

Источники синхротронного излучения и лазеры на свободных электронах - элементы инфраструктуры нанотехнологий

Часть 1
Источники и применение
синхротронного излучения

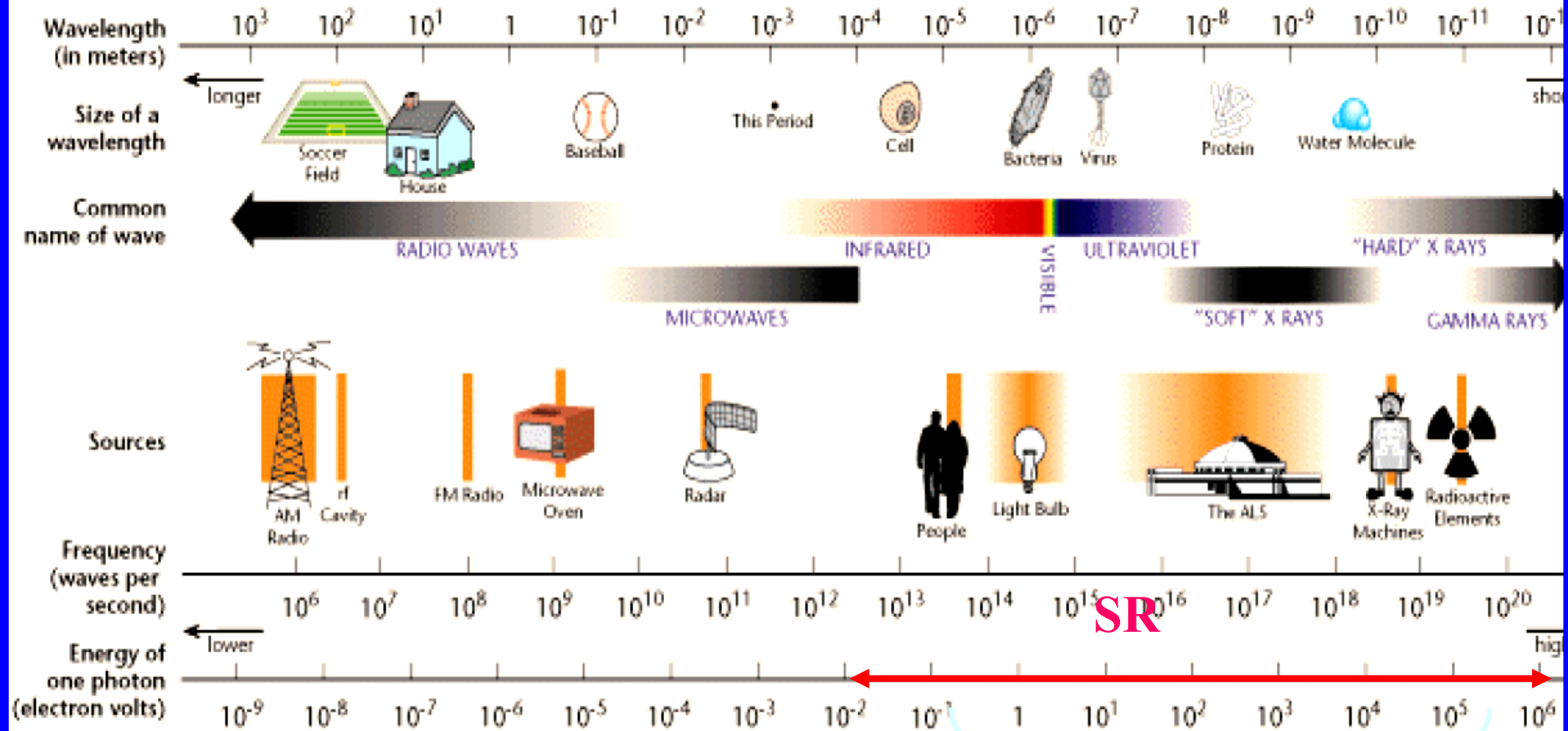
Г.Н. Кулипанов

*Институт ядерной физики им. Г.И. Будкера СО РАН,
Новосибирск, Россия.*

1.

**Электромагнитное излучение –
инструмент познания окружающего мира**

THE ELECTROMAGNETIC SPECTRUM



Электромагнитное излучение играет важную роль в познании человеком окружающего мира. Ряд примеров:

- по оценкам, большую часть всей информации человек получает с помощью зрения;**
- телескопы с момента изобретения Галилеем и до настоящего времени остаются важнейшим инструментом для изучения Вселенной;**
- изобретение микроскопа позволило открыть неизвестный ранее мир микроорганизмов – простейшие, бактерии и др.**

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

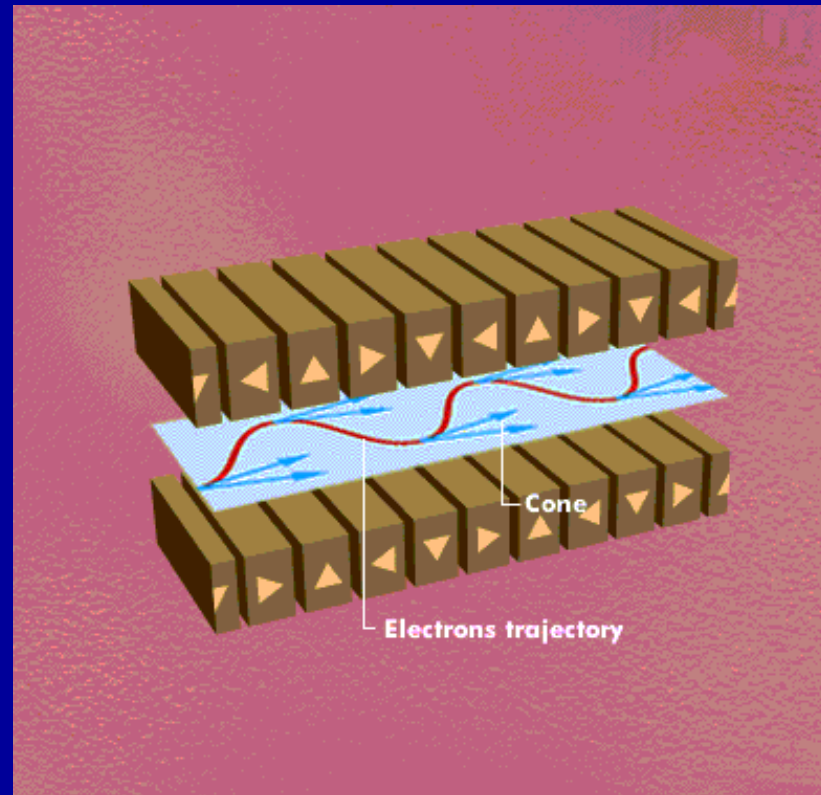
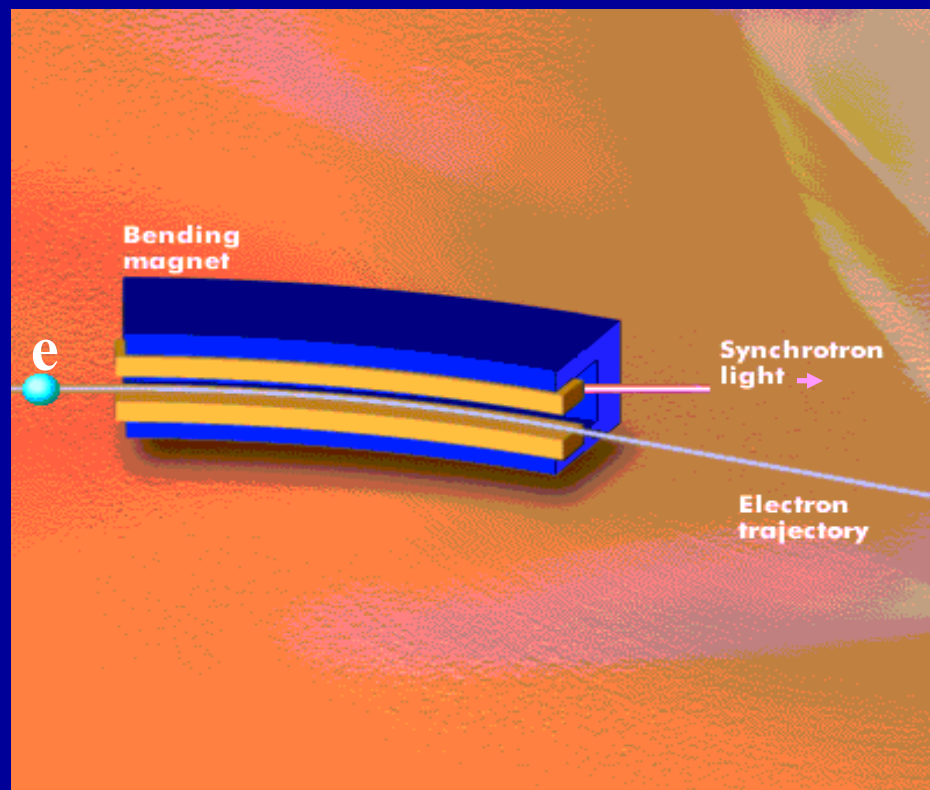
Ряд примеров:

- **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.**

2.

**Источники электромагнитного излучения,
основанные на использовании
релятивистских пучков электронов**

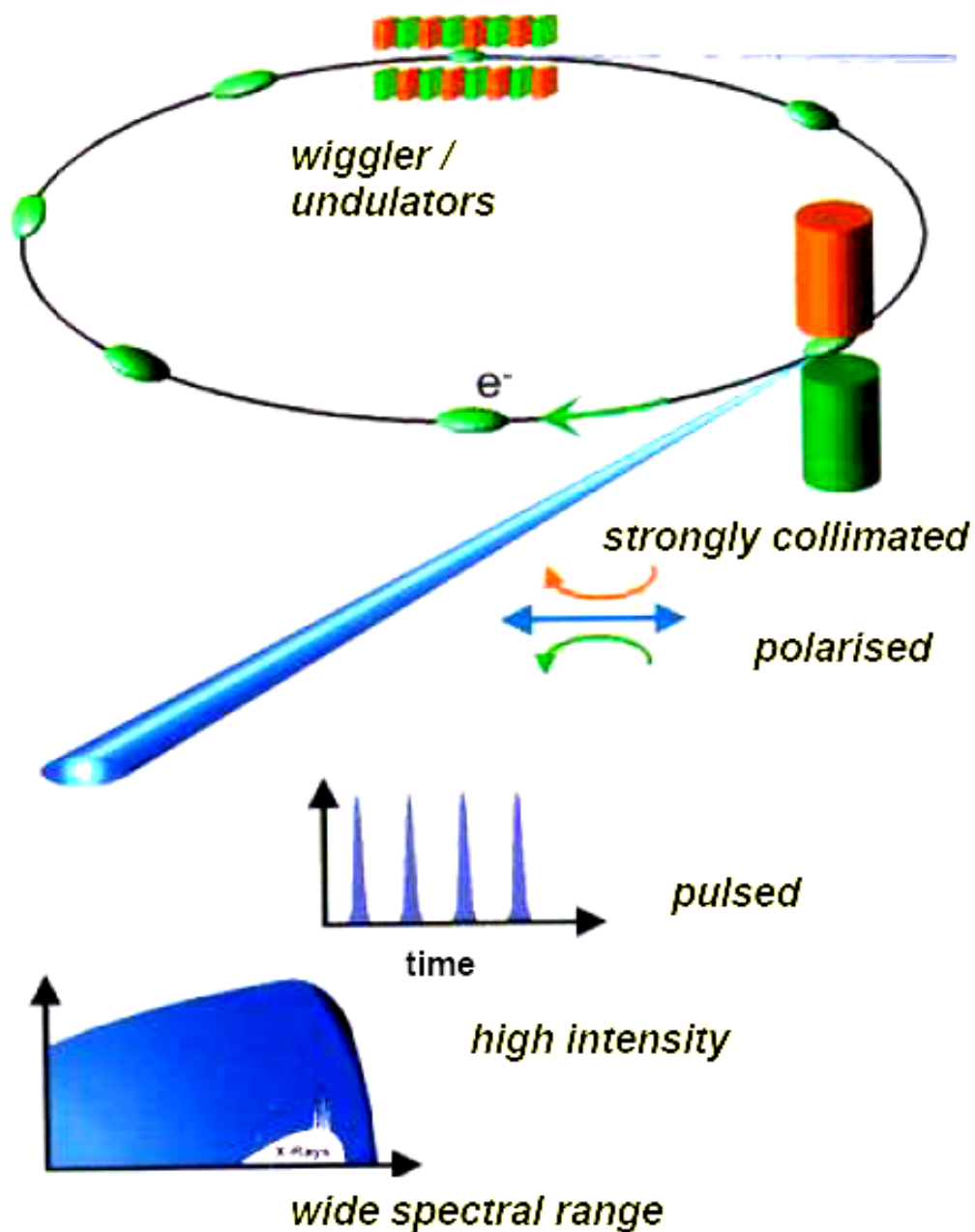
Что такое синхротронное излучение?



Синхротронное (или магнитотормозное) излучение — это электромагнитное излучение релятивистских заряженных частиц в магнитном поле.

Поскольку излучение релятивистских электронов в магнитном поле впервые наблюдалось в синхротроне, то его стали называть синхротронным, хотя в курсе Л.Д. Ландау и Е.М. Лифшица соответствующий параграф называется, может быть, физически более правильно — «магнитотормозное излучение».

Properties of synchrotron radiation



Properties:

- high brilliance and flux
- infrared up to hard X-rays (>100keV)
- polarization
- time structure

Applications:

- spectroscopy
- diffraction/scattering
- imaging

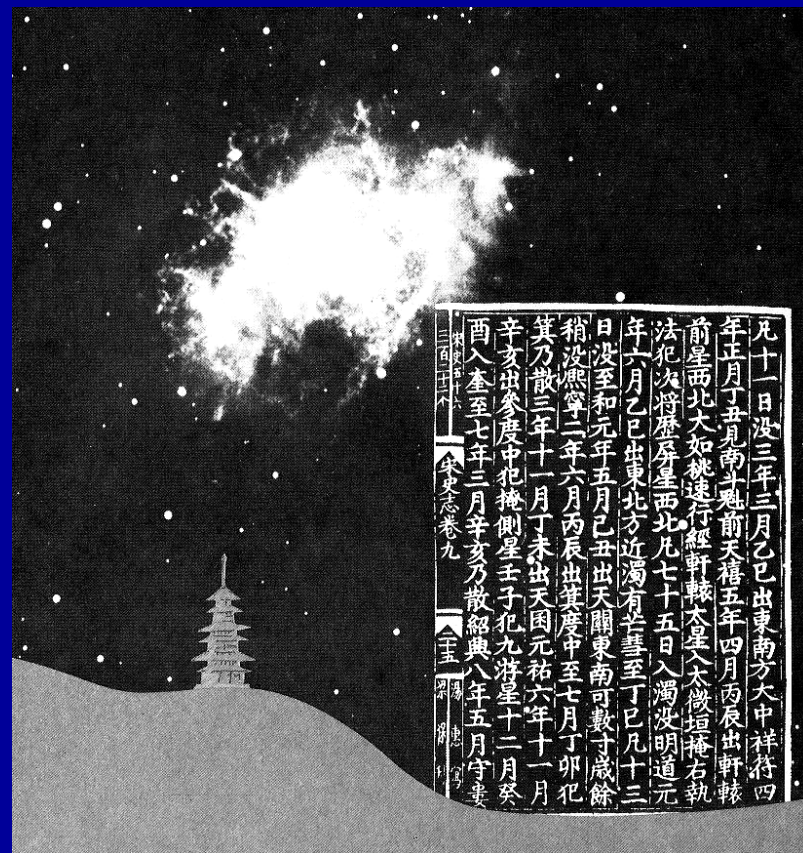
Fields:

- solid state physics
- crystallography
- structural biology
- chemistry/catalysis
- geo-/environmental science
- materials science, nano science
- medical science
- atoms, molecules and clusters
- magnetism
- engineering science

Crab Nebula
6000 light years away

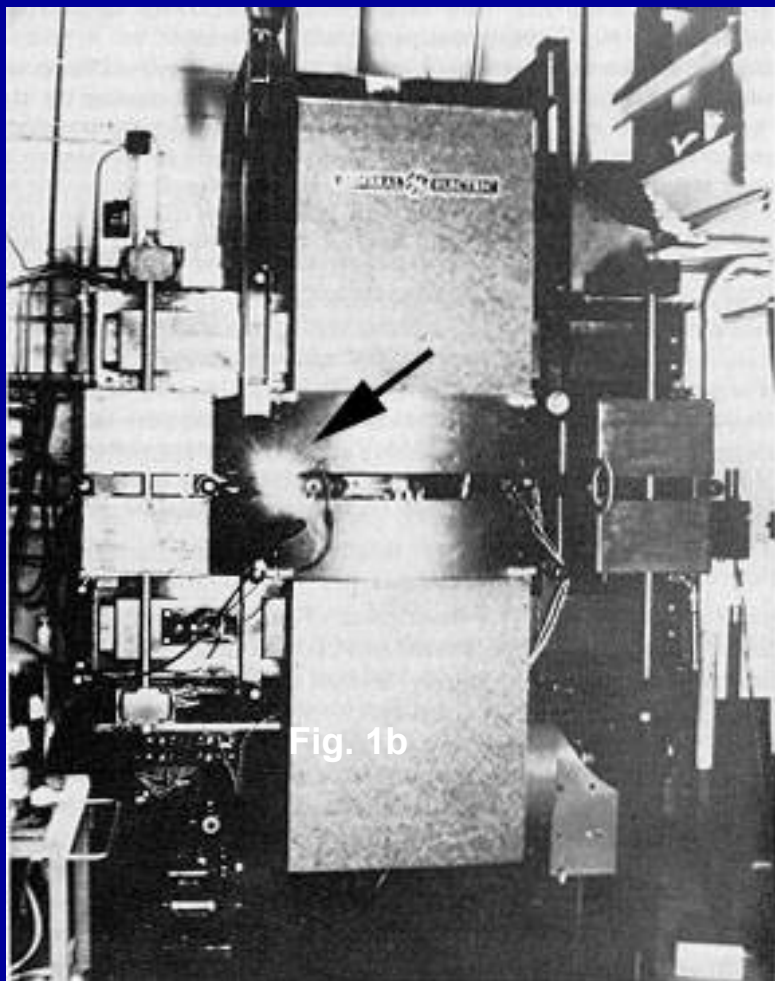
History

First light observed
1054 AD



Рождение Крабовидной туманности было связано со взрывом сверхновой в 1054 году – факт, описанный в своих хрониках японскими и китайскими монахами. «Звезда - гостя» была три недели видна днём и в течение года была самой яркой звездой на ночном небосклоне. В середине прошлого века вначале было высказано предположение, а потом и экспериментально подтверждено, что свечение Крабовидной туманности - это синхротронное излучение ультрарелятивистских электронов в межзвёздных магнитных полях.

