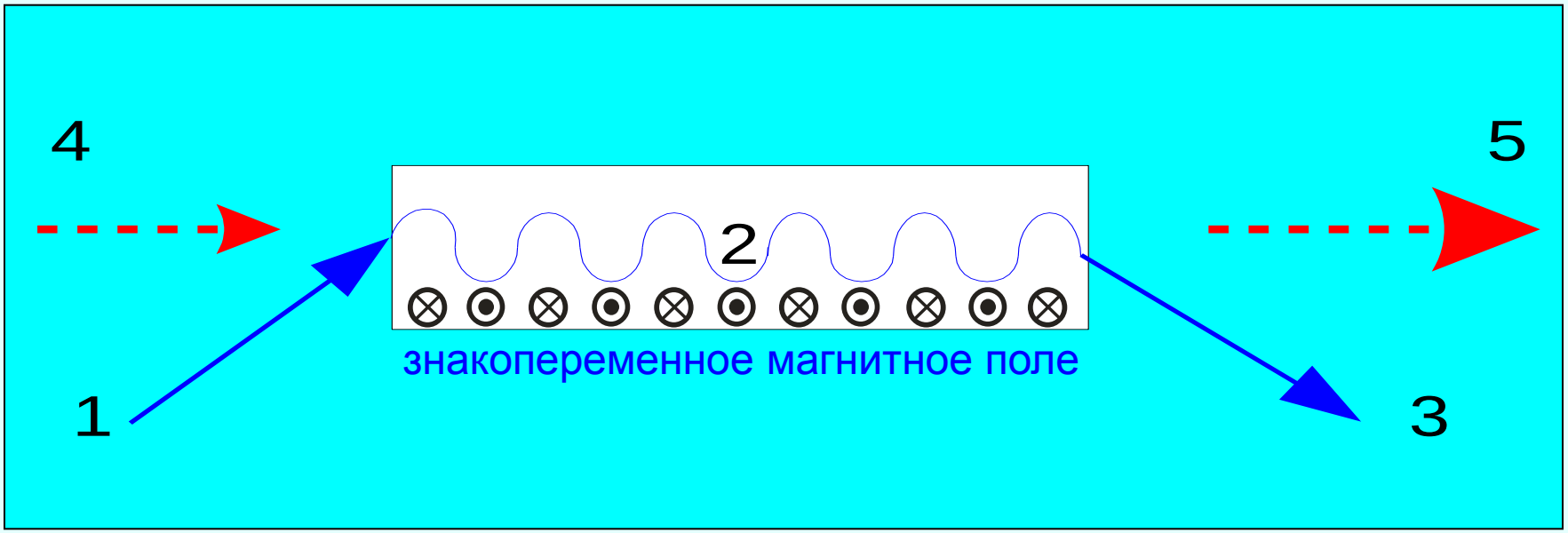
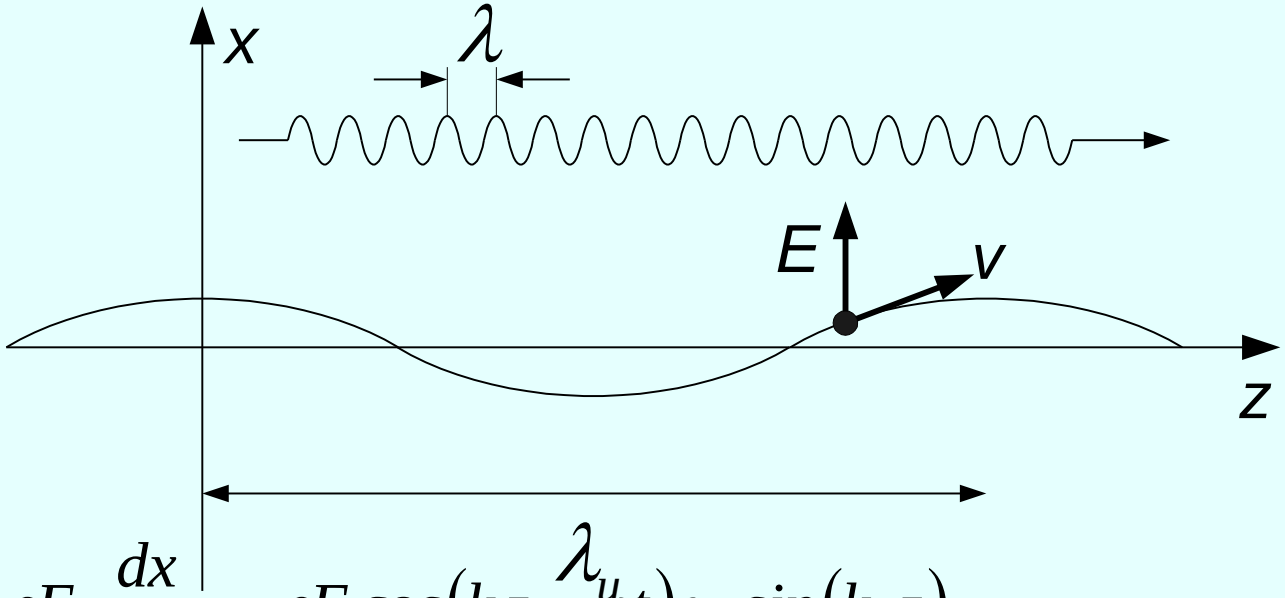


Схема ЛСЭ-усилителя



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 отстает от волны ровно на длину волны, то суммарное изменение энергии во всём ондуляторе может быть значительным.

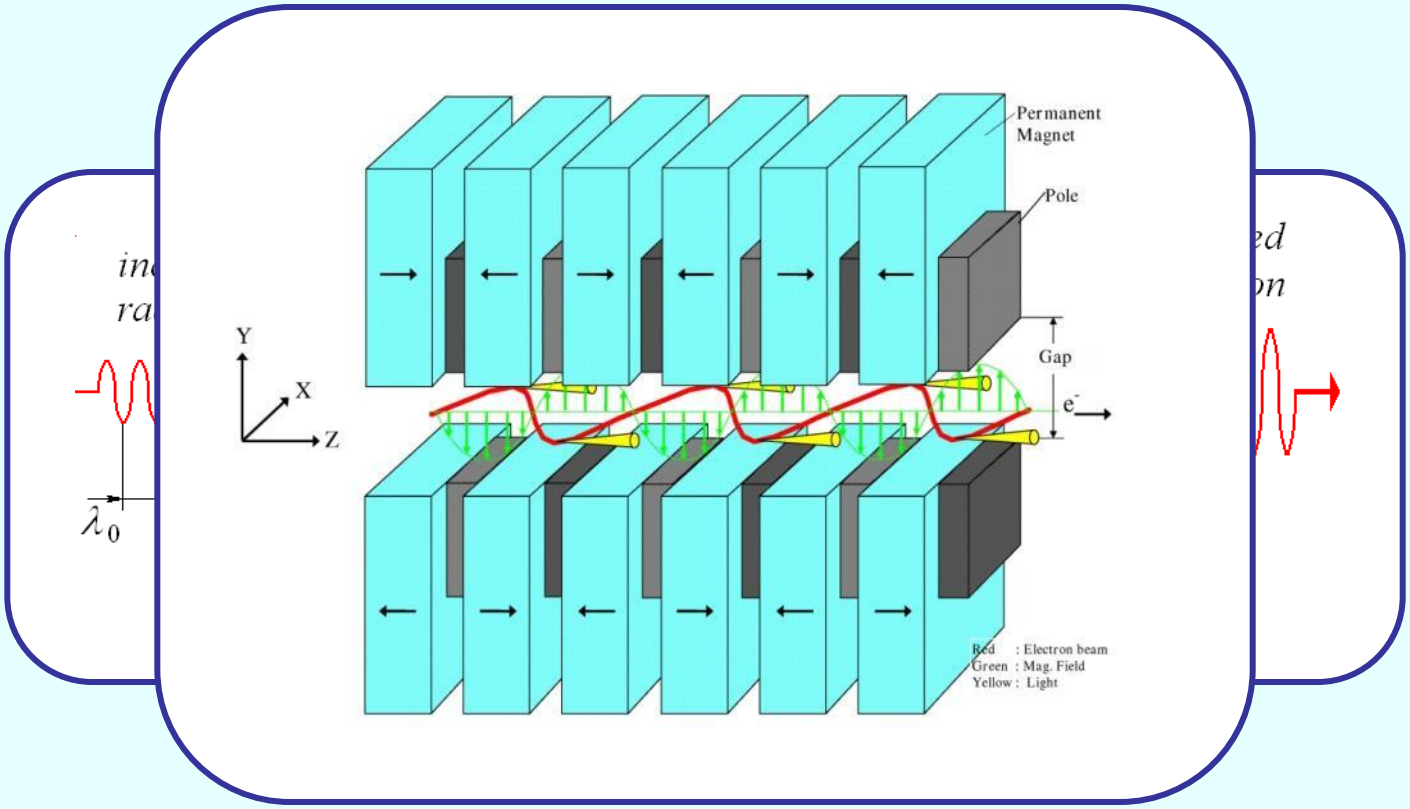


$$\frac{d\varepsilon}{dz} = eE_x \frac{dx}{dz} \approx -eE\cos\left(kz - \omega t\right)\alpha_0 \sin\left(k_u z\right) =$$

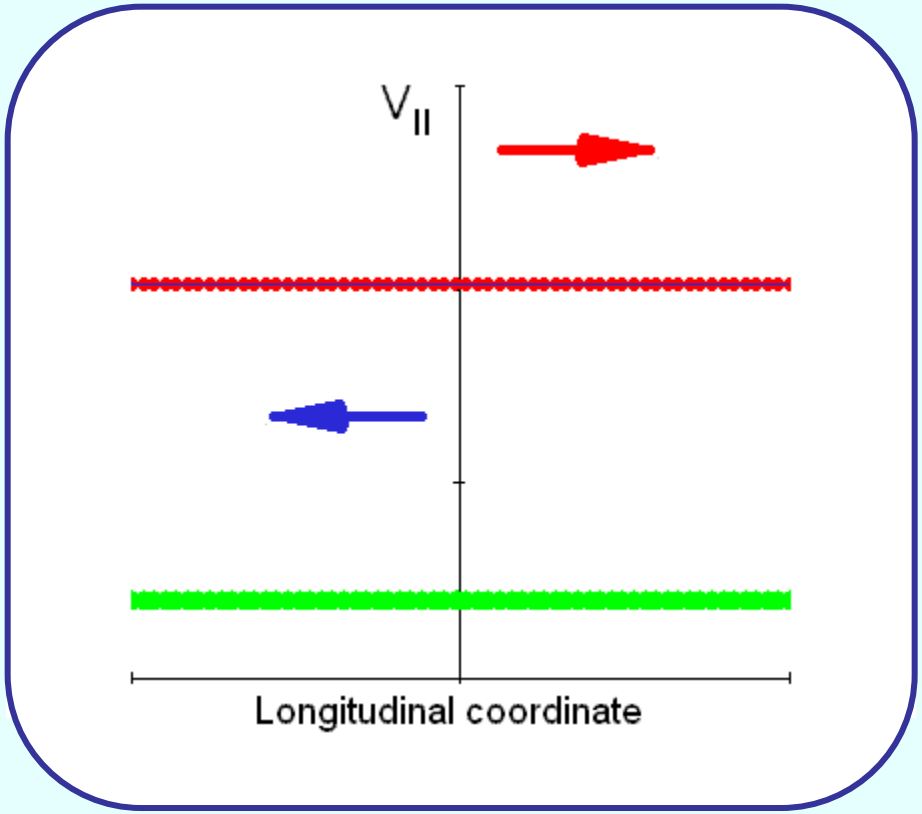
$$-\frac{eE\alpha_0}{2}\left\{\sin\left[\left(k+k_u\right)z - \omega t\right] - \sin\left[\left(k-k_u\right)z - \omega t\right]\right\}$$

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

Принцип работы ЛСЭ



Принцип работы ЛСЭ



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

synchronisme condition

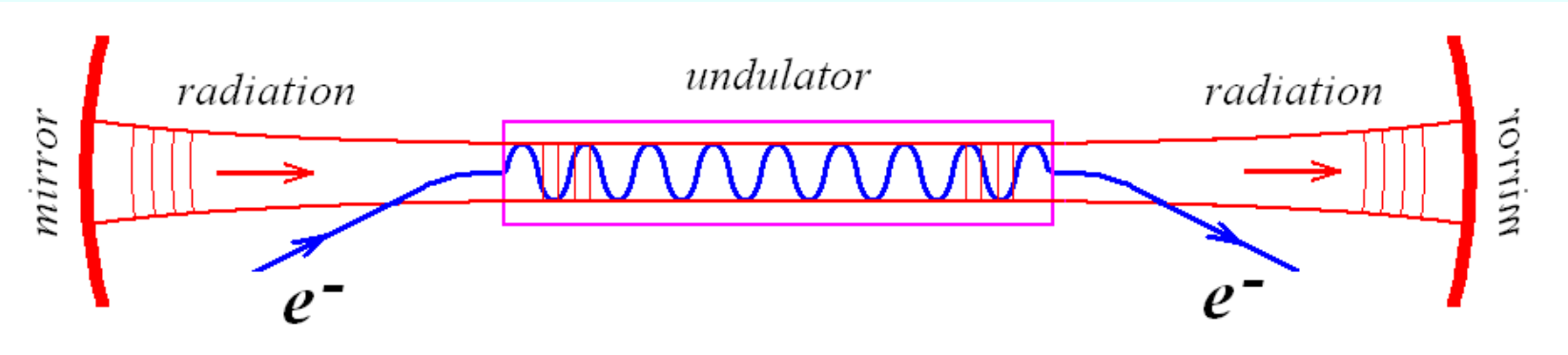
which is necessary for the

energy transfer

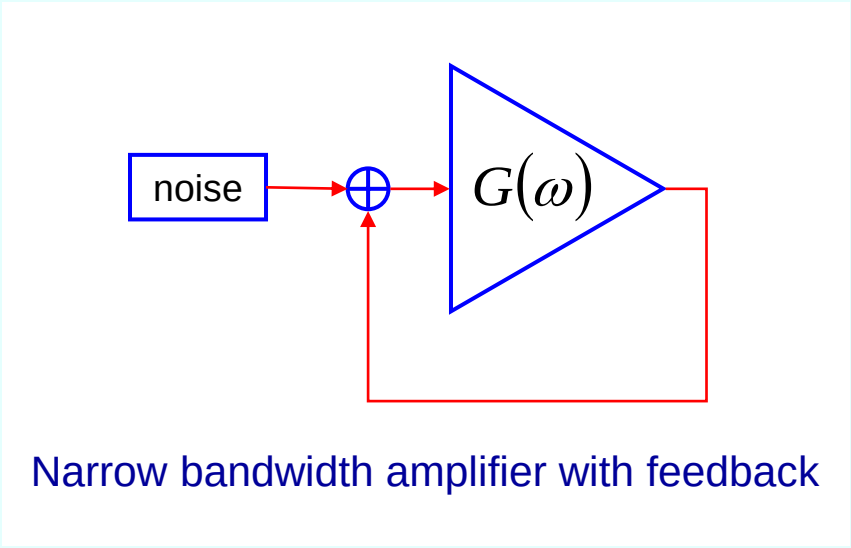
$$\left\langle \frac{d\gamma}{dz} \right\rangle = \frac{e}{mc^3}\langle \mathcal{E}_x V_x \rangle$$

Принцип работы ЛСЭ

ЛСЭ - осциллятор



Эквивалентная схема



Narrow bandwidth amplifier with feedback

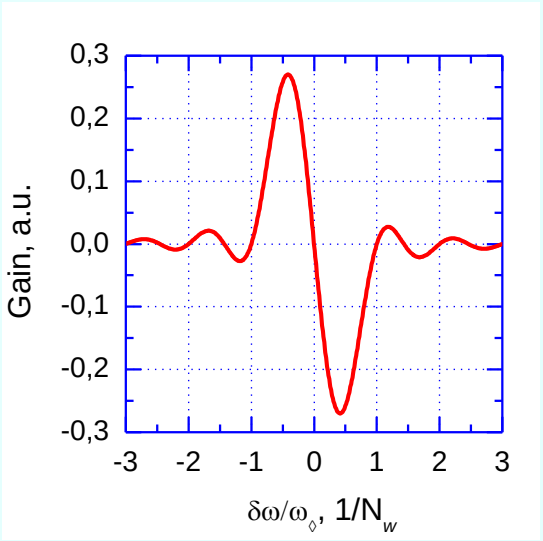
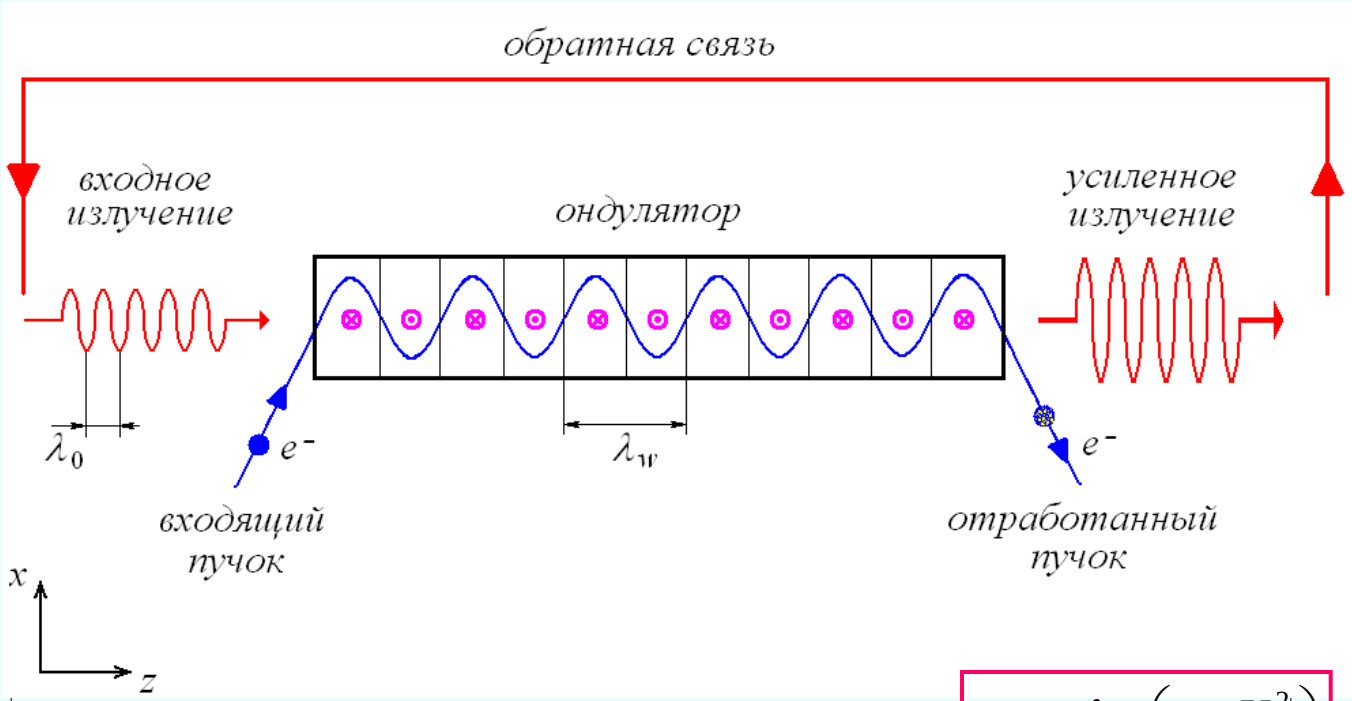
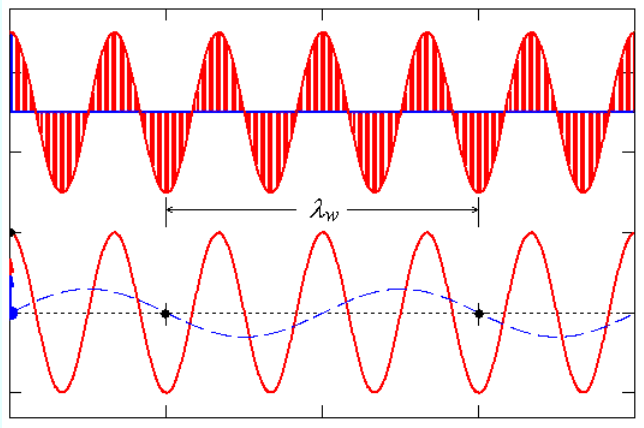


