



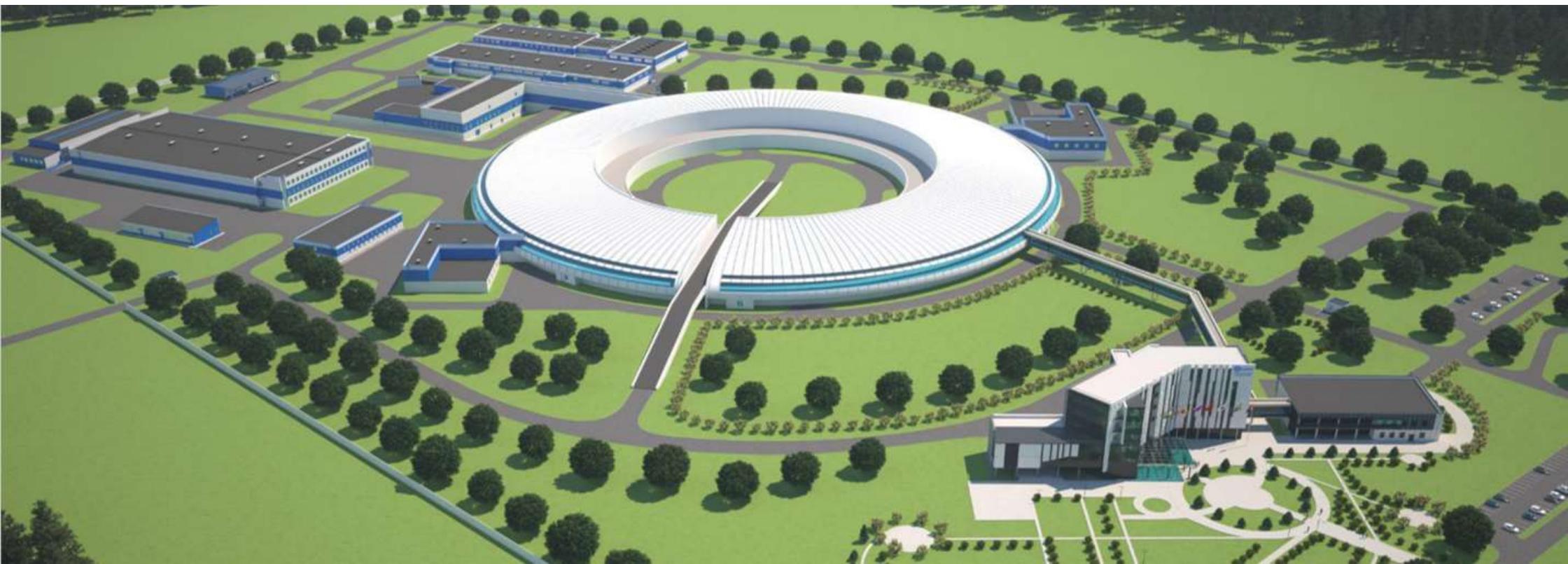
## «СКИФ», Супер чарм-тау фабрика и другие...

Е.Б. Левичев

Научная сессия ИЯФ

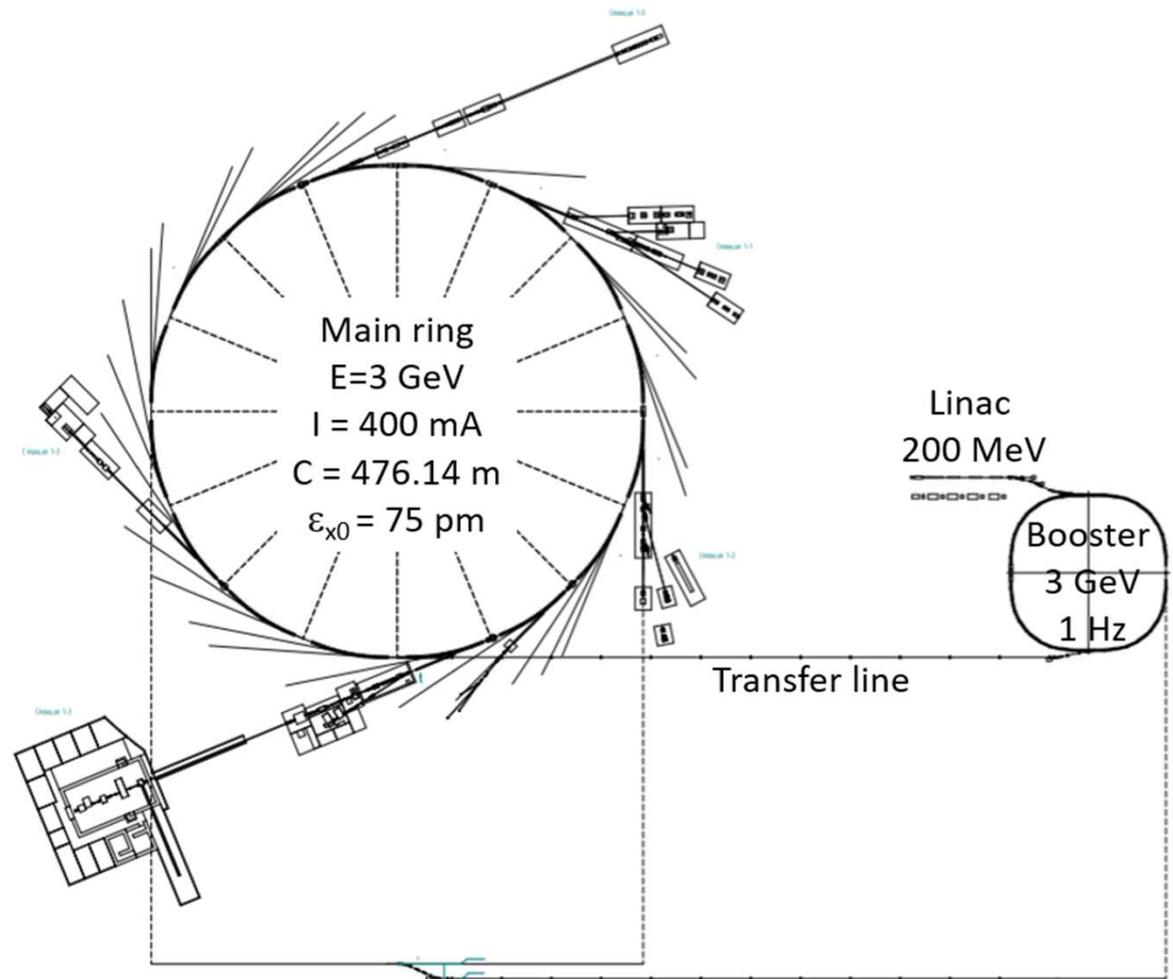
10-11 марта 2022 г.

СКИФ

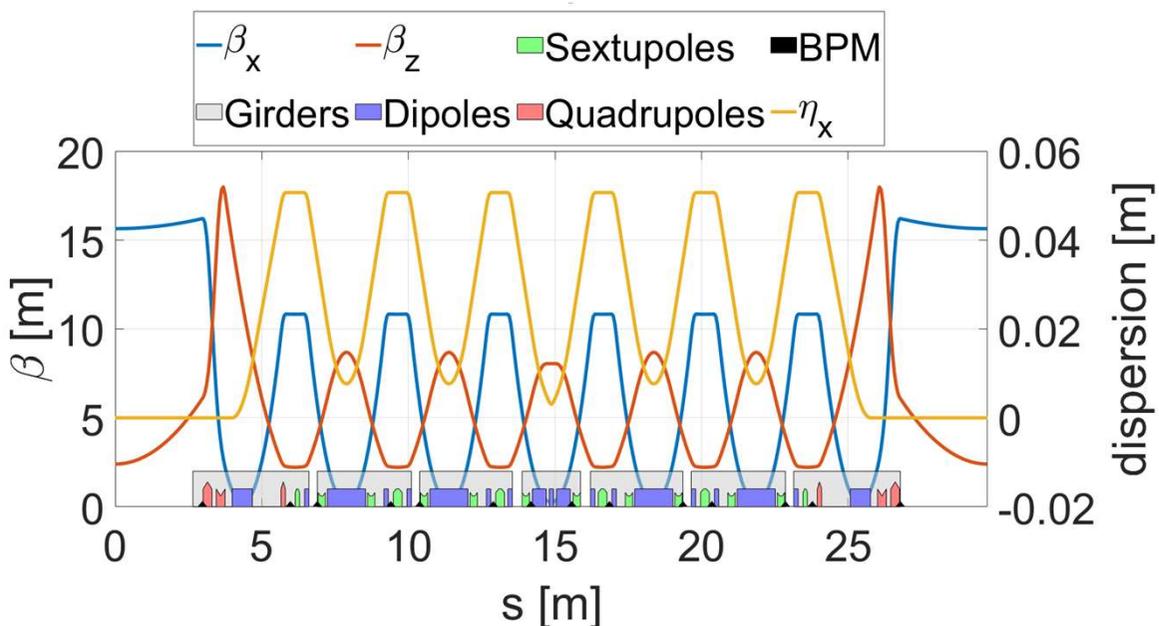


# Конфигурация

- Линак 200 МэВ.
- Бустерный синхротрон (NSLS II) с энергией 3 ГэВ и периметром 158.7 м.
- Накопитель 3 ГэВ, 476 м, ток до 400 мА, 16 периодов.
- До 30 экспериментальных станций (вигглеры, ондуляторы, «слабые» и «сильные» диполи).



