



СТАТУС

источника СИ

СКИФ

Е.Б. Левичев

Научная сессия ИЯФ

22 февраля 2019 г.

Авторы доклада

Г.Баранов
А.Богомягков
П.Воблый
А.Журавлев
К.Золотарев
К.Карюкина
Е.Левичев
И.Окунев
С.Синяткин



**СИБИРСКИЙ
КОЛЬЦЕВОЙ
ИСТОЧНИК
ФОТОНОВ**

Исходное ТЗ

- Энергия 3 ГэВ
- Периметр ≤ 480 м
- Горизонтальный эмиттанс ≤ 200 пм
- Поперечная апертура, достаточная для простой, надежной инжекции в горизонтальной плоскости ($A_{x_{inj}} \sim 7$ мм)
- Продольная апертура, достаточная для обеспечения «тушековского» времени жизни в условиях сильного внутрисгусткового рассеяния ($\Delta p/p \geq \sim 3\%$)
- Большое число каналов вывода СИ из
 - Прямолинейных промежутков (СП вигглеры и ондуляторы)
 - Магнитов в большом поле (жесткий рентген)
 - Магнитов с малым полем (мягкий рентген и ультрафиолет)
- Простота и дешевизна конструкции (магнитных элементов). Магниты С-образные, чтобы не замораживаться с выводом СИ
- Инжекция на энергии эксперимента из синхротрона-бустера а la «бустер NSLS II»

Яркость, когерентность, эмиттанс

Яркость СИ:

$$B_{\text{avg}}(\lambda) = \frac{N_{\text{ph}}(\lambda)}{4\pi^2 \Sigma_x(\lambda) \cdot \Sigma_x(\lambda) \cdot (s \cdot \% \text{ BW})}$$

Спектральный поток

$$\Sigma_{x,y} = \sqrt{\sigma_r^2(\lambda) + \sigma_{x,y}^2(e^-)} \cdot \sqrt{\sigma_r'^2(\lambda) + \sigma_{x,y}'^2(e^-)}$$

$$\sigma_{x,y}(e^-) = \sqrt{\beta_{x,y} \varepsilon_{x,y}(e^-)} \quad \sigma'_{x,y}(e^-) = \sqrt{\varepsilon_{x,y}(e^-) / \beta_{x,y}}$$

Эмиттанс электронного пучка

$$\Rightarrow \sigma_{Ix}(\lambda) \sigma_{I\psi}(\lambda) = \frac{\lambda}{4\pi} = \varepsilon_r(\lambda) \quad \text{Diffraction limited emittance for coherent Gaussian photon distribution}$$

Когерентная фракция потока СИ:

$$f_{\text{coh}} = f_{\text{coh}_x} \cdot f_{\text{coh}_y} = \frac{\varepsilon_r(\lambda)}{\Sigma_x} \cdot \frac{\varepsilon_r(\lambda)}{\Sigma_y}$$

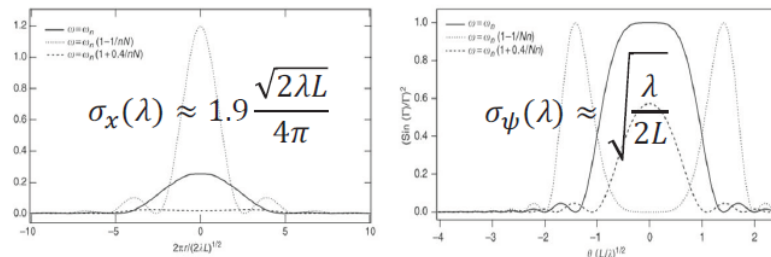
$$\varepsilon_x = \frac{C_q \gamma^2 \langle H(s) \rangle_m}{J_x \rho}$$

← Малая дисперсия
← Малое поле диполей

$$H(s) = \beta_x(s) \eta'_x(s)^2 + 2\alpha_x(s) \eta_x(s) \eta'_x(s) + \frac{1 + \alpha_x(s)}{\beta_x(s)} \eta_x(s)^2$$

Fitting Gaussian profiles to spatial and angular profiles for **undulator radiation** at λ :

P. Elleaume, in *Wigglers, Undulators, and Their Applications*, 2003.

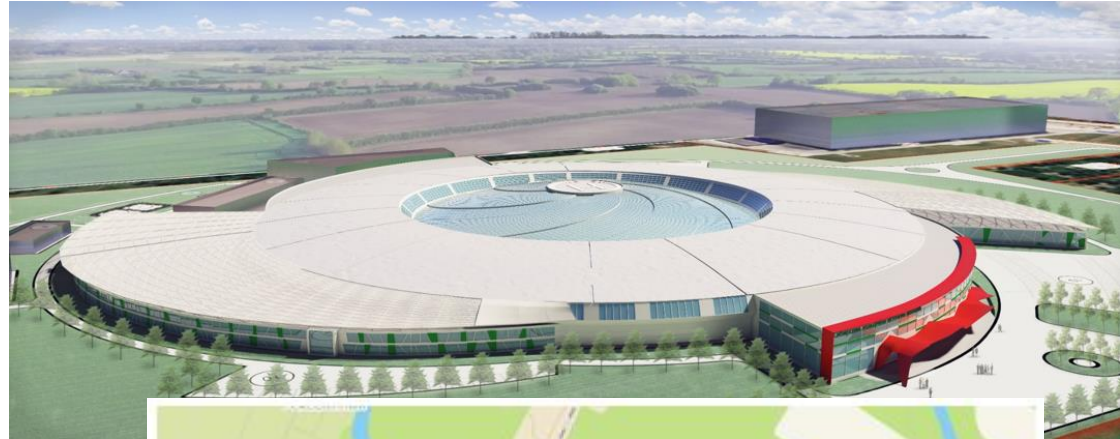
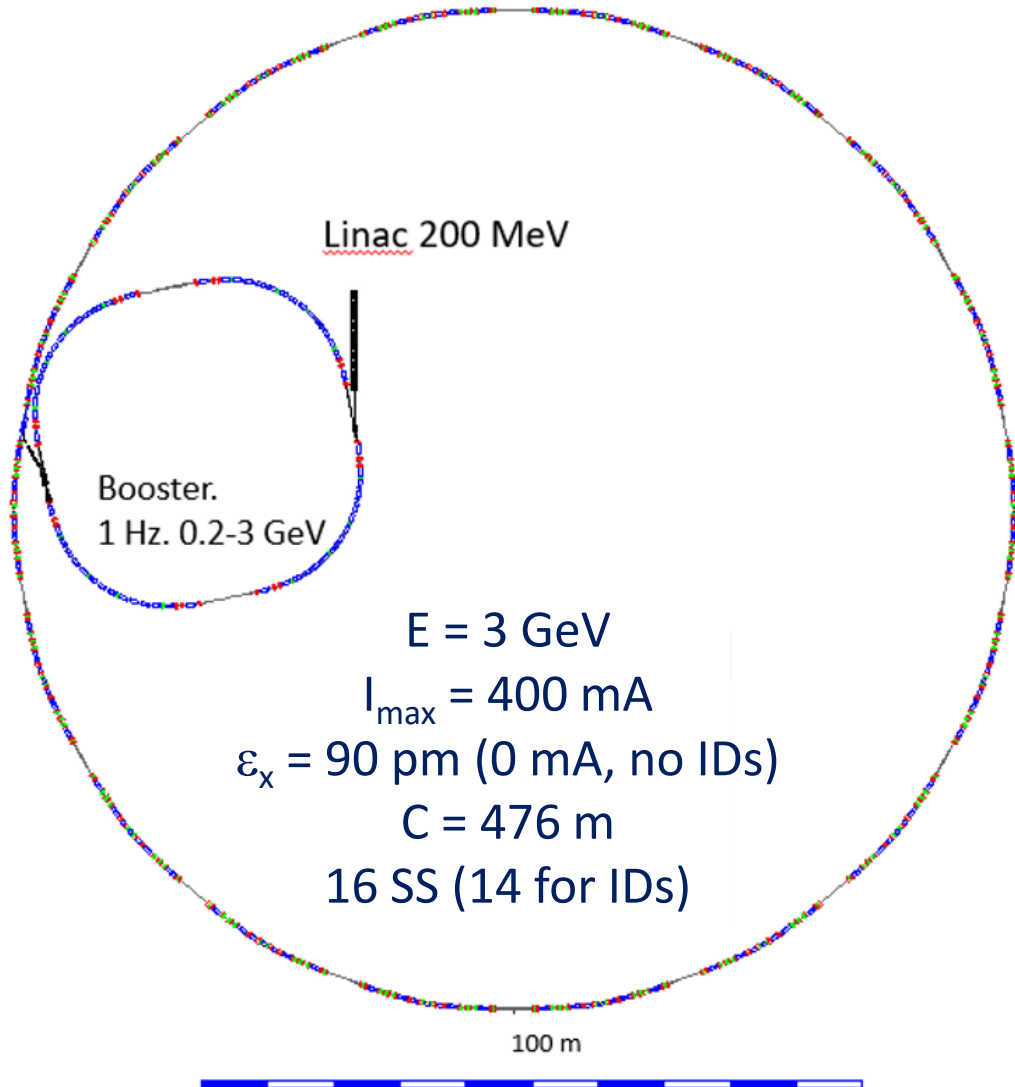


$$\Rightarrow \sigma_x(\lambda) \sigma_{\psi}(\lambda) \approx \frac{\lambda}{2\pi} = \varepsilon_r(\lambda)$$