Схема классического ЛСЭ





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

условие синхронизма

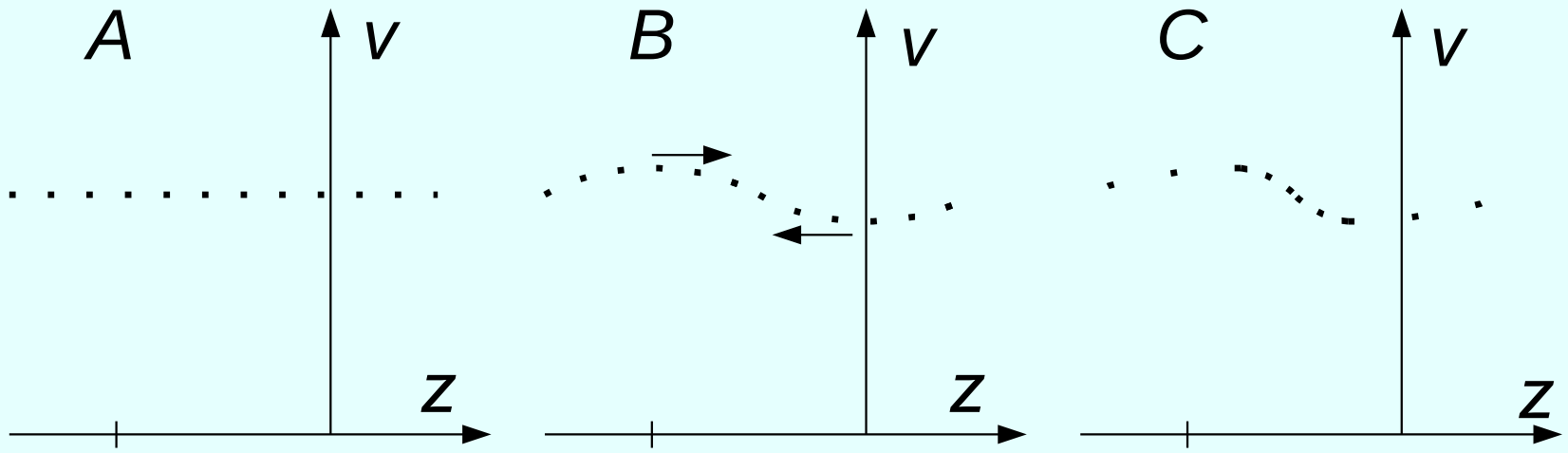
при котором происходит максимальная

передача энергии

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

скорость частицы меняется синхронно с электрическим полем волны

Группировка электронов из-за модуляции энергии (и, следовательно, скорости v)



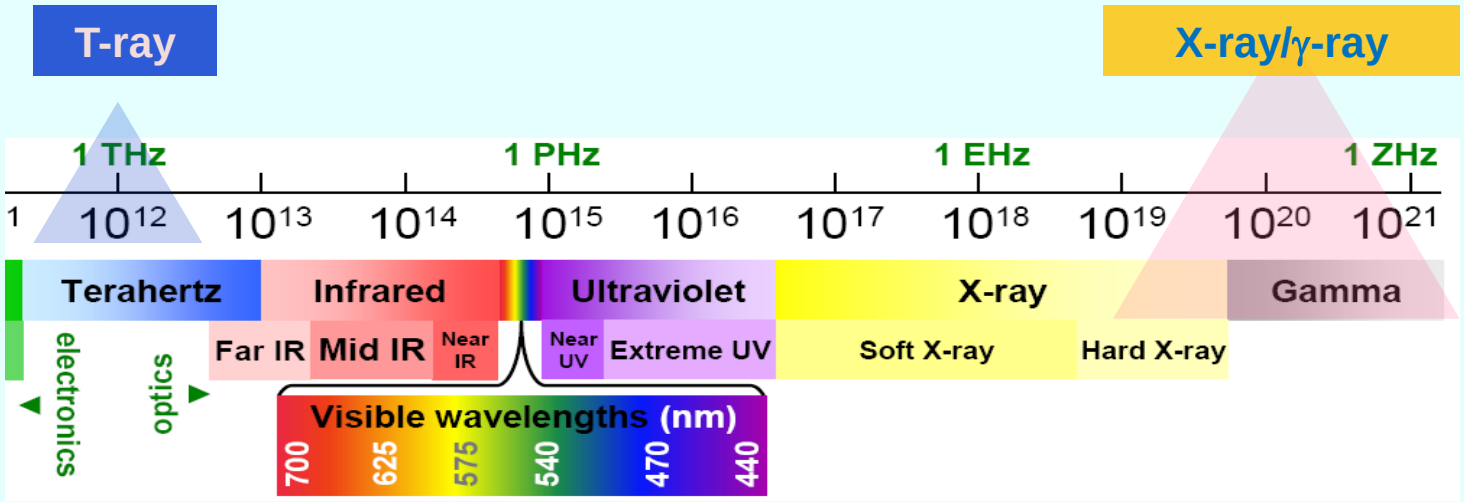
ЛСЭ перекрывают семь порядков по длинам волн излучения – от 1 мм до 0,1 нм.

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 и Японии. Новые рентгеновские ЛСЭ строятся в Германии, Италии, Англии, Китае и Ю. Корее.

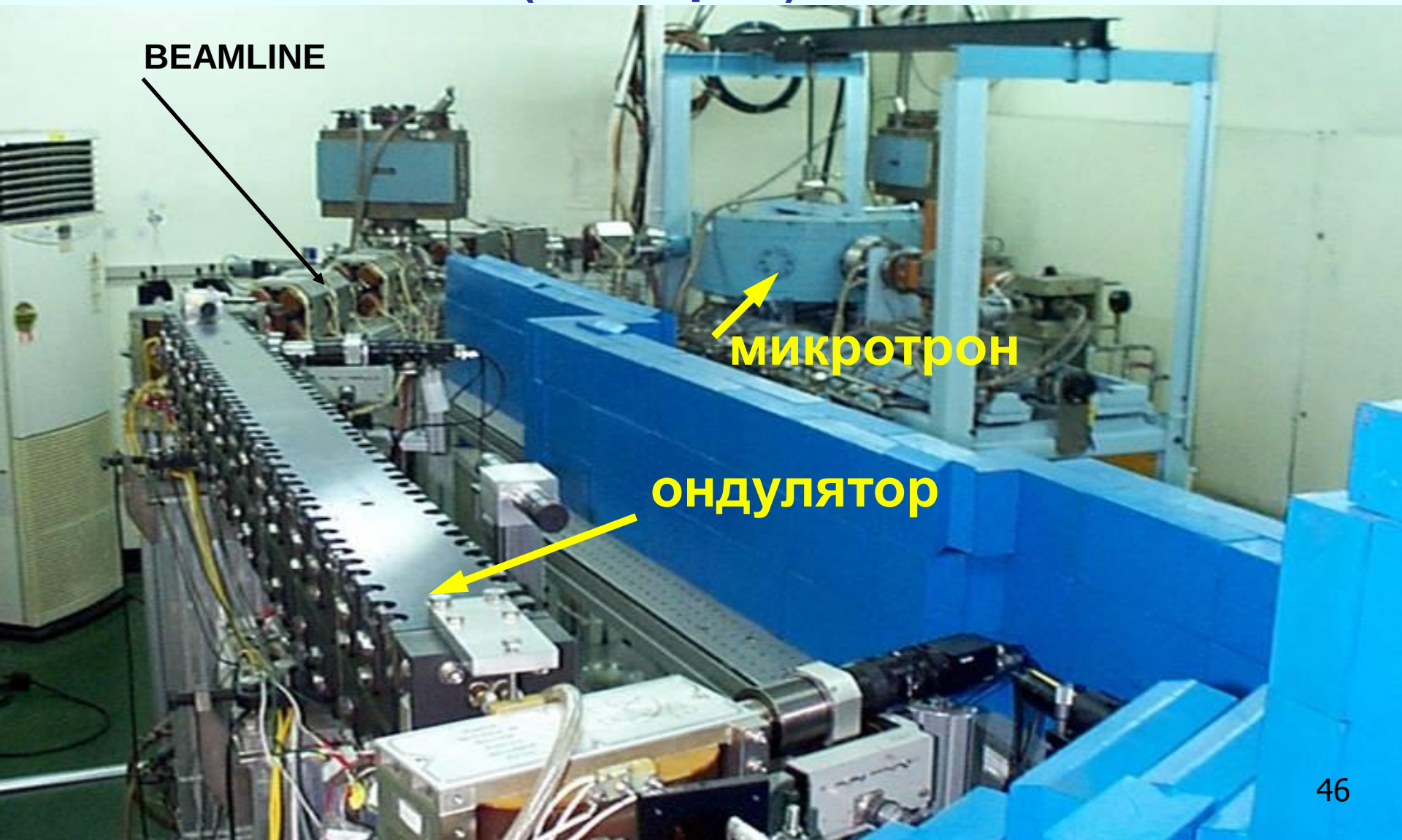
ЛСЭ университета Дюка (США) используется для генерации фотонов с энергией до 100 МэВ (длина волны 10^{-14} м).

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



Примеры: самый маленький и самый большой ЛСЭ

Компактный ЛСЭ субмиллиметрового диапазона. Разработан и построен ИЯФ им. Г.И. Будкера СО РАН для KAERI (Ю. Корея). Работает с 1998 г.



Рентгеновский ЛСЭ (SLAC, США)

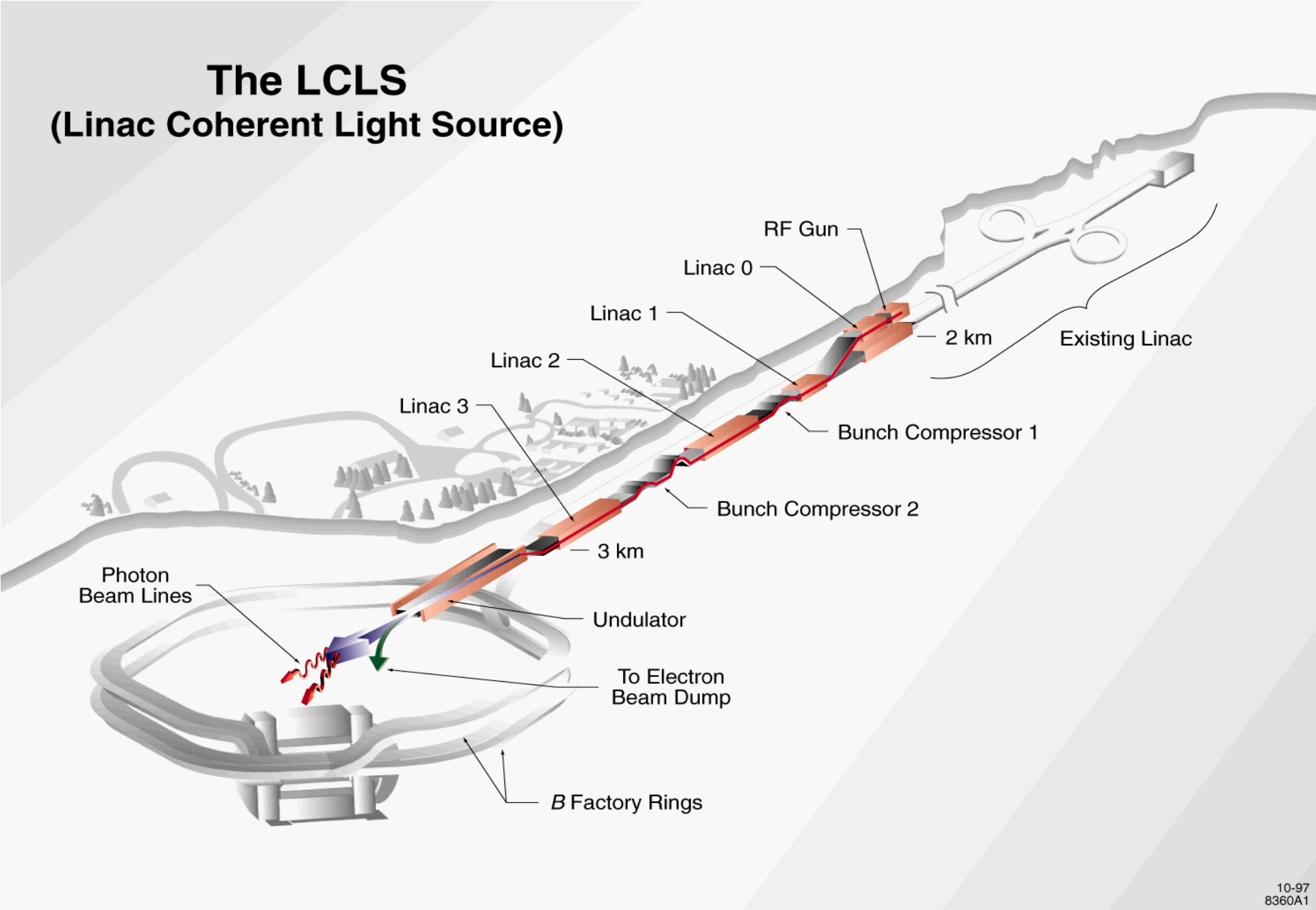
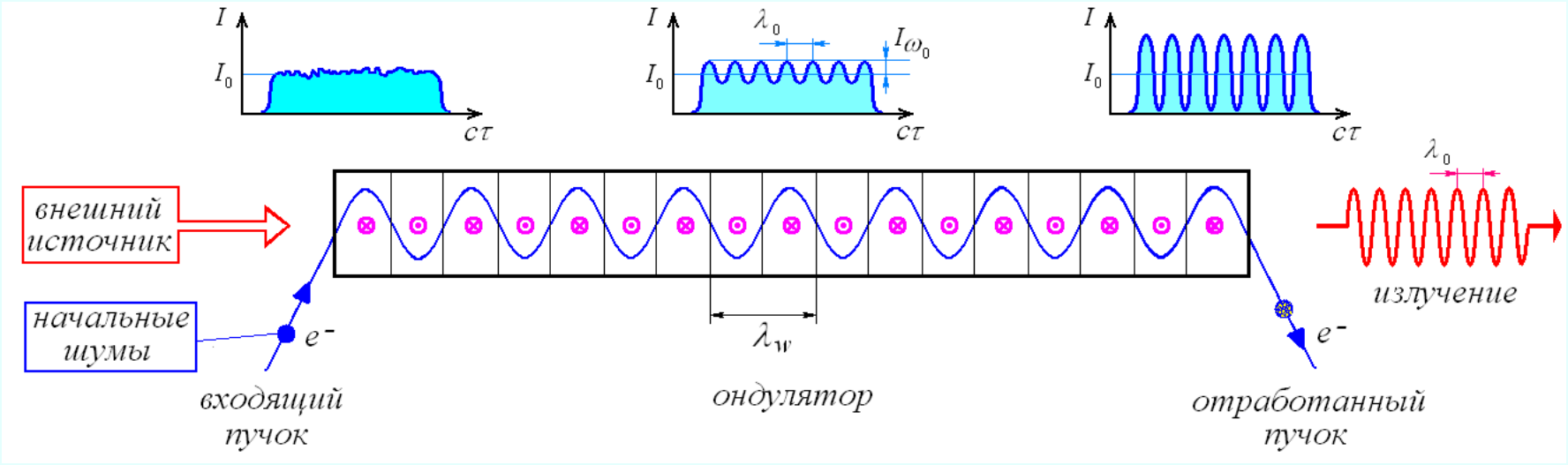
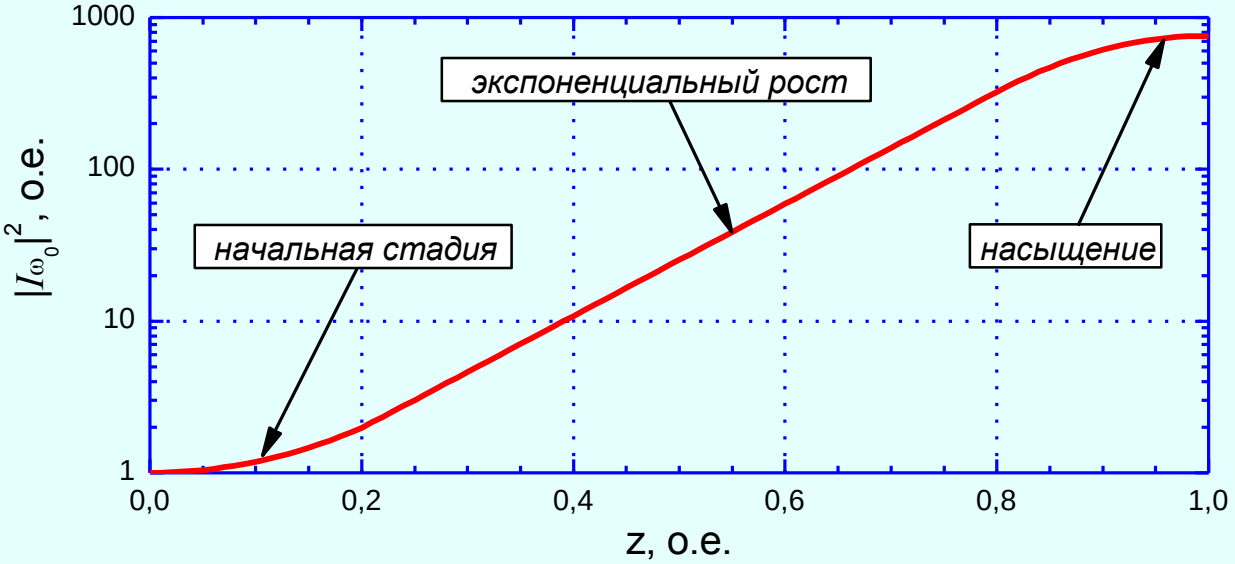


