

О возможностях рециркулятора как источника света.

Е.Г.Бессонов

ФИАН, Москва, Россия

По работе:

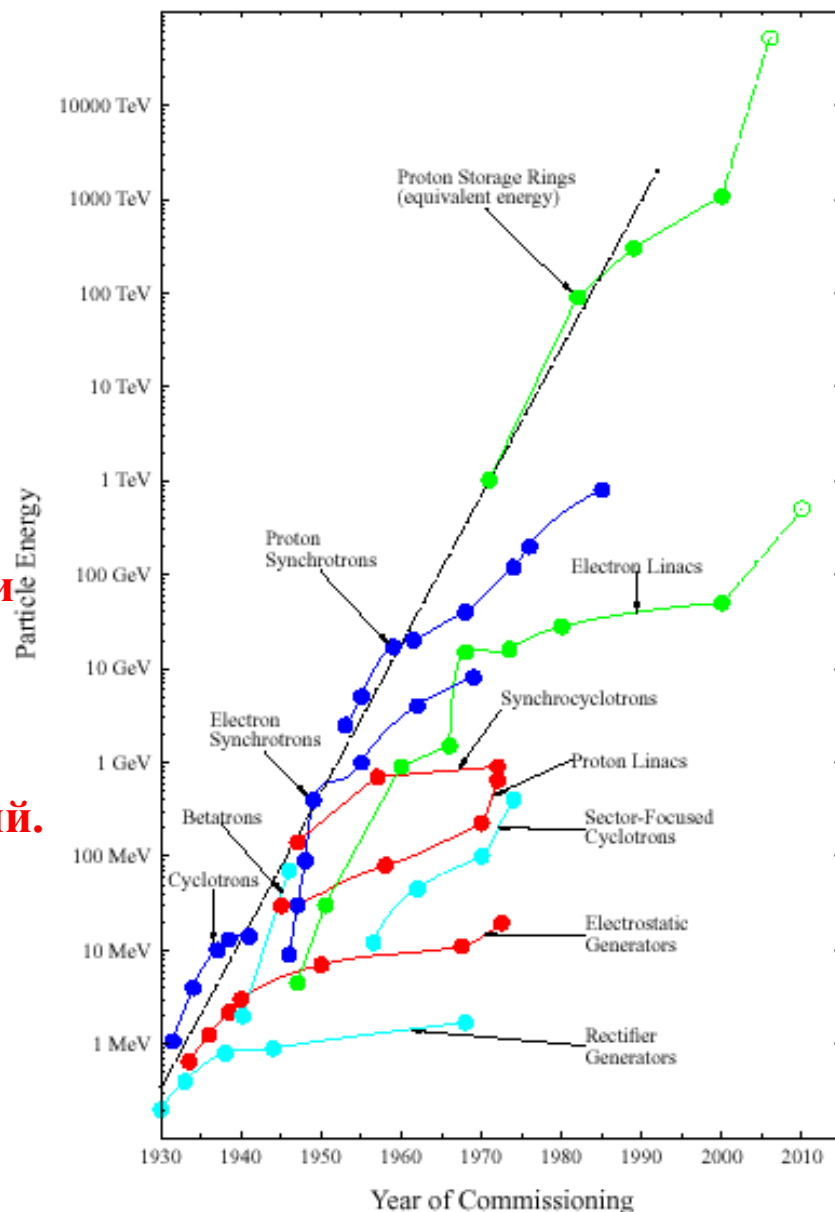
«4-е поколение источников света и физика элементарных
частиц»

<http://lanl.arxiv.org/abs/0906.1683>.

The "Livingston Curve" of the evolution of accelerator performance (1954), update by G. Krafft, Jefferson Lab (2003).

На рисунке видно, что электронный синхротрон ОФВЭ ФИАН «Пахра» на энергию 1.2 ГэВ - это один из последних синхротронов, построенных в 70-е годы прошлого века. Позднее за рубежом строились микротроны и рециркуляторы типа МАМИ-С и СЕБАФ. В России синхротрон «Пахра» - это единственный ускоритель, на котором ведутся работы по физике электромагнитных взаимодействий. Требуется реконструкция.

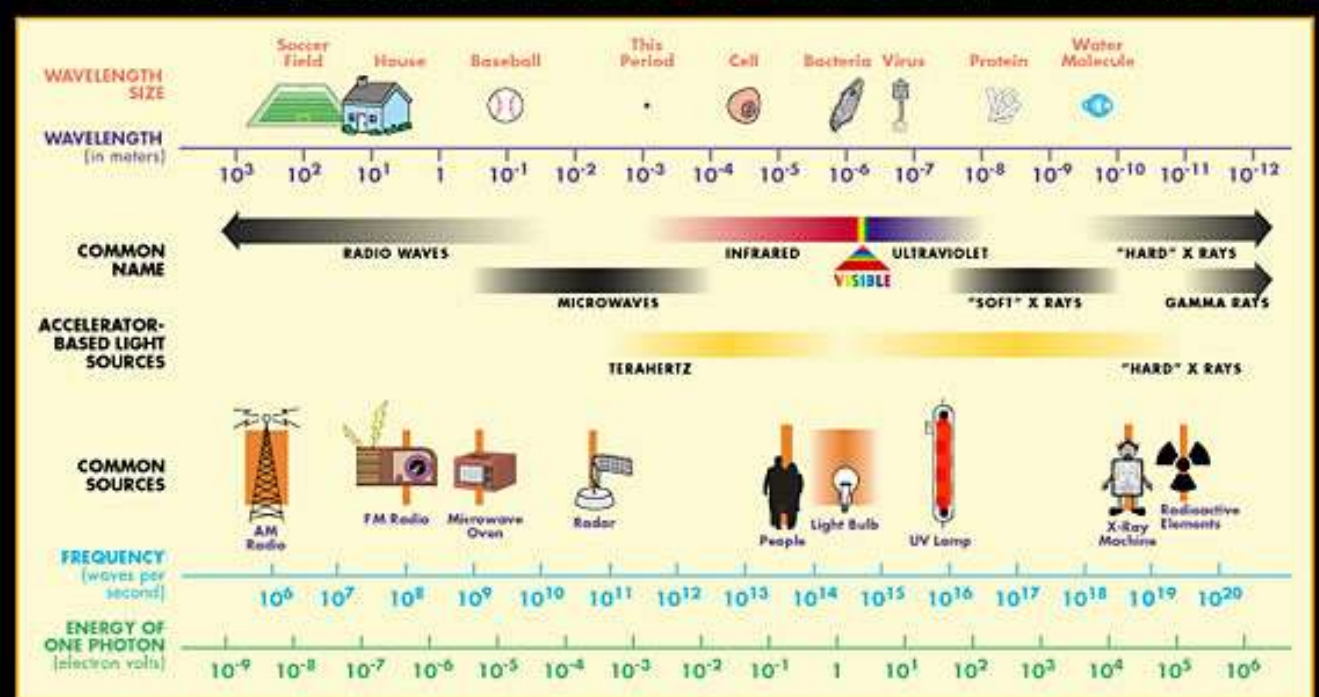
Update courtesy G. Krafft (2003)