# Структура и параметры



- Только 2 семейства секступолей.
- В центре суперпериода магнит 2 Т (жесткий рентген).
- Удлинение сгустка третьей гармоникой ВЧ.
- Сверхпроводящие ондуляторы.

ПАРАМЕТРЫ КОЛЬЦА	
Энергия	3 GeV
Периметр	476.14 м
Время оборота	1.59 $\mu$ с
Частота обращения, $f_0$	0. 62963 МГц
Коэффициент уплотнения орбит	$0.76 \cdot 10^{-4}$
Симметрия	16 DD
Эмиттанс	73 пм·рад
Энергетический разброс	$1.03 \cdot 10^{-3}$
Потери энергии/оборот	536 КэВ
Бетатронные частоты (x/y)	50.806/ 18.84
Натуральный хроматизм (x/y)	-149 / -55
Номер гармоники	567
Частота ВЧ	357 МГц
Напряжение ВЧ	0.77 МВ
Длина сгустка, $\sigma_s$	0.53 см
Напряжение ВЧ 3й гармоники	0.2 МВ
ВЧ акцептанс	2.59 %
Синхротронная частота	$1.13 \cdot 10^{-3}$
Декременты затухания (x/y/s)	1.94 / 1 /1.06
Время затухания(x/y/s)	9.2 / 17.7 /16.7 мс
Длина промежутков	6 м
Количество промежутков	16

# Внутрисгустковое рассеяние

400 мА в 510 сгустках

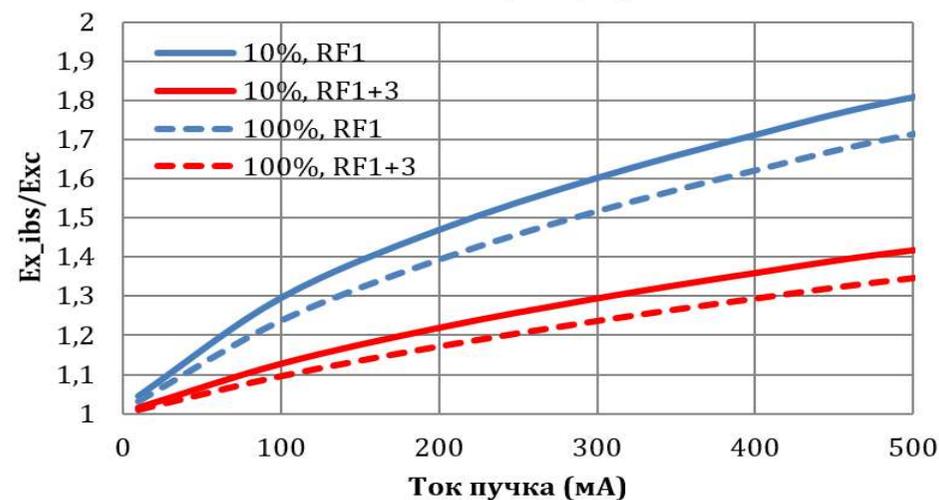
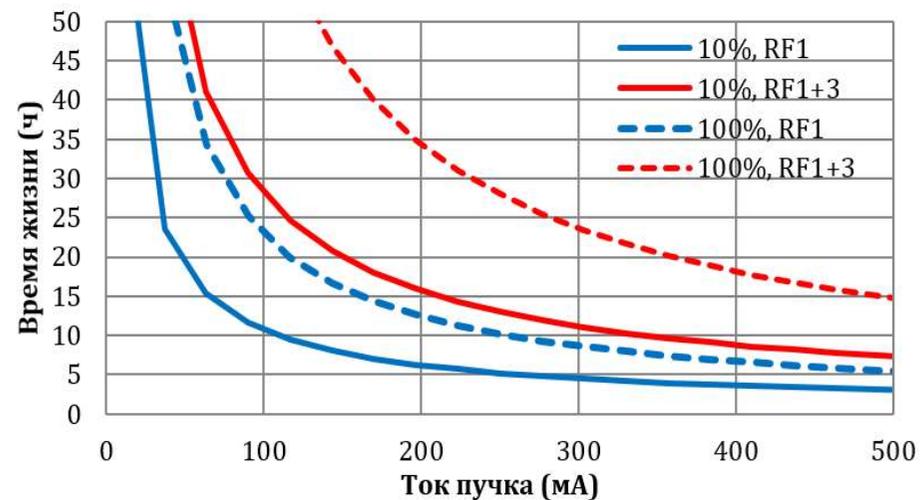
$U_0=534$  кэВ/оборот

$V_{RF}=0.845$  МВ

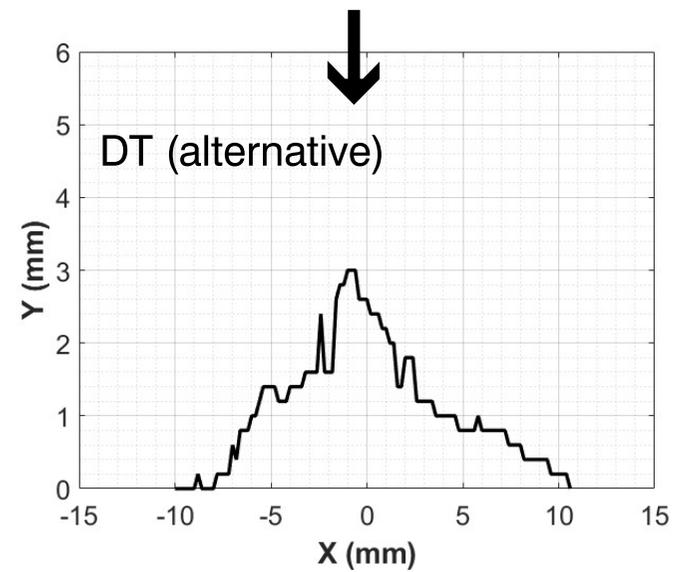
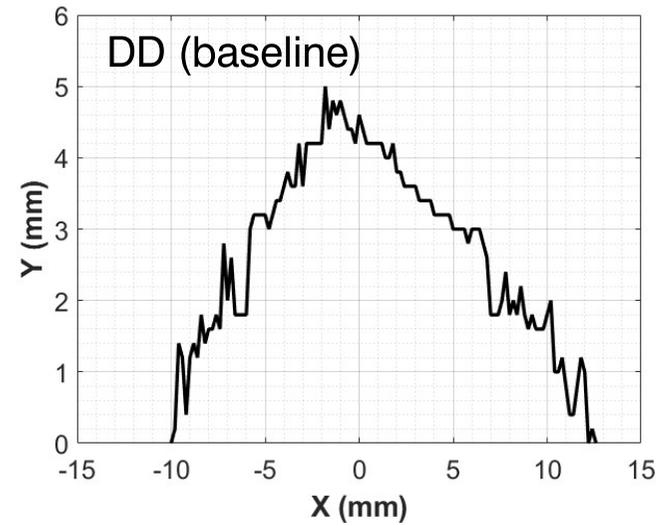
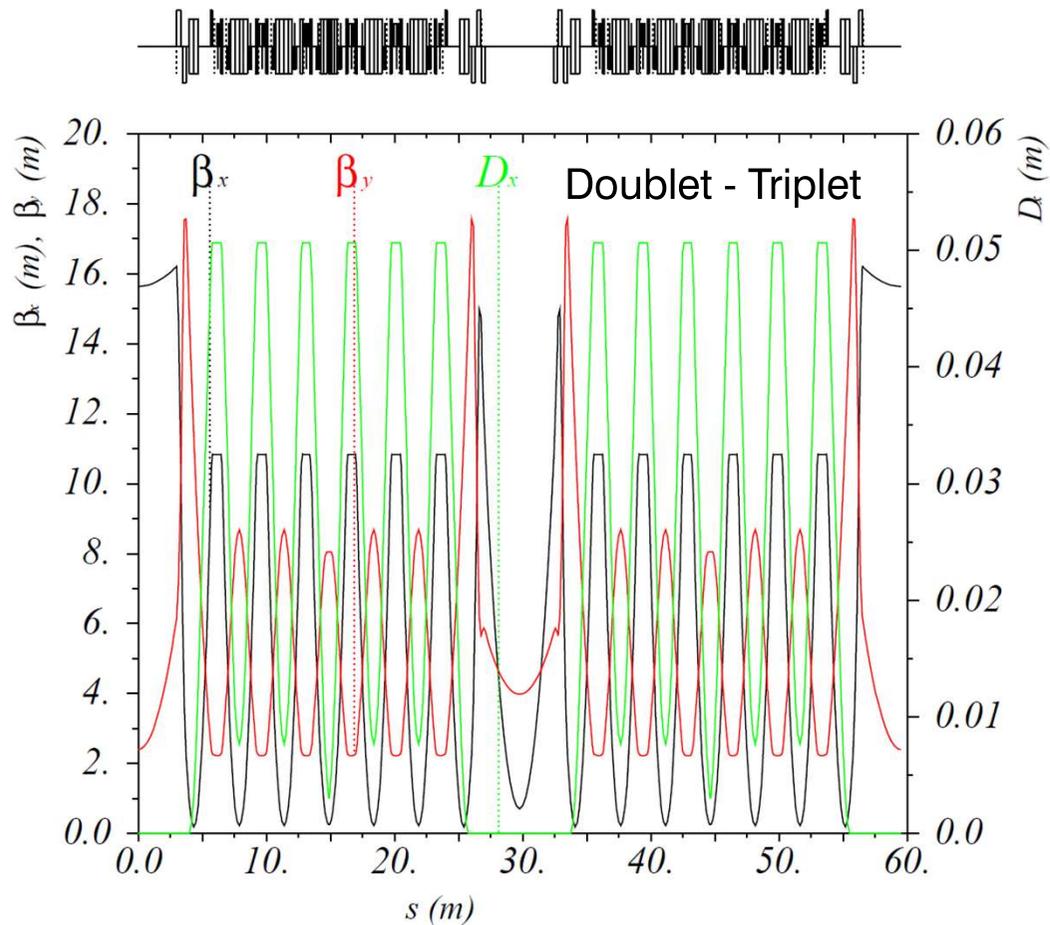
RF1 — основная ВЧ система

