



Г.И.Будкер

Перспективы встречных электрон-позитронных пучков в ИЯФ

Е.Б. Левичев



ИЯФ СО РАН



Проекты e+e- коллайдеров в мире

- На сверхвысокую энергию FCC-ee (CERN) и CEPC (IHEP). Энергия пучка от 45 ГэВ до 182 ГэВ, периметр ≈ 100 км.
- Супер Чарм-Тау Фабрика (ИЯФ и USTC CAS, Hefei, China). Энергия пучка от 1 ГэВ до 3.5 ГэВ, периметр $\approx 600 - 1000$ м.
- На сверхнизкую энергию ($\mu\mu$ -трон, ИЯФ). Энергия ≈ 400 МэВ, периметр ≈ 35 м.

Проекты e+e- коллайдеров в мире

- На сверхвысокую энергию FCC-ee (CERN) и CEPC (IHEP). Энергия пучка от 45 ГэВ до 182 ГэВ, периметр ≈ 100 км.
- Супер Чарм-Тау Фабрика (ИЯФ и USTC CAS, Hefei, China). Энергия пучка от 1 ГэВ до 3.5 ГэВ, периметр $\approx 600 - 1000$ м.
- На сверхнизкую энергию ($\mu\mu$ -трон, ИЯФ). Энергия ≈ 400 МэВ, периметр ≈ 35 м.

Future Circular Collider Study (CERN)



FCC-ee: история и вклад ИЯФ

Blondel A., Zimmermann F. A High Luminosity e+e- Collider in the LHC tunnel to study the Higgs Boson, arXiv:1112.2518v1 (2011).

Telnov V.I. Restriction on the energy and luminosity of e+e- storage rings due to beamstrahlung, arXiv:1203.6563, 29 Mar 2012. (Потеря частиц из-за «однократного пучкового излучения» – фундаментальное ограничение светимости на высокой энергии.)

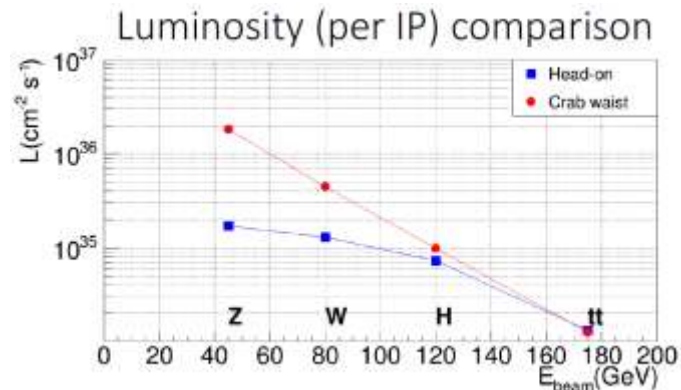
Vogomyagkov A., Levichev E., Shatilov D. Beam-beam effects investigation and parameters optimization for a circular e+e- collider at very high energies. Phys. arXiv:1311.1580v1, 7 Nov 2013. (Увеличение энергетического разброса и длины сгустка из-за «многократного пучкового излучения» – ограничение светимости на низкой энергии. Первое предложение CW-встречи.)

- Эффекты встречи, оптимизация светимости, основные параметры (Шатилов)
- Динамика пучка, изучение динамической апертуры (Богомягков, Синяткин, Пиминов, Левичев Е.)
- Промежуток встречи, финальный фокус (Воблый, Синяткин, Богомягков, Пивоваров, Краснов, Левичев Е.)
- Измерение энергии (Кооп, Богомягков, Мучной, Никитин)
- Вакуумная система, электронные облака (Краснов)
- Источники электронов и позитронов (Левичев А., Никифоров, Барняков, Мартышкин)

FCC2018, FCC-ee talks

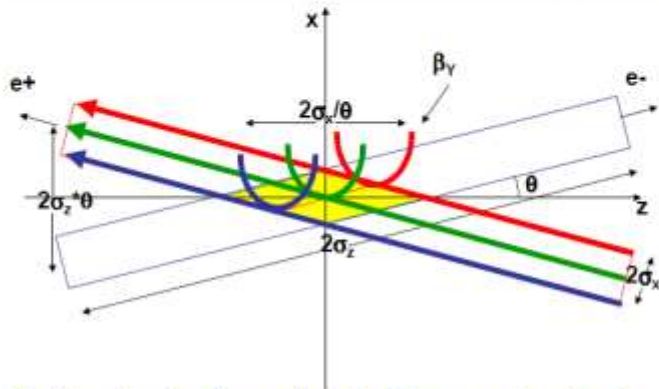
Lab	Talks
CERN	7
BINP	5
KEK	2
LNF/INFN	2
SLAC, FNAL, MIT, PSI, U Geneva, U Roma, EPFL, Bogazici U, Ankara U	1

FCC2015, CW vs Head-on



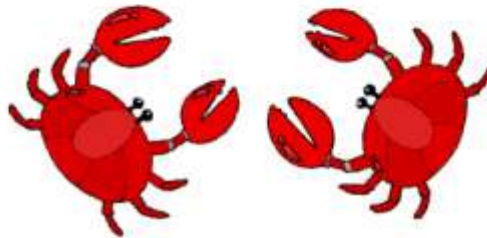
FCC-ee: CW

1. Large Piwinski's angle $\Phi = tg(\theta)\sigma_z/\sigma_x$
2. Vertical beta comparable with overlap area $\beta_y \approx \sigma_x/\theta$
3. Crab waist transformation $y = xy'/(2\theta)$

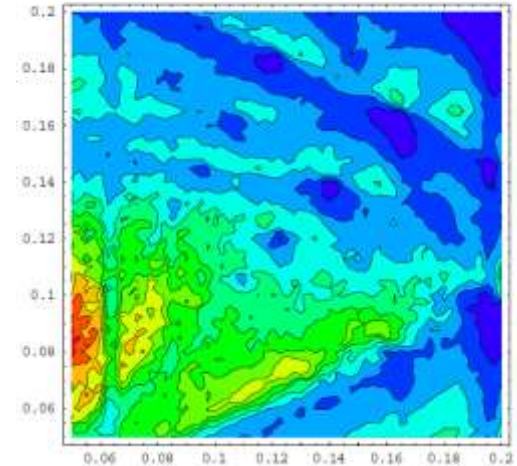


Crabbed waist is realized with a sextupole in phase with the IP in X and at $\pi/2$ in Y

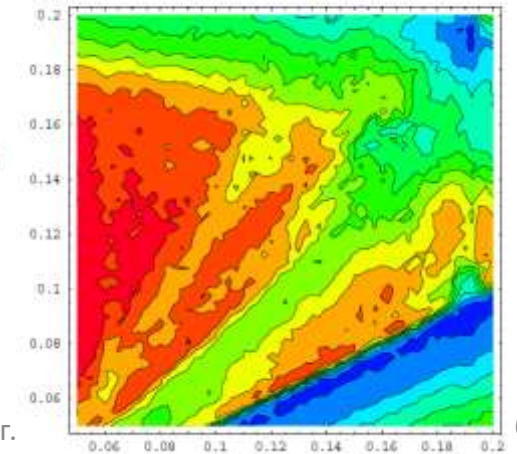
1. P.Raimondi, 2^o SuperB Workshop, March 2006
2. P.Raimondi, D.Shatilov, M.Zobov, physics/0702033



