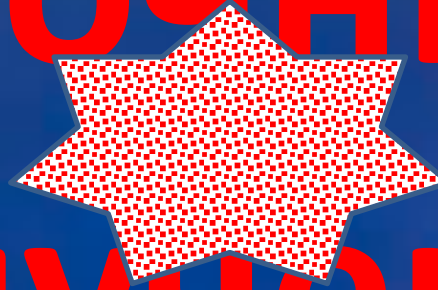


Источники излучения



Мезенцев Н.А.

ИЯФ
21-22 марта 2019

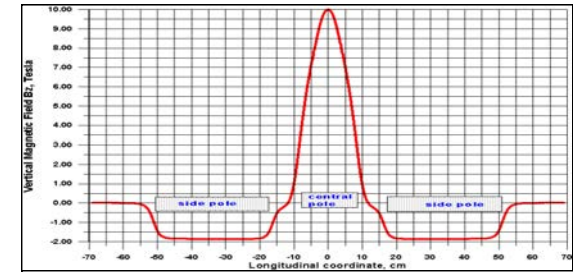
Introduction

3-pole wiggler (shifter) – main objective is an increasing of radiation rigidity. The central pole is used as a radiation source. The point of radiation is shifted of relatively initial orbit. All three bending magnets are superconducting.

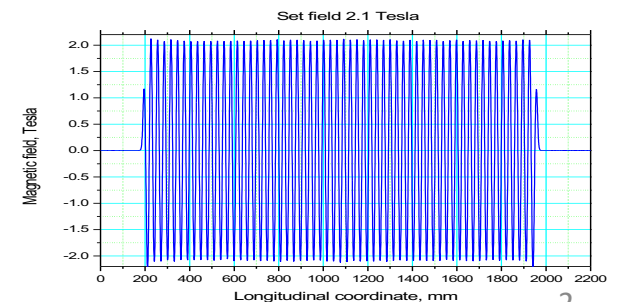
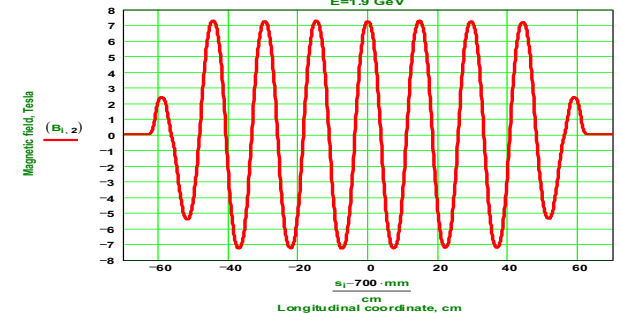
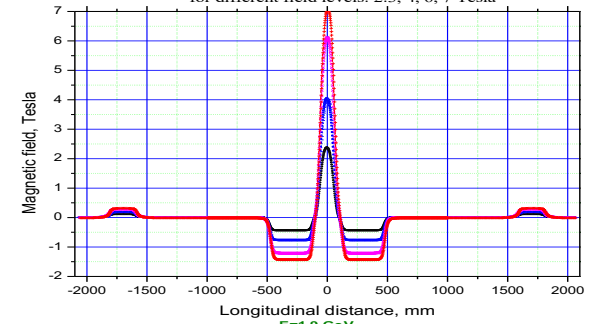
Shifter with the fixed radiation point – The same objective as previous one. The central pole is used as a radiation source. The external normally conducting magnets are used to keep beam orbit on a straight section axis at change of the main field.

Superconducting multipole wiggler – main objective - generation of powerful synchrotron radiation with high photon flux density in the rigid X-ray range. ($K \gg 1$)

Superconducting undulator – a basic purpose – generation of spatially coherent undulator radiation of high. ($K < 3$)



Longitudinal magnetic field distribution along straight section for different field levels: 2, 3, 4, 6, 7 Tesla

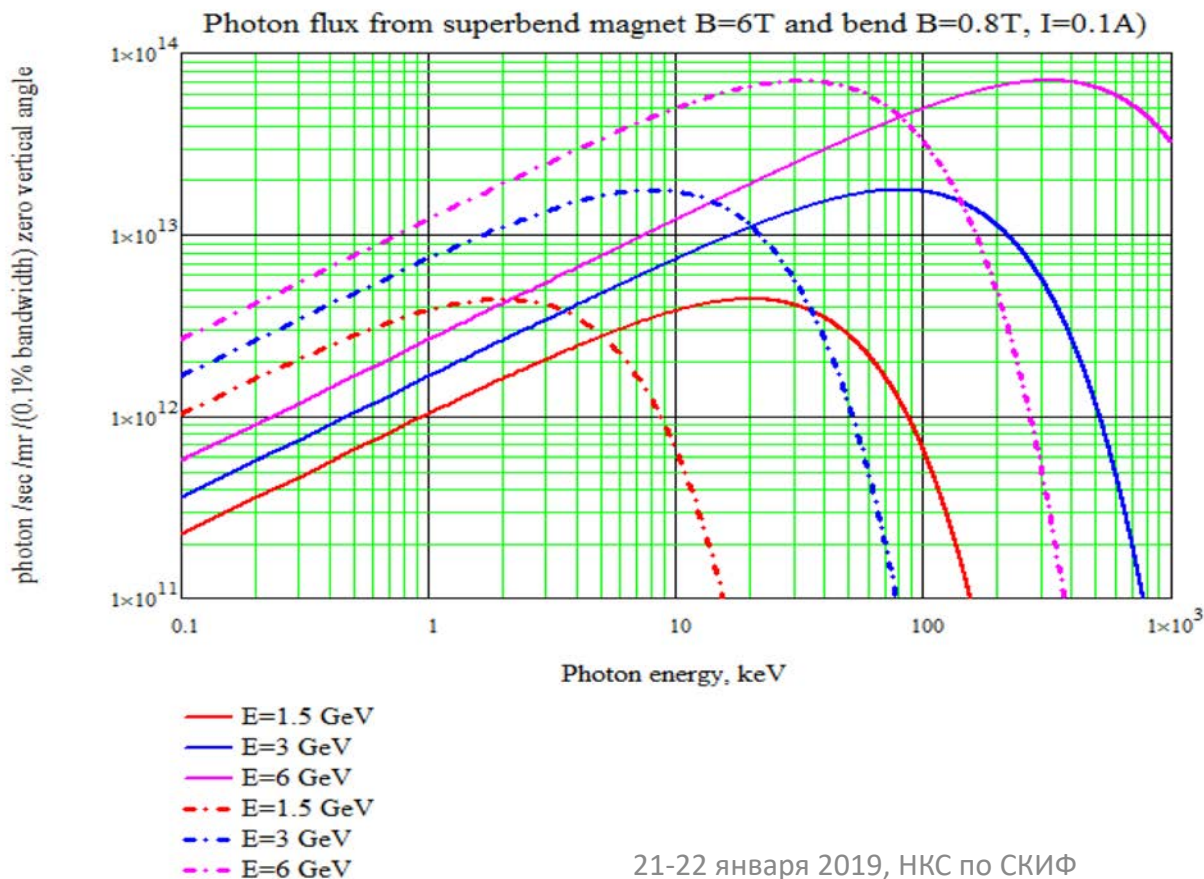


Поворотные магниты и Супербенды

Спектральные характеристики СИ определяются значением магнитного поля B и энергией электронов E

$$\varepsilon_c \sim B \cdot E^2$$

Супербенд – специальный поворотный магнит с высоким магнитным полем для получения жёсткого спектра. Является основным элементом магнитной структуры



Спектры излучения для электронов энергий 1.5, 3 и 6 ГэВ из поворотных магнитов с полем 0.8Т (пунктирные линии) и из супербенда с полем 6Т (сплошные линии)

Поворотные магниты и Супербенды

Длина орбиты, на которой формируется излучение, зависит от поля B $\Delta l(mm) \sim 3.4/B(T)$

Видимый эффективный размер электрона определяется полем B и энергией E $\Delta x(\mu m) \sim 2/(B(T)E(GeV))$

При горизонтальном эмиттансе ~ 100 pks и бета-функции в месте магнита ~ 1 м размер источника ~ 10 мкм – практически точечный источник.



9.3 Т супербэнд для BESSY, изготовленный в ИЯФ



21-22 января 2019, НКС по СКИФ



5.5Т супербэнд, изготовленный в Беркли для ALS

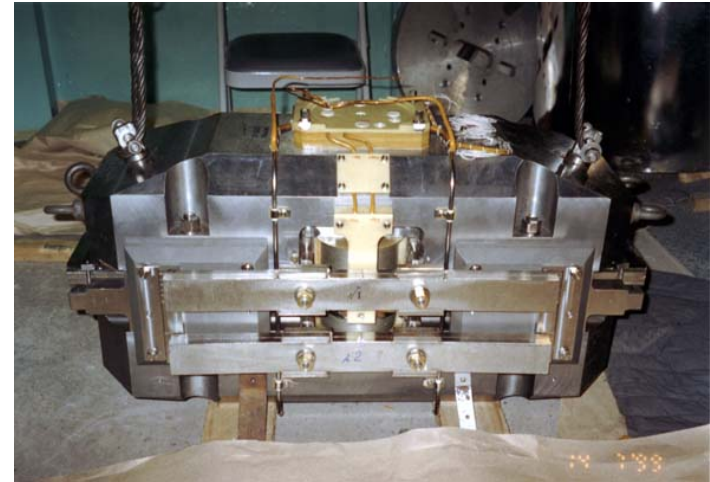


Сверхпроводящие шифтеры

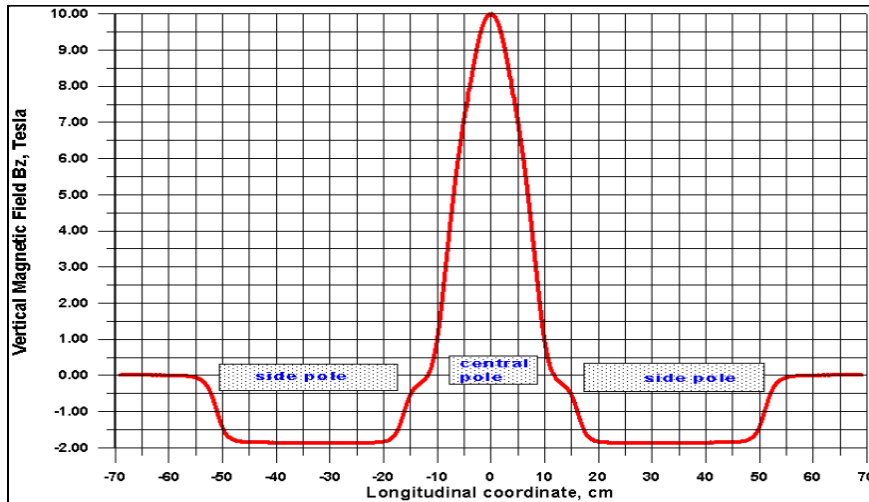
10 Tesla WLS for Spring-8, Japan



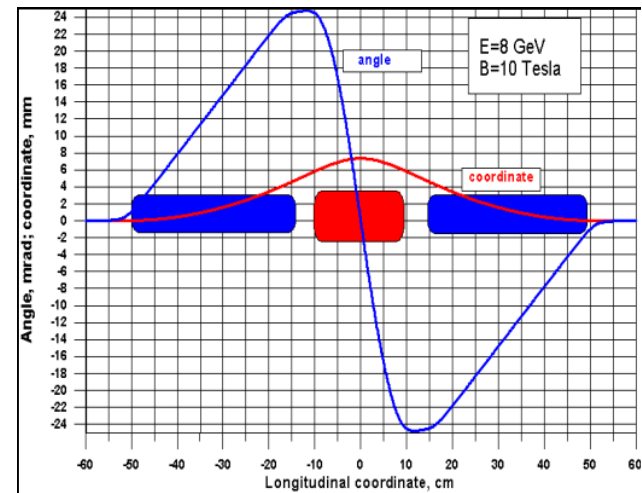
10 Т сверхпроводящий шифтер на магнитных измерениях