GE Synchrotron New York State



First light observed
1947

На фотографии видно рукотворное синхротронное излучение, которое впервые наблюдали в 1947 году на синхротроне, построенном в компании «Дженерал Электрик» в США. Несколькоми годами позже синхротронное излучение наблюдалось в ФИАН СССР на первых советских синхротронах.

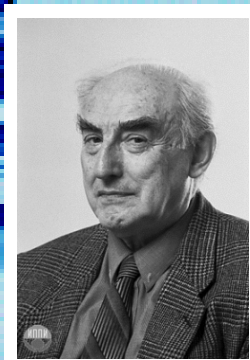
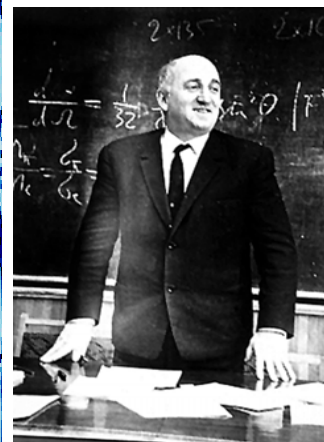
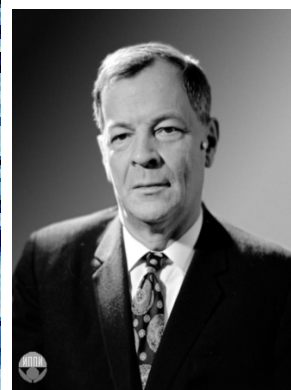
Между наблюдением рождения Крабовидной туманности и рукотворным СИ прошло девятьсот лет.

Это время было необходимо человечеству, с одной стороны, чтобы понять, что свечение Крабовидной туманности – это синхротронное излучение, а с другой - чтобы развить современную физику, создать теорию синхротронного излучения, разработать принципы и методы ускорения заряженных частиц, а создать накопители заряженных частиц и специальные генераторы синхротронного излучения – ондуляторы и вигглеры.

UNDULATORS, SNAKES (WIGGLERS)

ACCELERATORS, STORAGE RINGS

SR THEORY



Наука интернациональна, в решении проблем, связанных с генерацией СИ, приняло участие все международное сообщество. Российские учёные практически всегда были в числе первых. На рисунке приведены фотографии выдающихся российских учёных И.Я. Померанчука, Л.А. Арцимовича, В.И. Векслера, Г.И. Будкера и В.Л. Гинзбурга, заложивших основы теории СИ, основные принципы ускорения заряженных частиц, создания накопителей и специализированных генераторов синхротронного излучения (ондуляторов и вигглеров).

1. A. Lienard (1898) *Eclairage electrique* V. 16 , p. 5-14

- ввел концепцию запаздывающих потенциалов в расчетах электрических и магнитных полей;
- впервые рассмотрел мощность излучения быстрого электрона, движущегося по окружности;
- обратил внимание на сильный рост энергетических потерь, пропорциональных четвертой степени энергии частицы при фиксированном радиусе кривизны траектории:

2. G.A. Schott (1908, than 1912)

Electromagnetic Radiation, Cambridge University Press.

- исследовал свойства излучения, испускаемого движущимся по окружности электроном, в связи с изучением различных моделей атомов;
- вывел формулы, описывающие спектрально-угловое распределение мощности и поляризацию излучения.

3. Померанчук И.Я. ЖЭТФ (1939), 9, с.915

Рассчитаны ограничения на максимальную энергию электронов космических лучей, дошедших до земной поверхности, в силу энергетических потерь в магнитном поле Земли:

$$\Delta E \propto E^2 \cdot B^2 \cdot L$$

4. D. Iwanenko, I. Pomeranchuk (1944) *Phys. Rev.* 1944, V. 65, p.343

Рассчитано влияние магнитотормозного излучения на работу циклического ускорителя – бетатрона; показано, что магнитотормозное излучение приводит к установлению предела энергии электронов, ускоряемых в бетатроне

$$\Delta W \propto E^4 / R$$

5. L. Artsimovich, I. Pomeranchuk (1945)

J.Phys. USSR, 1945, 9, 267; "Ж. эксперим. и теор. физ.", 1946, 16, 379.

Впервые получены в простом виде основные формулы для излучения релятивистских электронов, спектрального ($\lambda \propto R/\gamma^3$) и углового ($\theta \propto 1/\gamma$) распределения магнитотормозного излучения.

Современная теория синхротронного излучения:

- 6. D. Iwanenko, A. A. Sokolov (1948) DAN, V. 59, p. 1551-1554; J. Schwinger (1949) Phys. Rev. V. 75, p. 1912-1925
- 7. J. Schwinger (1949) "On Classical Radiation of Accelerated Electrons"

ELECTRON SYNCHROTRONS – FIRST SOURCES of SR

1. **V. I. Veksler** (1944) Comptes Rendus de
l'Academic Sciences de l'URSS V. 43, 8, p.329
E. Mc. Millan (1945) Phys. Rev. V. 68, p. 144-145.

- Создание ускорителей электронов на очень большие энергии стало возможно после изобретения В.И. Векслером и независимо от него Е. McMillan принципа автофазировки, что позволило использовать высокочастотное ускорение заряженных частиц, движущихся по окружности с постоянным радиусом, в ускорителях, которые стали называть синхротронами.

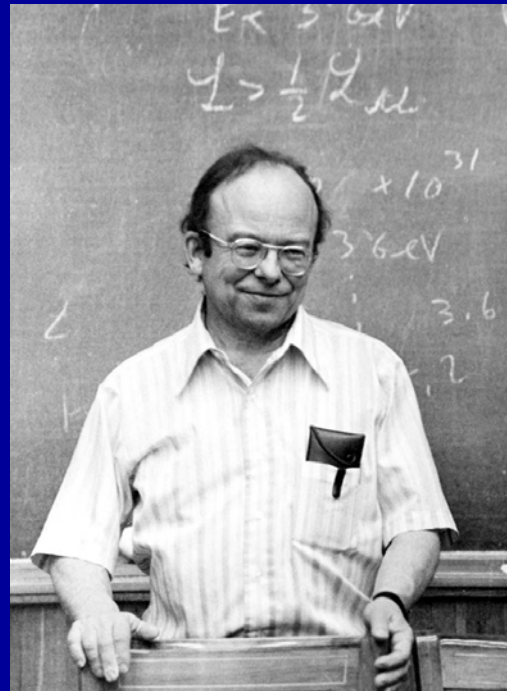
General Electric synchrotron (USA), FIAN synchrotron (USSR), Cornell synchrotron (USA), Frascati synchrotron (Italy)

2. **E. D. Courant, M. S. Livingston, M. S. Snyder** (1952)
- Открытие принципа жесткой фокусировки
CEA (USA), NIA (UK), ARUS (USSR), DESY (Germany)

The further progress of SR sources
is associated with development of
storage rings for high energy
physics colliders
(AdA, VEP-1, PSSR)



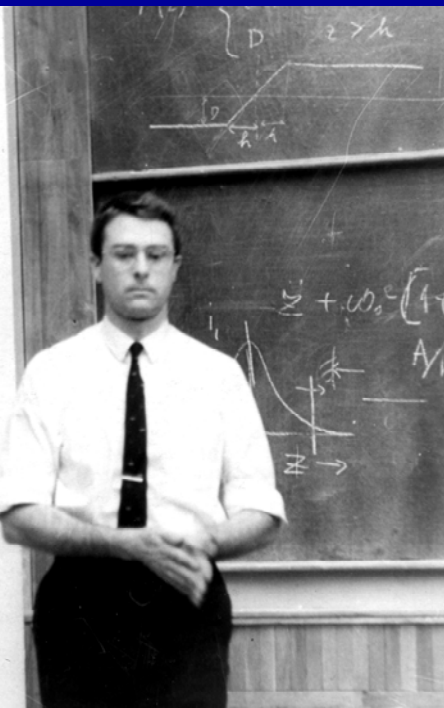
B. Touschek
(Frascati)



W. Panofsky
(Stanford)

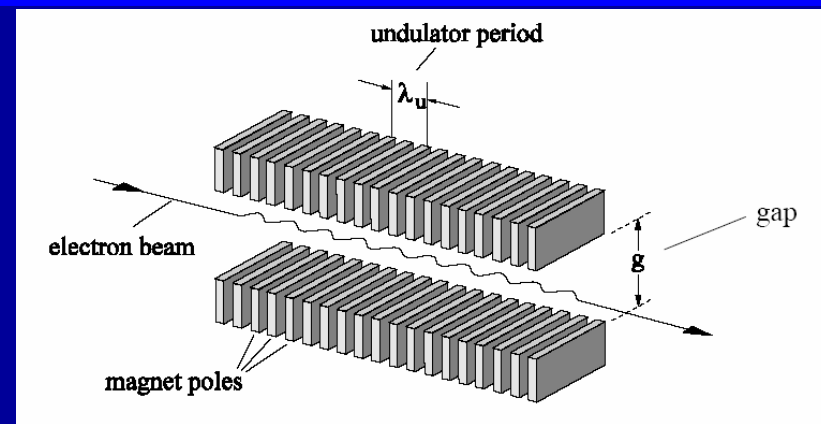


G. Budker
(Novosibirsk)



D. K. O'Neill
(Princeton)

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

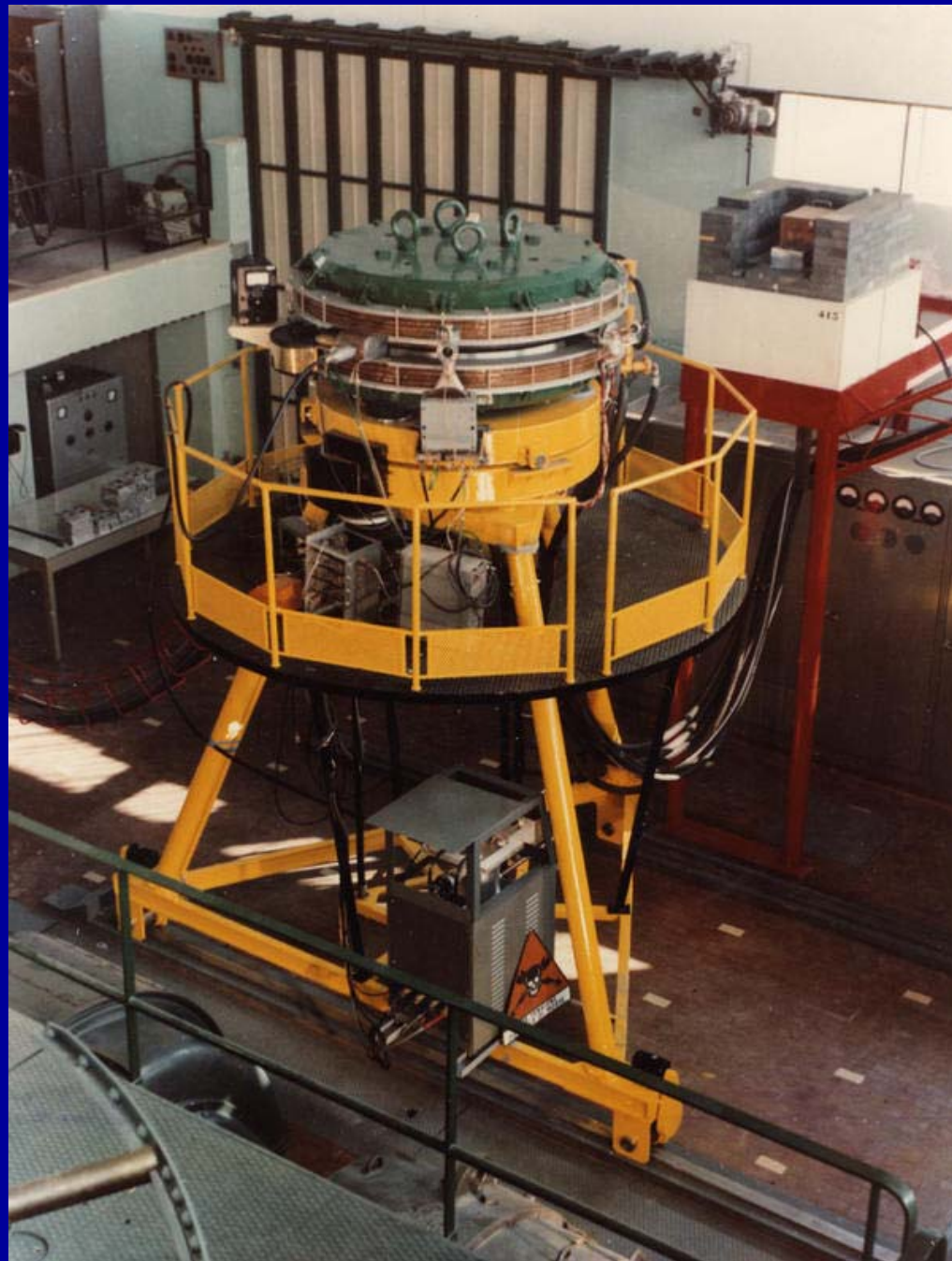
Гинзбург В.Л. Изв. АН СССР. Сер. физ. XI, № 2 165-181 (1947)

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

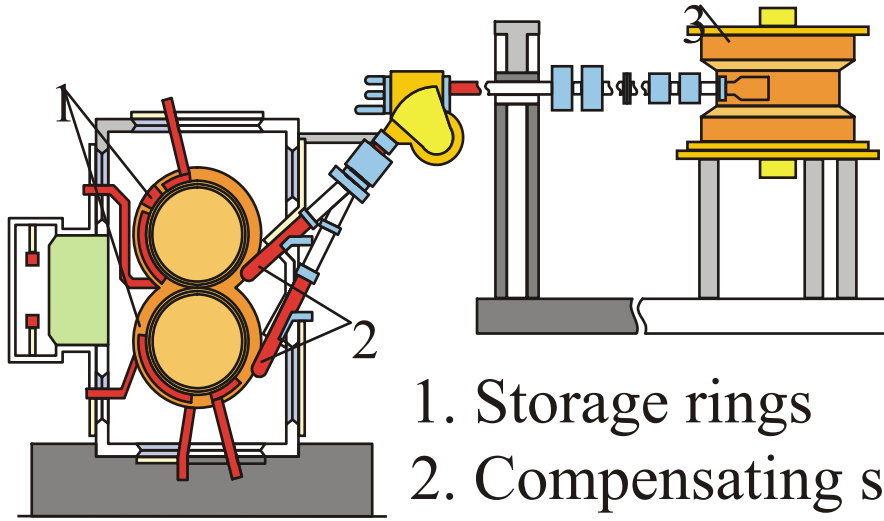
Motz H. J. Appl. Phys. 24 826-833 (1953)

- Первый вигглер создал К. Robinson in 1966.

**First Italy-France
storage ring
AdA**



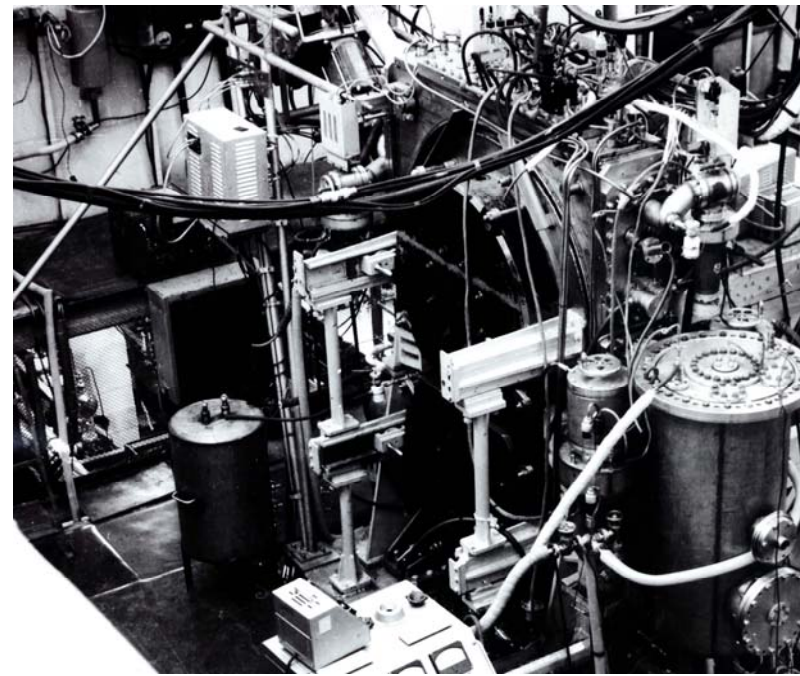
First Russian storage ring – electron-electron collider VEP-1 (1963, Novosibirsk).