RF1+3 — ВЧ система на третьей гармонике

	10%		100%	
	RF1	RF1+3	RF1	RF1+3
$\epsilon_{x0}$ (пМ)	72.7			
$\epsilon_{xcoupled}$ (пМ)	66		36	
$\epsilon_{xIBS}$ (пМ)	113	90	59	47
$\epsilon_{yIBS}$ (пМ)	11	9	59	47
$\sigma_E/E \times 10^4$ (0/IBS)	10.3/12.4	10.3/11.4	10.3/11.4	10.3/10.9
$\sigma_l$ (мм) (0/IBS)	5.3/5.9	15.8/16.2	5.3/5.4	15.8/15.4
$\tau_{TIBS}$ (ч)	3.2	7.9	6.2	17



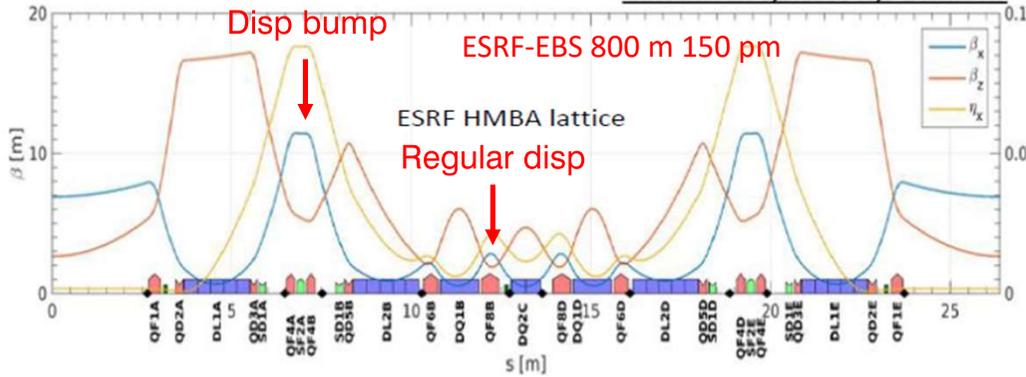
# Увеличение яркости



# A la «СКИФ» 6 ГэВ

Годится ли структура СКИФ для 6 ГэВ?

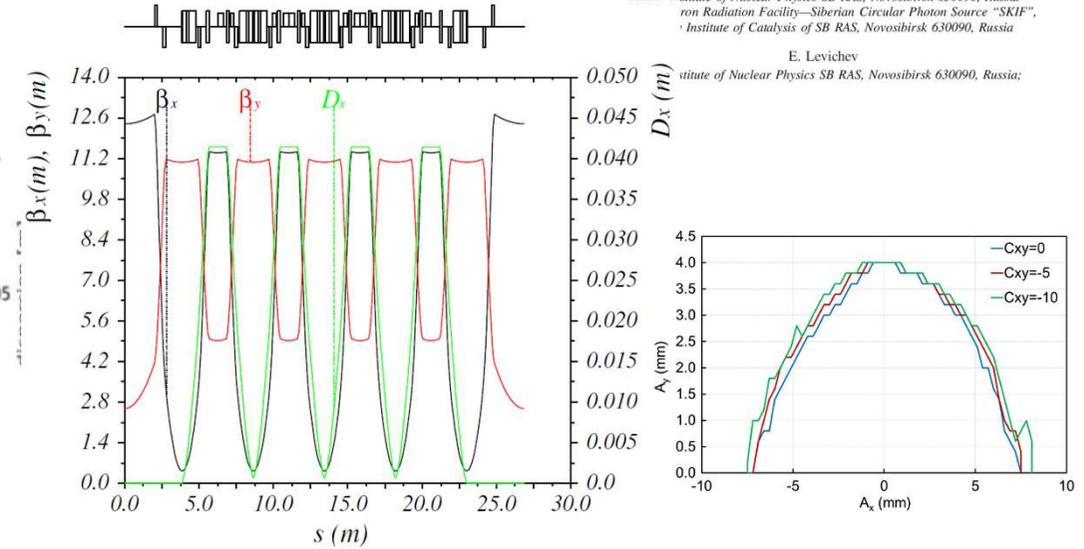
P. Raimondi, IPAC17, Denmark



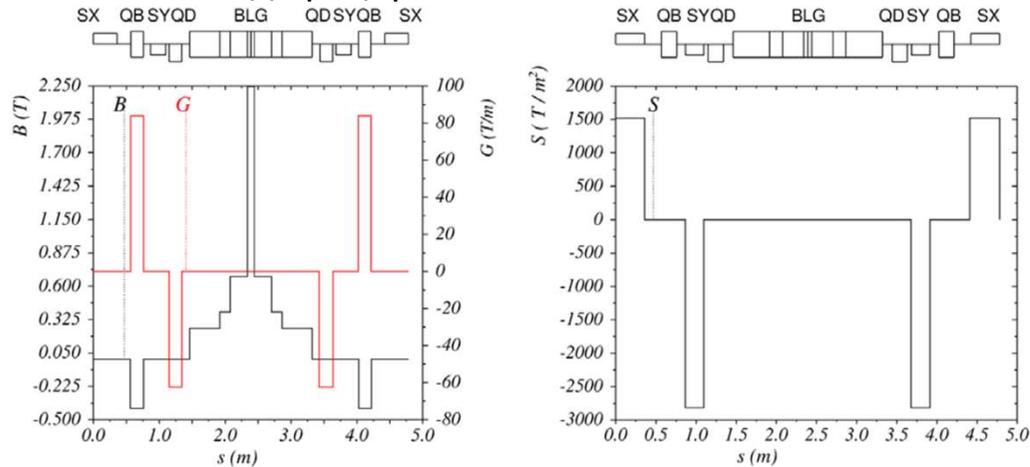
## Lattice optimization of a fourth-generation synchrotron radiation light source in Novosibirsk

G. Baranov, A. Bogomyagkov, I. Morozov, and S. Sinyatkin  
*Rutherford Institute of Nuclear Physics SB RAS, Novosibirsk 630090, Russia*  
*Novosibirsk Radiation Facility—Siberian Circular Photon Source "SKIF",*  
*Institute of Catalysis of SB RAS, Novosibirsk 630090, Russia*

