

Планируемые эксперименты на ВЭПП-6

Логашенко И.Б., Богомягков А.В., Левичев Е.Б., Синяткин С.В.,
Гармаш А.Ю., Барняков А.Ю. и многие многие другие

По материалам рабочего совещания «ВЭПП-2000/ВЭПП-6», 18-19 декабря 2025

Почему ВЭПП-6

Действующие коллайдеры ИЯФ

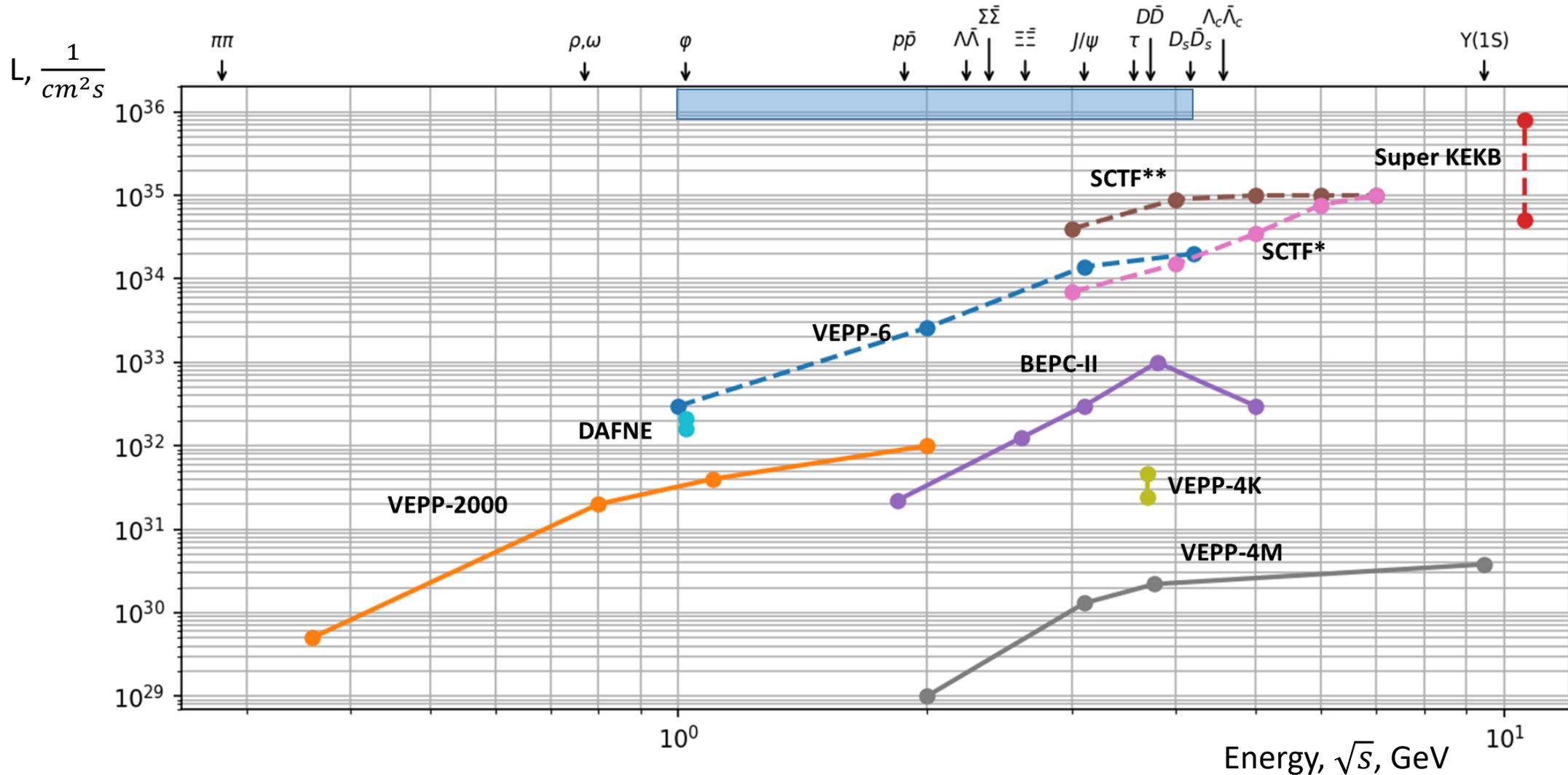
- ВЭПП-2000
Нет конкурентов по светимости/статистике
Частично ограничены детекторами
Ограничены энергией - есть много интересного выше 2 ГэВ
- ВЭПП-4М
Проигрываем ВЕРС-II по светимости – только небольшое число задач, где светимость не важна (например, массы)
Выше 5 ГэВ нет конкурентов – но светимость недостаточна
Требуется поддержание устаревшей инфраструктуры

Нужна новая машина с энергией выше 2 ГэВ с высокой светимостью

- Конкурентоспособная в мире (лучшая в своей нише) – *высокая светимость*
- Разнообразная физическая программа – *выше 2 ГэВ*
- Нам по силам, наличие у нас ключевых технологий (ускорительных и детекторных)
- Максимальное использование существующей инфраструктуры ИЯФ
- Разумная стоимость – потенциальная возможность получения целевого финансирования

ВЭПП-6

Электрон-позитронные коллайдеры в мире



Физическая программа ВЭПП-6

Структура $e^+e^- \Rightarrow$ адроны в сканировании

прямое измерение R в области от 1 до 3 ГэВ

эксклюзивные многочастичные конечные состояния \Rightarrow динамика (амплитудный анализ)

$(g-2)$, $\alpha(s)$, тест моделей pQCD, вычисления на решетках и др.

Физика барионов

ЭМ формфакторы гиперонов

относительная фаза ЭМФФ, поляризация гиперонов

взаимодействие в конечном состоянии

Фабрика чармония (ψ' , J/ψ , а также h_c , η_c , χ_c в их распадах)

радиационные и адронные переходы в системе чармония

адронные распады чармония \Rightarrow спектроскопия легких адронов, поиск гибридов и глюболов

слабые распады J/ψ

невидимые распады J/ψ (поиск «темного» фотона, аксионы и др.)

Дополнительные возможности:

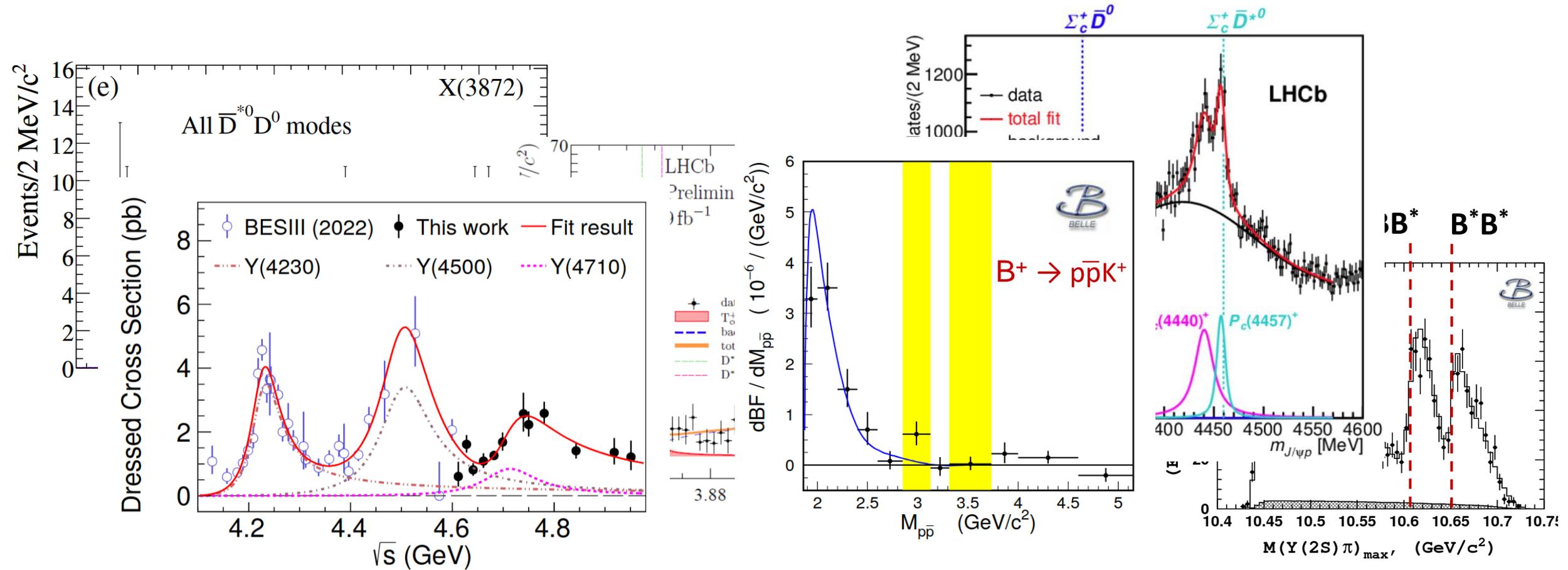
новая физика, $e^+e^- \Rightarrow D^{*0}$ (большая статистика)

энергетическое сканирование сечений $e^+e^- \rightarrow DD, DD\pi, DD^*, DD\pi\pi, D^*D^* \dots$ (повышенная энергия)

двухфотонная физика, физика τ и т.д.

Большая статистика \equiv Новые эффекты

Обнаружено множество (десятки!) структур в системах с тяжелыми кварками (с, b), как правило **вблизи порогов рождения** систем стабильных (в масштабе сильного взаимодействия) частиц (B,D,J/ ψ ...).



В системах, состоящих из легких кварков (u,d,s), эти эффекты еще **изучены очень плохо**. Однако уже есть первые указания. (доклад Л.Кардапольцева на рабочем совещании ВЭПП-2000/ВЭПП-6)

Физика чармония

BESIII На данный момент:
 $\sim 10^{10} J/\psi$ $\sim 3 \times 10^9 \psi(2S)$

ВЭПП6 Год работы со светимостью 10^{34} : $\sim 10^{11} J/\psi$ или $\sim 2 \times 10^{10} \psi(2S)$

Мода распада	Бранчинг / сечение	Число событий на BESIII (на данный момент)	Число событий на ВЭПП-6 (год работы)
$J/\psi \rightarrow \gamma \eta_c$	$(1.41 \pm 0.14) \%$	10^8	10^9
$\psi' \rightarrow \gamma \eta_c$	$(3.6 \pm 0.5) \times 10^{-3}$	10^7	7×10^7
$\psi' \rightarrow \gamma \chi_{c0}$	$(9.75 \pm 0.22) \%$	3×10^8	2×10^9
$\psi' \rightarrow \gamma \chi_{c1}$	$(9.75 \pm 0.27) \%$	3×10^8	2×10^9
$\psi' \rightarrow \gamma \chi_{c2}$	$(9.38 \pm 0.23) \%$	3×10^8	2×10^9
$\psi' \rightarrow \gamma \eta_c(2S)$	$(5.4 \pm 3.4) \times 10^{-4}$	2×10^6	10^7
$\psi' \rightarrow \pi^0 h_c$	$(7.4 \pm 0.5) \times 10^{-4}$	2×10^6	10^7
$e^+ e^- \rightarrow \pi^+ \pi^- h_c$	$(50 \pm 10) \text{ пб}$	$7 \times 10^4 (11 \text{ фб}^{-1})$	5×10^6

Большой объем данных на ψ и ψ'

– позволит исследовать свойства «легких» (до порога рождение $D\bar{D}$ системы) состояний чармония с высокой точностью;
 (доклад А.Винокуровой)

– предоставляет широкие возможности по исследованию структуры систем легких кварков в адронных (многочастичных) распадах чармония;

распад чармония происходит через аннигиляцию c и анти- c кварков в систему глюоны+фотоны => глюонно обогащенная среда, возможно рождение «экзотических» кварк-глюонных систем (гибриды) или чисто глюонных систем (глюболы);
 (доклад Л.Кардапольцева)

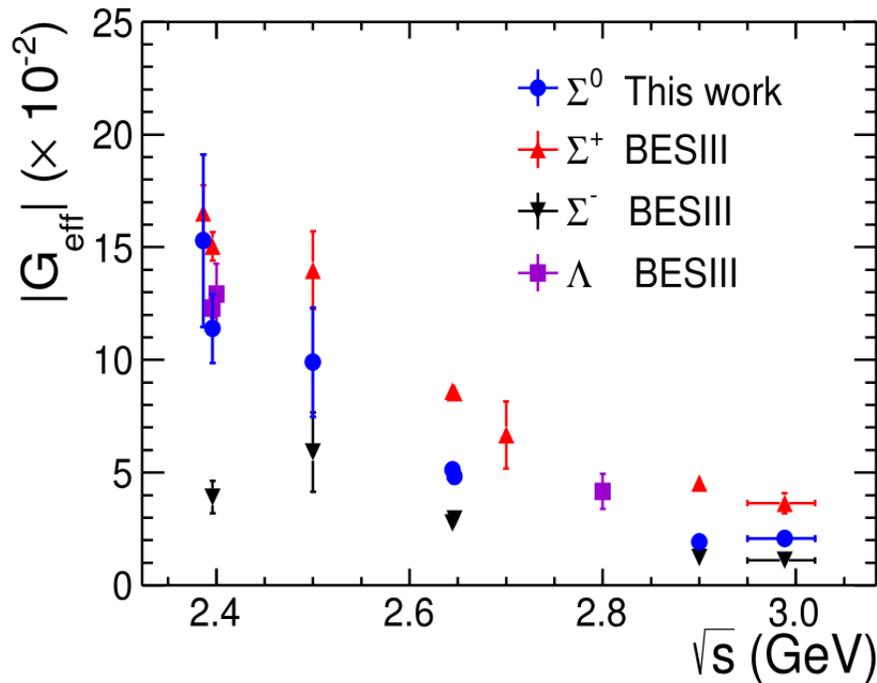
Чармоний	Полный известный бранчинг
η_c	60 %
χ_{c0}	30 %
χ_{c1}	50 %
h_c	70 %
χ_{c2}	30 %
$\eta_c(2S)$	10 %



ЭМФФ легких гиперонов: $\Lambda\Sigma\Omega$

Первые результаты по измерению ЭМФФ для гиперонов в эксперименте BESIII.

Phys. Lett. B 831 (2022) 137187



BESIII: статистика в области $< \sim 3$ ГэВ всего $O(100 \text{ пб}^{-1})$, несколько точек по энергии.