В настоящее время оптимальным для развития науки в России был бы Источник Света (ИС) основанный на сверхпроводящем линейном ускорителе (ЛУ) или рециркуляторе на энергию 1.5 - 2 ГэВ дающие в режиме рекуперации энергии непрерывный, стабильный, монохроматический, с малыми размерами и угловым разбросом сильноточный электронный пучок (ток ~ 100 мкА). Эти ускорители могли бы стать основой для ИС четвертого поколения (ИС4П).

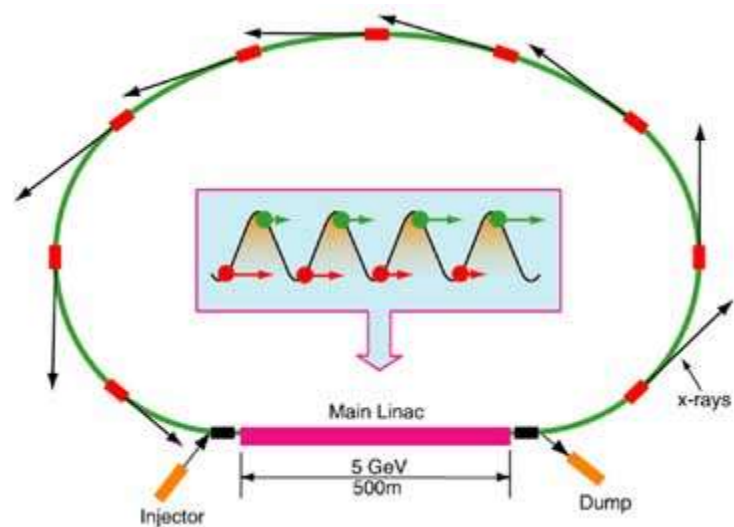
По определению (см. <http://www.lightsources.org>) ИС – это источ-

THE ELECTROMAGNETIC SPECTRUM



ники электромагнитного излучения ИК, оптического рентгеновского и γ - излучения основанный на ускорителе заряженных частиц.

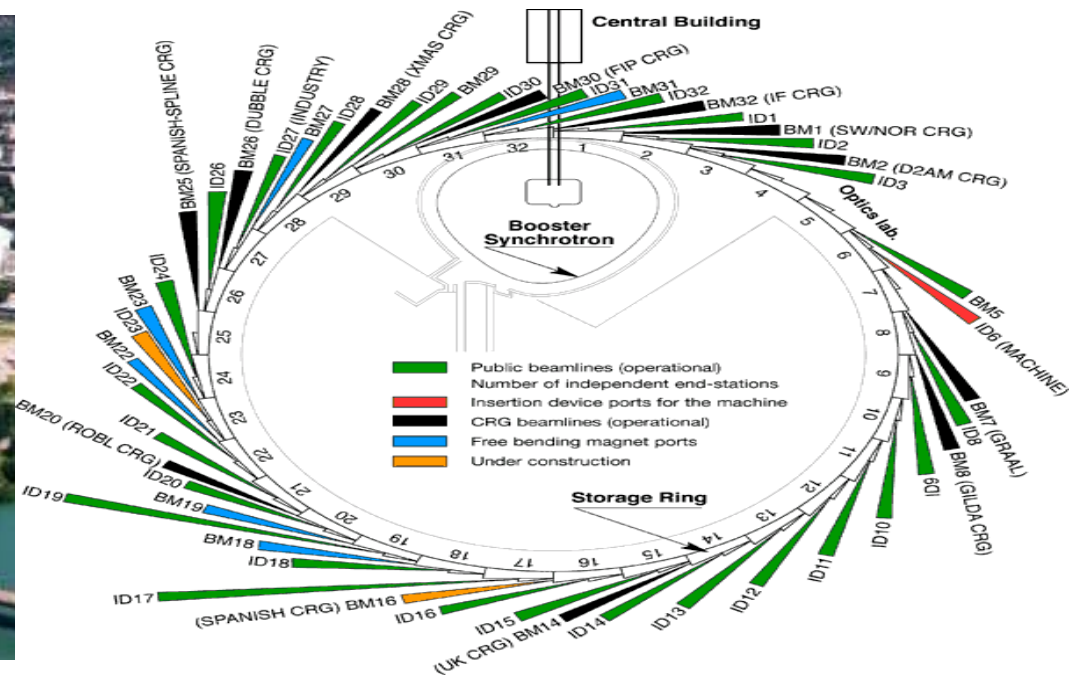
В режиме рекуперации энергии частицы пучка сначала увеличивают свою энергию проходя через сверхпроводящую возбужденную структуру ЛУ (рециркулятора) в ускоряющей фазе СВЧ волны, а затем уменьшают её до начальной энергии проходя в тормозящей фазе волны (см. рисунок). В этом случае энергия взятая пучком из СВЧ волны возвращается ей. Поэтому ток в ускорителе можно увеличить на 2-3 порядка не увеличивая мощности СВЧ генератора и сделать его сравнимым или больше тока достигнутого в ИС 3 поколения при меньшем эмиттансе пучка задаваемом электронной пушкой ЛУ. Такие ускорительные системы могут использоваться как в ядерной физике и в физике элементарных частиц, так и в качестве источников света (ИС) 3 и 4 поколений увеличивая круг пользователей.