E. Levichev  
*Institute of Nuclear Physics SB RAS, Novosibirsk 630090, Russia;*

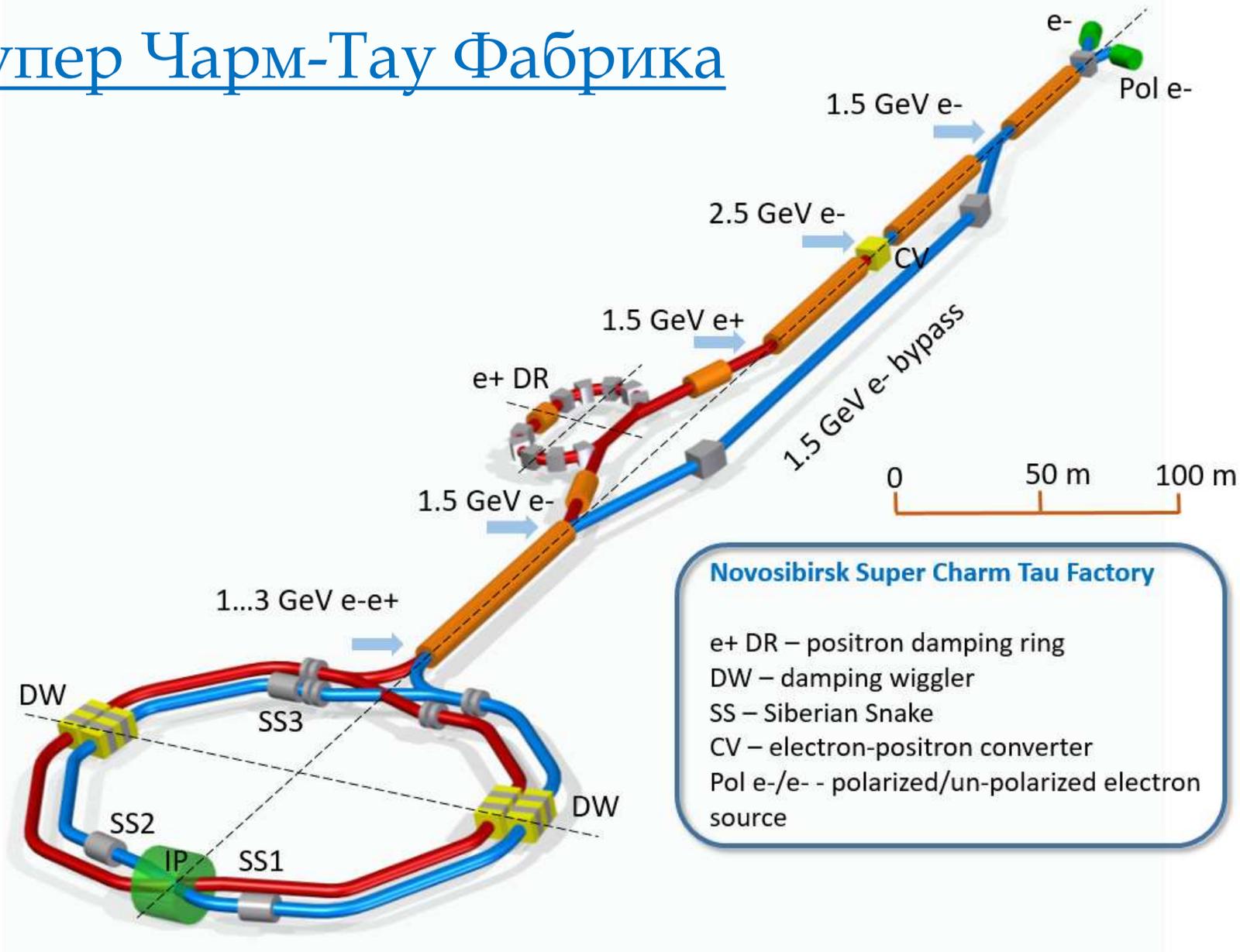


## Модифицированная ячейка СКИФ



Beam energy [GeV]	6
Symmetry	40
Circumference [m]	1074.6
Horizontal emittance [pm]	33.46
Energy spread	$2.12 \times 10^{-3}$
Energy loss per turn [MeV]	6.74
Betatron tunes (x/y)	88.39/27.16
Momentum compaction factor	$-1.84 \times 10^{-5}$
Chromaticity (x/y)	-212 / -79
Damping numbers (x/y)	2.13/0.87
Damping time (x/y/z) [ms]	3.0/6.4/7.3

# Супер Чарм-Тау Фабрика



# Изменения и проблемы

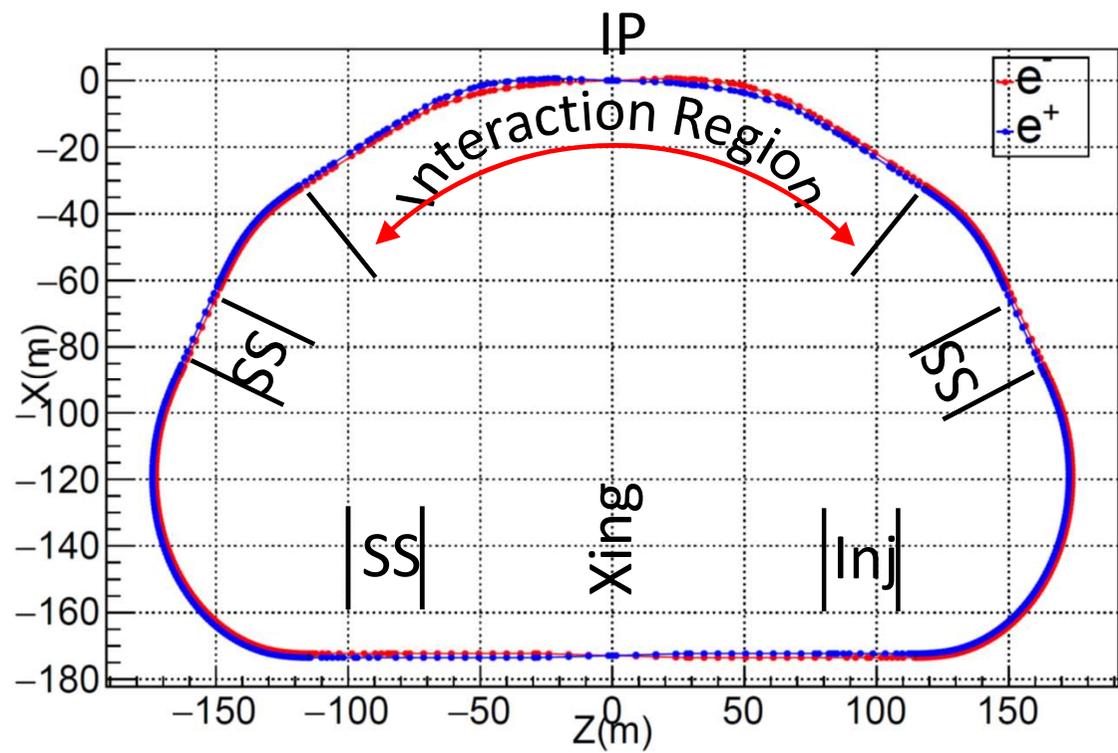
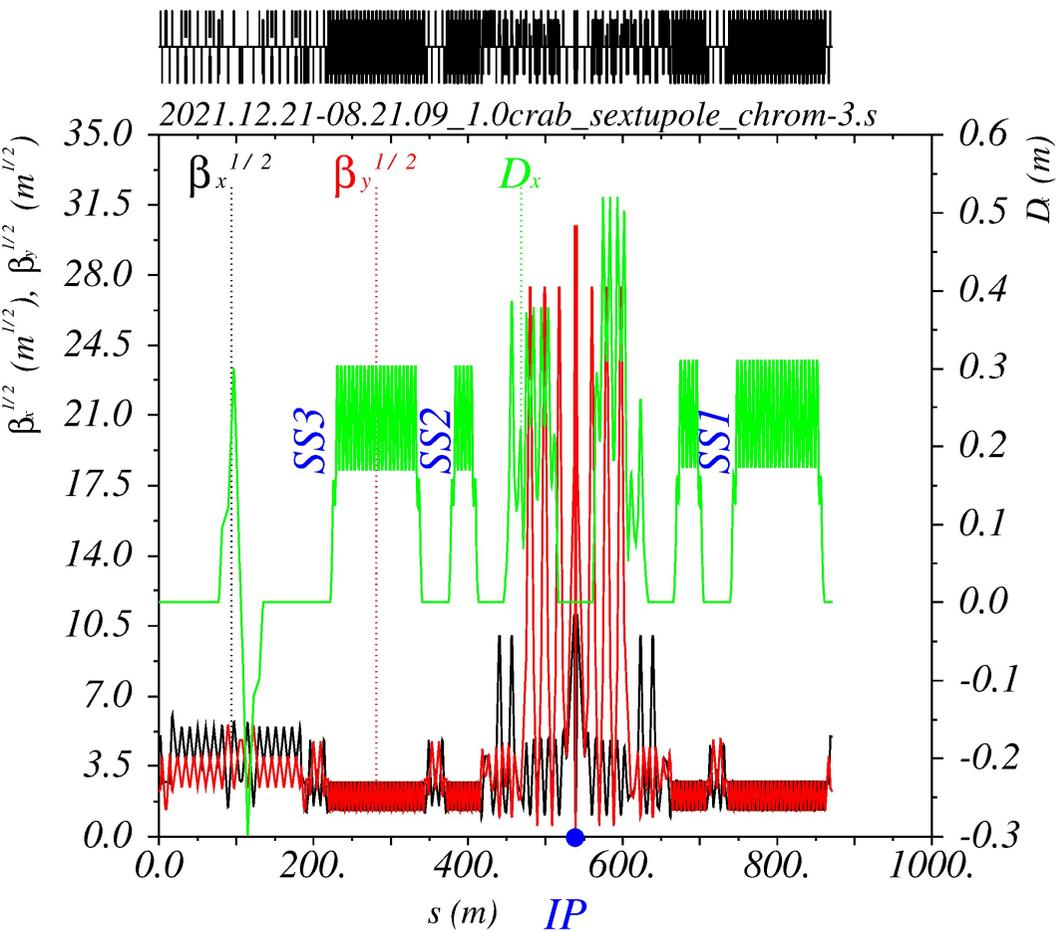
## Изменено по сравнению с 2011 г.