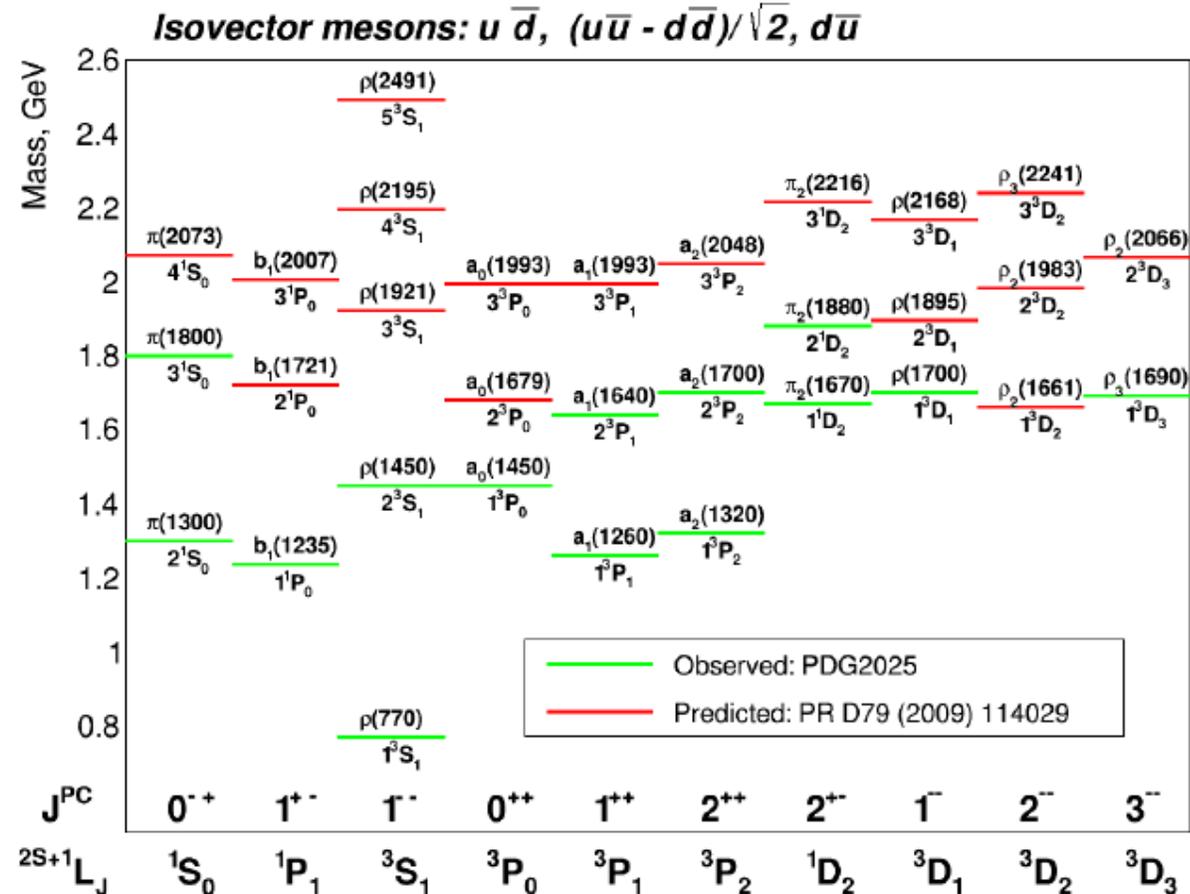
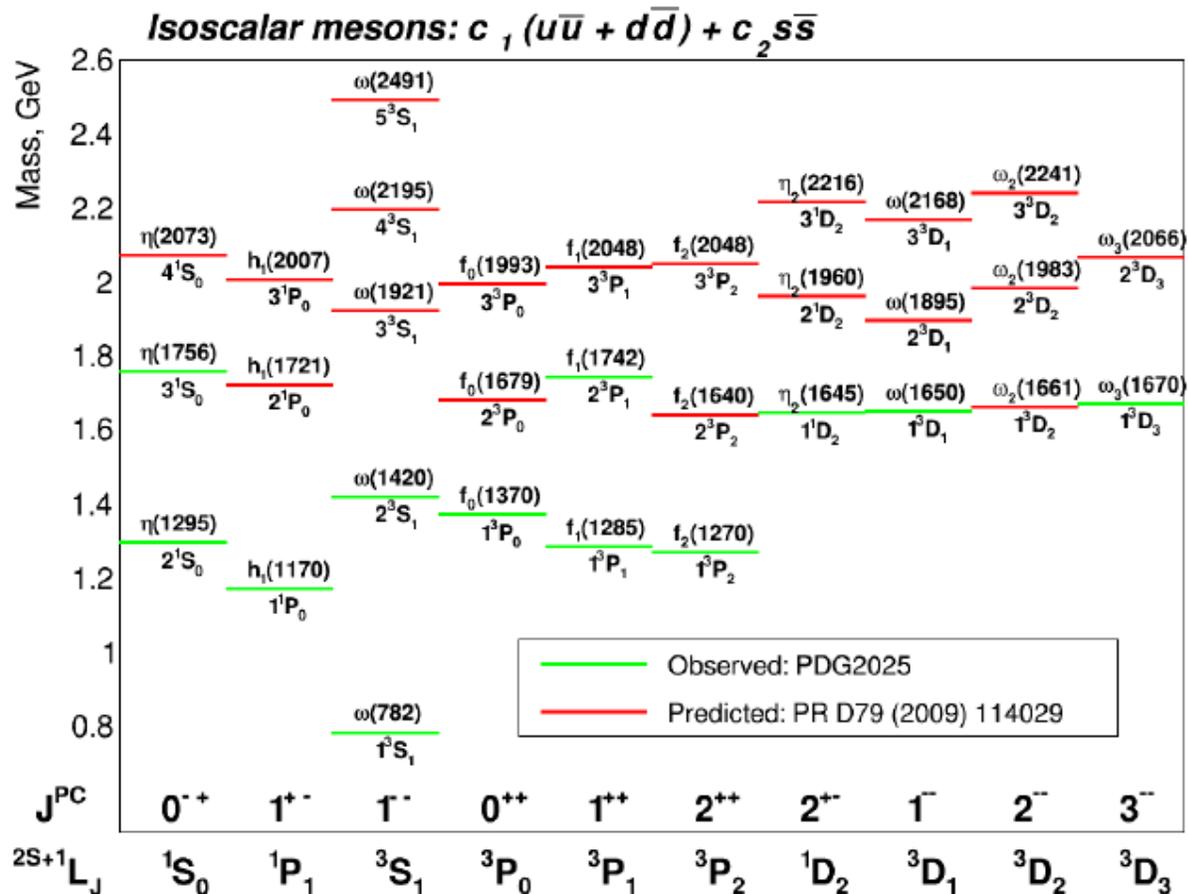
ВЭПП-6: ЭМФФ и относительная фаза могут быть детально (с малым шагом по энергии) и с высокой точностью (статистикой) измерены от порога рождения ~ 2 ГэВ и до ~ 3 ГэВ.

При проектной светимости ВЭПП-6, темп набора статистики составит $\sim 200 \text{ пб}^{-1}$ в сутки!