Идея рекуперации энергии предложена в 1965 г. (M.Tigner, Nuovo Cimento, v.37, p.1228) и в настоящее время развивается в Корнельском университете применительно к ИС нового поколения основанному на ЛУ (Energy Recovering Linac - ERL).

К настоящему времени освоены 3 поколения ИСоснованных на накопительных кольцах. Следующее поколение отличается от предыдущего по яркости электронных и световых пучков на 2-3 порядка. Примером ИС третьего поколения может служить Европейский ИС ESFF, который уже более 20 лет работает по 24 часа в сутки. Эксперименты ведутся на ~100 установках. В мире около 100 ИС 2 и 3 поколений (в основном в США, Европе, Японии).

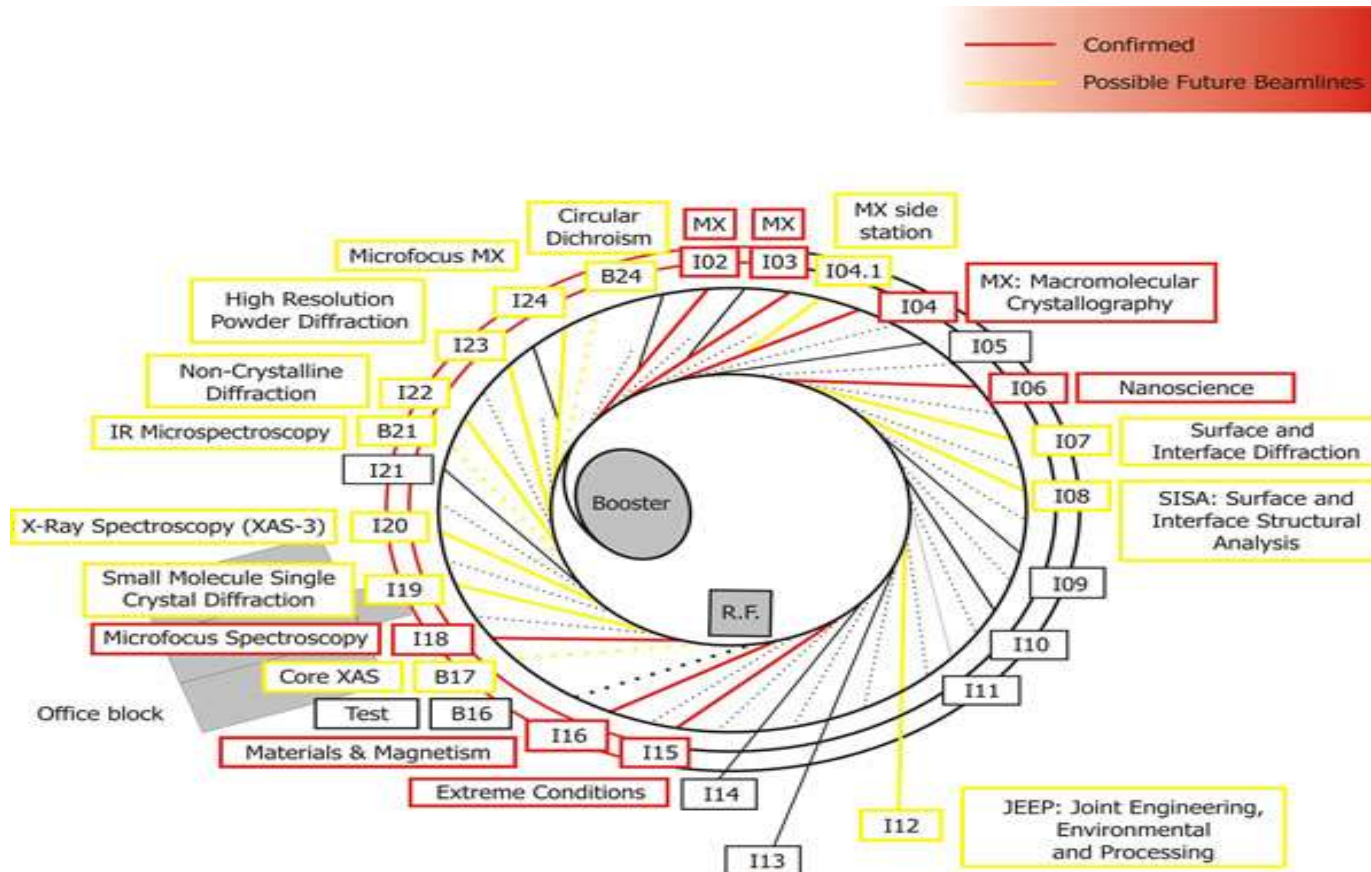
The **6 GeV ESRF** is an outstanding example of European cooperation in science. **18** nations work together to use the extremely bright beams of light produced by the ESRF's high performance storage ring to study a remarkably wide range of materials.



Несмотря на обилие ИС - строятся новые ИС 3 поколения. Среди них 3.0 GeV *Electron Storage ring* **Diamond**.

Harwell/Chilton Science Campus, UK.