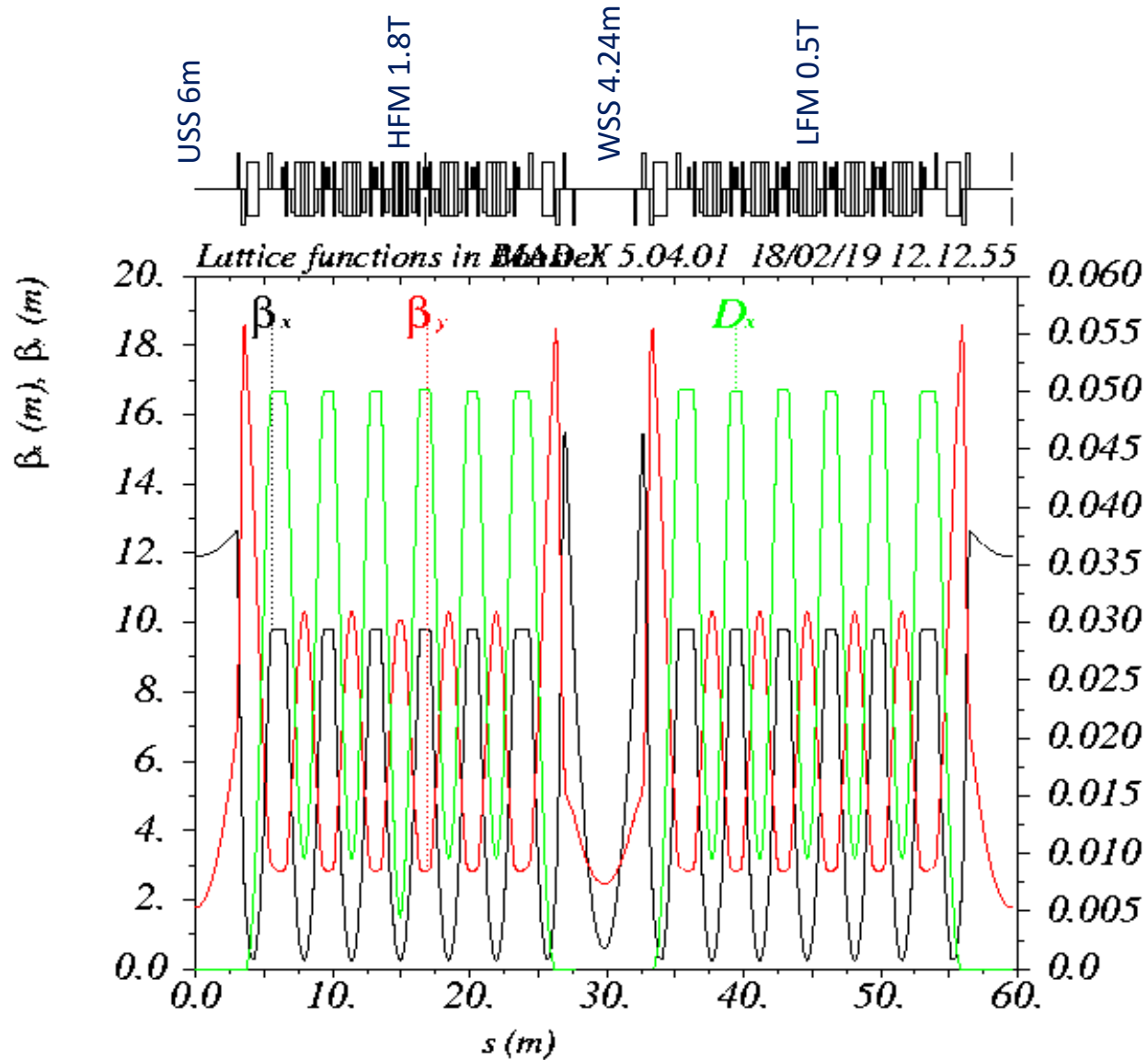
Diffraction limited emittance for undulator radiation from single electron filament

$$\varepsilon_r(1A^\circ) \approx 8 \dots 16 \text{ pm}$$

Конфигурация, размещение



Магнитная структура (1)



7B Achromat

16SS (8WSS+8USS)

1SS Main RF

1SS Injection+3hRF

14SS for IDs

Линак 2856 МГц/8 = 357 МГц

Синхротрон 158.4 м → 158.71 м (189 гармоника)

СКИФ 158.76 м x 3 = 476.14 м (567 гармоника)

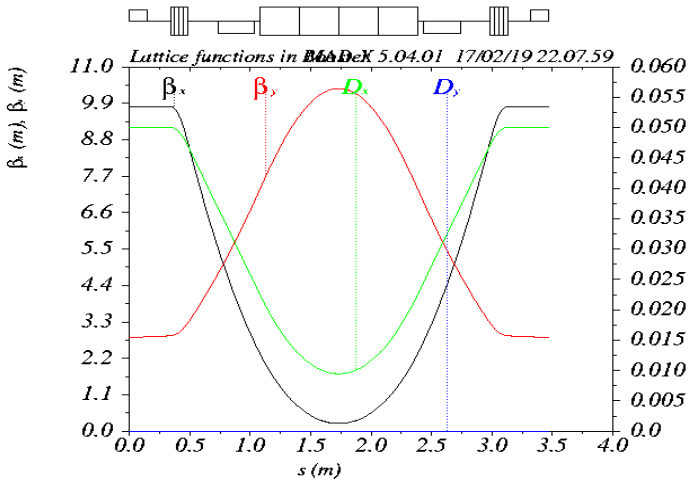
14 каналов из IDs

8 каналов из HFM (1.8 T)

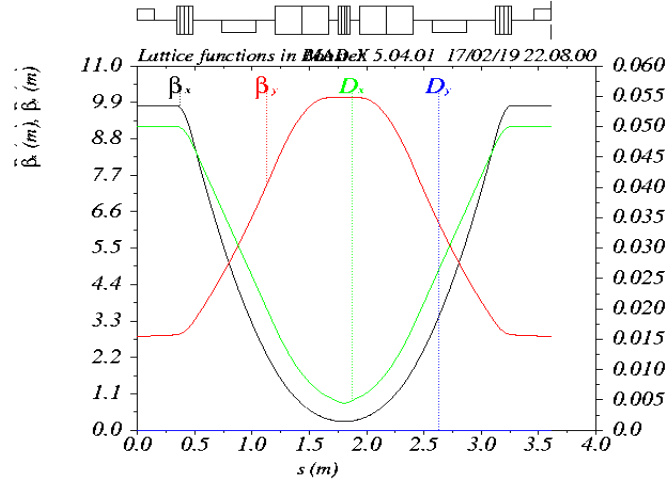
8 каналов из LFM (0.52 T)

Магнитная структура (2)