Сверхпроводящий магнит



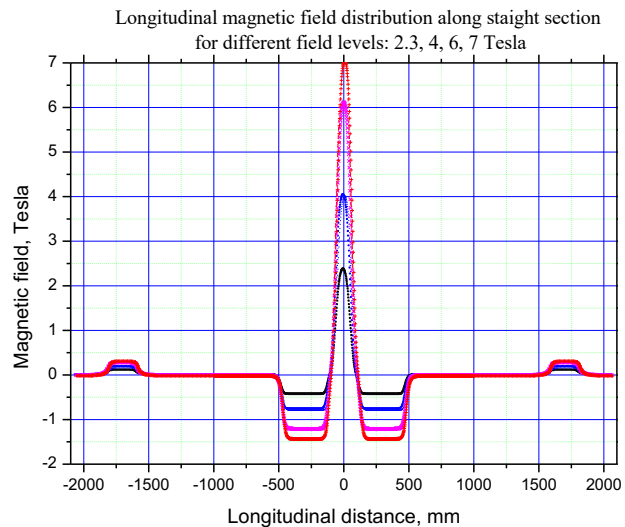
Продольное распределение поля



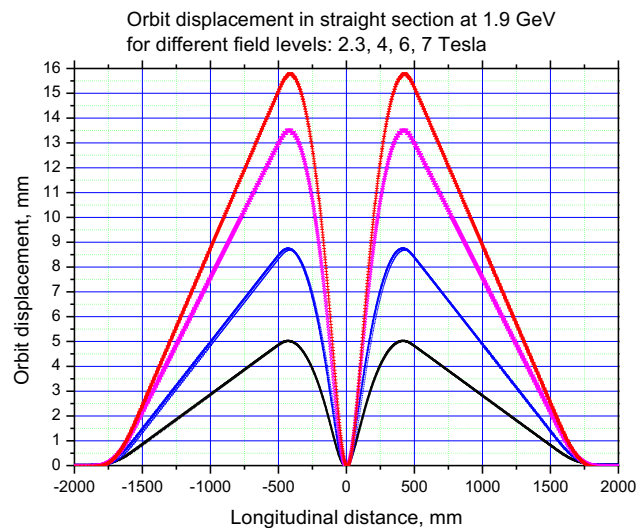
Орбита внутри шифтера

Сверхпроводящие шифтеры

7 Т шифтер для BESSY



Распределение
магнитного
поля внутри
шифтера



Орбита внутри
шифтера



Fig. 2-4 Photo of 7 Tesla WLS inserted into BESSY-2 straight section.

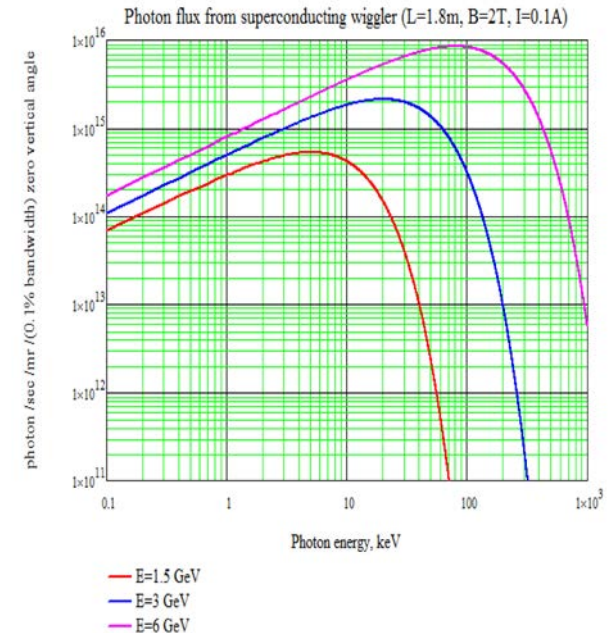
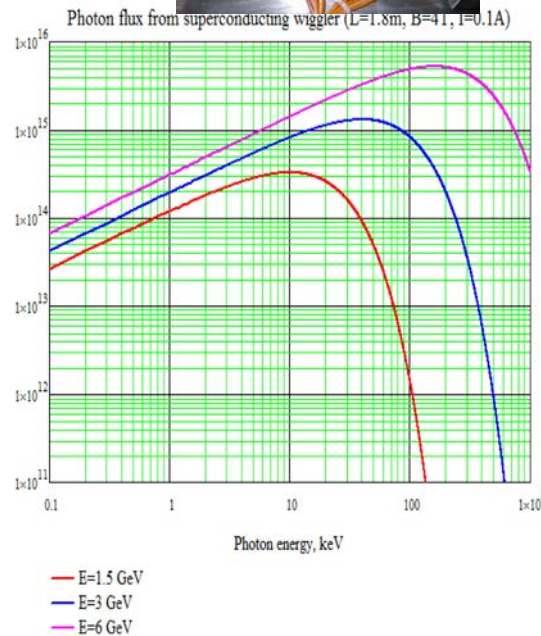
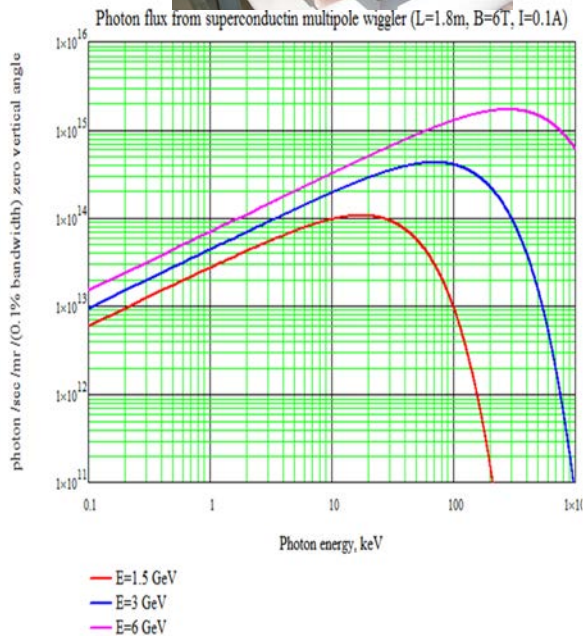
Сверхпроводящие многополюсные вигглеры

Основная цель – увеличить плотность потока фотонов синхротронного излучения в жёстком рентгеновском диапазоне кратно числу полюсов.

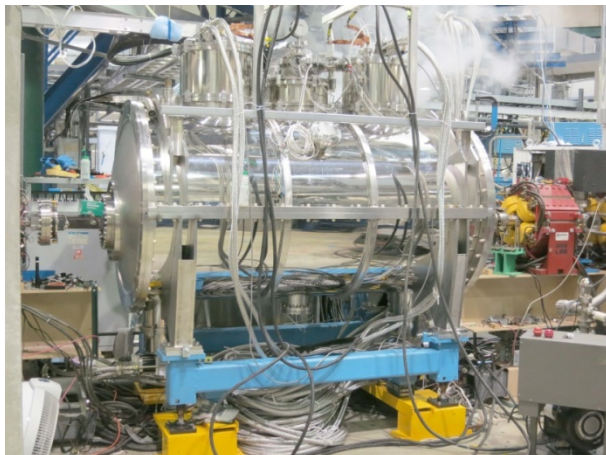
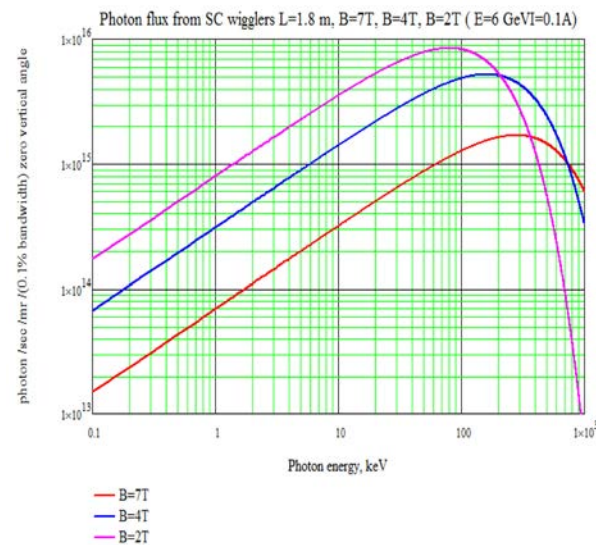
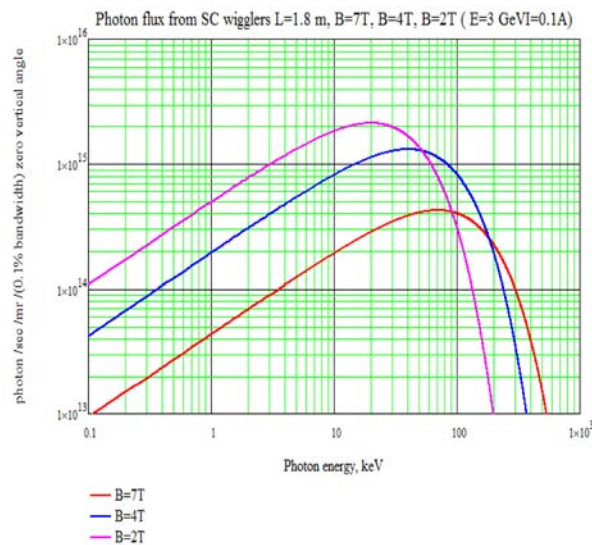
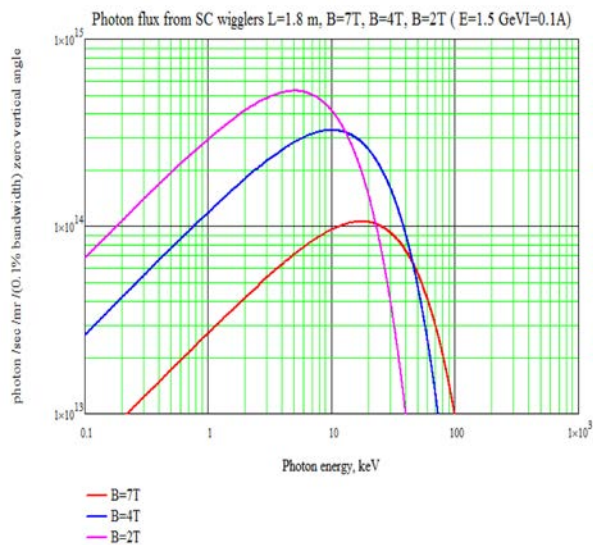
Можно разделить на три категории в соответствии с частотой заявок:

- Поле 7-7.5 Т, период 130-200 мм
- поле 3.5 - 4.2Т, период 48-60 мм
- поле 2-2.2 Т, период 30-33 мм

Потоки фотонов для разных вигглеров длиной 1.8 м для энергий 1.5,3,6 ГэВ



Сверхпроводящие многополюсные вигглеры



7.5 T 17 полюсов с периодом 193 мм для LSU CAMD (США)



4.2T 59 полюсов с периодом 52 мм для AS (Австралия)