(диапазон от 2 ГэВ до 3 ГэВ с шагом 10 МэВ за год)

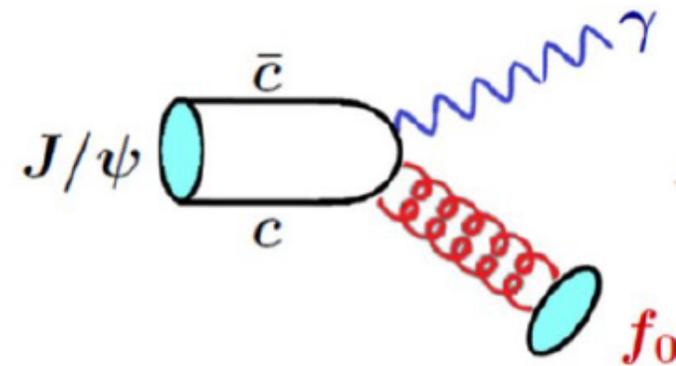
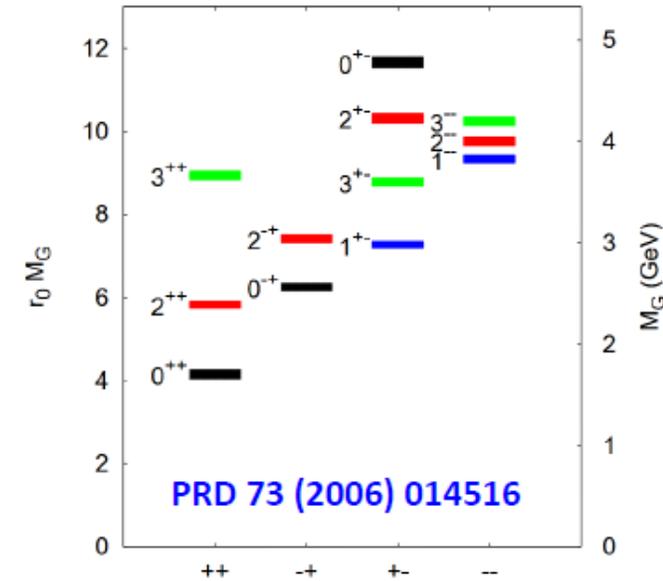
Спектр легких мезонов (u, d кварки)



- Спектр высших возбуждений мезонов **все еще плохо изучен**
- ВЭПП-6 идеально подходит для изучения этого спектра **в прямом сканировании и в распадах J/ψ и $\psi(2S)$**

Глюболы в рад. распадах J/ψ и $\psi(2S)$

- Глюбол – это **связанное состояние** только **глюонных полей**
- Их изучение **важно для понимания механизма генерации динамической массы**
- **КХД на решетке** предсказывает легчайшие глюболы с **квантовыми числами $0^{++}, 2^{++}, 0^{-+}$**
- J/ψ и $\psi(2S)$ **радиационно распадается** в два глюона, давая **обогащенную глюонами среду**
- Высокая вероятность перехода в состояния с **глюонными возбуждениями**



Требования к коллайдеру

1. Наиболее компактный (стоимость)
2. Энергия пучка 500-2100 МэВ
3. Ток пучка $I_{beam} \leq 1.5 \text{ A}$ (PEP-II: $I(e^+) = 3.2 \text{ A}$, DAΦNE: $I(e^-) = 2.45 \text{ A}$)
4. $\mathcal{L} \gtrsim \mathcal{L}_{\text{record}}$, $\beta_y^* = 3 \text{ мм}$, крабовая перетяжка, ФФ расслабленный
 - а) ФФ близок к Супер С-Тау, $\beta_y^* = 1 \text{ мм}$
5. Удовлетворительное время жизни $\tau_{\text{Тушек}} \geq 600 \text{ с}$

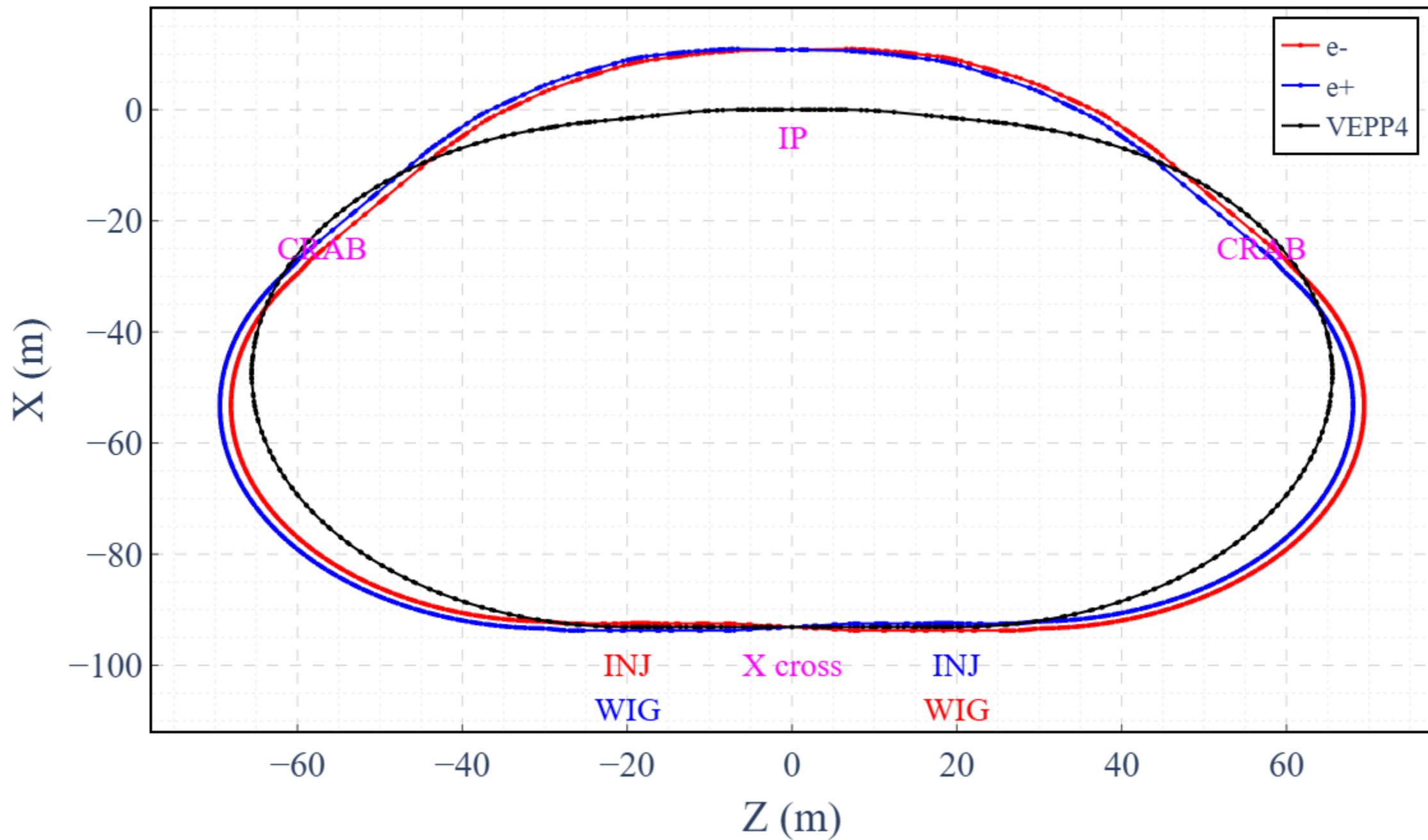
ВЭПП-6

Существующие установки

	DAΦNE	ВЭПП-2000	БЕРСИ	БЕРСИ
$\Pi, \text{ м}$	97	24.39	237.53	237.53
$E_{beam}, \text{ МэВ}$	500	900	1550	1900
$\mathcal{L}, 10^{32} \text{ см}^{-2} \text{ с}^{-1}$	2.13 <i>KLOE-2</i> 4.53 <i>SIDDHARTA</i>	0.9	3.1	10