Circumference 561.6 m; *No. of cells* 24 (6 fold symmetry)
Electron beam current 300 mA; *Minimum beam lifetime* 10 hours; *Emittance* –
horizontal 2.7 nm-rad; *Emittance - vertical* 0.03 nm-rad; *No. of Insertion Devices*
(IDs) Up to 22; *Free straight lengths for IDs:* 18x5 m, 6x8; *gap* 10 mm;
Building diameter 235 m



На очереди - ИС4П (в английском 4GLS). Они начали обсуждаться с начала 90-х годов и в частности на Рабочих совещаниях:

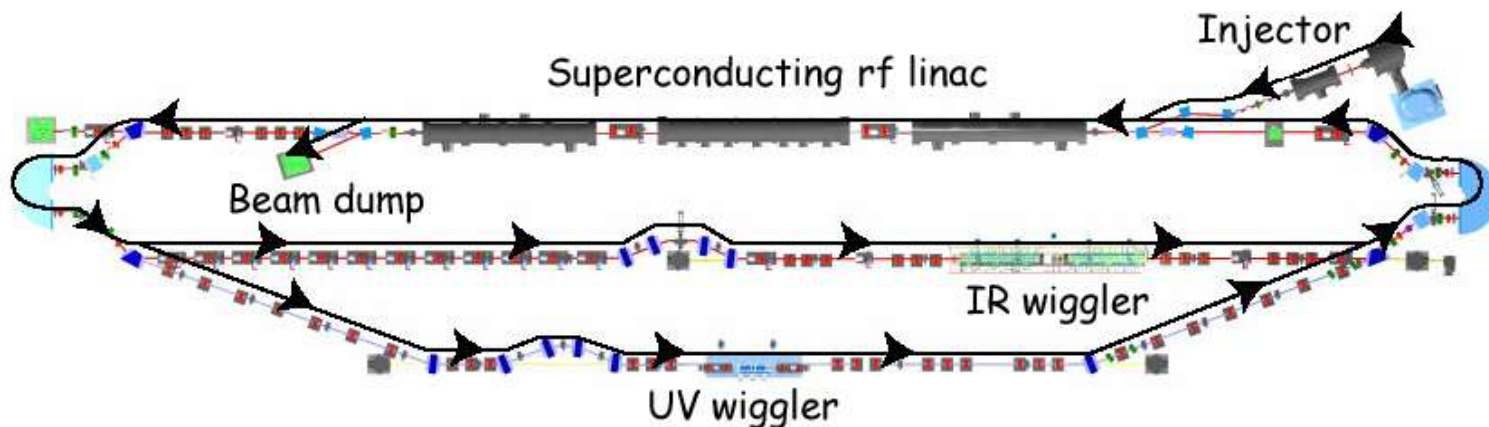
1. Proc. the WS on 4th GLS SSRL/SLAC Feb.24-27, 1992.
2. Proc. the ESRF-ICFA Workshop "4th generation light sources", Jan. 22-25, 1996, ESRF, Grenoble, France, p.WG2-108.

Сейчас принято считать, что ИС4П будут Рентгеновские лазеры на свободных электронах (ЛСЭ). Среди них:

1. LCLS, SLAC, USA (warm version), $1.5 \text{ \AA}^\circ$
2. FLASH, DESY, Germany (SC), $6.5 \text{ \AA}^\circ$
3. XFEL, DESY, Germany (SC), $1.0 \text{ \AA}^\circ$
4. NLS, RAL – Daresbury (SC), $25\text{-}10 \text{ \AA}^\circ$

Развитие ИС4П тесно связывается с развитием ЛУ и рециркуляторов основанных на сверхпроводящих высокочастотных структурах с рекуперацией энергии. Впервые рекуперация энергии осуществлена в ~2000 г. в Джефферсоновской лаборатории в США.

JLab 10kW IR FEL and 1 kW UV FEL



Output Light Parameters	IR	UV
Wavelength range (microns)	1.5 - 14	0.25 - 1
Bunch Length (FWHM psec)	0.2 - 2	0.2 - 2
Laser power / pulse (microJoules)	100 - 300	25
Laser power (kW)	>10	> 1
Rep. Rate (cw operation, MHz)	4.7 - 75	4.7 - 75

Electron Beam Parameters	IR	UV
Energy (MeV)	80-200	200
Accelerator frequency (MHz)	1500	1500
Charge per bunch (pC)	135	135
Average current (mA)	10	5
Peak Current (A)	270	270
Beam Power (kW)	2000	1000
Energy Spread (%)	0.50	0.13
Normalized emittance (mm-mrad)	<30	<11
Induced energy spread (full)	10%	5%

S. Benson et al, *High power lasing in the IR upgrade at Jefferson Lab, 2004 FEL*

Примеры проектов:

CORNELL

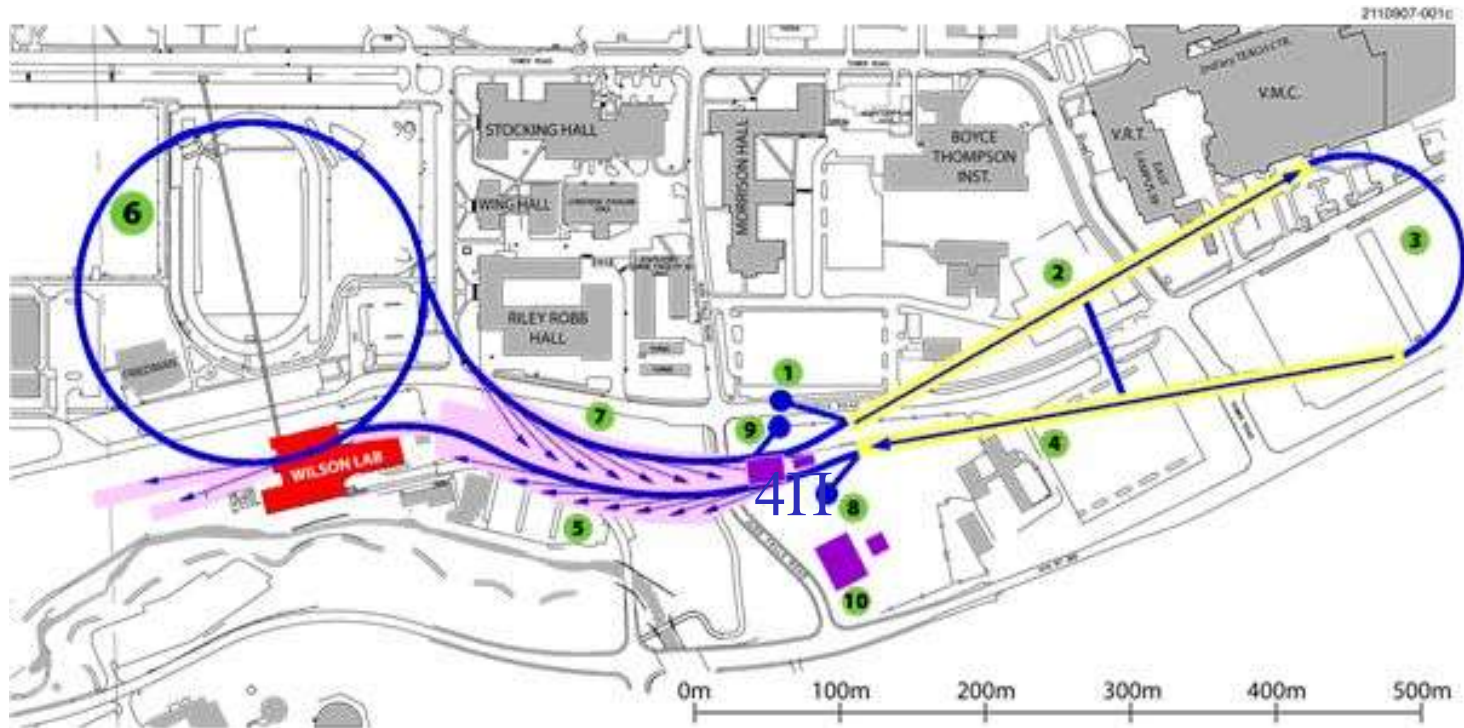
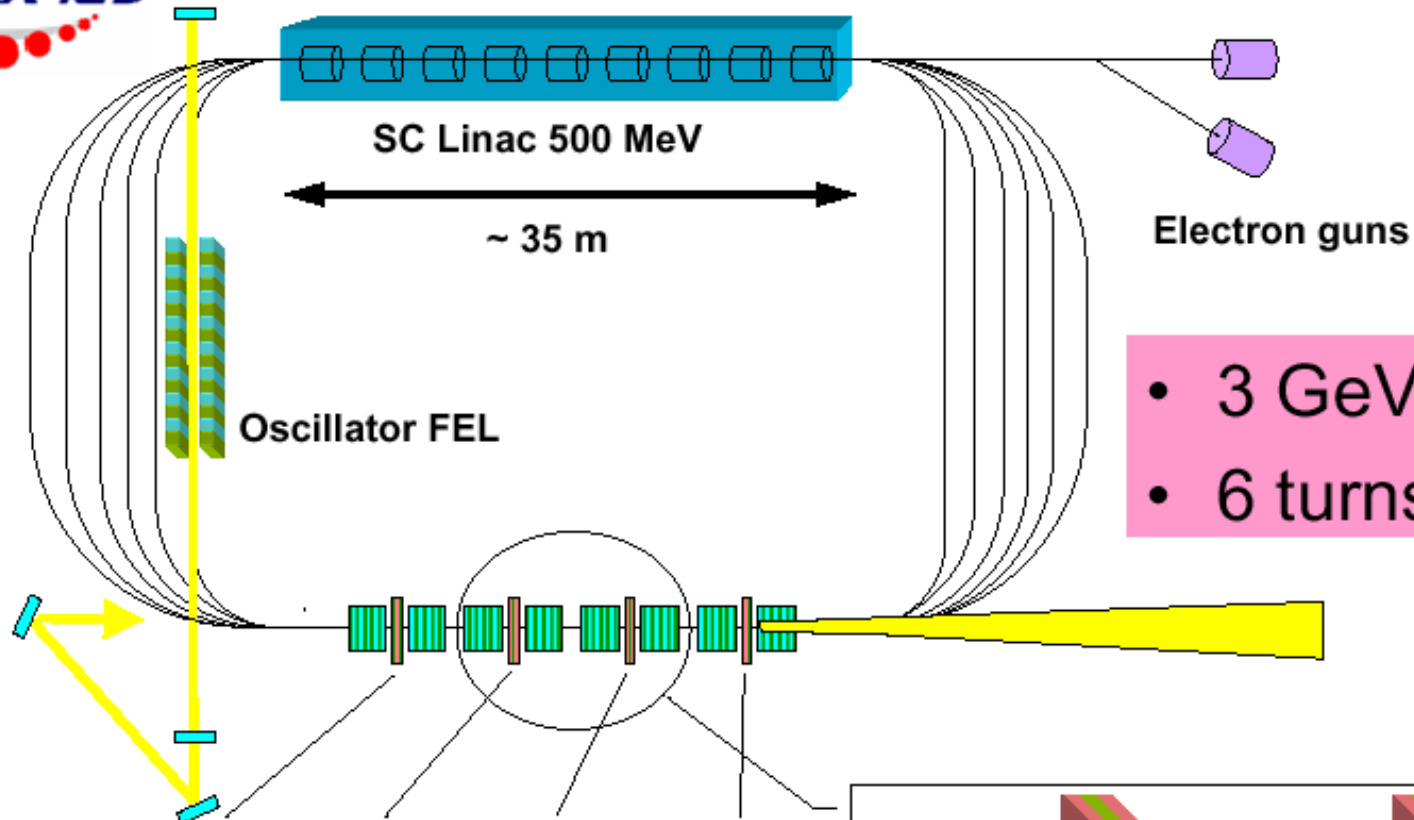
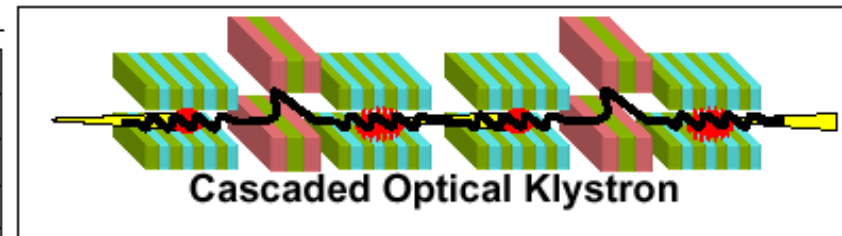


Figure 1b: Schematic ERL layout incorporating the existing Cornell Electron Storage Ring (CESR). Electrons are injected (1) and are accelerated to the right a 2.5 GeV linac (2), loop through a turn-around arc (3), and accelerate to the left through an additional 2.5 GeV linac (4) to 5 GeV, total. Beamlines are in the pink/red areas. Bunches then pass clock-wise around CESR (6). Bunches may be compressed to <100 fs (7) and feed more undulators before being uncompressed, energy recovered in second passes though linacs (2) and (4), and finally dumped at (8). A second injector (9) provides large bunches for pump-probe experiments (mode c of Table B-1). These are accelerated to 2.5 GeV through linac (4), pass through a long undulator, and are dumped without energy recovery at (8). The pump-probe station is at (10).