1. Storage rings
2. Compensating systems
3. Synchrotron B-2S

$E = 90 \text{ MeV} - 320 \text{ MeV (total); } L = 5 \cdot 10^{27} \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$
Exps 1965-1967 :

- electron-electron elastic scattering
(in parallel to Princeton-Stanford Rings);
- double bremsstrahlung (first observation and study)

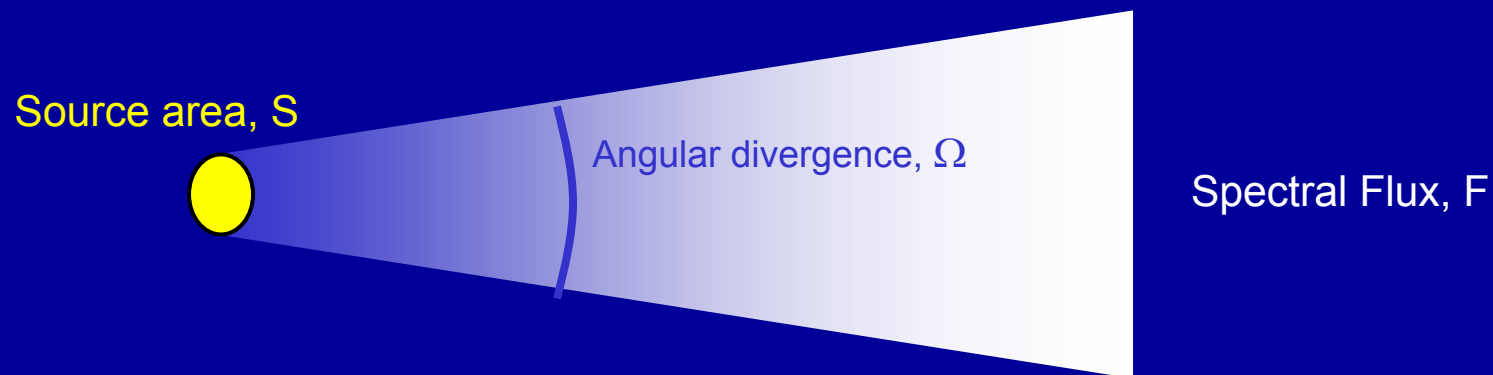


VEP-1
to-day as a monument



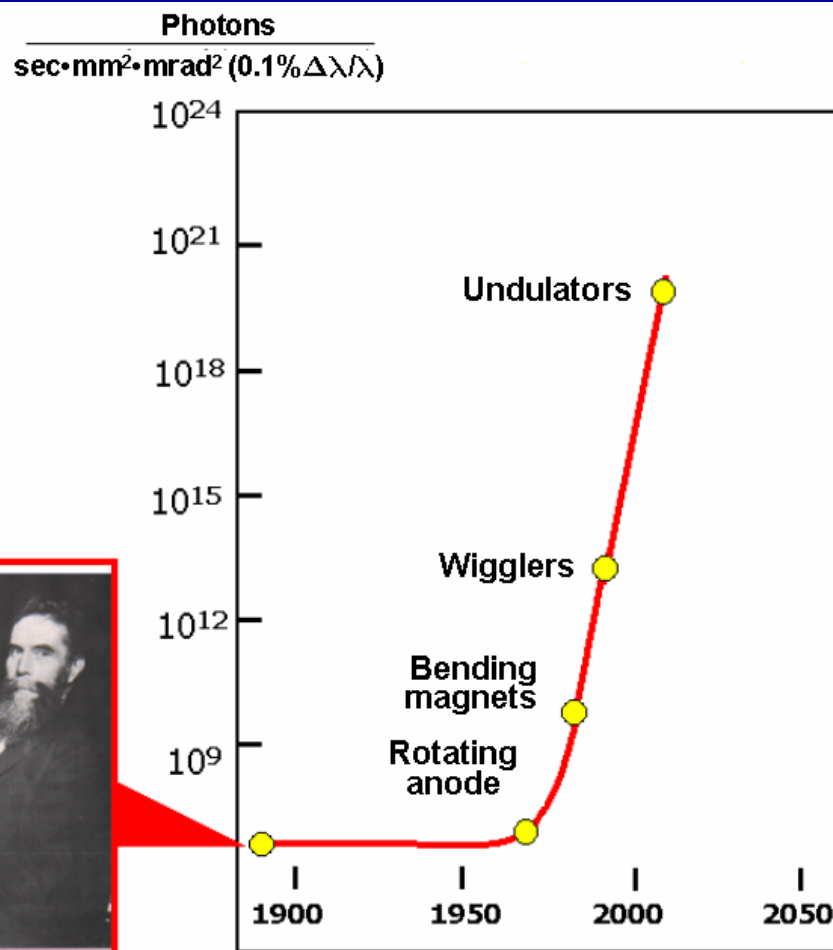
First electron-electron colliding beam experiments – 1965

**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.

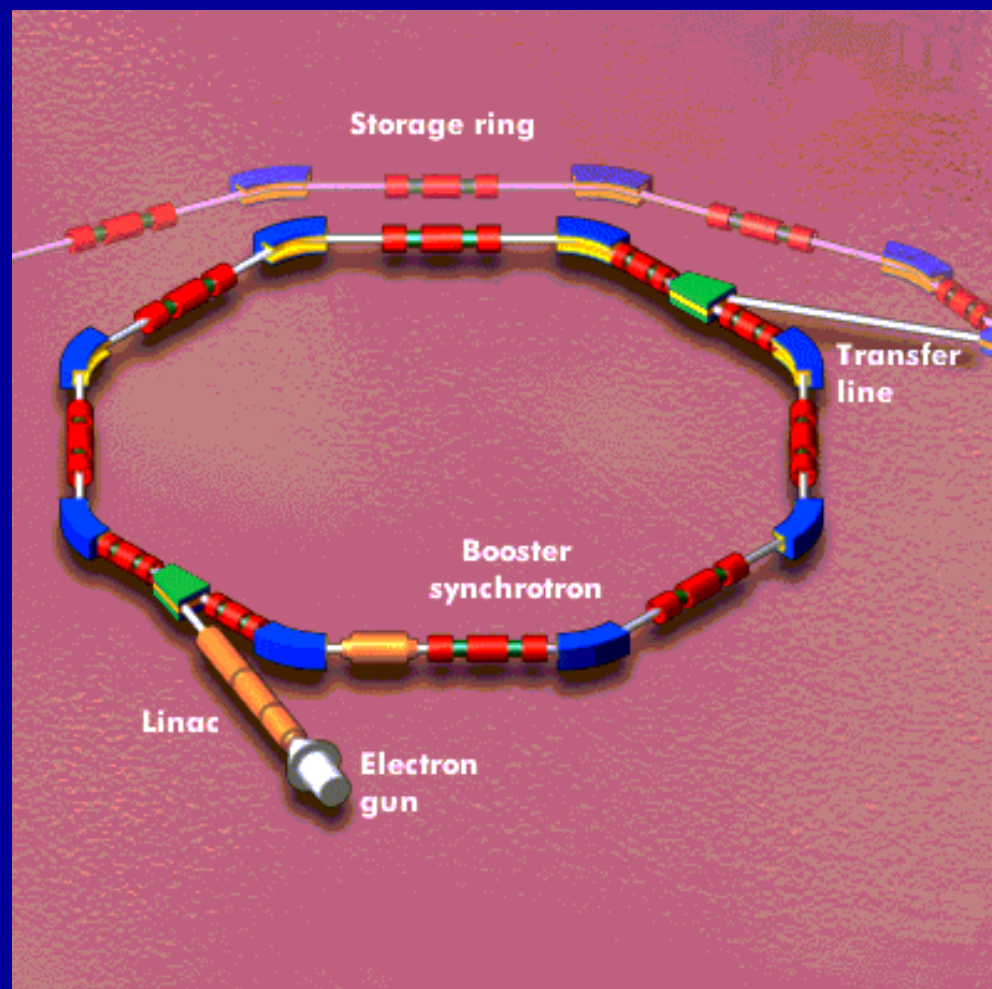


Всё началось после того, как Вильям Конрад Рентген в 1895 году открыл рентгеновские лучи, после чего были созданы первые рентгеновские трубки с яркостью $B_\lambda \sim 10^6$.

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.

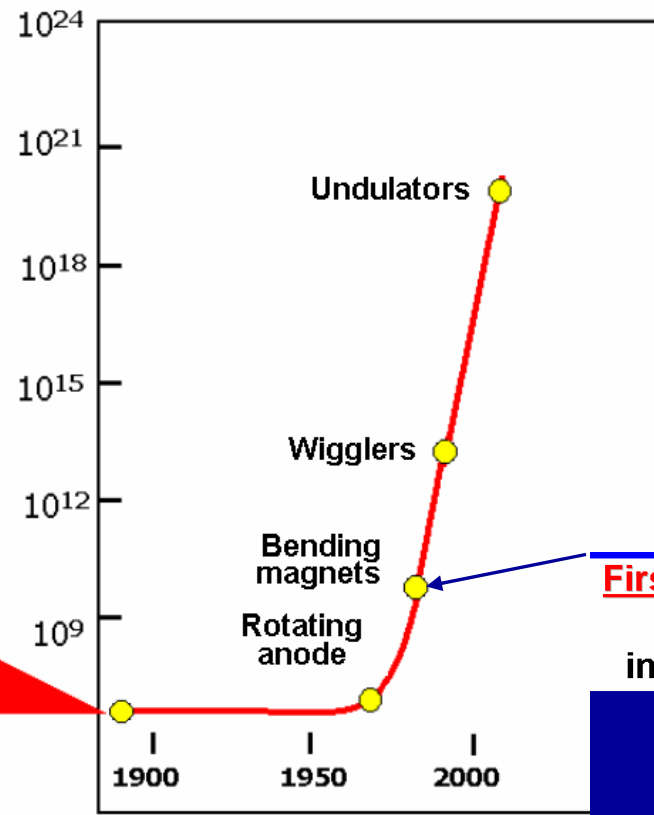
Использование электронных синхротронов, а затем накопителей электронов в качестве источников рентгеновского синхротронного излучения позволило ускорительному сообществу, начиная с 80-х годов, проводить целенаправленную работу по повышению яркости рентгеновских источников.

Три поколения источников СИ, основанных на электронных накопителях



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

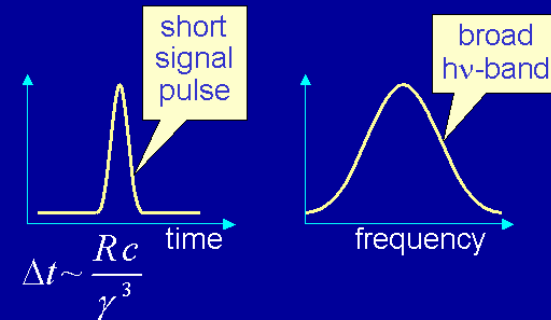
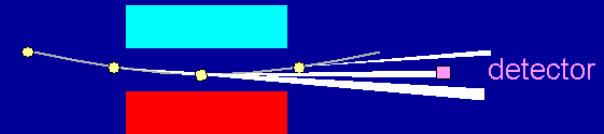
Photons
 $\text{sec} \cdot \text{mm}^2 \cdot \text{mrad}^2 (0.1\% \Delta\lambda/\lambda)$



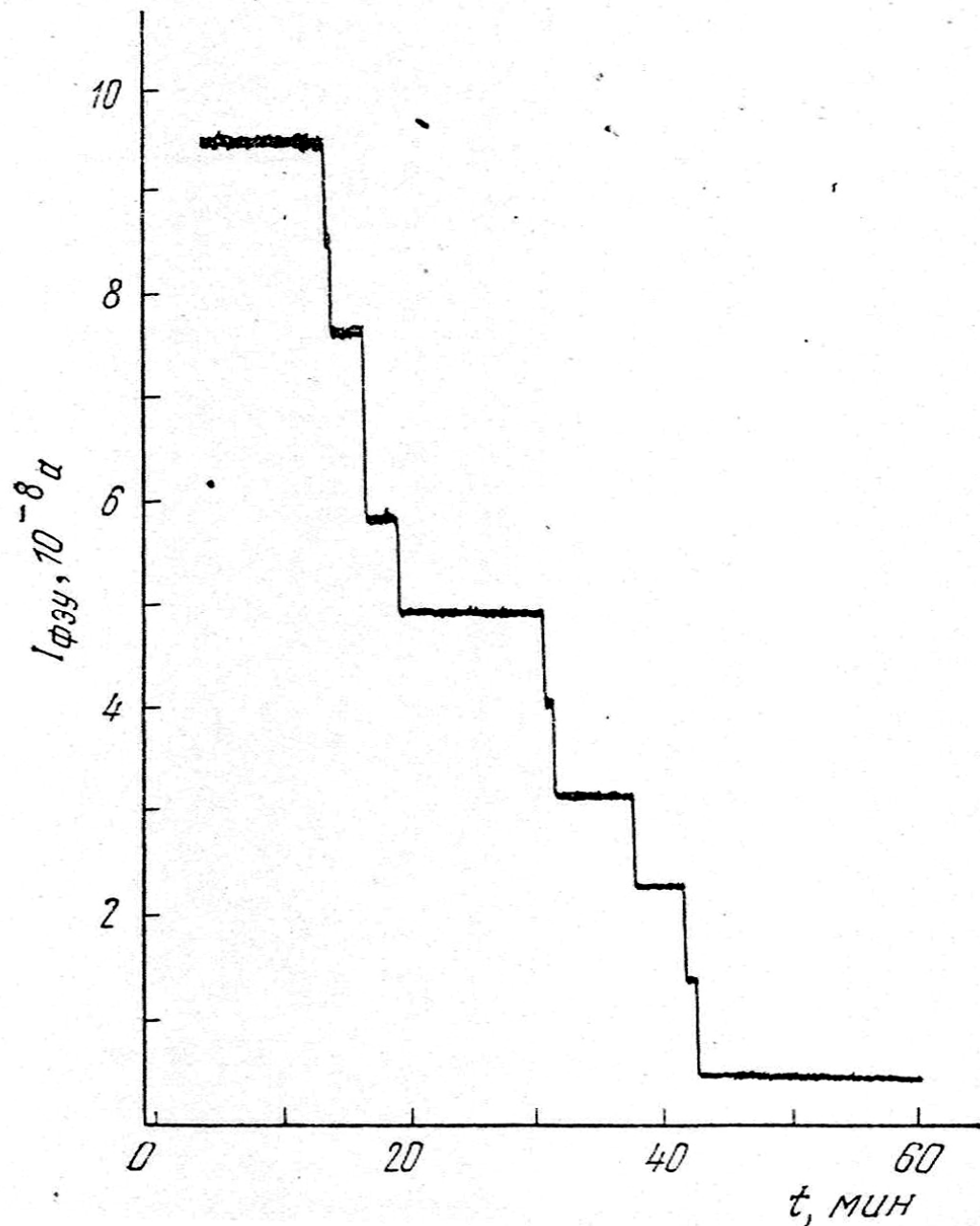
Переход с синхротронов на накопители в 70-е годы повысил яркость примерно в $10^2 - 10^3$ раз за счёт того, что в накопителях больше средний ток и, благодаря радиационному затуханию, меньше эмиттанс ($\varepsilon_x \sim 300 \text{ нм} \cdot \text{рад}$) и, соответственно, поперечные размеры электронного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

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

Bending magnets: $F \sim N_e$



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



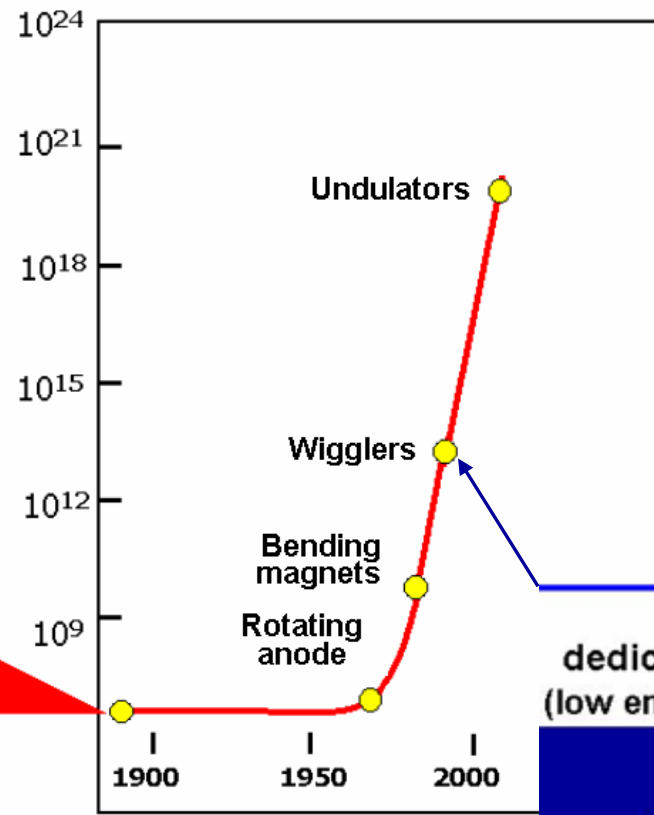
***SR beam from
11, 10, 9,....3,2,1
electrons in VEP-1
(1965)***

Постановка в прямолинейные промежутки накопителей электронов вигглеров и ондуляторов (иногда называемых также «змейками»), создающих знакопеременное периодическое магнитное поле с периодом λ_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.