Crab Off



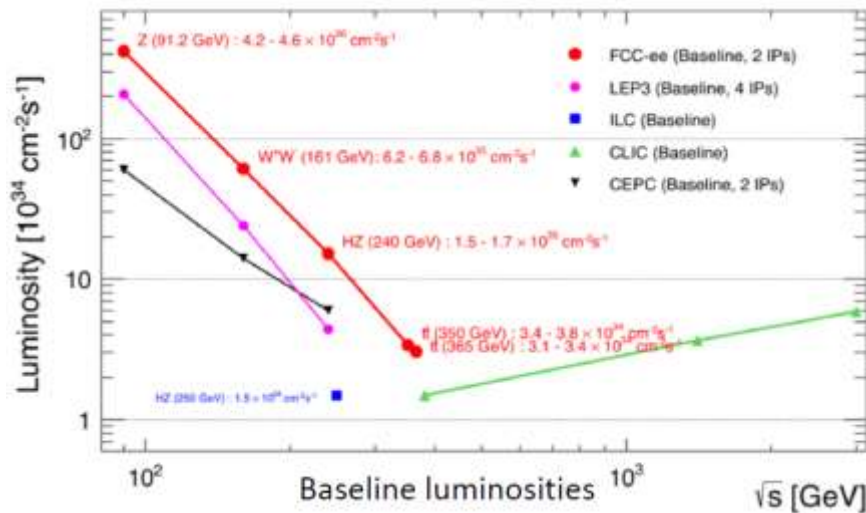
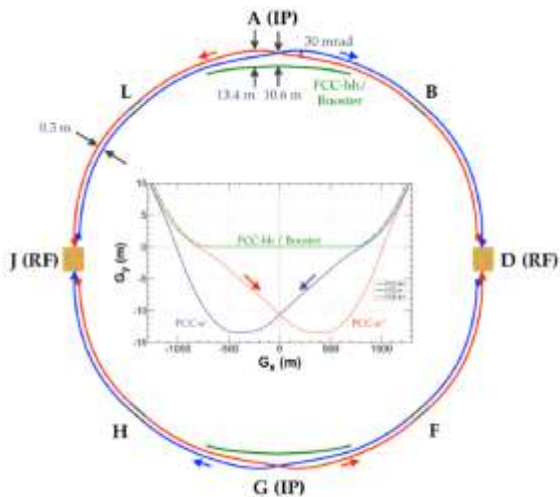
Crab On



FCC-ee: главное



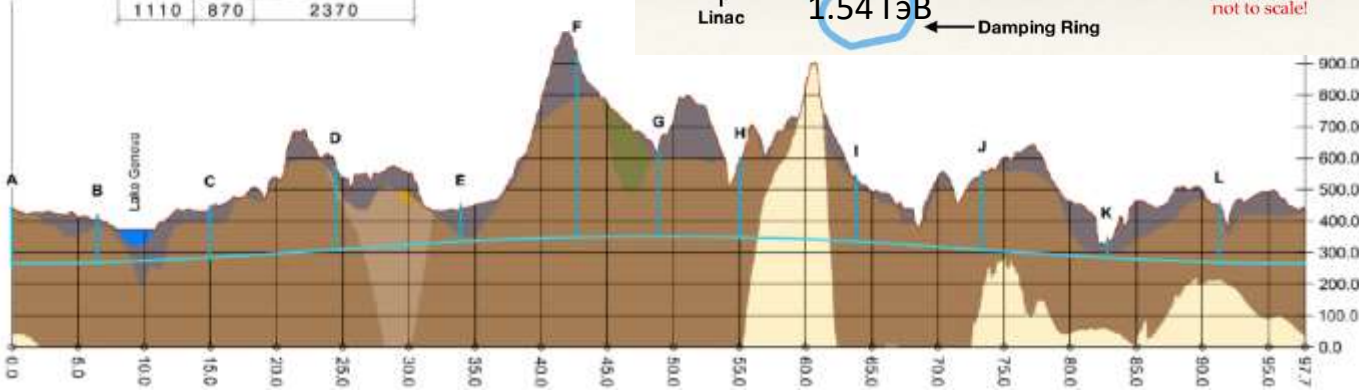
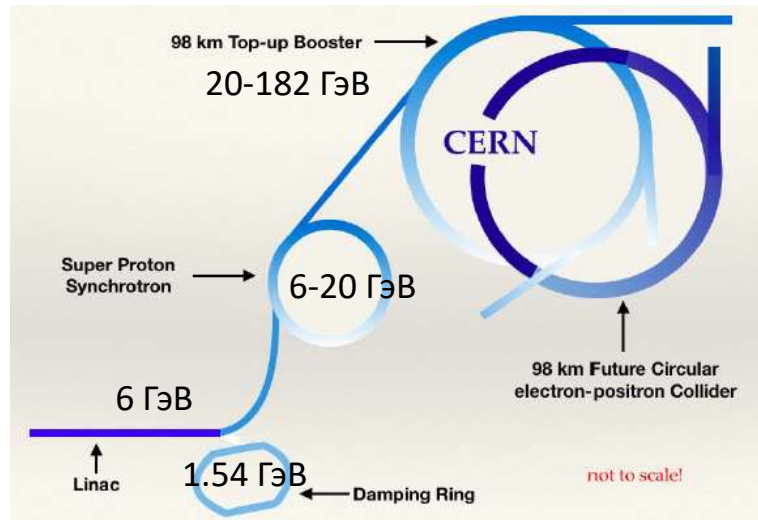
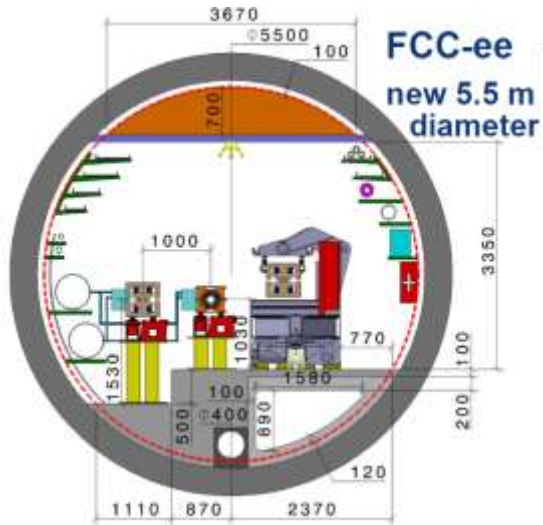
- Тоннель (≈ 100 км), ориентированный на FCC-hh (2×50 ТэВ); опционально FCC-he.
- Ограничение на мощность СИ ≤ 50 МВт на любой энергии.
- Два места встречи под углом 30 мрад.
- CW встреча.
- Тор-ап инжекция.



FCC-ee: параметры

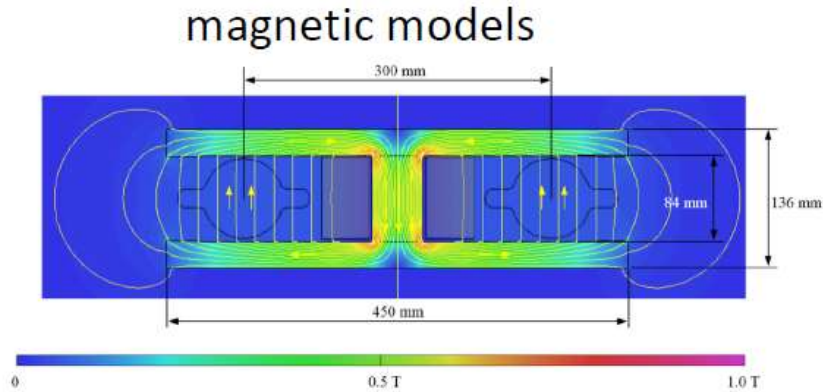
FCC-ee parameters		Z	W+W ⁻	ZH	ttbar	
Beam energy	GeV	45.6	80	120	175	182.5
Luminosity / IP	10 ³⁴ cm ⁻² s ⁻¹	230	28	8.5	1.8	1.55
Beam current	mA	1390	147	29	6.4	5.4
Bunches per beam	#	16640	2000	328	59	48
Average bunch spacing	ns	19.6	163	994	2763	3396
Bunch population	10 ¹¹	1.7	1.5	1.8	2.2	2.3
Horizontal emittance ϵ_x	nm	0.27	0.84	0.63	1.34	1.46
Vertical emittance ϵ_y	pm	1.0	1.7	1.3	2.7	2.9
β_x^* / β_y^*	m / mm	0.15 / 0.8	0.2 / 1.0	0.3 / 1.0	1.0 / 1.6	
beam size at IP: σ_x^* / σ_y^*	$\mu\text{m} / \text{nm}$	6.4 / 28	13 / 41	13.7 / 36	36.7 / 66	38.2 / 68
Energy spread: SR / total (w BS)	%	0.038 / 0.132	0.066 / 0.131	0.099 / 0.165	0.144 / 0.196	0.15 / 0.192
Bunch length: SR / total	mm	3.5 / 12.1	3 / 6.0	3.15 / 5.3	2.75 / 3.82	1.97 / 2.54
Energy loss per turn	GeV	0.036	0.34	1.72	7.8	9.2
RF Voltage /station	GV	0.1	0.75	2.0	4/5.4	4/6.9
Longitudinal damping time	turns	1273	236	70.3	23.1	20.4
Acceptance RF / energy (DA)	%	1.9 / ± 1.3	2.3 / ± 1.3	2.3 / ± 1.7	3.5 / (-2.8; +2.4)	3.36 / (-2.8; +2.4)
Rad. Bhabha/ actual Beamstr. Lifetime	min	68 / >200	59 / >200	38 / 18	37 / 24	40 / 18
Beam-beam parameter ξ_x / ξ_y		0.004 / 0.133	0.01 / 0.141	0.016 / 0.118	0.088 / 0.148	0.099 / 0.126
Interaction region length	mm	0.42	0.85	0.9	1.8	1.8

