КОЛЛАЙДЕР ВЭПП-2000: ОПЫТ РАБОТЫ, ТЕКУЩЕЕ СОСТОЯНИЕ, БЛИЖАЙШИЕ ПЕРСПЕКТИВЫ

Ю. Роговский

от имени коллаборации ВЭПП-2000
и большого коллектива ИЯФ работающего в интересах ВЭПП-2000

Институт Ядерной Физии им. Г.И. Будкера



ОИЯИ, Дубна
14-19 сентября, 2026

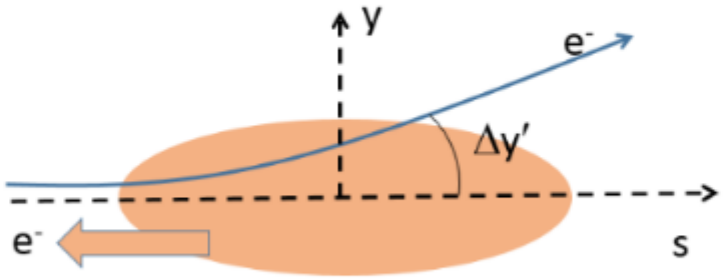
ИЯФ СО РАН

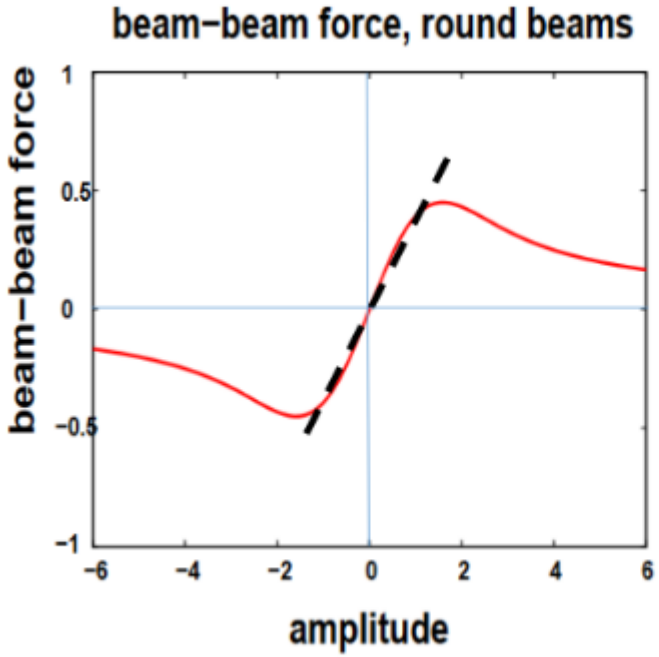
Эффекты встречи сталкивающихся сгустков

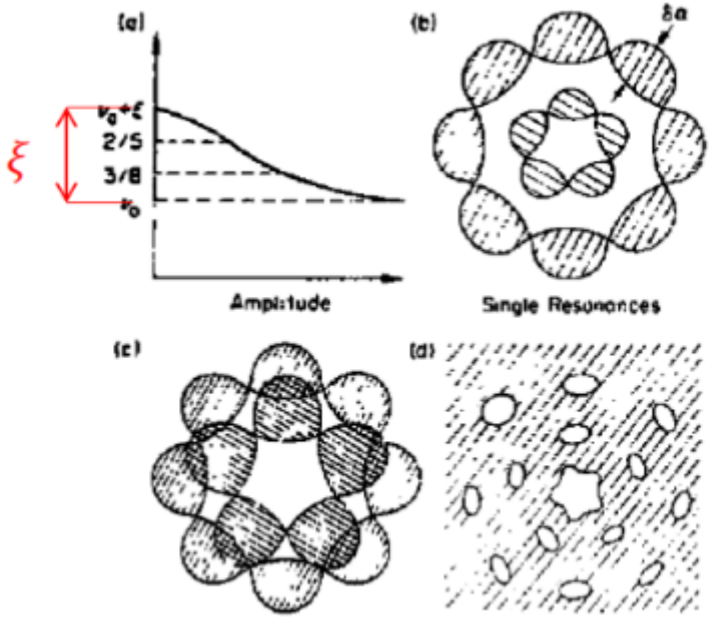
Ограничение светимости в «обычных» коллайдерах вызывается коллективным (нелинейным!) полем одного сталкивающегося сгустка, действующим на частицы другого сгустка.