Photons
sec·mm²·mrad² (0.1% $\Delta\lambda/\lambda$)



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 –

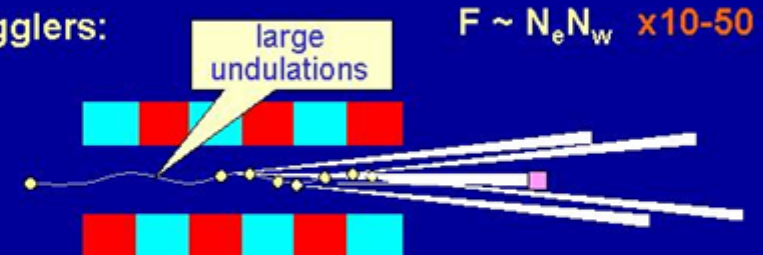
dedicated storage ring - synchrotron radiation sources (low emittance $\epsilon \sim 30$ nm, set of straight sections for wigglers)



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:



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



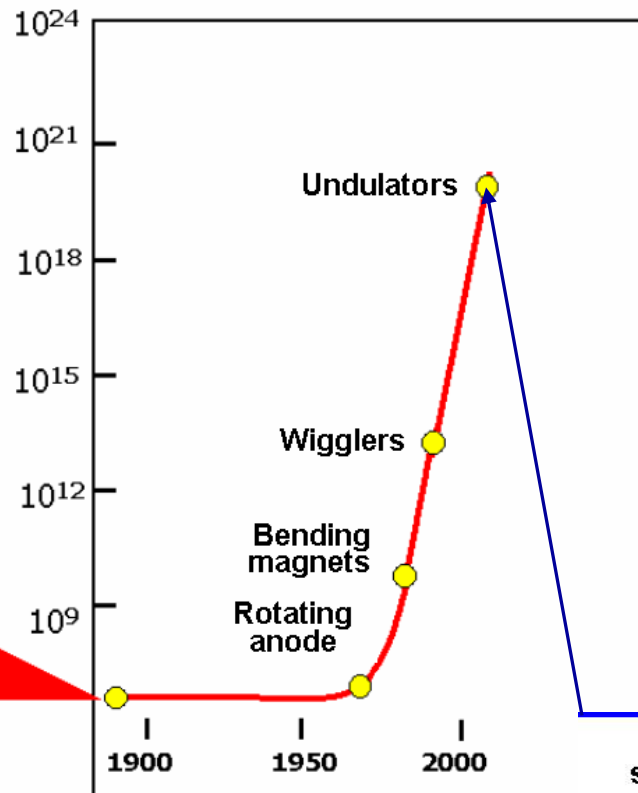
21-полюсный 7.5 Тесла сверхпроводящий вигглер

CLS, Канада, 2007



25-полюсный 4 Тесла сверхпроводящий вигглер

Photons
sec·mm²·mrad² (0.1% Δλ/λ)



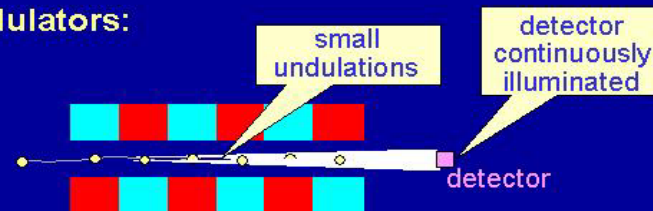
Источники СИ 3-го поколения, созданные в 90-х, имеют ещё меньший эмиттанс ($\varepsilon_x \sim 3$ нм·рад) и используют в качестве генераторов излучения длинные ондуляторы с $N \sim 10^2 \div 10^3$.

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 $\varepsilon \sim 3$ nm, set of long straight sections for long undulators)

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

Undulators:



$$F \sim N_e N_u^2 \times 10^3 - 10^4$$



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.

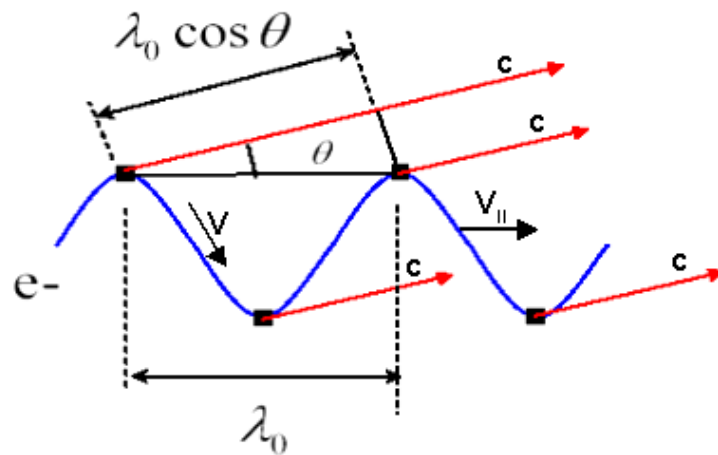
Например, в современных проектах рентгеновских источников ($\lambda \sim 1 \text{ \AA}$) предусматривается использование ондуляторов длиной ~ 100 м, что требует, исходя из простого условия интерференции

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

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

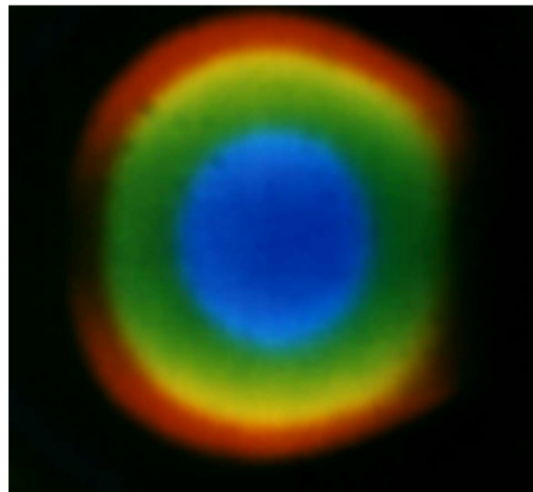
Угловая зависимость длины волны излучения из ондулятора

К точке наблюдения, расположенной под некоторым углом θ к оси змейки, источник излучения приближается со скоростью $v_{\parallel} \cos \theta$. В этой точке регистрируется излучение с длиной волны λ :



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

$$K = 0.94 \lambda_0 (\text{см}) B_0 (\text{Тл})$$



$$K \ll 1$$
$$i = 1$$

- Монохроматичность ондуляторного излучения под нулевым углом определяется длиной цуга и, соответственно, числом излучателей (периодов ондулятора):

$$\frac{\Delta\lambda}{\lambda_u} \sim \frac{1}{N_u}$$

Угловая расходимость ондуляторного излучения по порядку величины составляет

$$\Delta\psi_{0z} \approx \Delta\psi_{0x} \approx \sqrt{\frac{\lambda_u}{L_u}} \approx \frac{\sqrt{1+K^2/2}}{\gamma\sqrt{2N_u}}$$

Этой угловой расходимости ондуляторного излучения соответствует «эффективный» поперечный размер источника, равный

$$\Delta_{1z} \sim \Delta_{1x} \sim \frac{1}{4\pi} \sqrt{\lambda_u L_u}$$

- Полное число квантов, излучаемых одним электроном при пролёте через ондулятор:

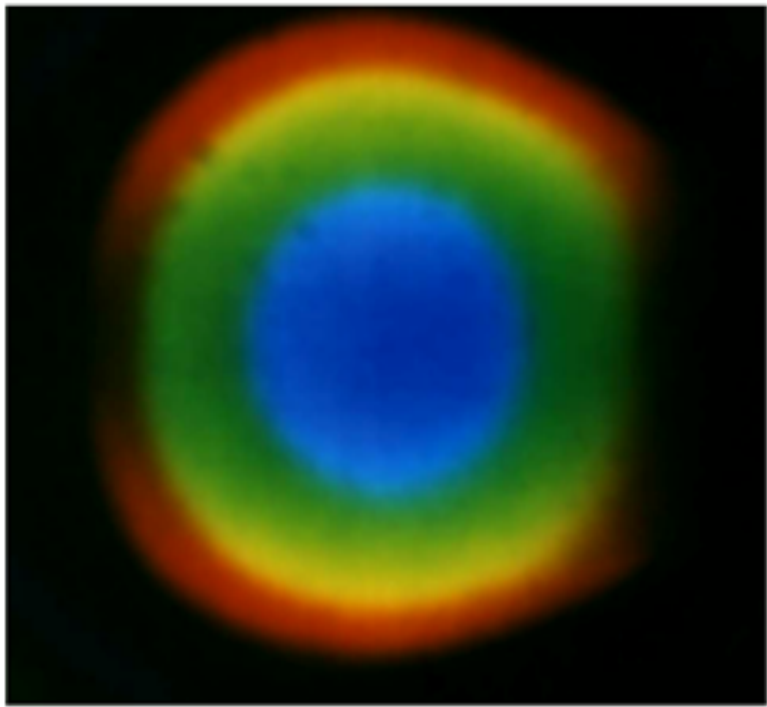
$$N_{1u} = \frac{\Delta W_{sn} \lambda_u}{2\pi \hbar c} \approx \frac{1}{137} N_u \alpha_0 K^2 \gamma$$

Излучение из ондулятора с поперечным магнитным полем линейно поляризовано, излучение из ондулятора со спиральным магнитным полем, в котором $B_y = B_0 \sin(2\pi z/\lambda_0)$, а $B_x = B_0 \cos(2\pi z/\lambda_0)$ – циркулярно поляризовано.

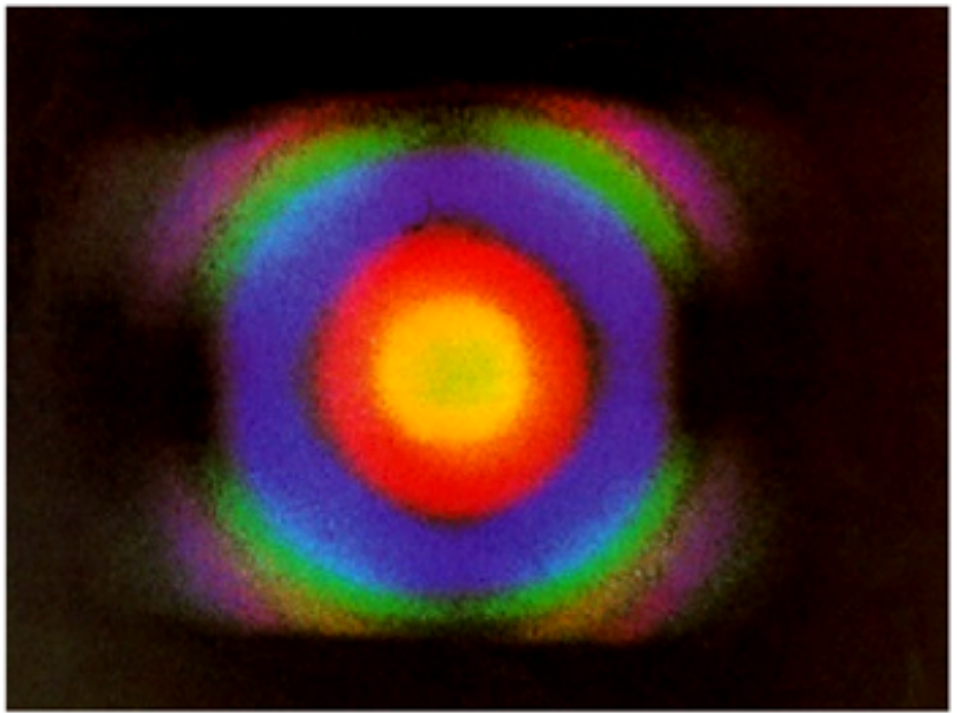
Режим генерации гармоник ондуляторного излучения ($K \gtrsim 1$)

- При увеличении магнитного поля в змейке величина K увеличивается, поперечное движение электрона становится релятивистским, модуляция продольной скорости электрона вдоль оси змейки становится существенной. В этом случае в спектре излучения появляются гармоники ондуляторного излучения ($i = 1, 2, 3 \dots$)

$$\lambda_u = \frac{\lambda_0}{2i\gamma^2} \left(1 + \frac{K^2}{2} + \lambda^2 \theta^2 \right).$$



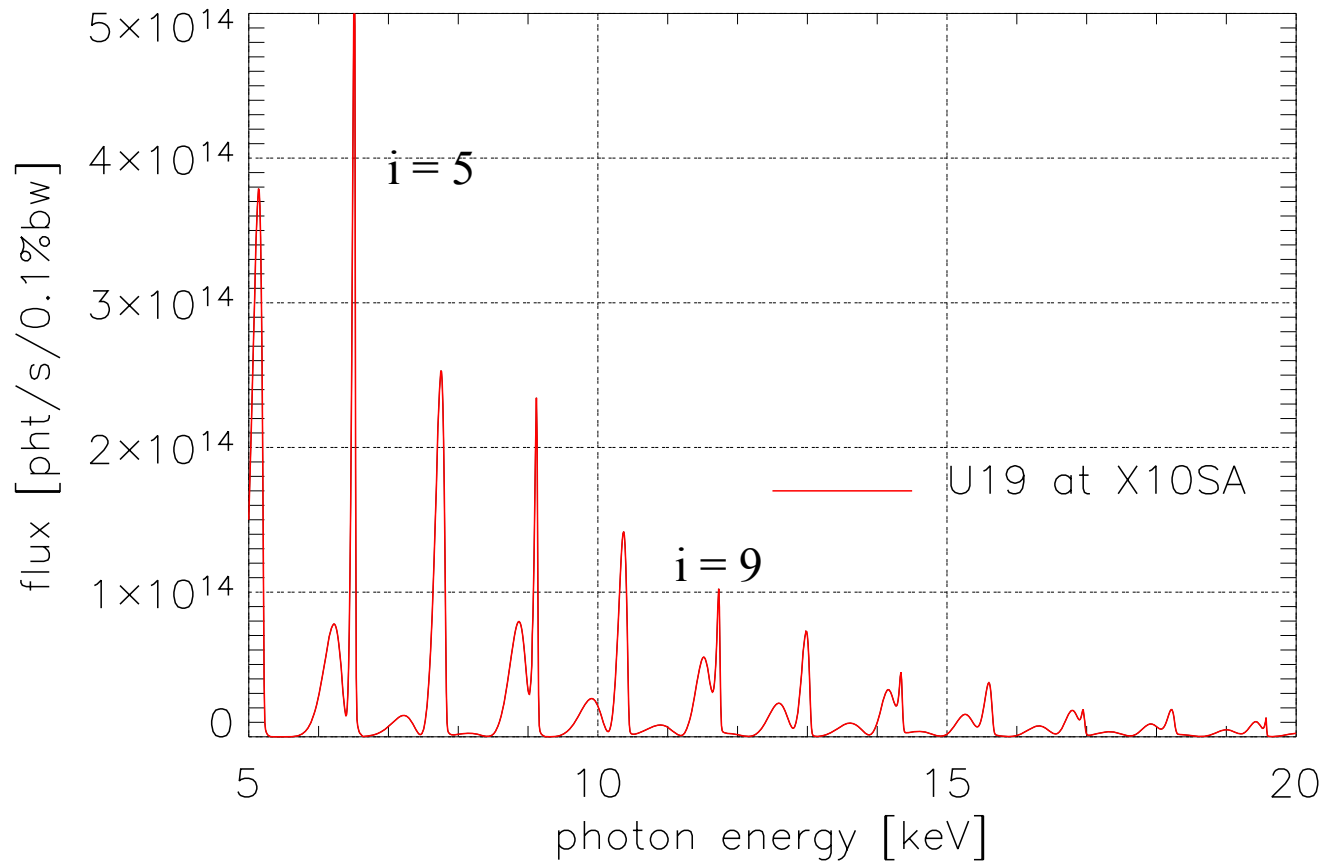
$K \ll 1$
 $i = 1$



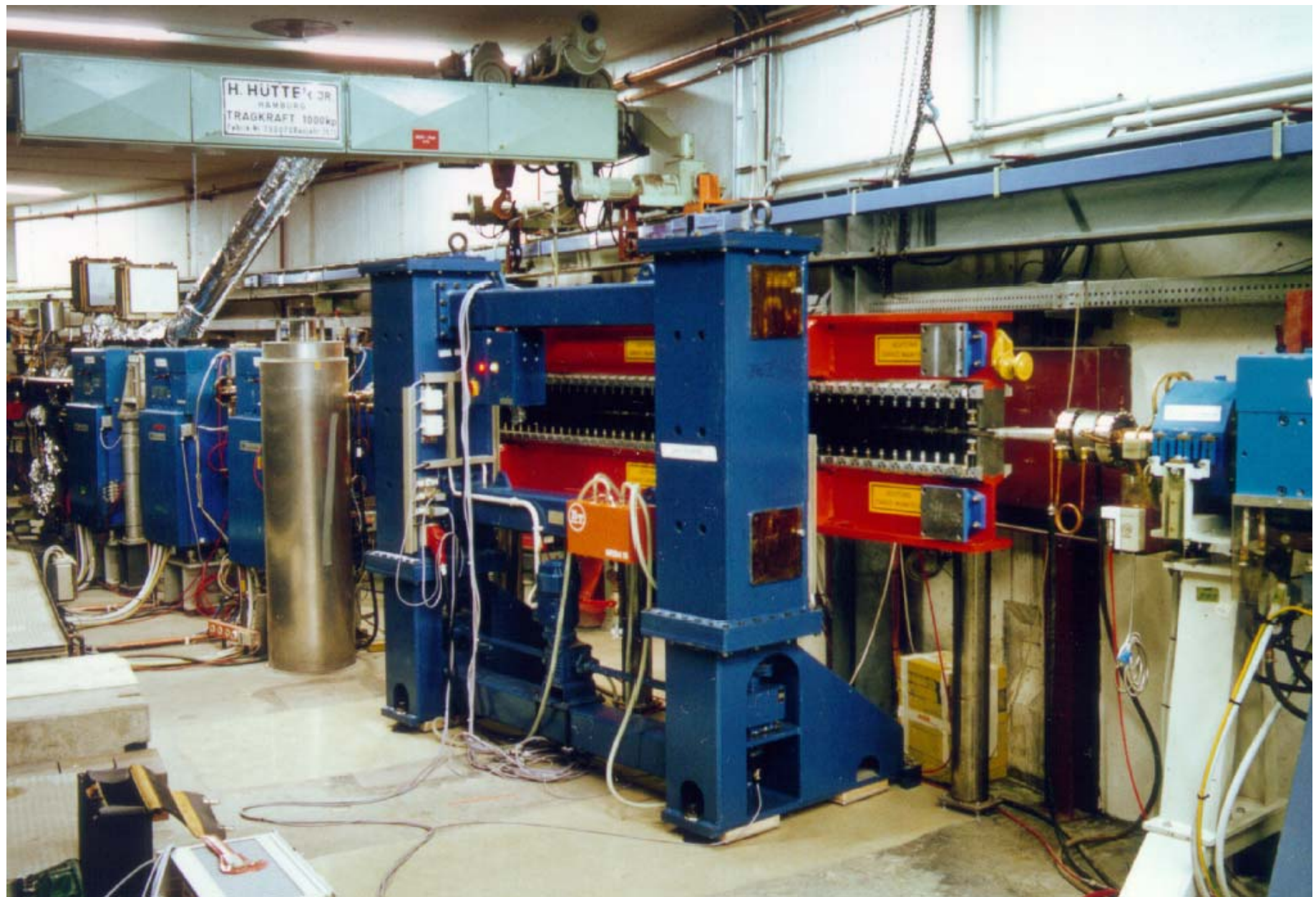
$K \sim 1$
 $i = 1, 2$

На слайде приведены фотографии излучения из ондулятора при $K \ll 1$, где видна генерация только первой гармоники ($i = 1$) и при $K \sim 1$, где видна генерация двух гармоник ($i = 1, 2$).

