

Источники СИ четвертого поколения.

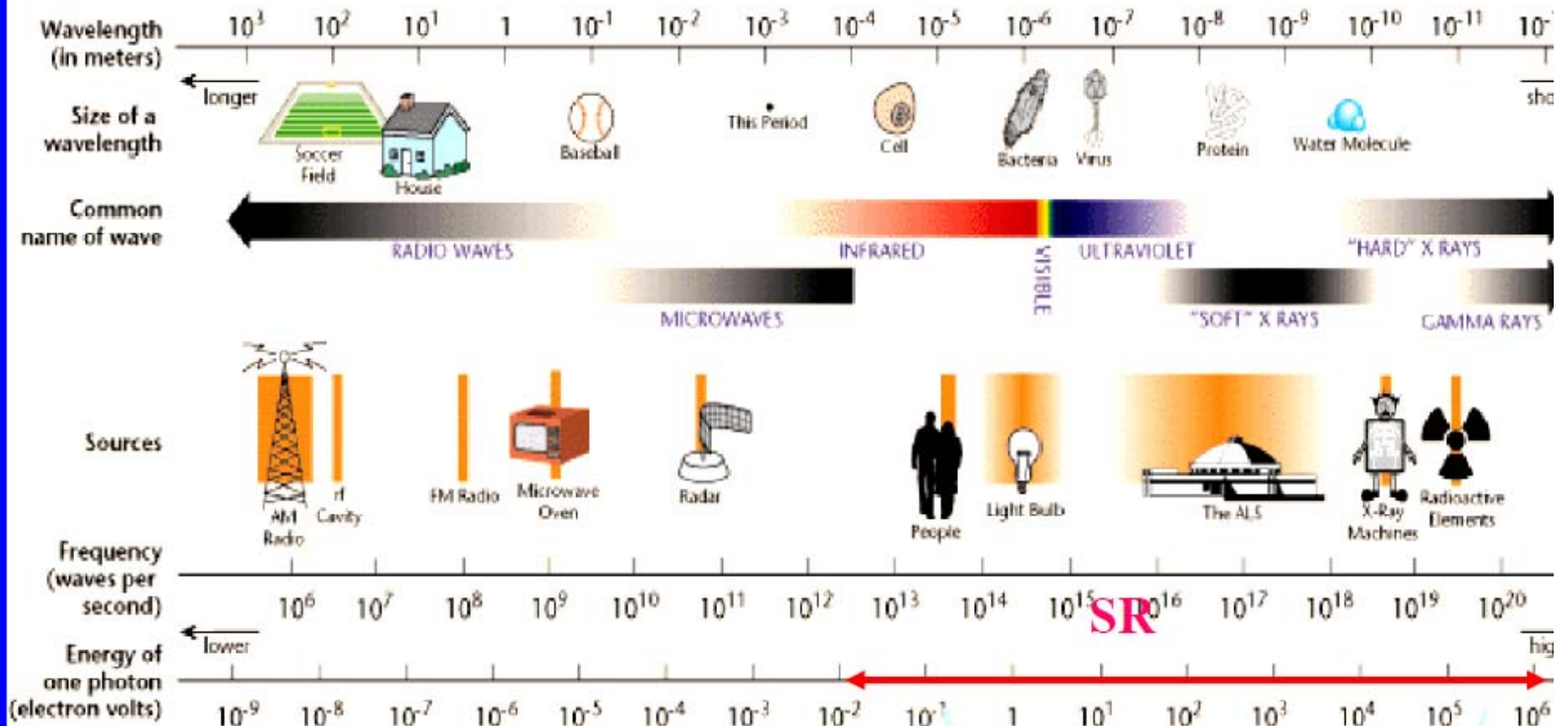
Проект “MARS”

*(Multi-turn Accelerator-Recuperator Source)*

# План сообщения

<b>1. Введение</b>	<b>1-6</b>
<b>2. Азбука СИ</b>	<b>7-10</b>
<b>3. Три поколения источников СИ</b>	<b>11-22</b>
<b>4. Ускоритель МАРС- источник СИ четвертого поколения</b>	
• <b>Требования</b>	<b>23-27</b>
• <b>Достоинства и недостатки накопителей и линаков</b>	<b>28-30</b>
• <b>Схема МАРС</b>	<b>31-39</b>
• <b>Статус проекта</b>	<b>40-42</b>

# THE ELECTROMAGNETIC SPECTRUM



**Использование электромагнитных волн различных диапазонов играет важную роль в развитии науки, техники и технологий.**

*Ряд примеров:*

- **Атомная и молекулярная спектроскопия:** открытие законов квантовой механики.
- **Рентгеновская дифракция:** открытие спиральной структуры ДНК, белковая кристаллография, исследование механизма быстропротекающих процессов и многое другое.
- **Радио, телевидение, радиолокация, телекоммуникационные структуры, глобальные навигационные системы.**

Over 60 years after GE Synchrotron

## 42 operational + 13 under construction SR sources over the world



Japan – 15 SR sources in operation, including 2 first-rate user's facilities: Spring-8 and Photon Factory

Europe – 13 in operation and 3 under construction

USA – more than 10 SR sources in operation

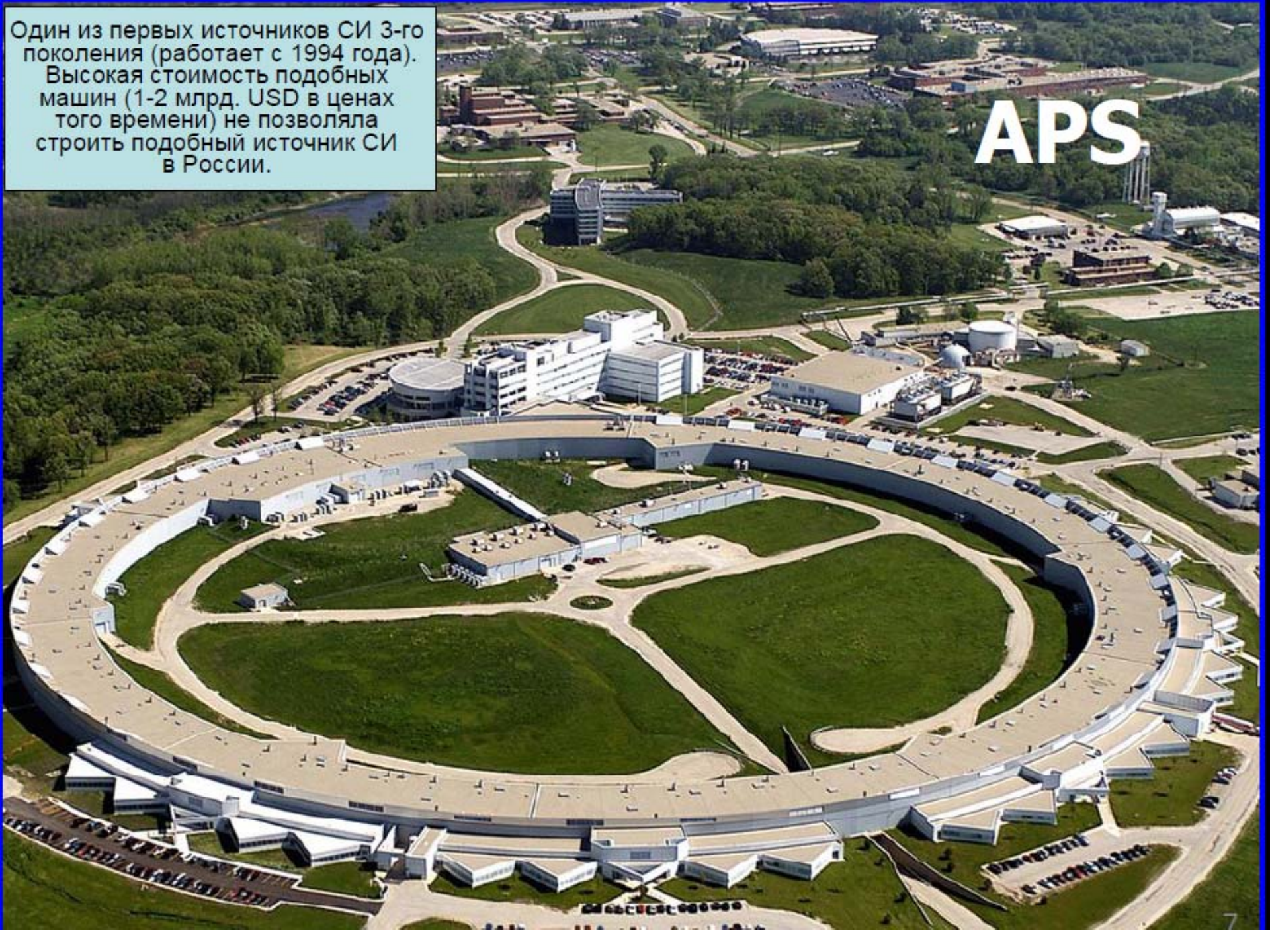
.....

Russia – 2 SR Centers (4 SR sources) in operation and 1 under construction

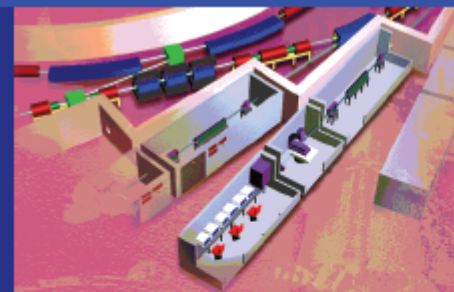
**~ 50 000 SR users worldwide**

Один из первых источников СИ 3-го поколения (работает с 1994 года).  
Высокая стоимость подобных машин (1-2 млрд. USD в ценах того времени) не позволяла строить подобный источник СИ в России.