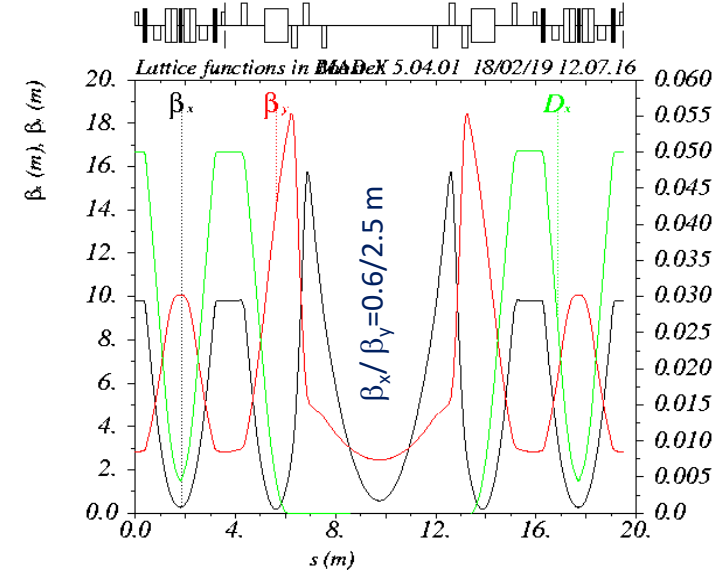
LFM 0.5T



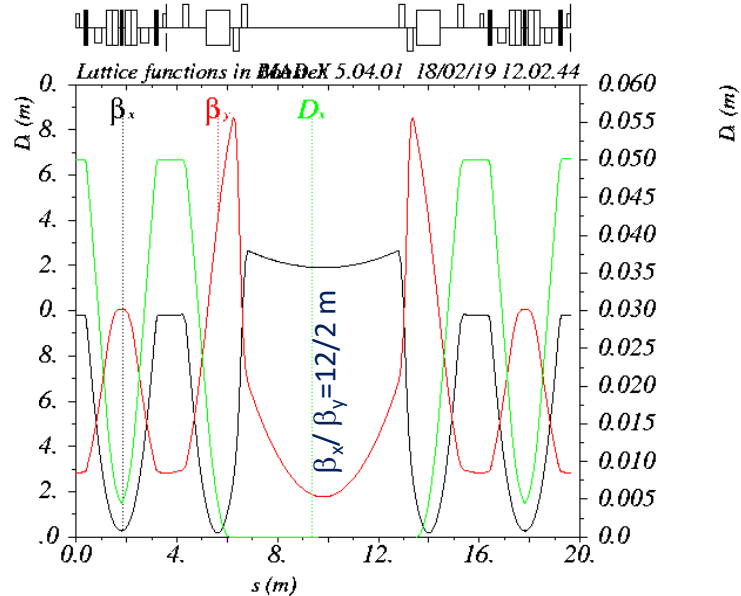
HFM 1.8T



USS 4.24 m



WSS 6 m



SKIF main parameters

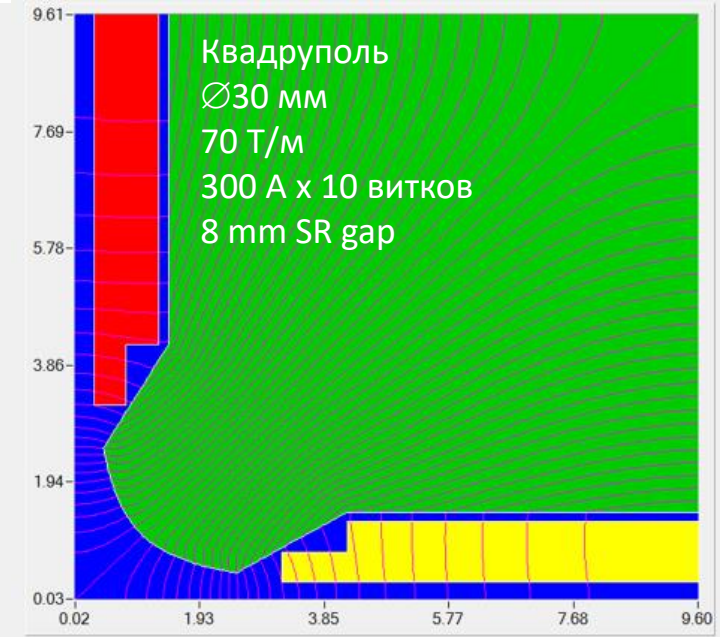
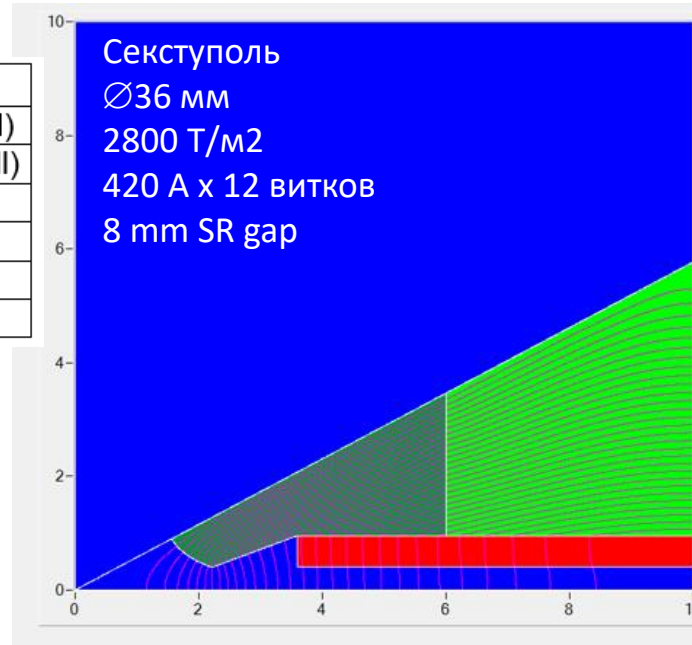
Beam energy	3 GeV
Circumference	476.14 m
Revolution period	1.59 μs
Symmetry	16(8)
Horizontal emittance	90 pm (zero current)
Momentum compaction	1.24×10^{-4}
Energy loss/turn	419 keV
Tune (x/y)	53.781/16.825
Chromaticity (x/y)	-147/-62
Partitions (x/s)	1.94/1.06
Damping times (x/s)	11.7/21.5 ms
Energy spread	8.6×10^{-4}
RF freq/harm number	357/567
RF voltage	742 kV
RF acceptance	2.5%
Synchrotron tune	1.51×10^{-3}
Bunch length	5.5 mm
Straight sections	8×6 m 8×4.24 m 2 for RF and injection 14 for IDs

Магниты

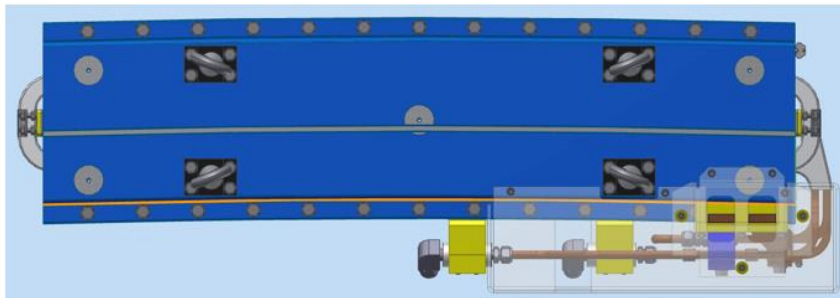
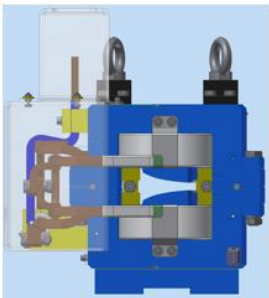
Name	N	L, m	R, m	θ , mrad	B, T	G, T/m	Comment
BD	144	0.14	60.03	-2.365	-0.166	55.477	Reverse bend (LFM cell)
BDI	16	0.14	27.15	-5.23	-0.368	52.460	Reverse bend (HFM cell)
BM0	32	0.93	24.65	37.874	0.406	-2.810	Dispersion suppressor
BF	72	1.3	19.07	68.175	0.524	-7.807	LFM (regular)
BFI	16	0.47	16.82	27.945	0.595	-10.279	LFM (HFM cell)
BI	8	0.1	5.552	18.012	1.801		HFM

Name	N	L, m	G, T/m
QM14	16	0.2	5.04
QM01	32	0.2	40.45
QM12	16	0.25	48.18
QM02	16	0.25	58.49
QM03	16	0.25	64.85
QM13	16	0.25	65.67

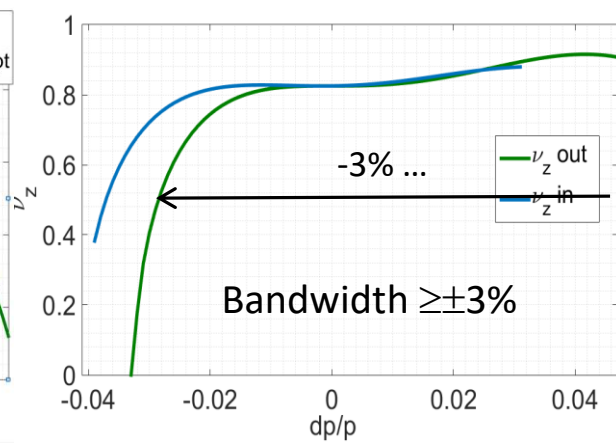
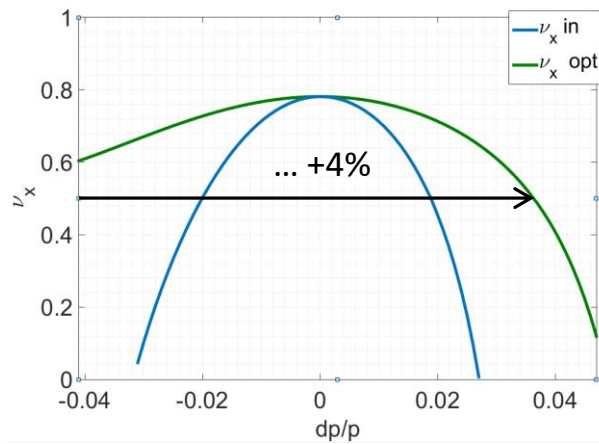
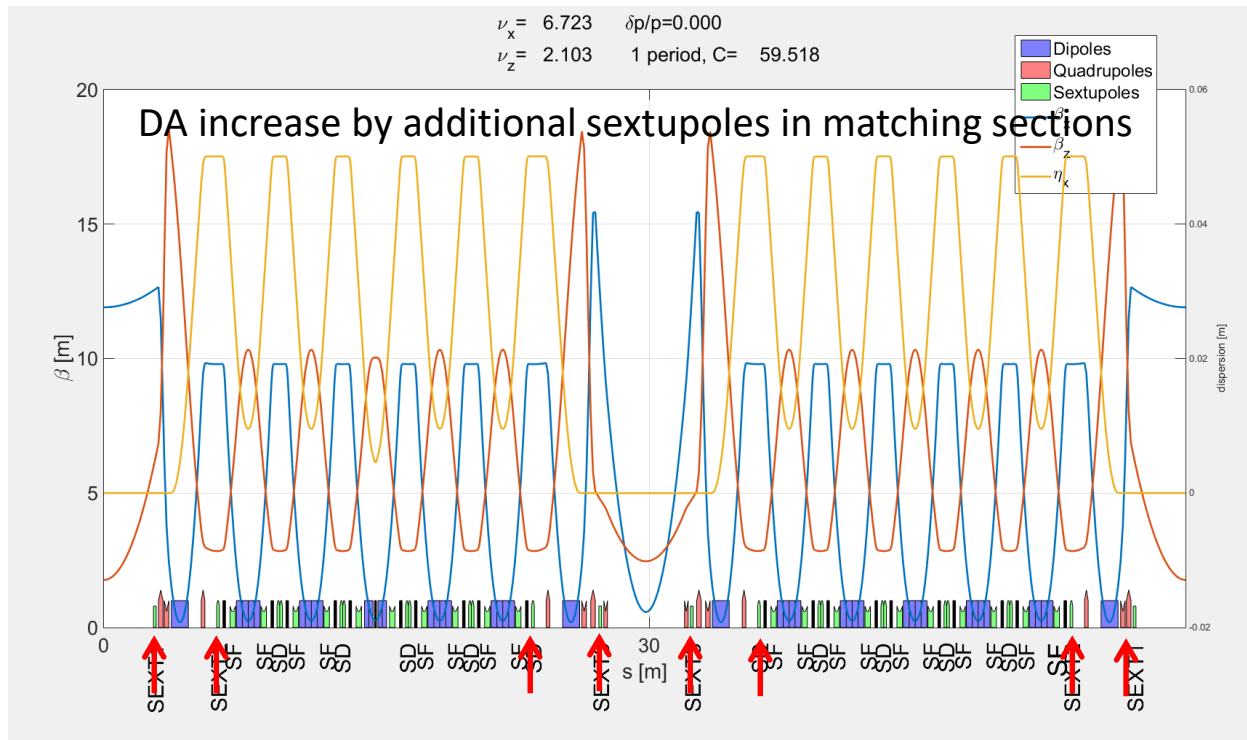
Name	N	L, m	S, T/m ²
SF	160	0.3	1995.0
SD	64	0.3	2616.1
SD	32	0.15	2616.1