- Увеличена энергия пучка (3 ГэВ → 3.5 ГэВ)
- Увеличено расстояние от IP до первой линзы (0.6 м → 0.9 м).
- Уменьшены градиенты линз ФФ (100 Т/м → 40 Т/м).
- Уменьшено число и поле вигглеров-затухателей (8 м × 4.8 Т → 4 м × 3.5 Т).
- Уменьшено число частиц в сгустке для ослабления IBS ( $7 \rightarrow 3.7 \times 10^{10}$ ).
- Увеличено число сгустков и полный ток (2 А → 2.9 А).
- Придуман новый финальный фокус для увеличения ДА.

## Проблемы

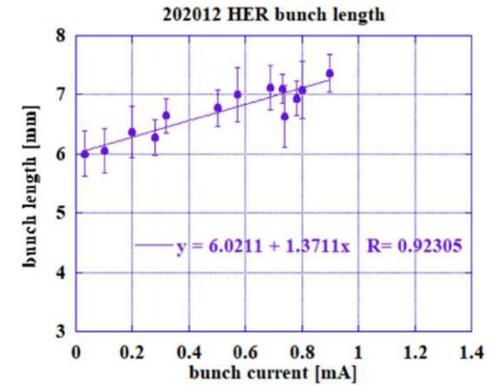
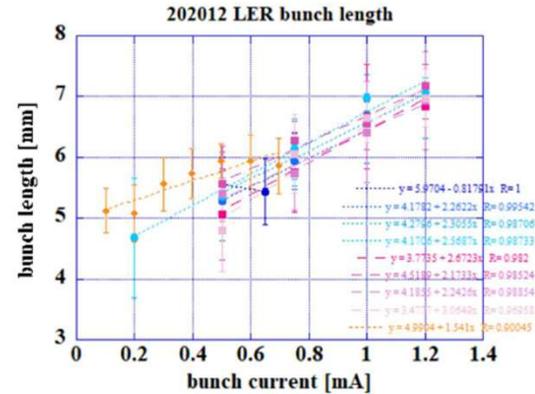
- Малая энергия (сильный «тушек»).
- Малый эмиттанс (большой хроматизм → малая ДА).
- Малая длина сгустка (сильный «тушек», когерентные неустойчивости).
- Большой ток сгустка и пучка (сильный «тушек», когерентные неустойчивости).
- Малая бета<sub>y</sub>, большой хроматизм, сильные секступоли (малая ДА).
- «Крабовые» секступоли (малая ДА при отклонении импульса)

# Конфигурация



# Параметры

$\Pi \approx 880 \text{ м}$        $\theta = \pm 30 \text{ мрад}$   
 $N_e < 3.7 \times 10^{10}$        $q = 2050$        $I < 3 \text{ А}$   
 $\beta_x^* = 100 \text{ мм}$        $\beta_y^* = 1 \text{ мм}$        $\xi_y \leq 0.1$   
 Hourglass on      IBS on      Wigglers on



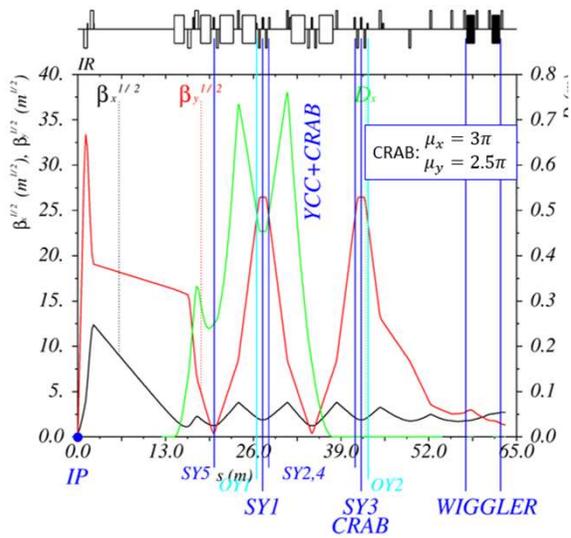
E (MэВ)	3500	3000	2500	2000	1500	1000	1000
I (A)	2.8	2.9	2.7	2.7	2.5	2.7	1.6
$N_e \times 10^{-10}$	3.7	3.0	2.8	2.7	2.5	2.9	2.7
$N_b$	1384	1769	1764	1863	1830	1703	1851
$\epsilon_x$ (нм)	7.1	5.4	4.6	4.5	6.3	11.7	14.7
$\epsilon_y$ (пм)	35.6	27.0	23.0	22.7	31.4	58.5	73.2
$\sigma_s$ (мм)	7.7	7.6	7.4	7.1	6.7	7.0	12.7
$L_{hg} \times 10^{-35} \text{ см}^{-2} \text{ с}^{-1}$	1.02	1.0	1.0	1.0	0.76	0.5	0.28
$\xi_y$	0.055	0.060	0.075	0.093	0.10	0.11	0.06

SuperKEKB 03.12.2019  
 $\beta_y^* = 1 \text{ мм}$

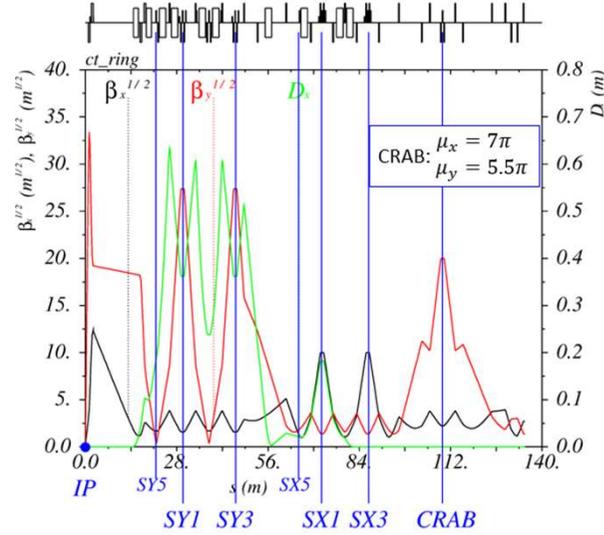
PEPII:  $I(e^+) = 3.2 \text{ А}$  PEPII  
 DAFNE:  $I(e^-) = 2.45 \text{ А}$

SuperKEKB:  $L = 3.8 \times 10^{34}$

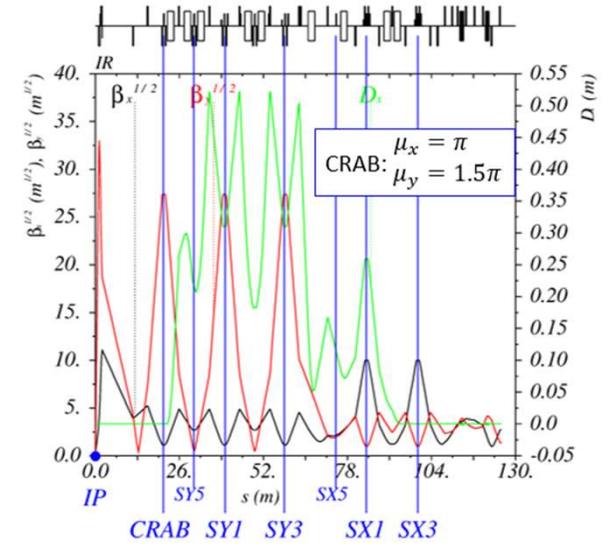
# Финальный фокус



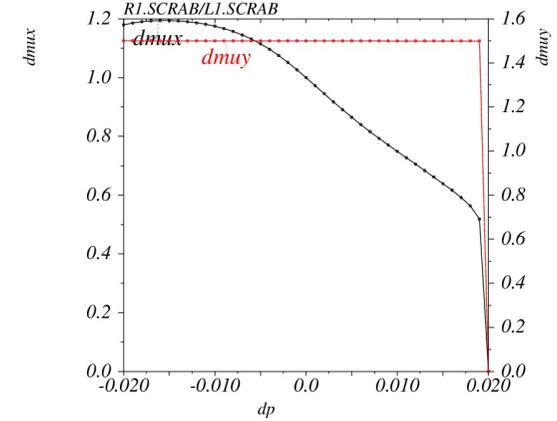
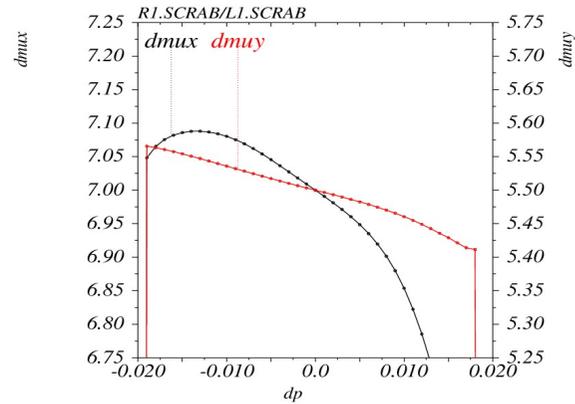
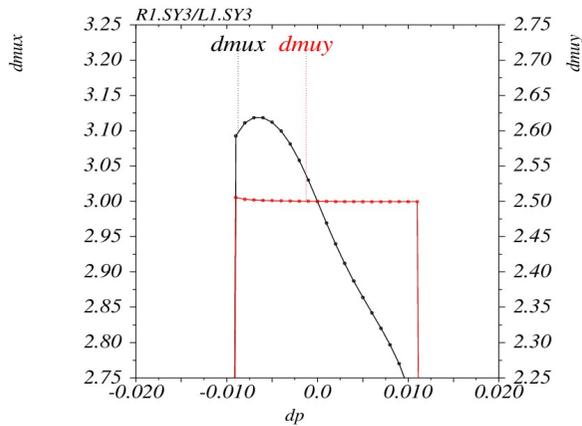
Oide, FCC-ee