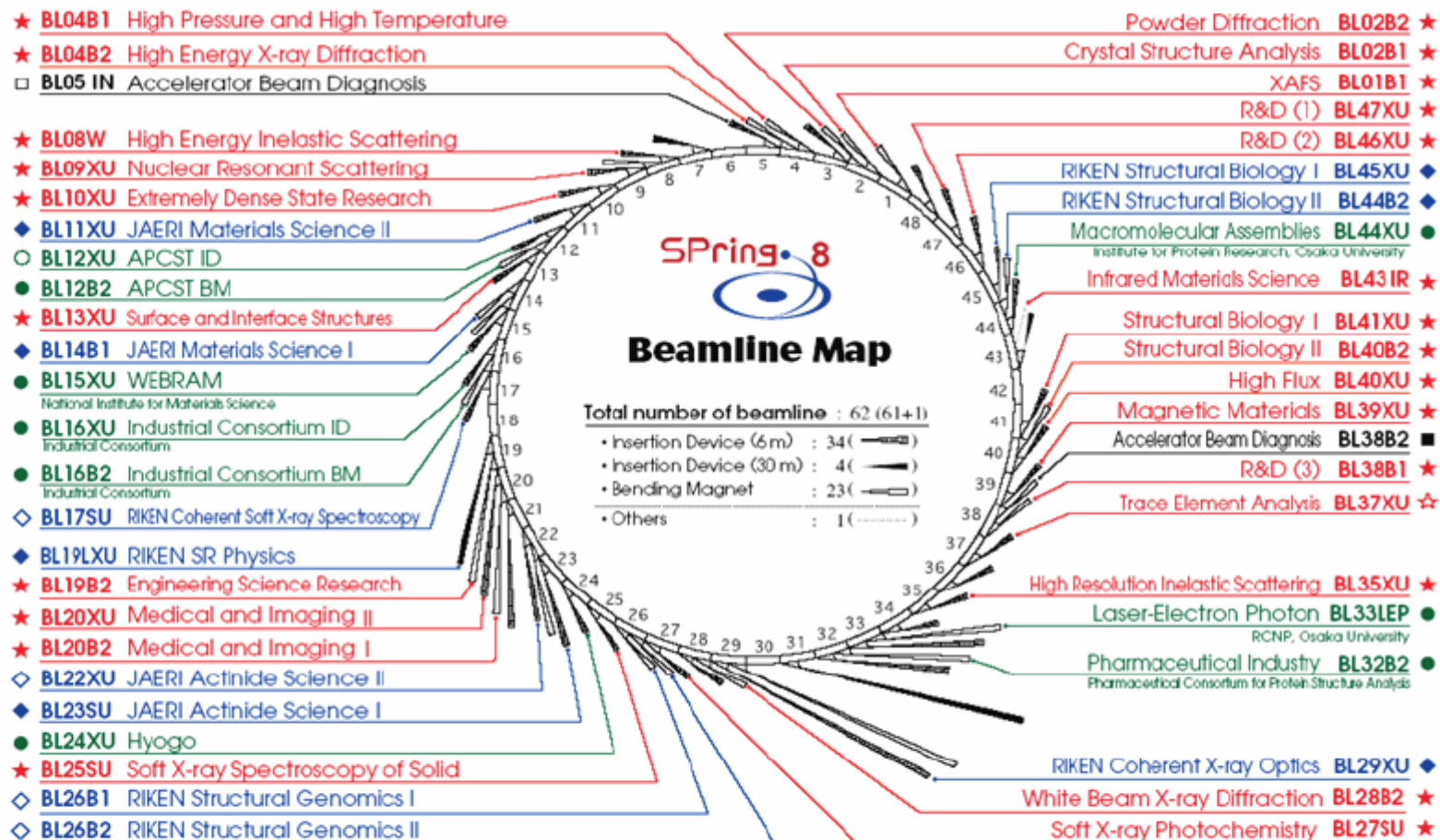
# APS



The SR sources of the 3rd generation available and those under construction (APS, ESRF, Spring-8, SLS, DIAMOND, SOLEIL, CLS...) are the efficient factories for generation of the new knowledge, new technologies and new materials.



SR  
beamline  
and  
experime  
stations

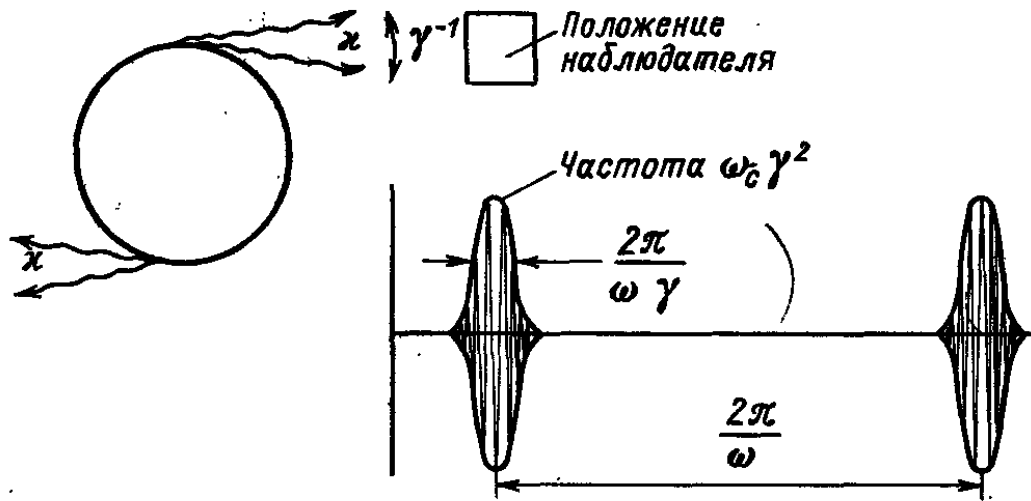


- ★ : Public Beamlines
- : Contract Beamlines
- ◆ : JAERI or RIKEN Beamlines
- : Accelerator beam diagnostic line

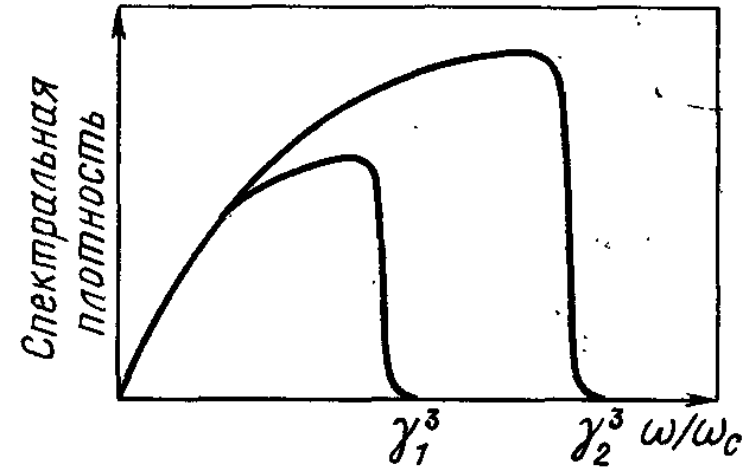
☆ ◇ ○ □ : Planned or Under construction



# СИНХРОТРОННОЕ ИЗЛУЧЕНИЕ



Угловое распределение синхротронного излучения и характер изменения во времени электромагнитного поля для неподвижного наблюдателя.



Качественный вид спектра синхротронного излучения при двух значениях энергии ( $\gamma_2 > \gamma_1$ ).

## Численные оценки:

$$\Delta W_{\text{изл}} = 90 \varepsilon^4 / R \text{ [кэВ; ГэВ, м]} \quad E = 10 \text{ ГэВ} \quad R = 30 \text{ м} \quad \Delta W = 30 \text{ МВ / оборот}$$

$$\text{Для } N = 5 \cdot 10^{11} \text{ электронов} \quad P_{\text{полн.}} = \Delta W_{\text{изл}} \cdot \frac{Nc}{2\pi R} = 1.5 \cdot 10^6 \text{ Вт} = 1.5 \text{ МВт}$$

$$\gamma = 100 \quad R = 0.3 \text{ м} \quad \omega = 10^9 \text{ с}^{-1} \quad \omega_{\text{изл}} = \gamma^3 \omega = 10^{15} \cdot \text{с}^{-1}; \quad \lambda \sim 3000 \text{ \AA}$$



# Влияние излучения на ускоряемый пучок.

1. Необходимость компенсировать рад. потери.
2. Влияние на качество пучка.
  - Синхротронные колебания – колебания энергии пучка, определяют азимутальную длину сгустка, в процессе ускорения происходит затухание синхротронных колебаний т. к. потери  $\sim E^4$ .
  - Z – бетатронные колебания – затухают.
  - РАД.. колебания – возбуждаются и увеличивается эмиттанс пучка.

**Пример:** Для  $E = 5 \text{ GeV}$ ,  $\rho = 15 \text{ м}$   $\tau_{\text{возб}} = 1 \text{ мсек}$  .  
Надо  $t_{\text{уск}} < \tau_{\text{возб}}$   
 $E = 5 \text{ GeV}$ ,  $f = 50 \text{ Hz}$   $B_0 \sim 0.6 \div 0.7 \text{ Т}$
  - Возбуждение  $\beta = \text{тр. и синхр.}$  – тр. колебаний за счет квантовых флюктуаций излучения.

**ОНДУЛЯТОР** – устройство для генерации когерентного синхротронного излучения в накопителе синхротрона.

**Коэффициент ондуляторности**

$$k = \frac{eBl}{2\pi mc},$$

**$k > 1$  амплитуда колебаний велика, излучение не когерентно**

**$I_{\text{изл.}} \sim N$  (число частиц) - вигглер**

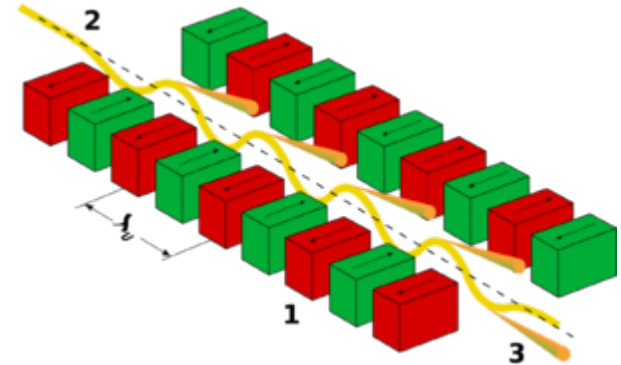
**$k \leq 1$  излучение когерентное  $I \sim N^2$  ондулятор**

$$\lambda = \frac{\lambda_u}{2\gamma^2} (1 + K^2/2 + \gamma^2\theta^2),$$

$$\lambda_u \sim 1 \text{ см}, \quad \gamma \sim 3000, \quad \lambda_{\text{min}} \sim (\theta=0) = 10 \text{ \AA}$$

**+ ондуляторного излучение:**

**возможность var.  $\lambda$ , изменяя  $B$ ;  
 монохроматичность  $\sim 10^{-2} \div 10^{-3}$ ;  
 поляризация 100%.**



Схематическое изображение ондулятора.