High harmonics with small gap (5 mm)



$$N_{\text{periods}} = 100, K_u = 1.6$$



In-vacuum undulator U-24 (Spring-8 / SLS)

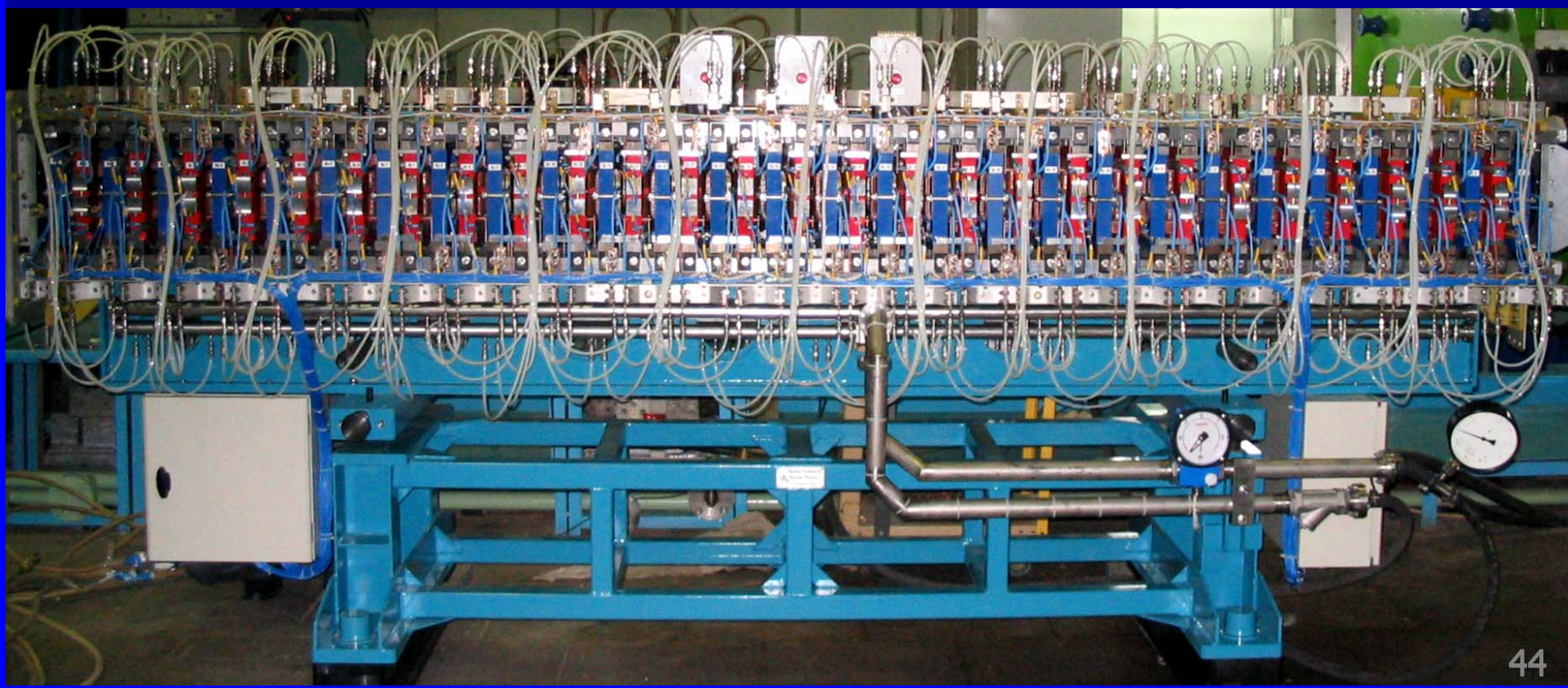


G. Ingold
T. Schmidt

Undulators HU256 For SR source Soleil (France)

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

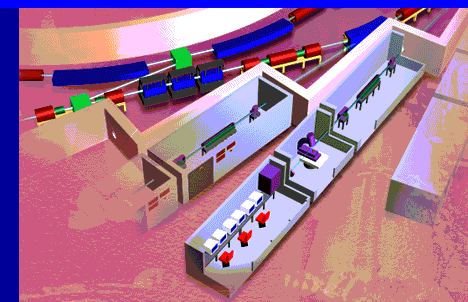
3 undulators + magn. meas. system
April 2004 – October 2005



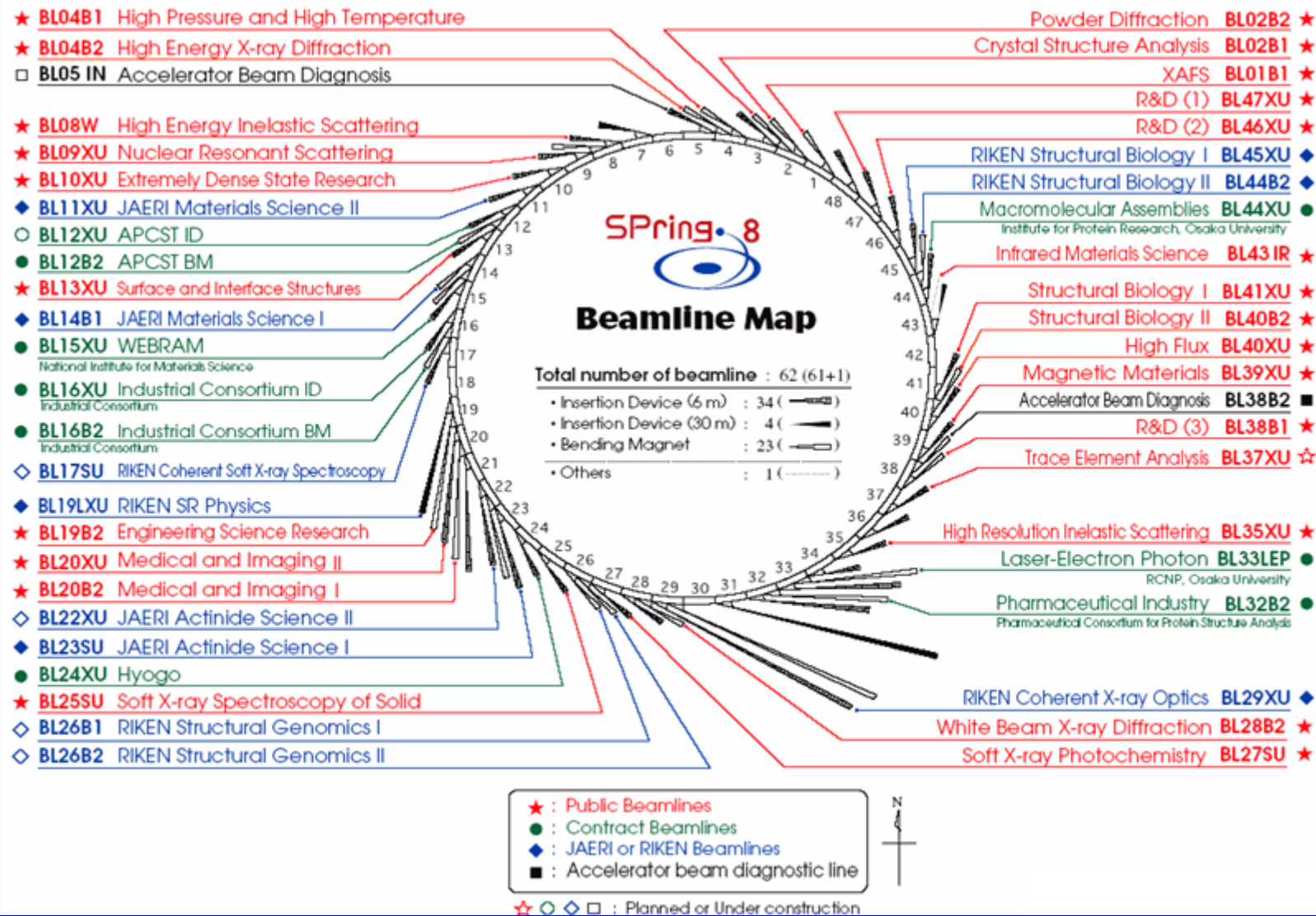
APS



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
beamlines
and
experimental
stations



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

Направления дальнейшего развития источников синхротронного излучения



Направления дальнейшего развития источников синхротронного излучения

Компактные и
относительно недорогие
источники СИ 3-го
поколения
на базе сверхпроводящих
поворотных магнитов

**Источники синхротронного излучения
“Siberia-HB” и “Nomad”**

Сибирский центр синхротронного излучения

Проект нового источника СИ "Siberia-HB"





9.6 T superbend designed and produced in the Budker INP for BESSY-II (2004)

Проект нового источника СИ “Siberia-HB” основан на применении сильнополевых (8.5 T) поворотных магнитов (“superbends”) в сочетании с традиционными “теплыми” магнитами

Project parameters

Energy	2.2 GeV
Perimeter	200 m
Number of superperiods (and number of superbends)	8 – 12
Emittance	4-6 nm
Current (with full energy injector)	up to 1 A

Structure of superperiod

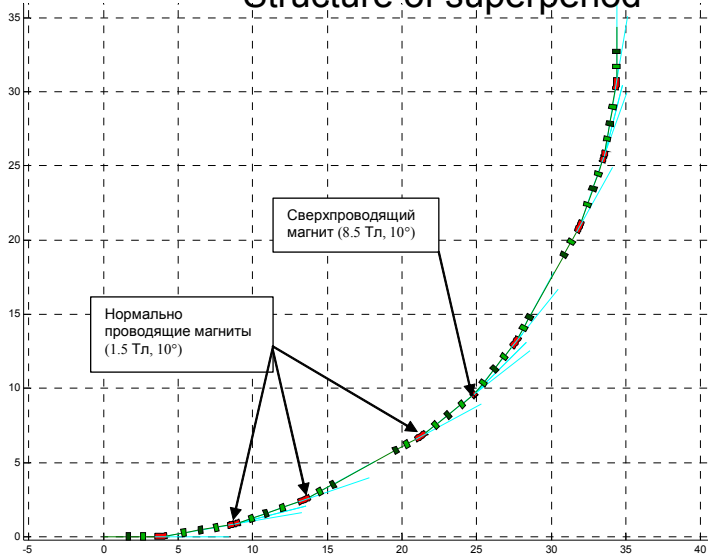
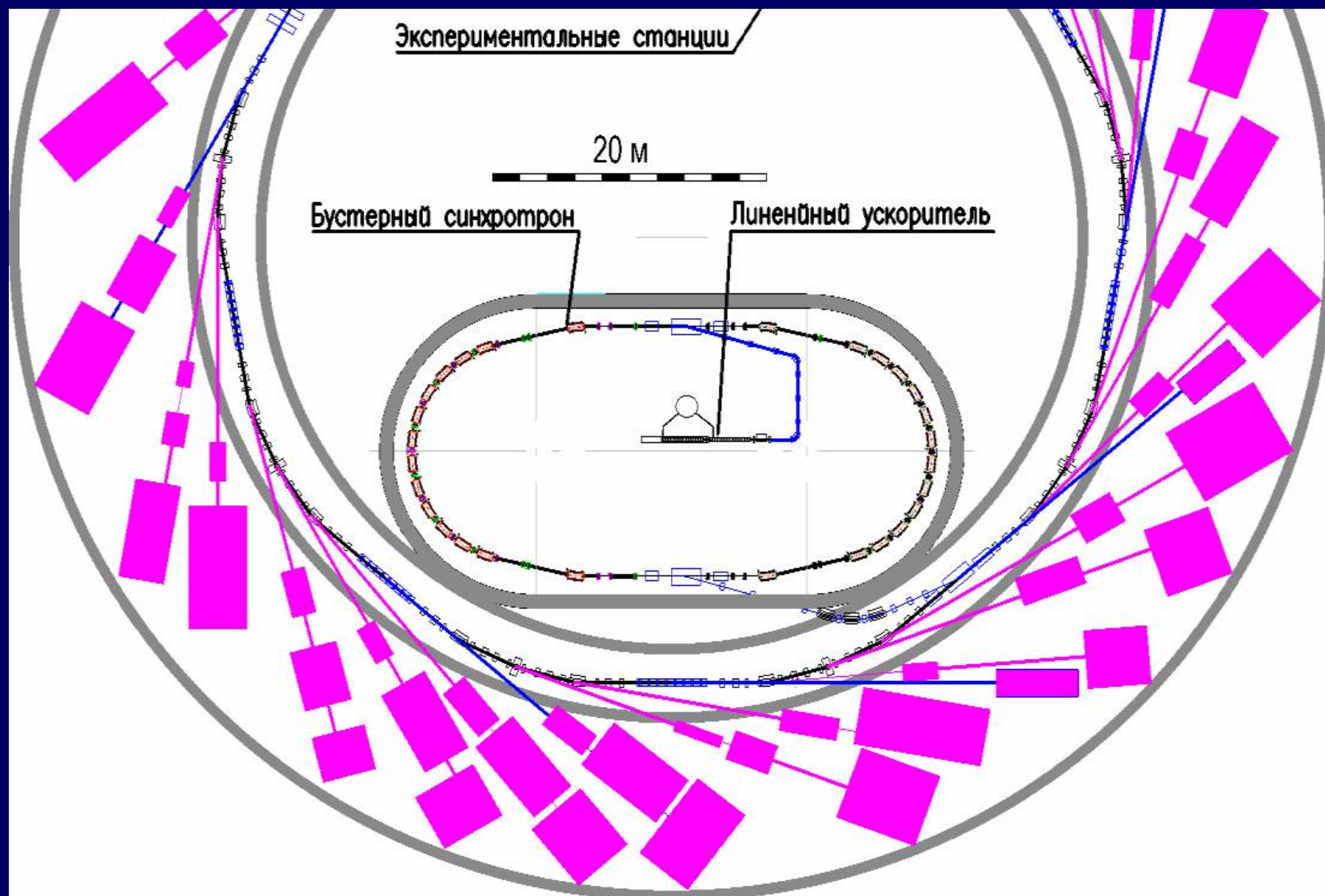
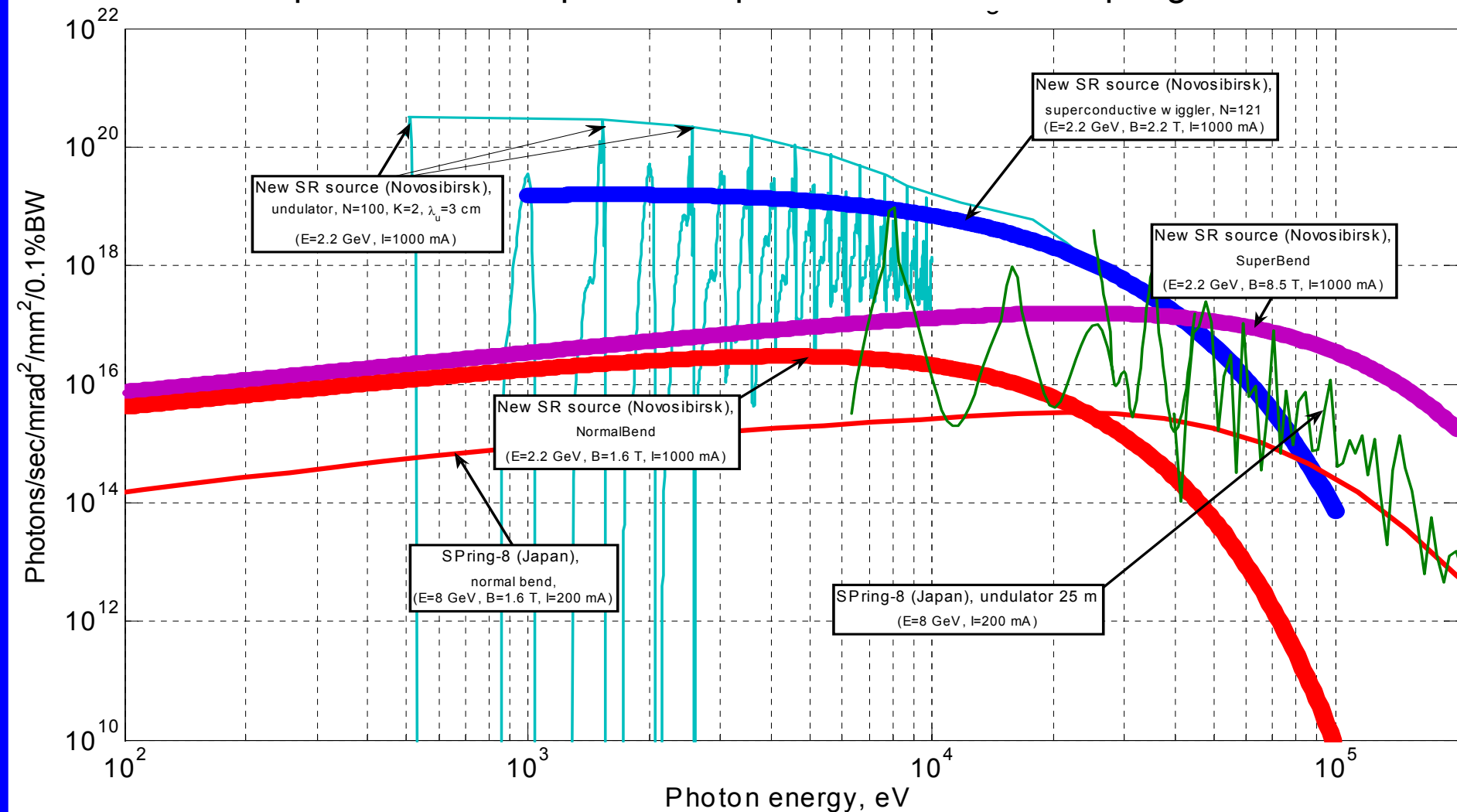