Raimondi, SuperB

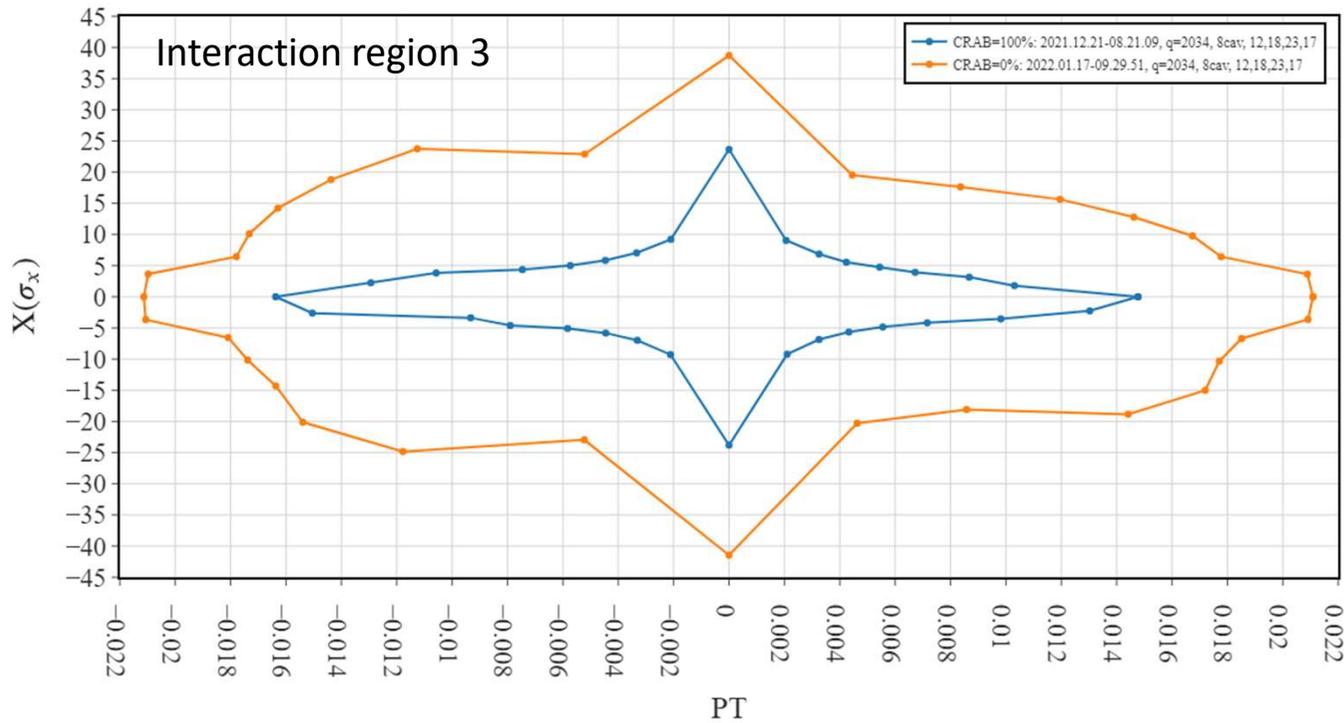


Bogomyagkov, SCTF



# Динамическая апертура

6d-DA,  $y_0 = \sigma_y, \sigma_x = 3.50e - 04m, \sigma_e = 1.14e - 03, 2 \text{ GeV}$



	CRAB OFF	CRAB ON
$\tau_T(s)$	740	108
$N_p(10^{10})$	2.7	2.7

Energy aperture

Interaction region 1:  $\pm 0.8\%$

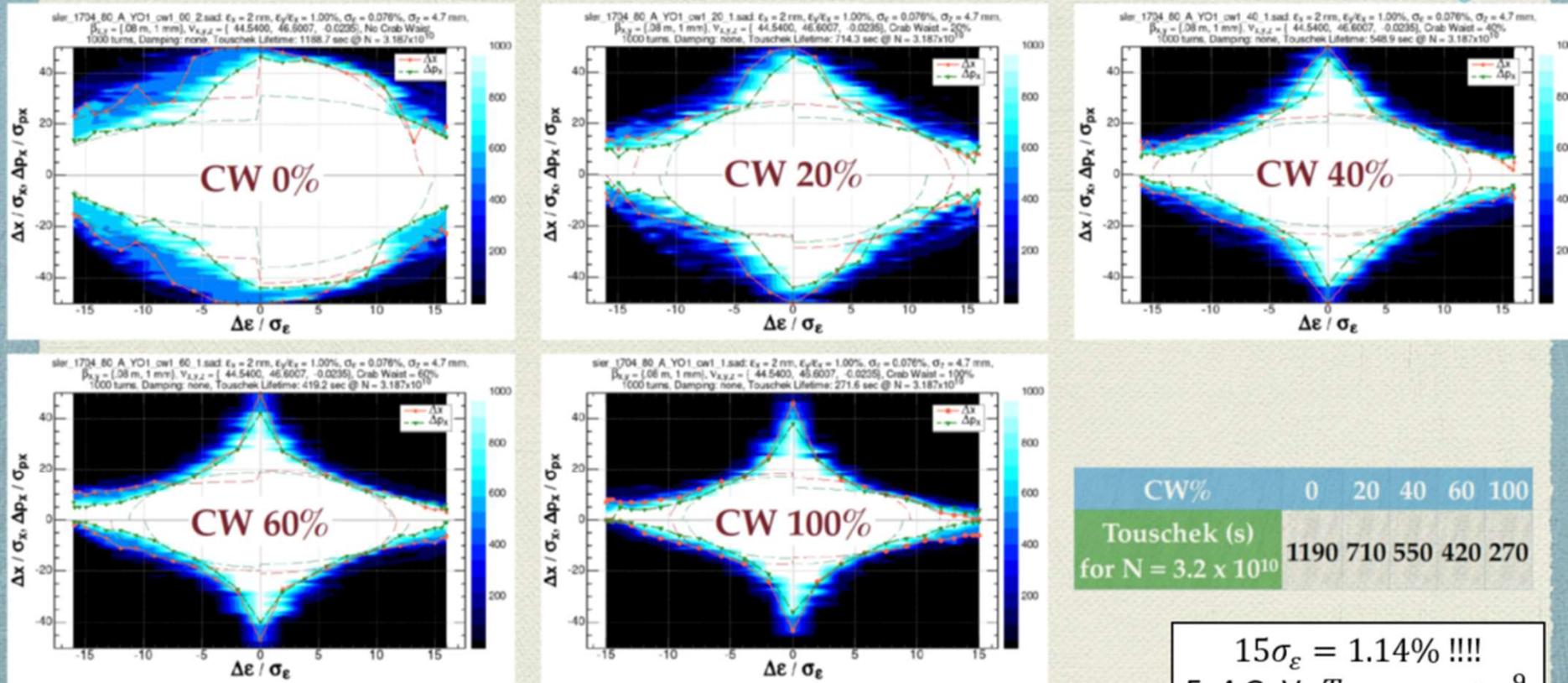
Interaction region 2:  $\pm 1.2\%$

Interaction region 3:  $\pm 1.4\%$

$\tau_{\text{туш}} \approx 100 \text{ с (а нужно } >300 \text{ с)}$

# Пример Super КЕКВ

Dynamic aperture for various CW ratios ( $\beta_y^* = 1$  mm)



CW%	0	20	40	60	100
Touschek (s)	1190	710	550	420	270
for $N = 3.2 \times 10^{10}$					

$15\sigma_\epsilon = 1.14\%$  !!!!  
 $E=4$  GeV,  $T_{\text{touschek}} \propto \gamma^9$

- chromaticities in  $\alpha^*, \beta^*$  are corrected

# e+e- коллайдер с энергией до 1.5 ГэВ

Предположим, в ИЯФ создается коллайдер, дополняющий СЧТФ в области низких энергий (0.5 – 1.5 ГэВ в пучке). Сравним параметры такого коллайдера с СЧТФ.