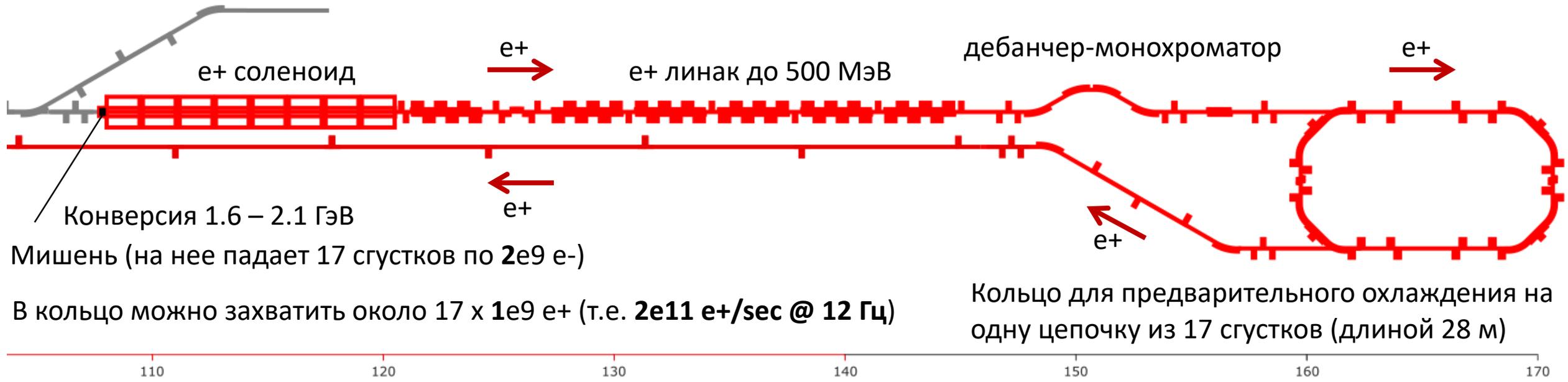
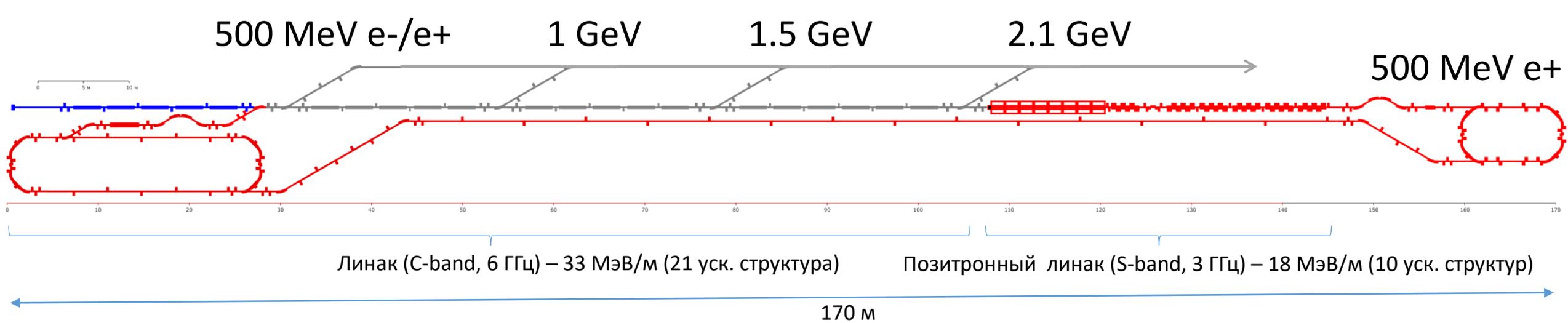
$E, \text{ МэВ}$	500	1000	1550	2100
$\Pi, \text{ м}$	388			
$2\theta, \text{ мрад}$	50			
$\beta_x^*/\beta_y^*, \text{ мм}$	150/3			
$I_{tot}, \text{ А}$	0.26	0.78	1.5	1.5
$\varepsilon_x, \text{ nm}$	55	33	31	30
$T_{Touschek}, \text{ с}$	900	900	1000	2000
$\mathcal{L}, 10^{32} \text{ см}^{-2} \text{ с}^{-1}$	1.7 (DAΦNE: 2-4)	25 (ВЭПП-2000: 0.9)	150 (БЕРСИ: 3.1)	200 (БЕРСИ: 10)

Layout



Почему нужен новый позитронный источник?

1. Текущая производительность ИК ВЭПП-5 – $4.8 \cdot 10^9$ е+/сек (@ 10 Гц). Ее можно увеличить в 16 раз за счет нового позитронного соленоида, нового группирователя-предускорителя, дебанчера-монохроматора, увеличения жесткости фокусировки в линаке и небольшого увеличения энергии электронного линака. То есть предел ИК ВЭПП-5 $0.8 \cdot 10^{11}$ е+/сек @ 10 Гц («ИК ВЭПП-5», научная сессия ИЯФ СО РАН, февраль 2025). Для ВЭПП-6 нужно $\sim 2 \cdot 10^{11}$ е+/сек.
2. Текущая энергия ИК ВЭПП-5 – 430 МэВ. Энергия инжекции в ВЭПП-6 – до 2.1 ГэВ.
3. Текущая схема работы ИК ВЭПП-5: многократное накопление позитронов в НО, относительно редкая (1 раз в 5 сек) инжекция в бустеры коллайдеров. Для ВЭПП-6 необходима top-up инжекция на энергии эксперимента.

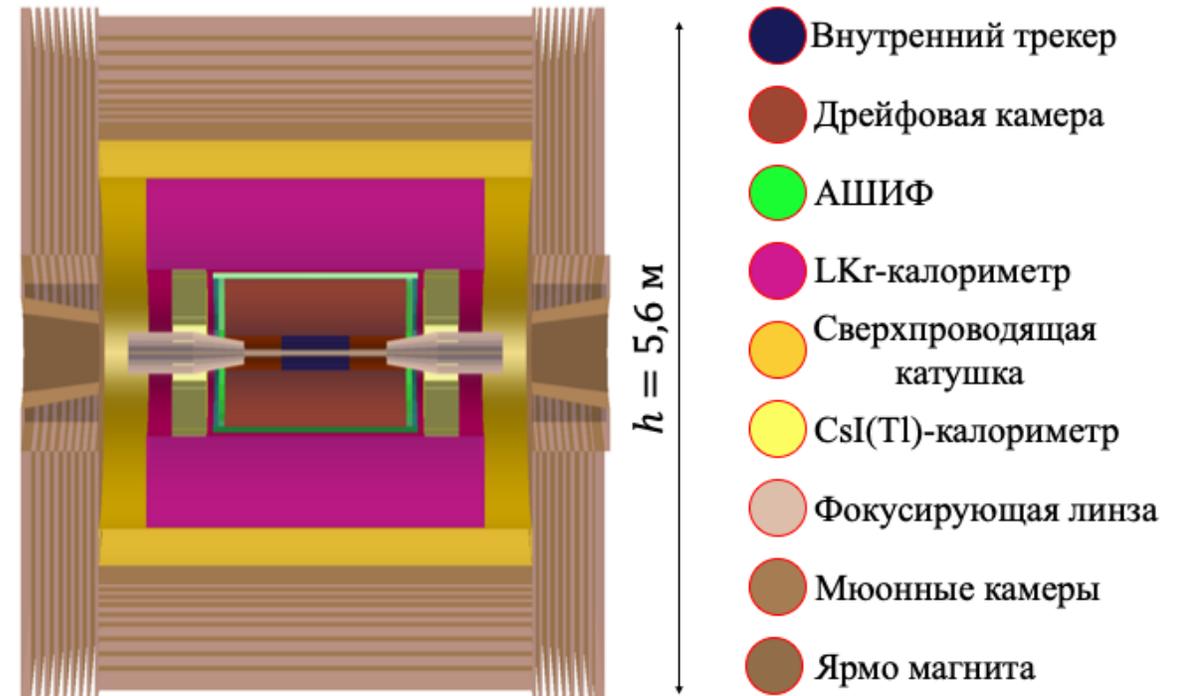
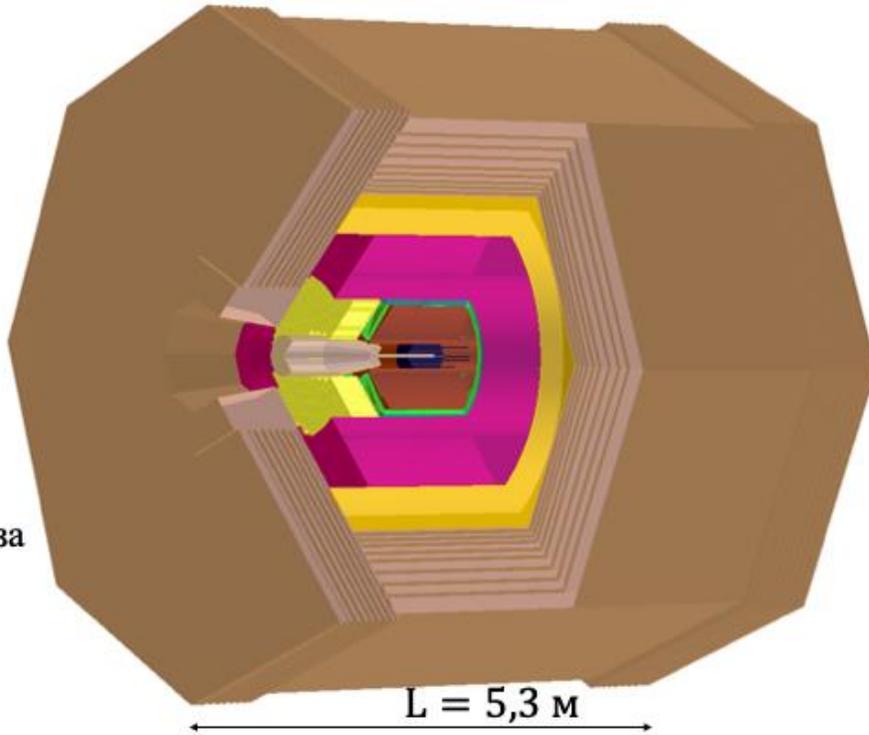


