

ВЭПП-2000

в 2023 году

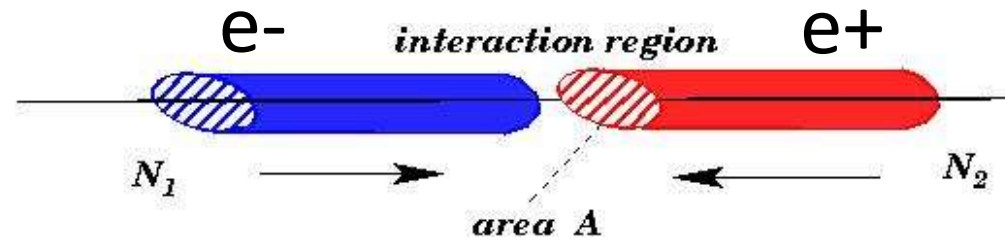
Юрий Роговский

от имени команды коллайдера ВЭПП-2000 (лаб. 11)

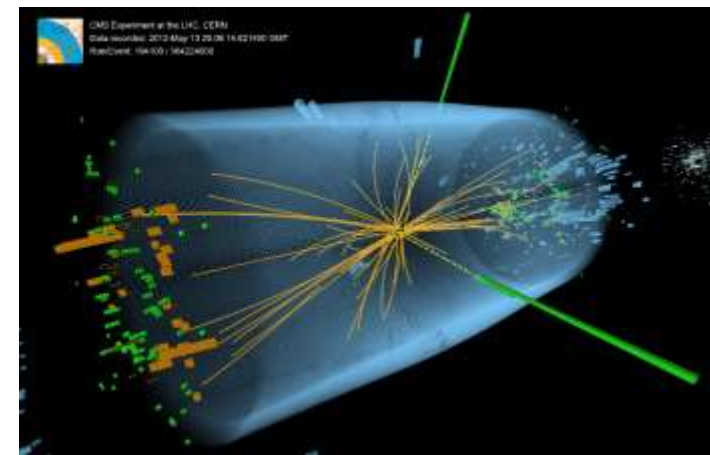
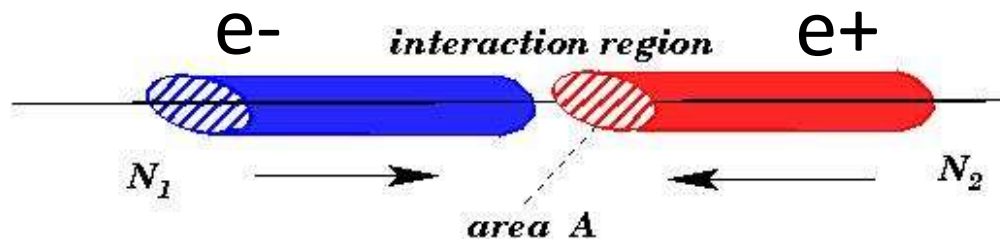
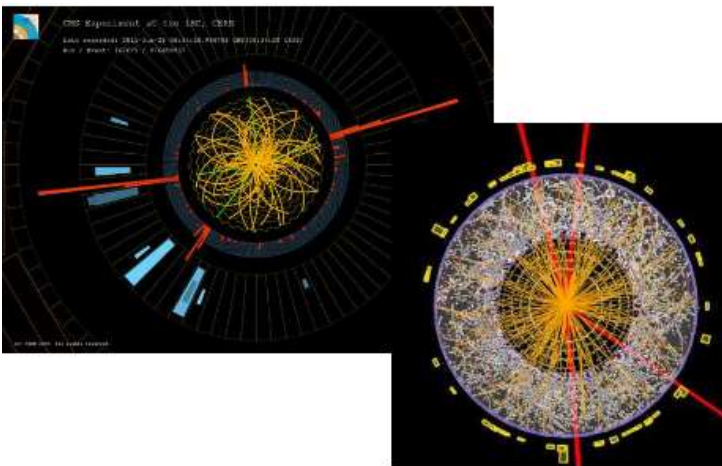
и большого коллектива ИЯФ работающего в интересах
комплекса ВЭПП-2000

Научная сессия ИЯФ

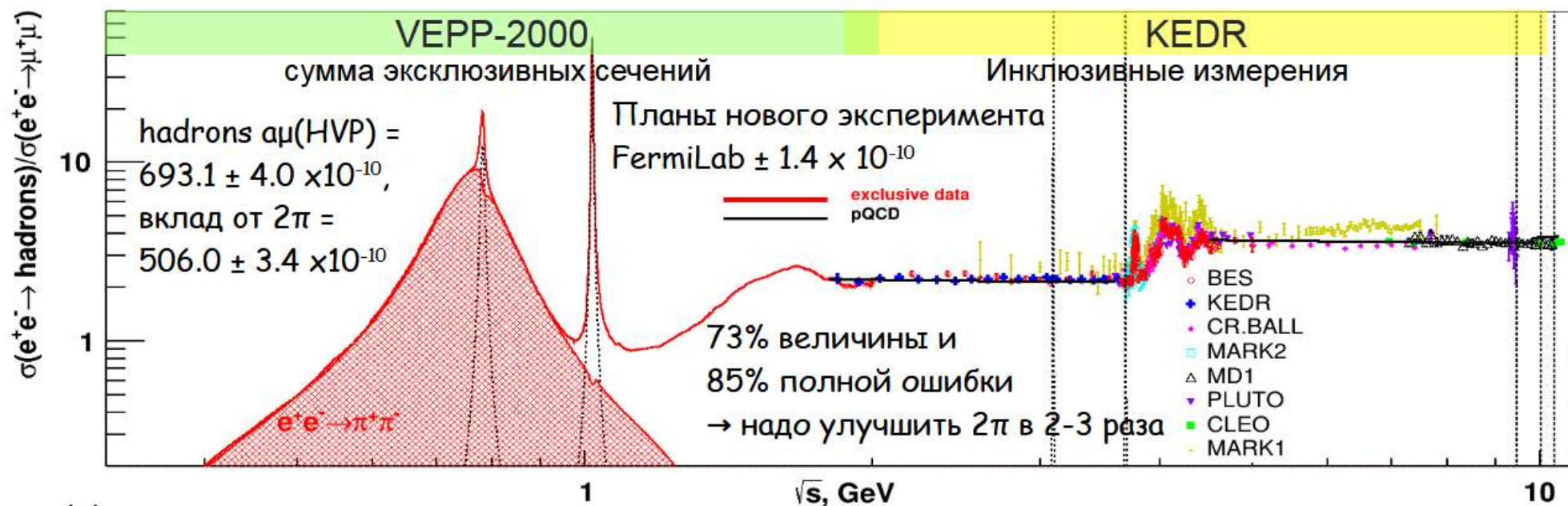
01.02.2024 г.

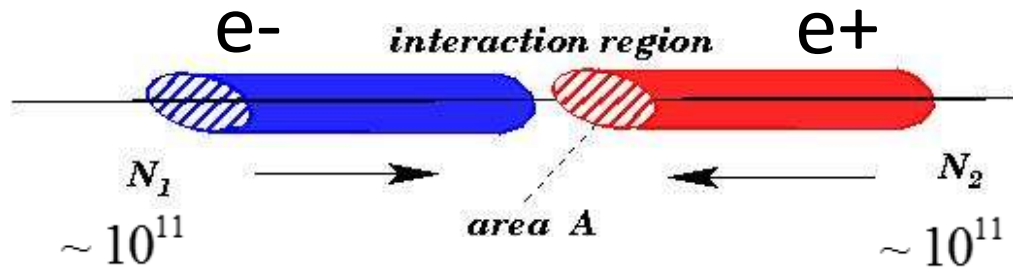


Чем мы занимаемся?



зачем мы занимаемся?





зачем мы занимаемся?

How many interacts?

$$\frac{L \cdot \sigma_{process}}{f_0} \sim \frac{10^{32} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1} \cdot 10^{-24} \text{ cm}^2}{12 \cdot 10^6 \text{ Hz}} \sim 10 \quad \text{Compare to } N_{bunch} \sim 10^{11}$$

$$\mathcal{L} = \frac{N_1 N_2 f n_b}{2\pi \sqrt{\sigma_{1x}^2 + \sigma_{2x}^2} \sqrt{\sigma_{1y}^2 + \sigma_{2y}^2}}$$

@ VEPP-2000 parameters

$$\mathcal{L} = \frac{N_1 N_2 f n_b}{4\pi \sigma_x \sigma_y}$$

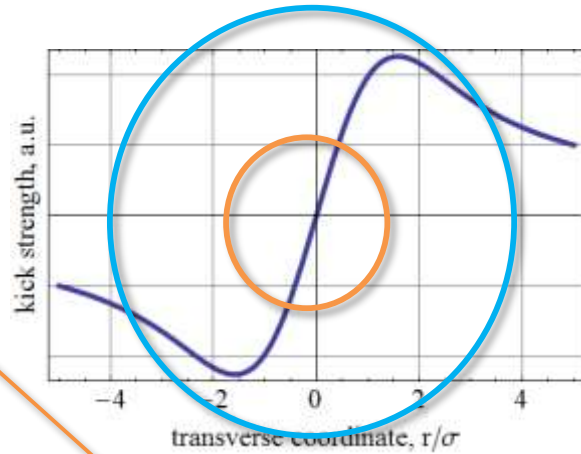
Эффекты встречи сталкивающихся сгустков

Particles unlikely interact with each other. Instead the particle every turn interact with collective field of the charged opposite bunch: beam-beam effects

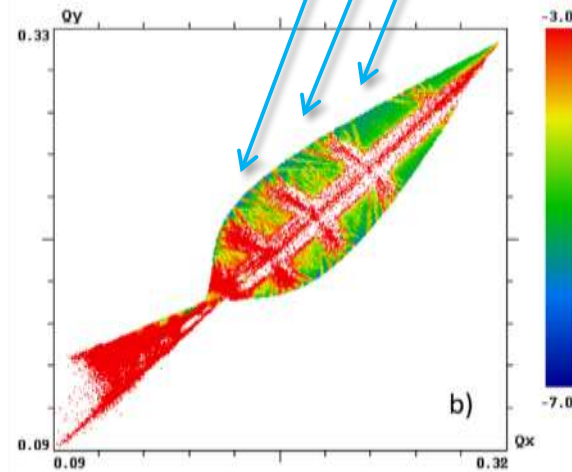
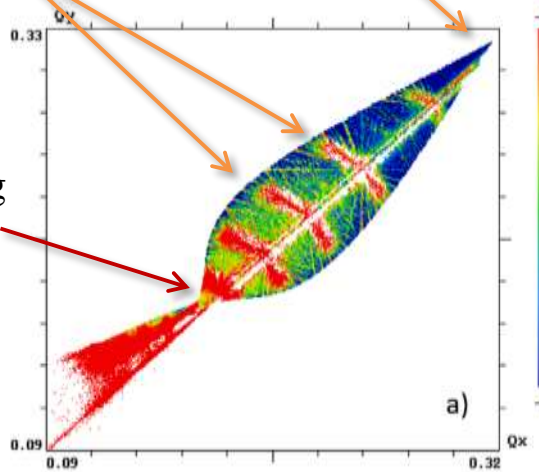
Linear beam-beam: tune shift

Resonances

Design working point

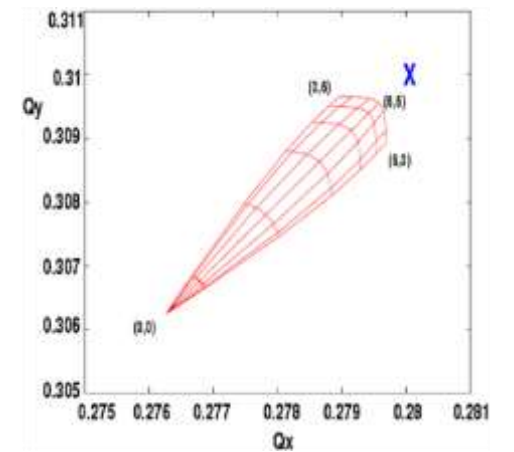
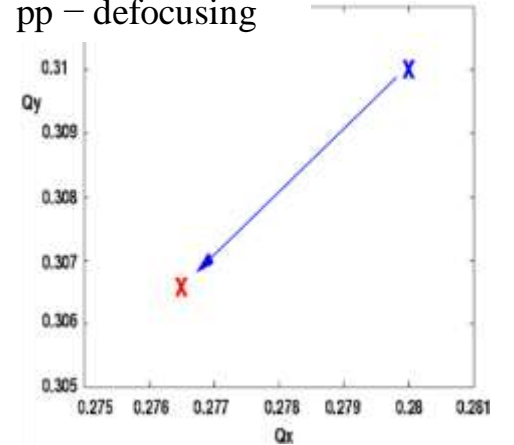