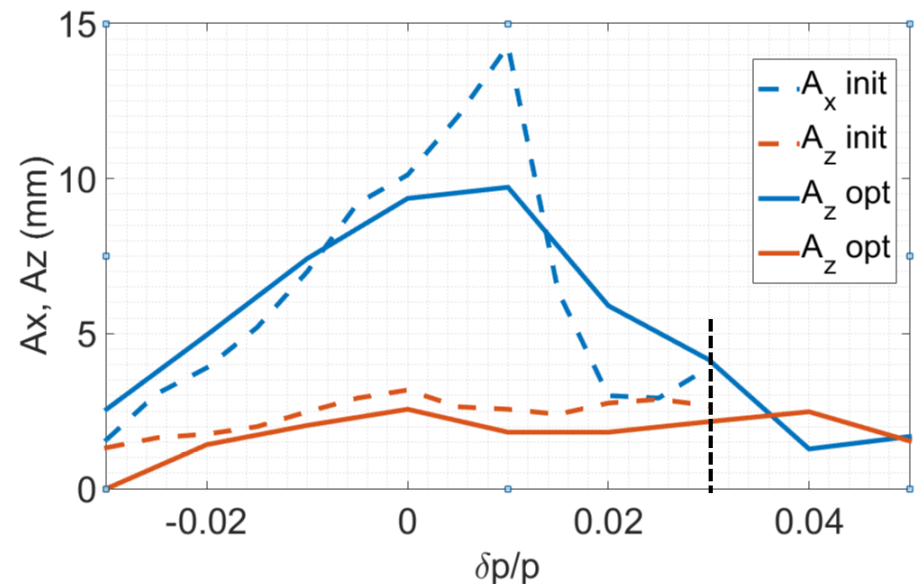
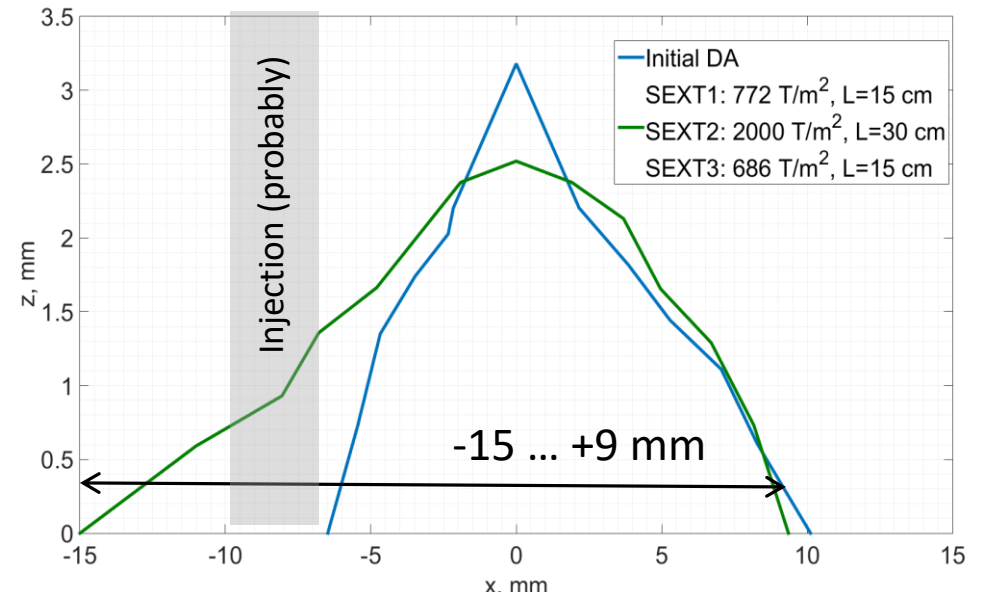
Магнит бустера NSLS II – аналог магнита для «СКИФ»



Динамическая апертура (1)

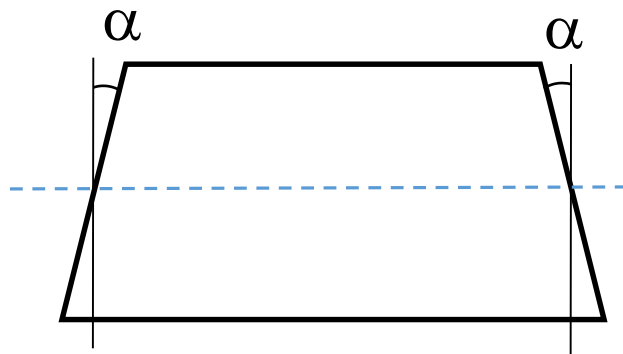


Preliminary...



Динамическая апертура (2)

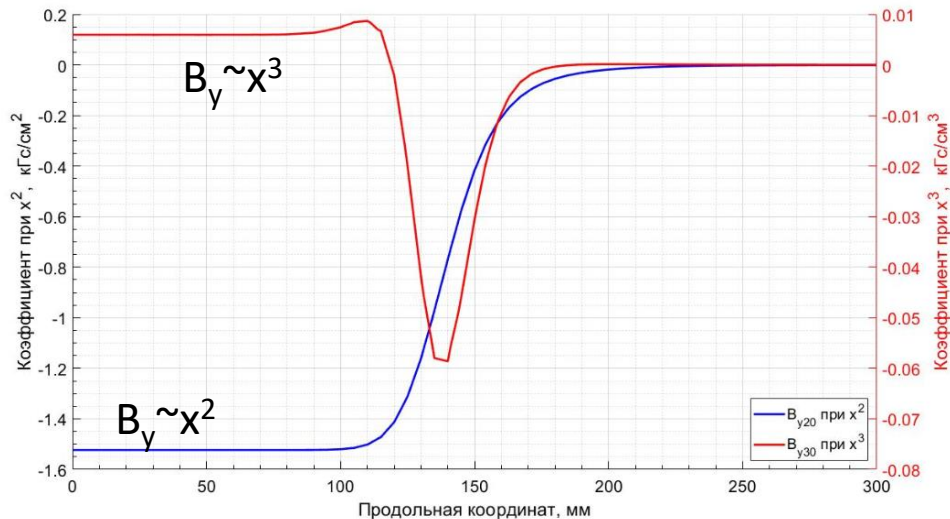
Предложен оригинальный метод увеличения динамической апертуры краевыми кубическими полями хроматических секступольных линз (просто, компактно, экономично, эффективно)



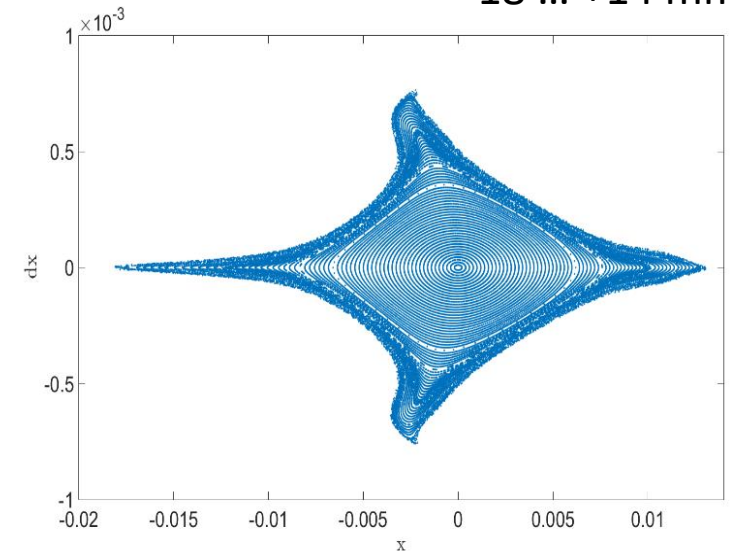
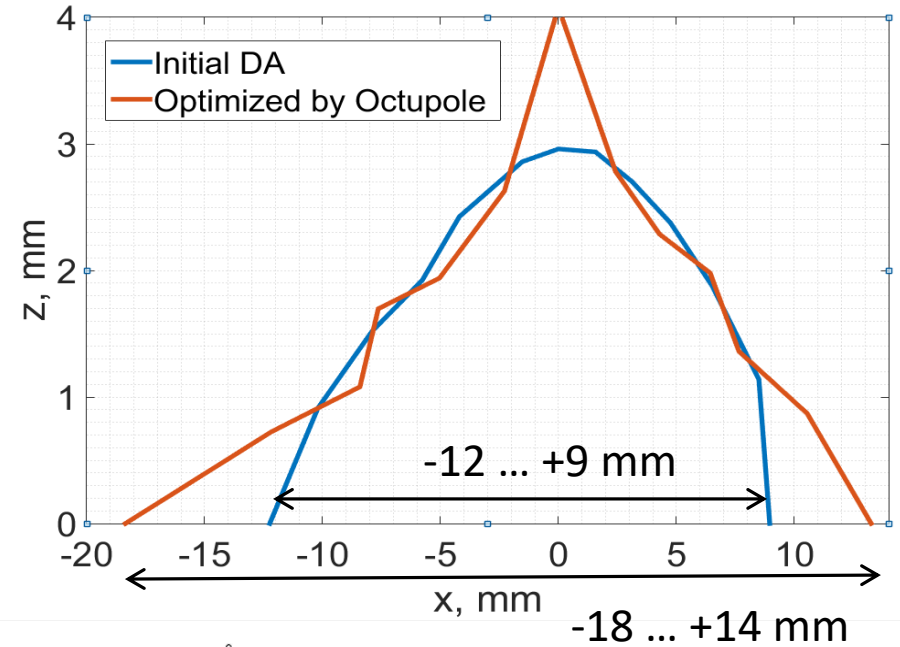
$$(B''''L) = -2B'' \tan \alpha$$