Для более полного охлаждения необходимо второе охлаждающее кольцо с меньшей апертурой (куда можно также поставить виглеры).

Параметры близкие к накопителю-охладителю ИК ВЭПП-5. Времена охлаждения: $\tau_x = 11 \text{ мс}$, $\tau_y = 17 \text{ мс}$, $\tau_s = 12 \text{ мс}$, т.е. можно работать с частотой 25 Гц.

Концепт универсального детектора

- Внутренний трекер
- Дрейфовая камера
- АШИФ
- LKr-калориметр
- Сверхпроводящая катушка
- CsI(Tl)-калориметр
- Фокусирующая линза
- Мюонные камеры
- Ядро магнита



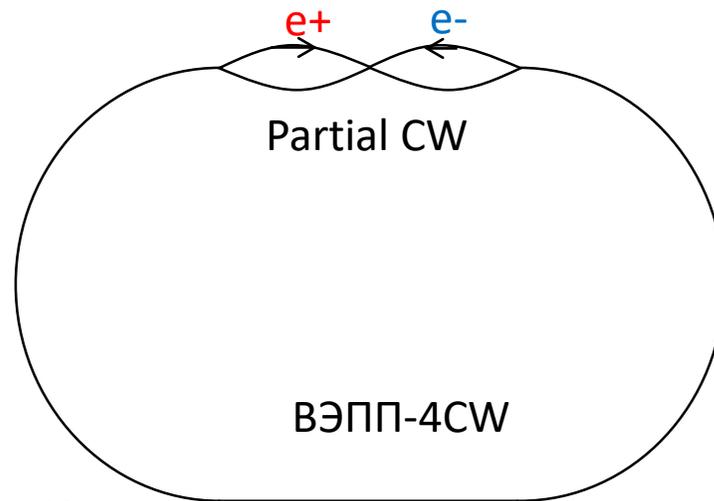
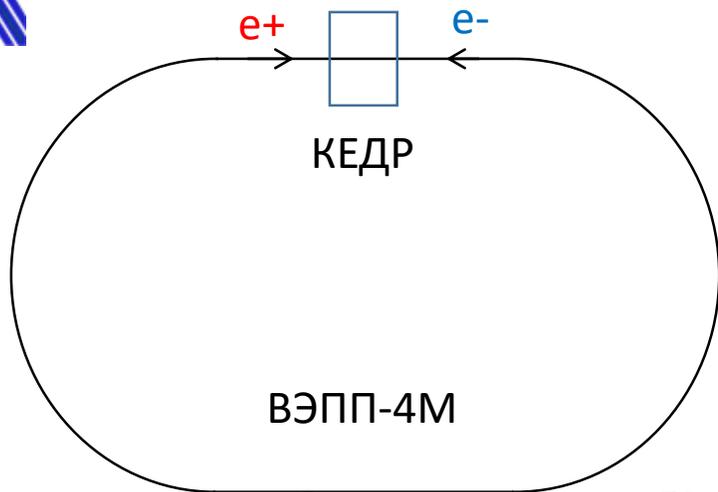
Первоначальный концепт – есть множество других вариантов. Многочисленные обсуждения в течении 2025 года.



Вопросы и проблемы CW коллайдеров

- Эффекты встречи с большим углом Пивинского и CW
- Нелинейная динамика и крабовые секступоли, ограничение динамической апертуры и времени жизни по Тушеку
- Зависимость параметров встречи от энергии пучка
- Фоны в области детектора
- Проектирование квадруполь и соленоидов *финального фокуса* (FF)
- Конструкция криостата и криосистемы
- Конструкция и охлаждение вакуумной камеры в *месте встречи* пучков (IP)
- Импеданс вакуумной камеры в IP
- Система разведения/сведения пучков в IP
- Необходимая точность сборки и выставки элементов FF
- Влияние поля детектора на механическую устойчивость системы FF и динамику пучка
- Влияние потерь частиц на «срывы» поля сверхпроводящих квадруполь FF