$$L = f \cdot \frac{N^2}{4\pi\sigma^2} = f \cdot N \frac{\xi \cdot \gamma}{r_e \beta} = \frac{I}{e} \cdot \frac{\xi \cdot \gamma}{r_e \beta}$$

$$\Delta\nu = \xi = \frac{N \cdot r_e \beta}{4\pi\sigma^2 \gamma} = \frac{r_e}{4\pi} \cdot \frac{N}{\varepsilon\gamma}$$







Machine	E (GeV)	γ	ξ_y (experiment)
DAFNE	0.51	998	0.02
BEPC	1.89	3698	0.04
BEPCII	1.89	3698	0.04
PEP-II(L)	3.12	6106	0.06
PEP-II(H)	8.99	17593	0.048
KEKB(L)	3.5	6849	0.069
KEKB(H)	8.0	15656	0.052
LEP-I	45.6	88062	0.033
LEP-II	104.5	191781	0.079
LEP3	120	234834	0.0798
CEPC	120	234834	0.0739

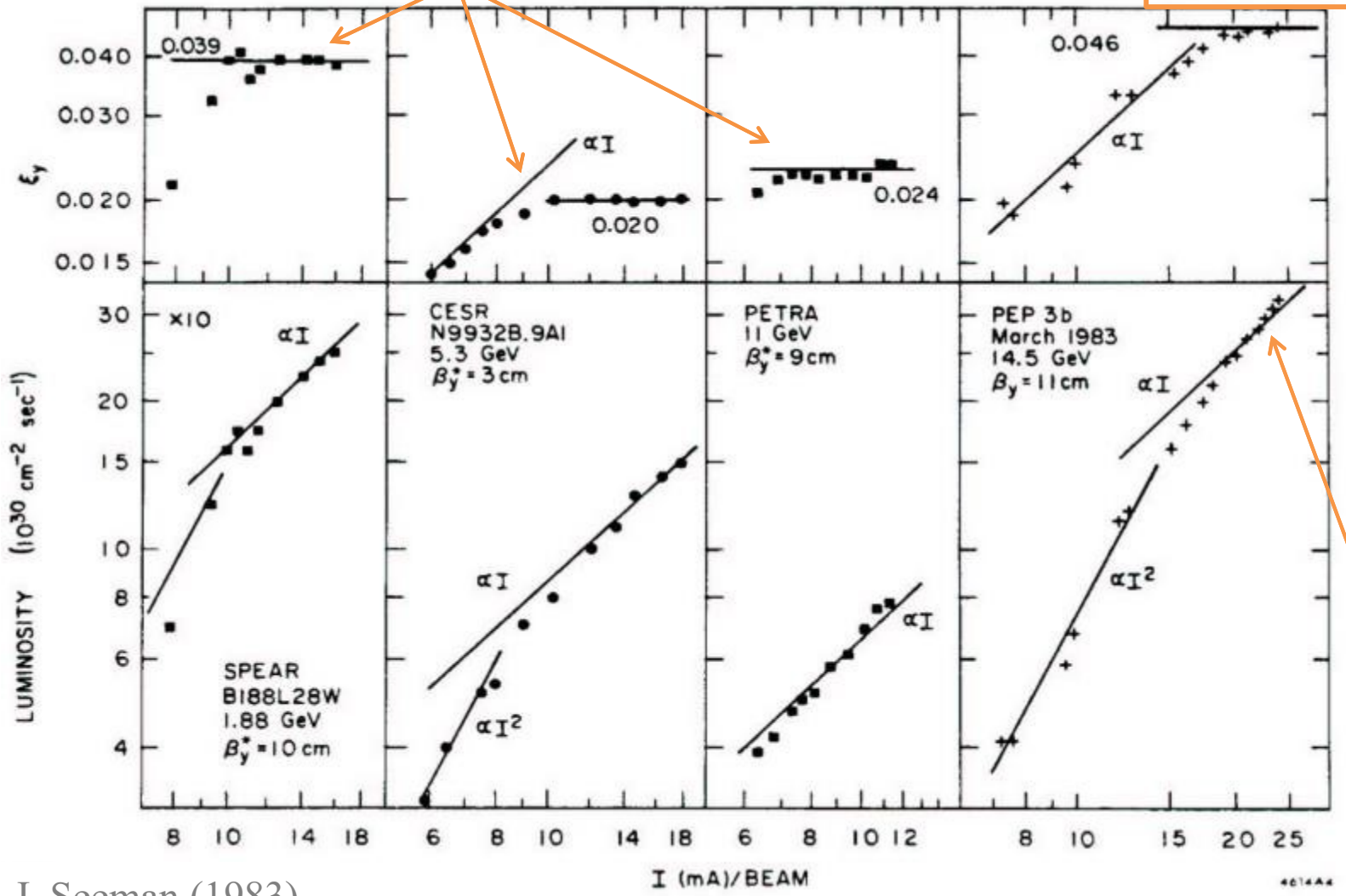
$$\xi \approx 0.02 \div 0.08$$

ВЭПП-2000: ξ value ≥ 0.1

Предел по эффектам встречи в лептонных машинах

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

$$\xi_{x,z} = \frac{r_e \beta^*_{x,z}}{2\pi\gamma} \cdot \frac{N_2}{\sigma_{x,z}(\sigma_x + \sigma_z)} \longrightarrow L = \frac{\pi\gamma^2 \xi_x \xi_y \varepsilon_x f}{r_e^2 \beta^*_y} \left(1 + \frac{\sigma_y}{\sigma_x}\right)^2$$



Specific luminosity vs beam current @ VEPP-2M

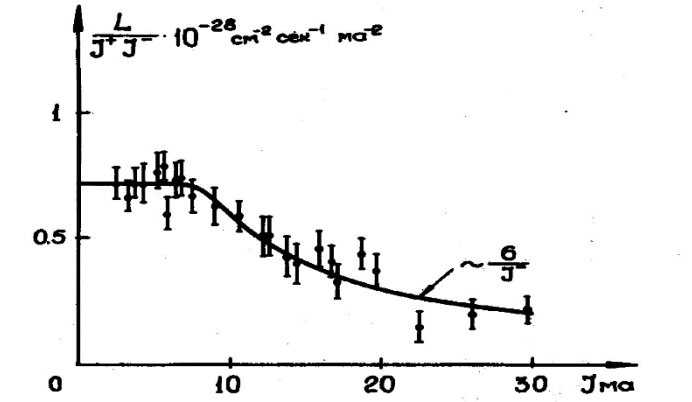


Рис.4. Зависимость удельной светимости от тока электронного пучка.