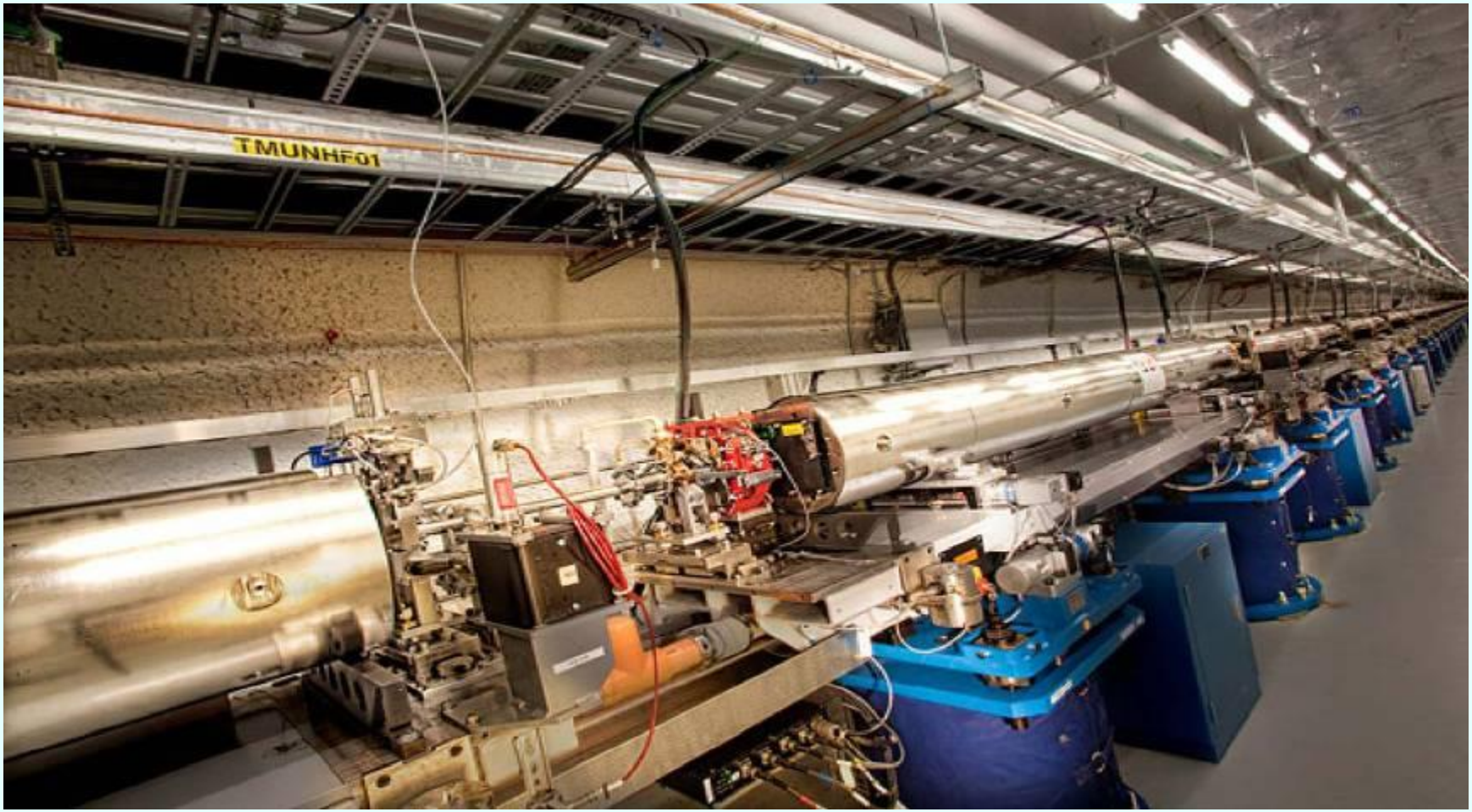
Схема однопроходного ЛСЭ с большим усилением



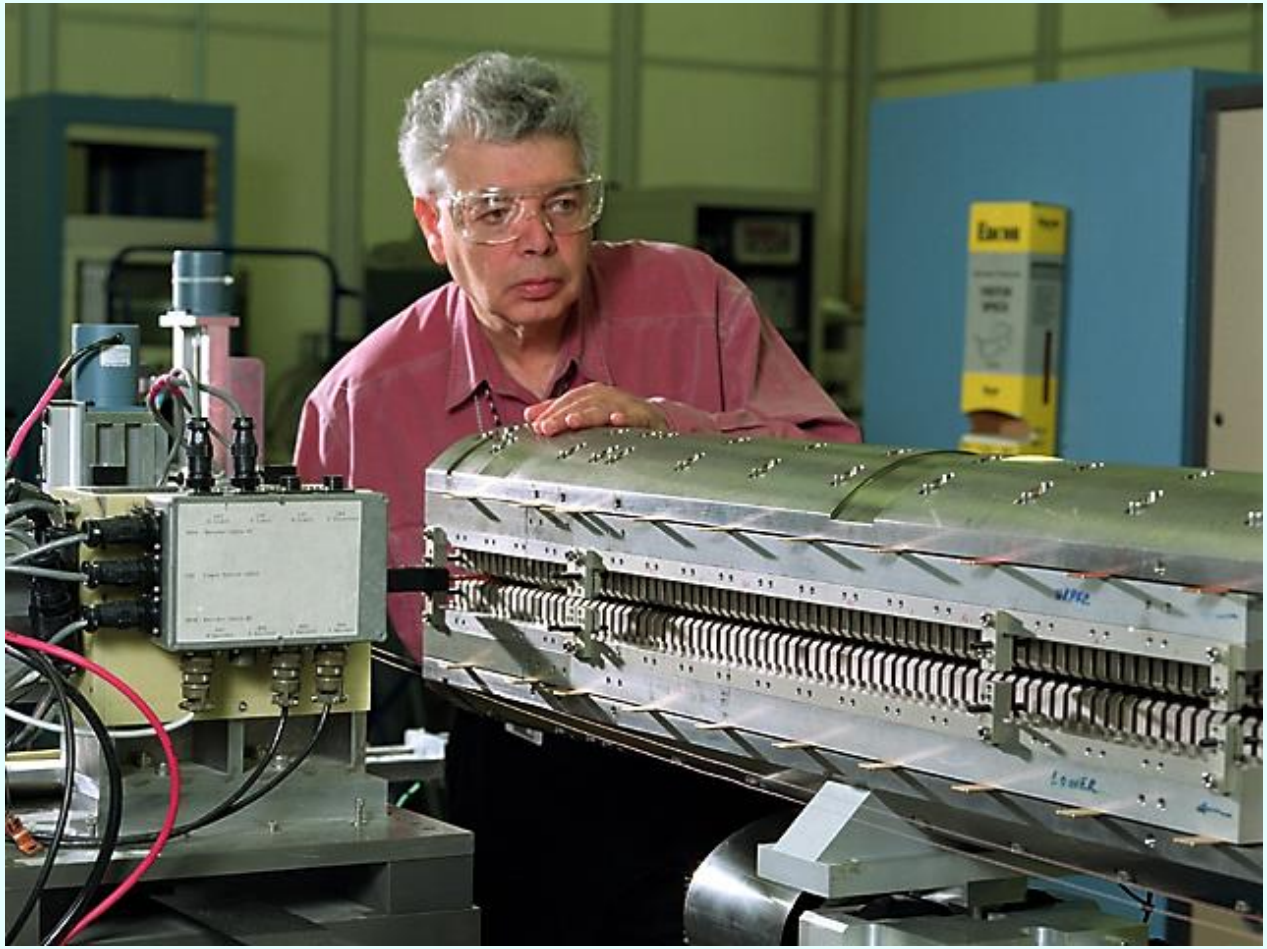


Зависимость степени группировки пучка от его продольной координаты в длинном ондуляторе

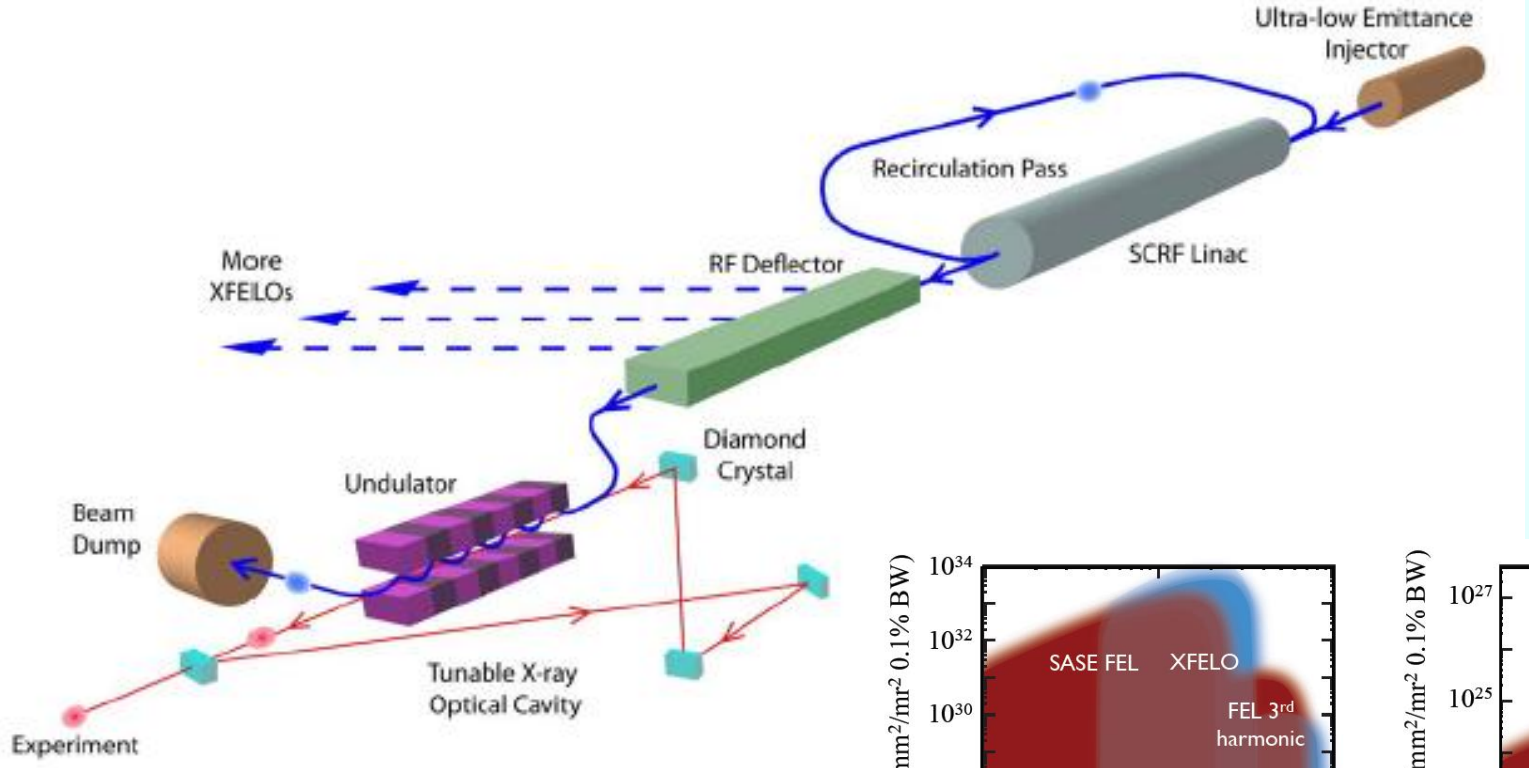
Ондулятор рентгеновского ЛСЭ (длина – около 50 м)



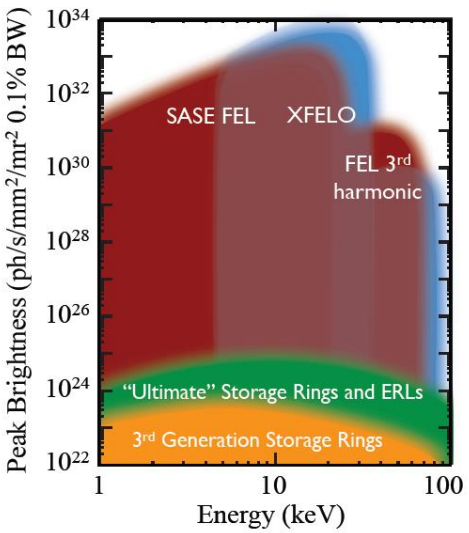
Ондулятор для рентгеновского ЛСЭ

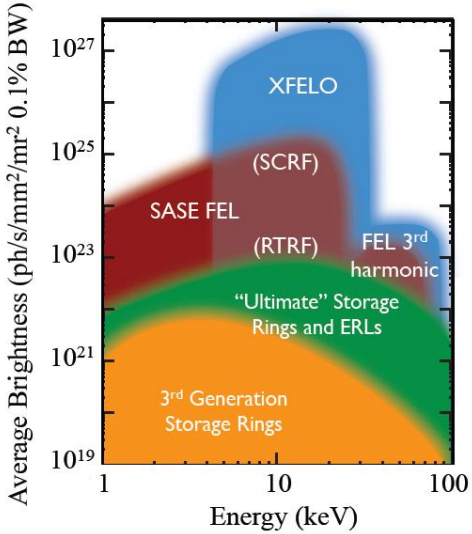


XFEL-O: Would deliver ultra-high spectral purity with high average power



Optical Cavity:
- Proposed by Collela and Luccio, 1984.
- Revisited in 2008, K-J Kim, S. Reiche, Y. Shvyd'k0, PRL 100, 244802.