2 T 63 полюса с периодом 32 мм для CLS (Канада)

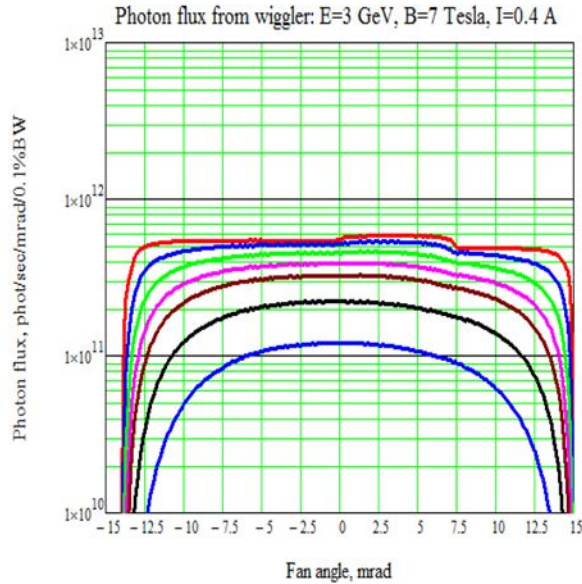
Сверхпроводящие многополюсные вигглеры

Полная мощность излучения $E=3$ ГэВ, $I=0.4$ А

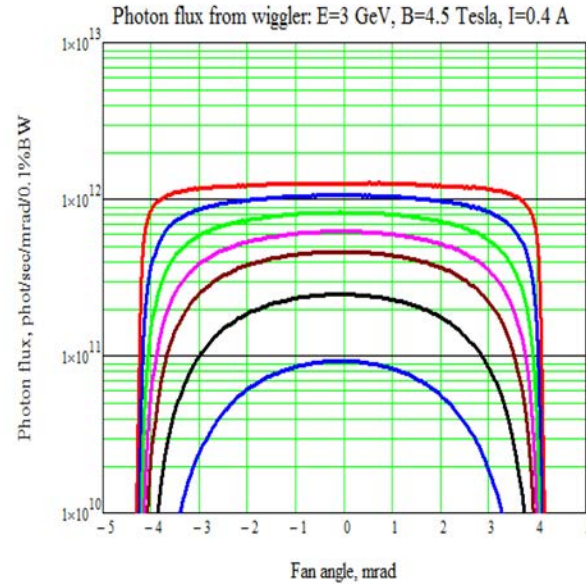
150. кВт

64.4 кВт

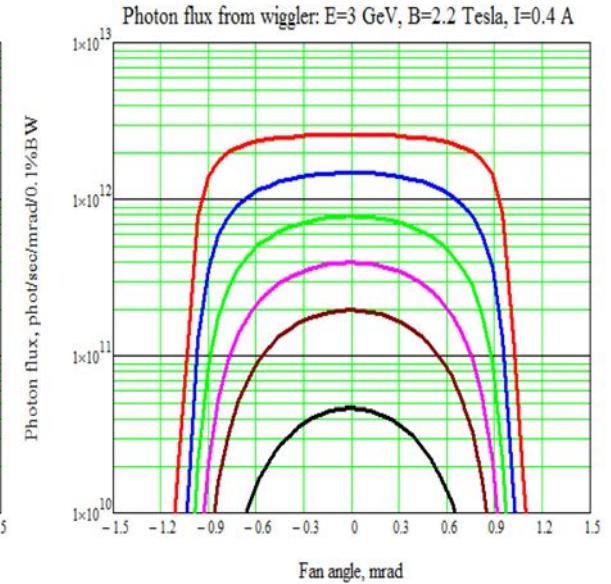
18.4 кВт



- photons 10 keV
- photons 20 keV
- photons 30 keV
- photons 40 keV
- photons 50 keV
- photons 70 keV
- photons 100 keV



- photons 10 keV
- photons 20 keV
- photons 30 keV
- photons 40 keV
- photons 50 keV
- photons 70 keV
- photons 100 keV



- photons 10 keV
- photons 20 keV
- photons 30 keV
- photons 40 keV
- photons 50 keV
- photons 70 keV
- photons 100 keV

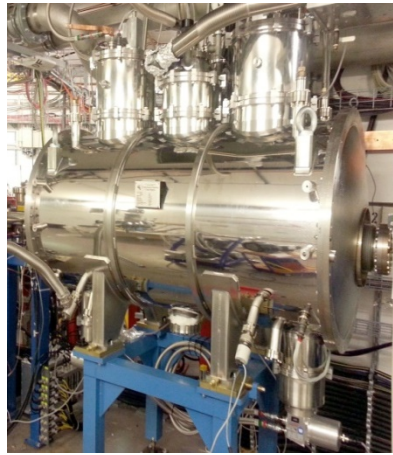
Спектрально-угловое распределение потока фотонов для разных категорий вигглеров, установленных на источник СИ $E=3$ ГэВ, $I=0.4$ А

International collaboration on SR generators

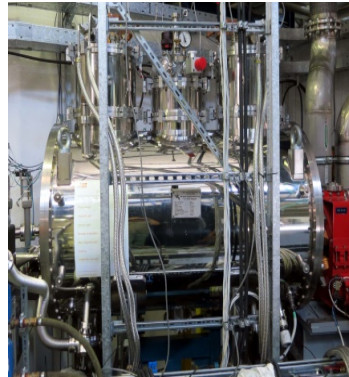
Germany:



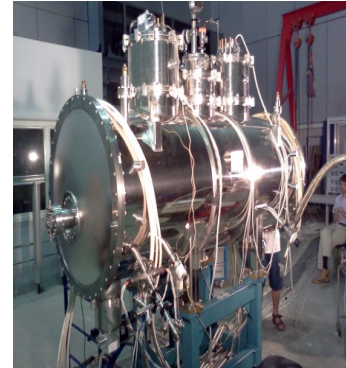
Two superconducting
7 Tesla shifters for
BESSY-2 light source
(Berlin). 2000,2001



17 poles 7 Tesla, $\lambda=148$ mm
superconducting wiggler for
BESSY-2 light source (Berlin)
2002



44-pole 2.5 Tesla, $\lambda=48$ mm
superconducting wiggler
for ANKA light source
(Karlsruhe) 2014

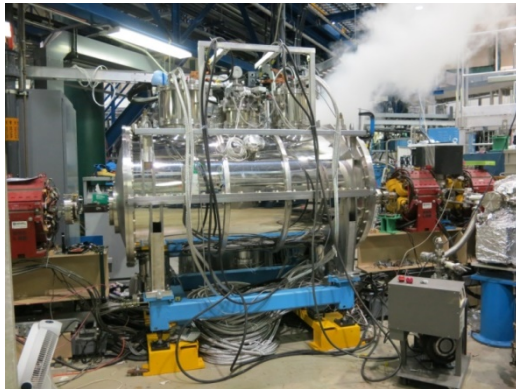


72-pole 3 Tesla, $\lambda=51$
mm superconducting
wiggler for ANKA-CLIC
(Karlsruhe)
Indirect cooling system.
2016

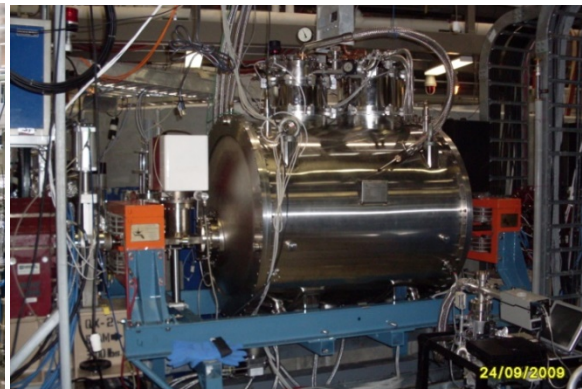


22-pole 7 Tesla, $\lambda=125$ mm
superconducting wiggler for
DELTA (Dortmund)
2019

USA



15-pole 7.5 Tesla, $\lambda=198$ mm
superconducting wiggler for LSU
CAMD light source (Baton Rouge)
2013



7 Tesla superconducting shifter for LSU
CAMD light source (Baton Rouge) 1997



49-pole 3.5 Tesla, $\lambda=60$ mm
superconducting wiggler for
ELETTRA light source (Trieste) 2002

Italy

England

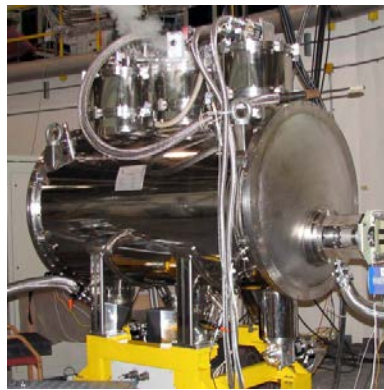


49-pole 3.5 Tesla, $\lambda=60$ mm superconducting wiggler for Diamond Light source. 2006

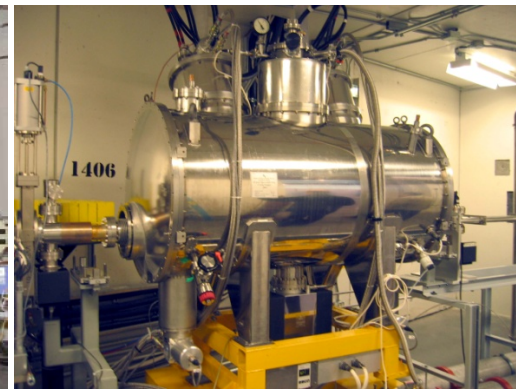


49-pole 4.2 Tesla, $\lambda=48$ mm superconducting wiggler for Diamond Light source. 2009

Canada



27-pole 4.2 Tesla, $\lambda=48$ mm superconducting wiggler for Canadian Light source. 2007



63-pole 2.2 Tesla, $\lambda=32$ mm superconducting wiggler for Canadian Light source. 2005

Brasil



35-pole 4.2 Tesla, $\lambda=60$ mm superconducting wiggler for LNLs light source. 2009

Australia



49-pole 4.2 Tesla, $\lambda=52$ mm superconducting wiggler for AS light source. 2012

Spain



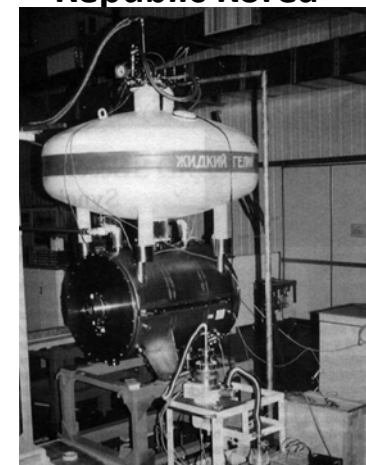
119-pole 2.1 Tesla, $\lambda=30$ mm superconducting wiggler for ALBA light source. 2010

Japan



10 Tesla superconducting shifter for SPring-8. 2000

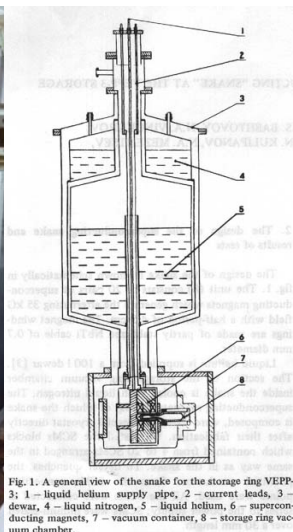
Republic Korea



7.5 Tesla superconducting shifter for PLS light source. 1996.

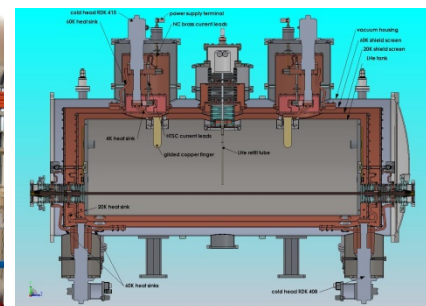
Cryogenic system of SC insertion devices progress (Budker INP)

Cryogenic system
1979



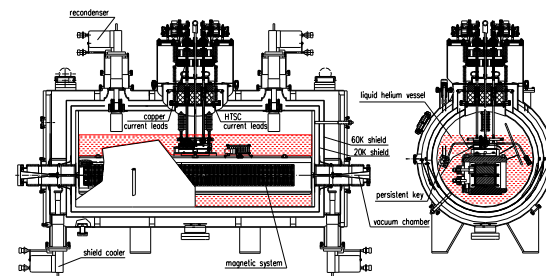
Liquid helium consumption ~ 4 l/hr

2007



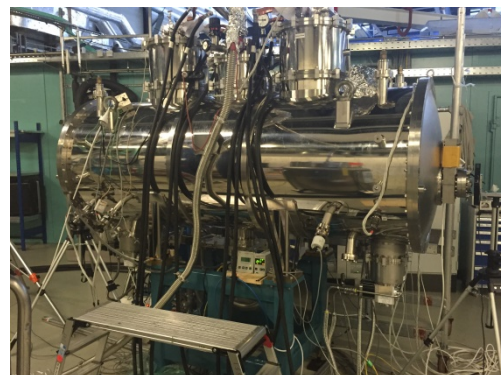
Liquid helium consumption < 0.03 l/hr

2002



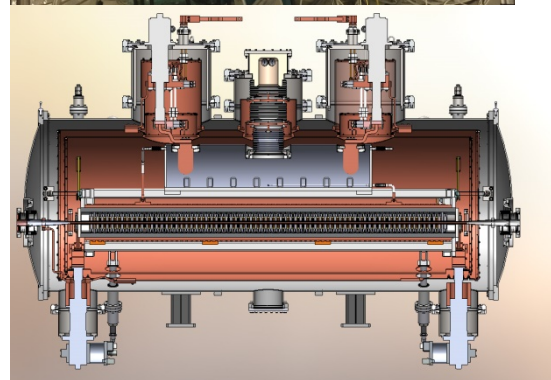
Liquid helium consumption ~ 0.6 l/hr

2015



Indirect cooling system. Liquid helium used as cooling agent

For initial cooling of the magnet thermal tubes on the basis of nitrogen and helium are developed, fabricated and tested.