1 – магниты; 2 – электронный пучок;

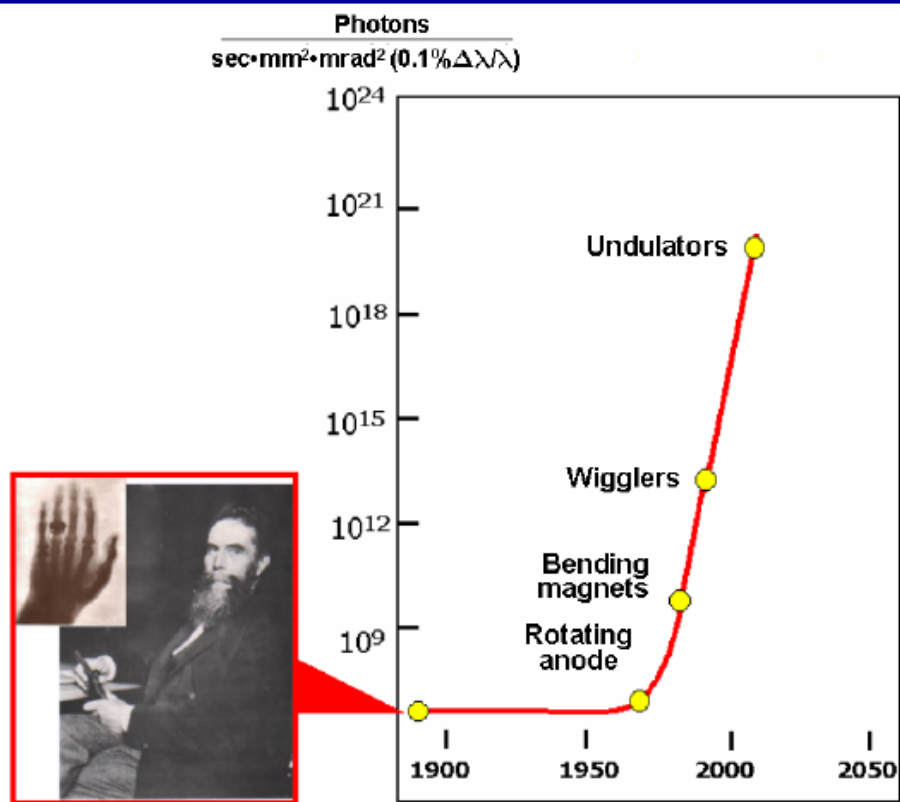
3 – синхротронное излучение.

**Главная цель эволюции источников СИ -  
повышение спектральной яркости,  
основной потребительской характеристики  
источников излучения**



$$\text{Brightness} = \text{const } F/(S \cdot \Omega)$$

# Диаграммы, показывающие историю, современное состояние и планы увеличения яркости рентгеновских источников.

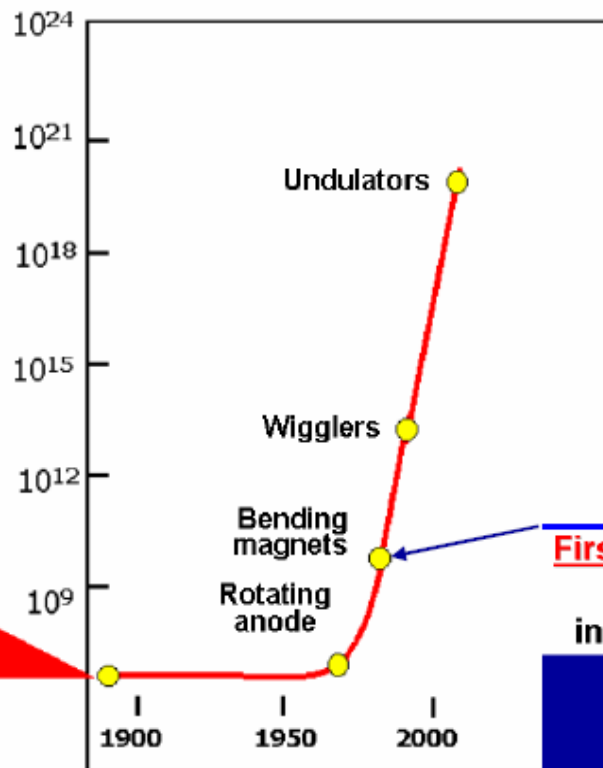


Всё началось после того, как Вильям Конрад Рентген в 1895 году открыл рентгеновские лучи, после чего были созданы первые рентгеновские трубки с яркостью  $B_\lambda \sim 10^6$ .

Примерно за шестьдесят лет их яркость эволюционным путём была увеличена примерно на два порядка за счёт увеличения мощности в электронном пучке при использовании вращающегося анода и за счёт использования микрофокусных рентгеновских трубок, позволяющих уменьшить размер электронного пучка на аноде.

Использование электронных синхротронов, а затем накопителей электронов в качестве источников рентгеновского синхротронного излучения позволило ускорительному сообществу, начиная с 80-х годов, проводить целенаправленную

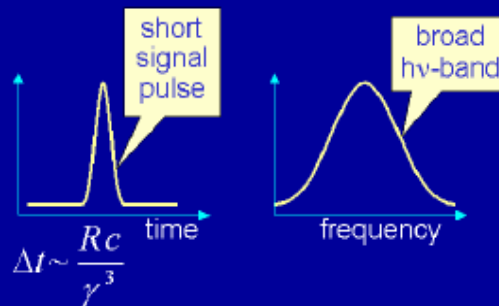
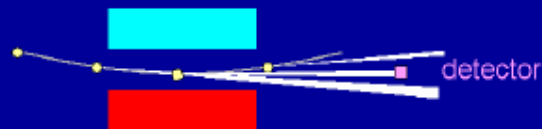
Photons  
 $\text{sec} \cdot \text{mm}^2 \cdot \text{mrad}^2 (0.1\% \Delta\lambda/\lambda)$



Переход с синхротронов на накопители в 70-е годы повысил яркость примерно в  $10^2 - 10^3$  раз за счёт того, что в накопителях больше средний ток и, благодаря радиационному затуханию, меньше эмиттанс ( $\epsilon_x \sim 300 \text{ нм} \cdot \text{рад}$ ) и, соответственно, поперечные размеры электронного пучка.

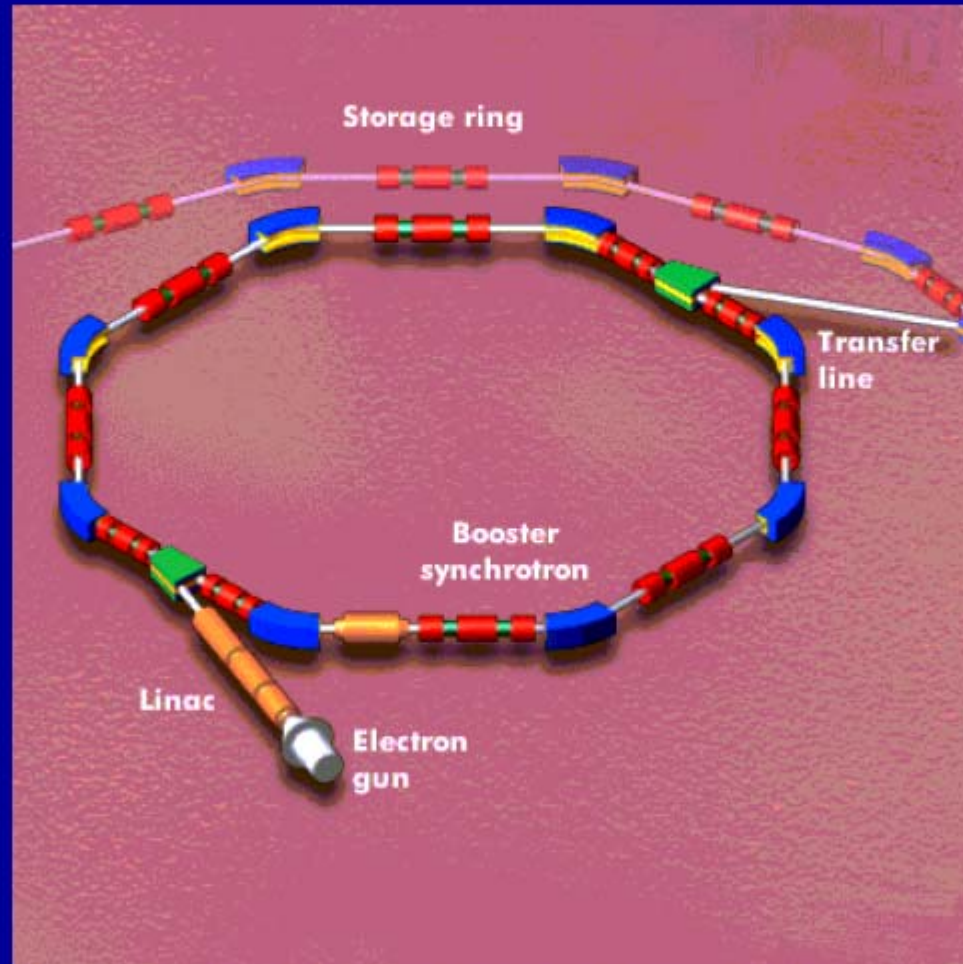
**First generation SR sources** – using of storage rings with emittance  $\epsilon \sim 300 \text{ nm}$  in parasitic mode during high energy experiments