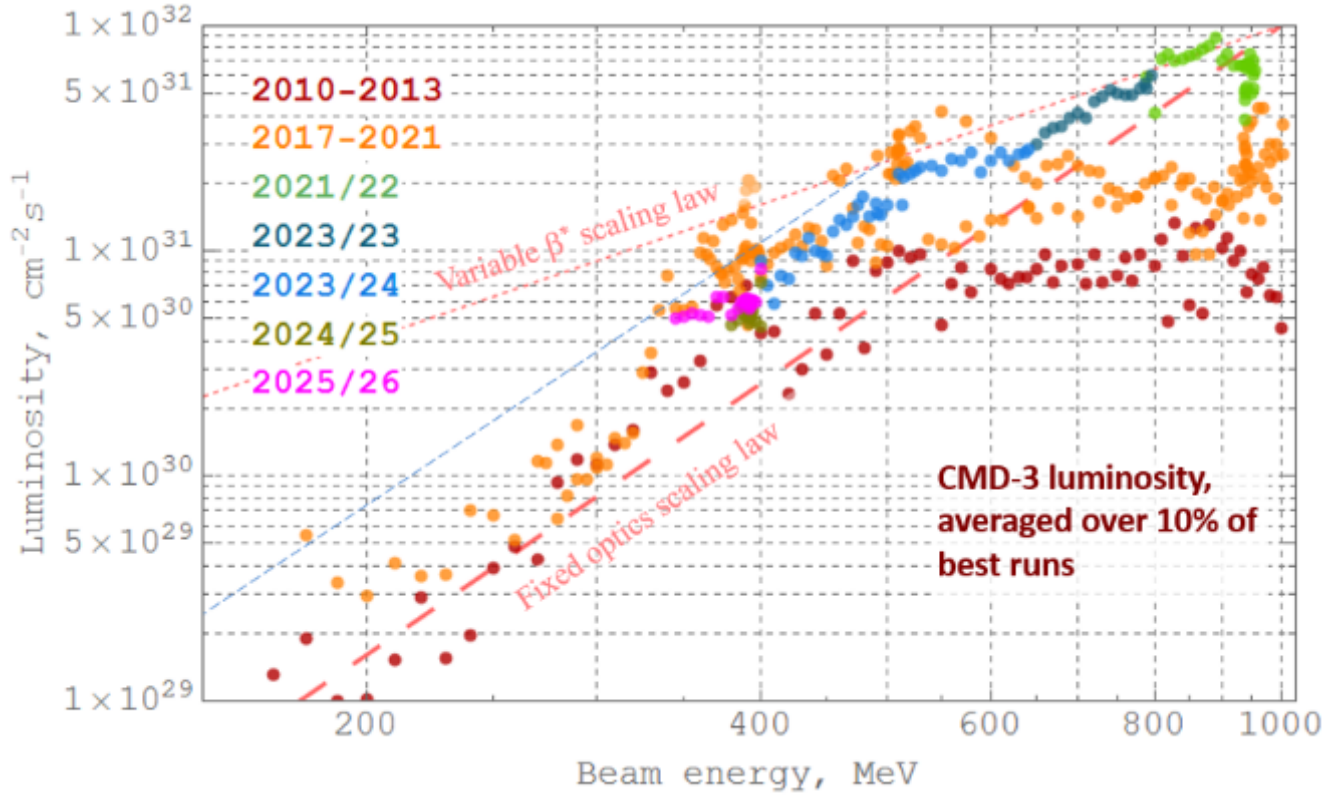
Final limit:

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

J. Seeman (1983)

ВЭПП-2000: Круглые пучки

Первый (и единственный) коллайдер с круглыми пучками. «Одномеризация» движения (одна координата r вместо x, y) уменьшает число