Nonlinear beam-beam: tune spread (footprint) & high-order resonance grid



FMA: beam-beam simulations by Lifetrac

LHC example: pp – defocusing

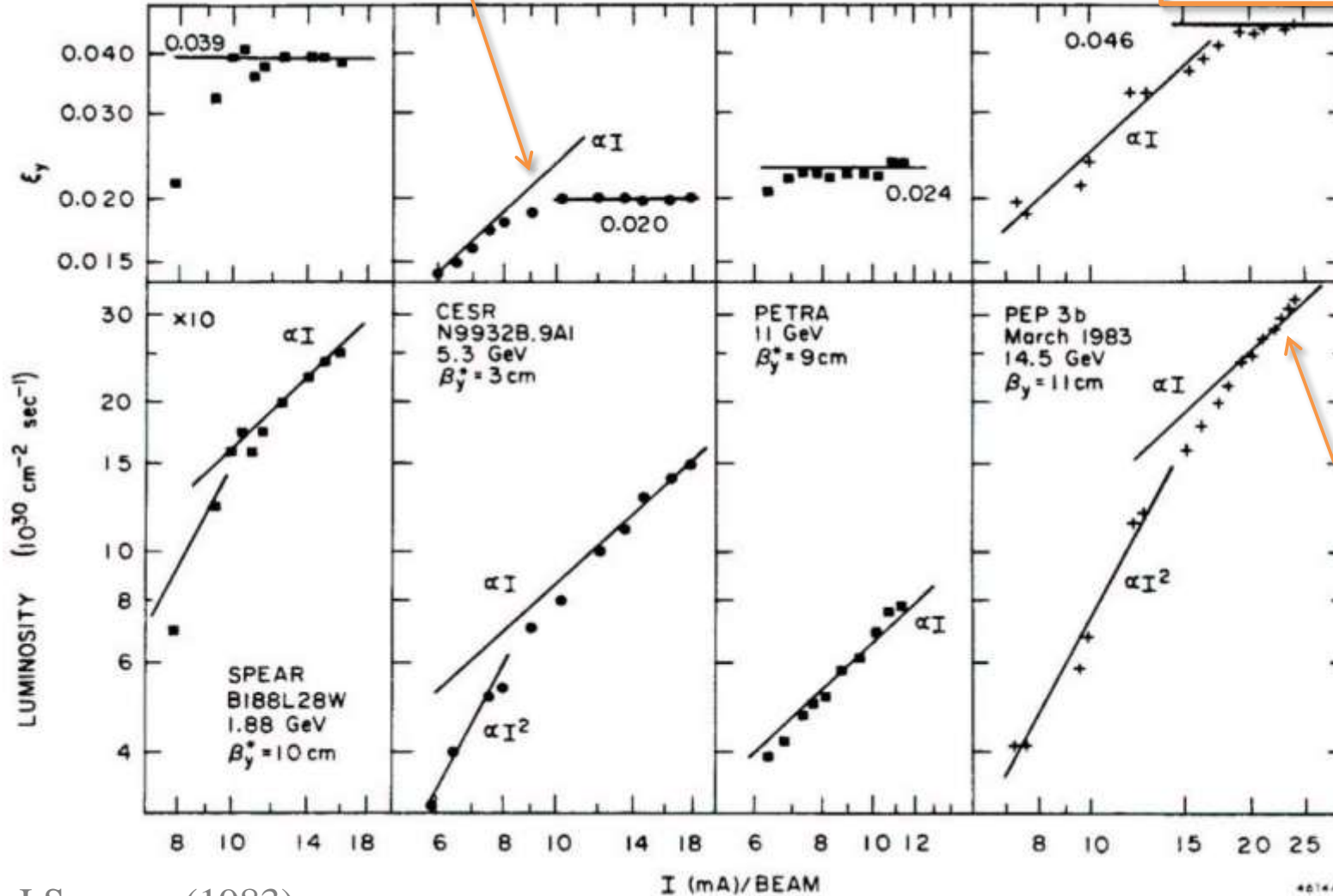


Ограничения по эффектам встречи в коллайдерах

Beam-beam parameter saturation, emittance (and beam size) growth

$$\xi_{x,z} = \frac{r_e \beta_{x,z}^*}{2\pi\gamma} \cdot \frac{N_2}{\sigma_{x,z}(\sigma_x + \sigma_z)}$$

$$L = \frac{\pi\gamma^2 \xi_x \xi_y \epsilon_x f}{r_e^2 \beta_y^*} \left(1 + \frac{\sigma_y}{\sigma_x} \right)^2$$



Specific luminosity vs beam current @ VEPP-2M

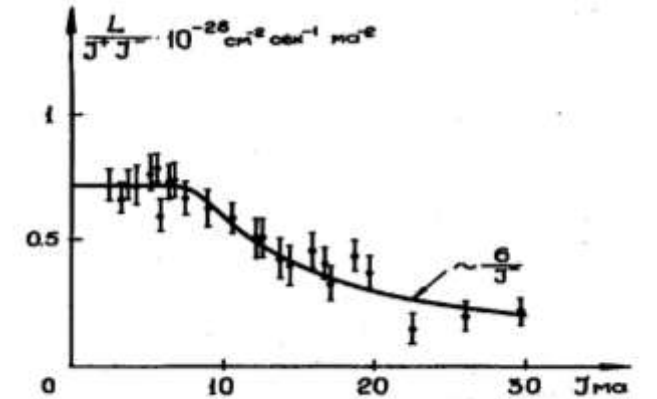


Рис. 4. Зависимость удельной светимости от тока электронного пучка.

Final limit:

- 1) emittance blowup,
- 2) lifetime reduction,
- 3) flip-flop effect



С чем мы пришли к 2024 г.

VEPP-2000 layout and capabilities @ 2023

Основная структура:

8 дипольных магнитов
24 квадр. линзы
4 с.п. соленоида

Коррекции:

24 гор. дипольных корректора
20 верт. дипольных корректоров
12 секступолей
12 скую-квадруполей

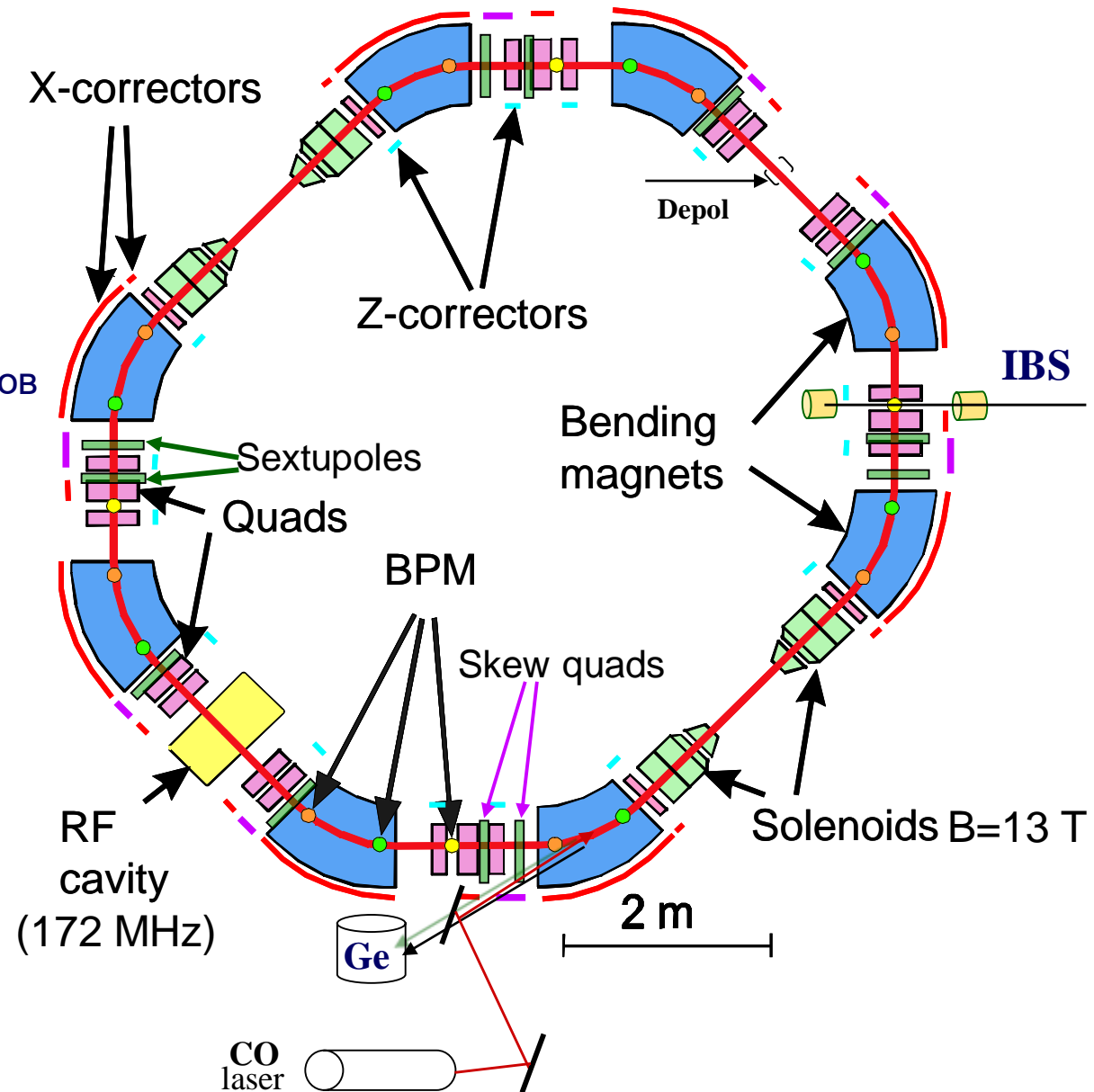
Наблюдение за пучком:

16 ПЗС-камер
4 пикапа
1 Измеритель тока
2 ФЭУ (e^+ , e^-)

Измерение энергии:

Резонансная деполяризация
ОКР, 16 ЯМР датчиков

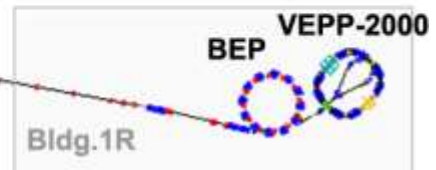
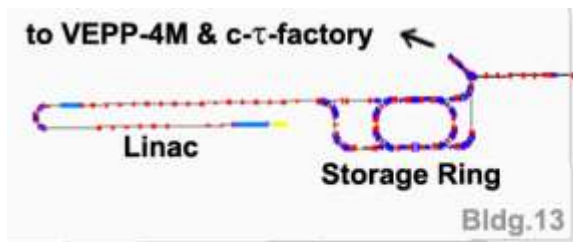
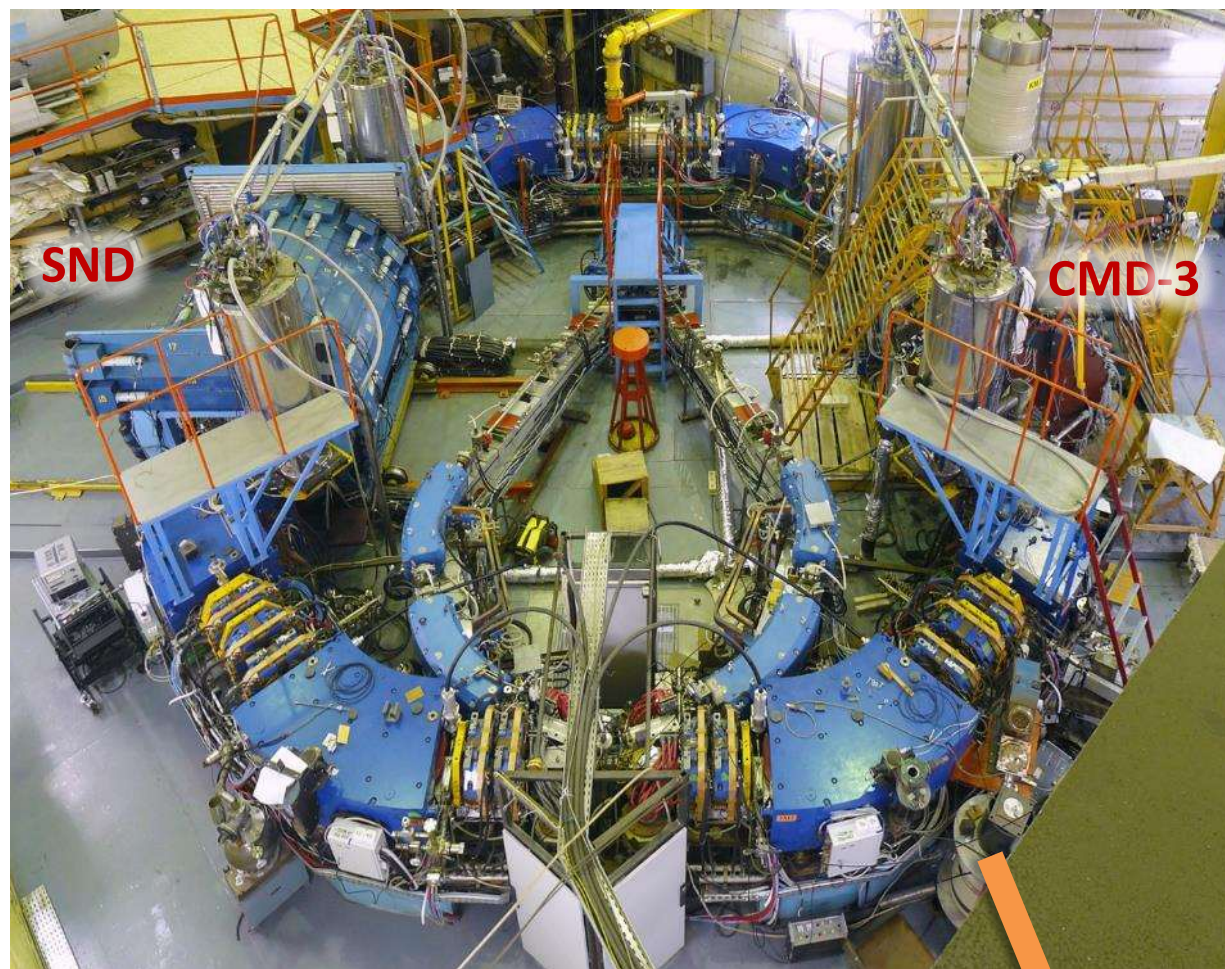
Детекторы: КМД-3, СНД