Длина 200 м,  
**Эмиттанс 50 нм,**  
 остальные параметры, как у СЧТФ.

$$\epsilon_x \sim \varphi^3$$

$$L_{CW} \sim \epsilon_x^{-3/4}$$

При прочих равных условиях, коллайдер с CW-встречей и меньшим периметром (большим эмиттансом) покажет светимость меньше, чем СЧТФ.

	СЧТФ	New coll.	
E, Mev	1000.	1000.	1000.
π, m	878.897	200.666	200.666
θ, deg	1.71887	1.71887	1.71887
fθ, Hz	341101.	1.49399 × 10 <sup>6</sup>	1.49399 × 10 <sup>6</sup>
I, A	2.69872	2.89358	2.89358
N	2.9 × 10 <sup>10</sup>	3. × 10 <sup>10</sup>	3. × 10 <sup>10</sup>
Nb	1703.	403.	403.
q	2050.	470.	470.
Fr f, Hz	6.99256 × 10 <sup>8</sup>	7.02175 × 10 <sup>8</sup>	7.02175 × 10 <sup>8</sup>
U0, keV	22.379	16.9706	16.9706
Vr f, keV	2000.	450.	450.
η	0.00149357	0.00141993	0.00141993
γs	0.0312177	0.00691106	0.00691106
δr f	0.0202129	0.0201033	0.0201033
σe	0.001145	0.0011	0.0011
σs	0.0076628	0.00721787	0.00721787
εx, m rad	1.46783 × 10 <sup>-8</sup>	5. × 10 <sup>-8</sup>	5. × 10 <sup>-8</sup>
εy, m rad	7.33916 × 10 <sup>-11</sup>	2.5 × 10 <sup>-10</sup>	2.5 × 10 <sup>-10</sup>
IBS	ON (MADX)	OFF	OFF
WIG	ON	OFF	OFF
CRAB	crab	crab	crab
βx, m	0.1	0.1	0.1
βy, m	0.001	0.001	0.002
ψy, m	0.	0.	0.
L <sub>max</sub> , m	0.00125933	0.00223998	0.00223998
L1, cm <sup>-2</sup> s <sup>-1</sup>	5.01627 × 10 <sup>34</sup>	2.55989 × 10 <sup>34</sup>	2.24467 × 10 <sup>34</sup>
L0, cm <sup>-2</sup> s <sup>-1</sup>	6.15568 × 10 <sup>24</sup>	3.78498 × 10 <sup>24</sup>	2.67639 × 10 <sup>24</sup>
L1/L0	0.814902	0.676328	0.838693
εx	0.0122293	0.0132432	0.0132432
εy	0.105235	0.0603493	0.0853468
εs	-0.000737031	-0.000782548	-0.000782548
φ	6.00207	3.0632	3.0632
γs/εx	2.5527	0.521859	0.521859
τL, s	6395.67	3068.03	3498.88
τT, s	2441.	0.	0.
τX, s	0.261956	0.0788665	0.0788665
τY, s	0.262003	0.0788834	0.0788834
τZ, s	0.131013	0.039446	0.039446
N/σ <sub>had</sub>	3.64627 × 10 <sup>23</sup>	1.17559 × 10 <sup>23</sup>	8.3127 × 10 <sup>22</sup>

# Мюмюотрон

## Мотивация:

- Реализовать в ИЯФ новый проект с ограниченной, но интересной физической программой.
- Создать стенд, позволяющий исследовать эффекты, свойственные СЧТФ (большие токи, многосгустковый режим, малая бета и т.д.)
- Открыть и исследовать димюониум + несколько других экспериментов.

## Способствующие факторы:

- Наличие подходящего защищенного помещения.
- Наличие требуемой инфраструктуры.
- Наличие инжектора с нужными параметрами.
- Простая и дешевая детектирующая система.

# Научная программа

- Димюоний – это связанное состояние пары  $\mu^+\mu^-$
- Чистая КЭД система
- Из 6 возможных КЭД-атомов: позитроний ( $e^+e^-$ ), мюоний ( $\mu^+e^-$ ), димюоний ( $\mu^+\mu^-$ ), тауоний ( $\tau^+e^-$ ), тау-мюоний ( $\tau^+\mu^-$ ), дитауоний ( $\tau^+\tau^-$ ) наблюдались только позитроний и мюоний.
- По сравнению с ними димюоний более компактная система  $R_{\mu\mu} \approx (1/100)R_{\mu e} \approx (1/200)R_{ee}$ .

- Наблюдение димюония – это открытие мирового уровня
- Сложная экспериментальная задача  $\rightarrow$  вызов экспериментатору  $\rightarrow$  развитие методики
- Тесты КЭД (мюоний – позитроний  $\times m_e/m_\mu$ )
- Исследование свойств мюона

➤  $e^+e^- \rightarrow \pi^0$

○ фон от  $e^+e^- \rightarrow \gamma\gamma$

➤  $e^+e^- \rightarrow \pi^0\gamma$

○ фон от  $e^+e^- \rightarrow \gamma\gamma\gamma$

---

➤  $e^+e^- \rightarrow$  dimuonium

➤  $e^+e^- \rightarrow \mu^+\mu^-$

➤  $e^+e^- \rightarrow$  dipionium

○ малое сечение

➤  $e^+e^- \rightarrow \pi^+\pi^-$

➤  $e^+e^- \rightarrow \pi^0\pi^0\gamma$

➤  $e^+e^- \rightarrow \pi^+\pi^-\pi^0$

➤  $e^+e^- \rightarrow \eta$

---

➤  $e^+e^- \rightarrow \pi^+\pi^-\pi^0\pi^0$

➤ ...

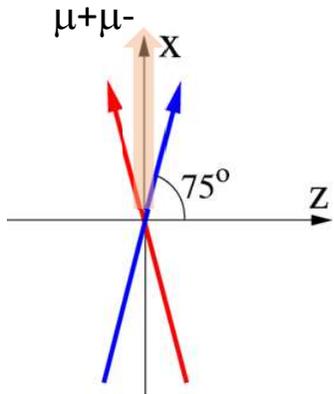
$E_{\text{CM}} = 210-550$  МэВ

$\gamma\gamma \rightarrow \pi^0, \pi\pi$  ?

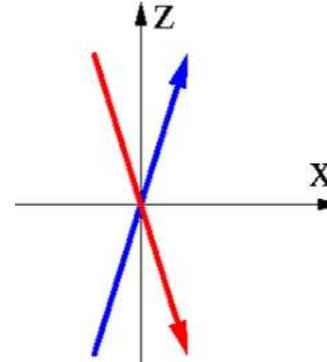
Рождение димюония в  $e^+e^-$  столкновениях:  
В.Н.Байер и В.С.Сынах,  
ЖЭТФ, **41**, 1576 (1961).

В.П.Дружинин, 2017.

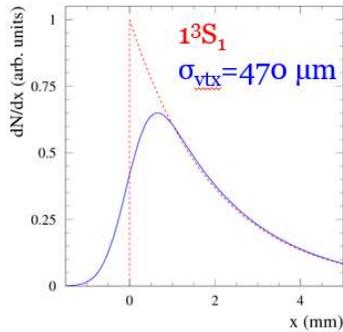
# Идея



$E_{\text{beam}}$ (MeV)	408
$\sigma_E/E_{\text{beam}}$ ( $\times 10^{-4}$ )	7.8
$\Delta\alpha$ ( $\times 10^{-4}$ )	6.8
$\sigma_x$ at IP ( $\mu\text{m}$ )	102
$\sigma_y$ at IP ( $\mu\text{m}$ )	0.84
$\sigma_z$ at IP (mm)	11
$L_{\text{aver}}$ ( $\times 10^{31} \text{ cm}^{-2} \text{ c}^{-1}$ )	8
Число банчей	30



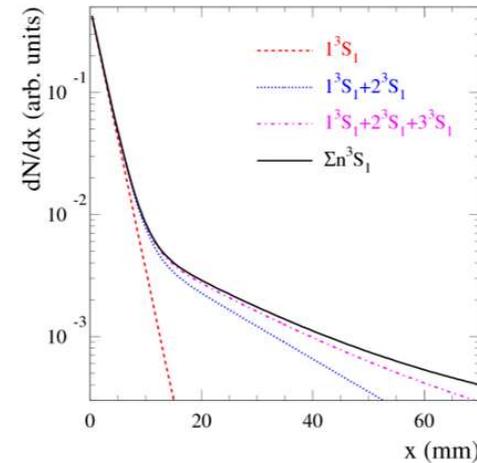
$E_{\text{beam}}$ (MeV)	287	502
$E_{\text{CM}}$ (MeV)	547	957
$\Delta E_{\text{CM}}$ (keV)	200	480
$L_{\text{aver}}$ ( $\times 10^{32} \text{ cm}^{-2} \text{ c}^{-1}$ )	4.3	3.4



Событий	за час	за 4 месяца
всего (1S/2S/3S)	23/2.8/0.8	65k/8.2k/2.4k
$x > 2.3 \text{ mm}$	7.6/2.5/0.8	21k/7.1k/2.3k