FCC-ee: размещение

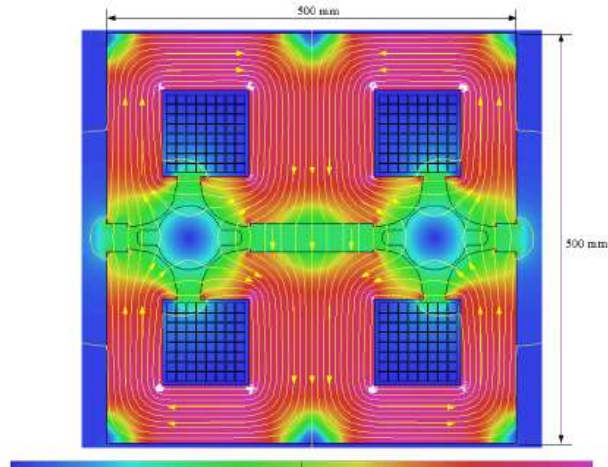


FCC-ee: прототипы

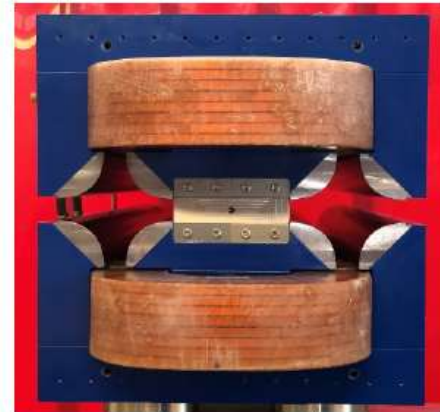
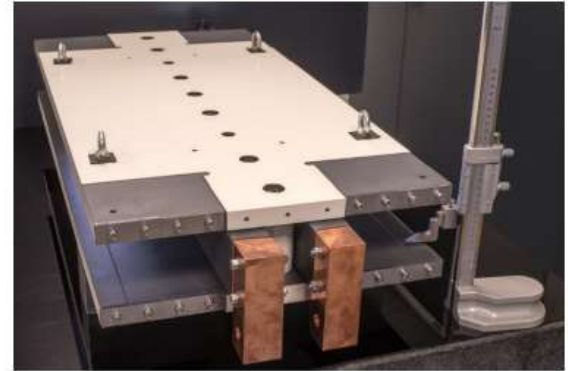
dipole



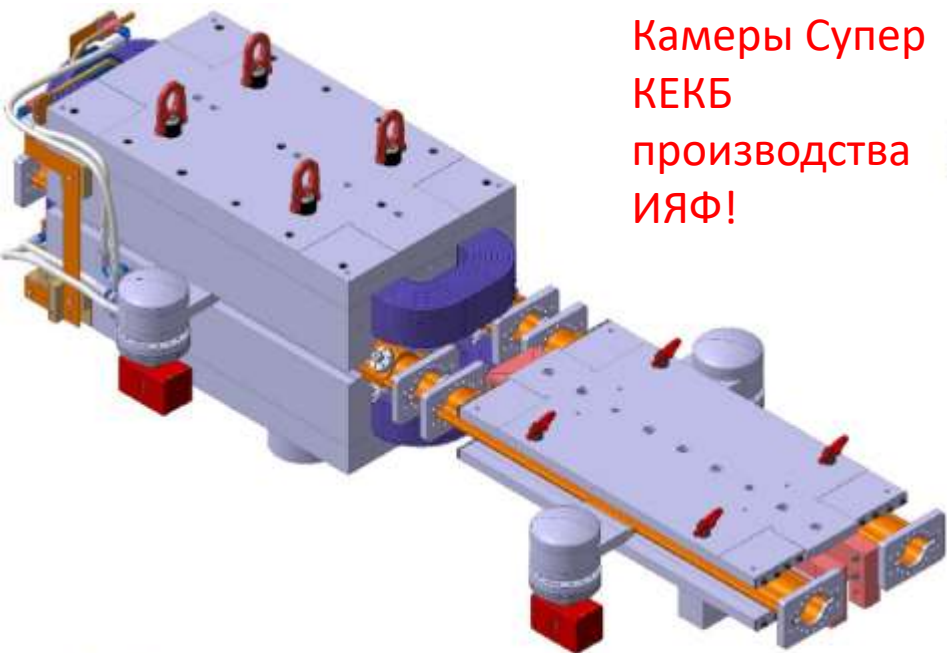
quadrupole



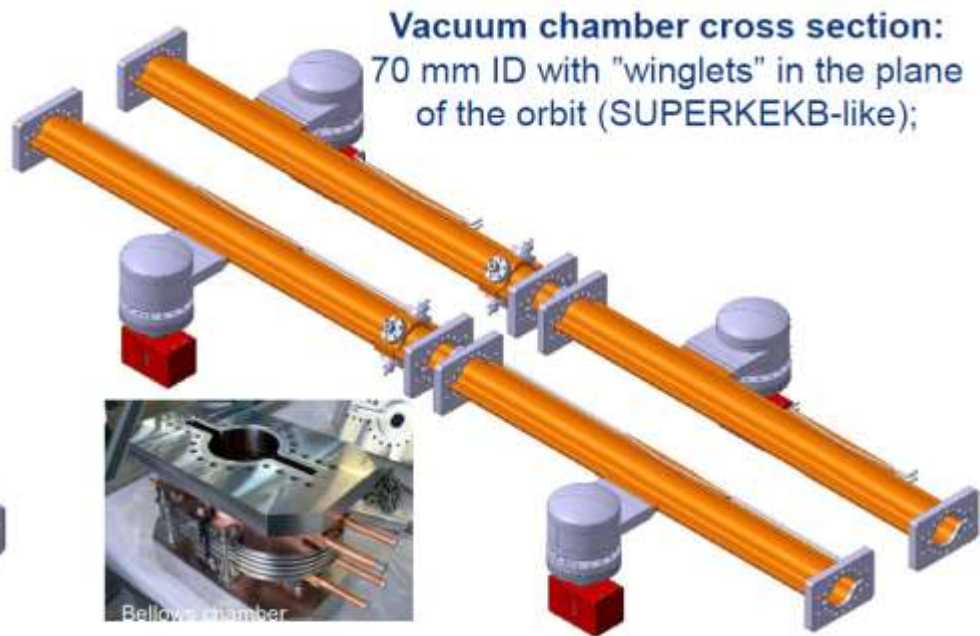
prototypes



FCC-ee: ячейка периодичности



Камеры Супер
КЕКБ
производства
ИЯФ!