резонансов, увеличивает ξ, и, как следствие, светимость.





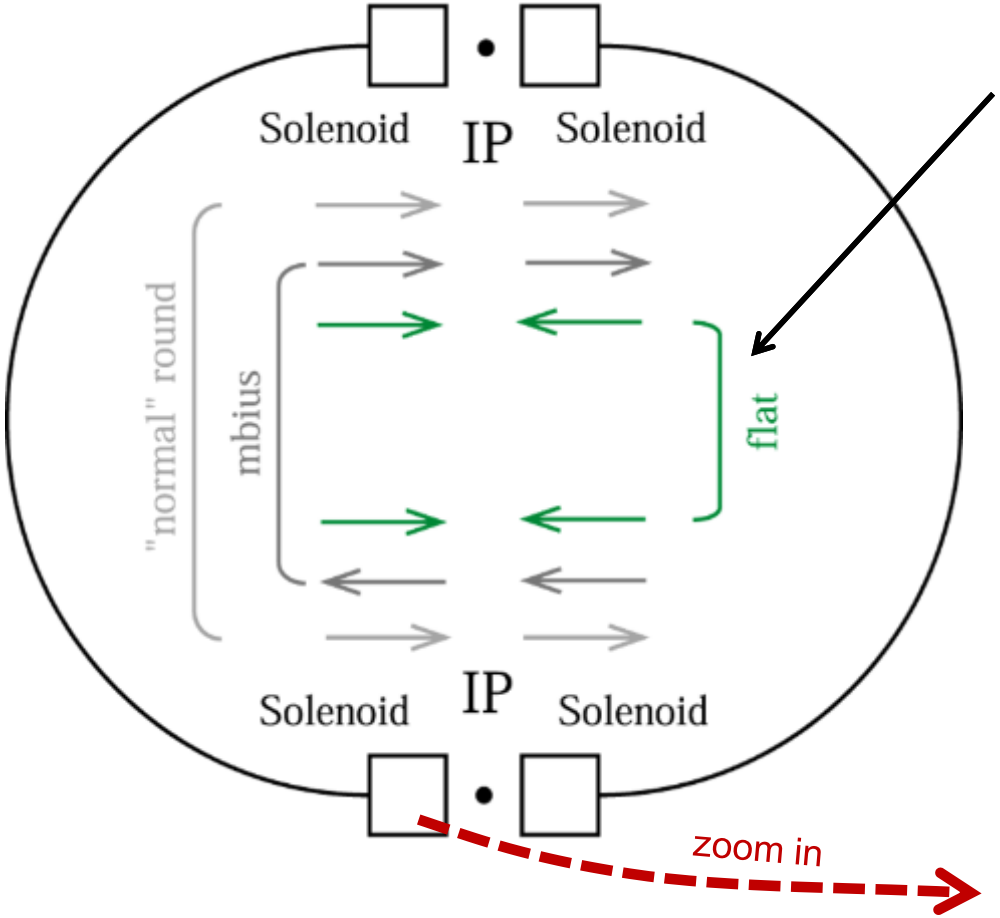
Design parameters @ 1 GeV	
Circumference	24.388 m
Number of bunches	1×1
Beam-beam parameter	0.12
Beam energy range	150 ÷ 1000 MeV
Design luminosity	1×10^{32} cm^{-2}s^{-1}