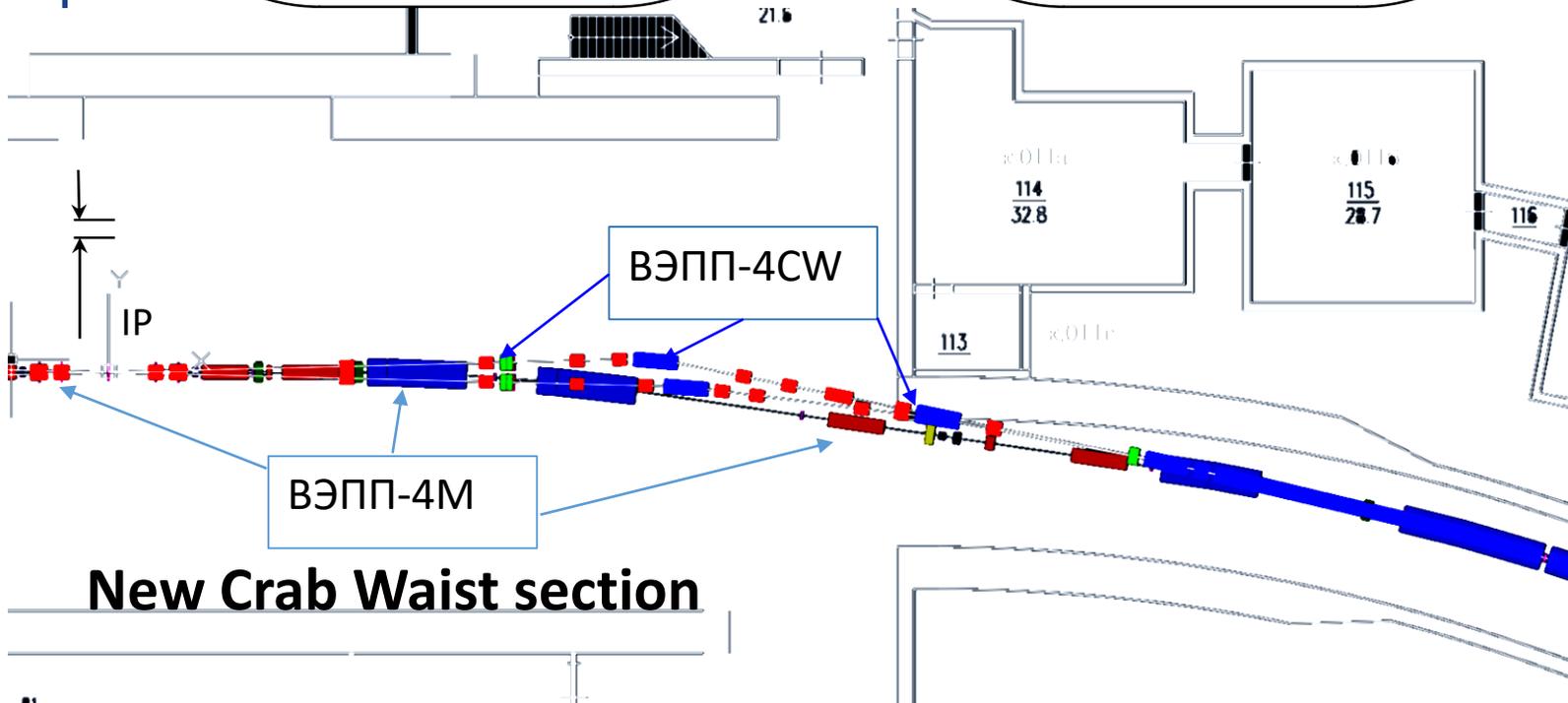
ВЭПП-4CW. Частичный краб-вэйст.



Модифицируется экспериментальный прожектор под частичный CW.

Тестирование:

- Финальный фокус (конструкция, сборка, механическая стабильность).
- Криогенная система.
- Эффекты встречи, предельный ξ .
- Параметры при изменении энергии.
- Влияние поля детектора на поля FF.
- Влияние и оптимизация «крабовых» секступолей
- Вакуумная камера прожектора встречи.
- Импедансы прожектора встречи.
- Нелинейная динамика.
- Потери частиц и сверхпроводимость.
- Фоны детектора.
- Измерение светимости.
- Автоматическая настройка встречи.
- И т.д.

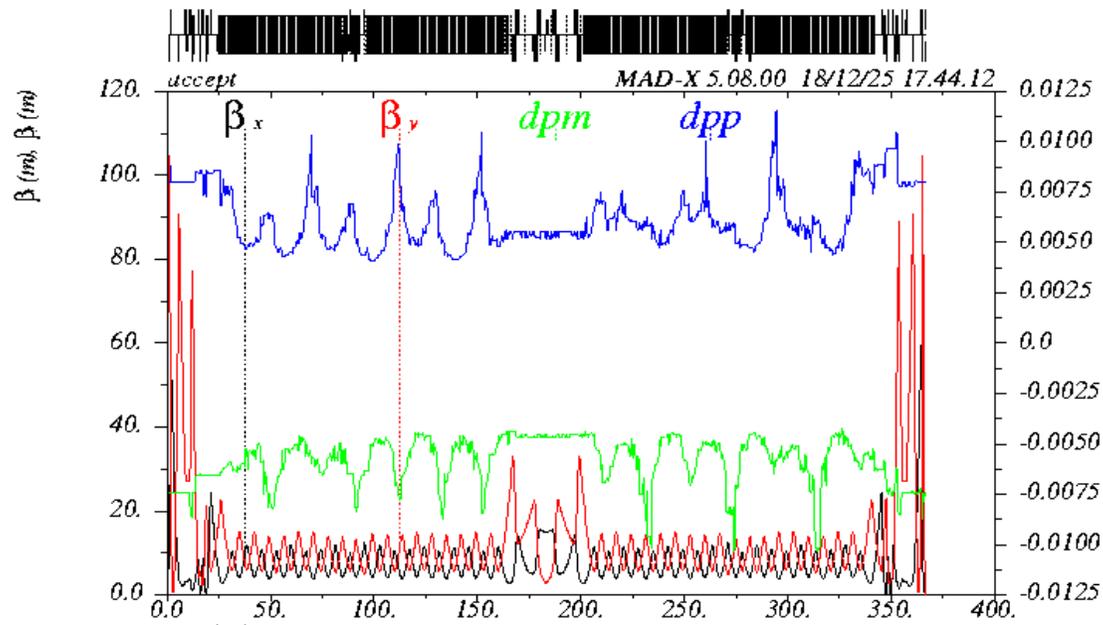


New Crab Waist section



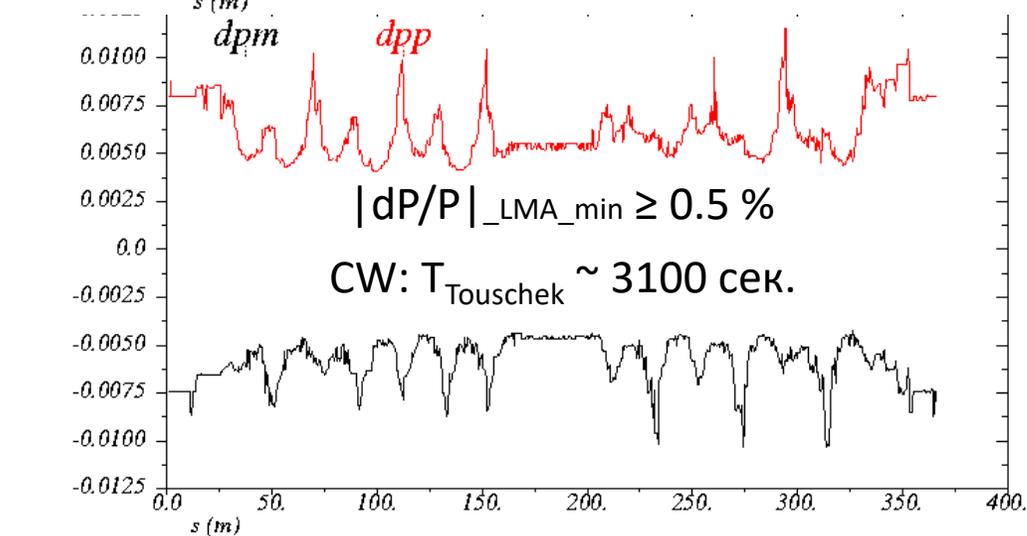
ВЭПП-4CW. Параметры.