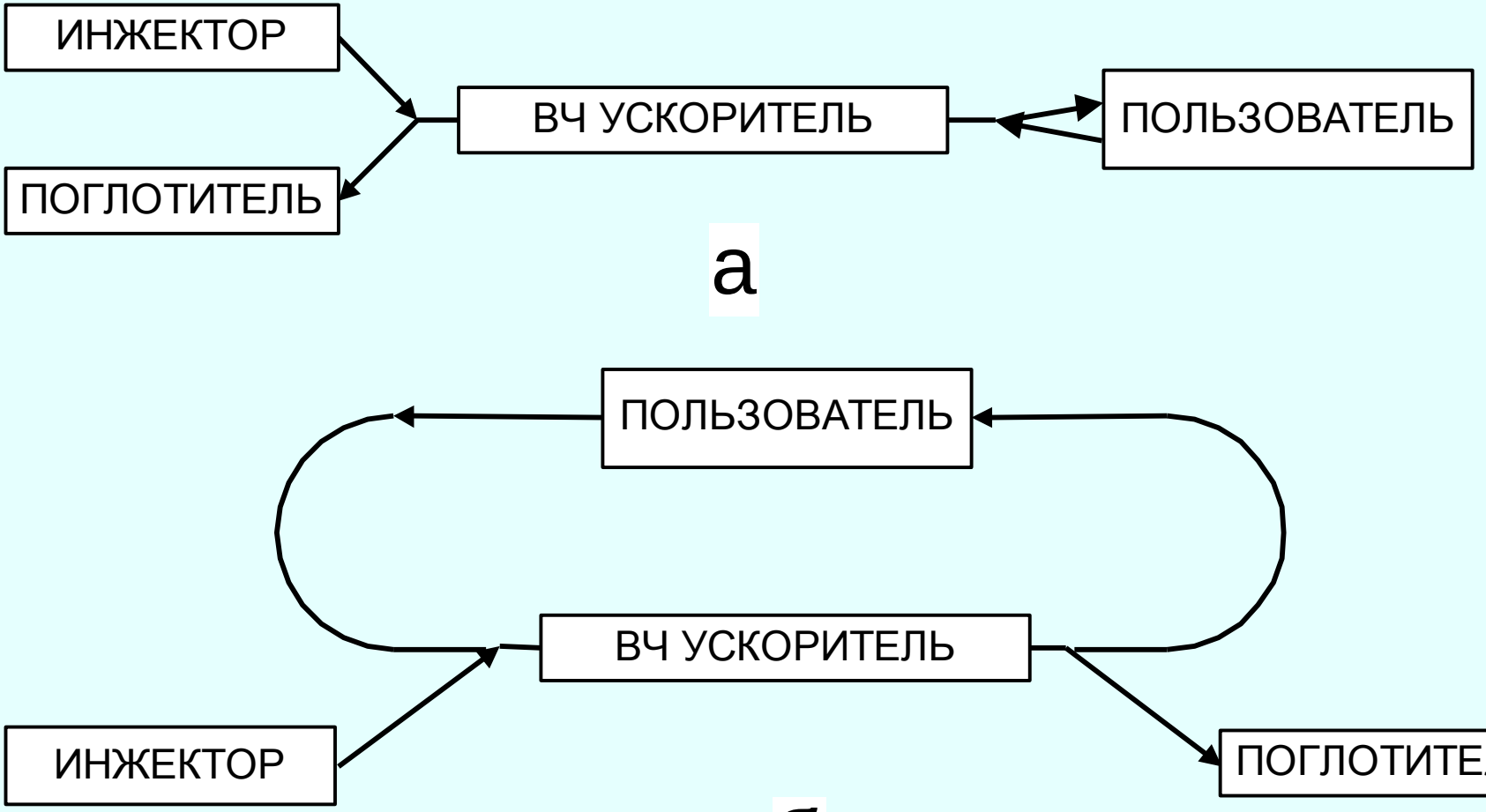
ЛСЭ
ИЯФ им. Г.И. Будкера СО РАН

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

Рекуперация

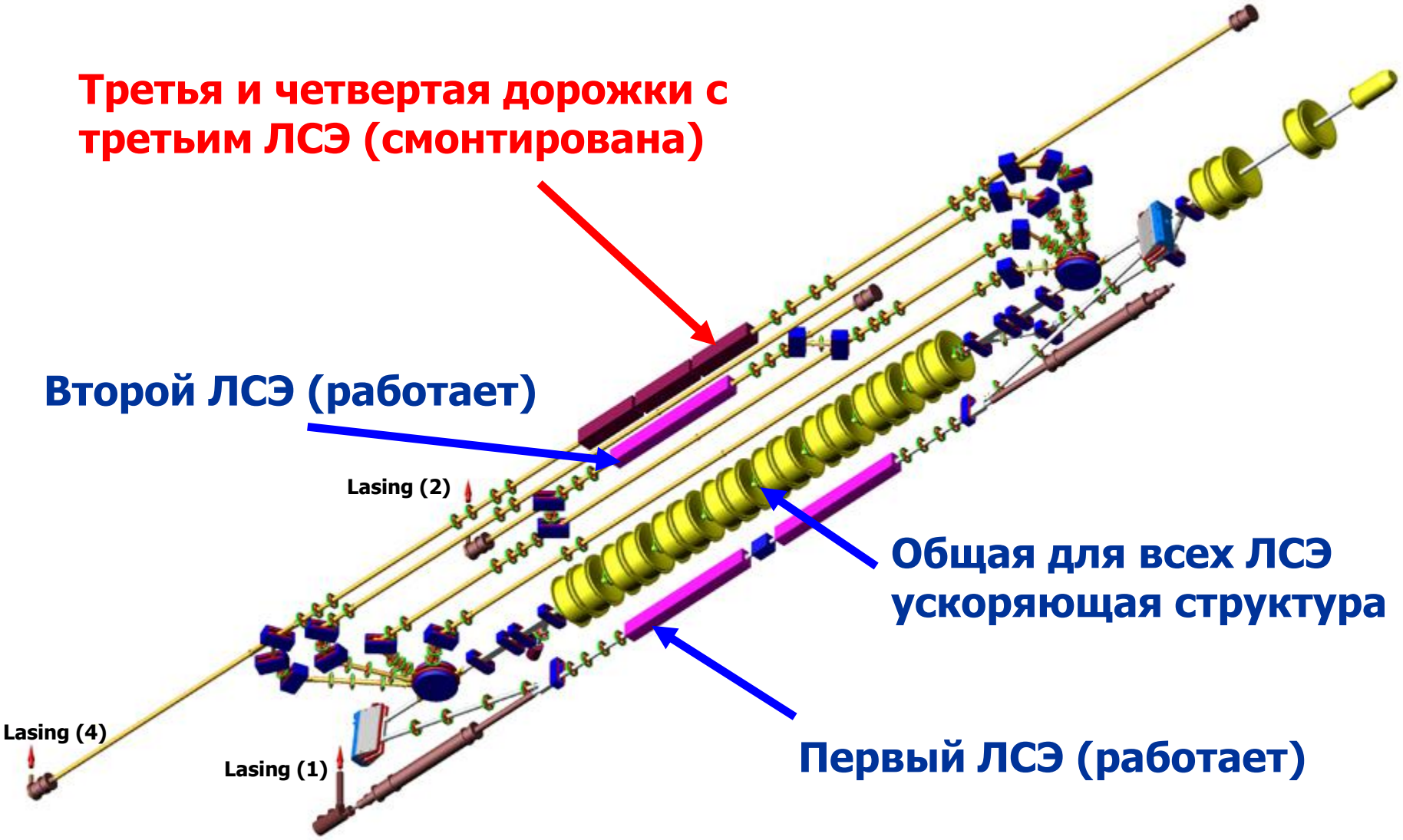
- **снижает радиационную опасность установки и**
- **позволяет повысить средний ток электронного пучка.**

Схемы ВЧ рекуператоров с возвратом пучка в ускоряющие резонаторы

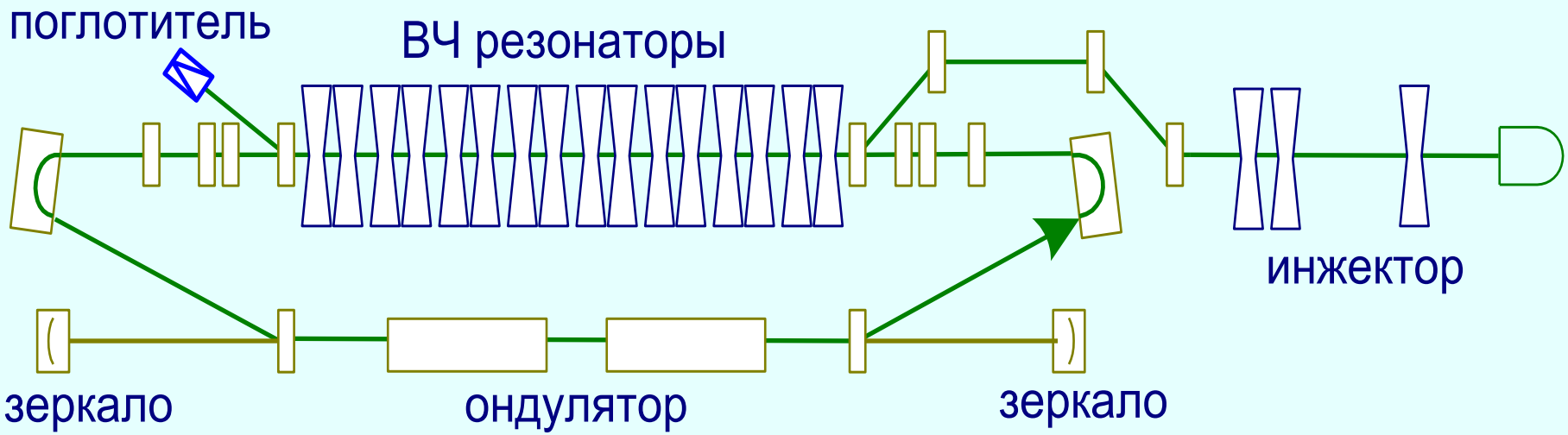


Проблемы: а – встречные пучки; б – фокусировка пучков с разной энергией внутри ускоряющей структуры.

Новосибирский ускоритель-рекуператор с тремя ЛСЭ (вид снизу)



Терагерцовый (субмиллиметровый) ЛСЭ. Работает с 2003 г.

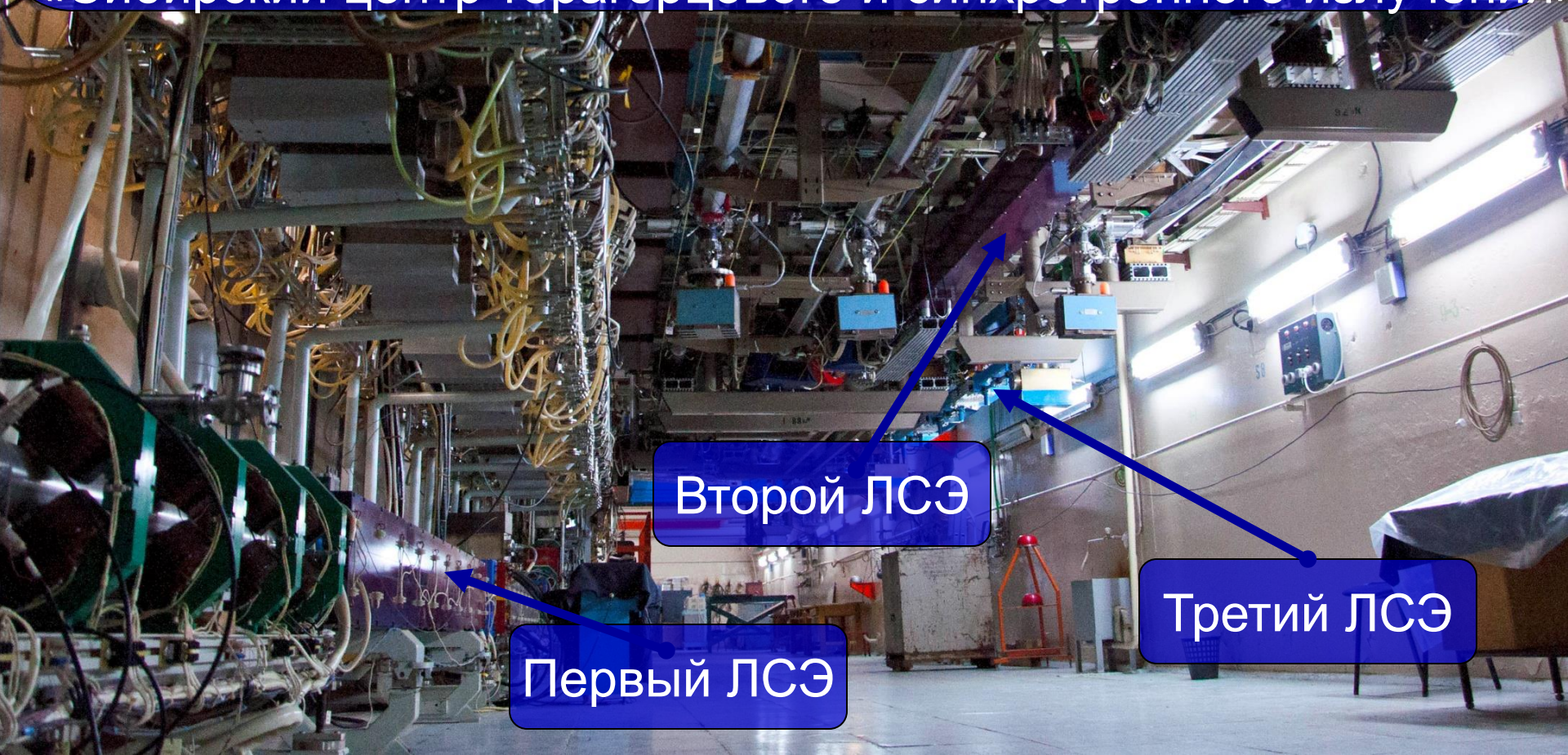


Электроны из инжектора с энергией 2 МэВ ускоряются в ВЧ резонаторах до энергии 11 МэВ, отдают часть энергии в ЛСЭ, а затем – замедляются в тех же ВЧ резонаторах. При этом энергия возвращается в резонаторы. Электроны с низкой (2 МэВ) энергией отводятся в поглотитель.

Субмиллиметровый ЛСЭ (2003)

В 2015 г. на первом и единственном в мире многодорожечном ускорителе-рекуператоре ИЯФ им. Г. И. Будкера СО РАН запущ третий лазер на свободных электронах (ЛСЭ).

Все три ЛСЭ УНУ «Новосибирский ЛСЭ» обеспечивают излуче 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»



Параметры Новосибирских ЛСЭ

	1st	2nd	3d	
Energy, MeV	12	22	**42**	46
Current, mA	30	10	**3**	50
Wavelength, μm	90-240	37-80	**9**	5-20
Radiation power, kW	0.5	0.5	**0.1**	5
Electron efficiency, %	0.6	0.3	**0.2**	0.5

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

В настоящее время в Институте ядерной физики им. Г.И. Будкера СО РАН (Новосибирск) работает два мощных ЛСЭ терагерцового и дальнего ИК диапазонов для Сибирского центра фотохимических исследований. В 2015 г. запущен третий ЛСЭ.

В основе своей полномасштабный проект имеет четырехдорожечный ускоритель-рекуператор с максимальной энергией 40 МэВ.

Полный диапазон перестройки длин волн излучения трех лазеров, установленных на 1, 2 и 4 дорожках полномасштабного ЛСЭ, будет составлять от 5 до 250 микрон.

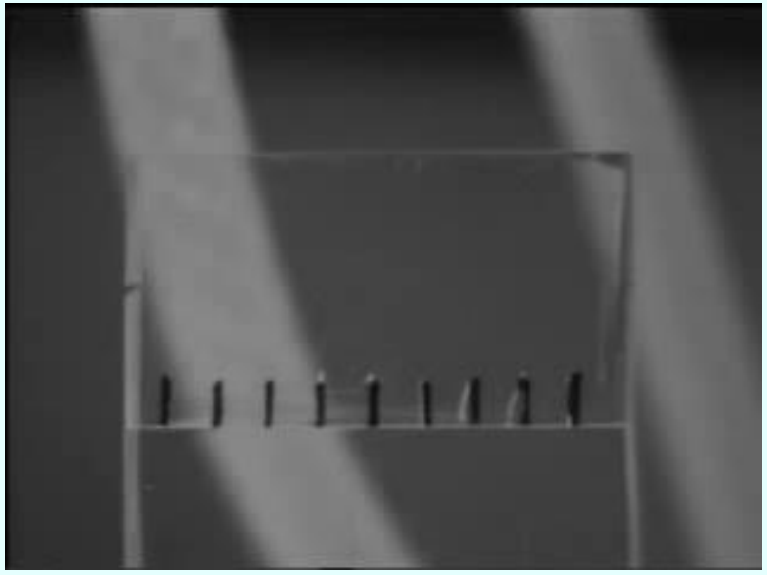
Эта установка предоставляет научным учреждениям России возможность проведения уникальных исследований.

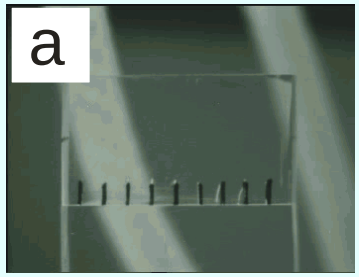
По средней мощности излучения (0,5 кВт) Новосибирский ЛСЭ значительно превосходит аналогичные зарубежные установки в своих диапазонах длин волн (40 – 80 и 110 – 240 микрон).

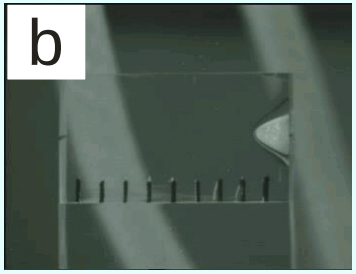
Новосибирский ЛСЭ является уникальным источником когерентного электромагнитного излучения. Рекордно высокая мощность ЛСЭ обусловлена использованием оригинального ускорителя-рекуператора электронов со средним током пучка 30 мА и энергией электронов до 40 МэВ.