VEPP-2000 @ 2023

Design parameters @ 1 GeV		@ 2021	@ 2022	@ 2023
Circumference	24.388 m			
Beam energy	150 ÷ 1000 MeV	160-1005	160-1005	160-1005
N of bunches	1×1			
N of particles	1×10 ¹¹ / 200 mA	0.9×10 ¹¹	1.2×10 ¹¹	0.6×10 ¹¹
Betatron tunes	4.14 / 2.14	0.17-0.18	0.17-0.18	0.12-0.18
β*	8.5 cm			
BB parameter	0.1	0.06	0.09	0.06
Luminosity	1×10 ³² cm ⁻² s ⁻¹	0.5×10 ³²	0.9×10 ³²	0.5×10 ³²

Subtotal: 950 pb⁻¹/detector, Target: 1 fb⁻¹



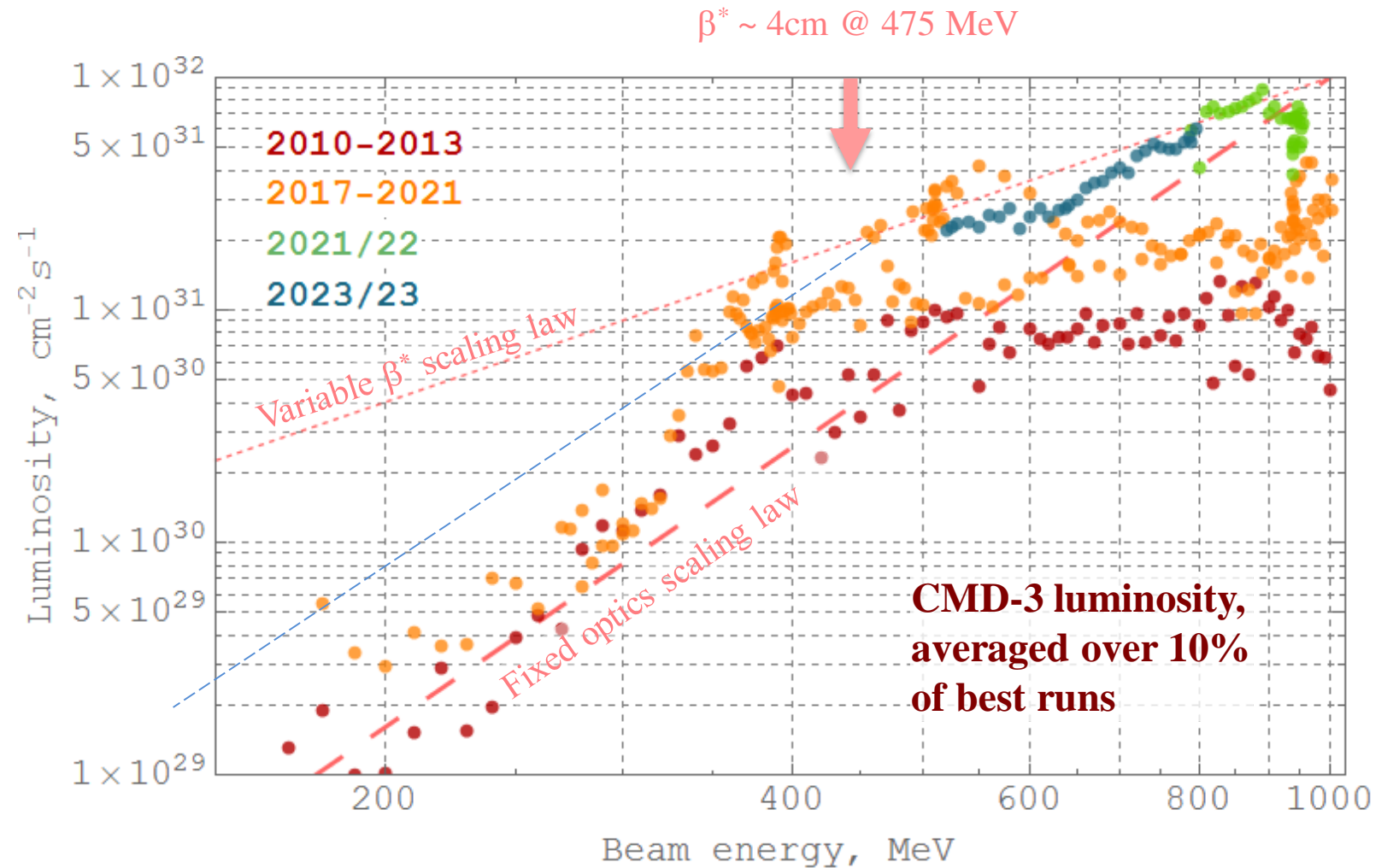
Operating with IC#VEPP-5 since 2016

Achieved luminosity (II)

With target luminosity of $10^{32} \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$ at the top energy, the scaling law is proportional to γ^4 for the fixed lattice (see dashed line). With given aperture one can vary β^* value in a way to fix the beamsize in the FF solenoids that gives γ^2 scaling (dotted line).

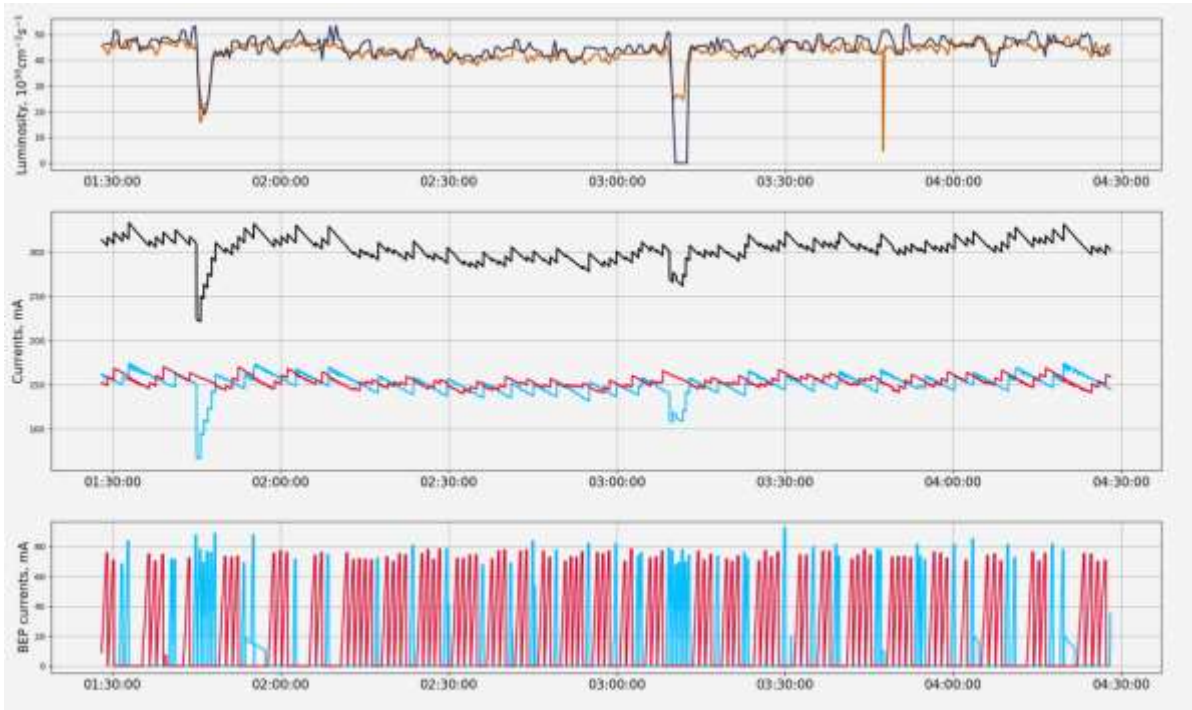
Unfortunately, with β^* lower than 4 cm the dynamic aperture decrease to unacceptable size that force us to fix the lattice again at very low energy range (blue dashed line).

The mentioned at previous slides tricks with flip-flop additional suppression the achieved luminosity already exceeds the discussed estimated limits at the middle energies.

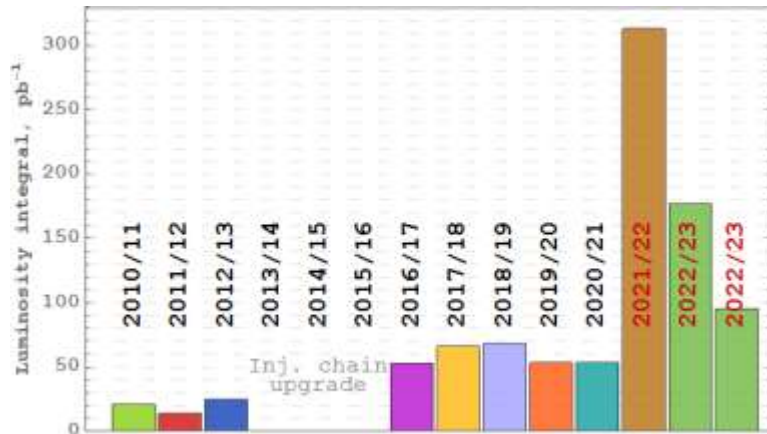


Current absolute record peak luminosity: $L_{\text{peak}} = 9 \times 10^{31} \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1} @ 890 \text{ MeV}$