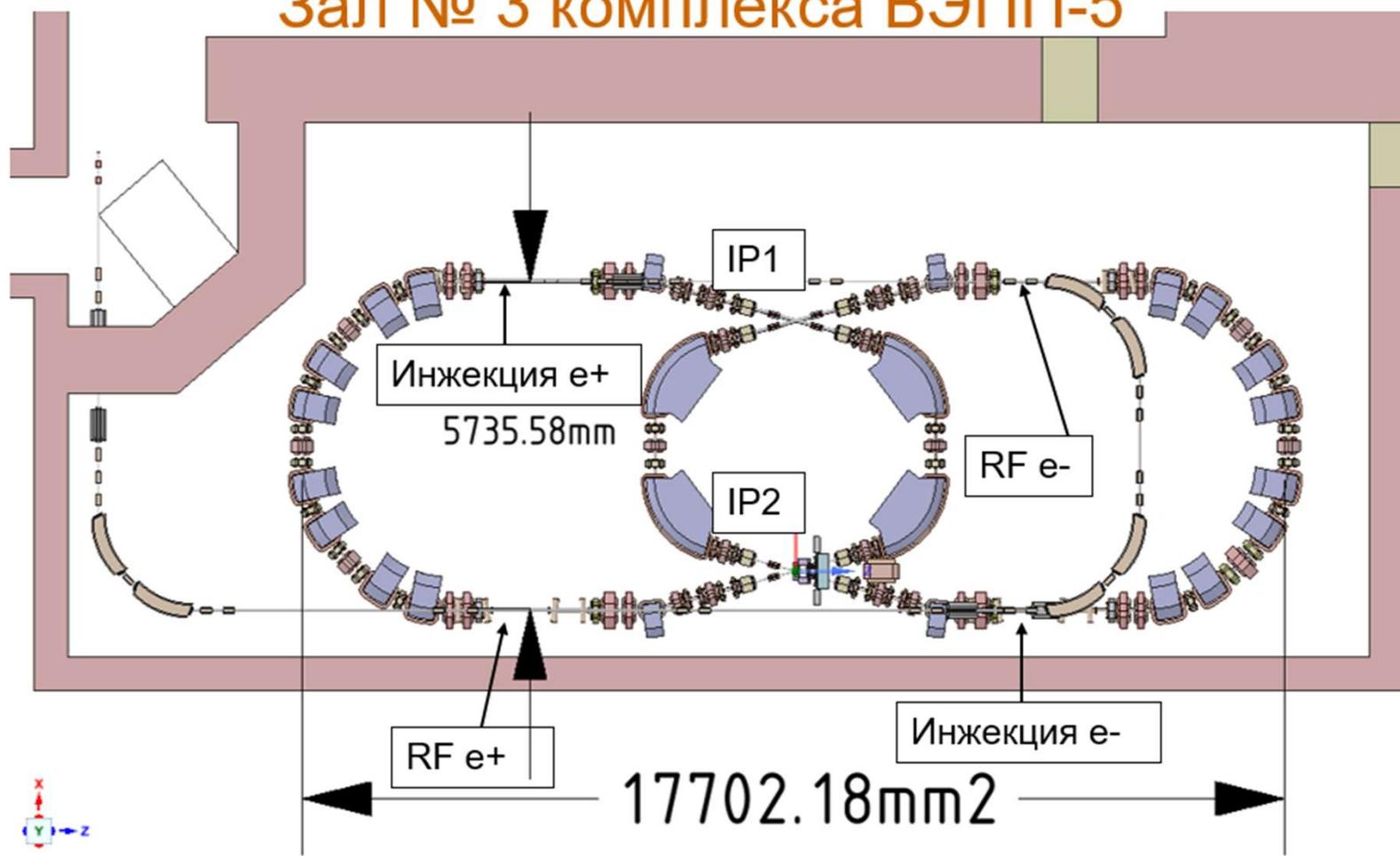
Эффективность регистрации – около 35%

- Разрешение детектора по вершине 150  $\mu\text{m}$
- Результующее разрешение  $\sigma_{\text{vtx}} = 320 \mu\text{m}$
- Для подавления упругого рассеяния предполагается потребовать  $x_{\text{vtx}} > 7\sigma_{\text{vtx}} = 2.3 \text{ mm}$

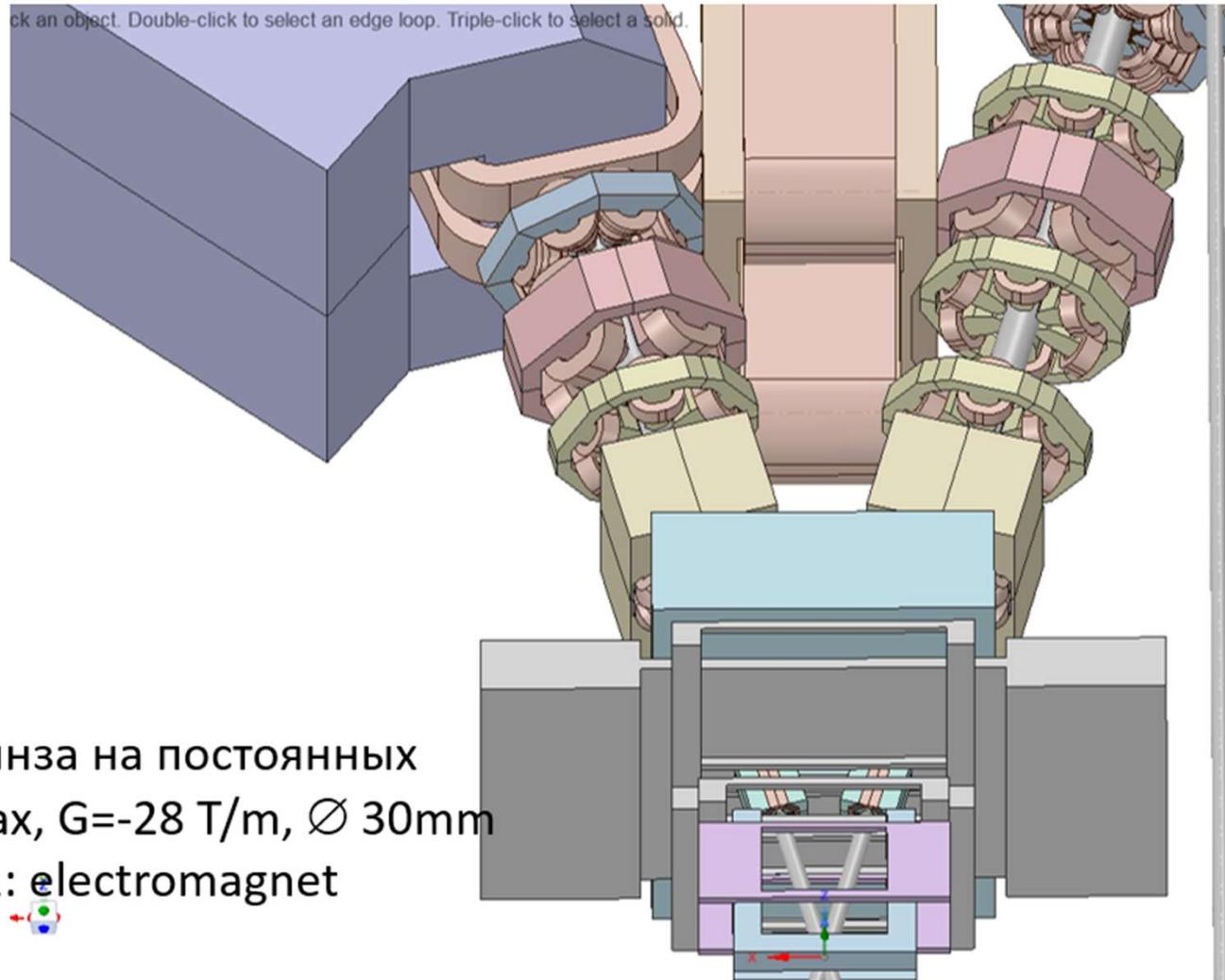


# Коллайдер

## Размещение Зал № 3 комплекса ВЭПП-5



# Проект достаточно проработан



- QD0: линза на постоянных магнитах,  $G = -28 \text{ T/m}$ ,  $\varnothing 30 \text{ mm}$
- QD/QF1: electromagnet



## Выводы

- СКИФ реализуется. Принципиальных проблем, угрожающих получению проектных параметров, не видно.
- Структура (технологии, опыт, оборудование и т.д.) СКИФ выглядит перспективной и для источника СИ высокой энергии 6 ГэВ.
- Супер чарм-тау фабрика. Растет понимание и реалистичность проекта. Последней принципиальной проблемой остается «тушековское» времени жизни пучка.
- CW-коллайдер с энергией ниже СЧТФ и размером меньше будет проигрывать СЧТФ из-за большего эмиттанса.
- Мюмюотрон (по-прежнему) видится единственным проектом со встречными пучками, готовым для детальной проработки и реализации.