Undulator radiation

Nowadays a variety of undulators as type and use the material for their manufacture is quite large.

The use of materials:

- Electromagnetic undulator using conventional electromagnets (EMU)
- Undulators with permanent magnets outside the vacuum chamber (OVPMU)
- Undulators with permanent magnets in a vacuum storage ring (in-vacuum IVPMU)
- Cryogenic undulators with permanent magnets (CPMU)
- Superconducting undulators (SCU)

The type of undulators:

- Planar
- Spiral
- 8-type (figure 8) undulators
- Wedge-shaped (tapered) undulators

Undulator radiation

Nowadays the most common are undulators permanent magnet using ceramic compounds SmCo, NdFeB, PrFeB.

$$K = 0.934 \cdot B(T) \cdot \lambda_0(cm)$$

$$\lambda_n = \frac{\lambda_0}{2n\gamma^2} \left(1 + \frac{K^2}{2} \right) \quad E_n[keV] = \frac{9.5nE^2[GeV]}{\lambda_0[mm] \left(1 + \frac{K^2}{2} \right)}$$

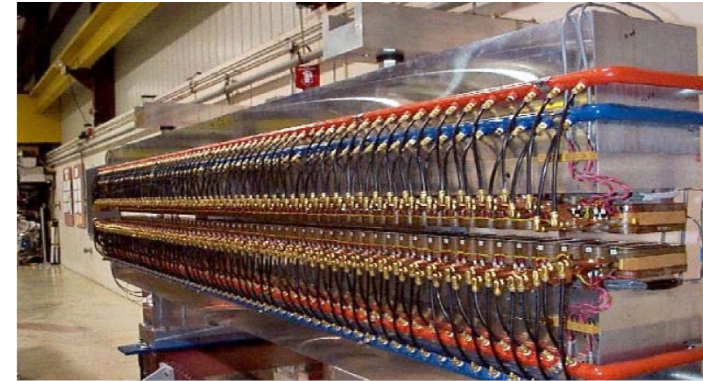
λ_0 – period of the undulator. The smaller the period, the more the energy of the photons at the first harmonic.

K - deflection parameter. The more K is, the more harmonics it emits an undulator.

The magnetic field at the axis is exponentially dependent on g/λ_0 , where g is the pole gap:

$$B \sim B_0 e^{-\pi \frac{g}{\lambda_0}}$$

The smaller the gap, the larger the field.



Electromagnetic undulator (EMU)

Undulator radiation

The Progress of materials for undulators permanent magnets

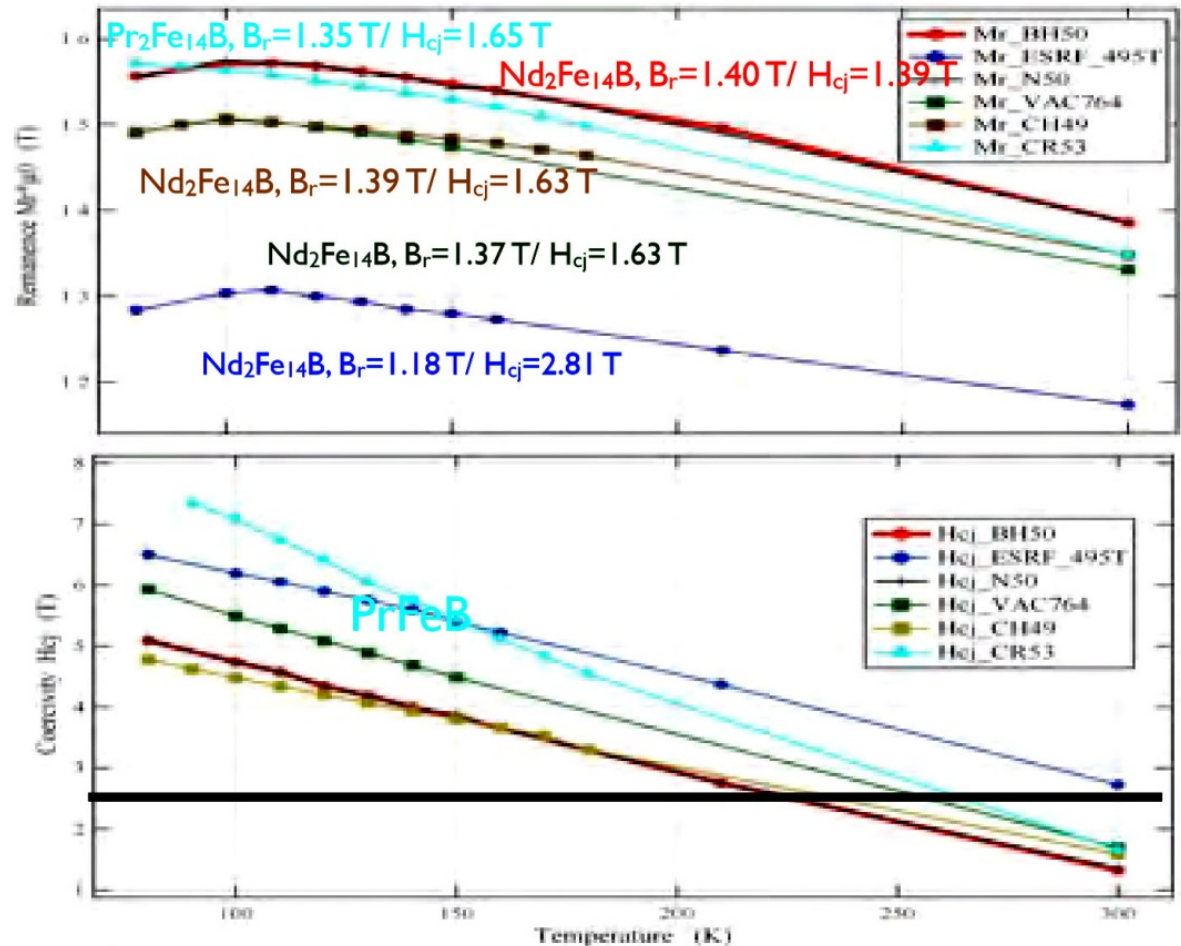
Magnets with high residual magnetization :

SmCo – $B_r \leq 1.05\text{T}$

NdFeB -- $B_r \leq 1.4\text{T}$

PrFeB -- $B_r \leq 1.6\text{T}$

Upon cooling of NdFeB permanent magnets to cryogenic temperatures the residual field increases with decreasing temperature (up to 100K). Magnets PrFeB increase the residual magnetization to the temperature of liquid nitrogen.

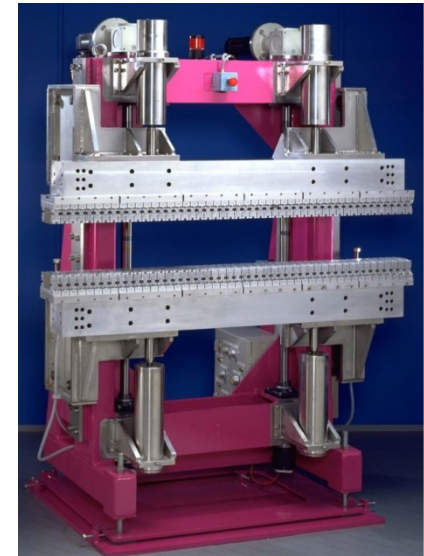


Ондуляторы

Ондуляторы на постоянных магнитах

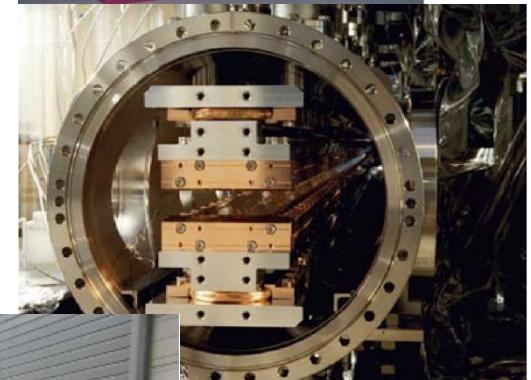
Ондуляторы - OVPMU

Магниты ондуляторов помещены вне вакуумной камеры сверху и снизу. Чтобы изменить магнитное поле на орбите электронов половинки ондуляторов перемещаются обособленно с помощью специальных механизмов. Фиксированный размер вакуумной камеры не позволяет создавать малый межполюсный зазор и ограничивает возможность создания большого K при малых периодах ондулятора.



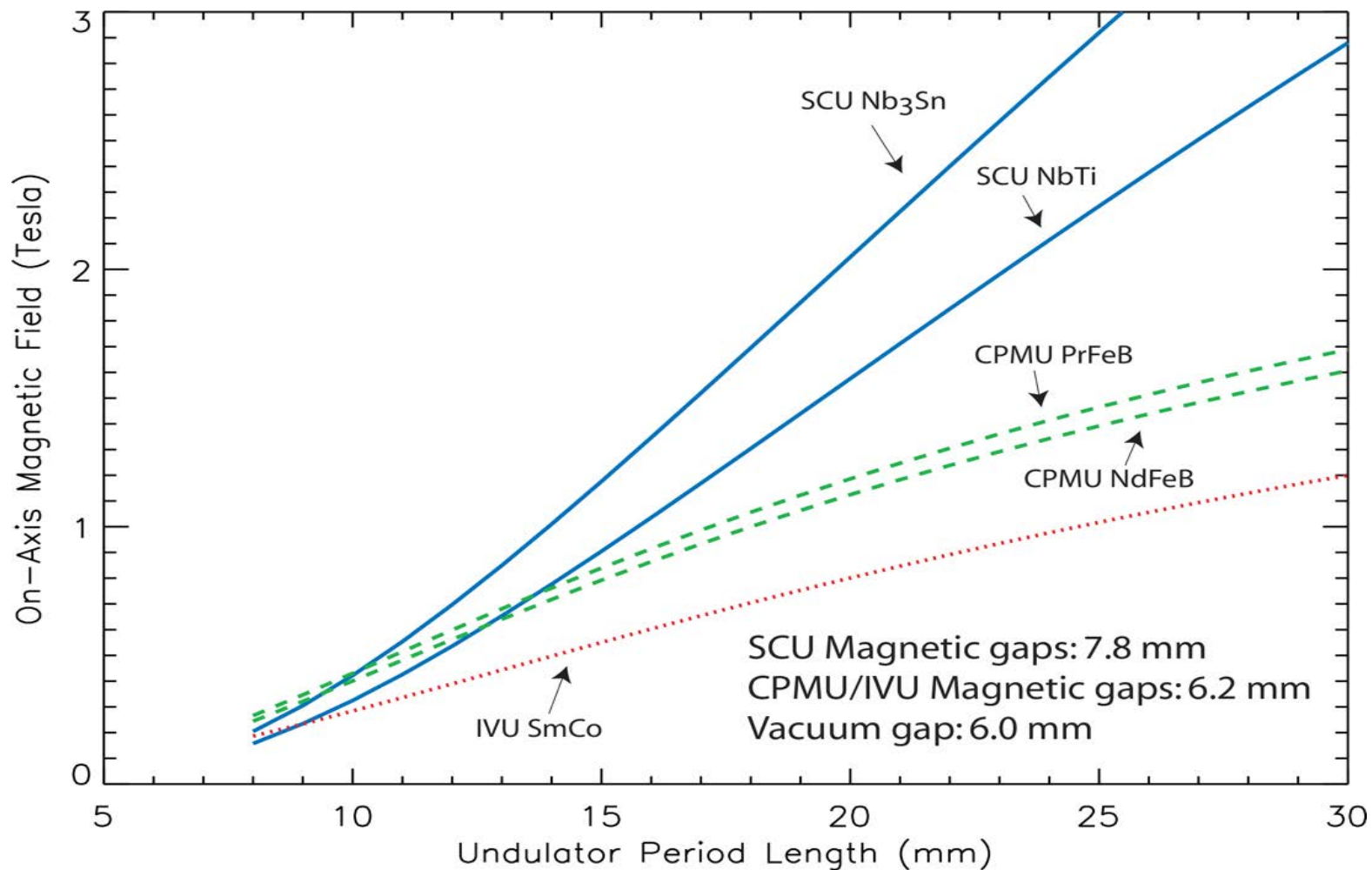
Ондуляторы - IVPMU

Магнитная система постоянных магнитов ондуляторов помещена в вакуум электронного накопителя и позволяет создавать межполюсные зазоры до 5-6 мм. Это позволяет увеличивать K до 2 и больше для периода 14-15 мм. Возможно и далее увеличивать K для коротких периодов, охлаждая постоянные магниты до криогенных температур (Ондуляторы - СРМУ).