M.W. Poole et al, PAC 2003 *4GLS: A new type of 4th generation light source facility*



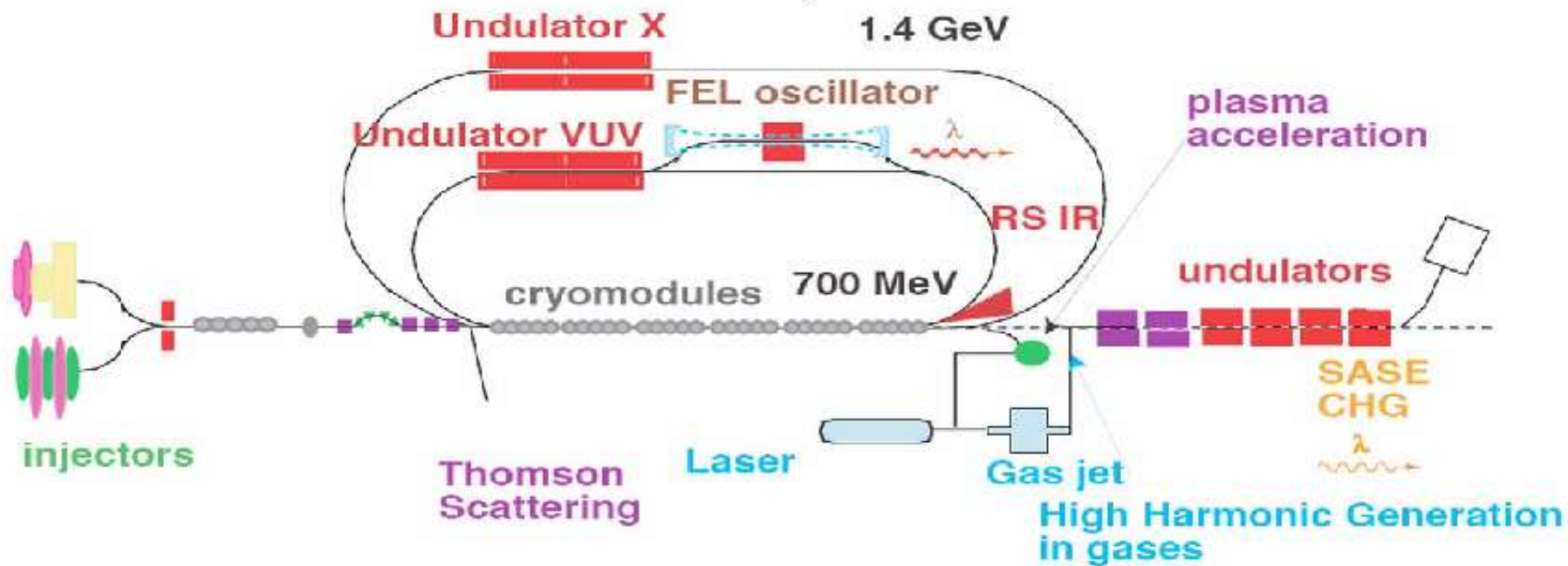
	Stage 1		Stage 2		Stage 3		Stage 4	
e-energy	500 MeV		1.5 GeV		2.5 GeV		3.0 GeV	
U Period	0.06	0.025	0.06	0.025	0.05	0.015	0.015	0.015
K	3.916	1.98	4.5	2.37	2.93	1.75	2.3	2.3
$\lambda(\text{nm})$	260	37	37	5.3	5.3	0.76	0.76	0.76/ 0.11