Bending magnets:  $F \sim N_e$



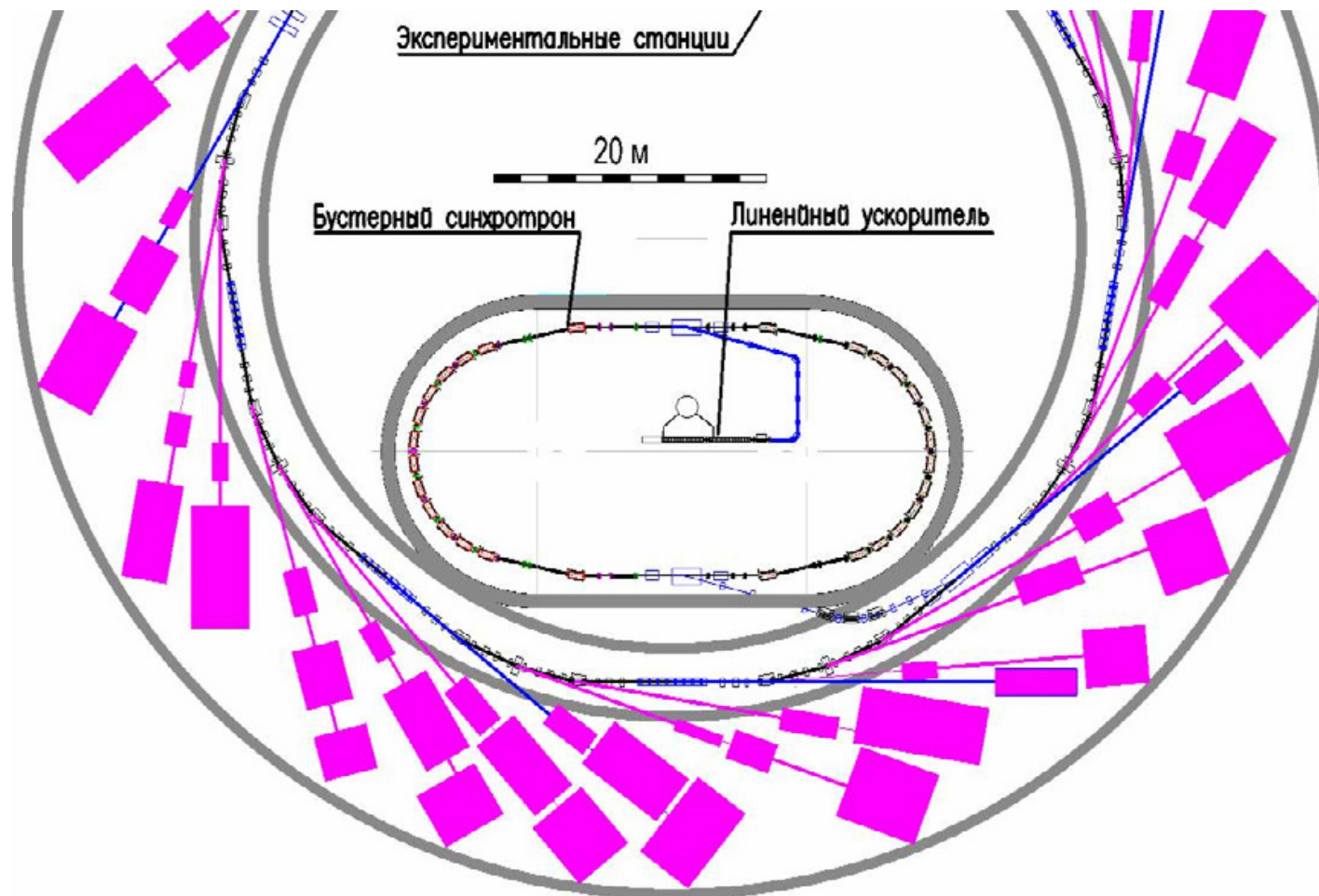
1980	$\epsilon \sim 300 \text{ nmrad}$	$N_u \sim 10$	$\sigma_E/E \sim 10^{-3}$
------	-----------------------------------	---------------	---------------------------

# Три поколения источников СИ, основанных на электронных накопителях

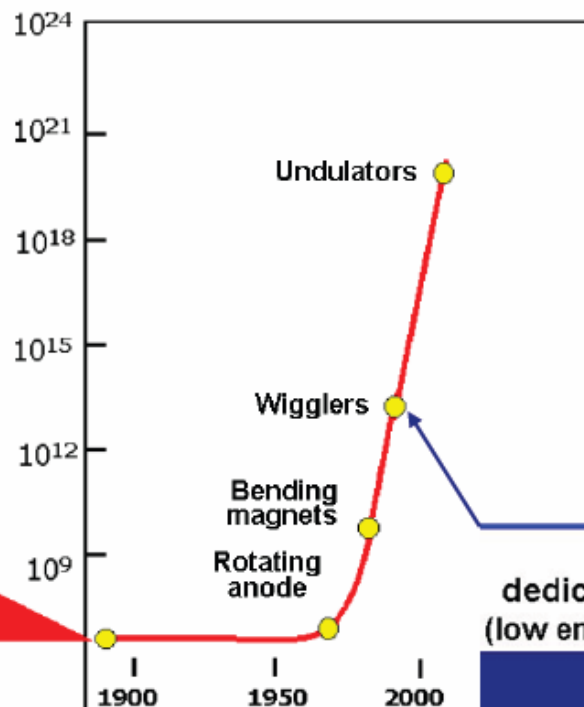


*Каскадная схема ускорения и накопления  
электронов в накопителе – источнике СИ*

# Схема источника СИ и размещения экспериментальных станций



Photons  
sec·mm<sup>2</sup>·mrad<sup>2</sup> (0.1%Δλ/λ)



За счет использования многополюсных вигглеров яркость источников СИ была увеличена в 10 – 100 раз. Создание в 80-х годах специализированных накопителей – источников СИ второго поколения, позволило уменьшить эмиттанс электронных пучков до  $\epsilon_x \sim 30$  нм·рад, а следовательно уменьшить площадь источника излучения и повысить яркость ещё на один-два порядка.

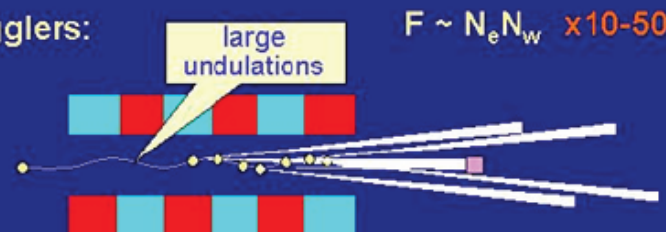
**Second generation SR sources** –

dedicated storage ring - synchrotron radiation sources (low emittance  $\epsilon \sim 30$  nm, set of straight sections for wigglers)

1980	$\epsilon \sim 300$ nmrad	$N_u \sim 10$	$\sigma_E/E \sim 10^{-3}$
1990	$\epsilon \sim 30$ nmrad	$N_u \sim 10^2$	$\sigma_E/E \sim 10^{-3}$

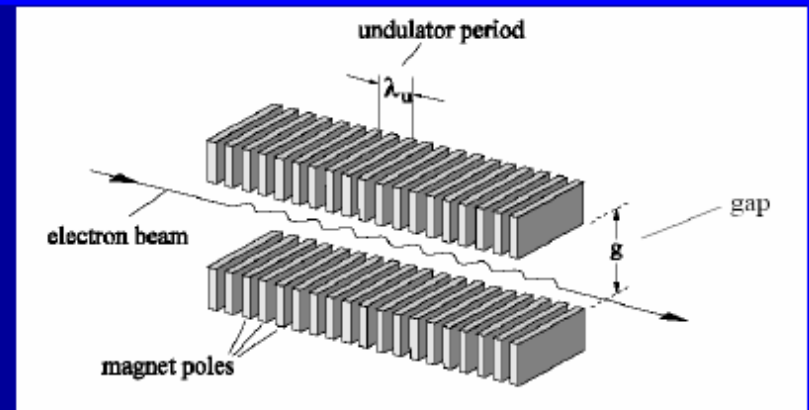
Storage rings

Wigglers:





## Вигглеры и ондуляторы



- Одним из основных элементов современных источников синхротронного излучения являются ондуляторы и вигглеры — периодические магнитные структуры, предложение об использовании которых впервые было рассмотрено в работе В.Л. Гинзбурга

*Гинзбург В.Л. Изв. АН СССР. Сер. физ. XI, № 2 165-181 (1947)*

- Спустя несколько лет первый ондулятор создал и испытал на пучке линейного ускорителя Н.Мотз.

*Motz H. J. Appl. Phys. 24 826-833 (1953)*

- Первый вигглер создал К. Робинсон в 1966.

Постановка в прямолинейные промежутки накопителей электронов вигглеров и ондуляторов (иногда называемых также «змейками»), создающих знакопеременное периодическое магнитное поле с периодом  $\lambda_0$  на участке длиной  $L = N\lambda_0$  ( $N$  – число периодов), является весьма эффективным способом повышения интенсивности синхротронного излучения.

В настоящее время слово «вигглер» используется для описания «змейки» с сильным магнитным полем и большим периодом, отклоняющей траекторию электронов на большой угол  $\alpha \approx 1/\gamma$  и предназначенной для генерации излучения со спектром, типичным для синхротронного излучения. Использование вигглеров позволяет:

- получать излучение с фотонами более высокой энергии за счёт использования в вигглере сильных магнитных полей;
- увеличить поток фотонов в  $2N$  раз ( $N$  – число периодов) по сравнению с излучением из поворотных магнитов за счёт суммирования излучения из всех полюсов вигглера;
- иметь возможность независимо изменять спектр на различных экспериментальных станциях, использующих излучение из разных вигглеров.

В настоящее время ондулятором принято называть «змейку» с большим числом полюсов, с малым магнитным полем, малым периодом, отклоняющую траекторию электронов на угол  $\alpha_0 \leq 1/\gamma$

Основное условие работы «змейки» в ондуляторном режиме – обеспечение конструктивной интерференции излучения электронного пучка из всех полюсов ондулятора, накладывает жёсткие ограничения на угловой разброс в электронном пучке.