Ондуляторы

Сравнение параметров ондуляторов на постоянных магнитах и сверхпроводящих при одном зазоре

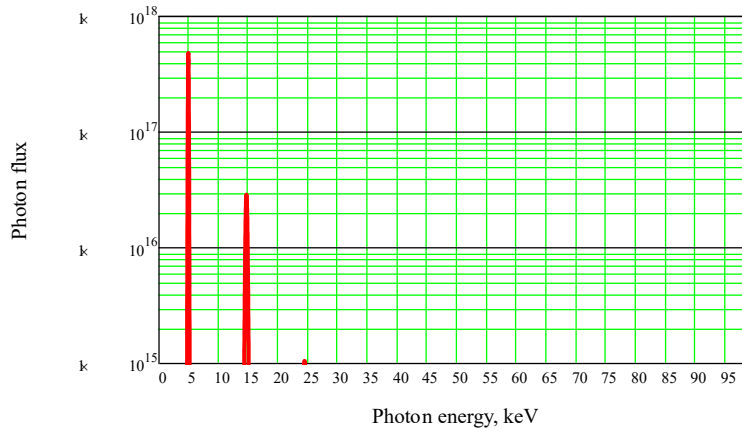


Undulator radiation spectrum

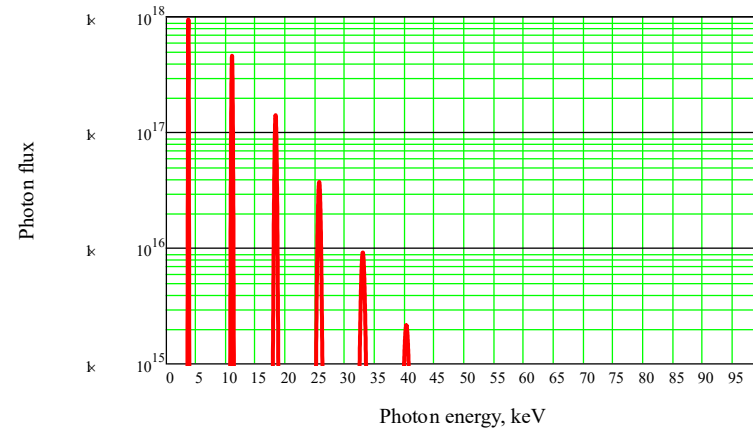
Period $\lambda=15.6\text{mm}$, $L=2\text{ m}$, Energy 3 GeV, $I=0.1\text{ A}$

$$K = 0.934 \cdot \lambda_0[\text{cm}] B_0[\text{T}]$$

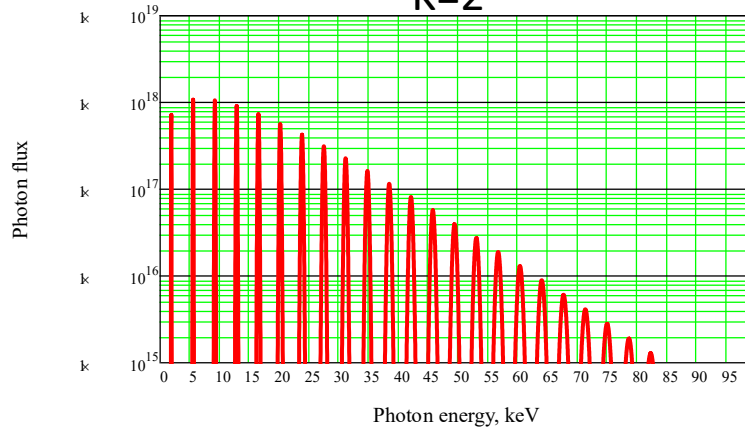
K=0.5



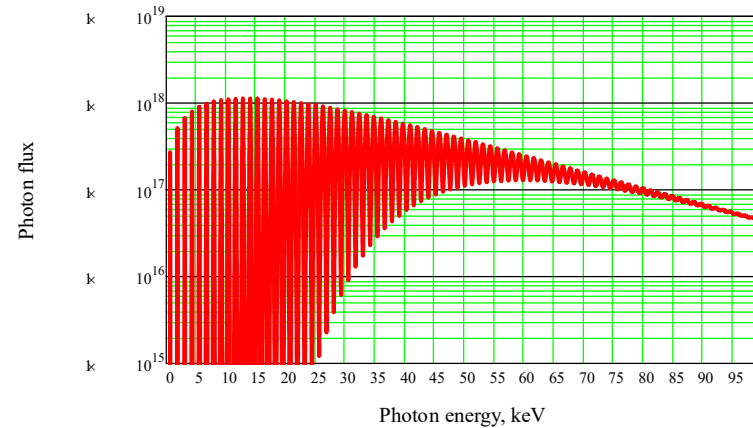
K=1



K=2

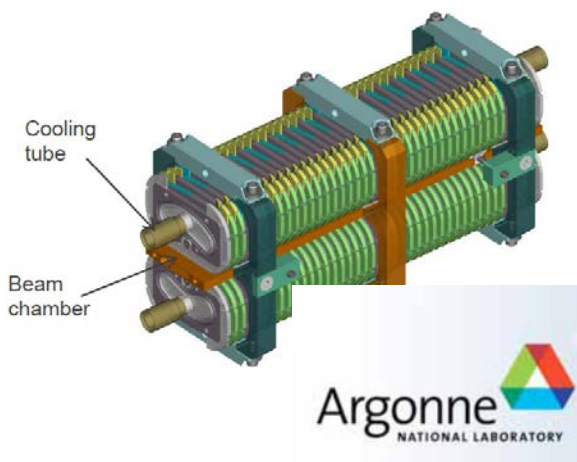


K=4

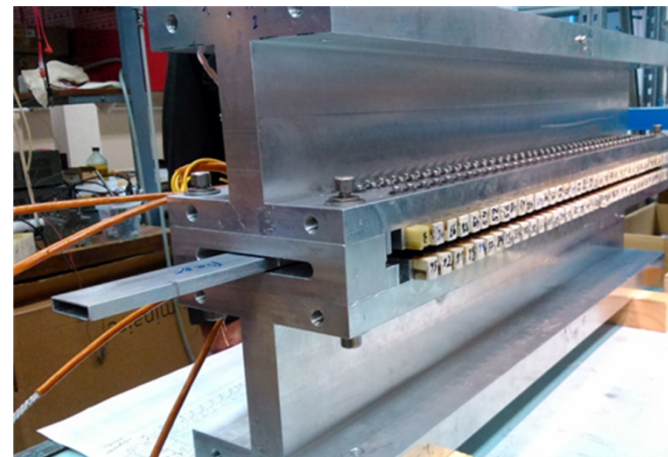
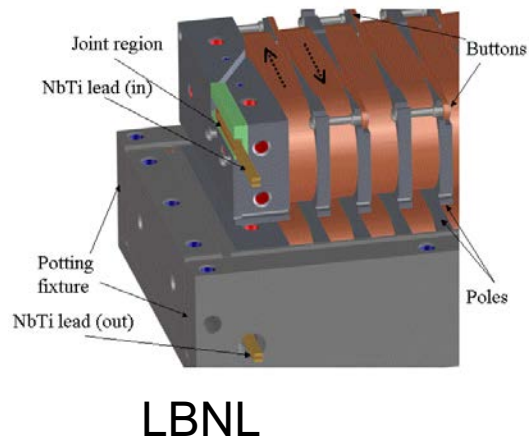
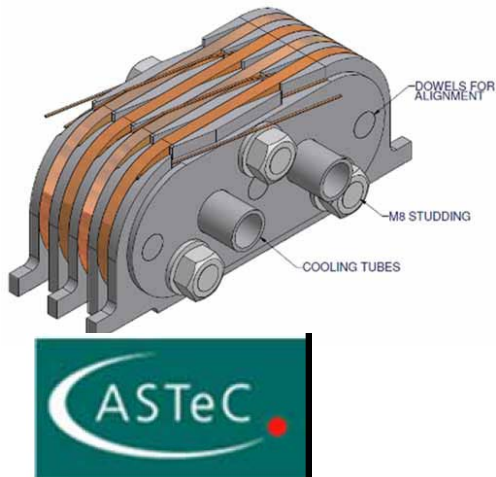
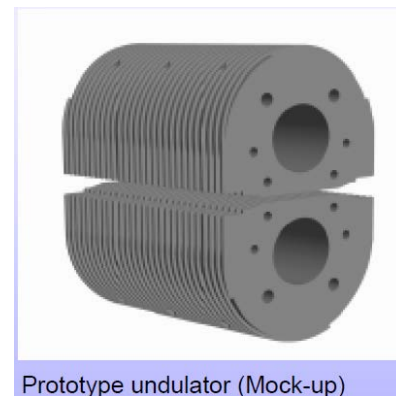
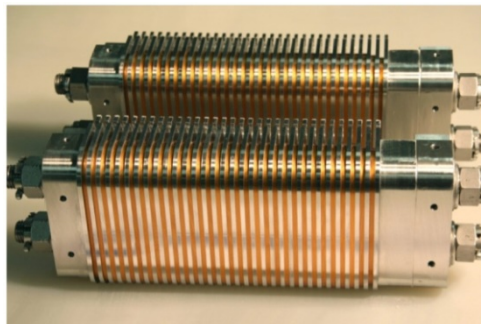