Vacuum chamber cross section:
70 mm ID with "winglets" in the plane
of the orbit (SUPERKEKB-like);

- CAD model of the 1m-long twin dipole and quadrupole prototypes with arc vacuum chambers.
- The chambers feature lumped SR absorbers with NEG-pumps placed next to them.
- **Construction of chamber prototypes in coming months and integration with twin magnets**

FCC-ee: сценарий

working point	luminosity/IP [$10^{34} \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$]	total luminosity (2 IPs)/ yr	physics goal	run time [years]
Z first 2 years	100	26 $\text{ab}^{-1}/\text{year}$	150 ab^{-1}	4
Z later	200	52 $\text{ab}^{-1}/\text{year}$		
W	25	7 $\text{ab}^{-1}/\text{year}$	10 ab^{-1}	1
H	7.0	1.8 $\text{ab}^{-1}/\text{year}$	5 ab^{-1}	3
machine modification for RF installation & rearrangement: 1 year				
top 1st year (350 GeV)	0.8	0.2 $\text{ab}^{-1}/\text{year}$	0.2 ab^{-1}	1
top later (365 GeV)	1.4	0.36 $\text{ab}^{-1}/\text{year}$	1.5 ab^{-1}	4
total program duration: 14 years - including machine modifications phase 1 (Z, W, H): 8 years, phase 2 (top): 6 years				

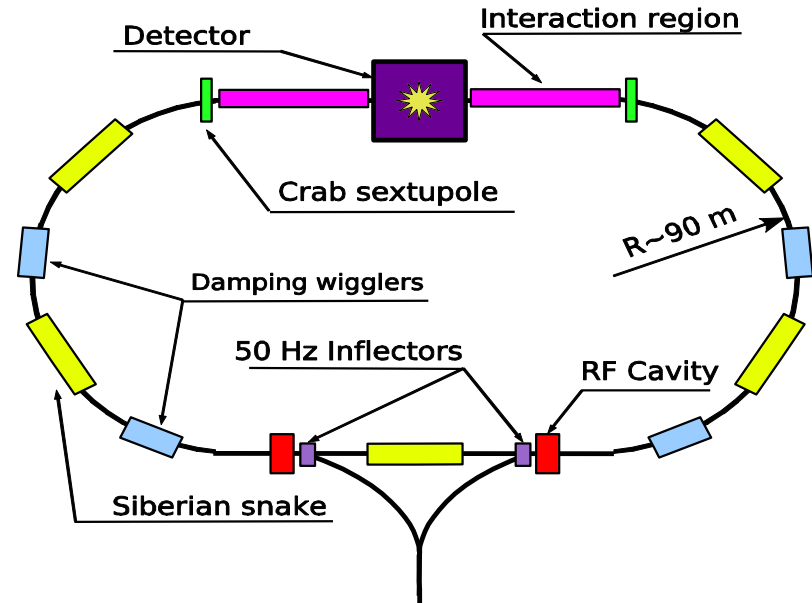
Супер Чарм/Тау Фабрика (СЧТФ) Новосибирск



СЧТФ: базовые принципы

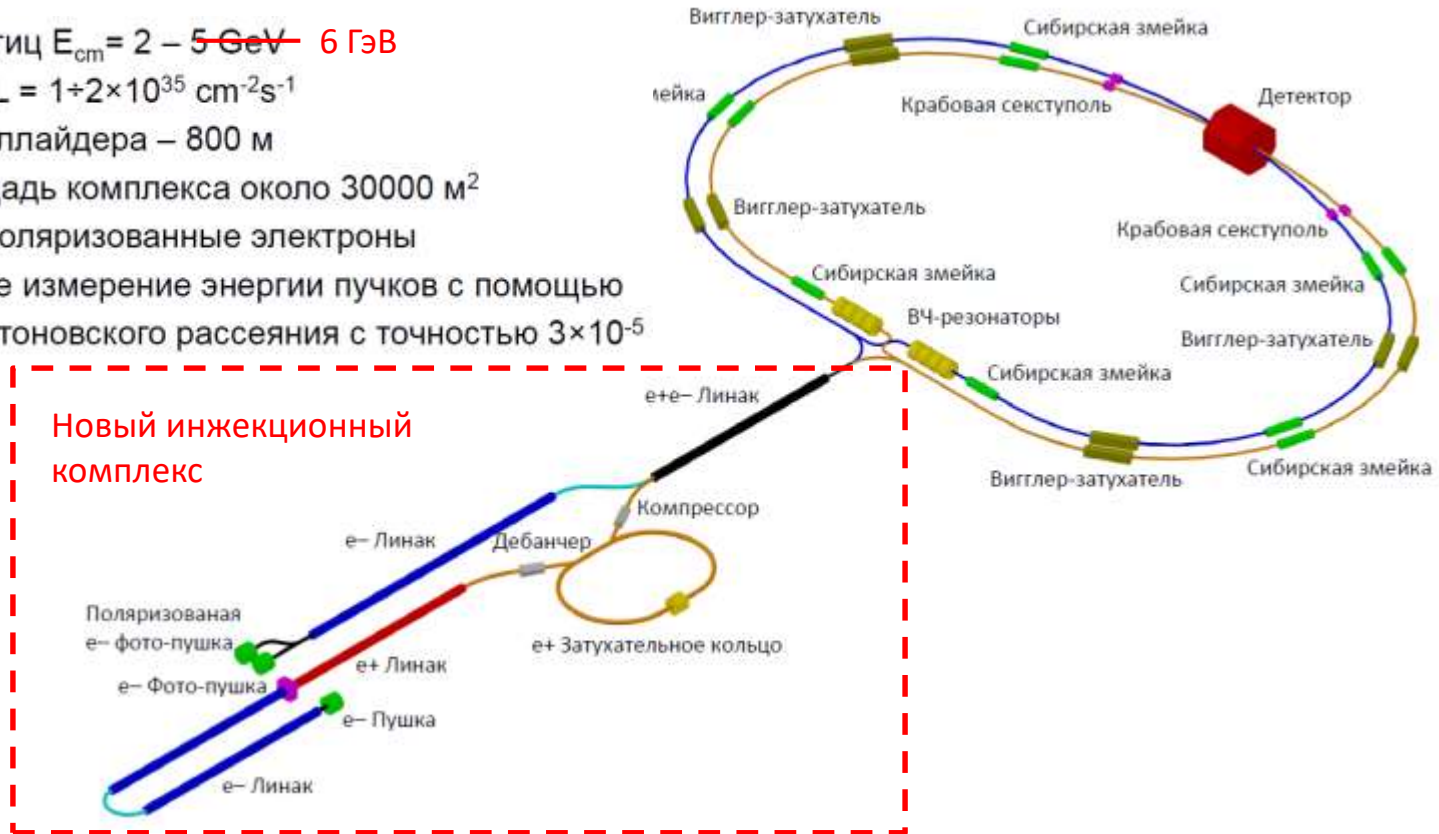
7 ноября 2006 г. – первое совещание:

- $2E = 3 \div 4.5$ ГэВ
- Crab Waist метод встречи
- Светимость $10^{35} \text{ см}^{-2}\text{с}^{-1}$
- Поляризованные электроны
- Симметричная встреча
- Без монохроматизации
- Калибровка по ОКР
- Модернизация ИК до $1 \cdot 10^{11} \text{ e}^+/\text{с}$