Схема размещения источника СИ и экспериментальных станций



Сравнение спектральной яркости Siberia-HB и Spring-8

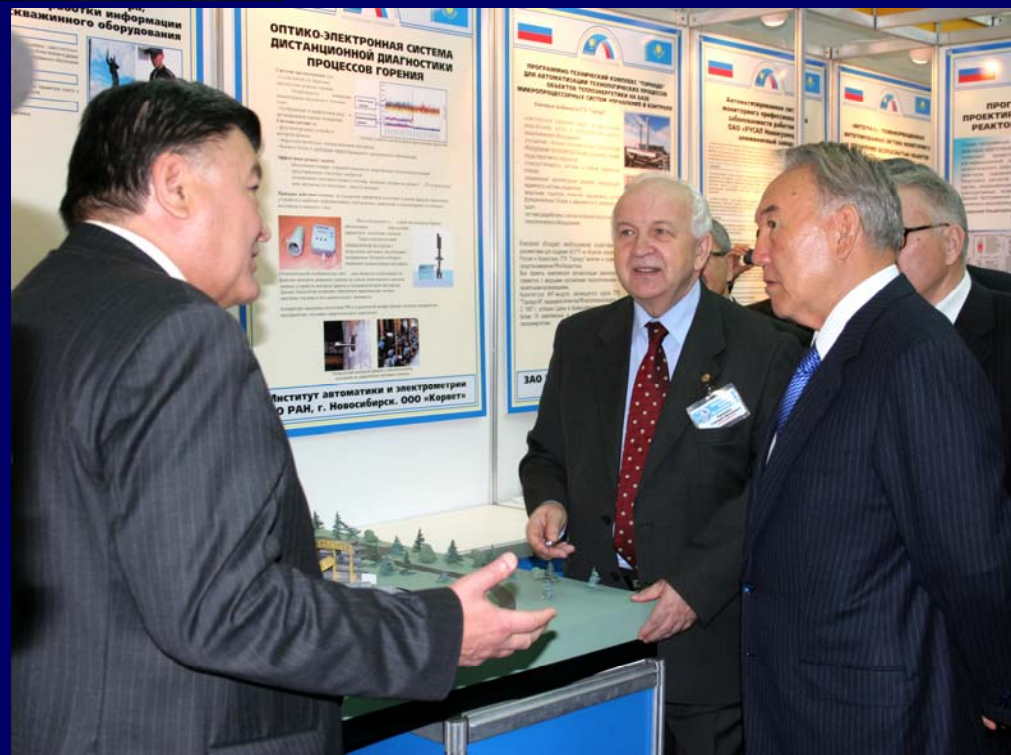


Новые источники СИ планируется создать в сотрудничестве с Казахстаном: проекты “Siberia-HB” и “Nomad”



Макет
нового источника СИ

4 октября, 2007 г.,
Выставочный центр СО РАН.
Президент Республики Казахстан
Нурсултан Назарбаев у макета
новых источников СИ “Siberia HB” для
Новосибирска и “Nomad” (“Кочевник”)
для Астаны (Казахстан).



Направления дальнейшего развития источников синхротронного излучения

**Источники СИ
4-го поколения**

MARS, XFEL

Крупные исследовательские
центры

**Проект “MARS”:
Multi-turn Accelerator-Recuperator Source**

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!!

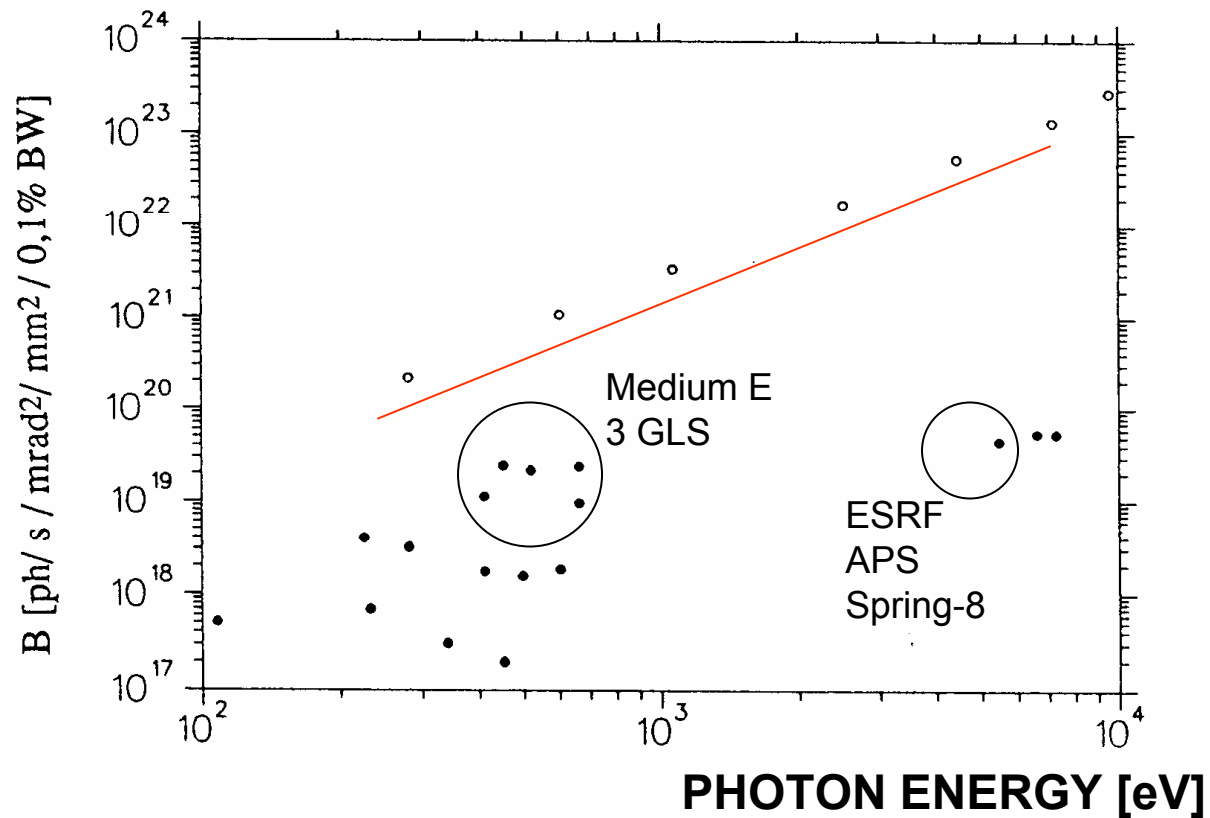
Пропорционально яркости увеличивался и поток пространственно когерентных квантов, поскольку

$$\dot{N}_{\text{coh}} \propto B_{\lambda} \cdot \lambda^2.$$

Тем не менее, в самых современных источниках: APS (США), SPring-8 (Япония) – **поток когерентных квантов составляет только 10^{-3} от полного потока**. Поэтому, несмотря на успешные эксперименты по рентгеновской голографии, этот метод не стал эффективным для структурных исследований реальных объектов, (большинство из которых имеют некристаллическую структуру). Даже для исследования кристаллических структур очень часто важна, например, рентгеновская спекл-спектроскопия, для которой также необходимо пространственно когерентное освещение.

Характеристики источников СИ 3^{го} поколения

Спектральная яркость:



В последнее десятилетие велись активные дискуссии по разработке источников СИ 4^{го} поколения.

Мировое физическое сообщество выработало требования к таким источникам и предложило несколько путей для их создания.

List of requirements for future generation of the X-ray sources:

- ☐ full spatial coherence;
- ☐ as high as possible temporal coherence ($\Delta\lambda/\lambda < 10^{-4}$ without additional monochromatization);
- ☐ the averaged brightness of the sources has to exceed 10^{23} - 10^{24} photons $\text{s}^{-1}\text{mm}^{-2}\text{mrad}^{-2}(0.1\% \text{ bandwidth})^{-1}$;
- ☐ the full photon flux for the 4th generation sources must be on level of 3rd generation SR sources;
- ☐ the high peak brightness of order 10^{33} photons $\text{s}^{-1}\text{mm}^{-2}\text{mrad}^{-2}(0.1\% \text{ bandwidth})^{-1}$ is important for some experiments;
- ☐ electron bunch length up to 1 ps and using a specialized technique X-ray pulses smaller than 100 fs;
- ☐ high long-term stability; generation linear, left-right circular polarized radiation with fast switching time and sign polarization; constant heat load on chambers and optics; etc.
- ☐ serving multi-user community.

- Реализация полностью пространственно когерентного источника будет возможна, если фазовый объём оптического источника будет меньше дифракционного предела

$$\Delta_{x,z} \cdot \Delta_{x',z'} \leq \frac{\lambda}{4\pi}$$

Для этого эмиттанс электронного пучка должен быть достаточно малым

$$\varepsilon_{x,z} = \sigma_{x,z} \cdot \Theta_{x,z} < \frac{\lambda}{4\pi}$$

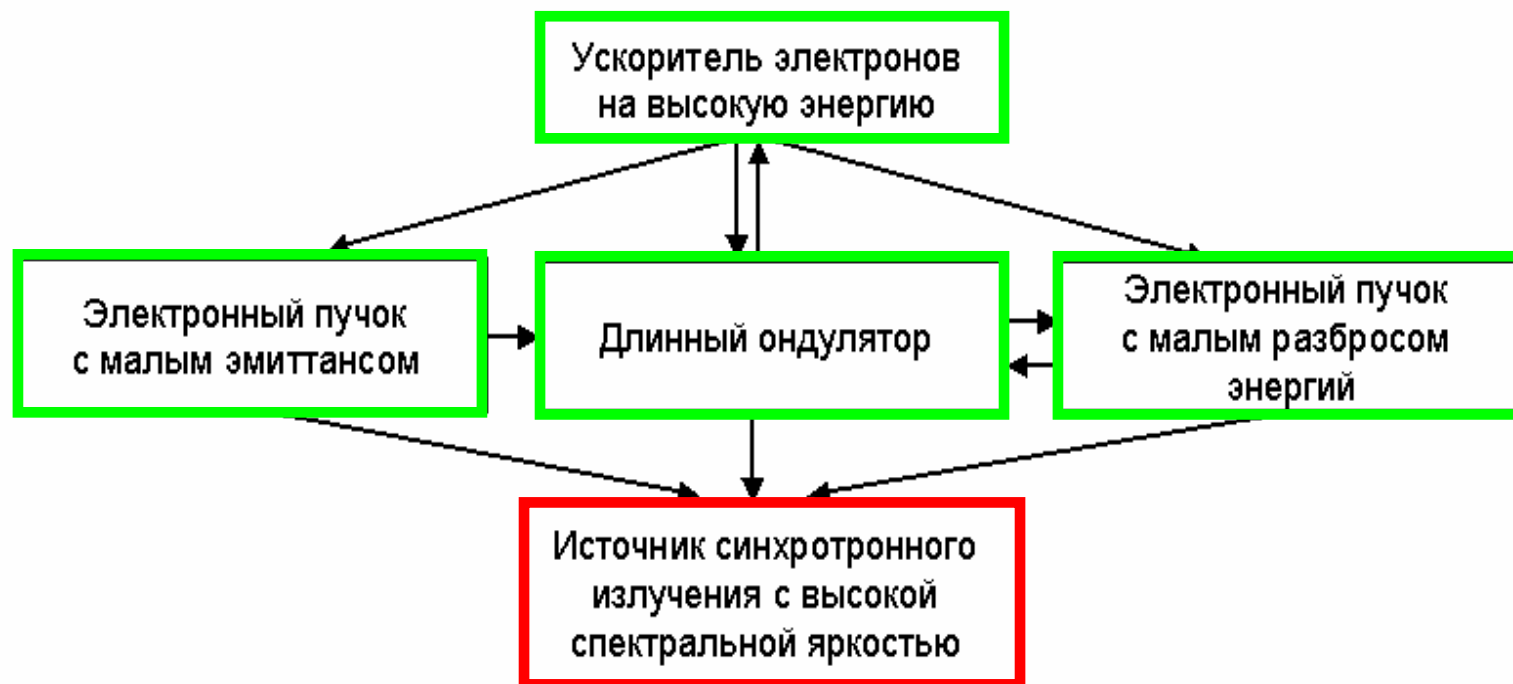
(что для рентгеновского излучения означает $\varepsilon_{x,z} < 10^{-2}$ нм·рад).

- Эмиттанс и энергетический разброс электронного пучка в накопителе электронов определяется равновесием между радиационным затуханием и диффузией за счёт квантовых флуктуаций синхротронного излучения, а также за счёт внутрипучкового рассеяния в случае пучков с большой плотностью.
- Дополнительный анализ показал, что в накопителе невозможно иметь эмиттанс электронного пучка меньше 10^{-1} нм·рад и энергетический разброс меньше 10^{-3} , поэтому реализация полностью пространственно когерентного рентгеновского источника возможна в случае перехода от накопителей электронов к ускорителям с рекуперацией энергии.
- Это предложение впервые было сделано в 1997 году на конференции SRI-97*, сейчас оно является общепризнанным и активно развивается во многих мировых центрах.

* *Kulipanov G., Skrinsky A., Vinokurov N. Journal of Synchrotron Radiation* 5 97-103 (1998),

Kulipanov G., Skrinsky A., Vinokurov N., Preprint Budker INP 97-103 (Novosibirsk: INP SB RAS, 1997)

Повышение спектральной яркости источников синхротронного излучения

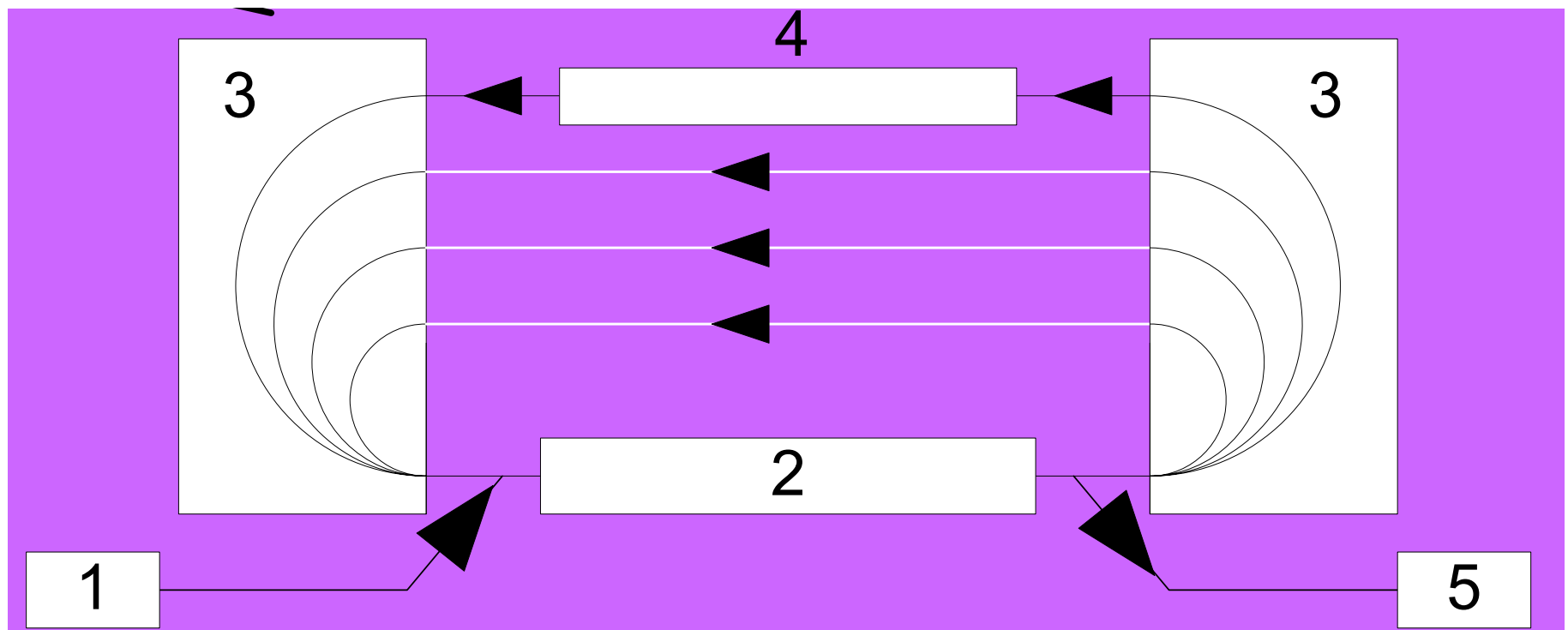


1980	$\varepsilon \sim 300 \text{ nmrad}$	$N_u \sim 10$	$\sigma_E/E \sim 10^{-3}$
1990	$\varepsilon \sim 30 \text{ nmrad}$	$N_u \sim 10^2$	$\sigma_E/E \sim 10^{-3}$
2000	$\varepsilon \sim 1-3 \text{ nmrad}$	$N_u \sim 10^3$	$\sigma_E/E \sim 10^{-3}$
2015	$\varepsilon \sim 10^{-2} \text{ nmrad}$	$N_u \sim 10^4$	$\sigma_E/E \sim 10^{-4}$

Storage rings

MARS
XFEL

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.