Superconducting undulators

Magnetic structure layout

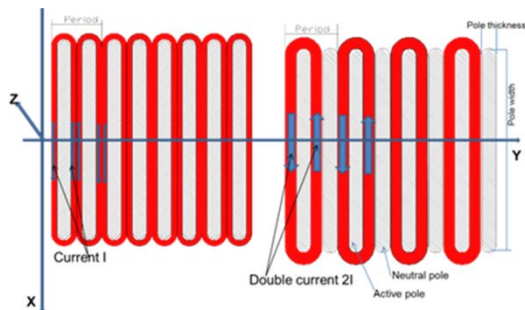


Vertical racetrack coils

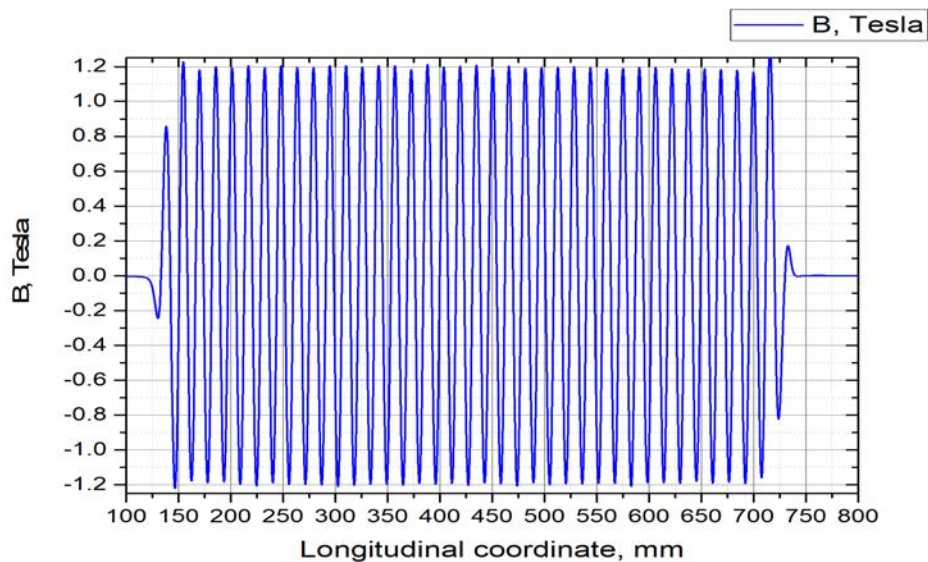
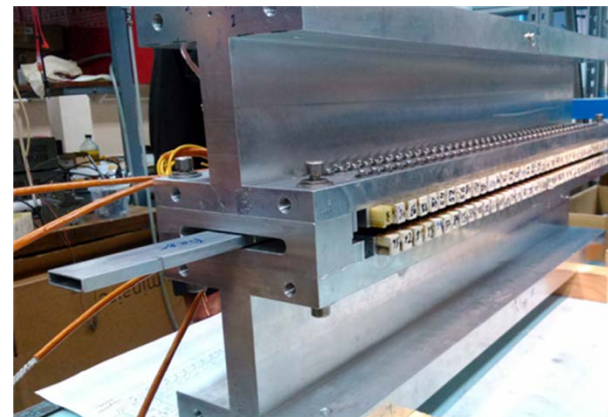
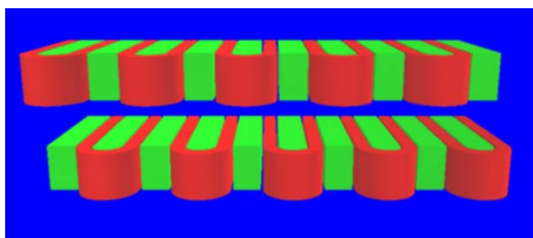


Budker INP, horizontal racetrack coils

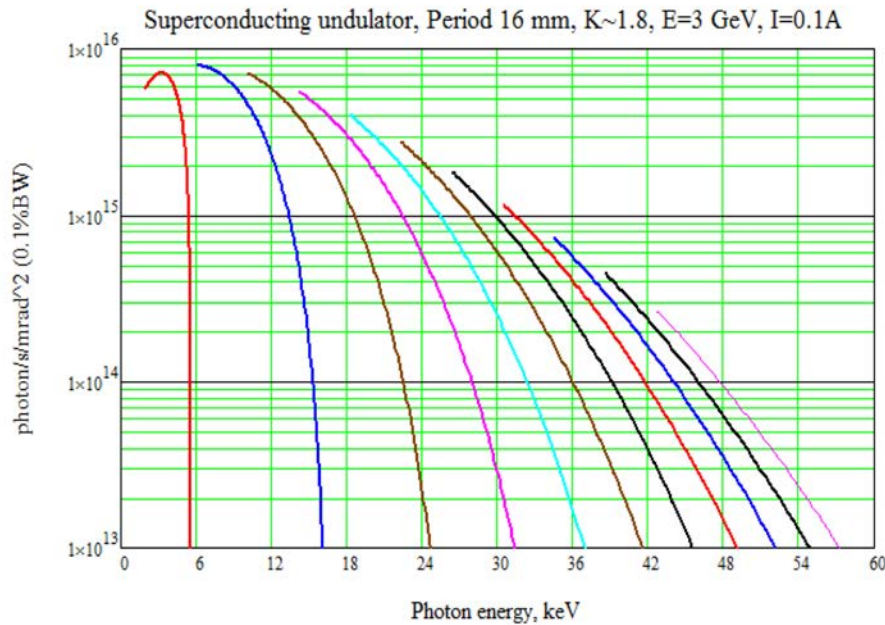
ИЯФ – сверхпроводящий прототип ондулятора с нейтральными полюсами



Период – 15.6 мм
Зазор - 8 мм
Поле - 1.2 Тесла
Провод NbTi/Cu – 0.5 мм



Излучение из сверхпроводящих ондуляторов



- Harmonic 1
- Harmonic 3
- Harmonic 5
- Harmonic 7
- Harmonic 9
- Harmonic 11
- Harmonic 13
- Harmonic 15
- Harmonic 17
- Harmonic 19
- Harmonic 21



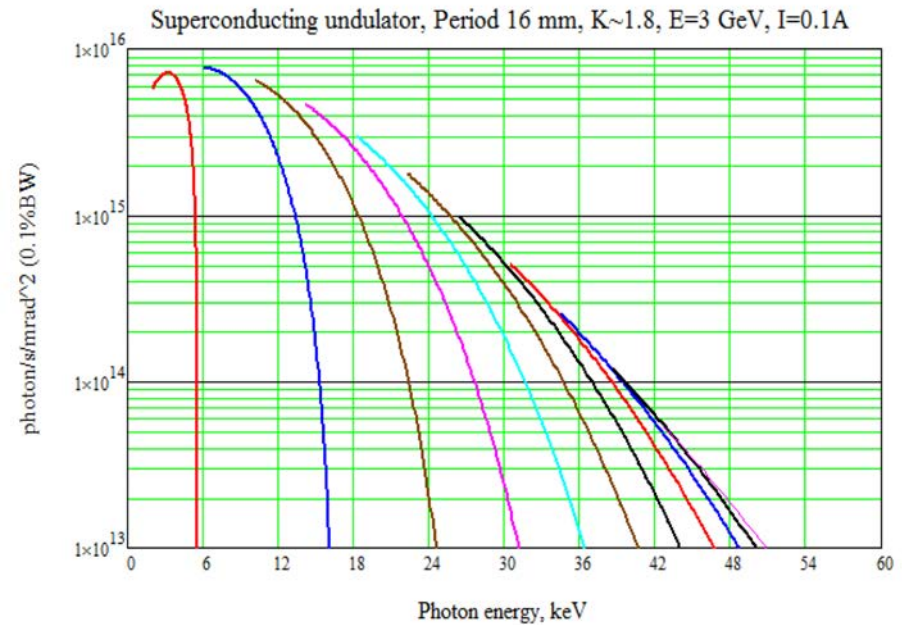
Фазовая ошибка 2°

$$N \sim e^{-n^2 \varphi^2}$$

N-номер гармоники

φ - фазовая ошибка (рад)

21-22 января 2019, НКС по СКИФ



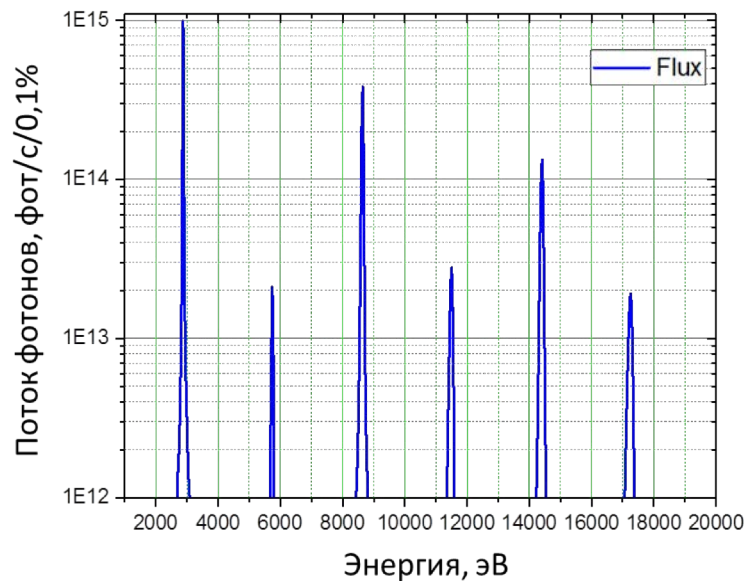
- Harmonic 1
- Harmonic 3
- Harmonic 5
- Harmonic 7
- Harmonic 9
- Harmonic 11
- Harmonic 13
- Harmonic 15
- Harmonic 17
- Harmonic 19
- Harmonic 21



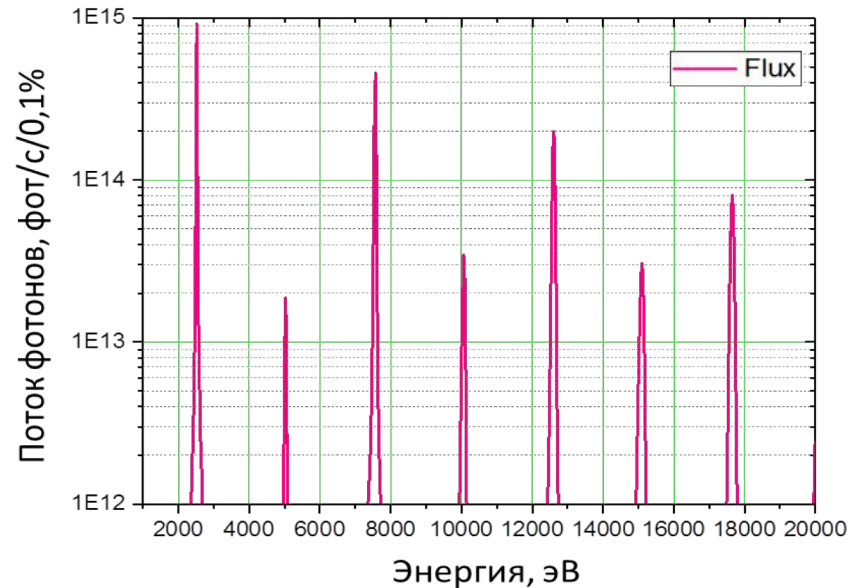
Фазовая ошибка 4°

Параметры СП ондуляторов для СКИФ

Параметр	Значение
Тип 1	
Период, мм	15.6
Полная длина, м	2
Число периодов	128
Межполюсный зазор, мм	8
Внутренний размер вакуумной камеры ШхВ, мм	60х6
Амплитуда магнитного поля, Т	1.2
Параметр отклонения (ондуляторности) К	1.75
Фазовая ошибка, град.	<3
Средняя мощность СИ, кВт	до 10