Data taking

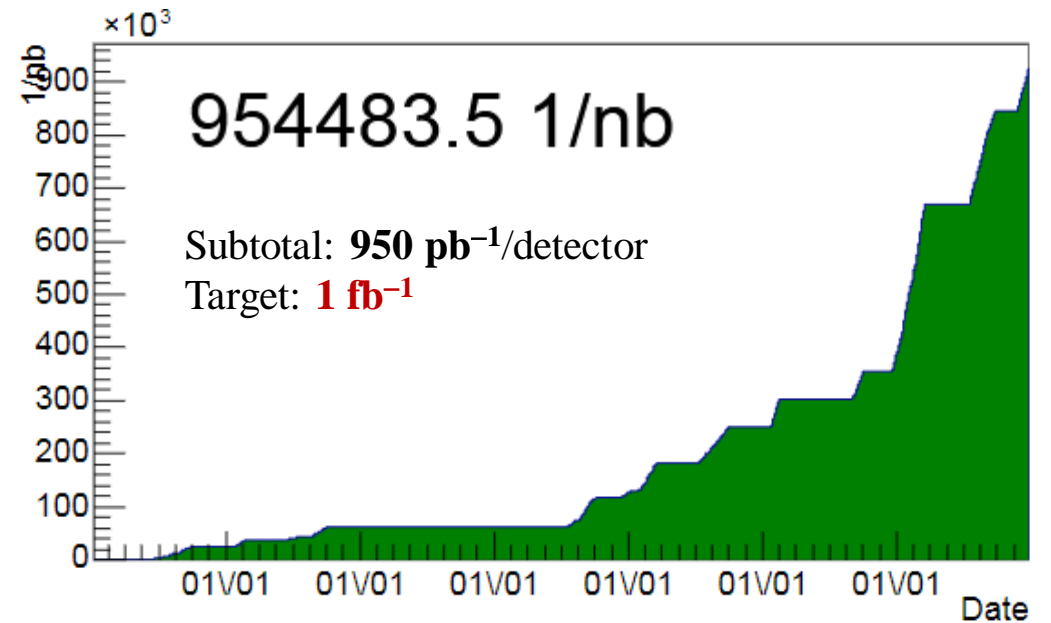
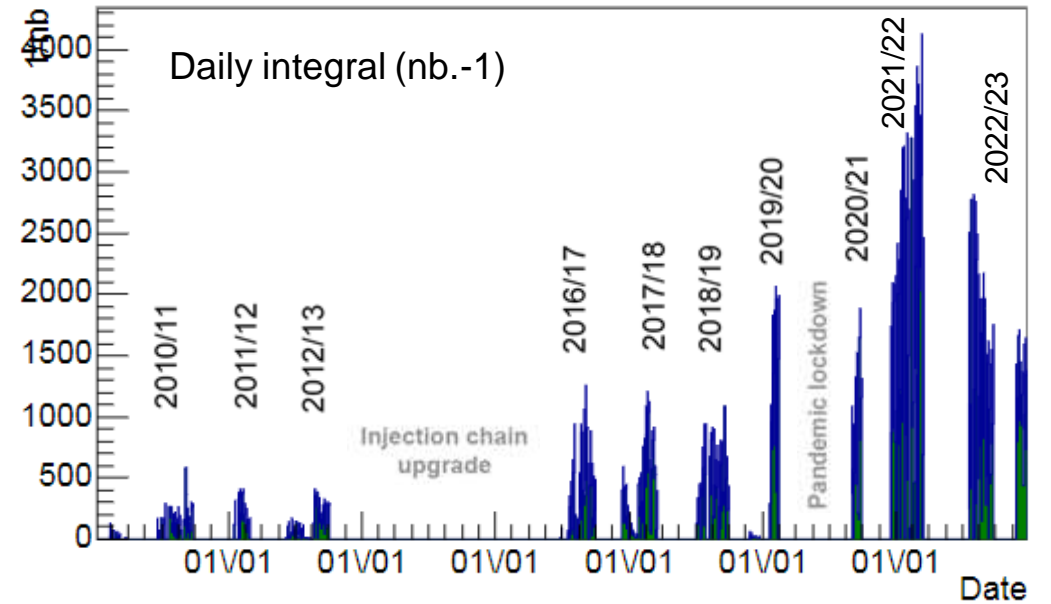


Status page screenshot during routine operation at nucleon-antinucleon pairs production threshold. Mar-12, 2023.

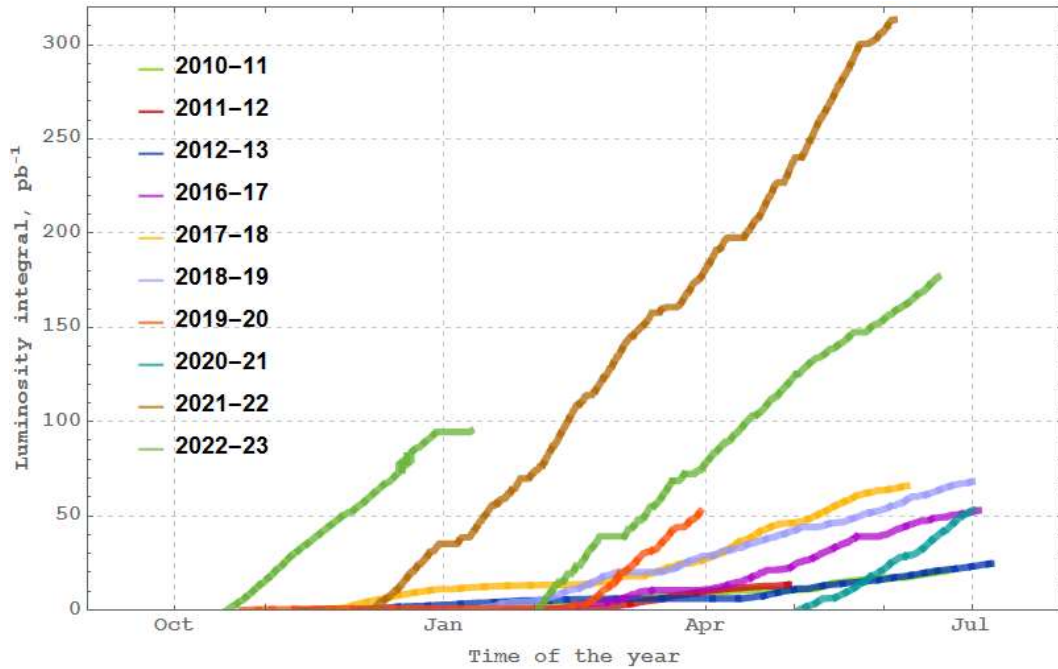


The best daily integral:
4.14 pb⁻¹, 21.05.2022
@ 950 MeV

The best daily integral:
2.6 pb⁻¹, 20.02.2023
@ 780 MeV

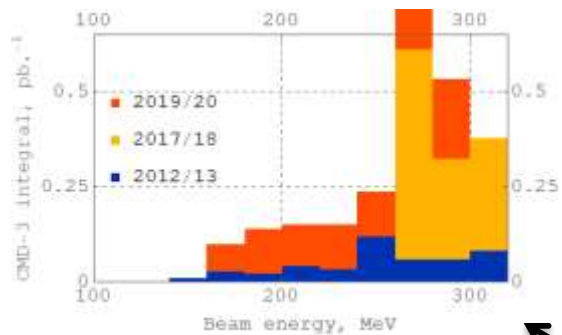
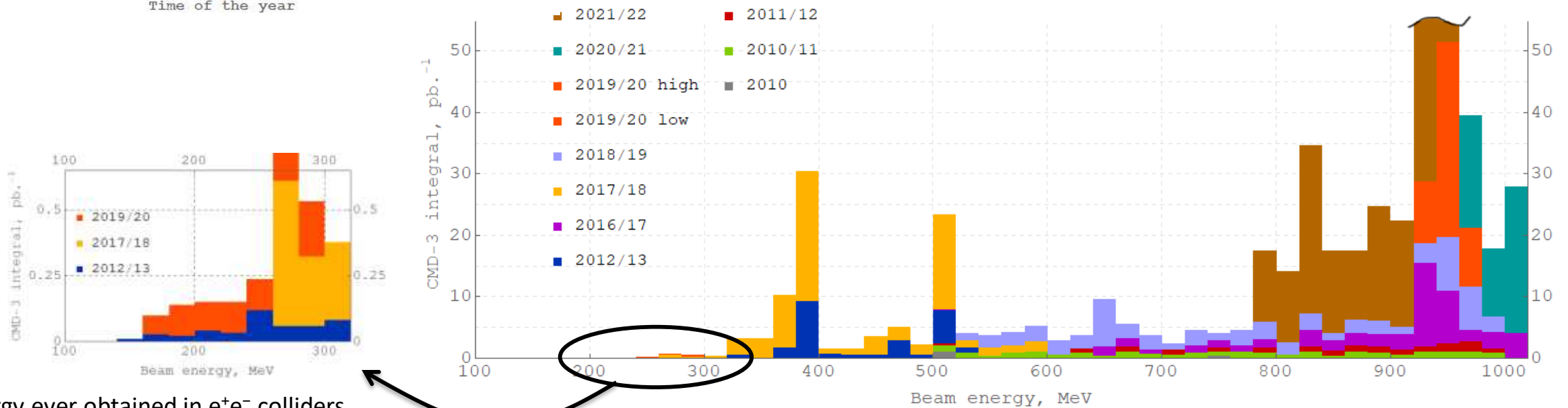
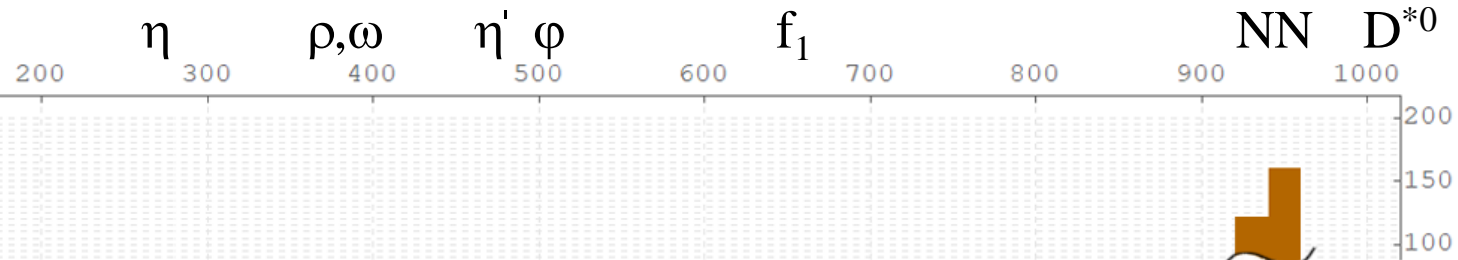


Accumulated data



Reasons for data taking rate progress @ high energies:

- β^* increase $\sim 10\%$ (better top-up injection efficiency)
- Accurate IP2IP betatron phase advance tuning (emit. blow-up supp.)
- RF-frequency change (detectors background suppression)
- New PS for f1-quads (freedom for achromats tuning)
- IC stable & plentiful e^+ provision (peak2mean Lum $< 10\%$)



Lowest energy ever obtained in e^+e^- colliders

Повышение надежности и стабильности в 2023 г.

Праздник в отдельно взятом подвале

Ждём в 2022 году:

- 1) Остальные ВЧ-500 (> 20шт)
- 2) Первую партию ГИД-160 (импульсное питание на замену Аккордов)
- 3) Полупроводниковый усилитель ВЧ БЭП
- 4) Новые источники соленоидов (12шт)

ВЧ-500-20 (4шт), семейство f3 @ 2022



ВЧ-500-20 (24шт +1), 3-квadrant
ВЭПП-2000 @ 2023



Получены 2023 году:

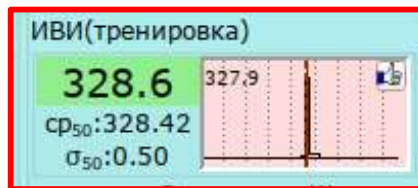
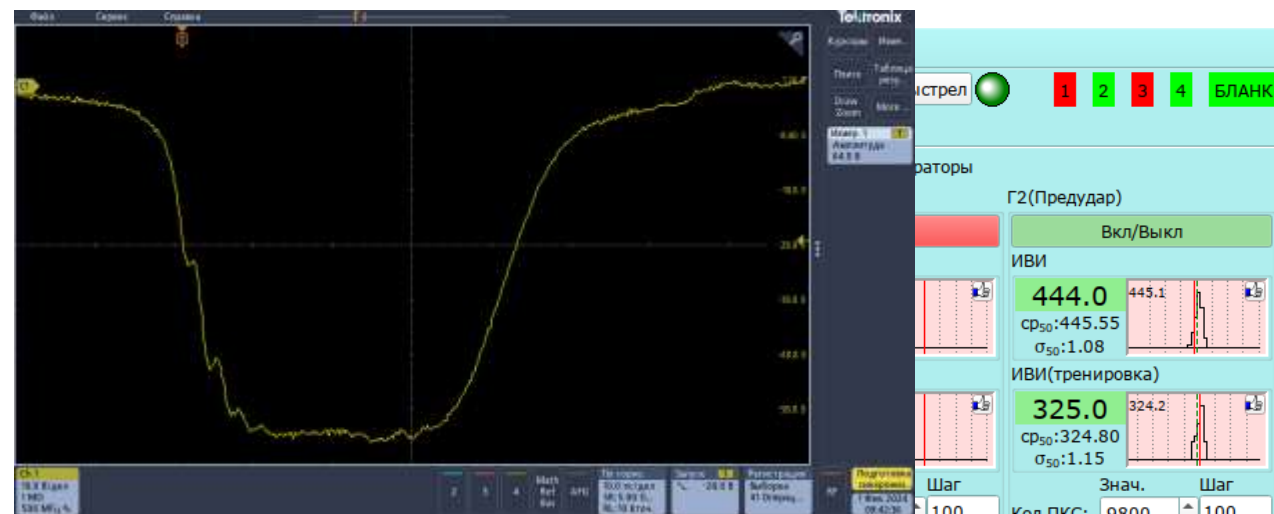
- Остальные ВЧ-500 (21 шт)
- Собраны в РМ
- Отданы для настройки в лаб.6
- Будут передаваться группами по 6 шт. для установки прямо во время работы в сезоне

Уже работает в 2023 г.