FRANCE

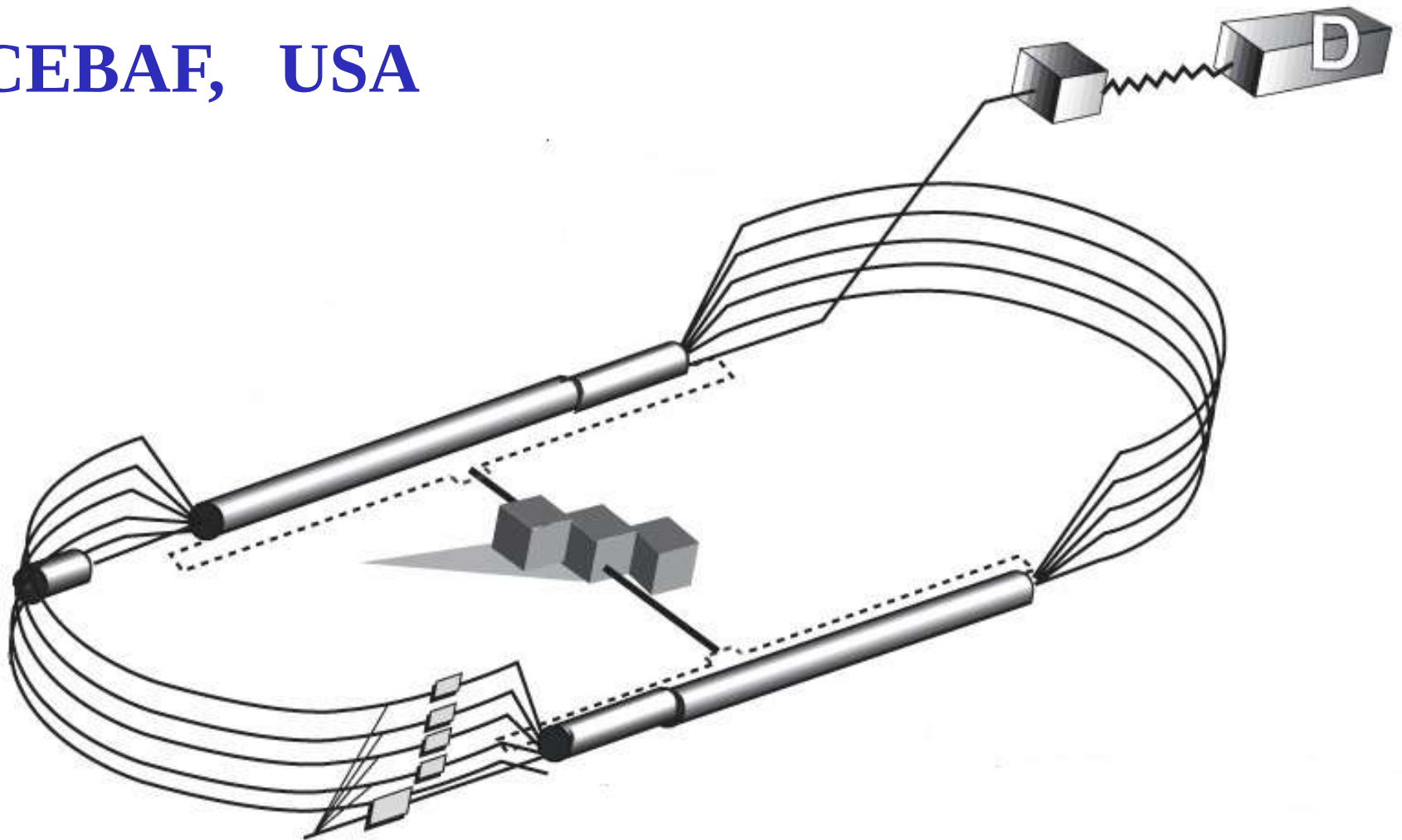
SACLAY

(ARC-EN-CIEL: Accelerator-Radiation Complex
for ENhanced Coherent Intense Extended Light)



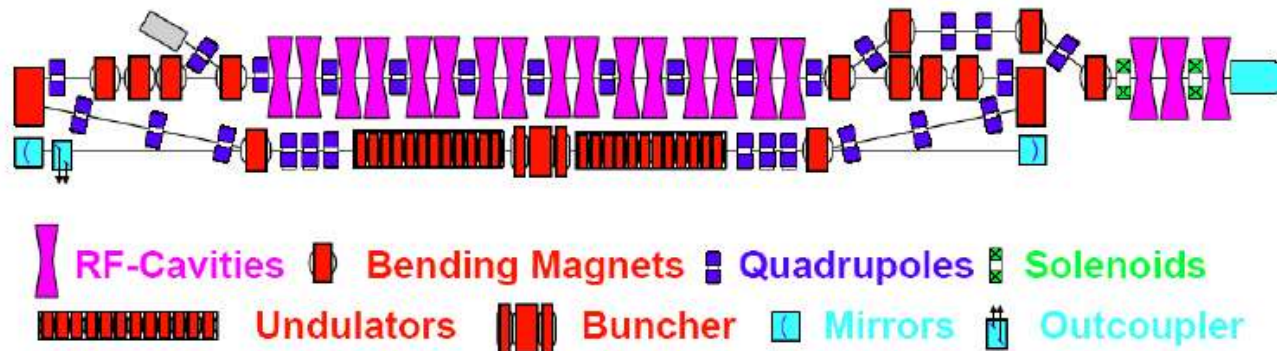
M.E. Couprie et al, "ARC-EN-CIEL" A proposal for a 4th generation light source in France, Proc. EPAC 2004, 366.

CEBAF, USA



ИЯФ СО РАН с 1998 г. развивает идею 5ГэВ ИС4П основанного на рециркуляторе с рекуперацией энергии. И настоящее время ими построен прототип ИС4П (МАРС), где осуществлена рекуперация энергии и генерация мощного (0.5 кВт) ТГц излучения.

Novosibirsk Free Electron Laser



Output Light Parameters	IR
Wavelength range (microns)	120-180
Bunch Length (FWHM psec)	50
Laser power / pulse (microJoules)	9
Laser power (kW)	0.2
Rep. Rate (cw operation, MHz)	22.5
Electron Beam Parameters	IR
Energy (MeV)	12
Accelerator frequency (MHz)	180
Charge per bunch (pC)	900
Average current (mA)	20
Peak Current (A)	10
Beam Power (kW)	240
Energy Spread (%)	0.2
Normalized emittance (mm-mrad)	20