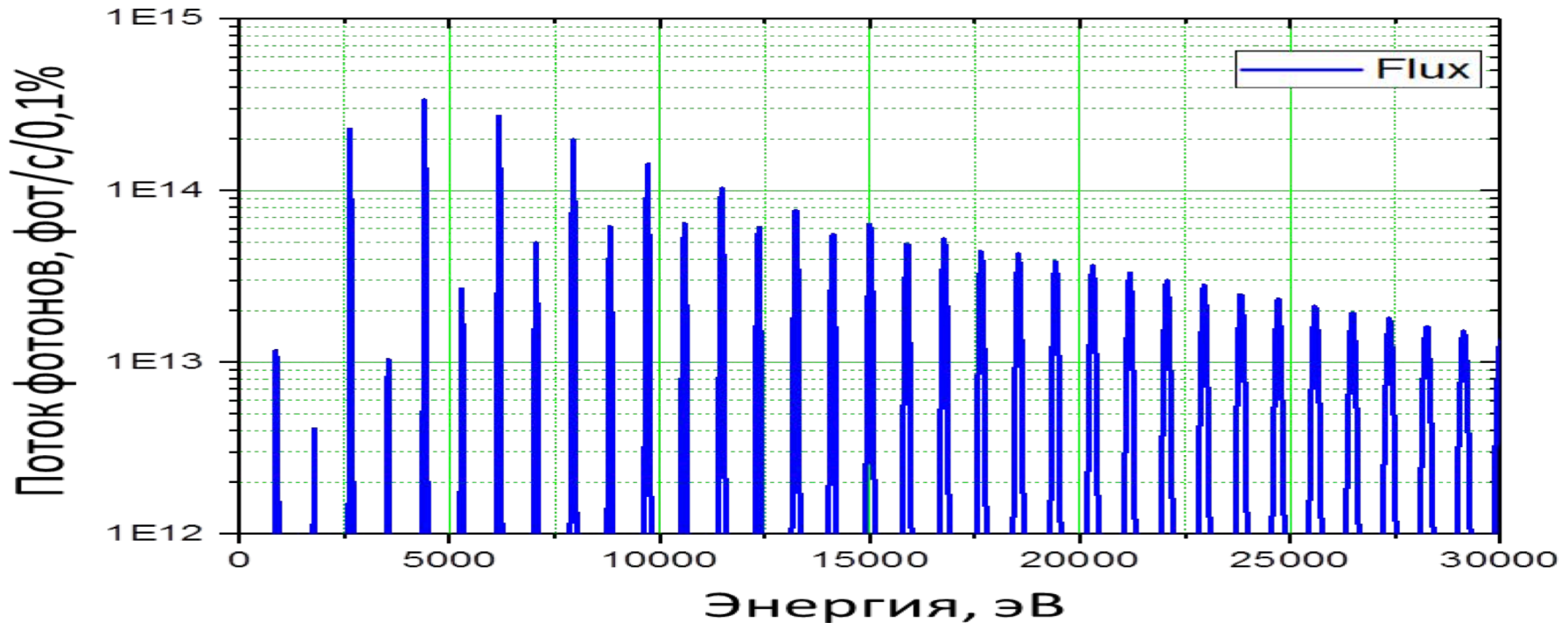
Поток фотонов из СП ондулятора тип 1 на расстоянии 15 м от источника излучения через щель 0,3х0,3 мм. I=400 мА, поле B = 0,92 Тл, оптимизация на рабочую энергию 14,4 кэВ.



Поток фотонов из СП ондулятора тип 1 на расстоянии 15 м от источника излучения через щель 0,3х0,3 мм. Ток I=400 мА, поле B = 1,05 Тл, оптимизация на рабочую энергию 12,6 кэВ.

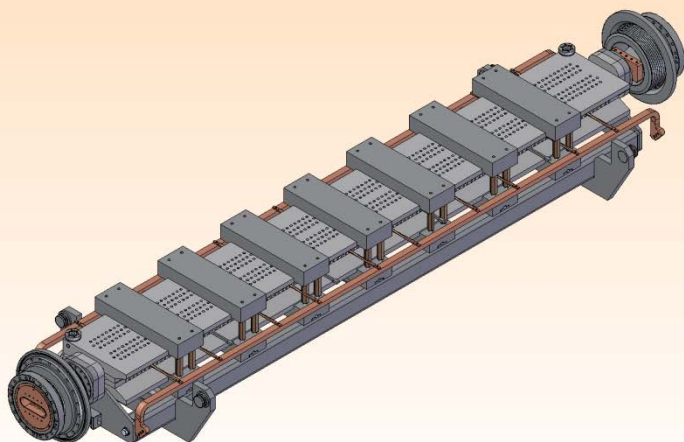
Параметры СП ондуляторов для СКИФ

Тип 2	
Период, мм	18
Полная длина, м	2.3
Число периодов	128
Межполюсный зазор, мм	8
Внутренний размер вакуумной камеры ШхВ, мм	60х6
Амплитуда магнитного поля, Т	1.7
Параметр отклонения (ондуляторности) К	2.85
Фазовая ошибка, град.	<3
Средняя мощность СИ, кВт	до 15

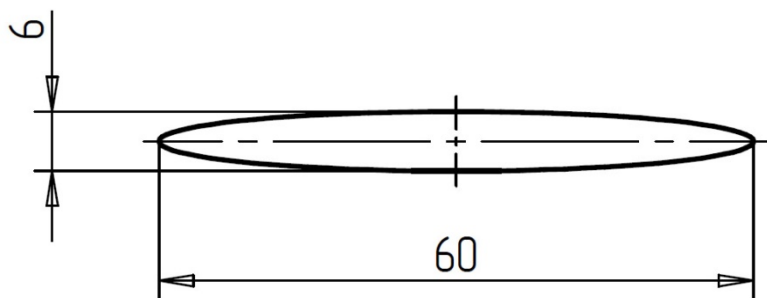
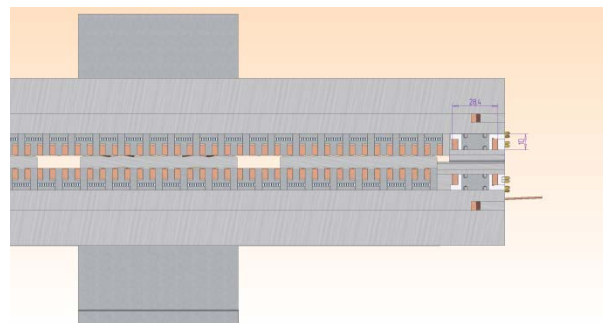
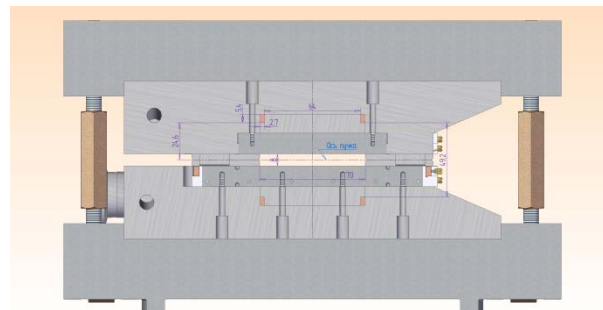


Поток фотонов из СП ондулятора тип 2 на расстоянии 15 м от источника излучения через щель 0,3х0,3 мм. Ток в накопителе 400 мА, поле В = 1,76 Тл

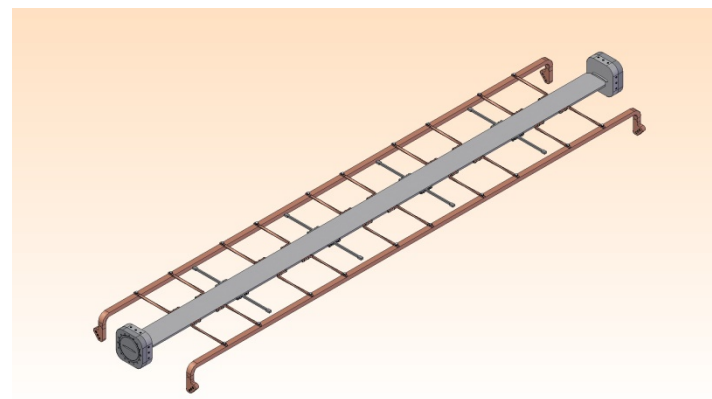
Магнит сверхпроводящего ондулятора



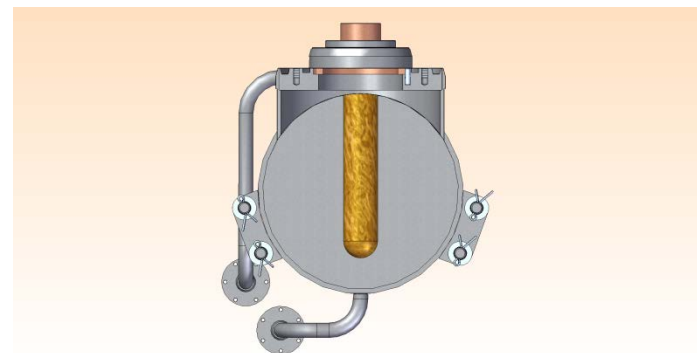
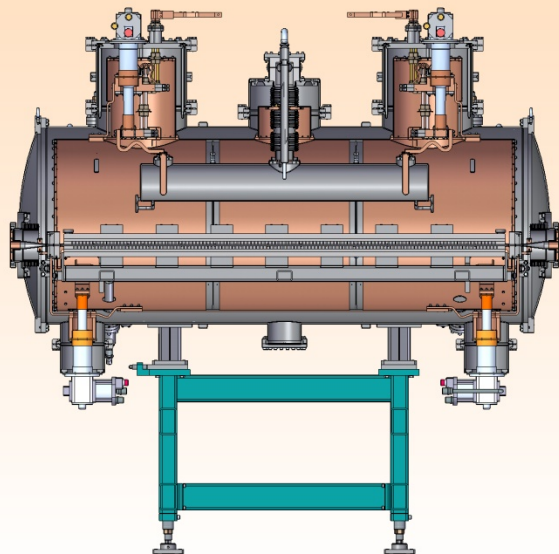
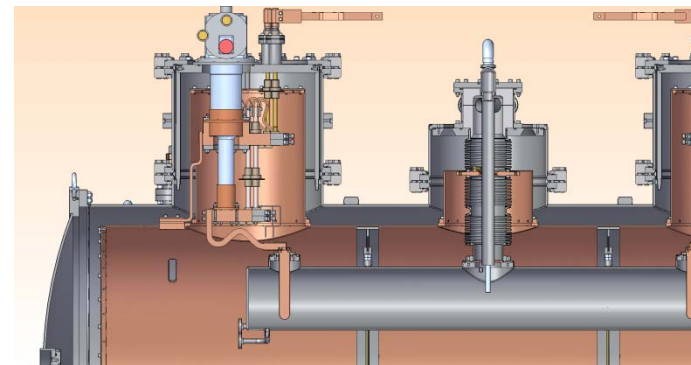
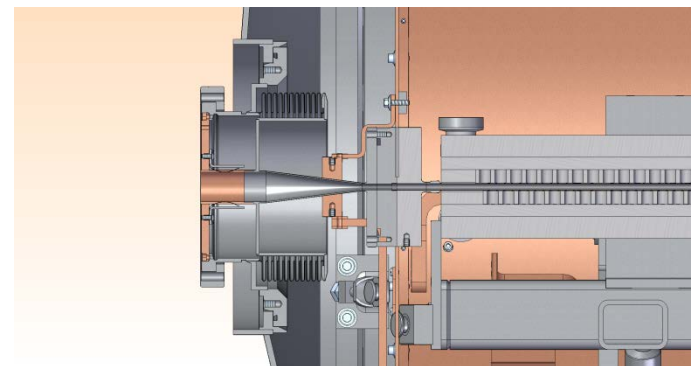
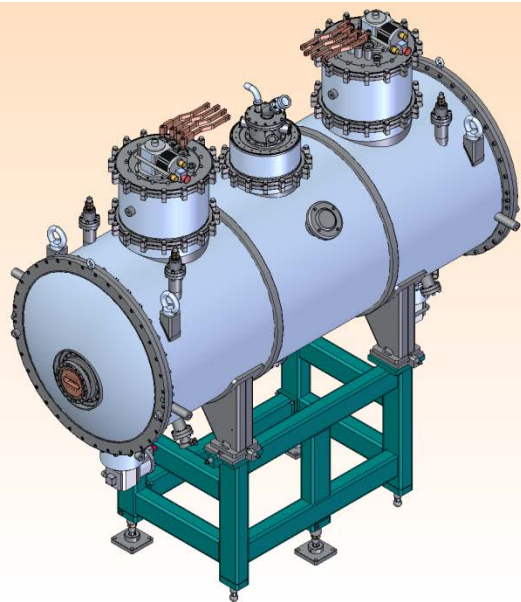
Ондулятор в сборе