Модернизация: ГИН системы впуска-выпуска ВЭПП-2000



Параметры источника питания	ТЗ
Напряжение импульса, кВ	15-75
Длительность полочки импульса, нс	> 20
Длительность импульса по основанию, нс	< 70
Частота следования импульсов, Гц	< 1
Допустимый обратный выброс, %	< 5
Однородность вершины импульса, %	+/- 3
Нестабильность срабатывания, нс	< 2



Уже работает в 2023 г.

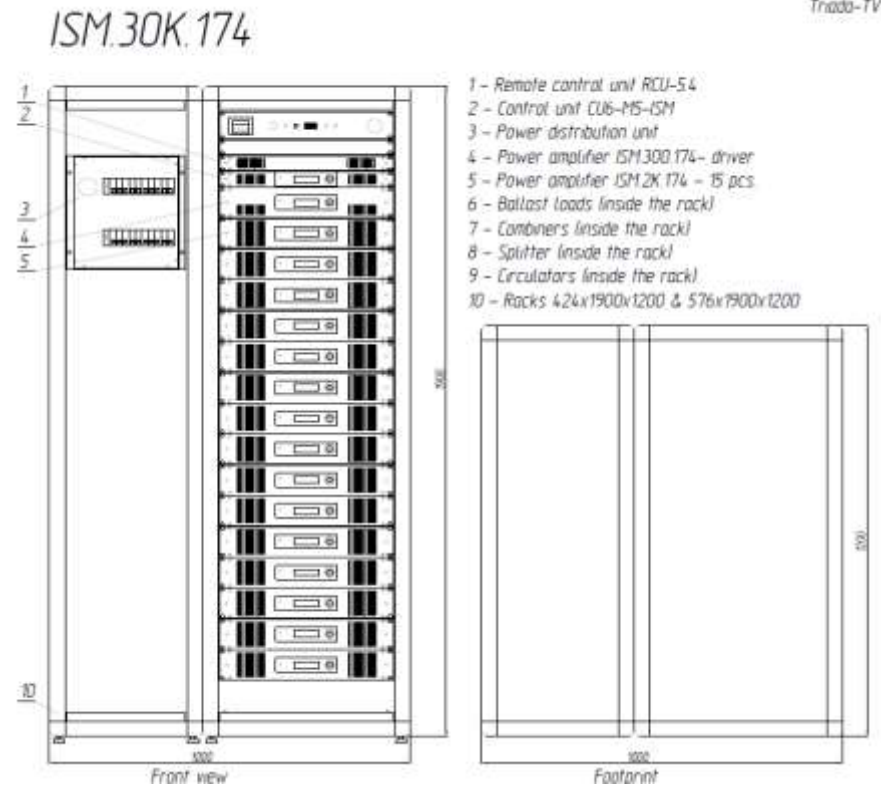
Источники питания кикеров инъекции ВЭПП2000 смонтированы в высоковольтном блоке. Высоковольтный разъем с уплотнением для дополнительной изоляции SF6. Адаптирована программа управления кикерами. С конца сентября один раз сработала блокировка при просадке питания.

У нас нет информации о ресурсе новых источников, для возврата на старую систему питания сохранена вся инфраструктура, и заказаны 2 запасных источника на случай аварии/ремонта.

Длительность импульса выбрана с целью избежать влияния джиттера, а с другой стороны иметь возможность работать в многосгустковом режиме для обезгаживания кольца.

Модернизация: ВЧ выходного каскада бустера БЭП

№ п / п	Наименование характеристики	Значение (описание)
1	Диапазон рабочих частот	172÷176 МГц
2	Максимальная выходная мощность.	30 кВт
3	Режим работы.	Непрерывный
4	Коэффициент усиления.	45 дБ (уровень входного сигнала ~1 Вт)
5	Сопrotивление фидерной линии.	50 Ом
6	Требования к выходной мощности в различных режимах работы усилителя.	Рабочий режим усилителя лежит в диапазоне от 1% до 100% номинальной мощности
7	Питание от 3-х фазной сети.	400В±10% 50 Гц
8	Габаритные размеры ГхШхВ	1500x1000x1900 мм
9	Охлаждение водяное, дистиллятом. Расход воды 60л/мин.	Усилитель подключается непосредственно к системе охлаждения ускорительного комплекса.
10	Избыточное рабочее давление в охлаждающем трубопроводе.	300 кПа
11	Максимальная температура воды на входе усилителя.	35°C



Delivered to BINP @ December 2023

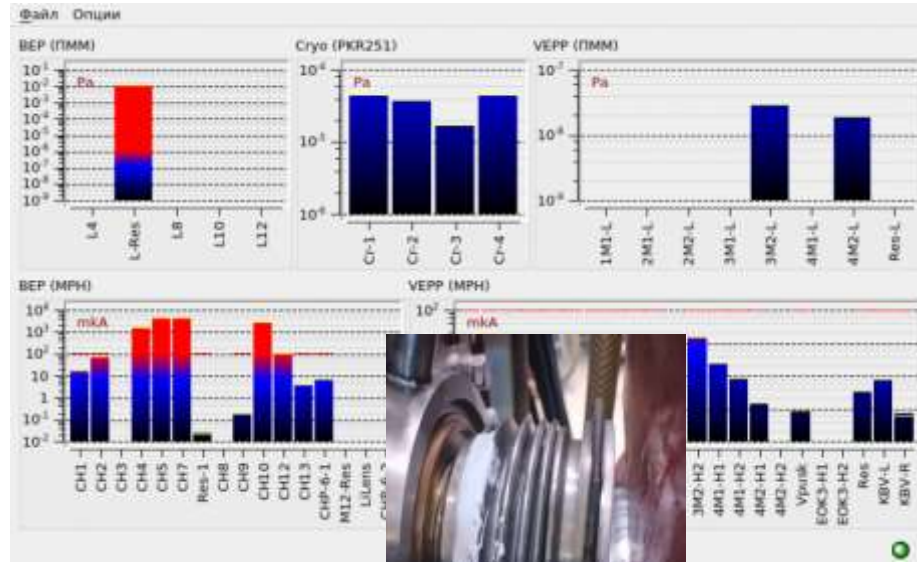
Total price – 10.000k rub.

Tested @ low level @ TriadaTV site

Введем в строй в 2024 г.

Что нам мешало.

Vacuum accident (BEP / VEPP-2000)



@ April 16, 2023



Cryo accident (VEPP-2000)



@ June 14, 2023



Что еще мы делаем каждый день?

Spin-depended effects. Weinberg angle

- Измерение продольной асимметрии полного сечения рождения J/ψ-мезона на SCTF [1][2]:

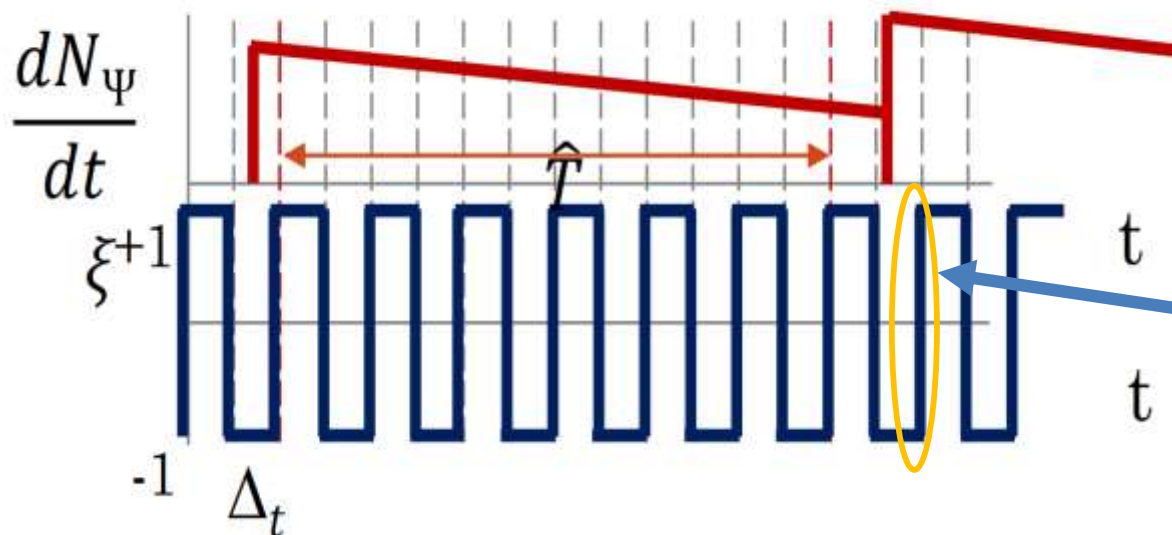
Учет радиационных поправок в рамках Стандартной Модели ($\xi_{e^-} = 1$)

$$A_{LR} \approx 4.7 \cdot 10^{-4}$$

- Из-за малости эффекта необходимо подавление систематической погрешности со стороны пучка:

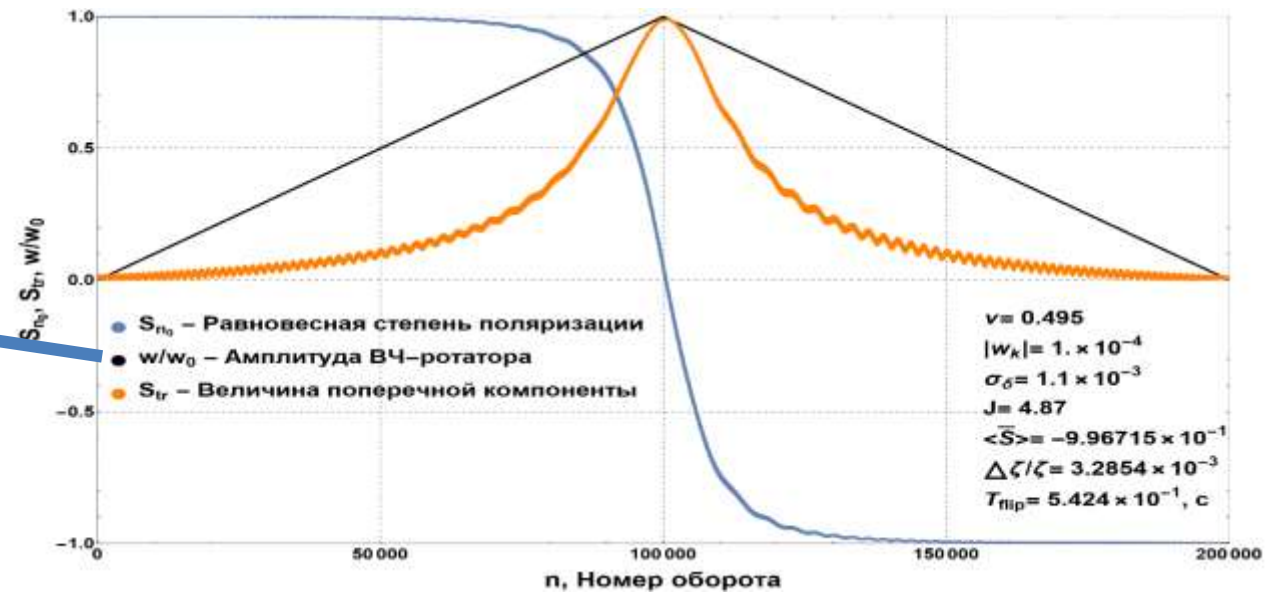
- Случайный знак продольной поляризации электронных сгустков (~300 сгустков)
- Частая смена знака продольной поляризации сгустков ($\Delta_t = 5$ с, потери при перевороте $\sim 10^{-3}$)

Спиновая “гимнастика”



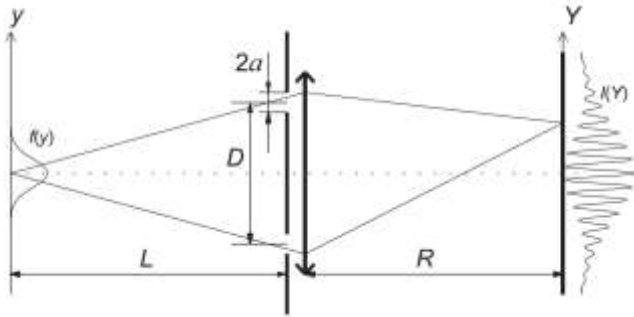
Моделирование переворота

(ВЧ-ротатор с продольным полем)



Интерферометр на БЭП.