Например, в современных проектах рентгеновских источников ( $\lambda \sim 1 \text{ \AA}$ ) предусматривается использование ондуляторов длиной  $\sim 100$  м, что требует, исходя из простого условия интерференции

$$\frac{1}{2}L_u \Theta_{x,z}^2 < \frac{\lambda_u}{2\pi},$$

электронных пучков с угловым разбросом  $\Theta_{x,z} < 10^{-6}$

# Undulators HU256 For SR source Soleil (France)

designed and produced at the Budker INP  
(Novosibirsk, Russia)

3 undulators + magn. meas. system  
April 2004 – October 2005



## Сверхпроводящие устройства для генерации СИ, разработанные и изготовленные в ИЯФ им. Г.И. Будкера СО РАН

ИЯФ, ВЭПП-3 1979



Первая в мире сверхпроводящая змейка с полем 3.5 Тесла

PLS, Ю.Корея, 1997



Сверхпроводящий шифтер 7.5 Тесла

CAMD LSU, США, 1996



Сверхпроводящий шифтер 7.5 Тесла с фиксированной точкой излучения

Spring-8, Япония, 2000



Сверхпроводящий шифтер 10 Тесла

BESSY, Германия, 1999, 2001



Сверхпроводящий шифтер 7.5 Тесла с фиксированной точкой излучения

BESSY, Германия, 2000



Сверхпроводящий поворотный магнит 9.6 Тесла

BESSY, Германия, 2002



17-полюсный 7 Тесла вигглер

ELETTRA, Италия, 2002



49-полюсный 3.5 Тесла вигглер

CLS, Канада, 2004



63-полюсный 2 Тесла сверхпроводящий вигглер

DLS, Англия, 2006



49-полюсный 3.5 Тесла Сверхпроводящий вигглер

Москва, Сибирь-2, 2007



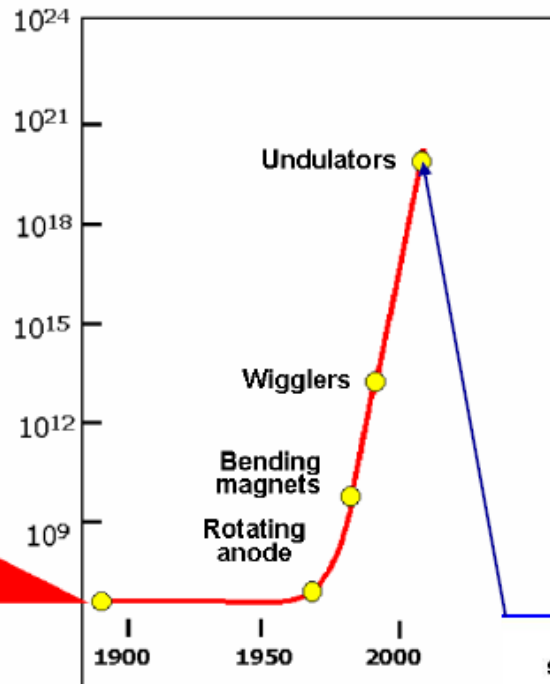
21-полюсный 7.5 Тесла сверхпроводящий вигглер

CLS, Канада, 2007



25-полюсный 4 Тесла сверхпроводящий вигглер

Photons  
sec·mm<sup>2</sup>·mrad<sup>2</sup> (0.1%Δλ/λ)



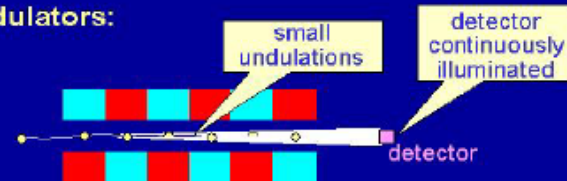
Источники СИ 3-го поколения, созданные в 90-х, имеют ещё меньший эмиттанс ( $\epsilon_x \sim 3$  нм·рад) и используют в качестве генераторов излучения длинные ондуляторы с  $N \sim 10^2 \div 10^3$ .

Это позволило повысить поток квантов по сравнению с излучением из поворотных магнитов в  $N$  раз, а также, благодаря интерференции излучения из всех полюсов ондулятора, уменьшить телесный угол в  $N$  раз. В итоге яркость излучения повысилась в  $N^2$  раз ( $\sim 10^4 \div 10^6$  раз)!!

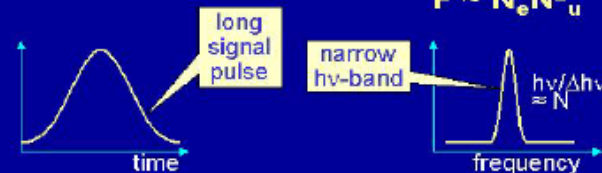
**Third generation SR sources** – storage rings optimized for installation of undulators (low emittance  $\epsilon \sim 3$  nm, set of long straight sections for long undulators)

1980	$\epsilon \sim 300$ nmrad	$N_u \sim 10$	$\sigma_E/E \sim 10^{-3}$	Storage rings
1990	$\epsilon \sim 30$ nmrad	$N_u \sim 10^2$	$\sigma_E/E \sim 10^{-3}$	
2000	$\epsilon \sim 1-3$ nmrad	$N_u \sim 10^3$	$\sigma_E/E \sim 10^{-3}$	

Undulators:



$$F \sim N_e N^2_u \times 10^3 \cdot 10^4$$



# Источники СИ 4-го поколения на основе ускорителей-рекуператоров. MARS

- Благодаря целенаправленной работе физиков-ускорительщиков яркость новых источников рентгеновского синхротронного излучения увеличивалась на три порядка за каждые десять лет, что позволило за последние тридцать лет повысить яркость рентгеновских источников в  $10^9$  раз!!  
Пропорционально яркости увеличивался и поток пространственно когерентных квантов, поскольку

Тем не менее, в самых современных источниках: APS (США), SPring-8 (Япония) – поток когерентных квантов составляет только  $10^{-3}$  от полного потока.



---

**Таблица 1. Список требований к четвертому поколению источников рентгеновского излучения:**

- # полная пространственная когерентность;
- # максимально высокая временная когерентность ( $\delta\lambda/\lambda < 10^{-4}$ ) без дополнительной монохроматизации;
- # средняя спектральная яркость этих источников должна превышать  $10^{23} - 10^{24}$  фотонов  $\text{с}^{-1}\text{мм}^{-2}\text{мрад}^{-2}$  (0.1 % ширины спектра)<sup>-1</sup>;
- # поток фотонов источников четвертого поколения должен быть на уровне источников СИ 3-го поколения;
- # для ряда экспериментов важна высокая пиковая яркость порядка  $10^{33}$  фотонов  $\text{с}^{-1}\text{мм}^{-2}\text{мрад}^{-2}$  (0.1 % ширины спектра)<sup>-1</sup>;
- # длина сгустков электронов до 1 пс и применение специальных методов для получения рентгеновских импульсов длительностью менее 100 фс;
- # высокая долговременная стабильность; генерация линейного, циркулярно поляризованного излучения (влево-вправо) с быстрым переключением типа и знака поляризации; постоянная тепловая нагрузка на камеры и оптику;
- # одновременное обслуживание коллектива пользователей.

## Требование когерентности излучения

На самых современных источниках поток когерентных квантов составляет только  $10^{-3}$  от общего потока. Из-за этого рентгеновская голография даже после успешных демонстраций не стала эффективным методом исследования структуры реальных объектов, большинство из которых имеют некристаллическую природу. Даже для кристаллических структур чрезвычайно важна speckle-spectroscopy, которая также возможна только при когерентном освещении.

Из всех требований к источникам синхротронного излучения четвертого поколения наиболее важным является получение полностью пространственно когерентного потока квантов при максимально возможной временной когерентности и сохранении величины потока равной тому, что дают источники СИ третьего поколения.

В этом случае увеличение спектральной яркости не сопровождается ростом полного потока фотонов, что снимает проблемы перегрева рентгеновской оптики и деградации образца

Важным требованием является также возможность использования ондуляторного излучения с монохроматичностью ( $10^{-3} \div 10^{-4}$ ) без использования монохроматоров, которые, как правило, портят пространственную когерентность пучка.

## Условия получения полностью пространственно когерентного излучения (Diffraction limited SR source)

$$\text{Яркость } B_{\lambda} = \frac{N_{ph}}{\Delta t} \cdot \frac{1}{\Delta S \cdot \Delta \Omega} \cdot \frac{1}{\Delta \lambda / \lambda}$$

Дифракционный предел фазового объема источника фотонов

$$(\Delta S \cdot \Delta \Omega)_{\min} = \frac{\lambda^2}{4} \quad \text{- для гауссовского пучка}$$

Эмиттанс электронного пучка должен быть достаточно малым:

$$\varepsilon_x = \sigma_x \cdot \sigma_{x'} \leq \frac{\lambda}{4\pi}$$

В этом случае источник генерирует полностью пространственно когерентное излучение

$$\overset{\circ}{N}_{coh} = B_{\lambda} \cdot \lambda^2 \cdot \frac{\Delta \lambda}{\lambda} = \frac{N_{ph}}{\Delta t}$$

# Достоинства накопителей

Высокая реактивная мощность в пучке  
(при  $E=8$  ГэВ,  $I=1.5$  А,  $P_{\text{реакт}}=12$  ГВт).

Долгое время жизни пучка (10 – 100 час), малые потери частиц высокой энергии за единицу времени и, соответственно, низкий радиационный фон и отсутствие наведенной активности.

Одновременное обслуживание большого количества экспериментальных станций и пользователей СИ.

# Недостатки накопителей

- Эмиттанс и энергетический разброс электронного пучка определяется равновесием между процессами радиационного затухания и диффузии, обусловленной квантовыми флуктуациями излучения и внутривпучковым рассеянием
- Анализ показывает, что нет практических решений уменьшить эмиттанс пучка в накопителе  $\epsilon x < 10^{-10}$  м·рад (в настоящее время минимальный достигнутый  $\epsilon x = 10^{-9}$  м·рад, PETRA-III, 2009 г.)
- Минимальный возможный энергетический разброс электронного пучка в накопителе также ограничен величиной  $\sigma E/E \geq 10^{-3}$ .

## Достоинства и недостатки ЛУ и ЛУР

- В линаке ЛУ в отличие от циклического ускорителя нормализованный эмиттанс может быть сохранен в течение ускоряющего процесса. Имея хороший инжектор благодаря адиабатическому затуханию может быть получен предельно низкий эмиттанс.
  - Однако при непрерывном режиме работы при пучка, близких к параметрам в накопителе  $E=8$  ГэВ и токе пучка 1.5 А потребовалась бы нереально большая мощность 12 ГВт и возникли бы проблемы с гашением пучка. Поэтому в этом случае прибегают к каскадному методу ускорения с рекуперацией мощности пучка – схема ЛУР
- Ускоритель с непрерывным электронным пучком СЕВАФ

## Три пути повышения яркости источников СИ:

Невозможно удовлетворить все требования, предъявляемые к источникам рентгеновского излучения четвёртого поколения, используя только один вид источника. Три возможных решения:

- Длинные ондуляторы, установленные на усовершенствованные накопители. Однако возможности уменьшения эмиттанса и энергетического разброса электронного пучка в накопителе ограничены.
- Длинные ондуляторы, установленные на электронный линак. Высокую пиковую яркость и фемтосекундную длительность импульсов излучения можно получать, используя SASE FEL на основе линака с высоким импульсным током ( $I_{\text{pulse}} \sim 10 \text{ kA}$ ).

*\* SASE – Self Amplifying Spontaneous Emission*

- Остальные требования легче и дешевле реализуются при использовании излучения из длинных ондуляторов, установленных на ускоритель – рекуператор.