Вакуумная камера ондулятора

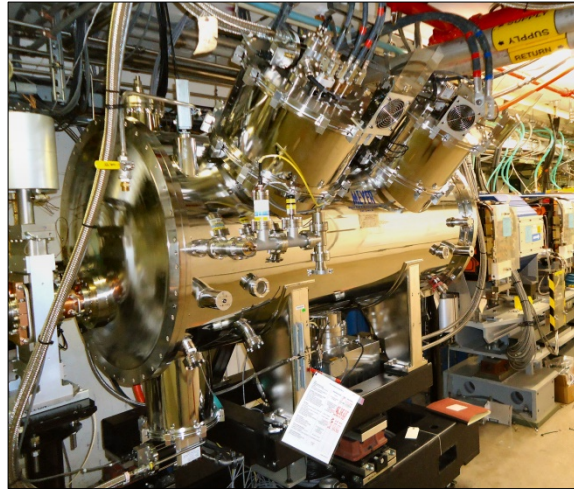


Криогенная система сверхпроводящих ондуляторов

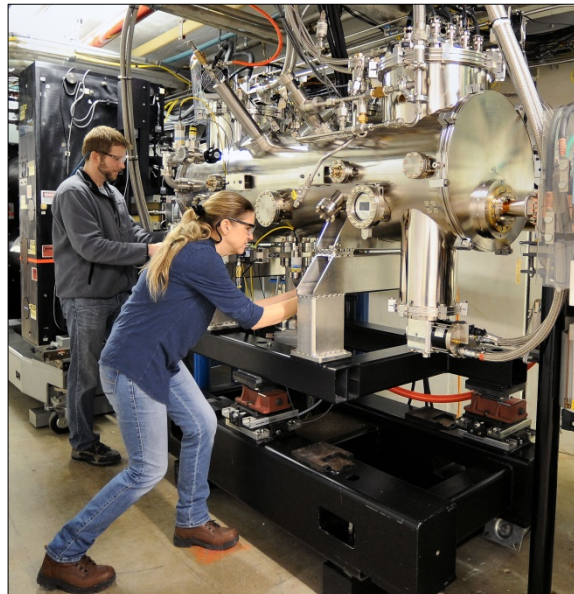


SCUs at the APS

- SCU0:
 - 16-mm period length
 - 0.33-m long magnet
 - Operation: Jan2013-Sep2016
- SCU1(SCU18-1):
 - 18-mm period length
 - 1.1-m long magnet
 - Operation: since May2015
- SCU18-2:
 - 18-mm period length
 - 1.1-m long magnet
 - Operation: since Sep2016.



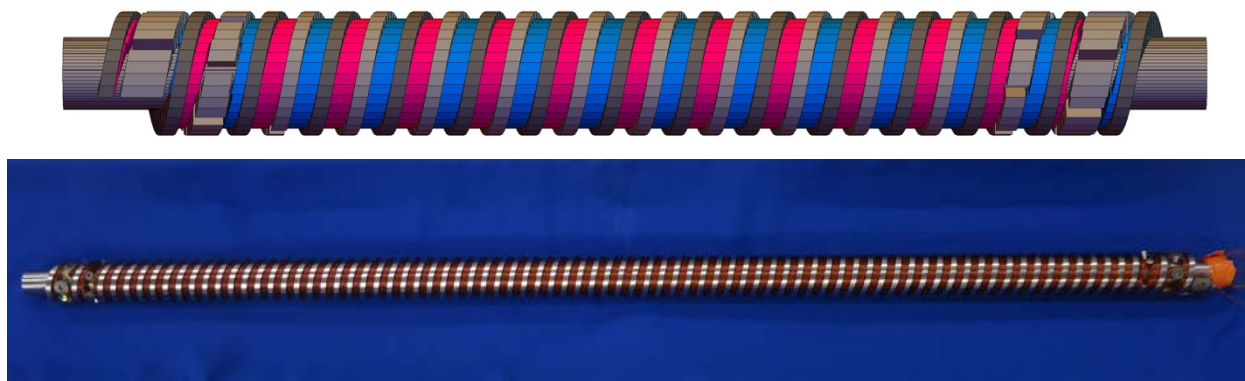
SCU18-1 in Sector 1 of the APS ring.



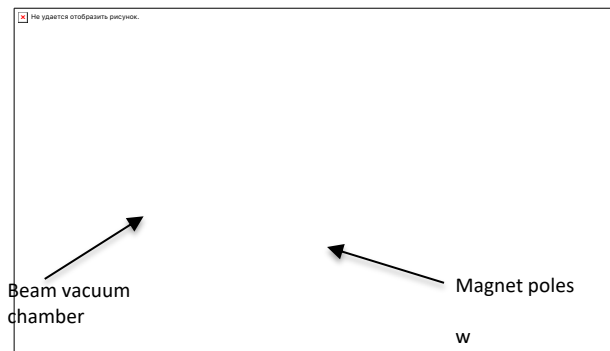
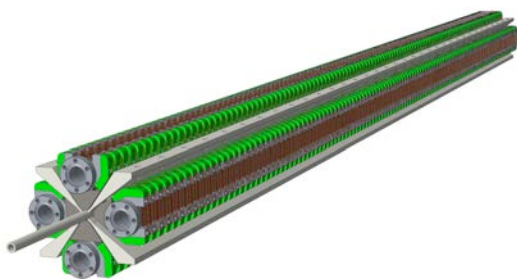
Helical SCU in Sector 7 of the APS ring.

- LCLS R&D SCU:
 - 21-mm period length
 - 1.5-m long magnet
 - Project completed in 2016.
- Helical SCU:
 - 31.5-mm period length
 - 1.2-m long magnet
 - Installed in Dec2017.
 - Operation: since Jan2018

Другие сверхпроводящие устройства для генерации излучения APS



Magnetic design model (top) and picture of the APS HSCU. Currents are running in opposite directions in blue and red coils.



SuperConducting Arbitrary Polarization Emitter-**SCAPE**. Two sets of “planar” undulator magnets are placed around vacuum chamber (APS).

Since 2005 there were several SCUs have been built, installed and used at SR facilities for users experiments. These devices are listed below:

2005-2012: 14 mm period, 100 periods, 0.38 T; Accel Instruments GmbH/KIT, Germany

2014-2015: 15mm period, 100 periods, 0.73 T; Babcock-Noell/KIT, Germany [20]

2013-2016: 16mm period, 20 periods, 0.71 T; APS, USA

2015 – current: 18mm period, 59 periods, 1 T; APS, USA

2016 – current: 18mm period, 59 periods, 1 T; APS, USA

2018 – current: 20mm period, 75 periods, 1.19 T; Bilfinger Noell/KIT, Germany

2018 – current: 31.5mm period, 30 periods, Helical, 0.4 T; APS, USA

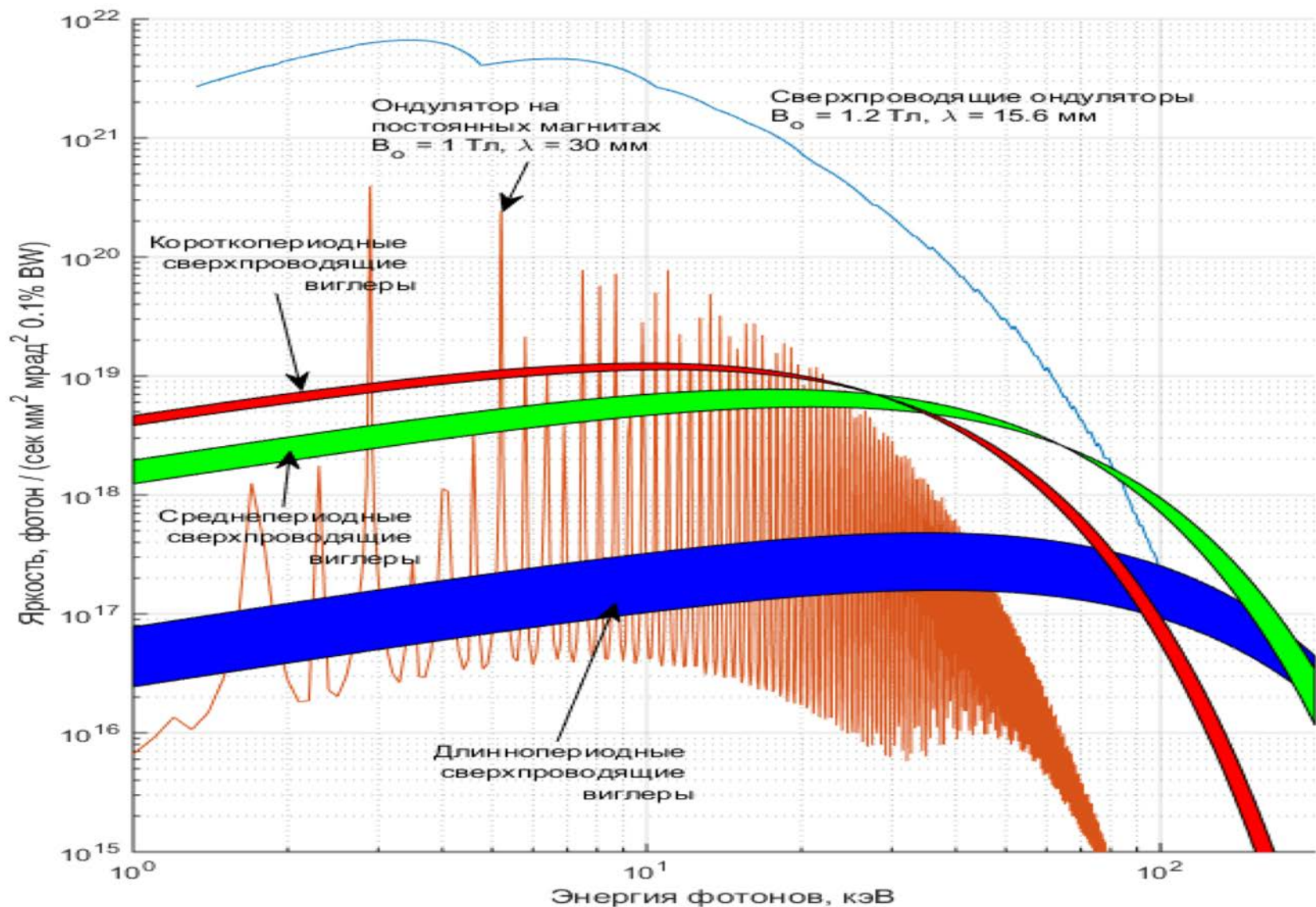
SLAC-ANL FEL SCU prototype

2014-2016: 21mm period, 70 periods, 1.7 T; APS, USA [75]

Другие сверхпроводящие устройства для генерации излучения в ИЯФ

- Сверхпроводящий ондулятор с изменяемым K вдоль ондулятора для уширения спектральной линии излучения до 1 кэВ.
- Изменение магнитного поля в ондуляторе синхронно с монохроматором.
- Универсальный спиральный ондулятор с переключаемой спиральностью. Горизонтальная/вертикальная апертура ~ 1 см.
- Эллиптический ондулятор с широкой горизонтальной апертурой.

Спектральная яркость вставных устройств – генераторов СИ нового источника



Заключение

ИЯФ имеет более чем 40 летний опыт по созданию генераторов синхротронного и ондуляторного излучения:

- опыт создания сверхпроводящих шифтеров и вигглеров с полем до 7.5 Тесла и установки их на накопители с энергией 1.35-1.7 ГэВ (CAMD, BESSY) с успешным решением проблем с устойчивостью динамики пучка. (CAMD – одновременно работают 7 Тесла шифтер и 7.5 Тесла 15 полюсный вигглер, изготовленные в ИЯФ. BESSY – около 20 лет одновременно работали два шифтера 7 Тесла и один 7 Тесла 17 полюсный вигглер).
- около 20 сверхпроводящих источников СИ изготовлены и установлены в различные центры СИ. Для накопителей с энергией 3ГэВ наиболее популярными оказались сверхпроводящие вигглеры с поле до 4.5 Тесла и периодом ~50 мм
- разработаны погружные криостаты для сверхпроводящих вигглеров с нулевым расходом жидкого гелия при долговременной непрерывной работе в условиях ограниченного доступа.
- ИЯФ имеет опыт совместной работы с лабораторией APS по созданию сверхпроводящего ондулятора и криостата с косвенным охлаждением

ИЯФ готов применить все накопленные знания и технологии для создания новых источников СИ в России.

СПАСИБО ЗА ВНИМАНИЕ