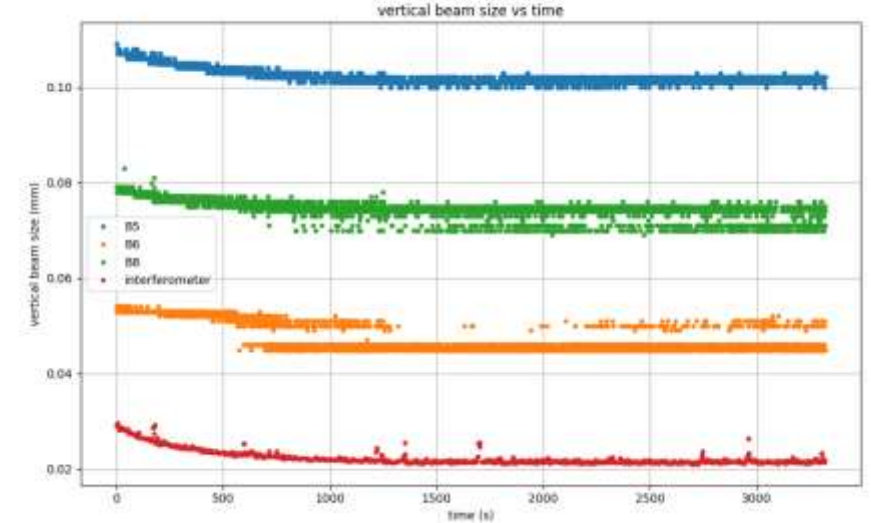
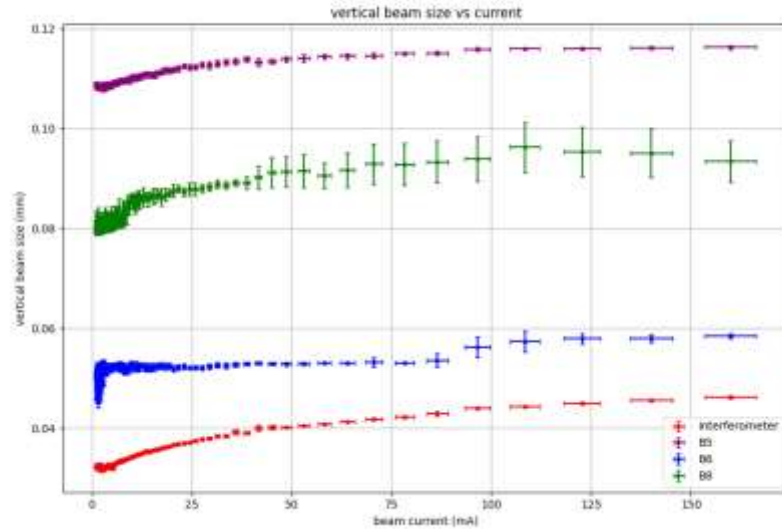
Схема установки:



$$I(Y) = I_0 \operatorname{sinc}\left(\frac{2\pi a}{\lambda R} Y\right) \left[1 + |\gamma| \cos\left(\frac{2\pi D}{\lambda R} Y + \phi\right)\right]$$

$$\sigma_y = \frac{\lambda L}{\pi D} \sqrt{\frac{1}{2} \ln \frac{1}{\gamma}}$$

Весной 2023 г. на одном из выводов СИ бустера БЭП коллайдера ВЭПП-2000 был установлен двухщелевой интерферометр для измерения вертикального размера пучка в магнитной структуре с малой бетатронной связью $\sim 1-2\%$.

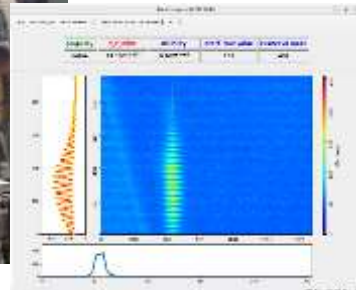


Зависимости вертикальных размеров от тока пучка и при естественном выпирании пучка, ПЗС-камеры B5, B6, B8 + интерферометр

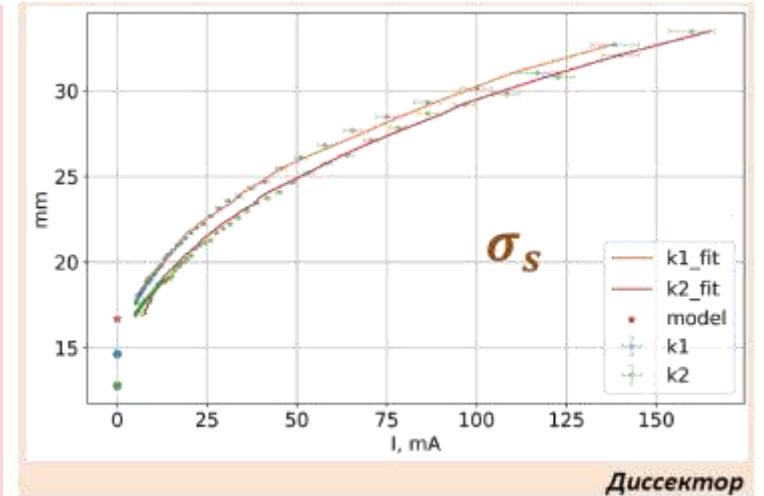
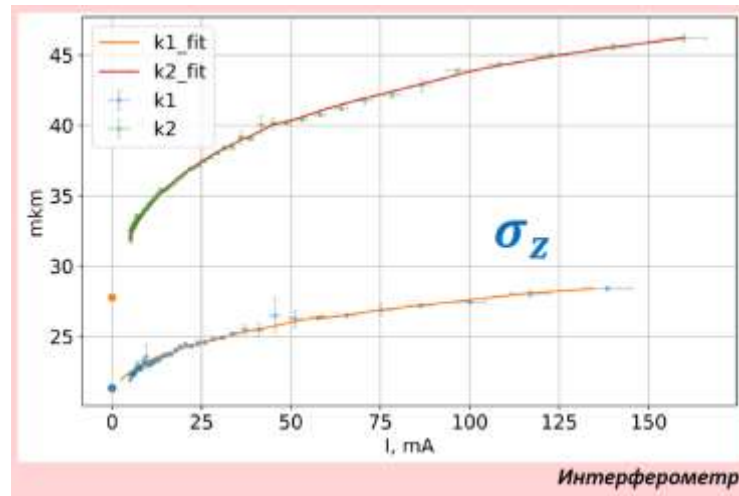
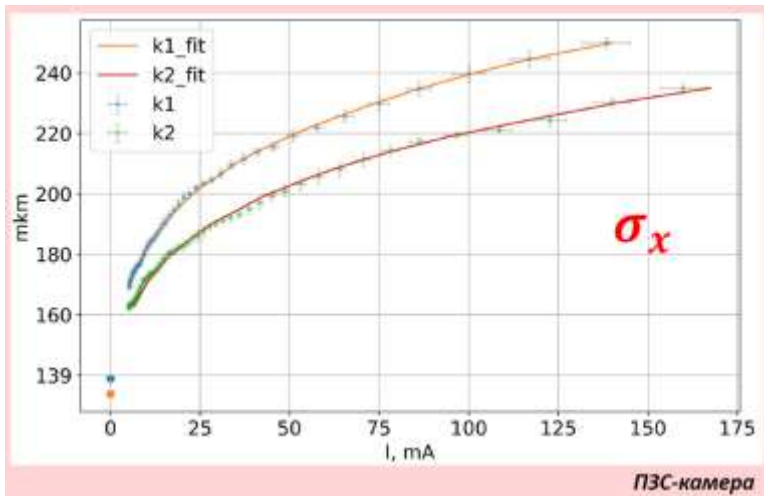
Минимальный размер пучка, доступный для измерения проекционной оптикой (ПЗС-камеры) определяется дифракционным пределом (~ 60 мкм).

Все размеры снимались в эквивалентных точках наблюдения, различия на ПЗС-камерах зависят от качества оптического тракта. Камера B5 и интерферометр «смотрят в одно метсо.»

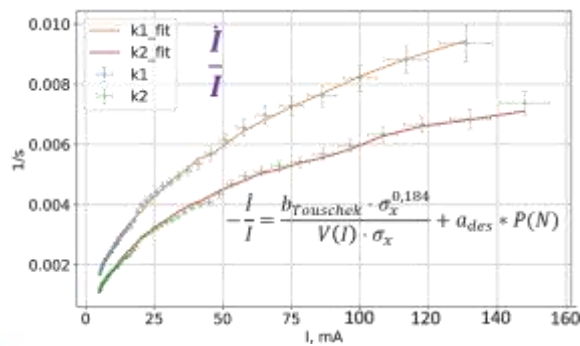
Вертикальный размер пучка (при токе пучка ~ 1 мА) ≈ 21 мкм
 $D=6,2$ мм, $\lambda=550$ нм, $L=2265$ мм



Токовые зависимости в БЭП.



* Коэффициенты бетатронной связи:
 $k_1 = 1,3 \%$
 $k_2 = 2,1 \%$
 (вычислены по аппроксимации поперечных размеров)



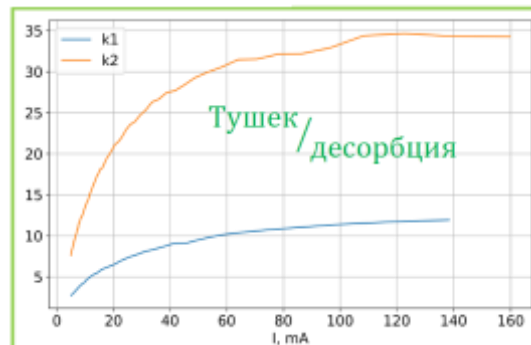
$$\hat{\sigma}_s (\hat{\sigma}_E^5 - \hat{\sigma}_E^3) = N \times C$$

$$\hat{\sigma}_s^3 - \hat{\sigma}_s \hat{\sigma}_E^2 = N \times A$$

$$\tau_{Touschek}^{-1} = -\frac{\dot{N}}{N} = \left\langle \frac{\beta_y N \Gamma_{particle}^2 c}{8 \pi \gamma^3 \hat{\sigma}_x \hat{\sigma}_y \hat{\sigma}_z \hat{\sigma}_s \hat{\sigma}_m^2} C(\epsilon_m) \right\rangle$$

$$\tau^{-1} = -\frac{\dot{N}}{N} = -\frac{\dot{I}}{I} = \tau_{Touschek}^{-1} + \tau_{desorption}^{-1} + \dots$$

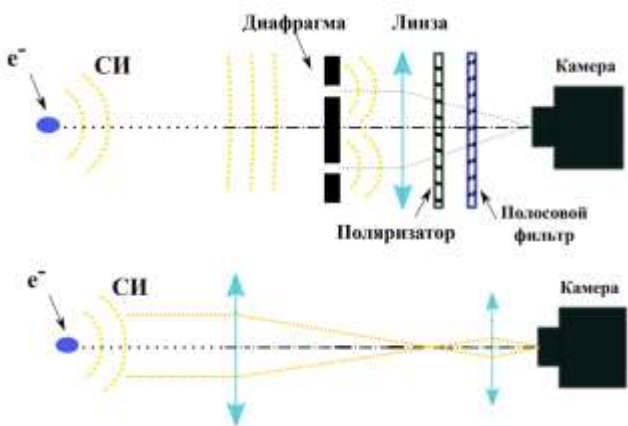
Экспериментальные данные зависимости размеров сгустка, а также времени жизни от тока снимались при естественном вымирании пучка. Они были использованы для определения вклада эффекта Тушека и фотостимулированной десорбции.



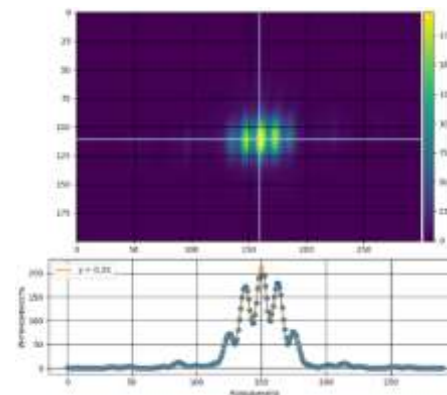
М. В. Тимошенко и др., «Зависимость размеров сгустка от интенсивности в бустере электронов и позитронов (БЭП)» // материалы XXVIII Российской конференции по ускорителям заряженных частиц (RuPAC-2023), ИЯФ СО РАН, 2023 г. (принято к публикации)

Применение Наногейт-38 на БЭП.