В ускорителях-рекуператорах объединяются преимущества накопителей электронов (высокая реактивная мощность пучка; малые потери частиц высокой энергии в единицу времени и, соответственно, низкий уровень радиационного фона и отсутствие наведенной радиоактивности) и достоинства линейных ускорителей (нормализованные эмиттанс пучка электронов ε_n и энергетический разброс могут быть сохранены во время ускорения).

- Поэтому, имея хороший инжектор с $\varepsilon_n < 100 \text{ nm}\cdot\text{rad}$ благодаря адиабатическому затуханию при ускорении до больших энергий ($E > 5 \text{ GeV}$, $\gamma > 10^4$), можно получить эмиттанс $\varepsilon_{x,z}' = \varepsilon_n/\gamma \sim 10^{-2} \text{ nm}\cdot\text{rad}$ и энергетический разброс $\sigma_E/E \sim 10^{-4}$.
- В ускорителях-рекуператорах время ускорения ($\tau_{\text{acc}} \sim 1 - 10 \mu\text{s}$) существенно меньше (на 3 – 4 порядка) характерного времени радиационного затухания в накопительных кольцах ($\tau_{\text{rad}} \sim 10 \text{ ms}$), поэтому диффузионные процессы не могут испортить эмиттанс и энергетический разброс электронного пучка.

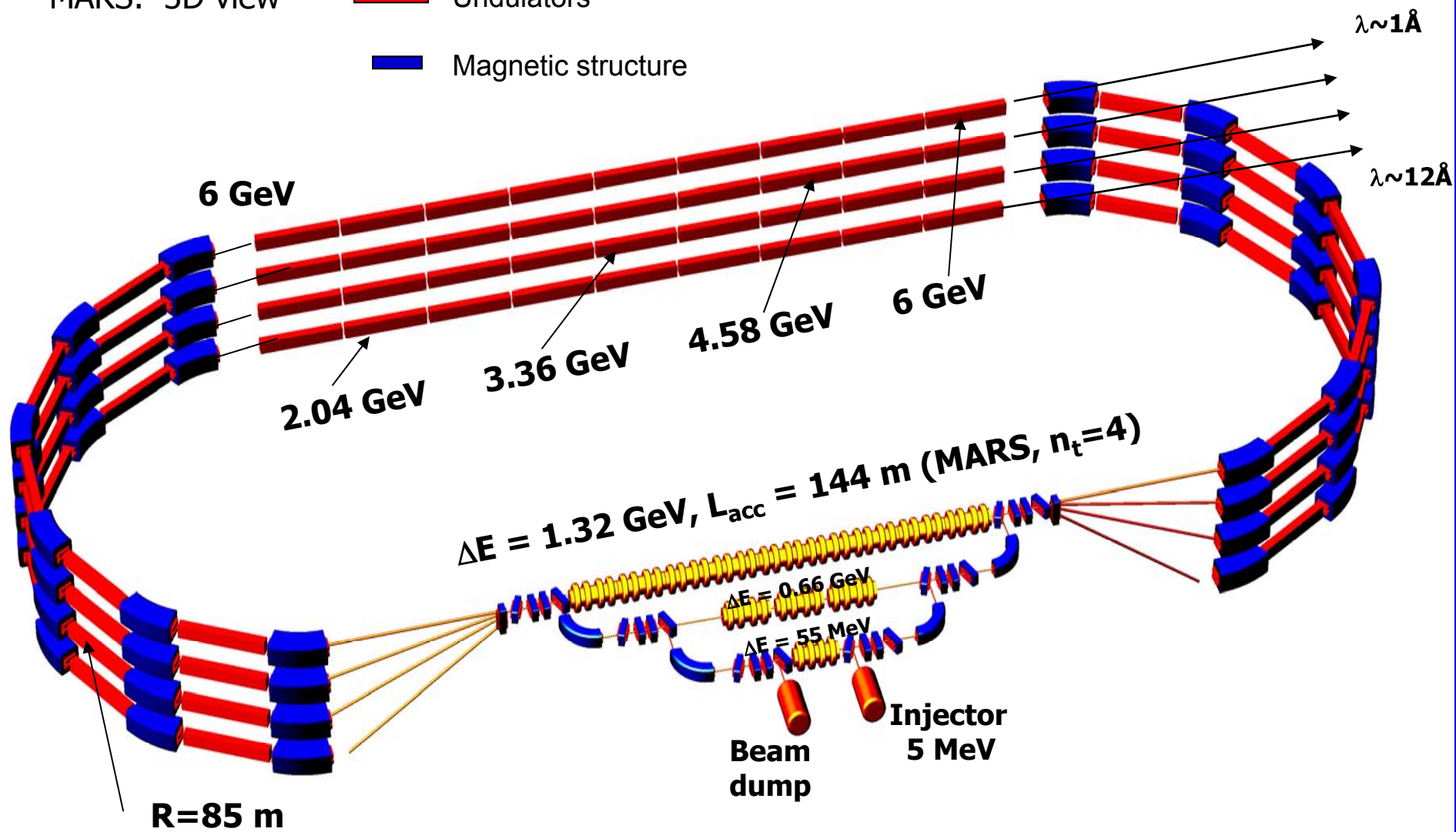
- На следующем рисунке будет показана разрабатываемая нами сейчас схема четырёхоборотного ускорителя-рекуператора MARS. В ускорителе-рекуператоре электроны, получаемые в инжекторе с энергией ~ 5 МэВ, затем ускоряются в дополнительном двухкаскадном инжекторе, после чего проходят четыре раза через основную ускоряющую высокочастотную структуру, увеличивая энергию до 6 ГэВ. После ускорения электроны проходят в том же направлении те же самые высокочастотные структуры, но в замедляющей фазе, уменьшая свою энергию до 5 МэВ, а затем попадают в поглотитель.
- В ускорителе-рекуператоре непрерывно и одновременно на четырёх дорожках движутся ускоряемые и замедляемые электроны. Потребители синхротронного излучения будут воспринимать излучение из ондуляторов MARS подобно излучению из накопительного кольца, с той лишь разницей, что каждый раз используются новые («свежие») электроны с малым эмиттансом

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

MARS: 3D view

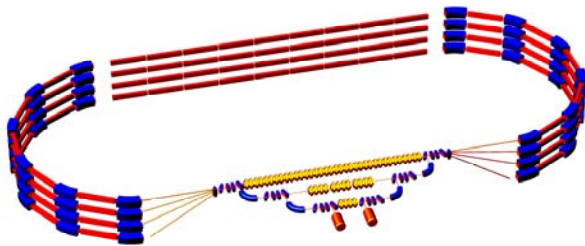
 Undulators

 Magnetic structure



Comparison of parameters of SR sources

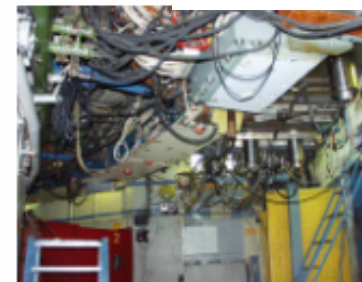
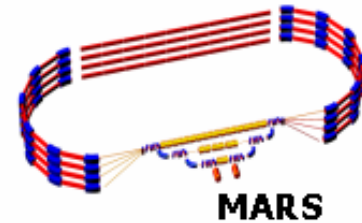
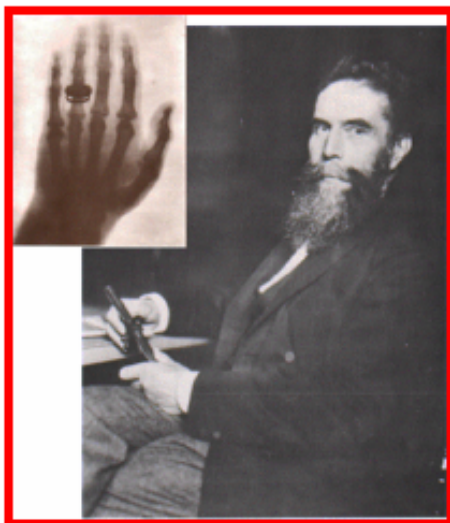
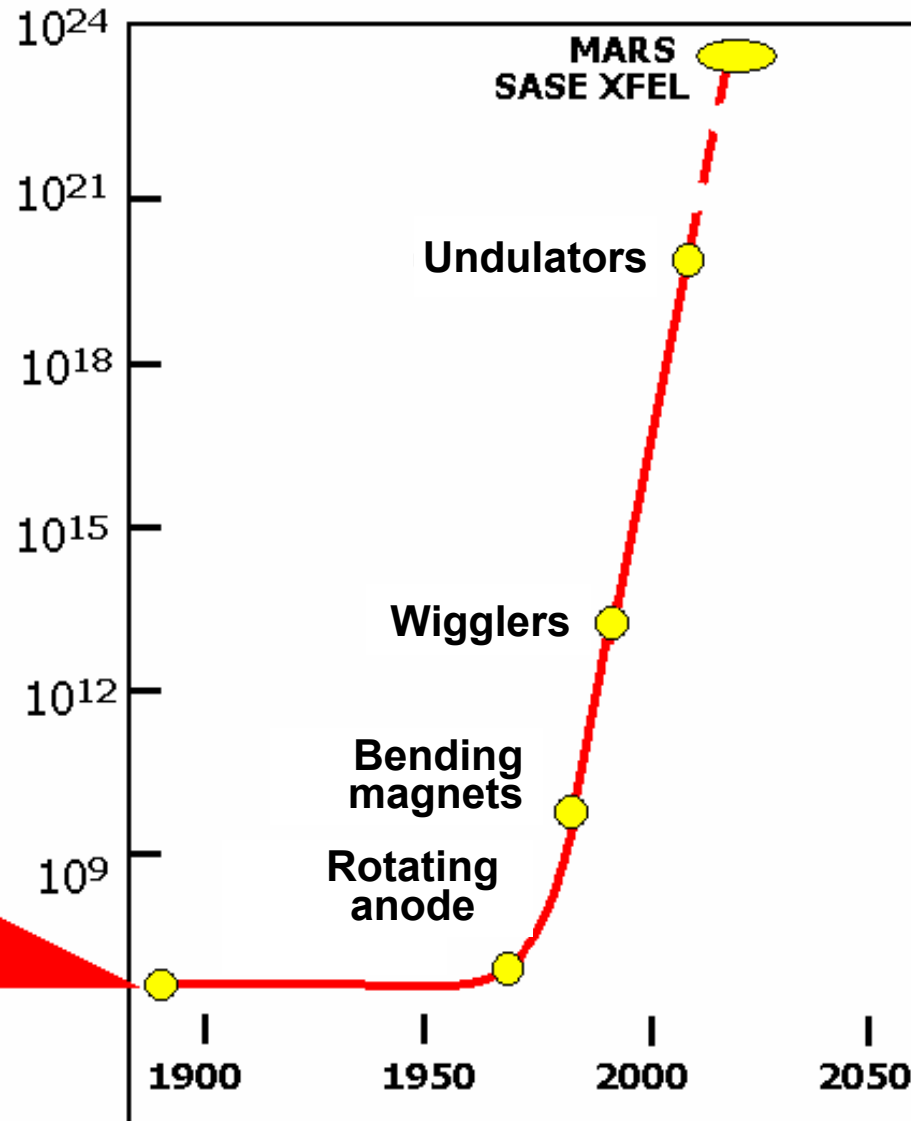
MARS ($I_e=2.5$ mA) and Spring-8 ($I_e=100$ mA)



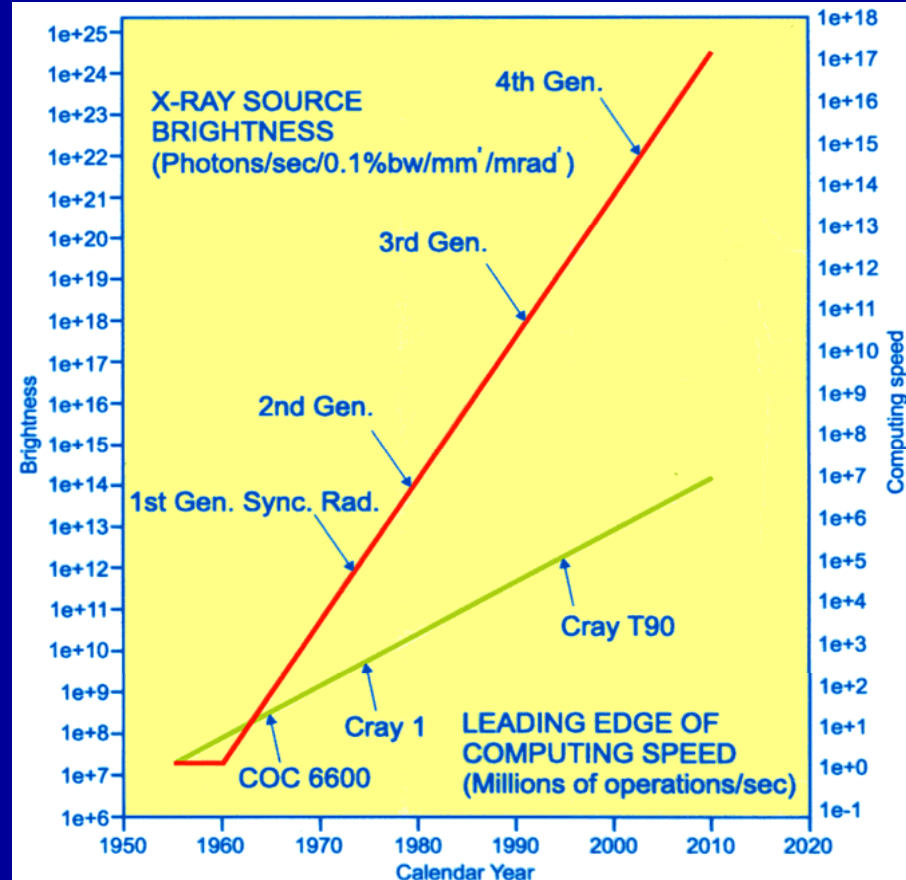
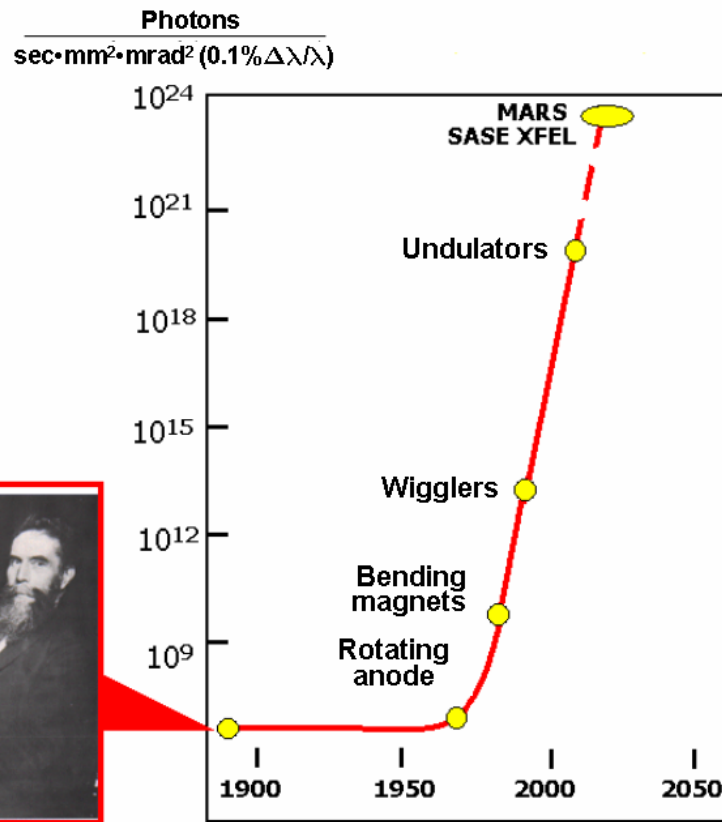
		Number of beamlines	B , ph·sec ⁻¹ ·mm ⁻² ·mrad ⁻² ($\delta\lambda/\lambda=10^{-3}$)	F , ph/sec ($\delta\lambda/\lambda=10^{-3}$)
MARS	Undulator $N_u \sim 10^2$	32	10^{22}	$4.6 \cdot 10^{13}$
	Undulator $N_u \sim 10^3$	12	10^{23}	$4.6 \cdot 10^{14}$
	Undulator $N_u \sim 10^4$	4	10^{24}	$4.6 \cdot 10^{15}$
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}	$1.2 \cdot 10^{16}$

Step rise in average brightness

Photons
sec•mm²•mrad² (0.1%Δλ/λ)



Сравнение роста яркости источников СИ и быстродействия компьютеров (факты и прогноз)



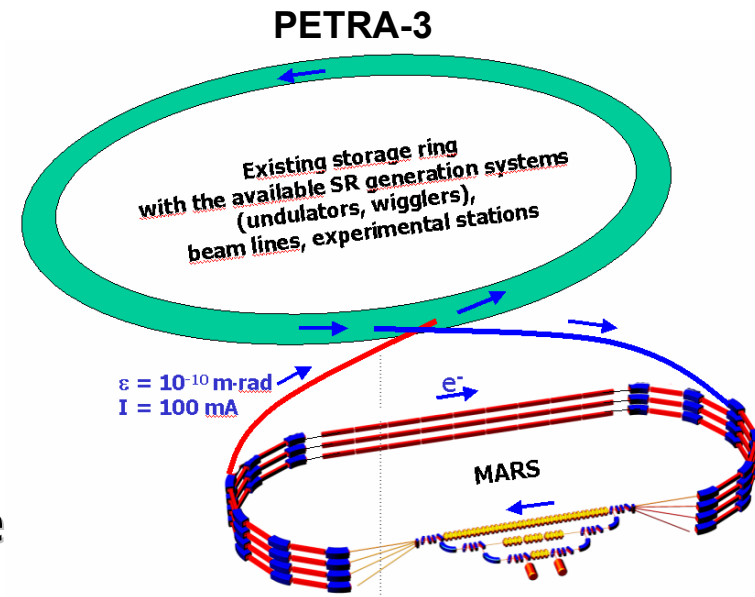
1980	$\varepsilon \sim 300$ nmrad	$N_u \sim 10$	$\sigma_E/E \sim 10^{-3}$
1990	$\varepsilon \sim 30$ nmrad	$N_u \sim 10^2$	$\sigma_E/E \sim 10^{-3}$
2000	$\varepsilon \sim 1-3$ nmrad	$N_u \sim 10^3$	$\sigma_E/E \sim 10^{-3}$
2015	$\varepsilon \sim 10^{-2}$ nmrad	$N_u \sim 10^4$	$\sigma_E/E \sim 10^{-4}$

Storage rings

MARS
XFEL

- The users of synchrotron radiation will perceive the radiation from the MARS undulators like radiation from a storage ring, with the only difference that each time new ('fresh') electrons are used with a small emittance $\varepsilon_{\min} \sim 10^{-2}$ nm rad and energy spread $\sigma_E/E \sim 10^{-4}$. For MARS project, four undulators 150 – 200 m long ($N \sim 10^4$) are placed in the four tracks, as well as several dozen undulators 5 – 20 m long ($N = 10^2 - 10^3$) into the arcs.