1 x 1 сгусток



dpm, dpp

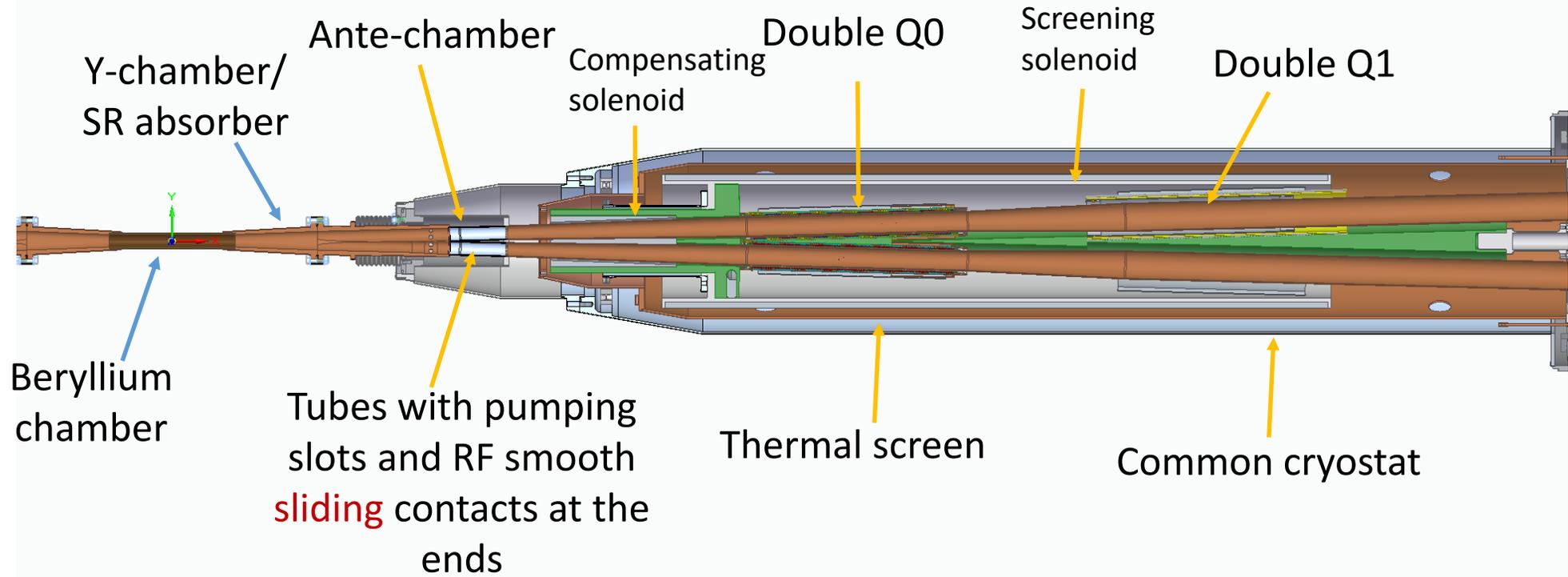
	ВЭПП-4М	ВЭПП-4CW	ВЭПП-4CW	ВЭПП-4CW	ВЭПП-4CW
E, GeV	1850	1000	1400	1850	1850
Π , m	366.09	366.23	366.23	366.23	366.23
θ , mrad	0	± 25	± 25	± 25	± 25
I, mA	3.300	0.015*	0.015*	0.015*	0.015*
Ne $\times 10^{-10}$	2.5	11.4	11.4	11.4	11.4
Nb	1	1	1	1	1
Qx / Qy	8.54 / 7.58	11.54 / 7.58	11.54 / 7.58	11.54 / 7.58	11.54 / 7.58
Cx / Cy	-14 / -20	-23 / -48	-23 / -48	-23 / -48	-23 / -48
$\alpha \times 10^2$	1.7	1.5	1.5	1.5	1.5
ϵ_x , nm	25.8	53.7	28.4	25.6	27.3
κ	0.10	0.05	0.05	0.05	0.025
$\sigma_E \times 10^4$	3.2	4.9	4.1	4.5	4.6
σ_s , mm	27.8	30.0	29.9	37.5	37.9
$\beta_x^* / \beta_y^* / D_x^*$, cm	75 / 7 / 83	15 / 1 / 0	15 / 1 / 0	15 / 1 / 0	15 / 1 / 0
ξ_X / ξ_Y	0.026 / 0.051	0.007 / 0.067	0.005 / 0.066	0.002 / 0.042	0.002 / 0.057
$\tau_X / \tau_Y / \tau_S$, sec	0.12 / 0.13 / 0.07	0.72 / 0.72 / 0.36	0.11 / 0.11 / 0.06	0.11 / 0.11 / 0.06	0.11 / 0.11 / 0.06
L, cm-2sec-1 $\times 10^{-30}$	1.0	21.1	29.6	24.9	33.8
Время жизни по Туш., sec	~ 5000	1500	1600	3100	2100



* - с обратной связью



IP mock-up



We are going to release mock-up installation of half of IP elements including full length beryllium chamber

Магнитные измерения квадруполя ССТ в криостате косвенного охлаждения

- ❑ “Холодные” испытания прототипа линзы ССТ проводились в “сухом” криостате с помощью кулеров в вакууме через медные тепловоды.
- ❑ Максимальный ток в квадрупольях, составляющий 1600 А, обеспечивается 4 источниками питания Danfysik по 400 А каждый.
- ❑ Первый шаг: подключается и измеряется только один квадруполь.
- ❑ Следующий шаг: обе линзы будут соединены последовательно, чтобы измерить влияние магнитного поля каждой линзы друг на друга.



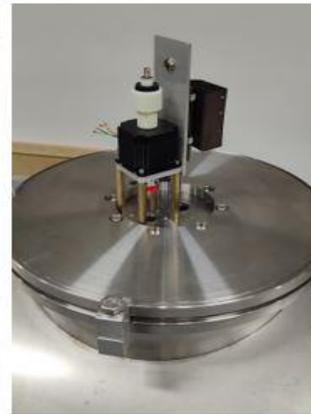
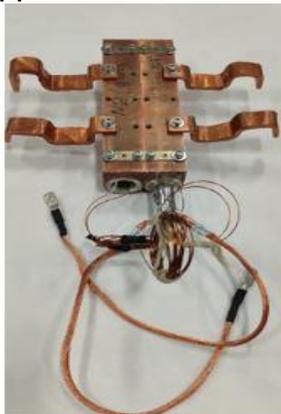
Криостат косвенного охлаждения в ИЯФ



Блок квадрупольей, собранный для магнитных измерений



Измерительная рама с шаговым двигателем



На пути к реализации

- Финансирование/Внешняя политика
 - ВЭПП-6 – один из флагманских проектов в предлагаемой федеральной программе «Фундаментальные свойства материи»
- R&D
 - Final focus, ВЭПП-4К – совместно с STCF (Хефей)
 - Прототипирование - совместно с STCF, SPD, модернизацией ВЭПП-2000
- Подготовка CDR
 - физическая программа
 - ускоритель
 - детектор
 - Короткий вариант – весна 2026
- Поэтапная реализация
 - 1 этап: тест «crab waist» и final focus на ВЭПП-4М (ВЭПП-4К)
 - 2 этап: полномасштабная реализация «в чистом поле»

Заключение

- ВЭПП-6 – проект коллайдера, который станет флагманской установкой ИЯФ (и РФ) на ~20 лет
- Актуальность ВЭПП-6 сохраняется и в случае запуска STCF в Китае
- Максимальное использование существующей инфраструктуры ИЯФ позволит начать реализацию первого этапа в рамках существующего финансирования, что не только даст интересным сообществу научные результаты, но и поможет в получении основного целевого финансирования
- Благодаря родственным отношениям с проектом Супер с-тау фабрики, множество аспектов ВЭПП-6 уже хорошо проработаны (но не все!)
- Задача ближайших лет – подготовка CDR, реализация ВЭПП-4К, получение решения о финансировании