... измерения вертикального размера пучка с помощью двухщелевого интерферометра

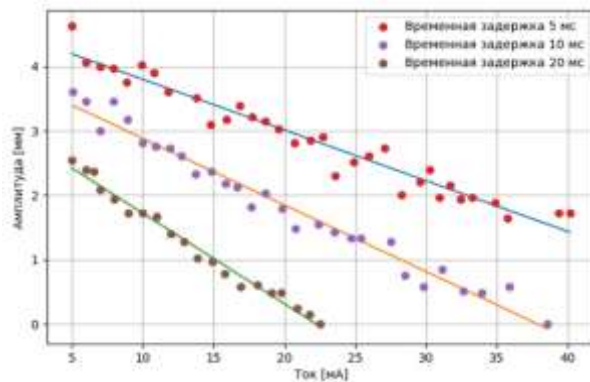
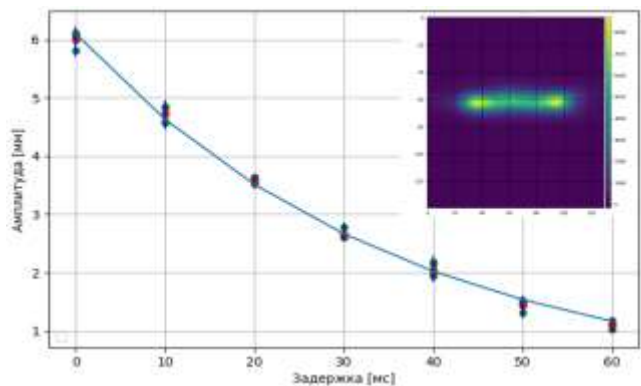


Стробируемая камера Наногейт-38 (частота кадров: 1 Гц, экспозиция: 60 нс (!) ÷ 1200 мкс) использована для...



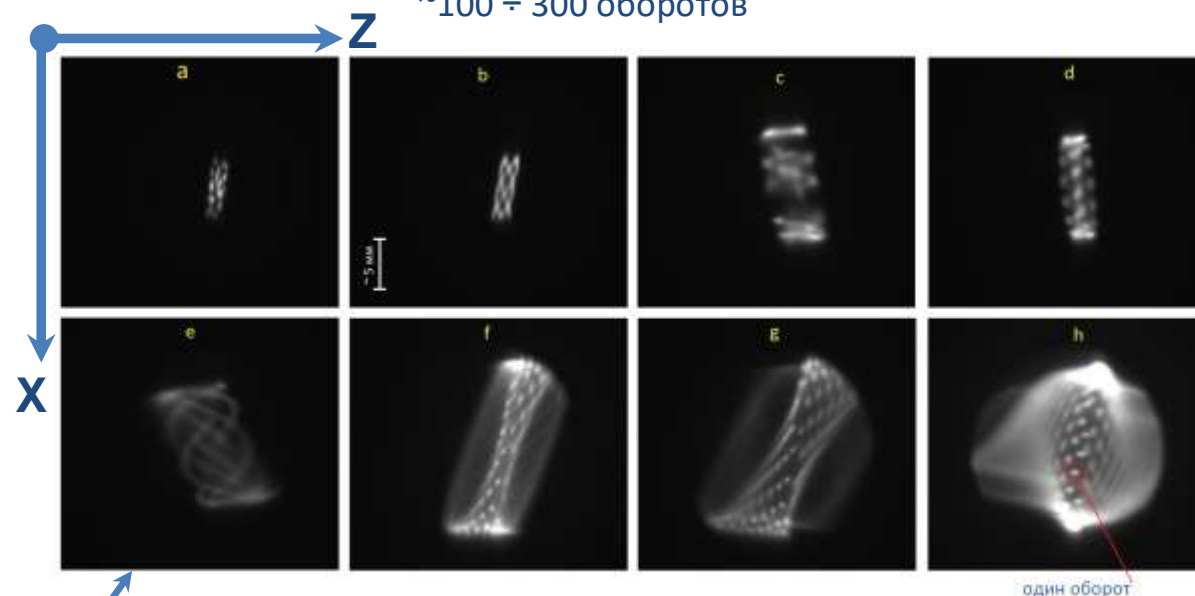
... измерения времени затухания бетатронных колебаний

... наблюдения колебаний пучка вблизи бетатронных резонансов ~100 ÷ 300 оборотов



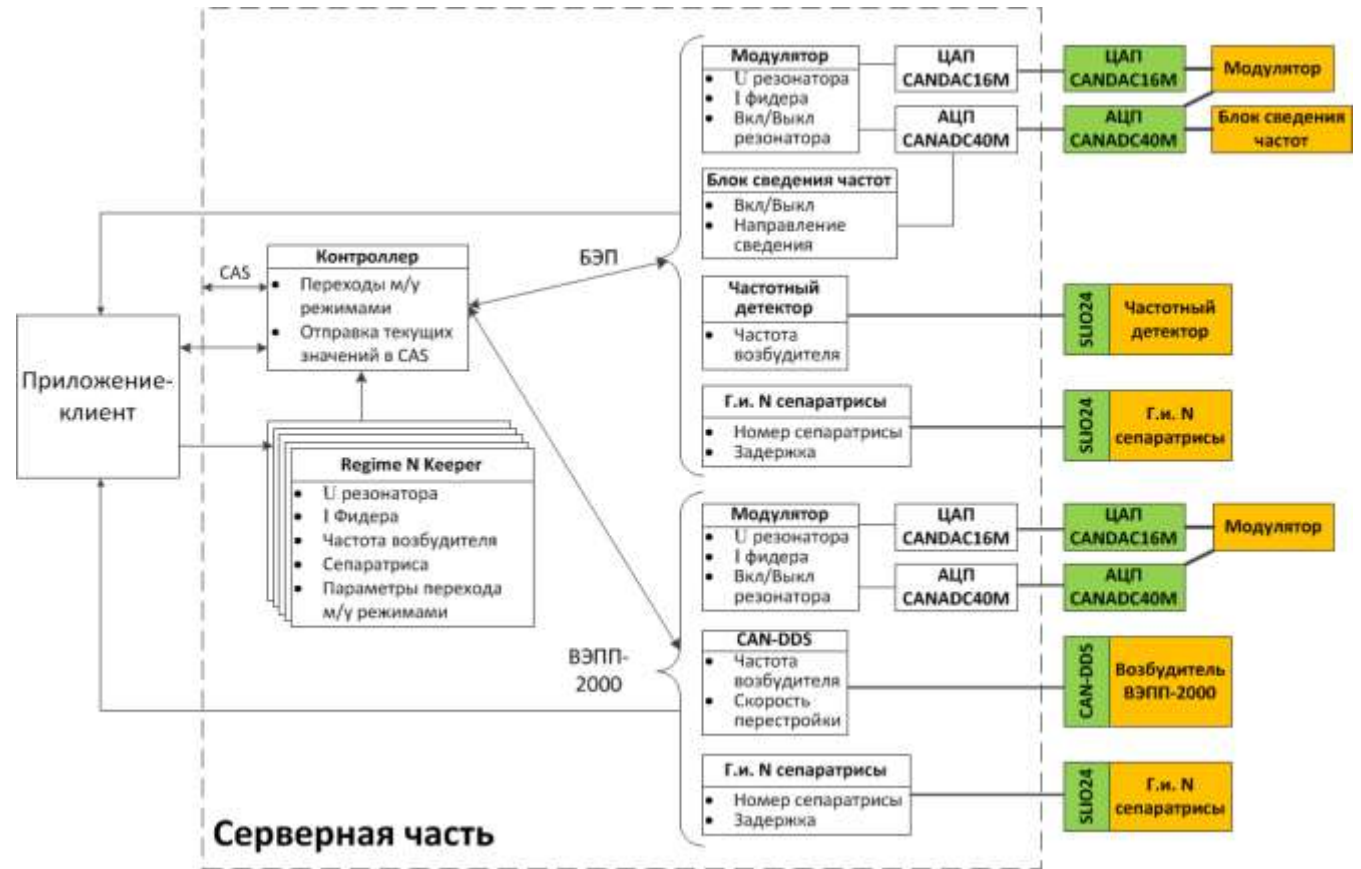
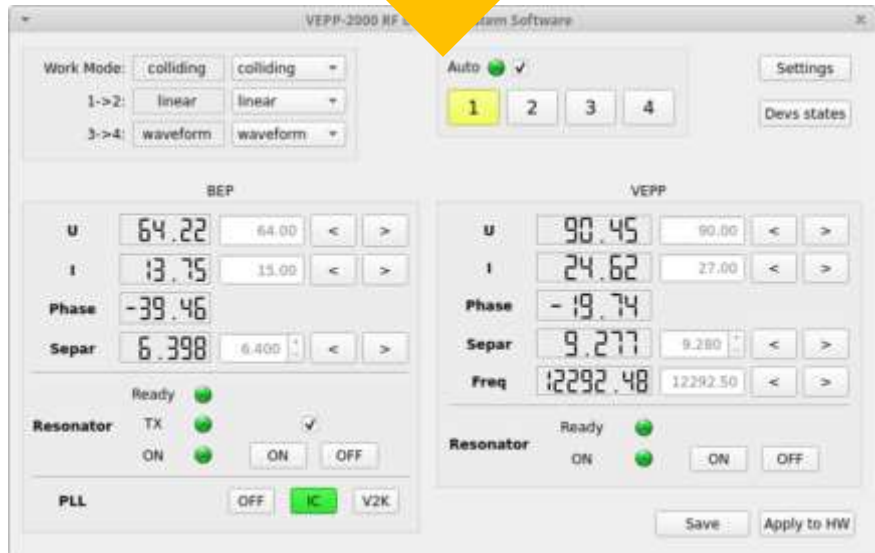
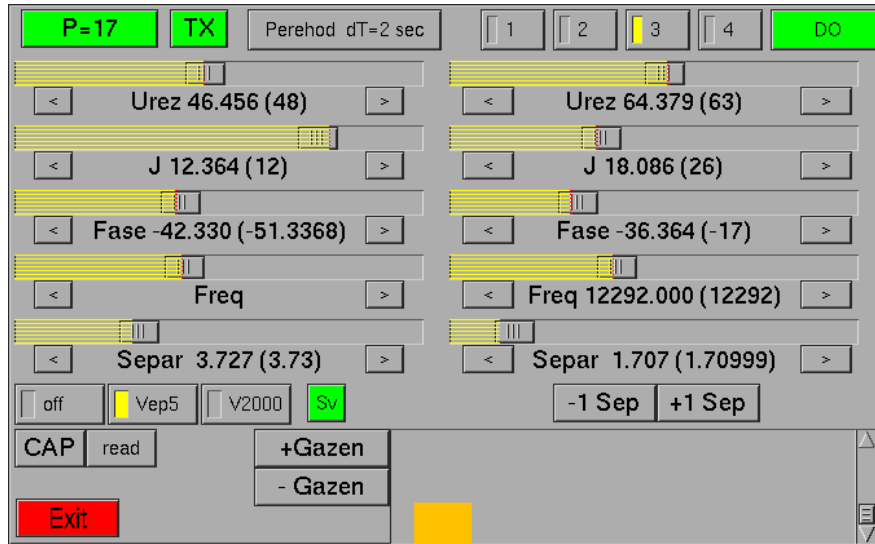
Ток пучка $I = 0,7$ мА. Расчетное время затухания радиальных бетатронных колебаний при энергии пучка $E = 430$ МэВ составляет $\tau_x \approx 32$ мс, что хорошо соотносится с измеренной величиной 36 мс.

Наблюдалась токовая зависимость времени затухания вследствие коллективных эффектов.