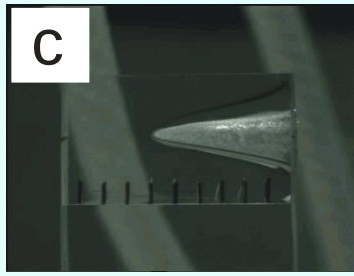
Некоторые эксперименты с использованием излучения НЛСЭ

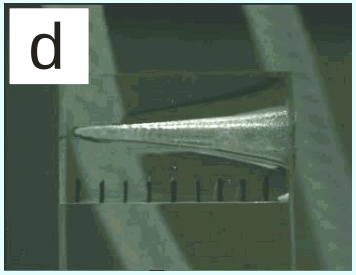
Абляция оргстекла несфокусированным субмиллиметровым излучением Новосибирского ЛСЭ

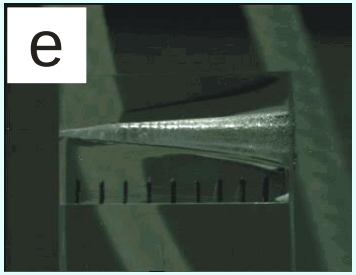


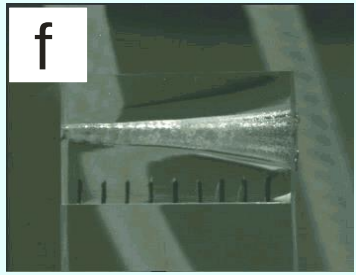












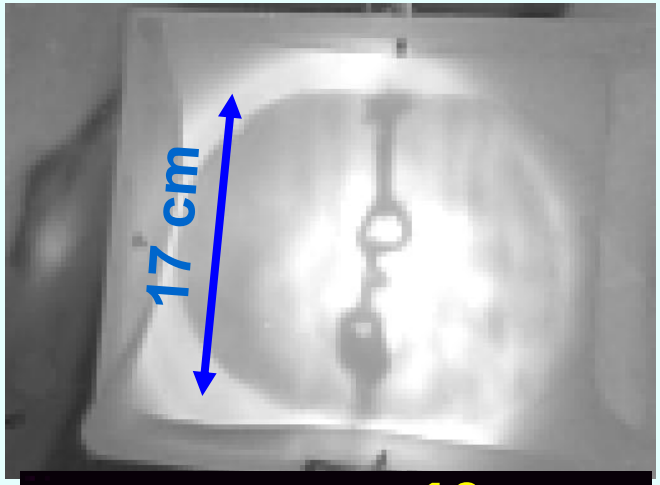
- Несфокусированный лазерный пучок просверливает отверстие длиной 50-мм оргстекле за 3 минуты
- Горения не наблюдается
- Высокая частота повторения позволяет исследовать механизм абляции в ранее недостижимых условиях
- Возможно производство наноматериалов

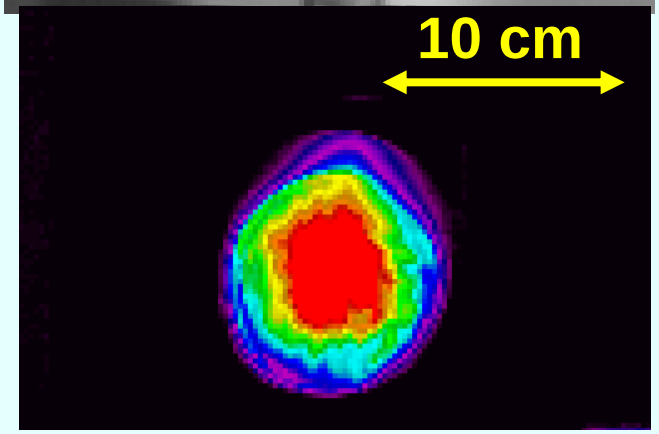
Непрерывный оптический разряд в воздухе и аргоне атмосферного давления

- Непрерывный оптический разряд был получен при фокусировке излучения параболическим зеркалом (f=1.0 cm) непосредственно после выходного зеркала

Визуализация субмиллиметрового излучения с помощью тепловизора, разработанного Институтом физики полупроводников СО РАН

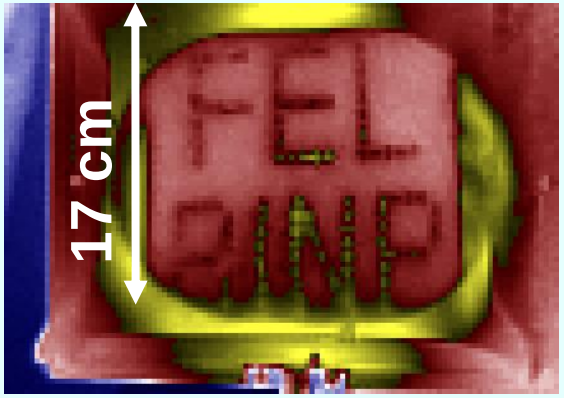
Ключи в непрозрачном конверте

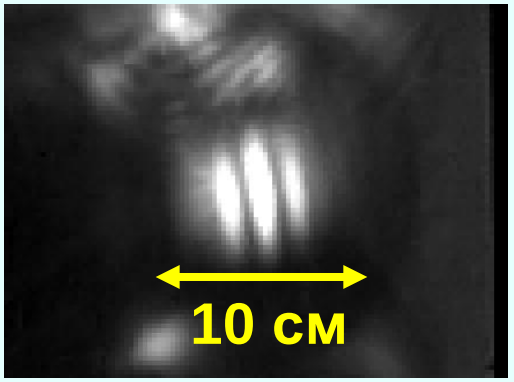




Сечение пучка излучения на расстоянии 13 метров (на выходе оптического канала)

Изображение 6-мм отверстий, регулярно просверленных в металлической пластинке



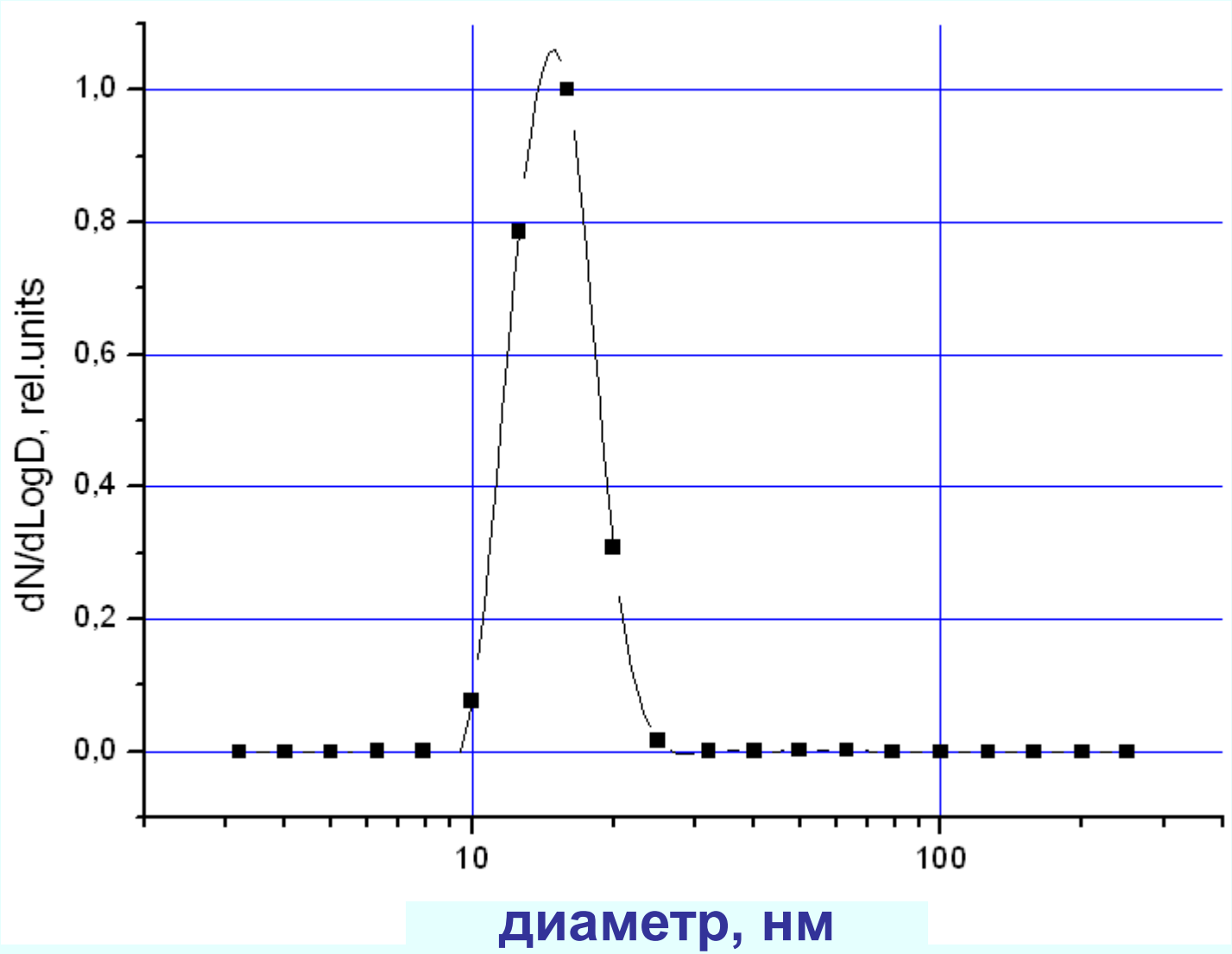


Дифракция на двух круглых отверстиях (диаметр - 6 мм, расстояние - 14 мм)

Абляция мрамора

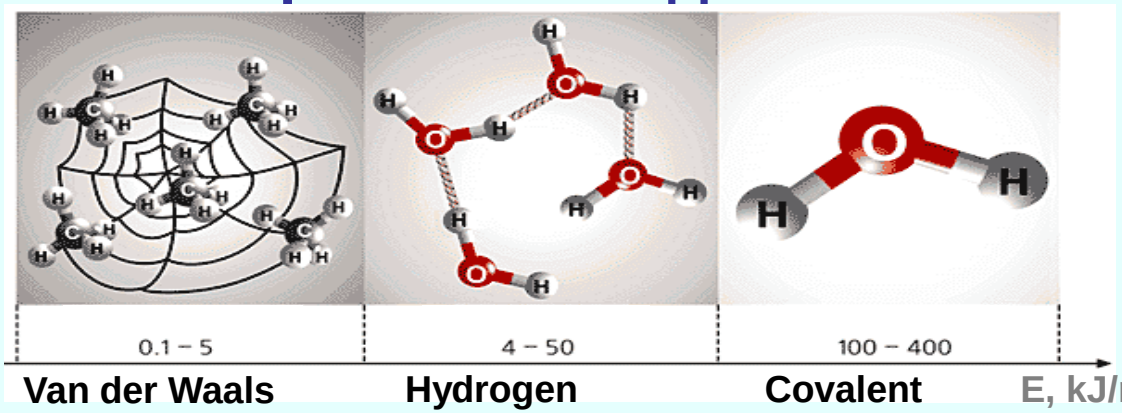
Результат действия субмиллиметрового излучения на мрамор

Распределение продуктов абляции мрамора по эффективным диаметрам (Институт хим. кинетики и горения СО РАН)



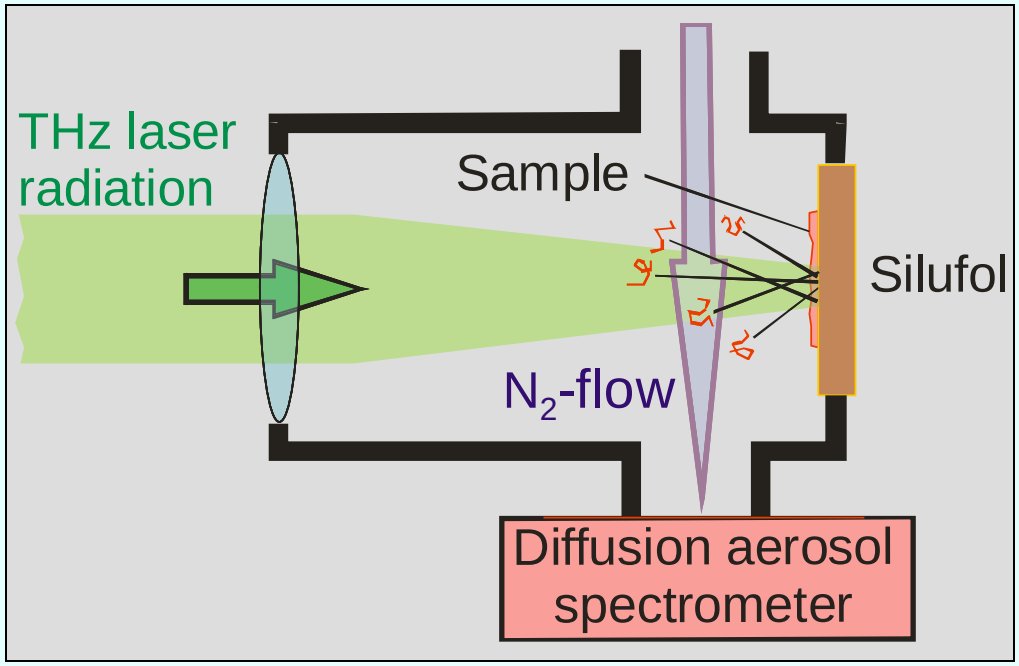
Абляция биологических макромолекул (институты хим. кинетики и горения и цитологии и генетики СО РАН)

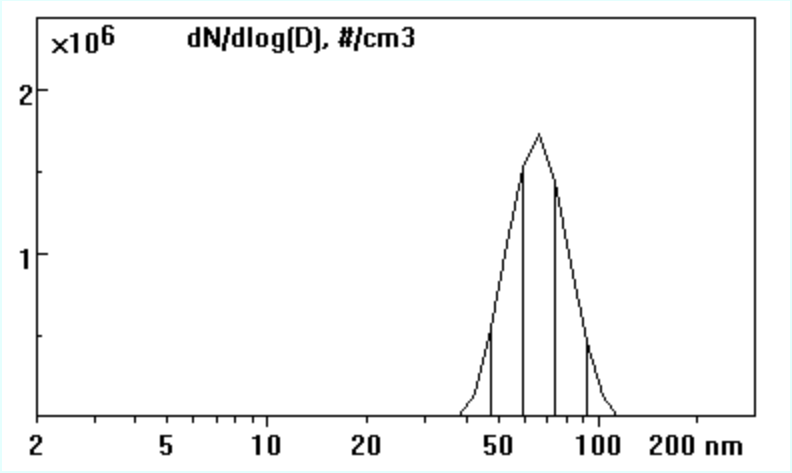
Энергия взаимодействия



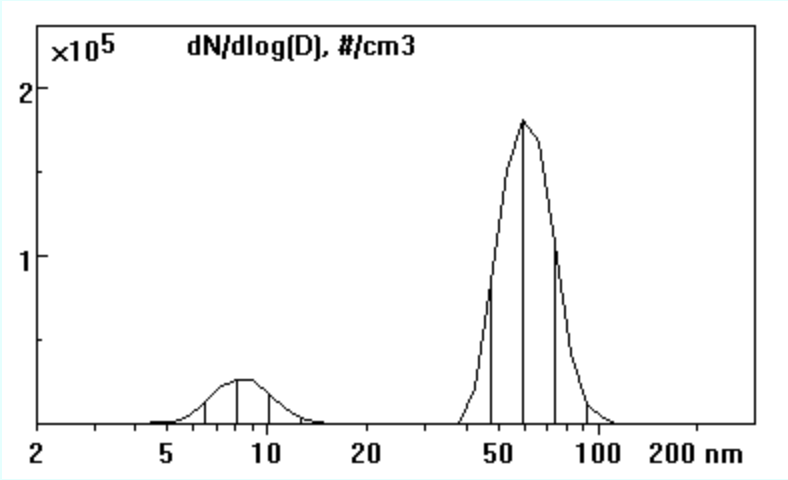
Низкая (менее 0,01 эВ ≈ 1 кДж/моль) энергия фотонов субмиллиметрового излучения позволяет испарять биологические макромолекулы с поверхности твердого образца не разрушая эти молекулы.

«Ультрамягкая» лазерная абляция ДНК





Фаг ДНК

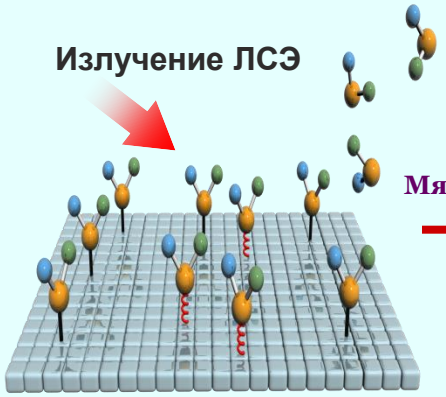


Фаг ДНК + плазмид ДНК

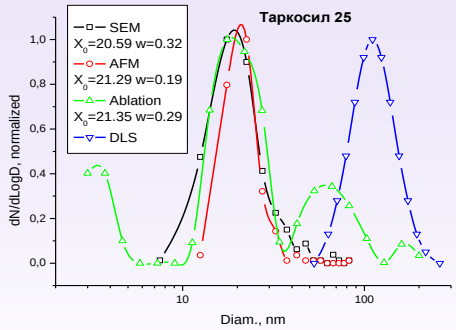
Для оптимальной мощности спектр размеров содержит лишь один пик. При больших мощностях наблюдаются пики, соответствующие фрагментам начальных молекул.

Применение Новосибирского терагерцового ЛСЭ в комплексном подходе к оценке биобезопасности наночастиц

Комплексный подход в нанобиобезопасности состоит в определении размеров, дисперсионного и элементного состава образцов, изучении их распределения в организмах экспериментальных животных, выявлении «органов-мишеней», молекулярных и клеточных процессов, обусловленных воздействием наночастиц.

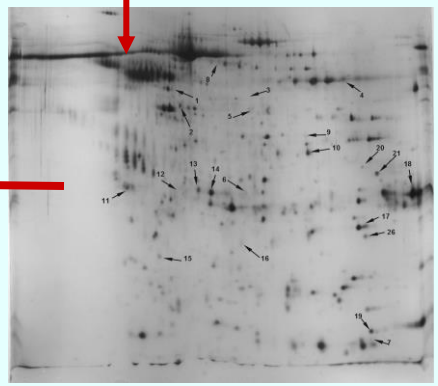


Мягкая абляция

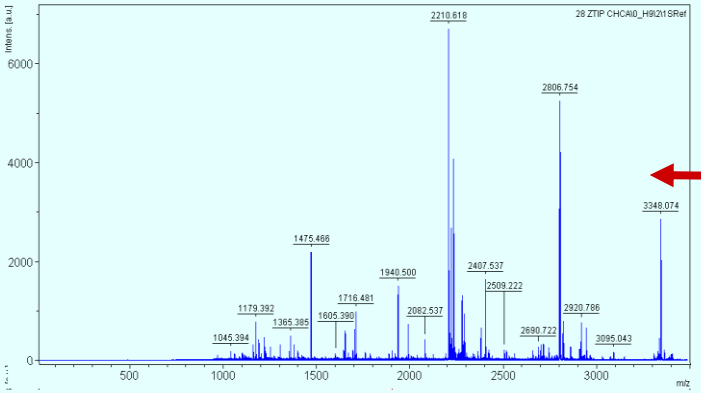


Определение размера и дисперсионного состава наночастиц методом мягкой неразрушающей абляция под действием терагерцового излучения: наночастицы Таркосила 25, SiO2

Аэрозольное введение наночастиц



Протеомная карта белков после введения наночастиц SiO2 (черными треугольниками показаны индуцированные белки)

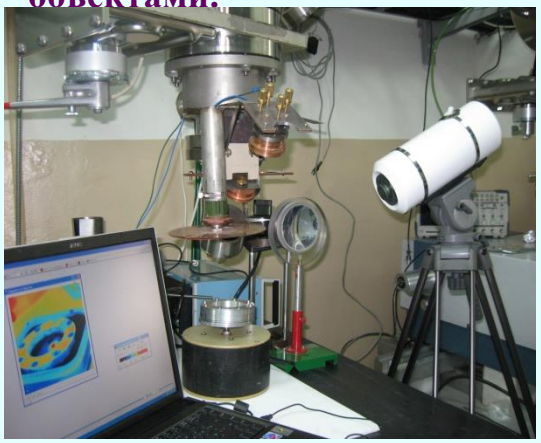


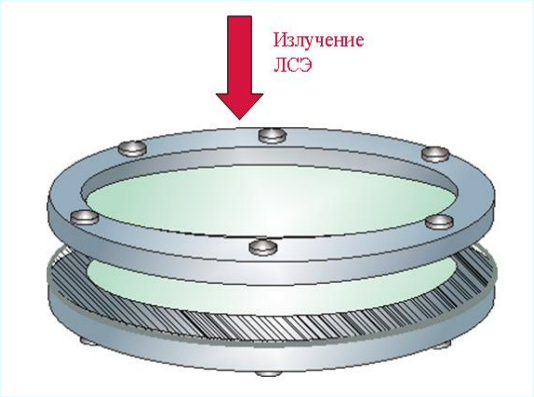
Масс-спектрометрическая Идентификация белков

Методом масс-спектрометрии показано, что в ответ на экспозицию наночастицами Таркосила 25 в легких мышей развивается воспалительный процесс, начинается экспрессия белков аппоптоза и регуляторов клеточного цикла.