Реализация полностью пространственно когерентного источника возможна в случае перехода от накопителей электронов на ускорители с рекуперацией энергии, что впервые было предложено в августе 1997 года на конференции SRI-97:

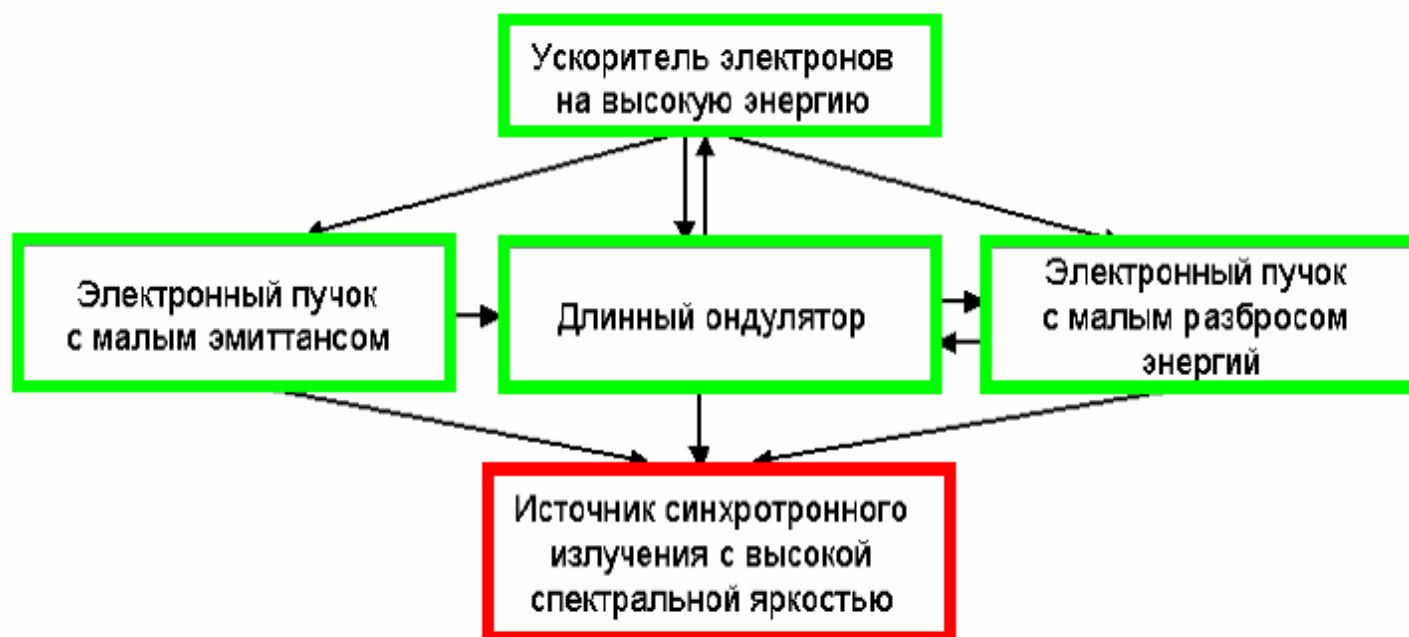
Kulipanov G.N., Skrinsky A.N., Vinokurov N.A. MARS – recirculator-based diffraction- limited X-ray source. – Novosibirsk, 1997. (Budker INP preprint; No 97-103).

Kulipanov G.N., Skrinsky A.N., Vinokurov N.A. Synchrotron light sources and recent development of accelerator technology // J. of Synchrotron Radiation. – 1998. – V. 5, pt. 3. – P. 176-178. – (Proceedings of the SRI-97), а затем обсуждалась в июле 1999 года на ICFA-meeting в APS.

После этого идея использования ускорителей - рекуператоров стала активно обсуждаться на многих конференциях, во многих лабораториях мира (Jefferson Lab, Cornell University, BNL, LBL, Erlangen University, Daresbury Lab., KEK). Однако практически во всех проектах рассматривается однооборотный вариант (ERL) в отличие от нашего первого предложения 1997 года использовать многооборотный ускоритель – рекуператор (MARS).



## Пути повышения спектральной яркости источников синхротронного излучения

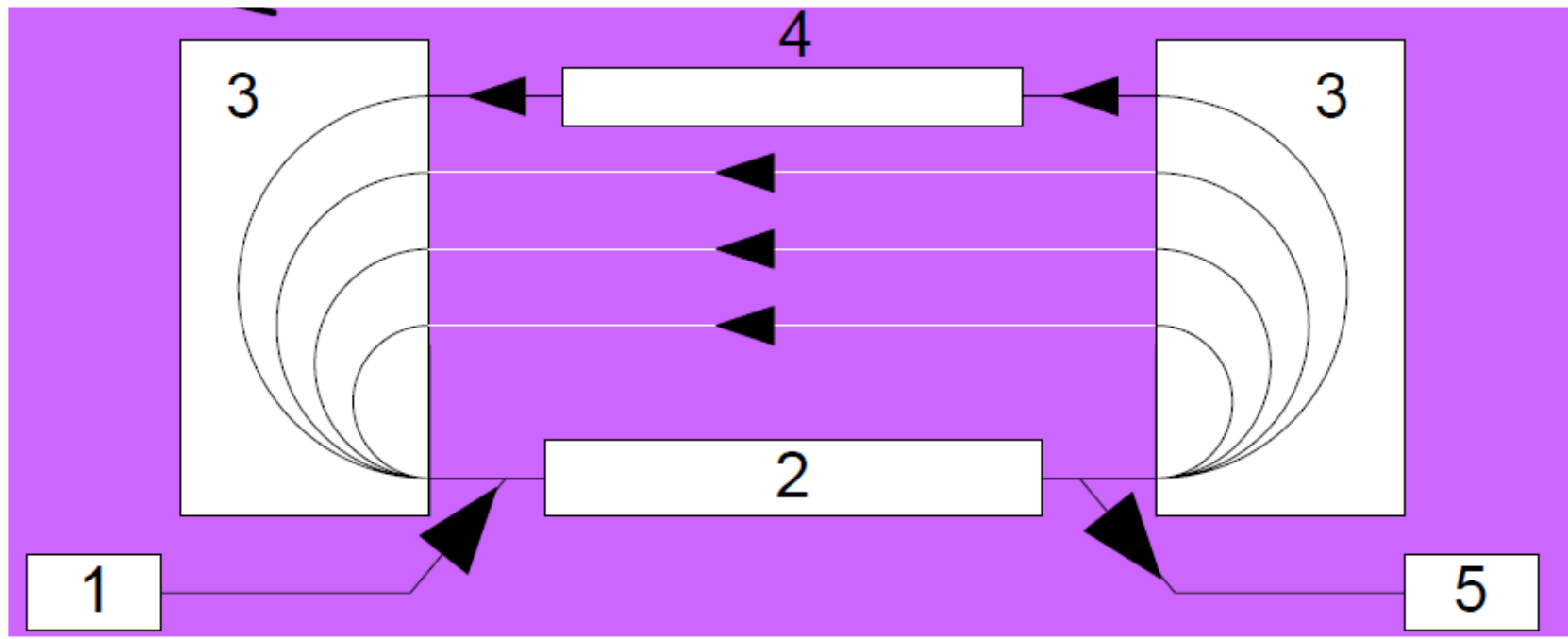


1980	$\varepsilon \sim 300 \text{ nmrad}$	$N_u \sim 10$	$\sigma_E/E \sim 10^{-3}$
1990	$\varepsilon \sim 30 \text{ nmrad}$	$N_u \sim 10^2$	$\sigma_E/E \sim 10^{-3}$
2000	$\varepsilon \sim 3 \text{ nmrad}$	$N_u \sim 10^3$	$\sigma_E/E \sim 10^{-3}$
2010	$\varepsilon \sim 1 \text{ nmrad}$	$N_u \sim 10^3$	$\sigma_E/E \sim 10^{-3}$
2020	$\varepsilon \sim 0.01 \text{ nmrad}$	$N_u \sim 10^4$	$\sigma_E/E \sim 10^{-4}$

Накопители

MARS

# Layout of the SR source based on four-passes accelerator-recuperator



1 - injector, 2 - RF accelerating structure, 3- 180-degree bends,  
4 – undulator, 5- beam dump.

## Мотивация для использования многооборотного ускорителя-рекуператора:

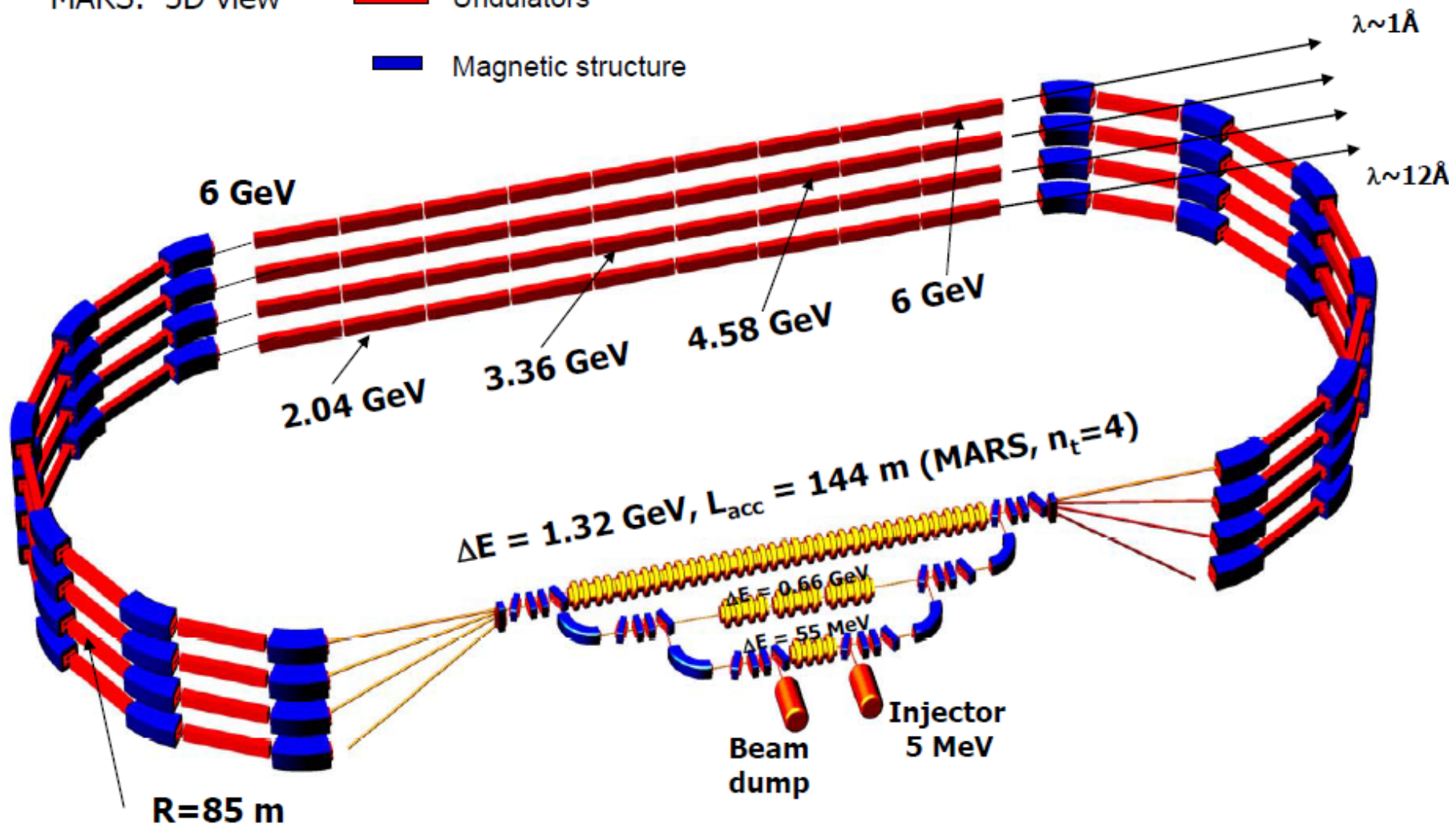
- соединить достоинства накопителя (высокая реактивная мощность в пучке, низкая радиационная опасность) и линака (нормализованный эмиттанс и энергетический разброс сохраняются в процессе ускорения);
- благодаря рекуперации энергии радикально снижается радиационная опасность и стоимость здания с биозащитой становится ниже;
- в силу многооборотного ускорения снижается стоимость ВЧ системы.