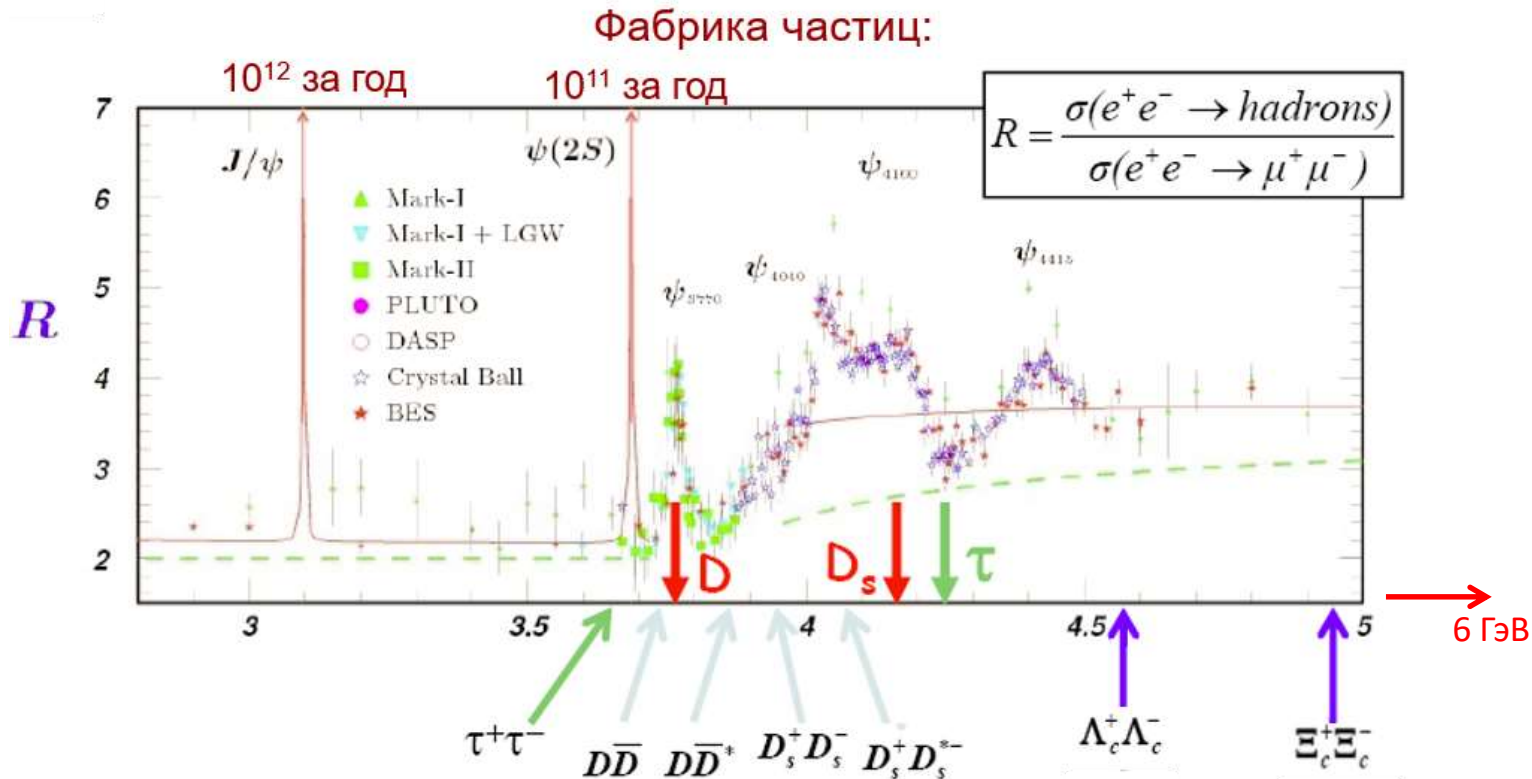


СЧТФ: схема

- ▶ Энергия частиц $E_{cm} = 2 - 5 \text{ GeV} - 6 \text{ ГэВ}$
- ▶ Светимость $L = 1+2 \times 10^{35} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$
- ▶ Периметр коллайдера – 800 м
- ▶ Общая площадь комплекса около 30000 м²
- ▶ Продольно поляризованные электроны
- ▶ Непрерывное измерение энергии пучков с помощью обратного комптоновского рассеяния с точностью 3×10^{-5}



СЧТФ: энергия

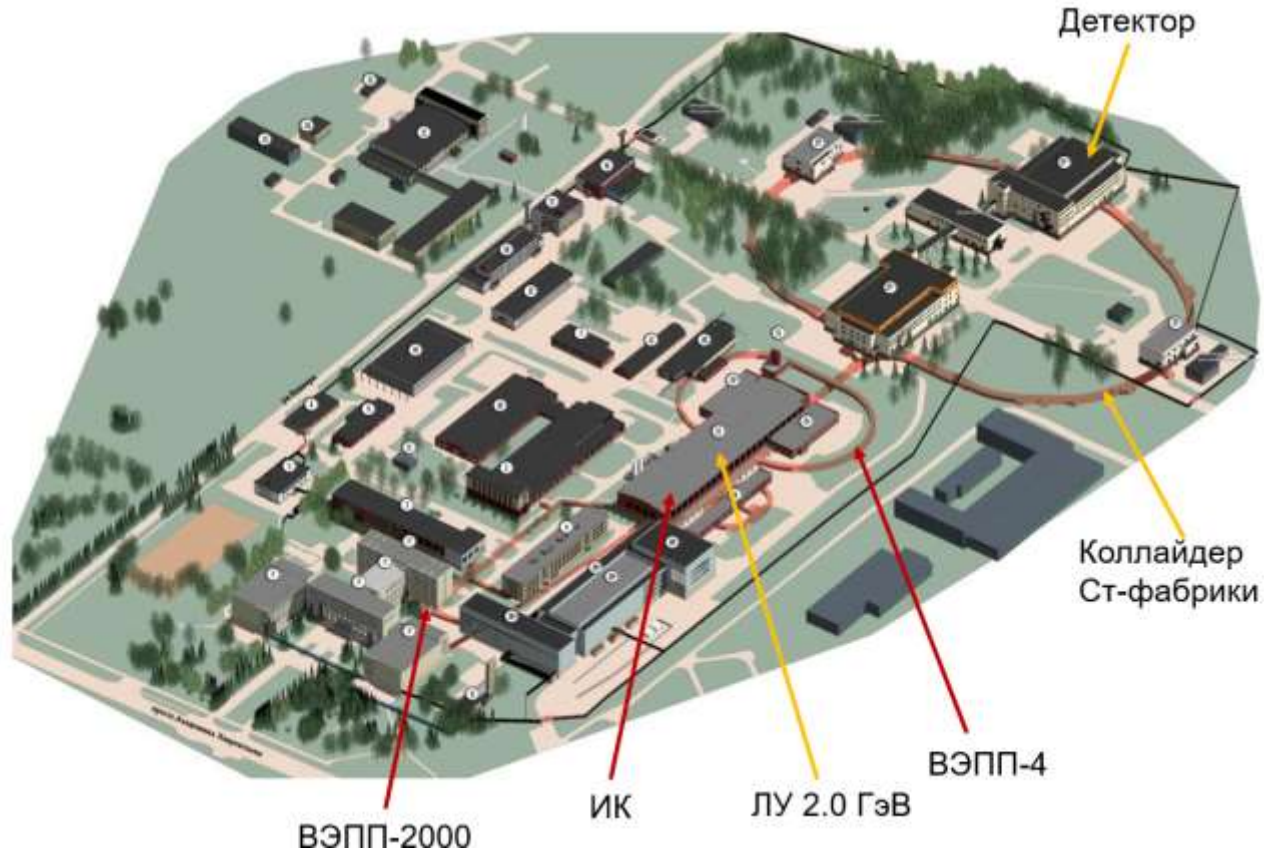


СЧТФ: параметры

Energy	1.0 GeV	1.5 GeV	2.0 GeV	2.5 GeV
Circumference	813.1 m			
Emittance hor/ver	8 nm/0.04 nm @ 0.5% coupling			
Damping time hor/ver/long	50/50/25 ms	30/30/15 ms		
Bunch length	21 mm	12 mm	10 mm	10 mm
Energy spread	$8.7 \cdot 10^{-4}$	$11 \cdot 10^{-4}$	$9.3 \cdot 10^{-4}$	$7.2 \cdot 10^{-4}$
RF frequency	499.95 MHz			
Harmonic number	1356			
Particles in bunch	$7 \cdot 10^{10}$			
Number of bunches	406 (10% gap)			
Bunch current	4.2 mA			
Total beam current	1.7 A			
Beam-beam parameter	0.135	0.135	0.121	0.097
Luminosity	$0.6 \cdot 10^{35}$	$0.9 \cdot 10^{35}$	$1.0 \cdot 10^{35}$	$1.0 \cdot 10^{35}$