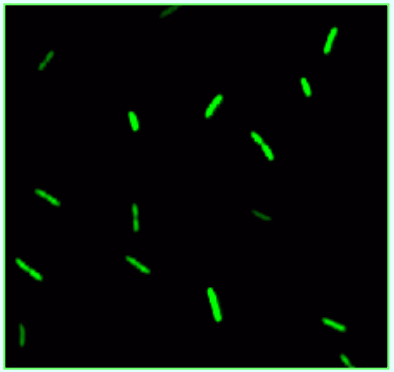
Изучение воздействия терагерцового излучения на биообъекты (новосибирский ЛСЭ)

Терагерцовый диапазон излучения ЛСЭ соответствует области колебаний водородных связей и энергии нековалентных взаимодействий биологических макромолекул. Излучение большой мощности Новосибирского ЛСЭ, созданного в ИЯФ СО РАН позволяет на специально оборудованной биологической станции производить модельные эксперименты с биомакромолекулами и живыми объектами.



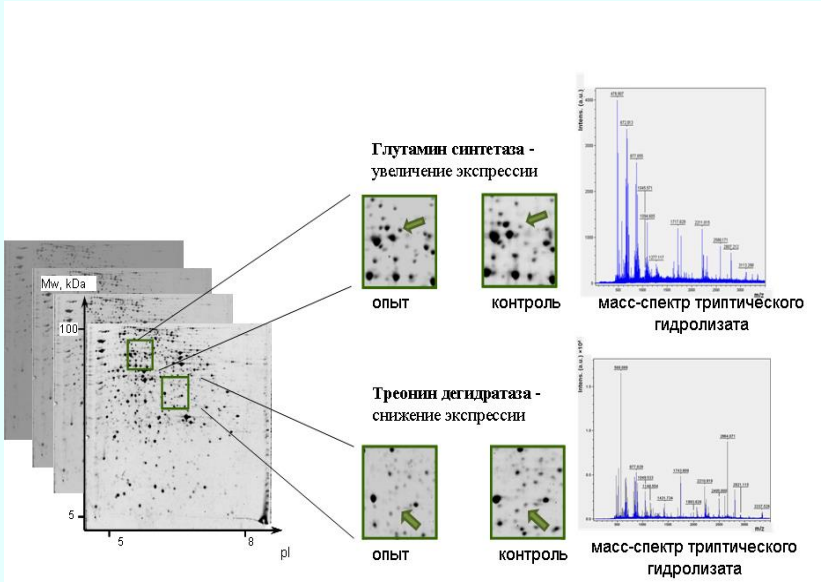


Облучении бактериальных клеток терагерцовым излучением



При облучении бктериальных клеток *E. coli*/pDps-gfp терагерцовым излучением показана экспрессия Gfp-белка.

Методами протеомного анализа с последующей масс-спектрометрией были идентифицированы белки, индуцируемые в клетках E.coli в ответ на терагерцовое излучение.



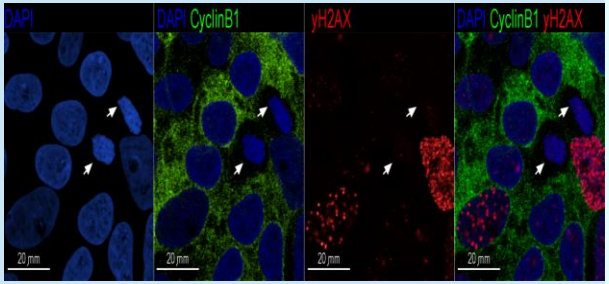
Полученные результаты создают основу для разработки научных основ воздействия электромагнитных полей и высокоэнергетичных частиц на различные уровни организации живых систем.

ИЗУЧЕНИЕ ВОЗДЕЙСТВИЯ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ОБЛУЧЕНИЯ НА МОЛЕКУЛЯРНО-ГЕНЕТИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ КЛЕТОК ЧЕЛОВЕКА

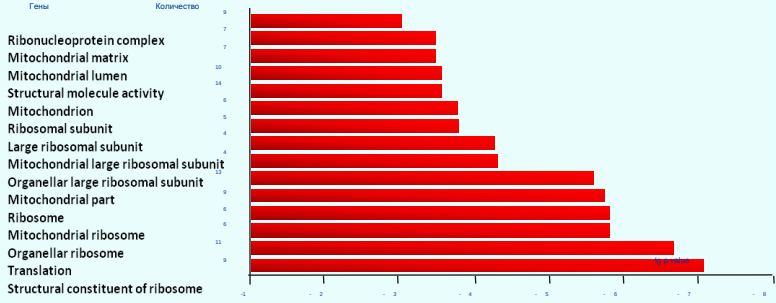
(ИЦиГ СО РАН, ИОГЕН РАН, ИЯФ СО РАН)

Исследовано воздействие на стволовые клетки человека электромагнитного излучения терагерцового диапазона, генерируемого Новосибирским лазером на свободных электронах (ЛСЭ) в диапазоне частот 1,25 – 6 ТГц, в пределах которого находятся резонансы колебаний водородных связей биомакромолекул.

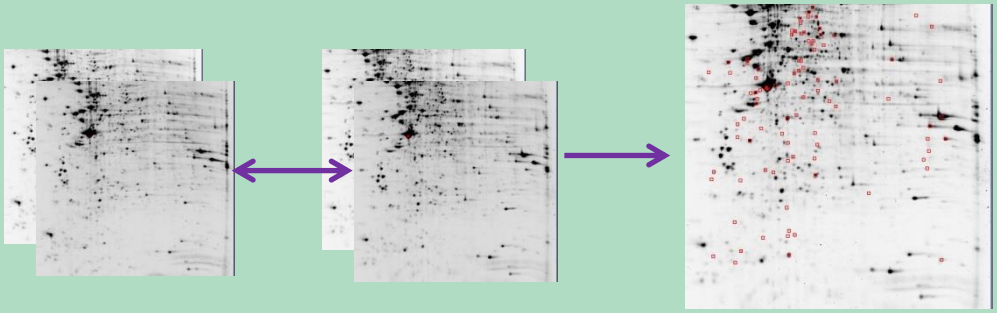
ТГц-излучение не оказывает ДНК-повреждающего, генотоксического и мутагенного воздействия на геномы мбириональных стволовых клеток человека (ЭСК)



ТГц излучение повышает транскрипцию генов митохондрий в ЭСК



Воздействие ТГц излучения на ЭСК изменяет экспрессию белков, вовлеченных в процессы транскрипции и трансляции, процессинга и сплайсинга пре-мРНК, протеолиза, гликолиза, а также белков, связанных с цитоскелетом



Повышение экспрессии

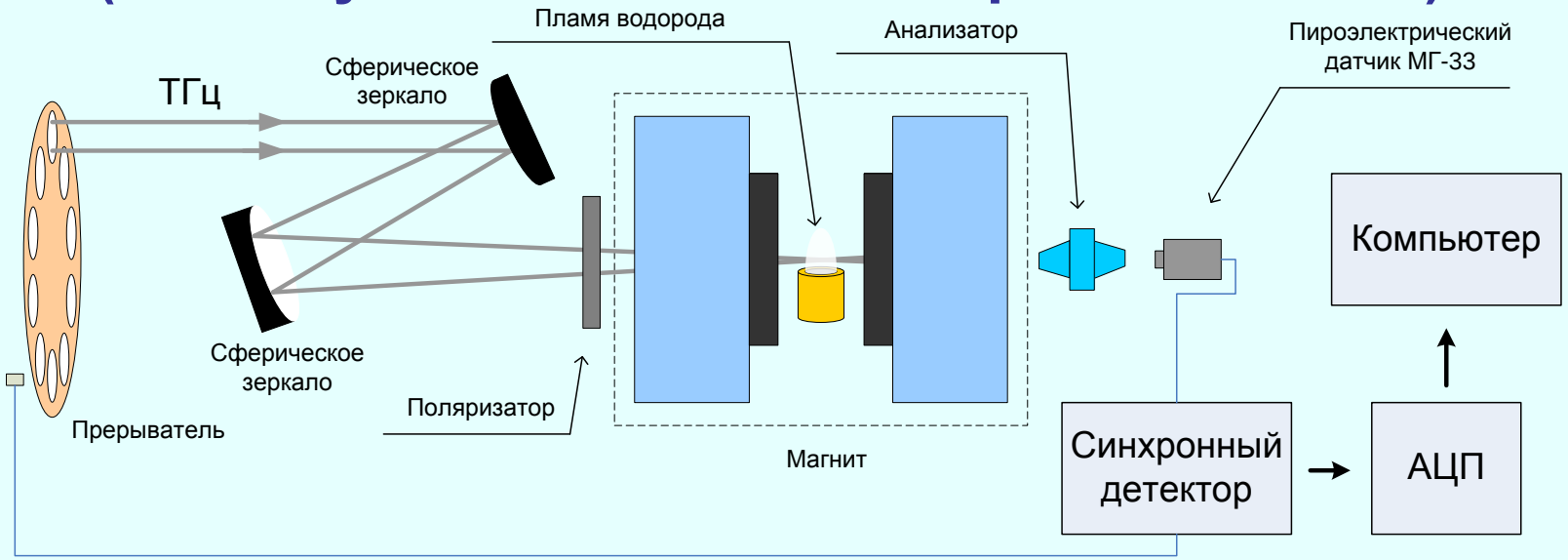
ATP synthase subunit alpha, mitochondrial
Keratin, type I cytoskeletal 19
Heterogeneous nuclear ribonucleoproteins C1/C2
Histone-binding protein RBBP4
Tubulin beta chain
Actin, cytoplasmic 1
Heterogeneous nuclear ribonucleoproteins A2/B1
Voltage-dependent anion-selective channel protein 1

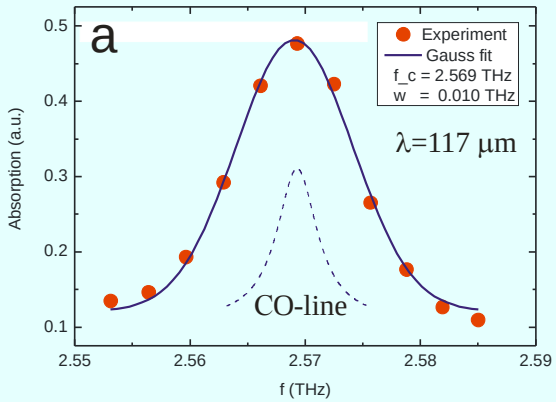
Снижение экспрессии

DNA replication licensing factor MCM7
Ezrin
Glycine--tRNA ligase
Moesin
Eukaryotic translation initiation factor 3 subunit D
Leukotriene A-4 hydrolase
Dihydropyrimidinase-related protein
Asparagine--tRNA ligase, cytoplasmic
WD repeat-containing protein 1
Bifunctional purine biosynthesis protein PURH
Dihydropyrimidinase-related protein 3
Serine--tRNA ligase, cytoplasmic
DnaJ homolog subfamily C member 7
Heterogeneous nuclear ribonucleoprotein H
26S protease regulatory subunit 7
Glyceraldehyde-3-phosphate dehydrogenase
26S protease regulatory subunit 6B
Actin, cytoplasmic 2
L-lactate dehydrogenase B chain
Annexin A5
Proteasome activator complex subunit 3
Peroxiredoxin-6

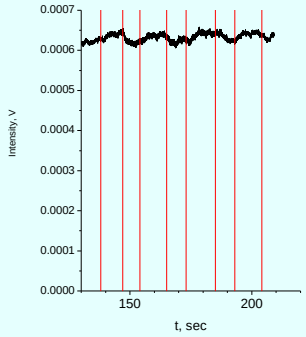
Заключение: ТГц излучение, не вызывая термического стресса, изменяет экспрессию генов, кодирующих белки, но не повреждает ДНК

Молекулярная спектроскопия с использованием излучения ЛСЭ: обнаружение радикалов ОН в водородном пламени по эффекту Фарадея (Институт хим. кинетики и горения СО РАН)





(a) Absorption in CO gas cell vs. laser wavelength; the dash line is calculated profile of CO-molecule transition.

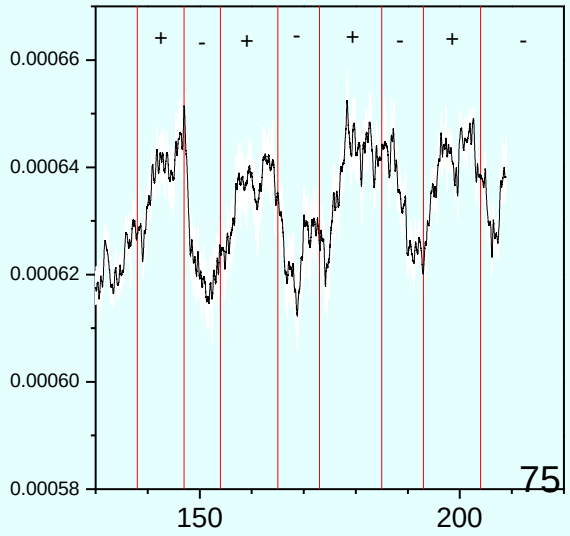


$I = I_0 \sin^2(\phi_0 + \Delta\phi)$

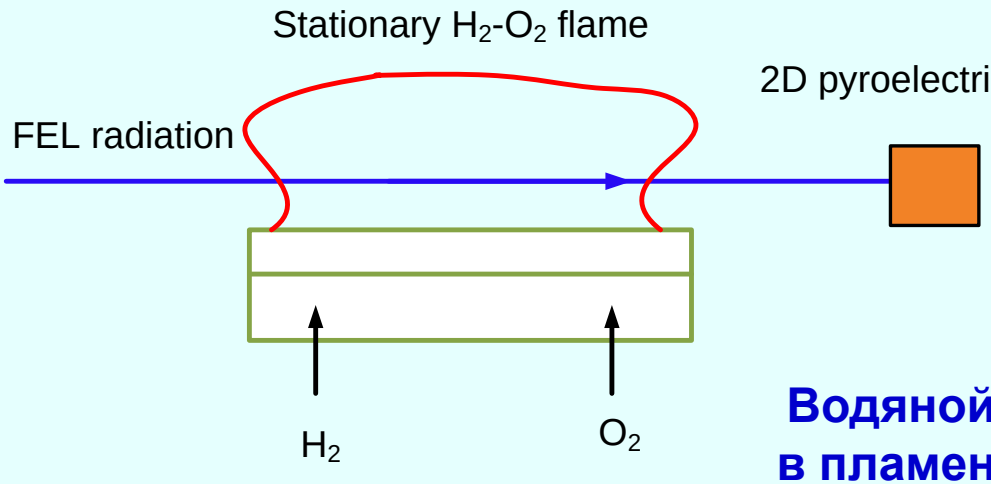
$\Delta I / I_0 = 3.6 * 10^{-4}$

$\phi_0 = 0.11$ rad

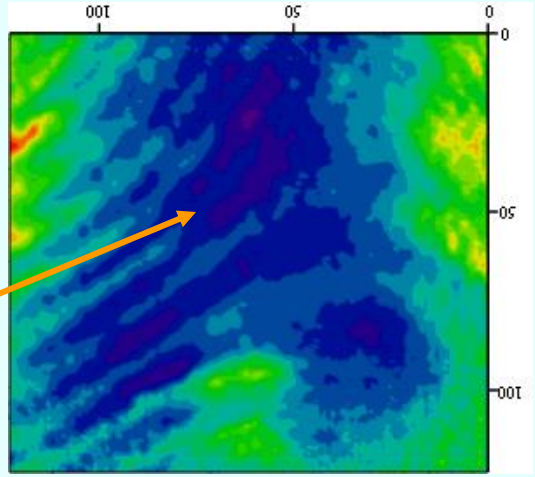
$\Delta\phi = 1.4 * 10^{-3}$ rad

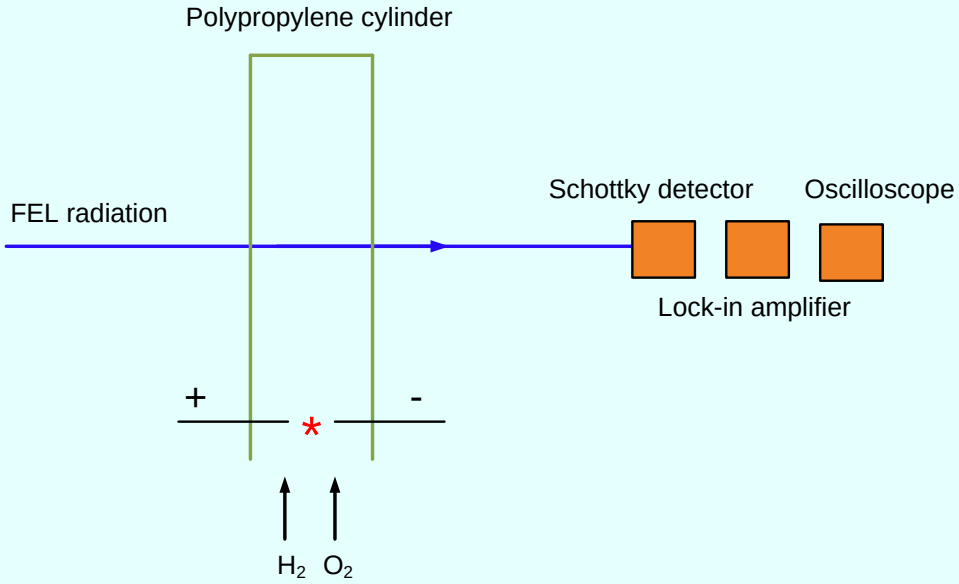


Исследование горения H_2 - O_2 при помощи излучения НЛСЭ, настроенного на линию поглощения H_2O