$$\Delta y' = \frac{1}{6} \frac{B''''L}{B\rho} (3x^2y - y^3)$$

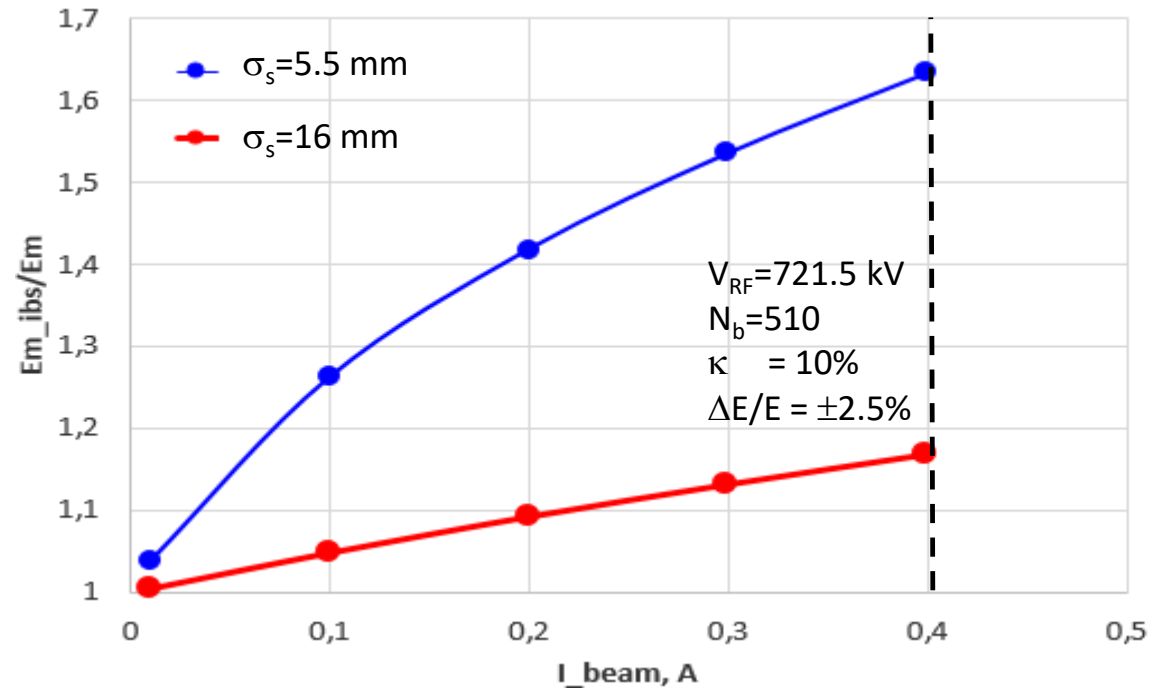
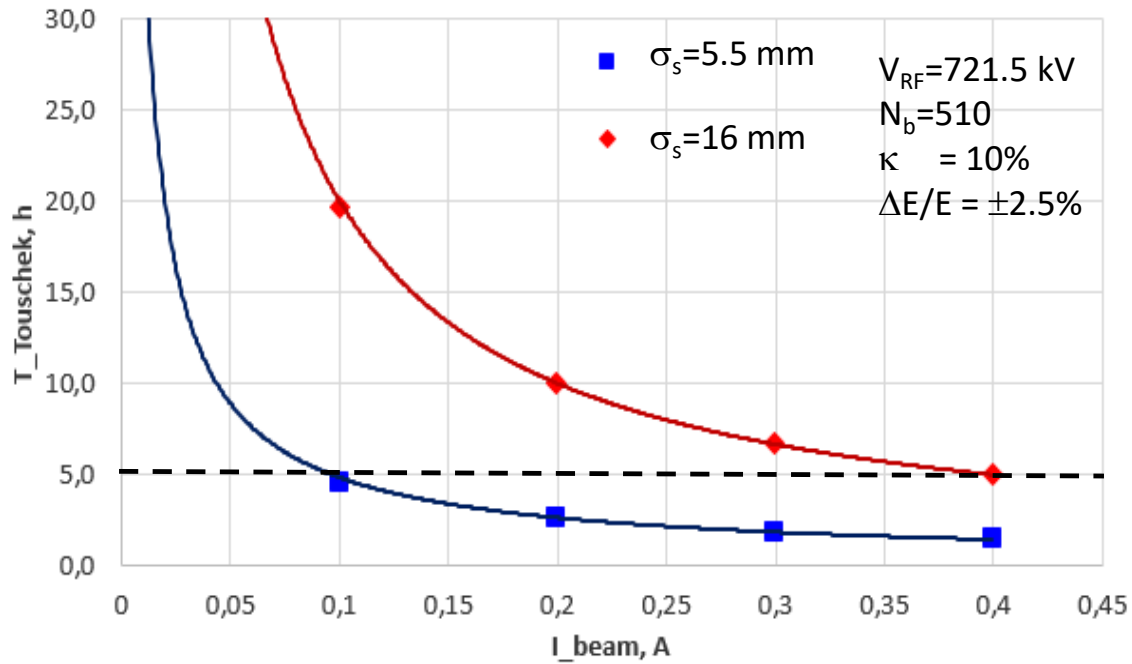
$$\Delta x' = -\frac{1}{6} \frac{B''''L}{B\rho} (x^3 - 3xy^2)$$



Торцы хроматических секступолей срезаны под углом $\approx 20^\circ$



Внутрисгустковое рассеяние (1)



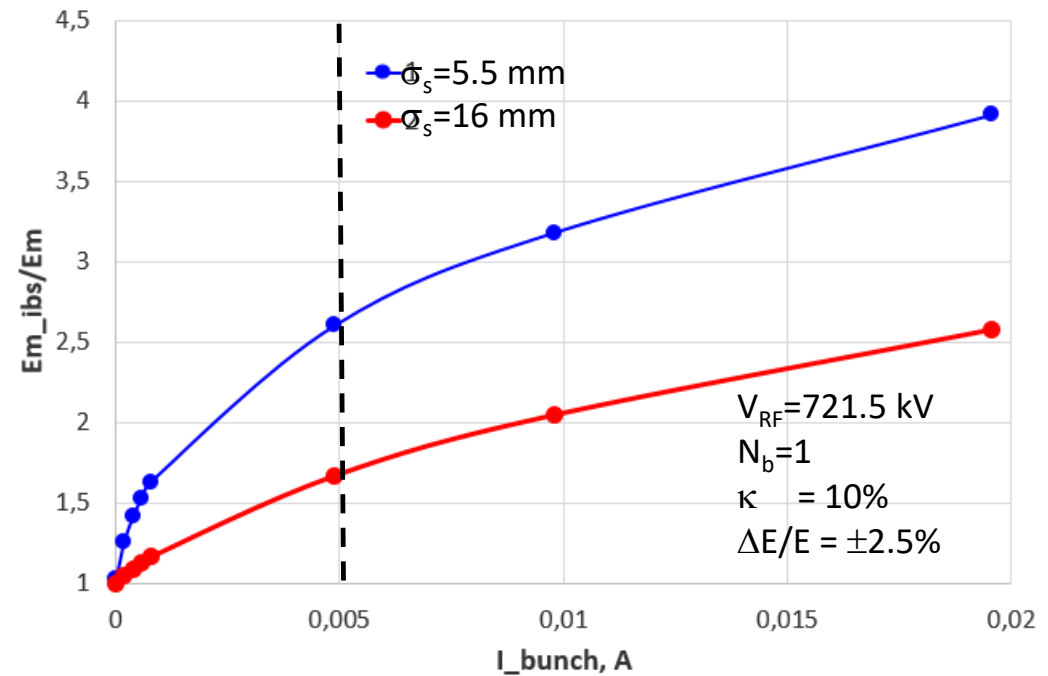
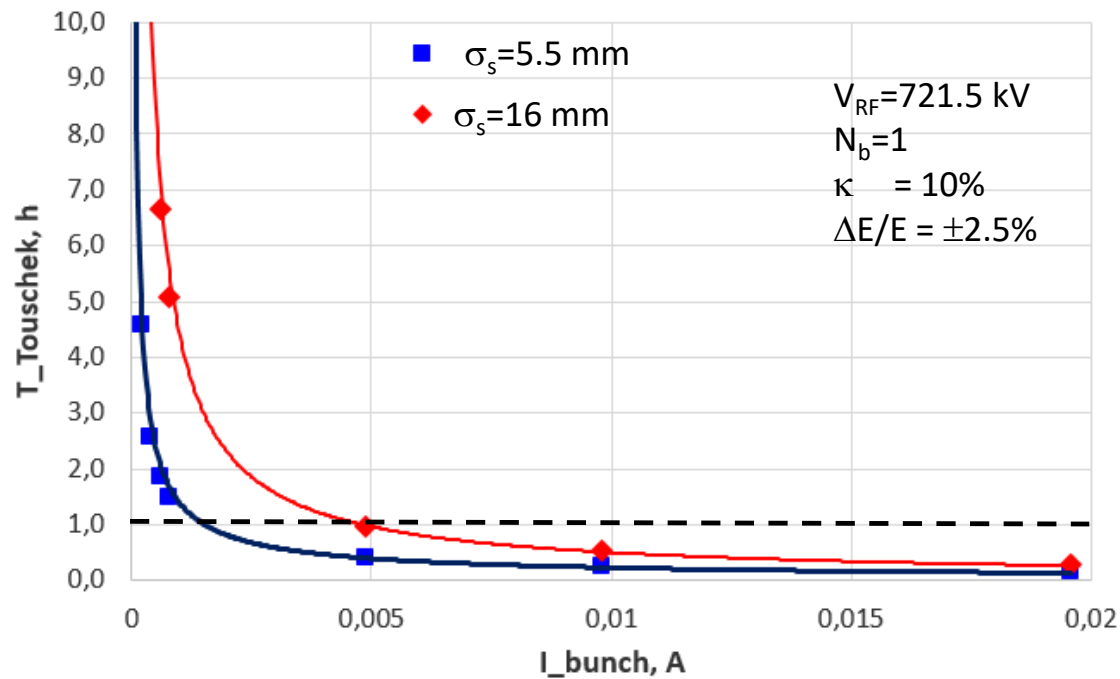
Многосгустковый режим (510 сгустков из 567).

Ток 400 мА (0.783 мА/сгусток, 7.77×10^9 е/сгусток).

Бетатронная связь 10% (вертикальный эмиттанс \approx дифракционному для 1 Å)

При 3-х кратном удлинении сгустка 3-ей гармоникой ВЧ «тушековское» время жизни 5 час и увеличение горизонтального эмиттанса 83 пм \rightarrow 96 пм (≈ 1.17 раза). Без удлинения – 1.5 часа, 135 пм (≈ 1.63 раза) (с учетом IBS, $\sigma_{\text{sibs}} = 6.4$ мм).