- В ускорителях – рекуператорах, как и в линейных ускорителях, нормализованный эмиттанс может быть сохранён в течении ускоряющего процесса. Имея хороший инжектор с  $\varepsilon_n < 10^{-7}$  м·рад, благодаря адиабатическому затуханию на энергии  $E > 5$  GeV может быть получен эмиттанс  $\varepsilon_{x,z} \sim 10^{-11}$  м·рад и энергетический разброс  $\delta_E / E \sim 10^{-4}$ .
- В ускорителях – рекуператорах время ускорения мало по сравнению с временем радиационного затухания в накопителях электронов (в  $10^3 \div 10^4$  раз), благодаря чему диффузионные процессы не могут испортить эмиттанс и энергетический разброс пучка электронов.

# Layout of MARS ( $E_{\text{max}} = 6 \text{ GeV}$ )

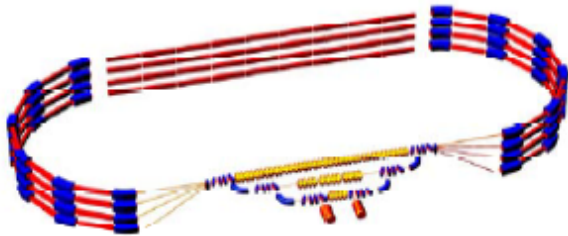
MARS: 3D view

- Undulators
- Magnetic structure



## Comparison of parameters of SR sources

### MARS ( $I_e=2.5$ mA) and Spring-8 ( $I_e=100$ mA)



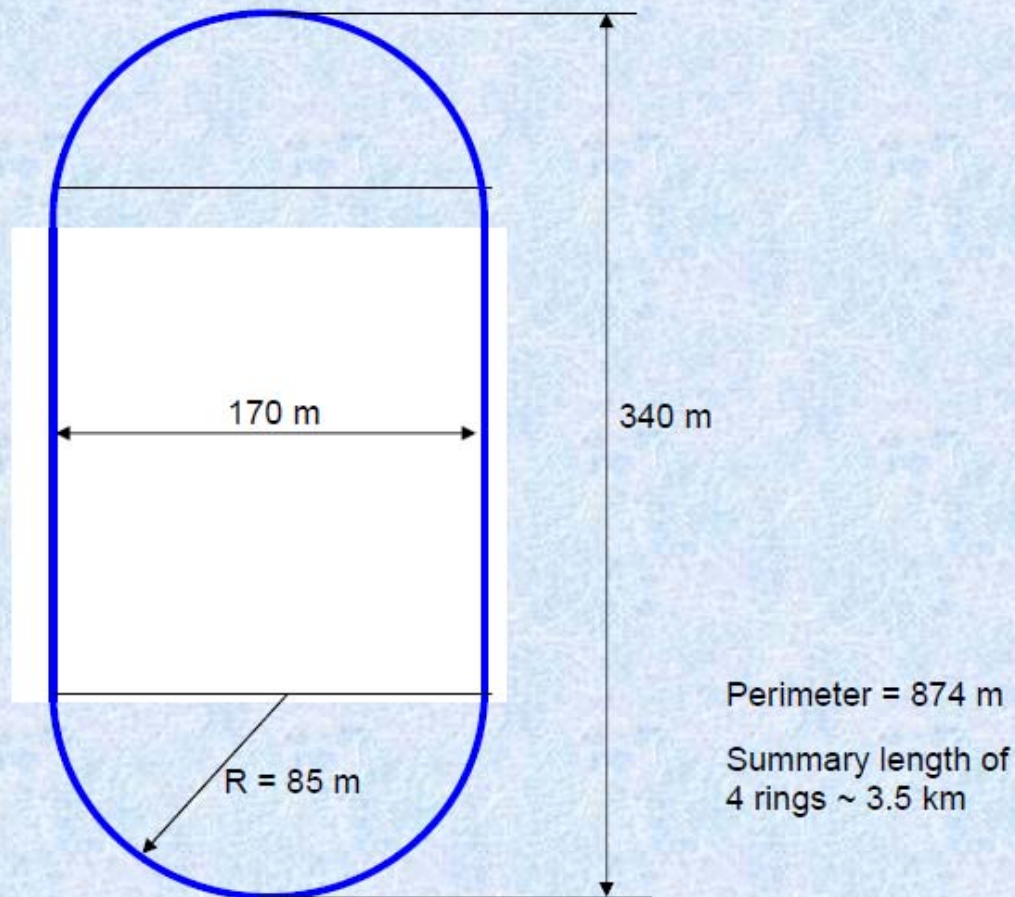
		Number of beamlines	$B,$ ph·sec <sup>-1</sup> ·mm <sup>-2</sup> ·mrad <sup>-2</sup> ( $\delta\lambda/\lambda=10^{-3}$ )	$F,$ ph/sec ( $\delta\lambda/\lambda=10^{-3}$ )
MARS	Undulator $N_u \sim 10^2$	32	$10^{22}$	$4.6 \cdot 10^{13}$
	Undulator $N_u \sim 10^3$	12	$10^{23}$	$4.6 \cdot 10^{14}$
	Undulator $N_u \sim 10^4$	4	$10^{24}$	$4.6 \cdot 10^{15}$
SPring-8	Bending magnet	23	$10^{16}$	$10^{13}$
	Undulator $N_u=130$	34	$3 \cdot 10^{20}$	$2 \cdot 10^{15}$
	Undulator $N_u=780$	4	$10^{21}$	$1.2 \cdot 10^{16}$

- 
- Для экспериментаторов источник излучения на базе ускорителя –рекуператора подобен источнику излучения на базе накопителя электронов с той лишь разницей, что в ускорителе –рекуператоре каждый раз используется свежий электронный пучок с малым эмиттансом  $\varepsilon_{\min} \sim 10^{-2}$  нм·рад и энергетическим разбросом  $\sigma_E/E \sim 10^{-4}$ .
  - В проекте MARS, 4 длинных ондулятора длиной 150 – 200 метров ( $N \sim 10^4$ ) размещены в длинных промежутках 4-х колец, а также большое количество относительно коротких ондуляторов длиной 5–20 м ( $N = 10^2 - 10^3$ ) в полукольцах.

# MARS at Kurchatov Institute ?

Russian-German Workshop  
"Kurchatov Centre of Synchrotron Radiation  
and Nanotechnology"  
February 18–19, 2008, Kurchatov Institute, Moscow

The basic dimensions of the MARS main rings





## Проект «MARS» в 2010 году

Планируется выполнить работу по завершению концептуального проекта «Создание для НИЦ «Курчатовский институт» источника синхротронного излучения четвёртого поколения «MARCS»» (по договору с РНЦ «Курчатовский институт»). В концептуальном проекте будет представлено:

- 1) основная схема работы «MARS»;
- 2) характеристики «MARS» как источника синхротронного излучения;
- 3) исследовательские возможности источника синхротронного излучения «MARS»;
- 4) магнитная структура «MARS»;
- 5) инжекционная система и система поглощения отработанного пучка;
- 6) длинные ондуляторы – основные источники синхротронного излучения в «MARS»;
- 7) высокочастотная ускоряющая (замедляющая) структура и криогенная система;
- 8) вакуумная система «MARS»;
- 9) требования к зданию для размещения «MARS» и экспериментальных залов;
- 10) вариант размещения «MARS» на территории РНЦ «Курчатовский институт»;
- 11) оценка требуемой электрической мощности для работы «MARS»;
- 12) оценка сроков проектирования, изготовления и начала работы «MARS»;
- 13) оценка стоимости проекта “MARS”