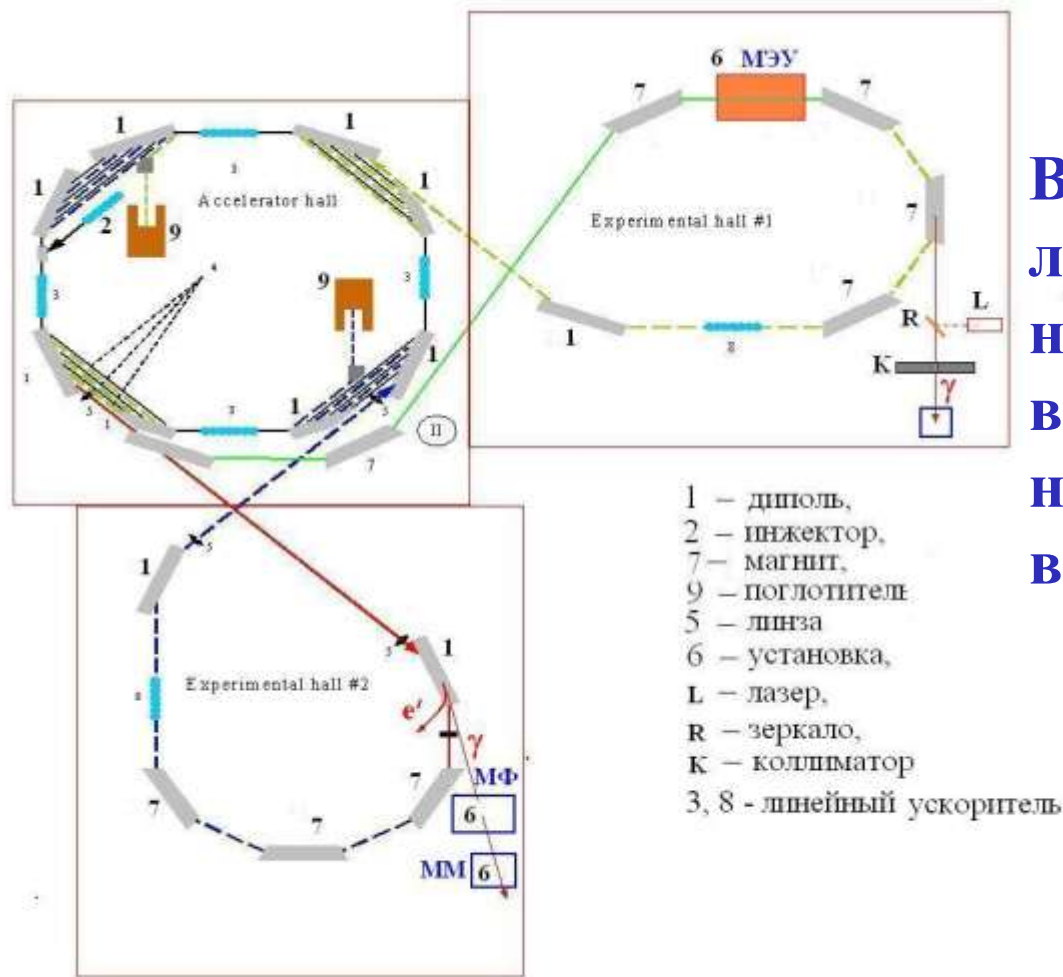


V.P. Bolotin et al, , *Status of the Novosibirsk Terahertz FEL*, 2004 FEL Conference Proceedings, 226-228

Выбор схемы

Корнельская схема ИС4П основанная на сверхпроводящем ЛУ с рекуперацией энергии (ERL) и накопительного кольца на ту же энергию. Однако в этой схеме стоимость ЛУ в ~ 10 раз дороже стоимости накопительного кольца. Поэтому стоимость источника можно снизить в M раз, если сделать рециркулятор на ту же энергию с M прохождениями ускоряющей системы (Шведский вариант). В этом случае сам рециркулятор может стать ИС4П, если в его прямолинейных промежутках разместить ондуляторы для генерирования спонтанного и индуцированного ОИ (ЛСЭ). Здесь же можно осуществить встречные электронные и лазерные пучки для генерирования γ - излучения по схеме обратного комптоновского излучения, установить внутренние мишени с исследуемыми образцами и мишени (тонкие проволоочки) для генерирования тормозного γ - излучения. Ток из рециркулятора может переводиться в аналог накопительного кольца с оптимизированной для ИС магнитной структурой. Предельный ток в рециркуляторе в M раз меньше (когерентные эффекты), т.к. токи с различных орбит в ЛУ складываются.

Принципиальная схема ИС ФИАН содержит рециркулятор с рекуперацией энергии (РРЭ) установленный в бункере синхротрона «Пахра». Он может работать без возвратных дуг как ИС на эксперименты в различных областях науки включая физику элементарных частиц.



Возвратные дуги установленные в экспериментальных залах с целью удобства и расширения возможностей ИС могут использоваться по очереди.

Пример

При прохождении ондулятора с числом периодов M и оптимальным полем электрон испускает

$$N_{ph} \simeq \alpha M = M / 137$$

фотонов. При токе i через ондулятор проходит поток

$$\dot{n} = i / e \simeq 6 \cdot 10^{18} i [A]$$

е/сек, который испускается поток фотонов

$$\dot{N}_{ph} \simeq 6 \cdot 10^{18} \alpha M S^{coh} i [A] \simeq 4.4 \cdot 10^{16} M S^{coh} i [A]$$

при мощности испускаемого излучения

$$P^{rad} [W] \simeq \hbar \omega \dot{N}_{ph} \simeq 4.4 \cdot 10^{16} M S^{coh} i [A] \hbar \omega [eV],$$

где S^{coh} - фактор когерентности излучения. Для спонтанного некогерентного ОИ $S^{coh} = 1$, а для ЛСЭ

$S^{coh} = N_{e-}^{bunch}$, где N_{e-}^{bunch} - число электронов в микробанче. Длина волны ОИ $\lambda_{min} = \lambda_u / 2\gamma^2$.

При длине ондулятора $L=411$ см, $M=137$, $i=100$ мА, $\hbar\omega=1.7$ кеV имеем: $\dot{n} \approx 6 \cdot 10^{17}$ е/сек, $\dot{N}_{ph} \sim 6 \cdot 10^{17}$ фот./сек, $P^{rad} |_{S^{coh}=1} = 170$ Вт.

Часть электронов пучка $\dot{n} \approx 6 \cdot 10^{14}$ е/сек может выводиться из рециркулятора при выключенной схеме рекуперации энергии. При этом мощность в пучке при энергии электронов 2 ГэВ $P_e = 200$ кВт.

Заключение

1. ИС4П являются источниками оптического, рентгеновского и гамма-излучения одновременно. На них, также как и на ИС3П на равноправных условиях могут одновременно или по очереди работать пользователи как из области физики элементарных частиц так и из физики твердого тела, медицины, биологии, химии, нанотехнологий и т.д.
2. Строительство прототипа ИС4П на энергию ~ 50 МэВ будет стимулировать развитие отсутствующей в России техники радиочастотной сверхпроводимости так необходимой для развития ИС и ускорительной техники.
3. Сильноточные непрерывные электронные пучки высокой яркости получаемых на сверхпроводящих ЛУ с рекуперацией энергии при малых энергиях ~ 50 МэВ уже находят применение в источниках света ИК и оптического диапазона, мощных ЛСЭ, источниках тарагерцового и обратного комптоновского излучения, лептон-ядерных коллайдерах, системах электронного охлаждения.
4. Строительство ИС4П на энергию 1.5-2 ГэВ в развитых странах обходится в ~ 100 -200 млн \$ и длится ~ 5 лет. Поэтому рассматриваемый ИС должен стать национальным ИС. Троицк одно из возможных расположений рассматриваемого ИС.