Внутрисгустковое рассеяние (2)



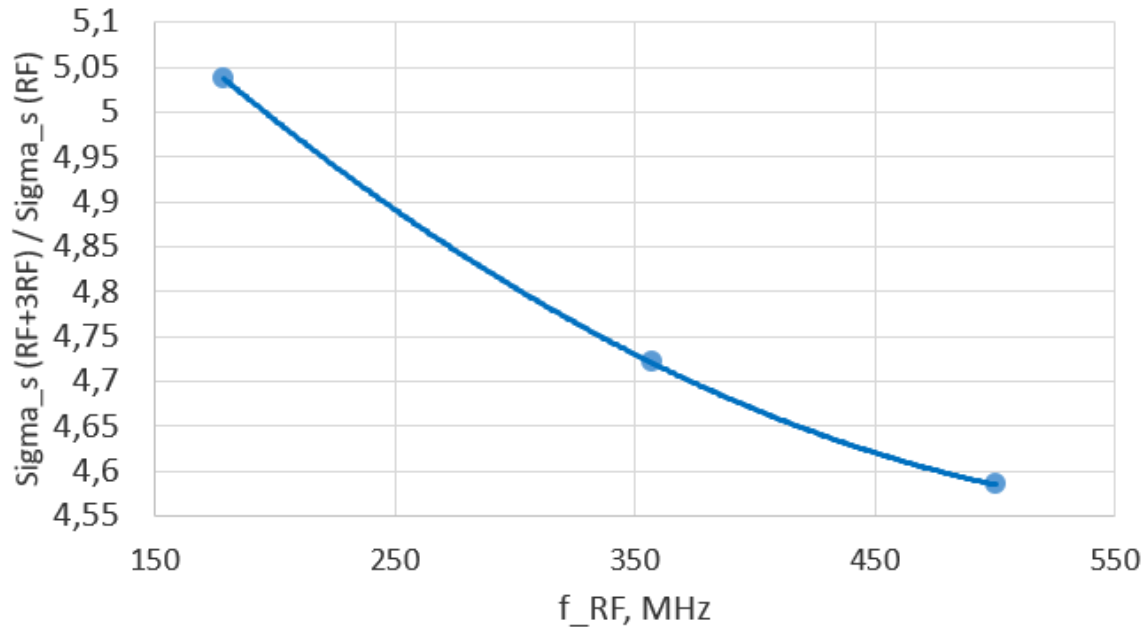
Односгустковый режим (5 мА/сгусток)

Бетатронная связь 10% (вертикальный эмиттанс \approx дифракционному для 1 Å)

При 3-х кратном удлинении сгустка 3-ей гармоникой ВЧ «тушековское» время жизни 1 час и увеличение горизонтального эмиттанса 83 пм \rightarrow 138 пм (≈ 1.67 раза). Без удлинения – 0.4 часа, 215 пм (≈ 2.6 раза) (с учетом IBS, $\sigma_{\text{sibs}} = 9$ мм). Для 15 сгустков ток 75 мА.

Внутрисгустковое рассеяние и частота ВЧ

Выбор частоты ускоряющей ВЧ системы с точки зрения улучшения ситуации с внутрисгустковым рассеянием. Казалось бы, чем меньше частота ВЧ, тем длиннее сгусток и тем лучше. Однако на самом деле...



(Предыдущая версия ESRF-like)

Вопрос: как нужно удлинить пучок для трех частот ВЧ, чтобы выдержать зафиксированные параметры?

E (GeV)	3 GeV		
C (m)	477 m		
I (mA)	400		
Coupling (%)	5		
$\Delta E/E$ (%)	1.9		
ϵ_{xIBS} (pm)	200 (190@0 mA)		
$\tau_{Touschek}$ (h)	5		
ω_{RF} (MHz)	178	357	500
N_{bunch}	255	511	716
I_{bunch} (mA)	1.57	0.783	0.559
$N_e/bunch \times 10^9$	15.6	7.8	5.6
V_{RF} (kV)	478	605	700
$v_s \times 10^3$	1.2	2	2.6
σ_{s0} (mm)	10	6	5
σ_{s3h} (mm)	50	28	20
Elongation	5	4.7	4.6

Fixed

Вигглер (1)

Оценено влияние вигглера с параметрами:

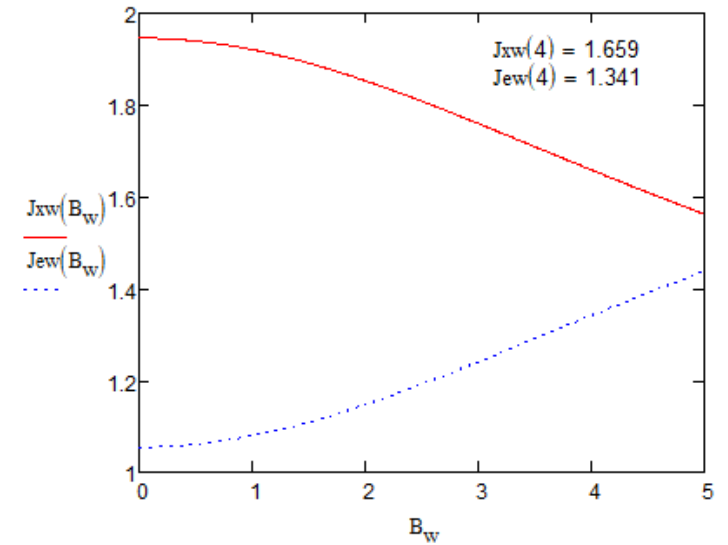
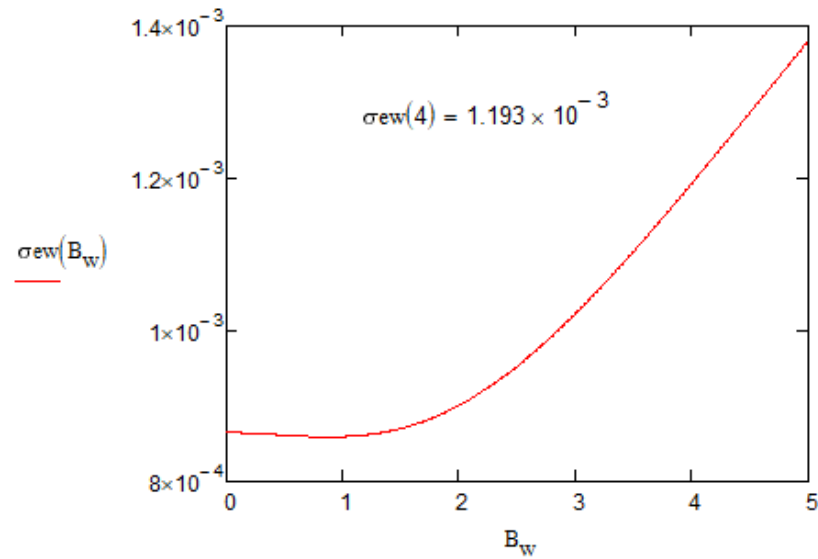
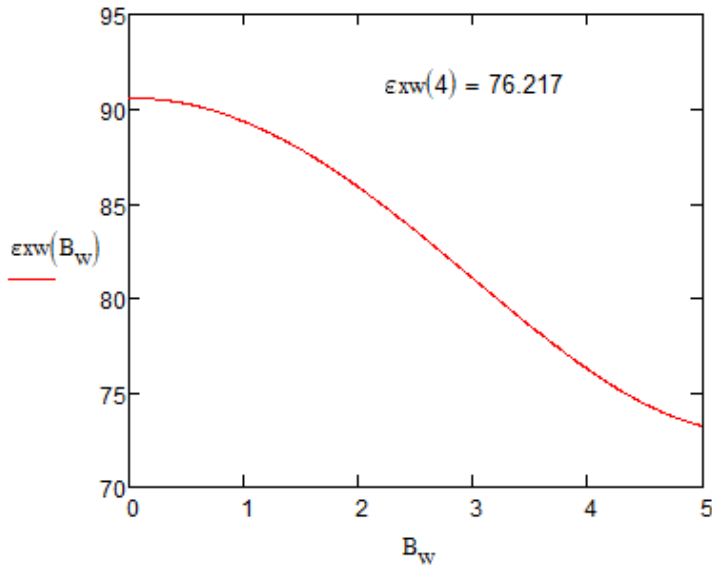
1 вигглер:

90 пм → 76 пм

2 вигглера:

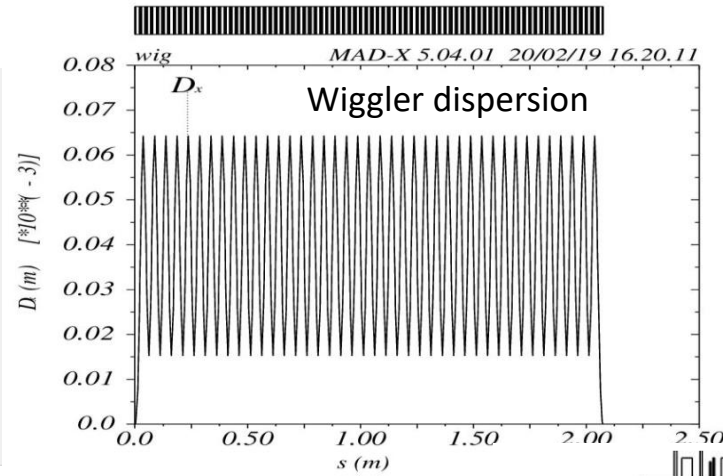
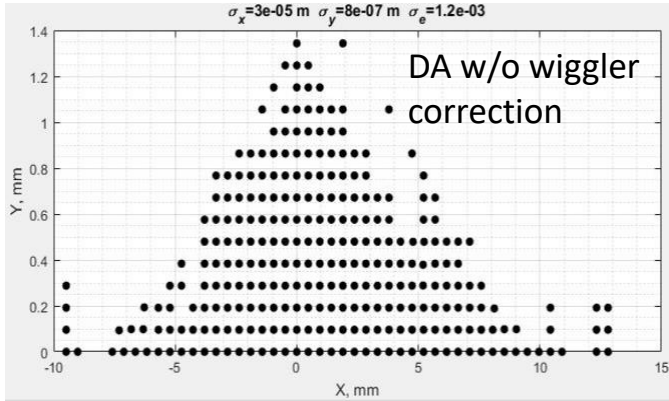
90 пм → 65 пм