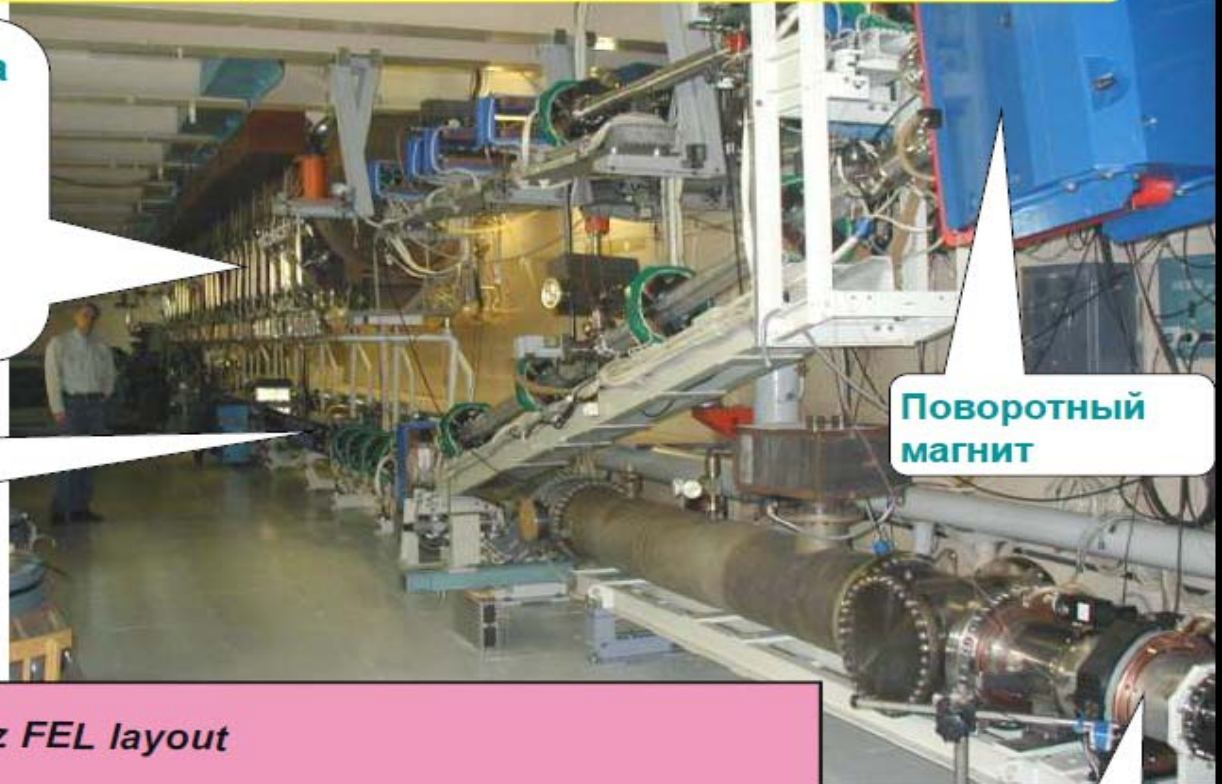
# Новосибирский лазер на свободных электронах

## Ускоряющая структура

$l_{RF} = 1.66$  м (180 МГц)  
 $f_e = 2.8 - 11.2$  МГц  
 $E_e = 12.8$  (14) МэВ  
 $t_e = 40 - 100$  пс  
 $\langle I_e \rangle = 20$  (100) мА

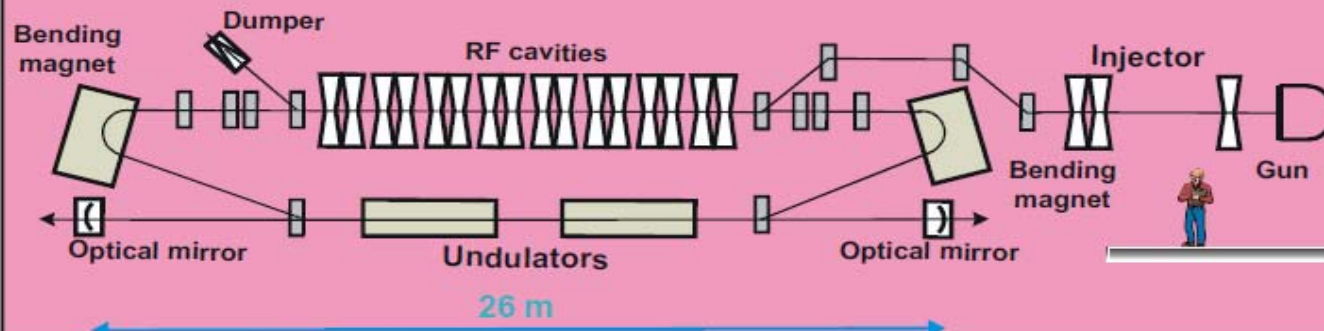
## Ондулятор

$L = 2 \times 4$  м  
 $l_w = 120$  мм  
 $N_w = 32$   
 $a_w = 0 - 0.8$



Поворотный магнит

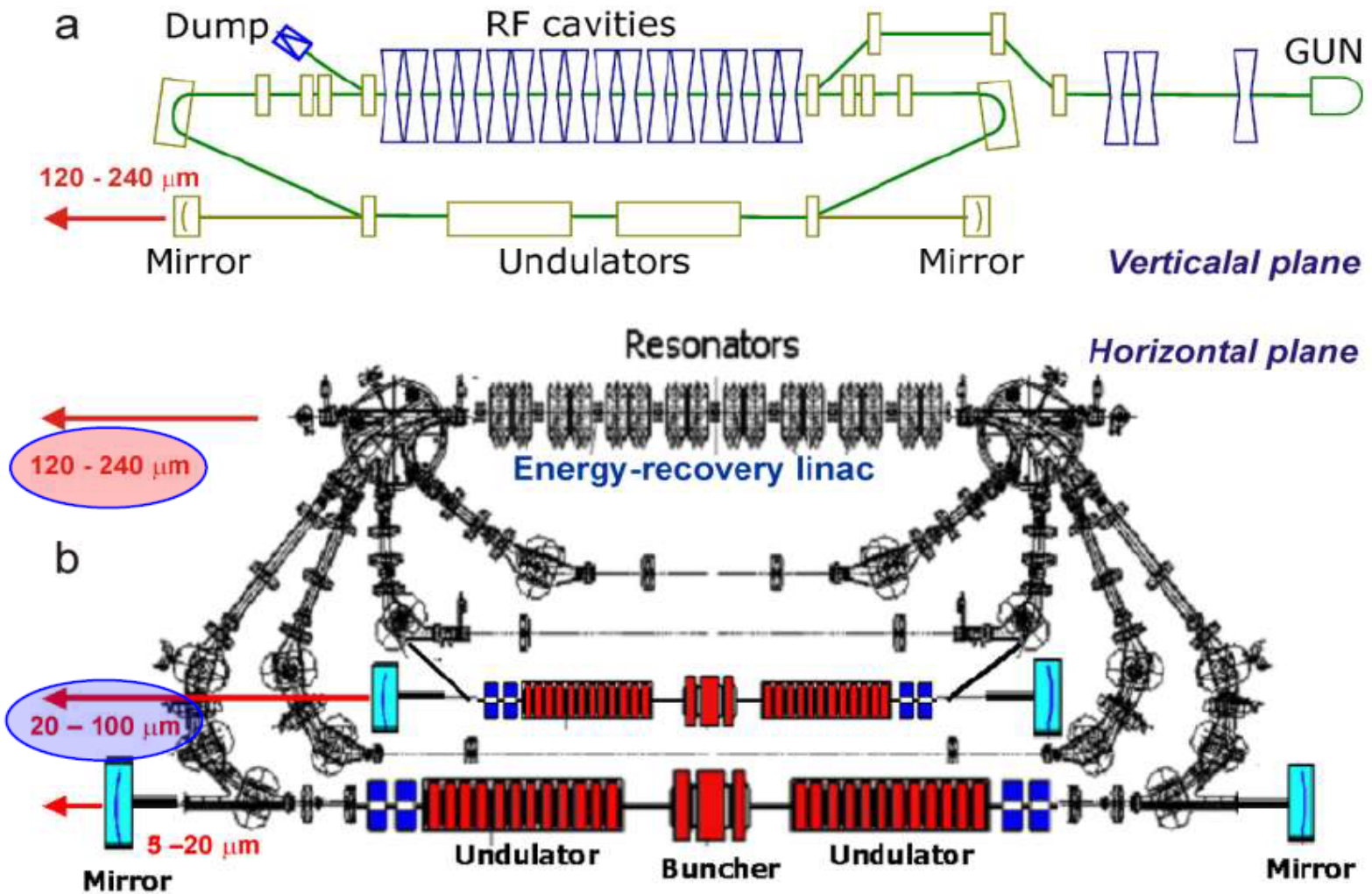
THz FEL layout



Заднее зеркало  
оптического  
резонатора

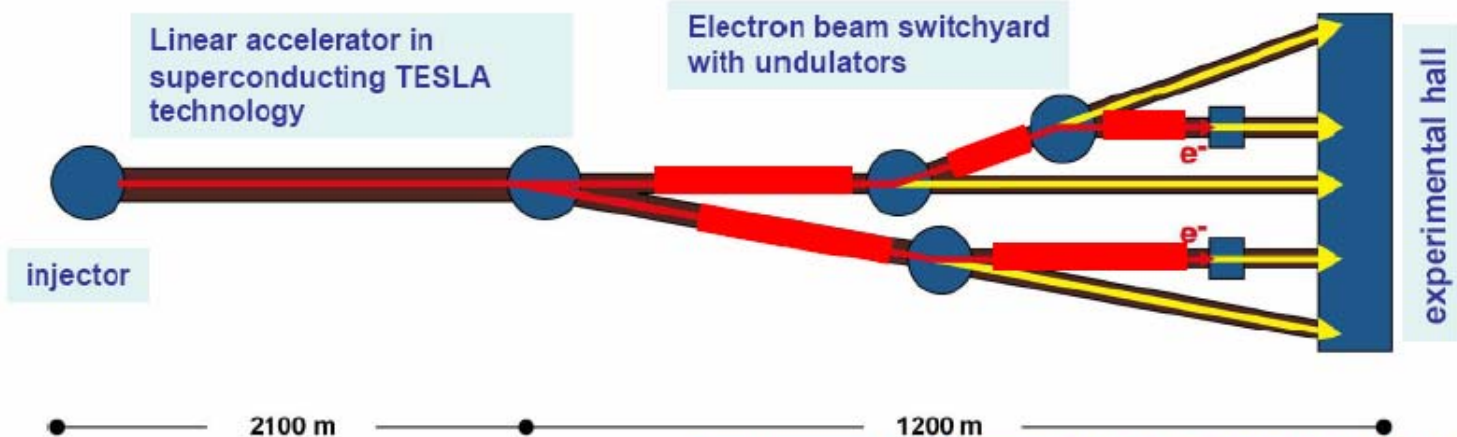
# Ближайшие перспективы

(второй лазер запущен и скоро будет доступен пользователям)



**Спасибо за внимание**

# XFEL: The European X-ray Free-Electron Laser



Linac: **20 GeV**  
 min. wavelength:  **$\sim 1 \text{ \AA}$**   
 photons per pulse:  **$\sim 10^{12}$**   
 pulse length:  **$\sim 100 \text{ fs}$**

- 2** X-ray SASE FELs,
- 1** SASE XUV-FELs, and
- 2** beamlines for short pulse physics using spontaneous radiation
- 10** experimental stations



# Production and assembly of superconducting cavities for FLASH