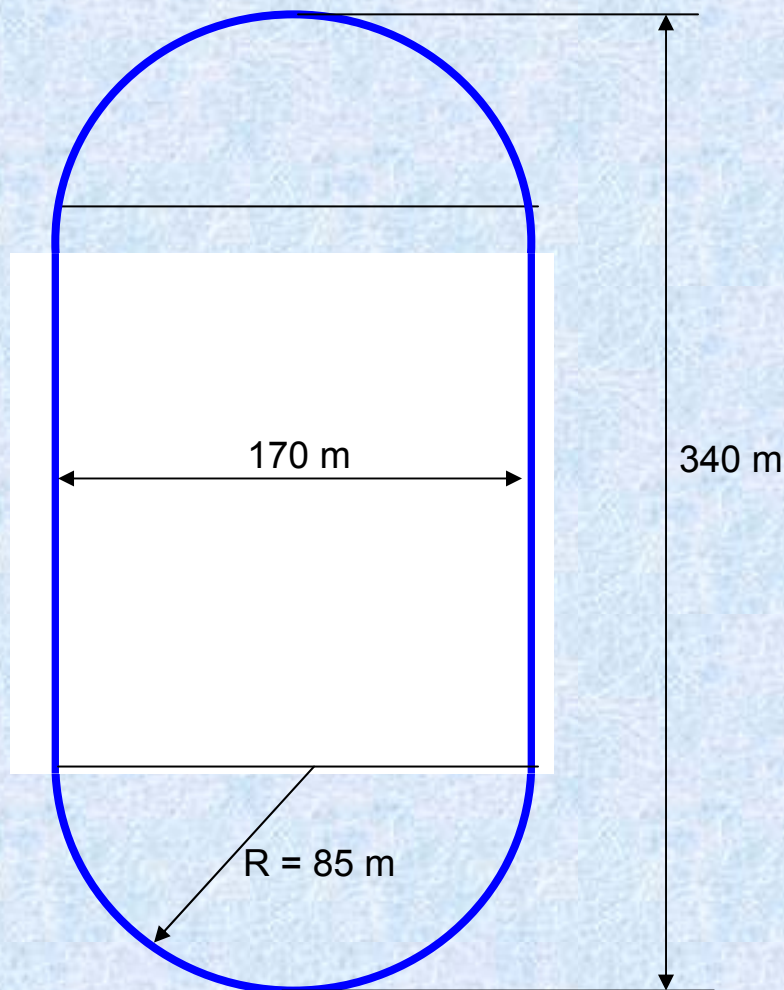
- ❑ A rough estimation has shown that in practice, the total cost of the multi-turn accelerator based project is the same as the cost of the available SR source of the 3rd generation (ESRF, APS, Spring-8).
- ❑ It is quite probable that in some cases, a multi-turn accelerator-recuperator can be used for improving the brightness at the upgrade of the available SR sources of the 2nd and 3rd generations. In this case, the existing storage ring with the available generation systems (undulators, wigglers), beam lines, experimental stations can be used as the last track.



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



Perimeter = 874 m

Summary length of
4 rings ~ 3.5 km





43C1

43

308a

308a

50 M



50 M

Направления дальнейшего развития источников синхротронного излучения

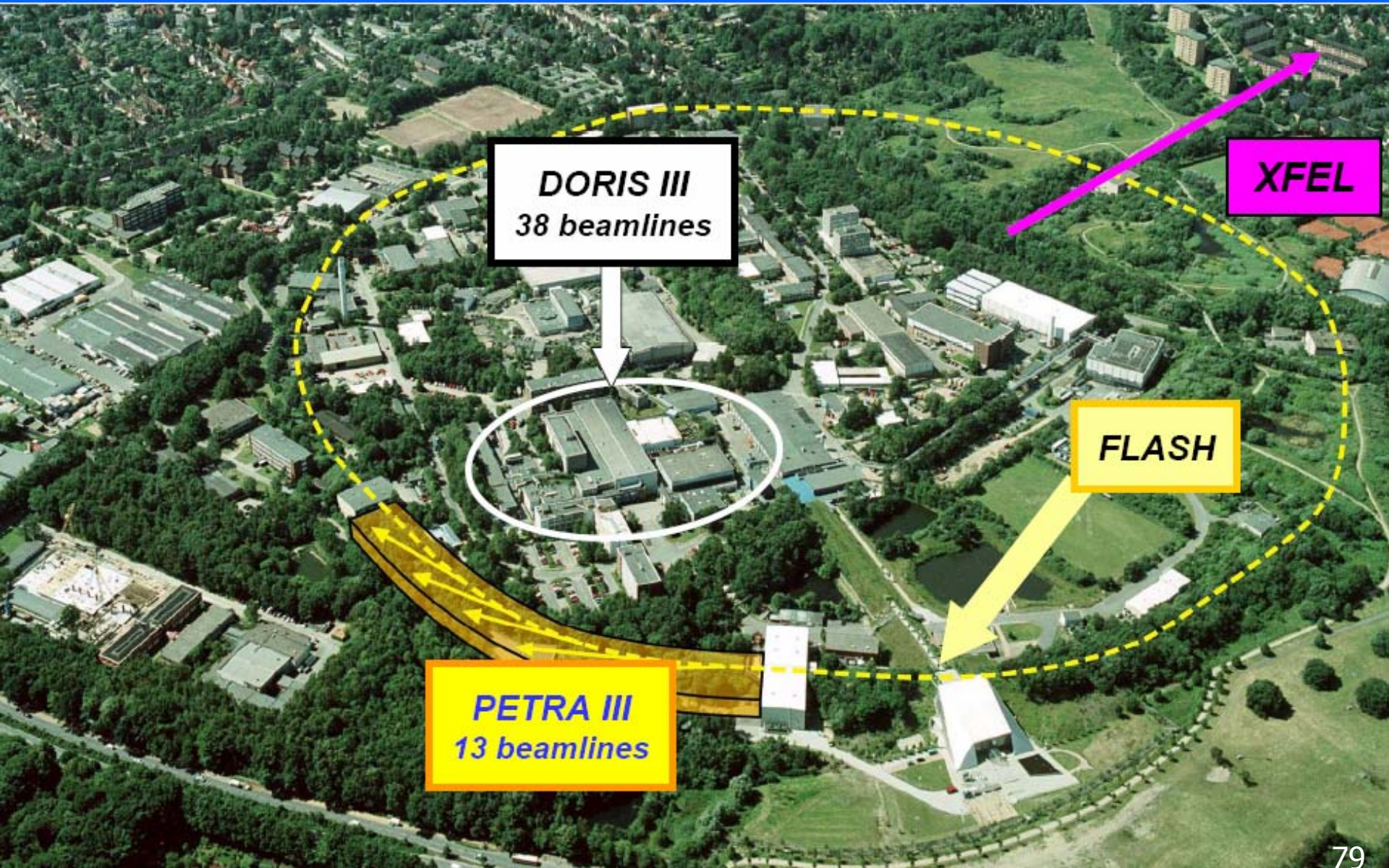
**Источники СИ
4-го поколения**

MARS, XFEL

Крупные исследовательские
центры

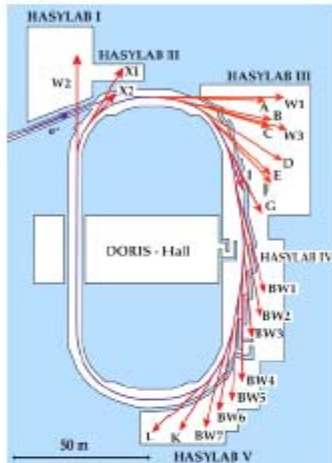
**Проект “XFEL”:
Рентгеновский SASE лазер**

Synchrotron Radiation Sources at DESY



Photon Facilities at DESY

DORIS III



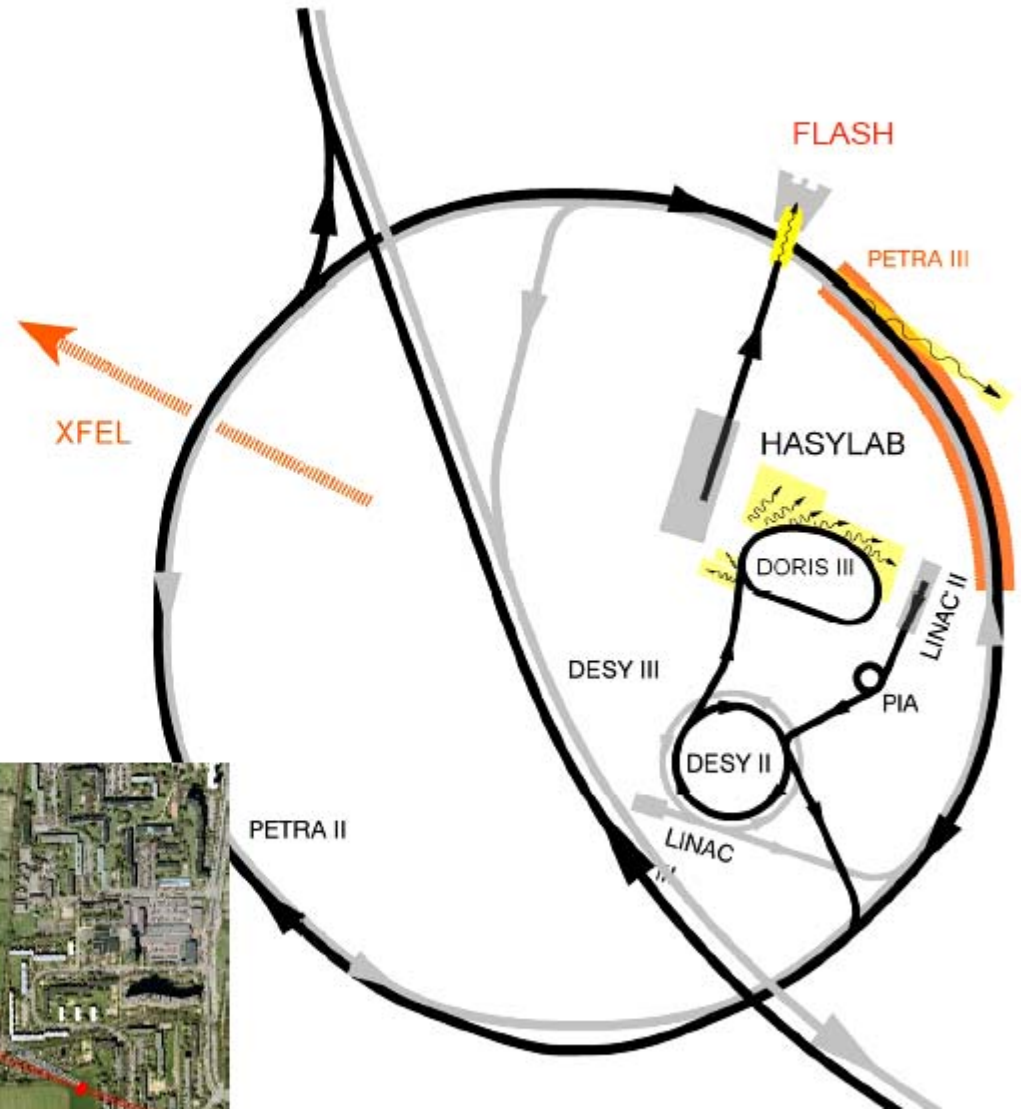
FLASH



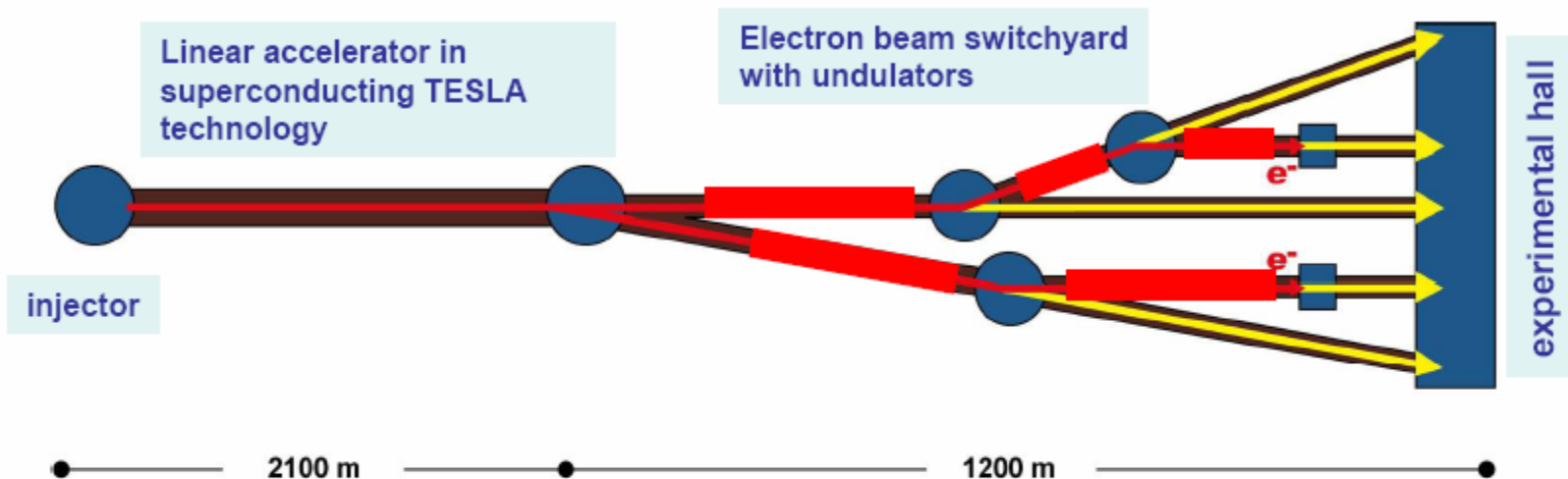
PETRA II/III



XFEL

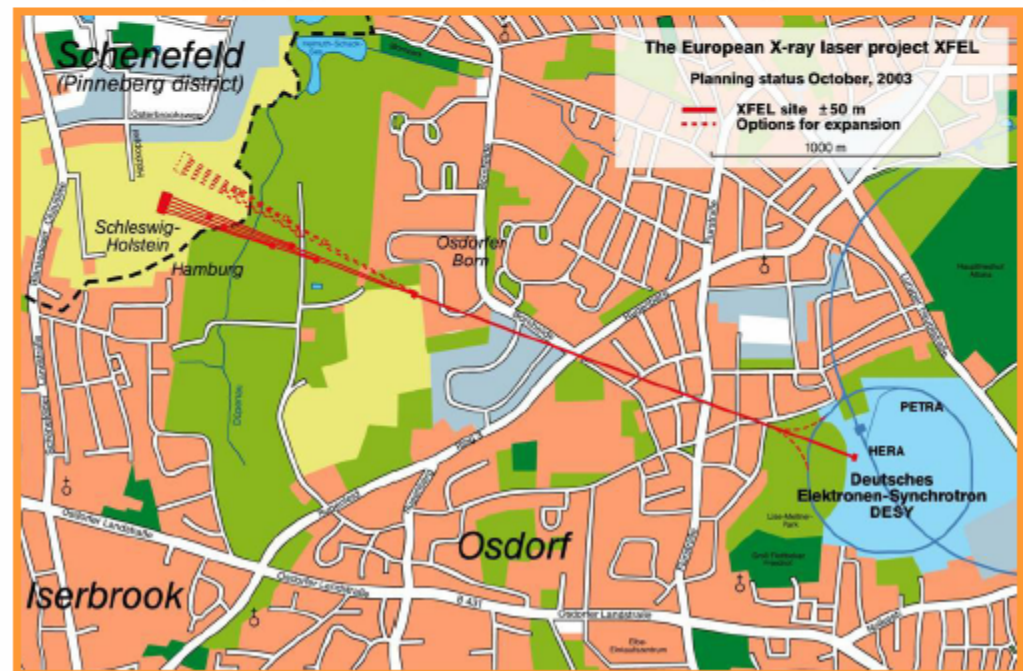


XFEL: The European X-ray Free-Electron Laser



Linac: 20GeV
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