$\lambda=5$ см $B = 4$ Т $N_{\text{per}}=20$ $L = 2$ м



	Δv_y	ε_{xw} (pm)	J_x/J_e	σ_e/E
Bare lattice	0	90	1.94/1.06	8.6×10^{-4}
Simulation	0.013	76	1.6/1.4	1.21×10^{-3}
Theory	0.013	76	1.6/1.4	1.19×10^{-3}

Вигглер (2)



$\lambda = 5 \text{ cm}$ $B = 4 \text{ T}$ $N_{\text{per}} = 20$ $L = 2 \text{ m}$

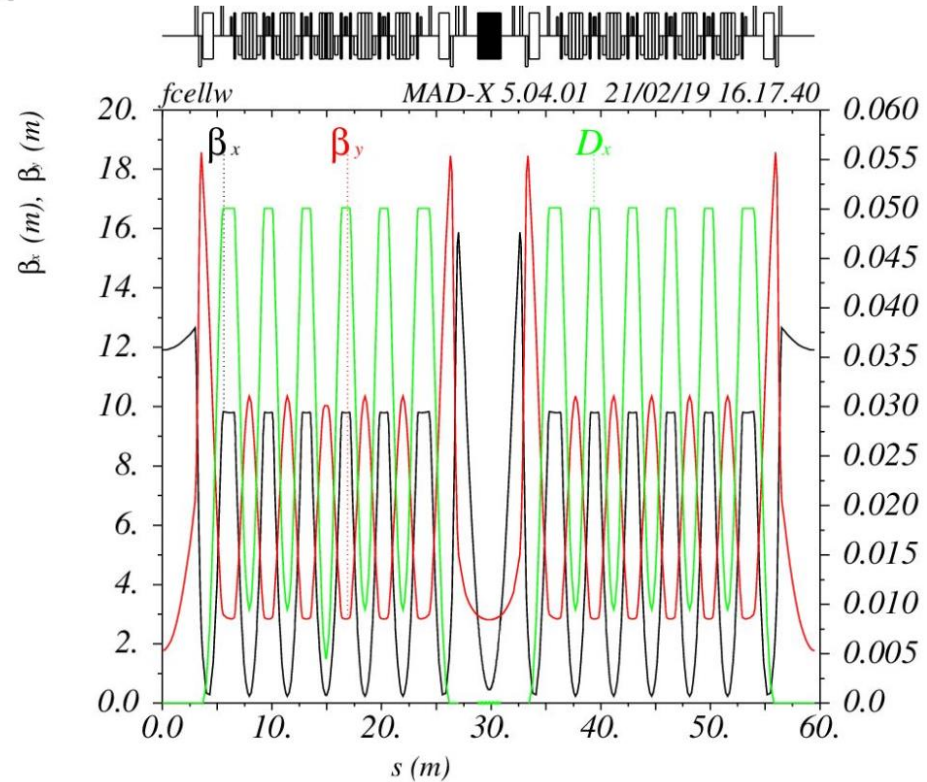
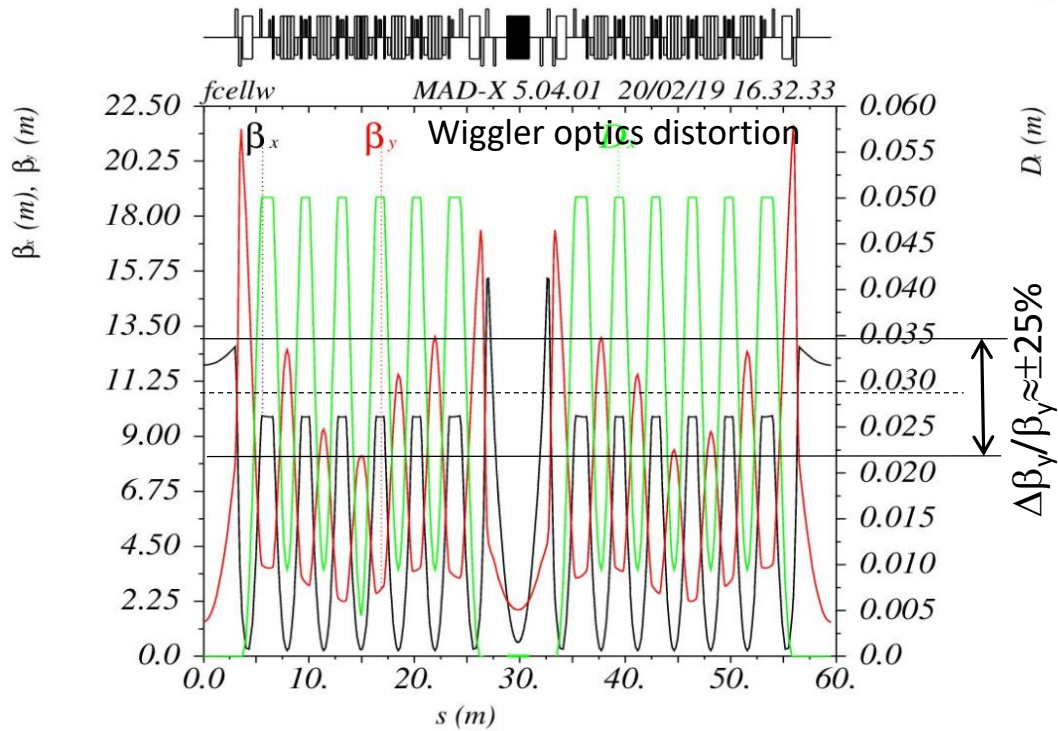
Локальная коррекция (только триплетом)

$K1_{\text{qm12}} -4.8147 \rightarrow -4.7703 \text{ m}^{-2}$

$K1_{\text{qm13}} +6.5620 \rightarrow +5.9983 \text{ m}^{-2}$

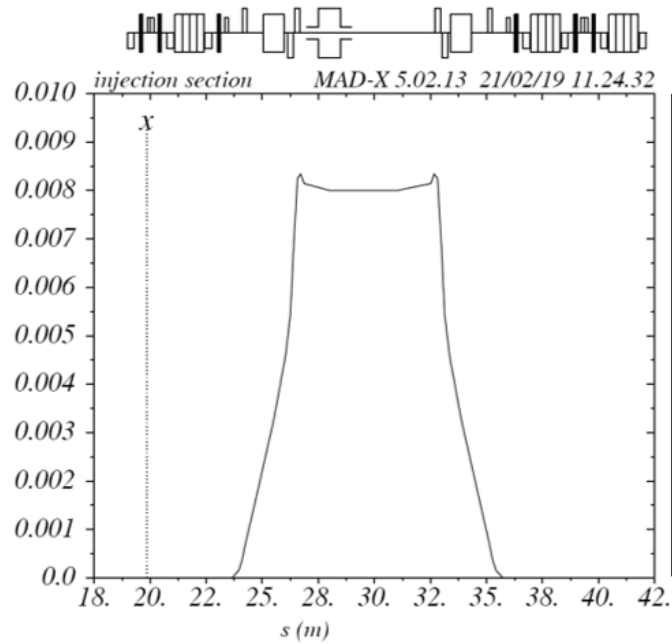
$K1_{\text{qm12}} -0.5036 \rightarrow +0.5574 \text{ m}^{-2}$

$\Delta v_x = 0.01$ $\Delta v_y = 0.001$

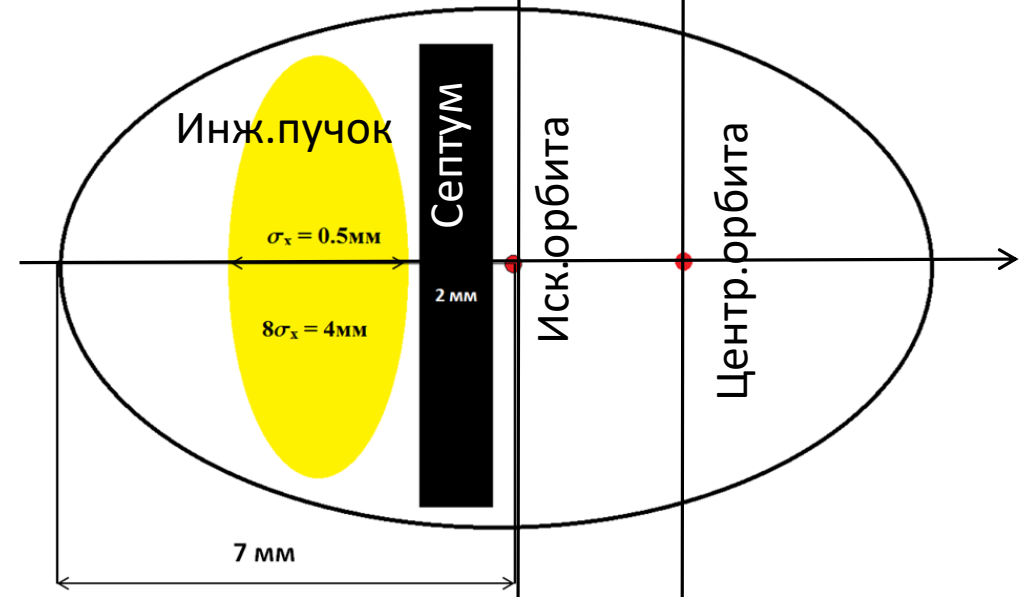
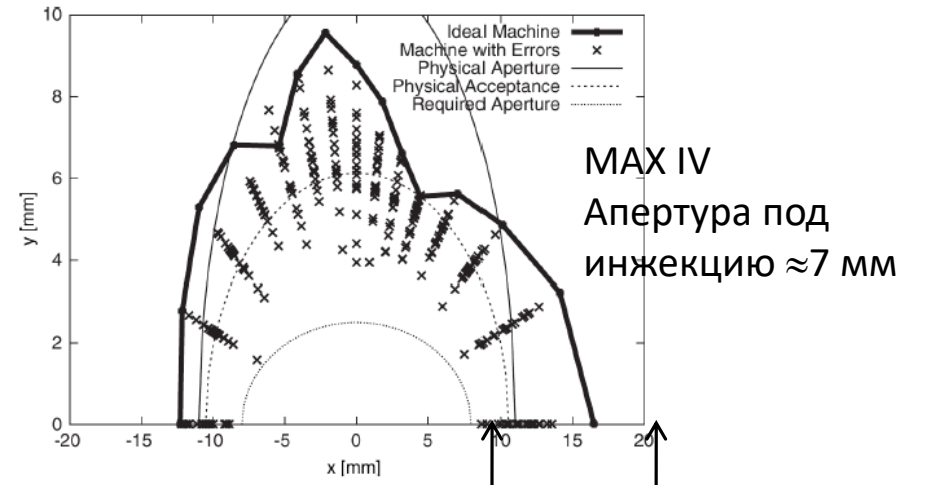