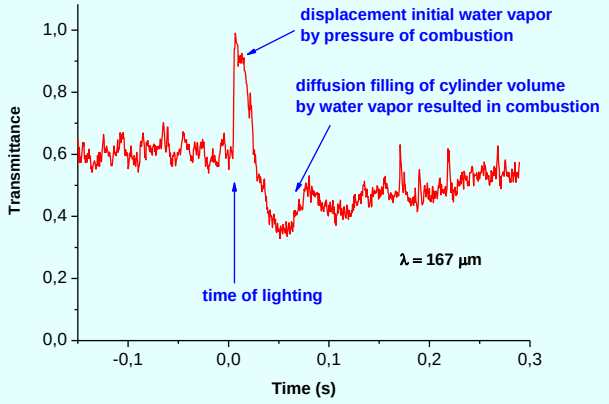


Водяной пар в пламени



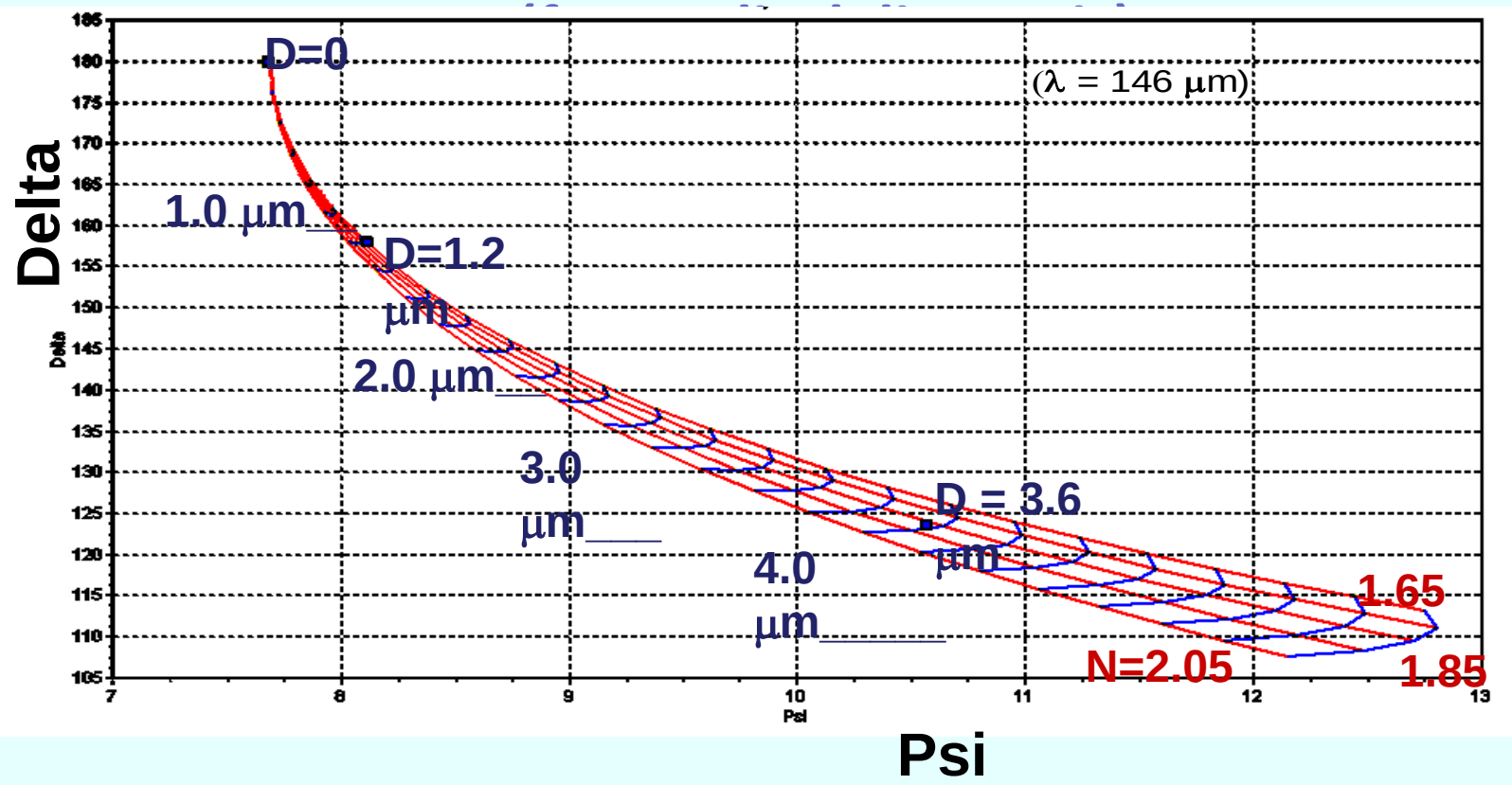


Combustion H_2- O_2 mixer in ∅40×200 mm polypropylene cylinder



V. Kubarev, E. Chesnokov et al. (Budker INP, ICKC, LIG)

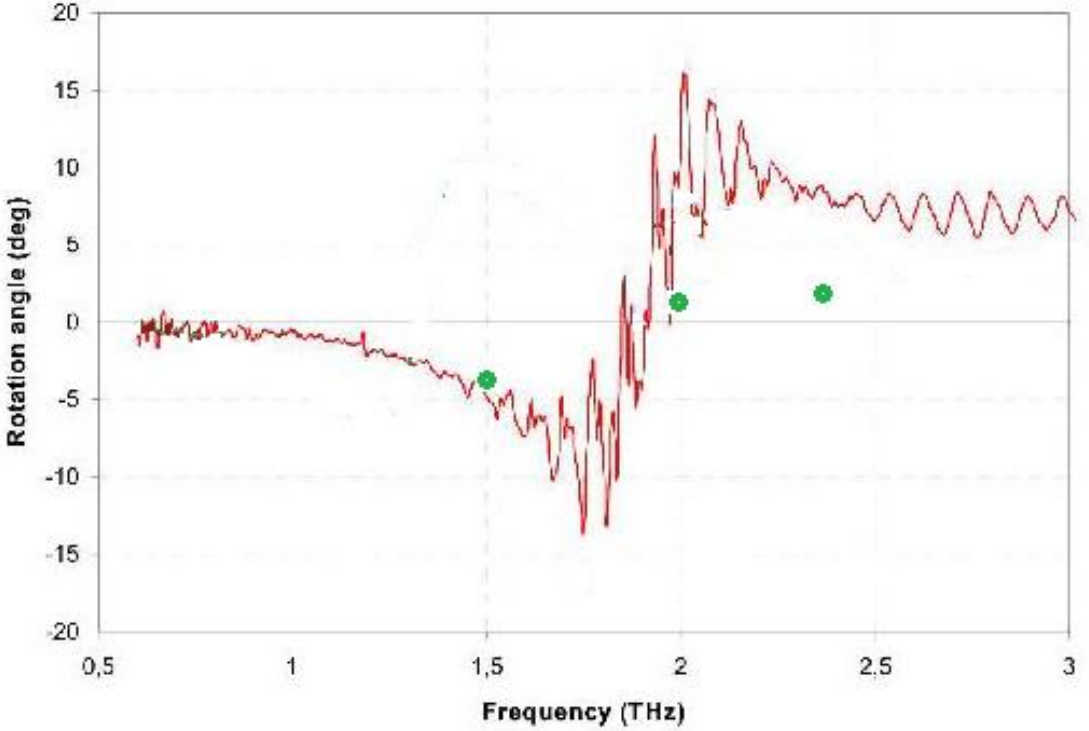
Измерение показателя преломления и толщины плёнок крови



Yu. Yu. Choporova. Ellipsometric studies at NovoFEL This conference, poster session.

M. V. Kruchinina et al. Possibilities of the optical methods for studying blood in colorectal cancer diagnosis. 2014 International Conference on Laser Applications in Life Sciences 2014 June 29 - July 2, Ulm, Germany.

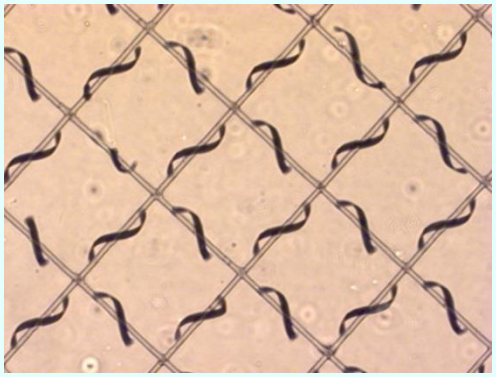
Измерение поворота направления поляризации киральными метаматериалами



130 μm $\psi = 1.94$

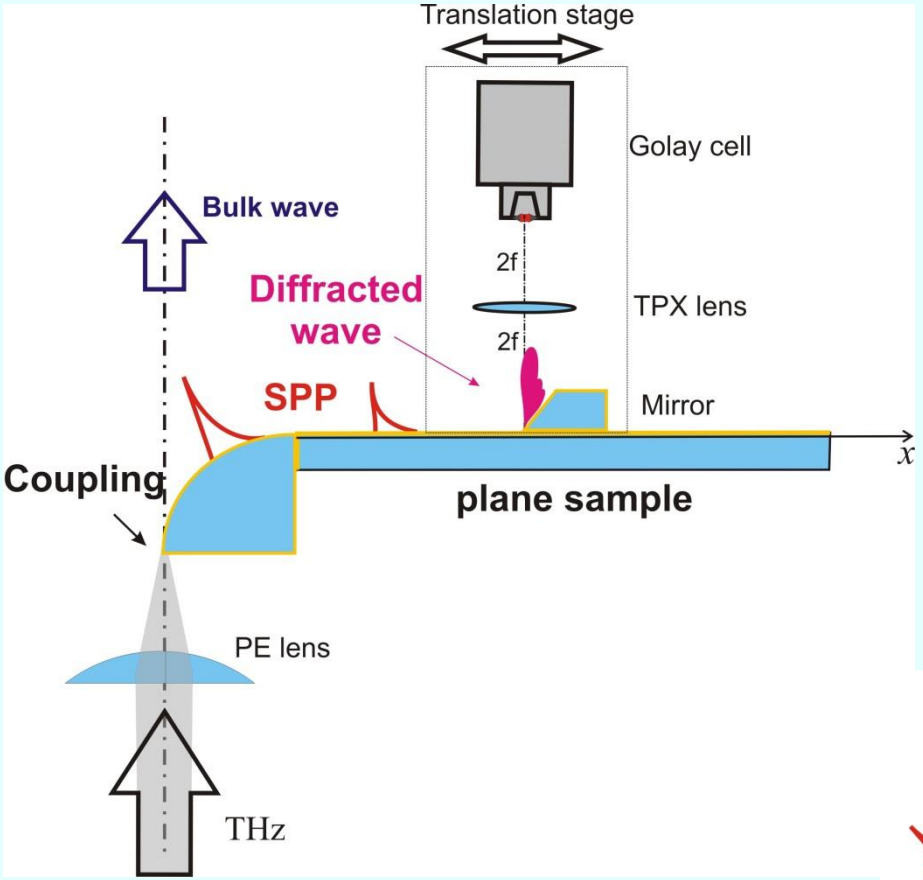
150 μm $\psi = 1.2$

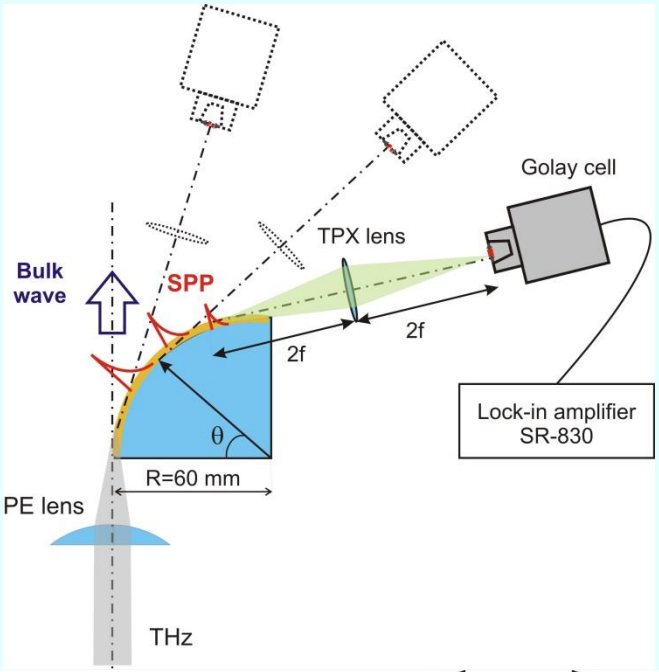
200 μm $\psi = -2.14$

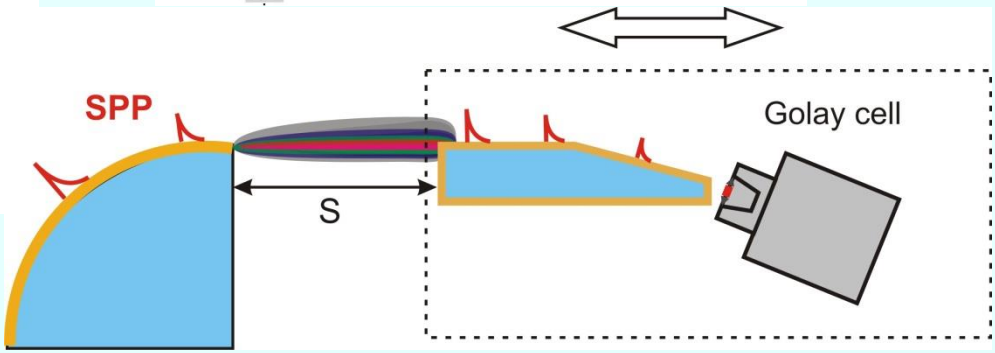


The chiral metamaterial made in laboratory of V. Ya. Prinz (ISP SB RAS)

Исследование поверхностных плазмон-поляритонов

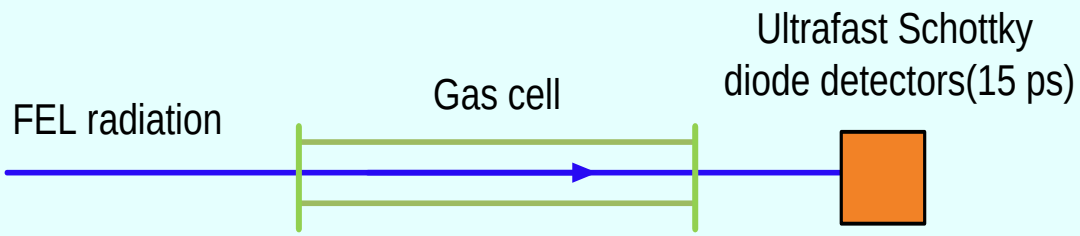


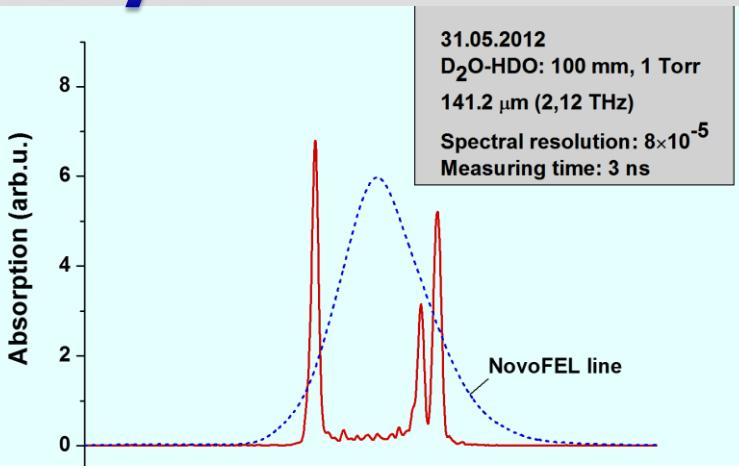




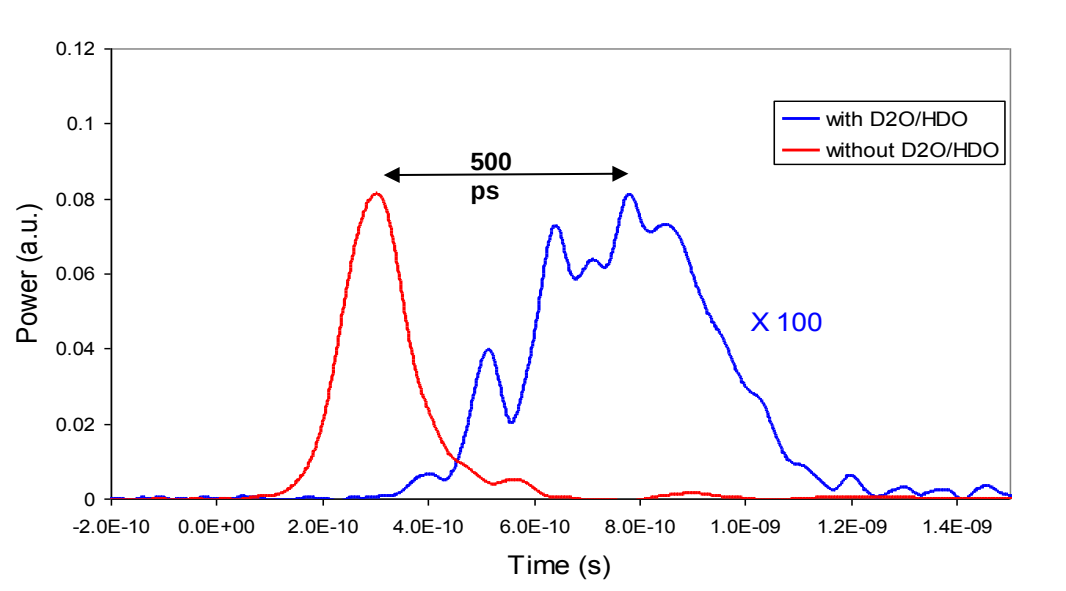
V. V. Gerasimov. Transmission of THz surface plasmon polariton along plane and curved metal-dielectric surfaces. This conference,