IP: $\beta_y=0.8$ mm, $\beta_x=40$ mm

СЧТФ: размещение в ИЯФ



СЧТФ: статус

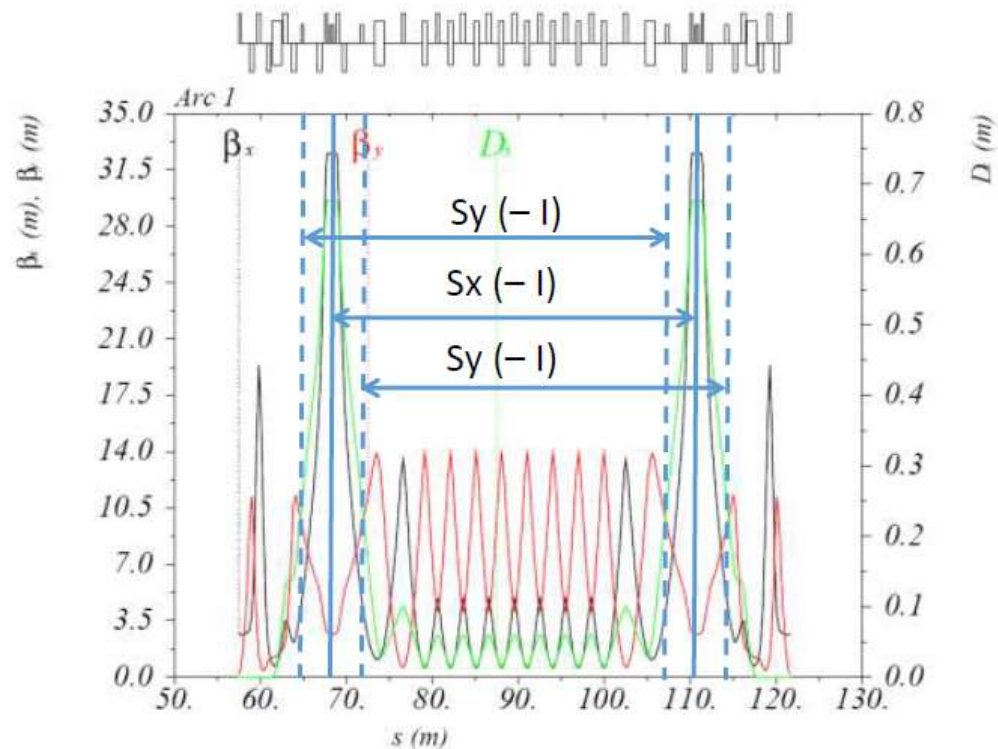
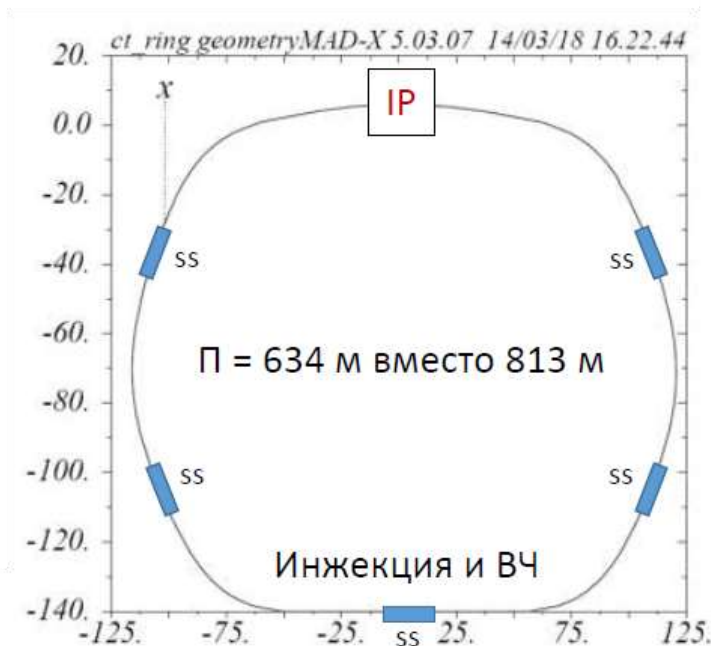
- Проект одобрен Минобрнауки РФ как один из шести проектов «мега-сайнс» и включен в Концепцию развития СО РАН до 2025 г.
- Проведено научно-техническое обоснование физической программы, коллайдера, детектора, инжекционного комплекса.
- Разработана проектная документация: научный проект, концептуальный технический проект, дорожная карта, инженерно-строительный проект.
- Получена официальная поддержка Европейского комитета по ускорителям будущего (ЕСФА).
- Проект прошел экспертизу Европейской Комиссии (Russian Mega Science projects – evaluation of the potential for cooperation with Europe Experts meeting in Brussels 19 June 2013).
- Подписаны соглашения о сотрудничестве с ЦЕРНом, КЕК (Япония), INFN (Италия), ОИЯИ (Дубна), Институтом Джона Адамса (Англия) и т.п.
- Распоряжение Правительства РФ предписывает представить к концу 2019 г. В Правительство РФ все необходимые документы для рассмотрения начала финансирования.

СЧТФ: планы

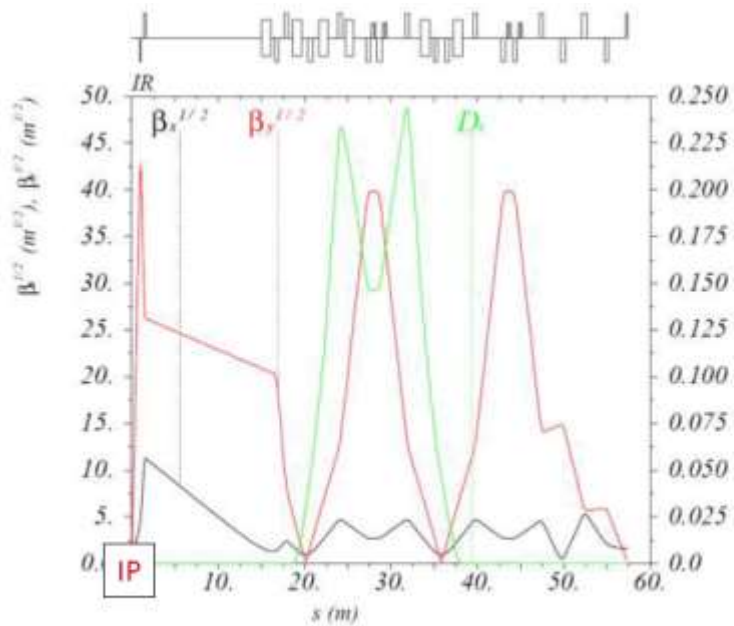
- Увеличение энергии пучка до 3 ГэВ согласно просьбе физиков. (Китай – 3.5 ГэВ, $P = 1$ км)
- Реалистичный проект области пересечения. $L^* = 0.6$ м \rightarrow 0.9 м.
- Короткий промежуток встречи (a la Katsunobu Oide).
- Желание отказаться от вигглеров-затухателей.
- Слегка ужесточить параметры (увеличить светимость).
- Получить нужные ДА, МА, время жизни с учетом внутрисгусткового рассеяния и, в конечном итоге, большую светимость.

СЧТФ: первая попытка модернизации (1)

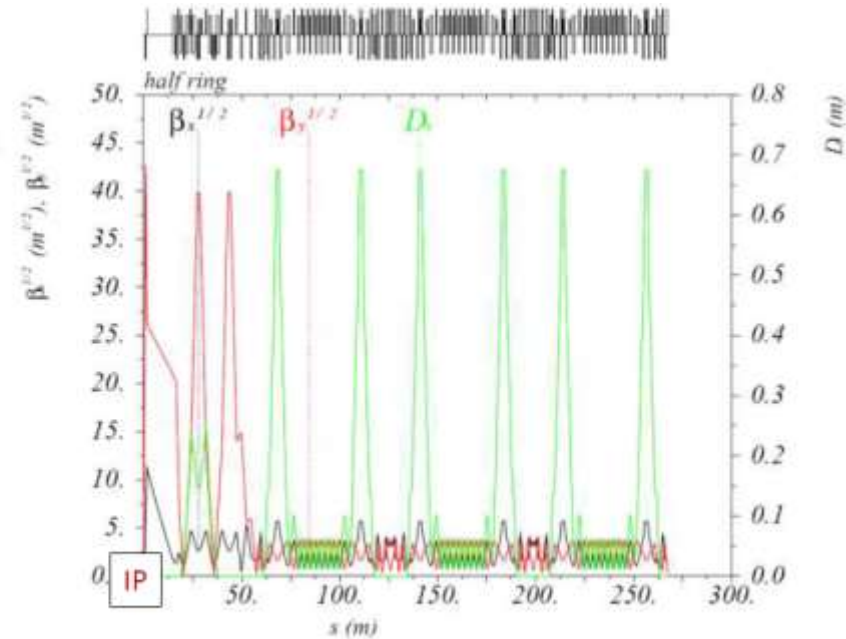
6 суперпериодов НМБА (как для ESRF)



СЧТФ: первая попытка модернизации (2)