* съемка велась при ударах кикерами по пучку

VEPP-2000 Control System Software Update



Публикации

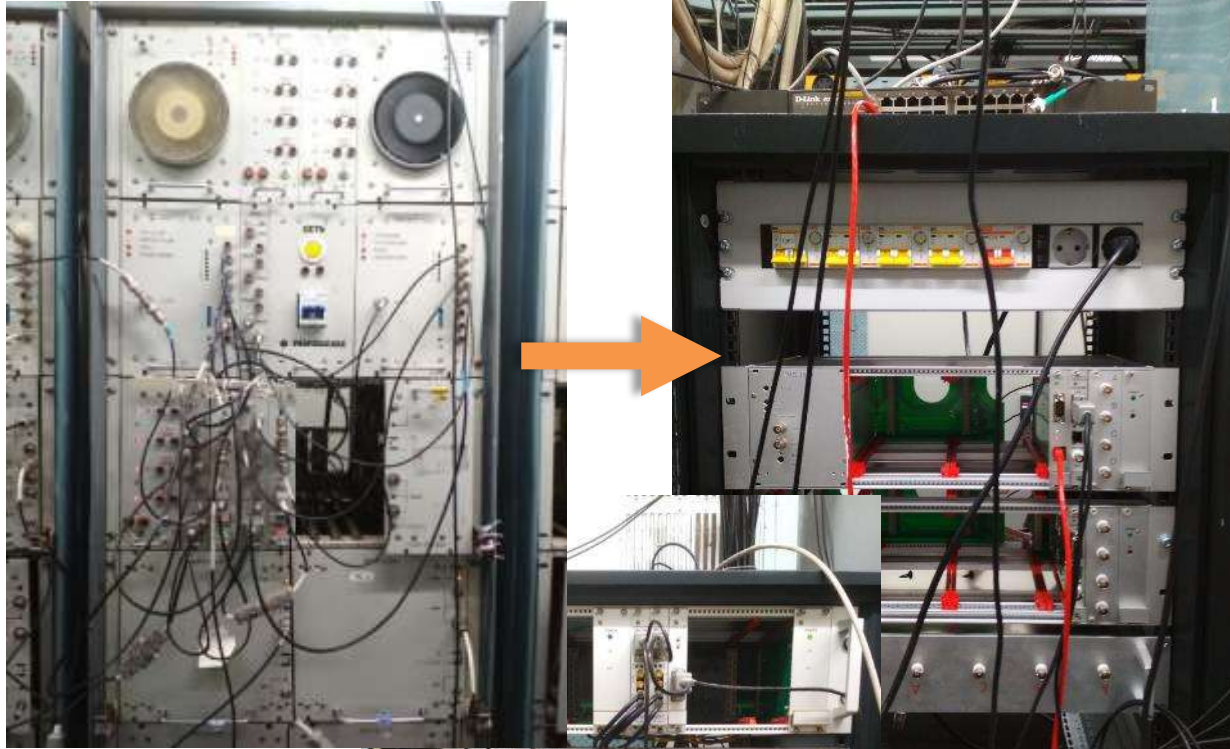
1. Rastigeev, et all: Performance enhancement of VEPP-2000 collider over the last two years.
2. Кооп: Свободная прецессия спинов как альтернатива методу резонансной деполяризации в будущих электрон-позитронных коллайдерах.
3. Bedarev, et all: Свободная прецессия спинов как альтернатива методу резонансной деполяризации в будущих электрон-позитронных коллайдерах.
4. Bedarev, et all: Планирование эксперимента по определению бегущего угла Вайнберга на энергии J/ψ мезона на тау-чарм фабрике.
5. A.E. Bondar (speaker), E.V. Bedarev, I.A. Koop, A.V. Otboev, Yu.M. Shatunov, Measurement of the weak mixing angle at a Super Charm-Tau factory with data-driven monitoring of the average electron beam polarization, The 2024 International Workshop on Future Tau Charm Facilities (FTCF2024), January 14-18, Hefei, China, 2024.
6. Rogovsky, Bekhtenev: Calibration of beam position monitors for Injection Complex damping ring.
7. Denisov, Rogovsky: Развитие методов цифровой обработки сигналов с датчиков пооборотного положения пучка.
8. Senchenko, et all: VEPP-2000 control system. Tango migration and recent upgrades.
9. Eminov, et all: Upgrade of software of VEPP-2000 RF Control system.
10. Sherstuk, et all: Coherent Betatron Oscillations in a Storage Ring at Injection.
11. Sherstuk, et all: Single-revolution regime of CCD-camera at injection at VEPP-2000.
12. Chistakov, Perevedentsev: Betatron Stopbands in VEPP-2000 Collide
13. Timoshenko, et all: Coherent Betatron Oscillations in a Storage Ring at Injection.



Что мы еще можем сделать после 2023 г.

- Ничего. Продолжать работу.
- Улучшать надежность → Повышать интеграл.
- Изучение и оптимизация коллайдера во всем диапазоне энергий.
- Модернизация?

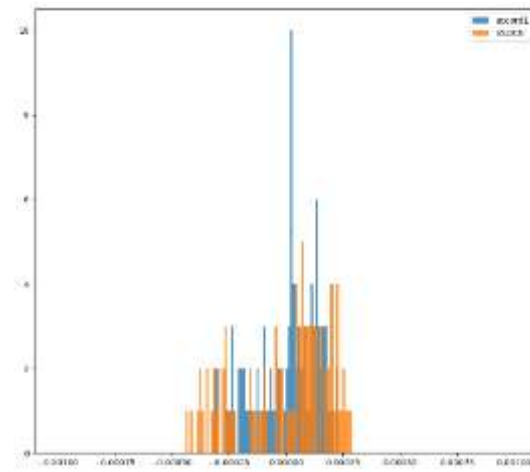
Модернизация: АККОРД => ГИД-160 элементов КБВ



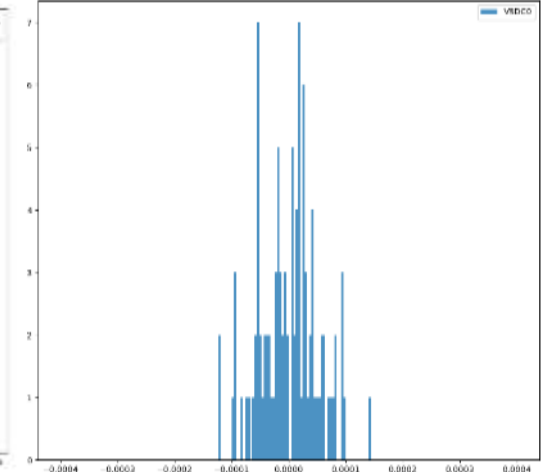
АКОРД: 2 channels

ГИД-25: 8 channels

ГИД-160: 1 channel



АКОРД: stability $2 \cdot 10^{-3}$



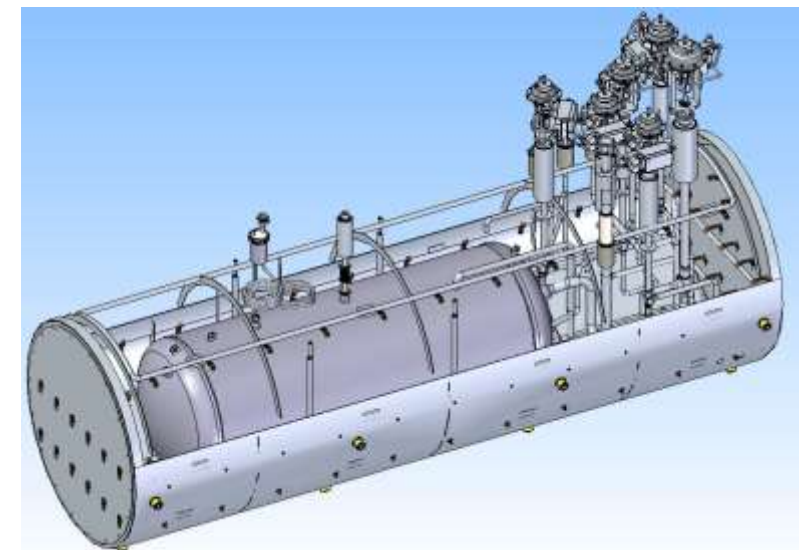
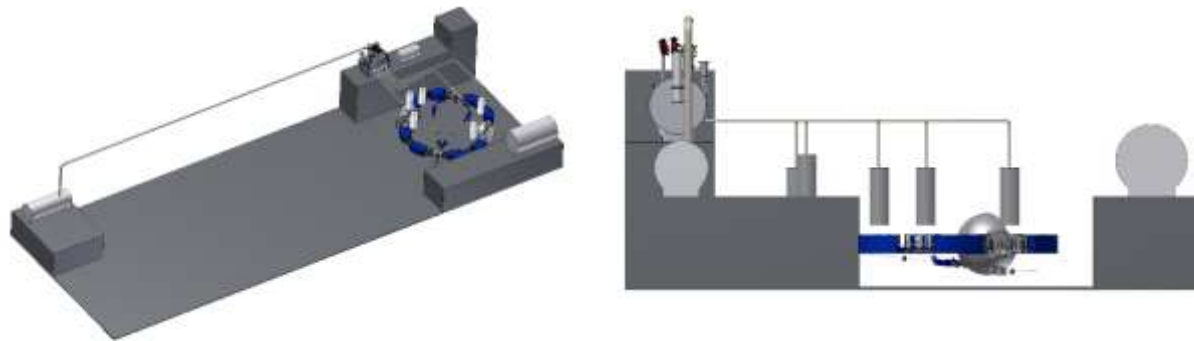
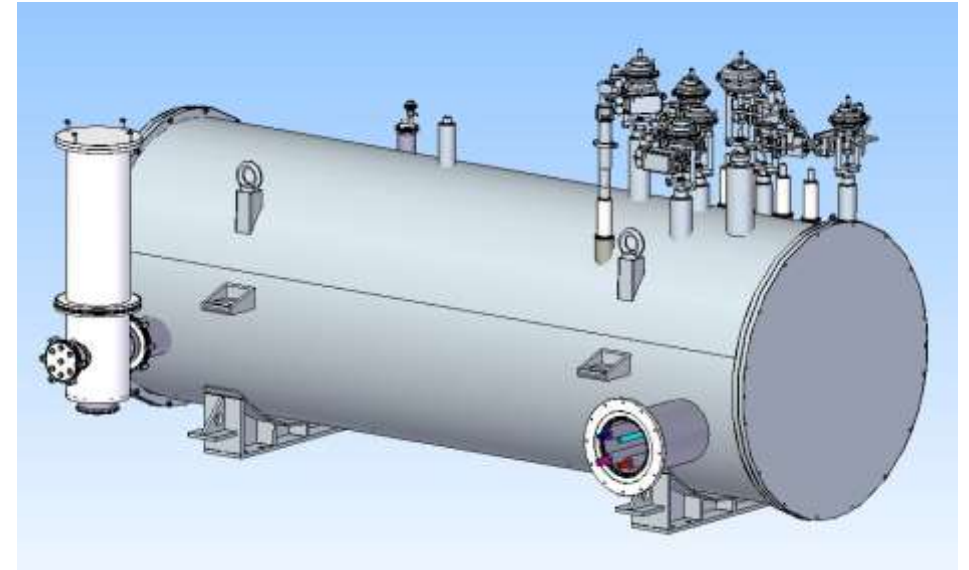
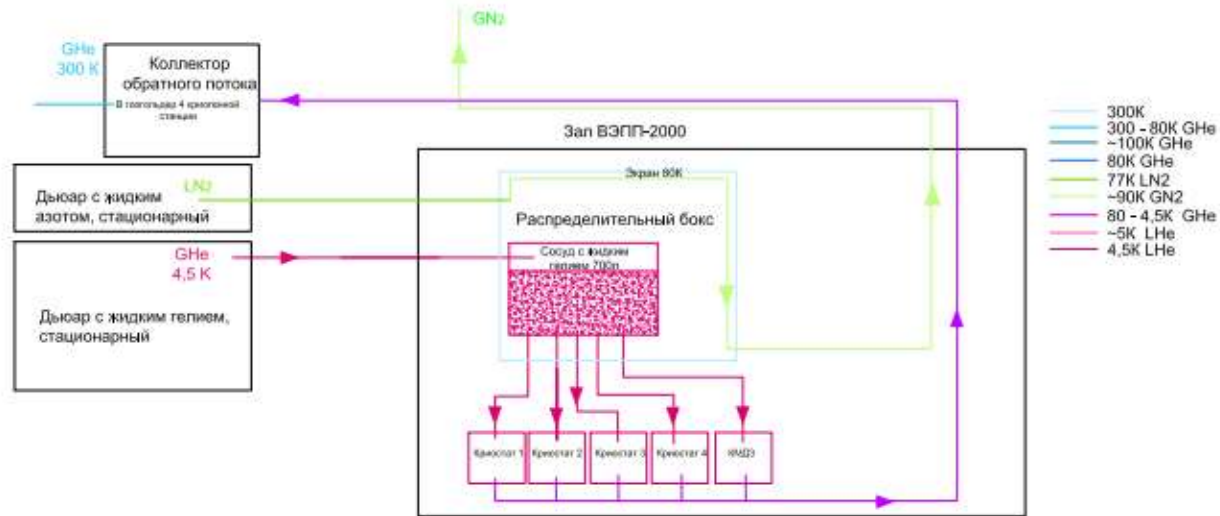
ГИД-160: stability $2 \cdot 10^{-3}$

Delivered FOS to BINP @ 2022
Total price – 3.000k rub.

- ✓ Комплектация для 3 корзин
- ✓ Проверена стабильность
- × Долговременный дрейф
- ✓ ПО управления
- × Интеграция в СУ ВЭПП-2000

Пуско-наладочные работы

Модернизация: дистанционная заливка гелия



- Most of parts designed
- Location of N / He tanks not clear yet
- Further study is needed

Пока это мечты.
Поиск решения.

Conclusion

- ВЭПП-2000 продолжает набор статистики в области энергий 160-1000 МэВ.
- Набранный городской в последовательные 3 сезона больше чем за предыдущие.
- Достигнута рекордная светимость 0.5×10^{32} @ ~800 МэВ (в 2023).
- Ведется модернизация подсистем и повышение надежности работы комплекса.
- Целевой интеграл 1 фб.⁻¹ не за горами. Осталось ~100 нб.⁻¹.
- ВЭПП-2000 в хорошей форме. Можем набрать еще 1 фб.⁻¹.