Затухание свободной индукции вращательных переходов молекул



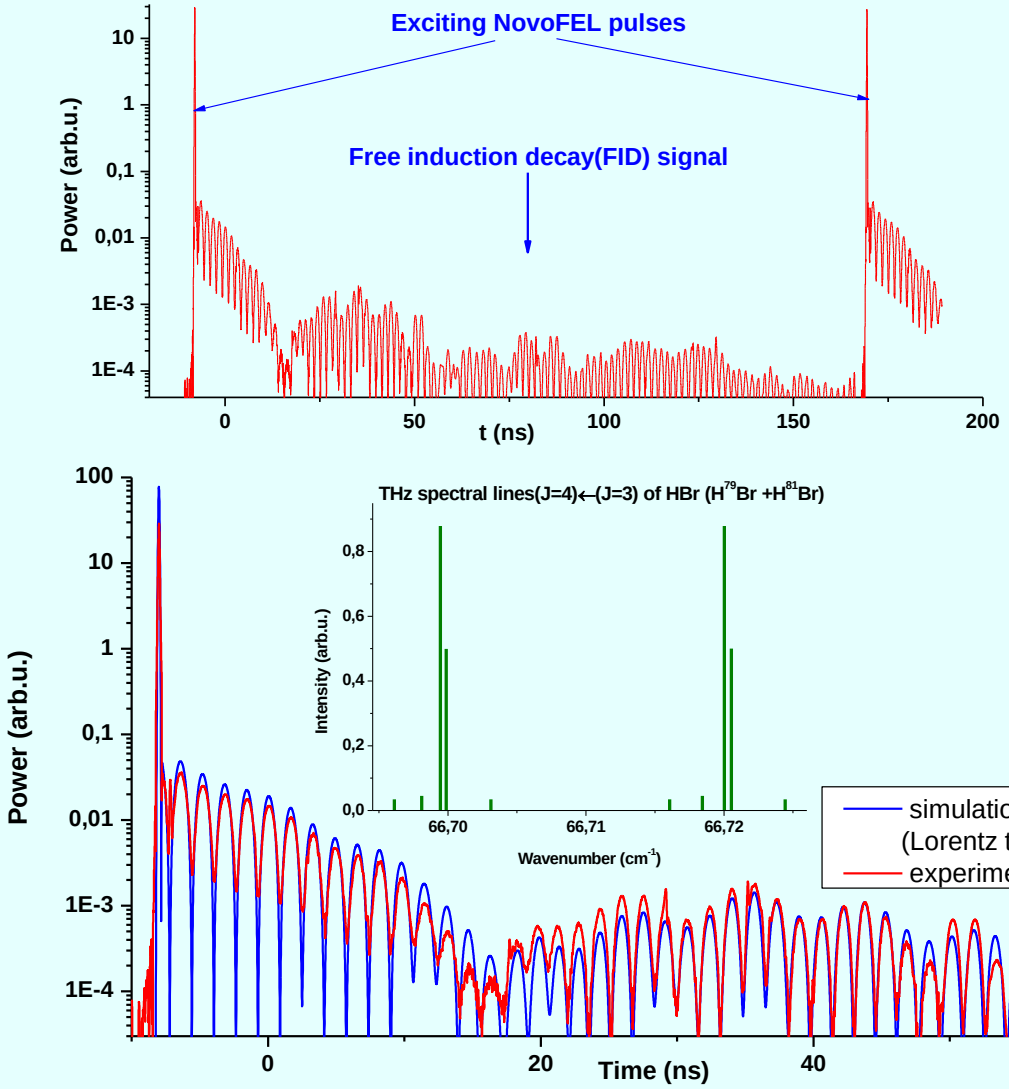


$$V_g = \frac{d\omega}{dk} = \frac{c}{n + \omega \dfrac{dn}{d\omega}} = 0.85c$$



E N Chesnokov, V V Kubarev, P V Koshlyakov and G N Kulipanov. Direct observation of the terahertz optical free induction decay of molecular rotation absorption lines in the sub-nanosecond time scale. Appl. Phys. Lett. 101, 131109 (2012).

Затухание свободной индукции HBr



$(\Delta f / f)_{min}=(2\text{-}4)\cdot 10^{-6}$

E N Chesnokov, V V Kubarev, P V Koshlyakov and G N Kulipanov. Very long terahertz free induction decay in gaseous hydrogen bromide. Laser Phys. Lett. 10, 055701(2013).

Применения затухания свободной индукции

- Быстрая time-domain спектроскопия с временным разрешением
- Измерение сечений столкновительного уширения
- Спектроскопия высокого разрешения ($\Delta f/f \sim 10^{-6}$)
- Быстрая спектроскопия невоспроизводимых явлений
- Спектральное «кино» с частотой кадров до 22.5 МГц

Планы 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)

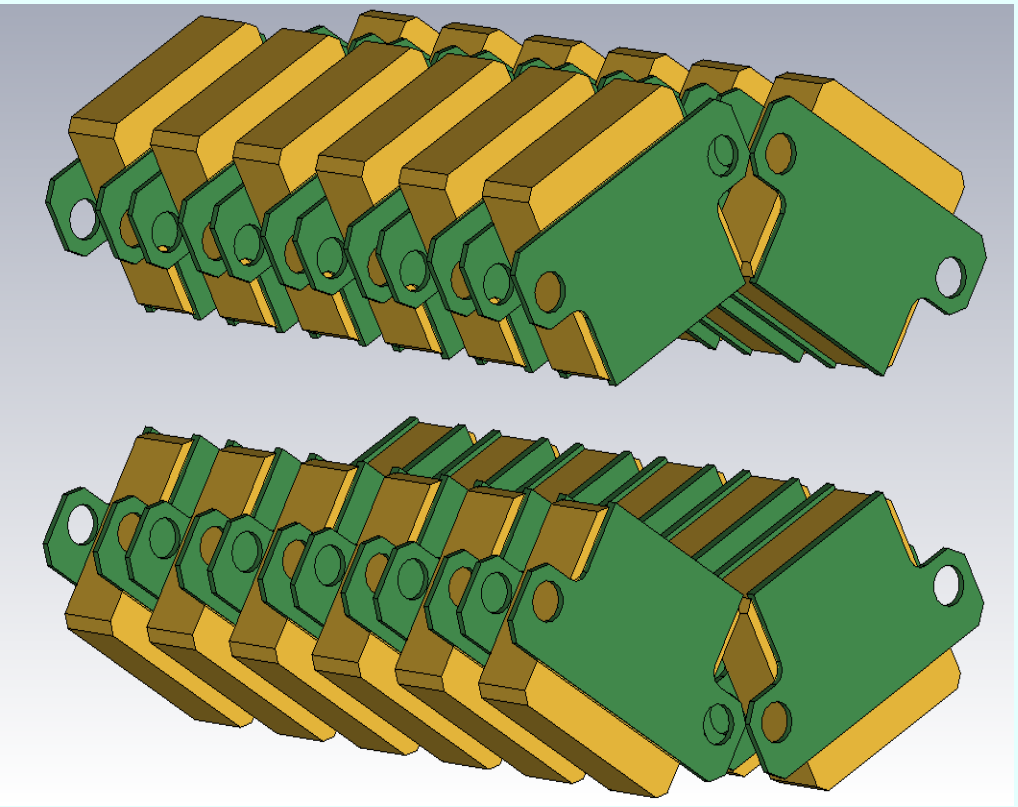


Схема ондулятора

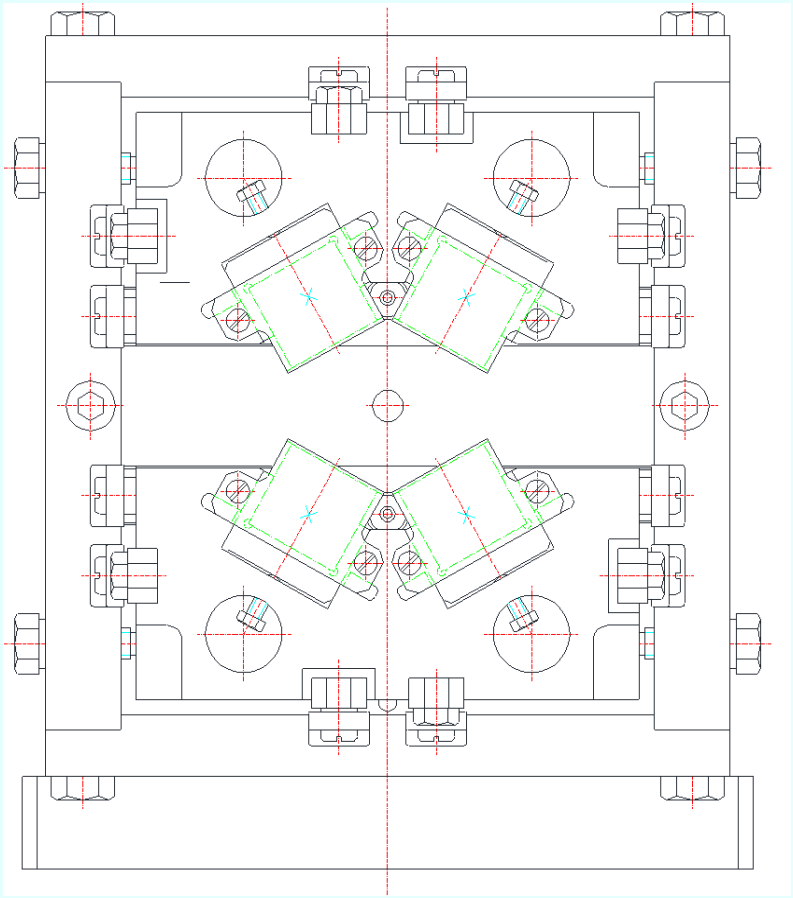


Чертёж прототипа

Канал вывода излучения на новые пользовательские станции.

Канал вывода излучения на новые пользовательские станции (продолжение)

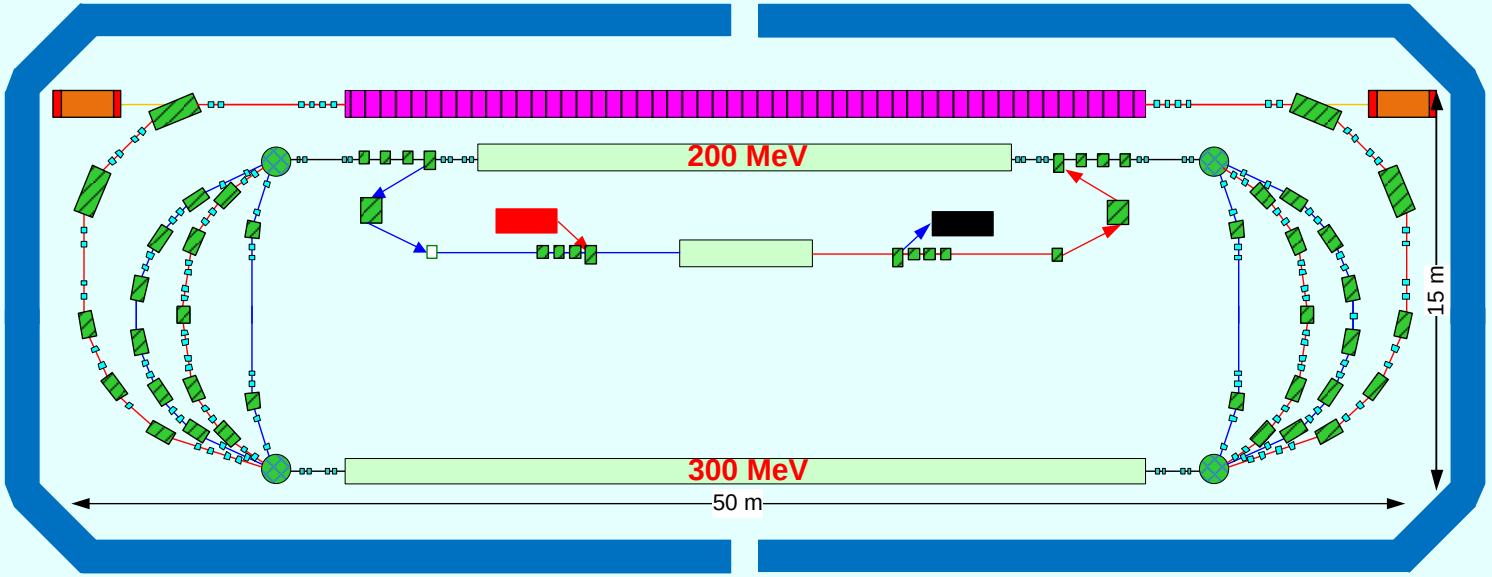
В последние годы усилился интерес компаний, производящих электронные микросхемы, к использованию для этих целей источников мягкого рентгеновского излучения. Этот интерес связан с необходимостью дальнейшего роста быстродействия и объёма памяти компьютеров, для которого требуется дальнейшее уменьшение размеров элементов и повышение их плотности. При применяемой сейчас литографической технологии размеры отдельных элементов ограничены длиной волны излучения, делённой на два пи (вследствие дифракции). Выбор длины волны вблизи 13,5 нм связан с наличием в этом диапазоне относительно хороших зеркал, необходимых для формирования равномерной освещённости в рабочей зоне. Проблема состоит в том, что источник должен обеспечивать среднюю мощность излучения порядка 10 кВт и обладать высокой стабильностью и надёжностью.

Предложение по проекту подпрограммы «Фотоника» на 2014-2020 г.г. для включения в состав Государственной программы «Развитие промышленности и повышение конкурентоспособности» в соответствии с Распоряжением Правительства РФ от 24 июля 2013 г. № 1305-р

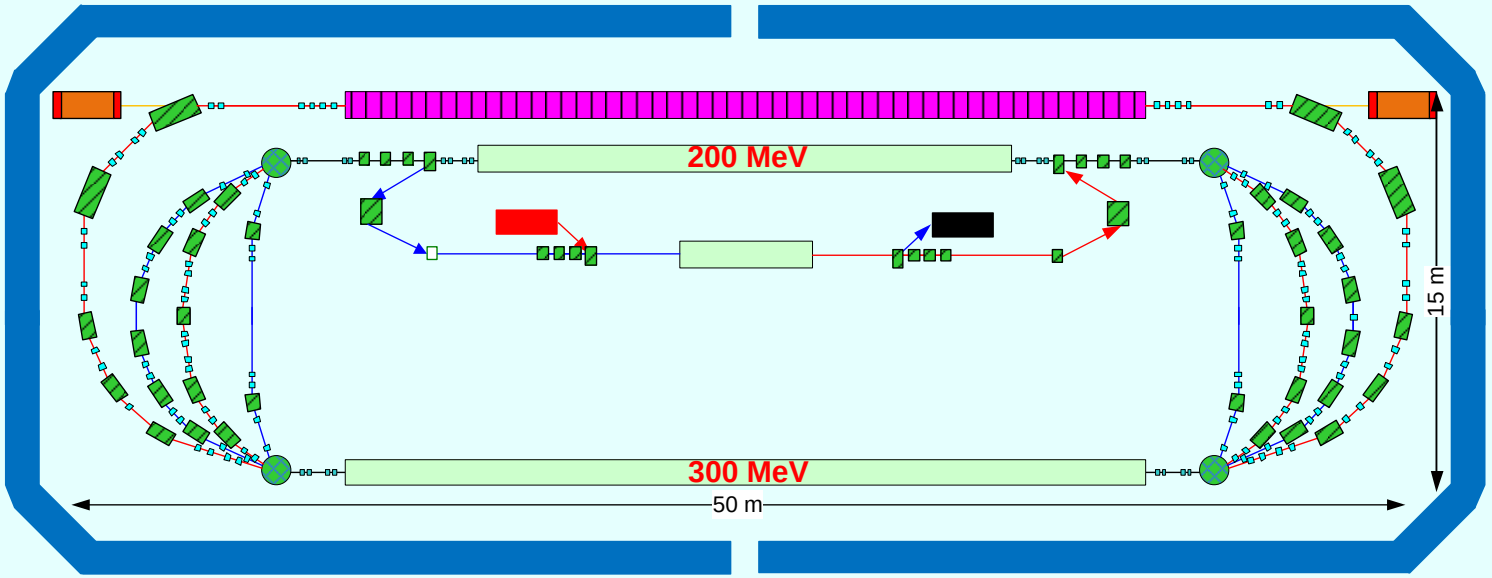
Наименование проекта: Исследования по разработке и созданию мощного рентгеновского лазера на свободных электронах для производства интегральных микросхем методом рентгеновской литографии.

Проект ЛСЭ для рентгеновской литографии

(Compact 13.5-nm free-electron laser for extreme ultraviolet lithography, Y. Socol, G. N. Kulipanov, A. N. Matveenko, O. A. Shevchenko and N. A. Vinokurov, Phys. Rev. ST AB, Vol. 14, No 4. – 040702-1 – 040702-7, 2011).



Длина волны	13.5 нм
Энергия электронов	1 ГэВ
Средняя мощность	10 кВт
Средний ток электронов	10-20 мА
Габариты	20×50 м^2
Период ондулятора	3 см



После установки сверхпроводящего магнита с полем 10 Т такой ускоритель-рекуператор можно использовать для получения периодических импульсов рентгеновского излучения с длительностью менее 100 фс, необходимых для экспериментов с высоким временным разрешением. Такие эксперименты проводятся сейчас на электронных накопителях, но поток полезных фотонов там на три порядка ниже.

Спасибо за внимание