Инжекция

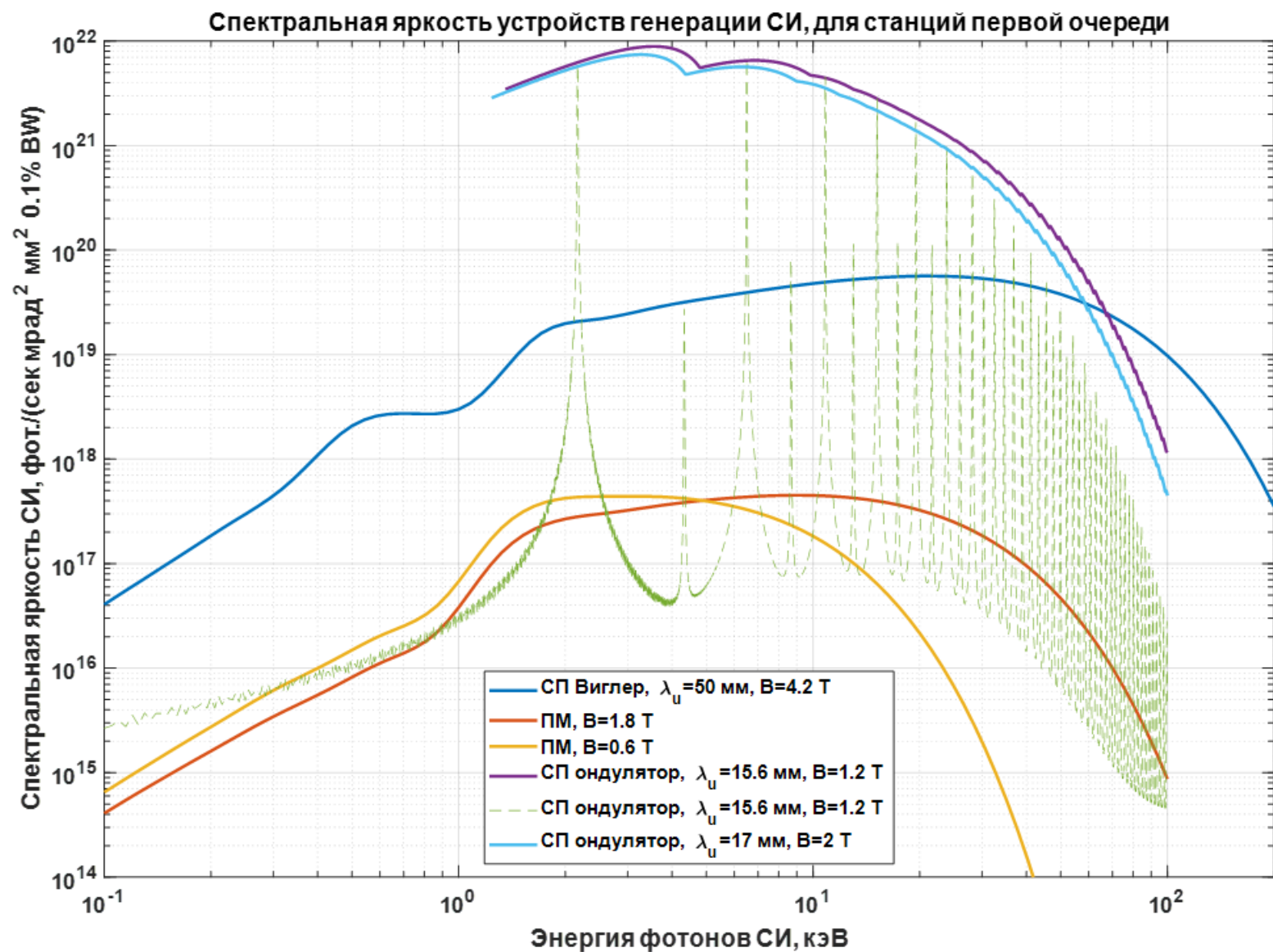
Динамическая апертюра позволяет инжектировать пучок «традиционно» – в горизонтальной плоскости с искажением орбиты накопленного пучка к «ножу» впускного магнита.



Пластины	L(m)	F_i (mrad)	H(Тл)	U(кВ)
Kick1	0.25	2.5	0.04	10
Kick2	0.25	2.3	0.04	10
Kick3	0.25	2.3	0.04	10
Kick4	0.25	2.5	0.04	10
			H(Тл)	
Sep1	0.4	30	0.75	
Sep2	1.4	200	1.43	



Спектральная яркость

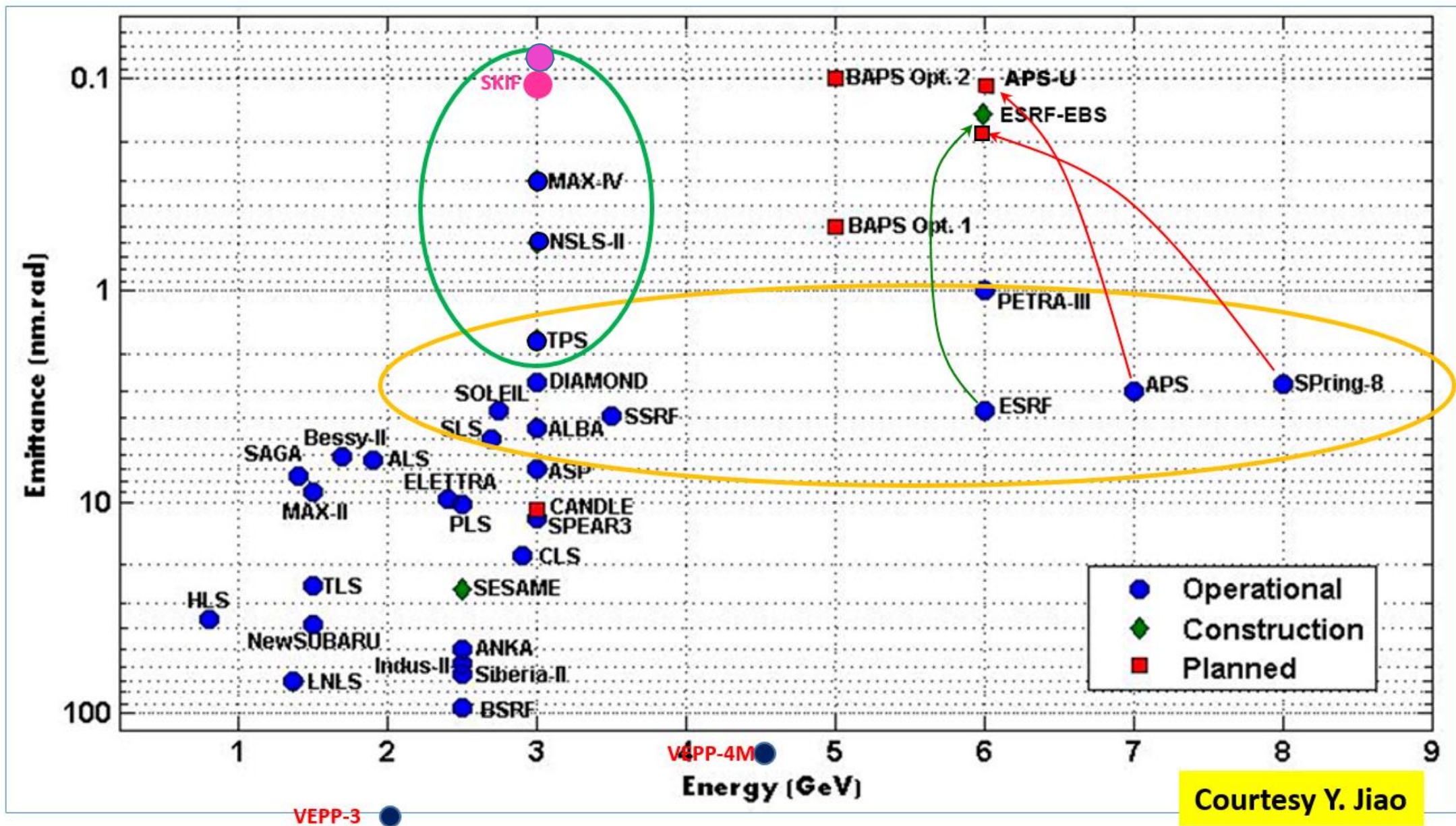


Заключение

- Есть первое приближение источника СИ СКИФ (3 ГэВ, 476 м, ≈ 80 пм при нулевом токе, $\kappa = 10\%$).
- При номинальном токе 400 мА в многосгустковом режиме внутрисгустковое рассеяние увеличивает эмиттанс до ≈ 100 пм при «тушековском» времени жизни 5 час (длина сгустка ≈ 16 мм обеспечивается ВЧ-3).
- 16 промежутков (из них 14 для IDs) двух типов: 6 м ($\beta_x = 11.9$ м, $\beta_x = 1.8$ м) для инжекции, резонаторов и ондуляторов, и 4.24 м ($\beta_x = 0.57$ м, $\beta_x = 2.4$ м) для сильнополевых вигглеров.
- Предполагается 30 каналов вывода СИ. 14 из IDs, 8 из сильнополевых магнитов (1.8 Т) и 8 из регулярных магнитов (0.5 Т).
- Поперечная динамическая апертура достаточна для простой и эффективной инжекции. Продольная апертура достаточна для обеспечения требуемого времени жизни.
- Магниты не сложные и (первая оценка) реализуемые.

Можно переходить к технической фазе Концептуального проекта.

Сравнение



Courtesy Y. Jiao