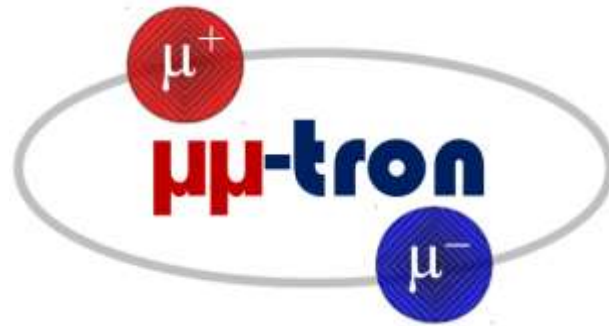


Промежуток встречи



½ кольца

e^+e^- коллайдер на низкую энергию для поиска и изучения связанного ($\mu^+\mu^-$) – состояния (атом димюония), а также, для исследования критических ускорительных технологий, необходимых для реализации Супер Чарм/Тау Фабрики и источника синхротронного излучения «СКИФ»



μ-трон: критические технологии

- Получение малого эмиттанта (30 нм @ 0.4 ГэВ = 500 пм @ 3 ГэВ) и малой длины сгустка (~1 см) – сложная оптика и динамика.
- То же при токе ~2 А – коллективные неустойчивости.
- Получение малой бетатронной связи (0.3-0.5%).
- Коррекция хроматизма и получение динамических апертуры и акцептанта.
- Прецизионность, предсказуемость, совпадение с моделью.
- Быстрые и мощные системы обратной связи.
- Вакуумная система для работы с большими токами (импедансы, нагрев, электронные облака, быстрая ионная неустойчивость).
- Капельная инжекция (top up) при небольшой ДА – использование мультипольного кикера.
- Разработка современных систем: магнитной, вакуумной, управления, диагностики, питания ...

μ-трон: факторы «за»

- Новый проект не имеющий аналогов в мире.
- Небольшое время реализации ~5 лет (для Супер Чарм/Тау Фабрики ~10 лет от начала финансирования).
- Небольшой объем финансирования, позволяющий начать работы прямо сейчас. Обеспечение – существующая грантовая система, нет необходимости в спец.решениях правительства.
- Наличие готовой инфраструктуры.
- Наличие готового инжектора.
- «Простой» детектор.
- Интересная ускорительная физика и физика частиц. Возможность «с нуля» сделать установку с уникальными параметрами.

Все это позволяет надеяться на привлекательность такого проекта для студентов и молодых исследователей и увеличение их притока как в ИЯФ, так и на соответствующие кафедры НГУ и НГТУ. Возможность быстрого получения результатов и, как следствие, быстрого карьерного роста.

μμ-трон: зачем?

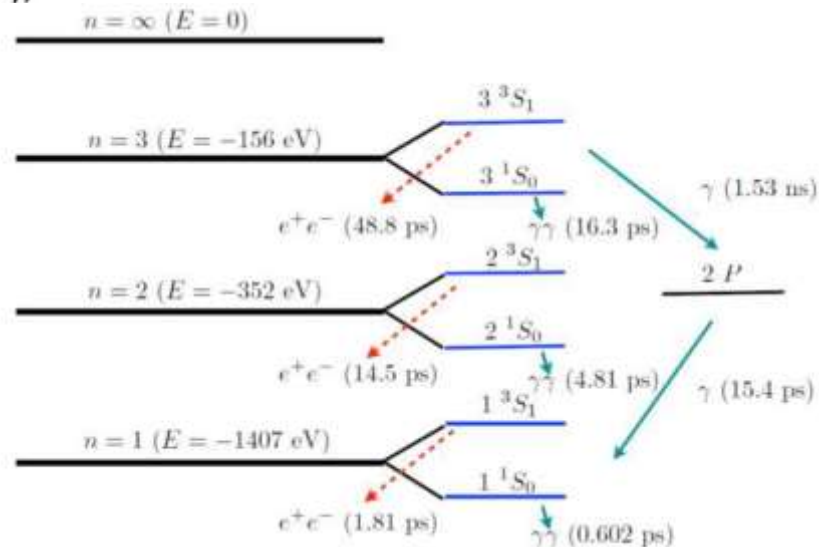
- Наблюдение димюония это открытие мирового уровня
- Тест КЭД $\left(\text{мюоний} \neq \text{позитроний} \times \frac{m_e}{m_\mu} \right)$
- Экспериментальные трудности приведут к новым методикам.
- Исследование свойств мюона
 - Разница в 3.5σ расчетом и измерением $(g-2)_\mu$
 - Проблема радиуса протона/дейтрона
 - Указание на нарушение лептонной инвариантности в распадах В-мезонов (LHCb), $B^+ \rightarrow K^+ e^+ e^-$ и $B^+ \rightarrow K^+ \mu^+ \mu^-$

μμ-трон: димюоний

- Димюоний это связанное состояние пары ($\mu^+\mu^-$).
- Система из 2 лептонов, описываемая КЭД
- Из 6 лептонных атомов (e^+e^-), (μ^+e^-), ($\mu^+\mu^-$), (τ^+e^-), ($\tau^+\mu^-$), ($\tau^+\tau^-$) наблюдались только два позитроний (e^+e^-), мюоний (μ^+e^-).

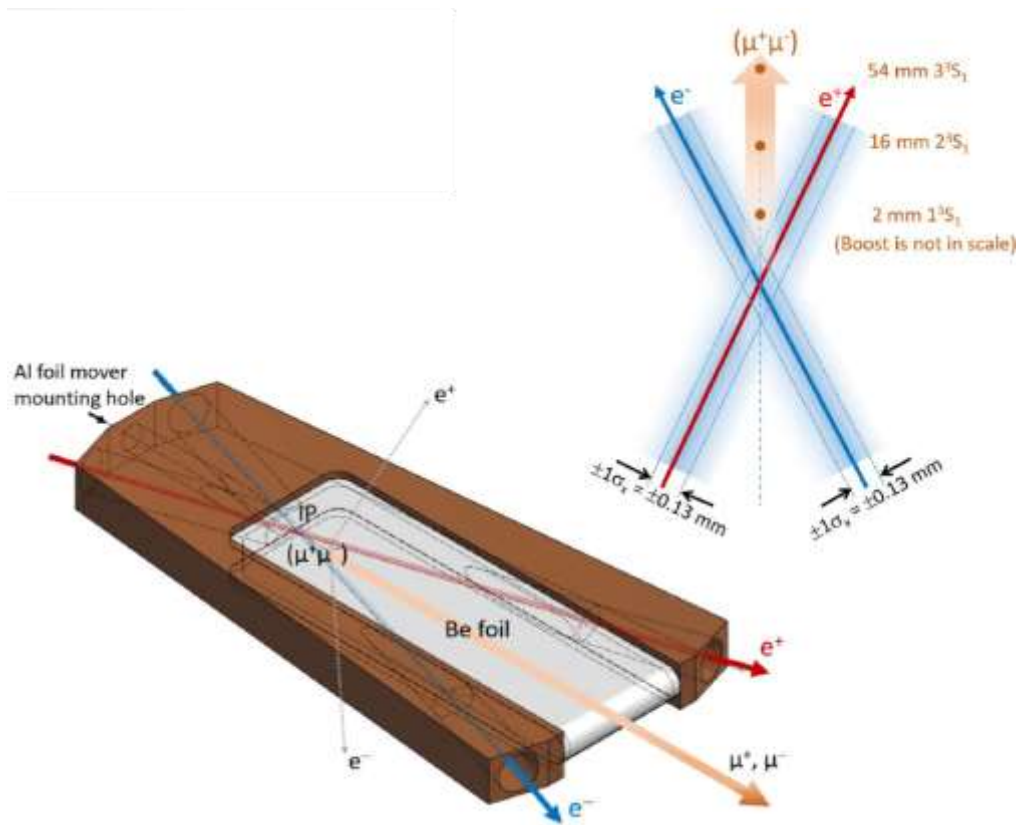
- Компактен (большая m_μ) $R_{\mu\mu} \approx \frac{1}{100} R_{\mu e} \approx \frac{1}{200} R_{ee}$

- Масса: $M_{\mu\mu} = 2 \times 105.7 \text{ MeV} - 1.4 \text{ keV}$
- Время жизни мюона: $\tau_{0,\mu\mu} = 2.2 \text{ мкс}$
- Время жизни димюония: $\tau_{0,\mu\mu}(n^3S_1) = n^3 \times 1.81 \text{ пс}$

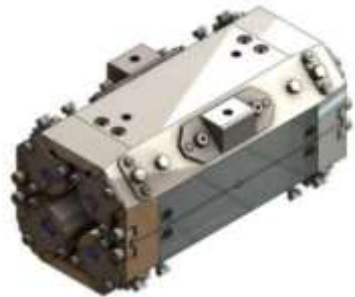
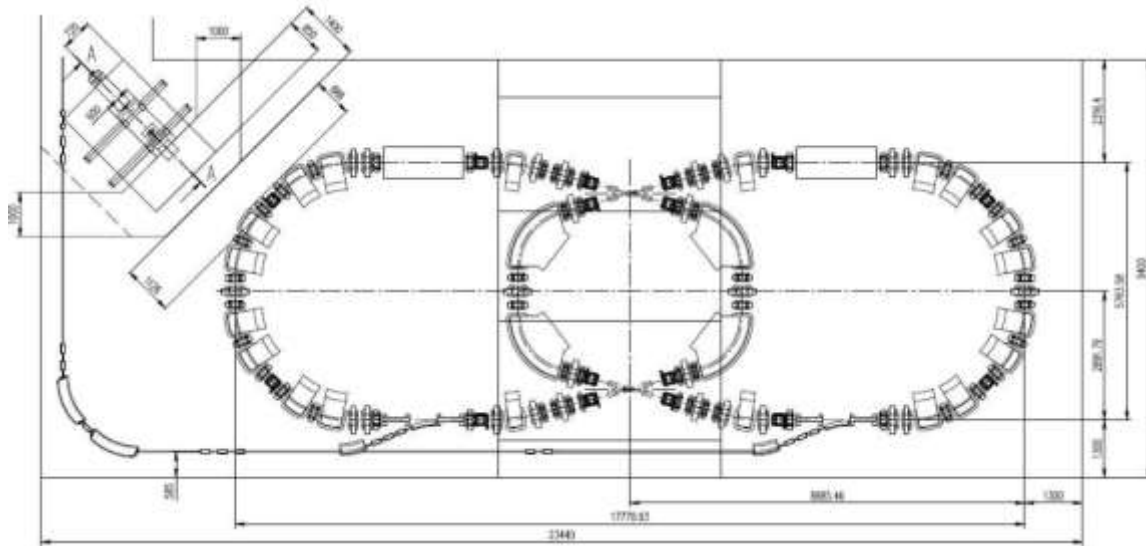


μμ-трон: регистрация

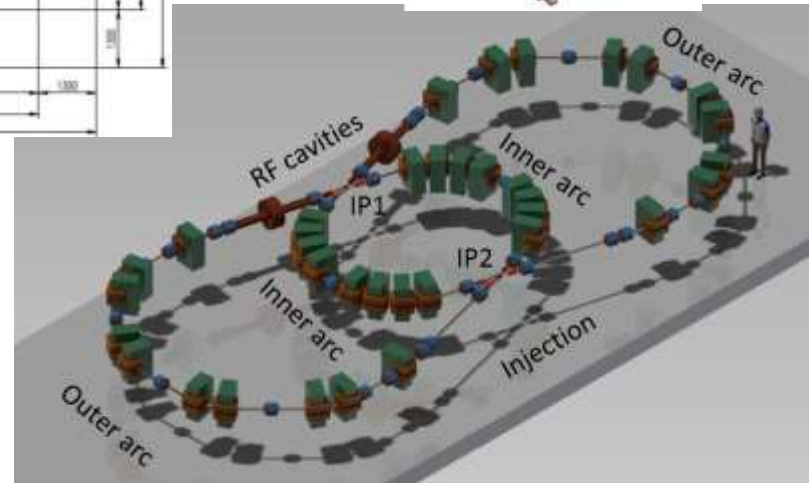
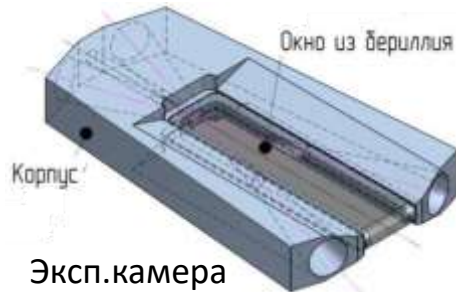
- Экспериментальная камера: два Ве-окна (0.5 мм), пропускающие e^+ , e^- от распадающихся атомов.
- Детектор представляет собой трековую систему с калориметром (сэндвич) над и под местом встречи + магнитный спектрометр в направлении вылета мюонов.
- Подвижная мишень-фольга Al (10 μm) позволяет исследовать переходы $S \rightarrow P$



μ-трон: коллайдер



Линза на постоянных магнитах.



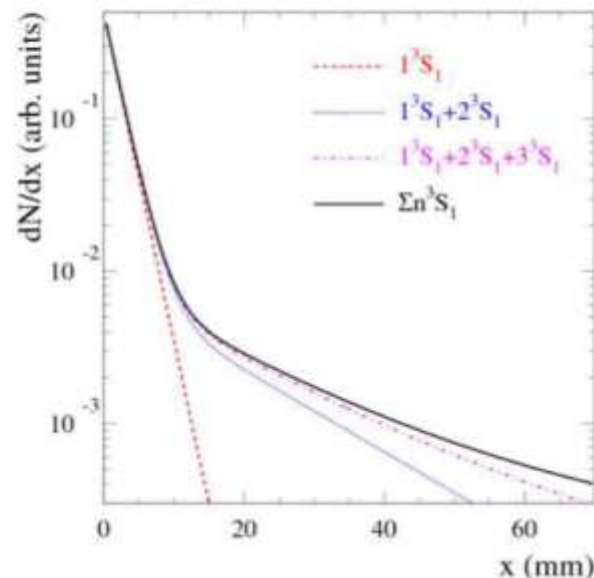
μ-трон: параметры

θ , град	75	M , МэВ	211.315
E_0 , МэВ	408.225	σ_M , кэВ	396
β_x/β_y , см	15/0.2	$\frac{\sigma_x}{\sqrt{2} \cos \theta'}$, МКМ	277
σ_z , см	1.1		
$\varepsilon_x/\varepsilon_y$, нМ	68/0.34	$I(30 \text{ bunch})$, А	1.7
σ_δ	8×10^{-4}	\mathcal{L} , см ⁻² с ⁻¹	8.6×10^{31}
ν_s	0.019	$\dot{N}(1S, l > 2 \text{ мм})$	4.7 час ⁻¹
ξ_x	1.6×10^{-6}		
ξ_y	1.1×10^{-3}	$N_p(1 \text{ bunch})$	3.5×10^{10}
ξ_z	-2.1×10^{-3}	N_{limit}	1.6×10^{11}

μ-трон: эффективность

Событий		за 1 час	за 4 месяца
$x > 2 \text{ mm}$	1S/2S/3S	4.7/1.4/0.5	13k/4k/1k

- Эффективность регистрации 15-30%
- Разрешение детектора по вершине $150 \text{ }\mu\text{m}$
- Результирующее разрешение $\sigma_{vtx} = 320 \text{ }\mu\text{m}$
- Для подавления упругого рассеяния требуется $x_{vtx} > 6.25 \sigma_{vtx} = 2 \text{ mm}$



Заключение

- ИЯФ активно участвует в работе над (всеми) тремя планируемыми электрон-позитронными коллайдерами: FCC-ee (100 км), Супер Чарм/Тау Фабрика ($\approx 0.6-0.8$ км) и $\mu\mu$ -трон (~ 0.03 км).
- Несмотря на большую разницу в размере, энергии, физической программе в проектах много общего. Необычная схема встречи, жесткая фокусировка, большой хроматизм, проблемы с ДА, малый эмиттанс + большой ток и т.д.
- Исходя из требуемого времени реализации логично рассматривать $\mu\mu$ -трон как «полигон» для отработки технологий и компонентов для СЧТФ, а последнюю – как «полигон» для FCC-ee.