Lum Integral: **1053 pb^{-1}**/detector @ 2024, Target: **1 fb^{-1}**

Current absolute record peak luminosity: $L_{peak} = 0.9\times10^{32}$ cm^{-2}s^{-1} @ 890 MeV in 1 x 1 bunch collision (ξ value ≥ 0.1)

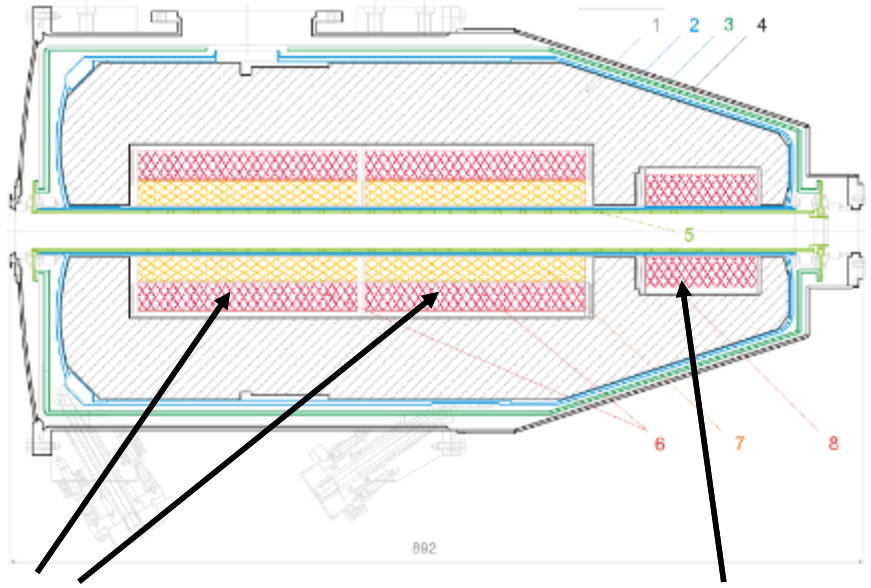
ВЭПП-2000: Круглые пучки (реализация)

The RCB realization at VEPP-2000 includes axially-symmetric final focusing with strong solenoids. The polarity of solenoid does not change the focusing features, but affect the betatron eigen modes and emittances formation.



Choice of polarity combination: round beam due to coupling resonance? The simplest practical solution, best dynamic aperture.

Below 600 MeV “short” FF solenoids are available (backward halves of main coils switched off).



Flat-to-Round/Mobius or Long-to-Short change needs polarity switch in solenoids, realignment and new orbit correction.

12T Solenoid main coils, NbTi, Nb_3Sn 8T Compensating coil

ВЭПП-2000 магнитная система и оборудование @ 2026

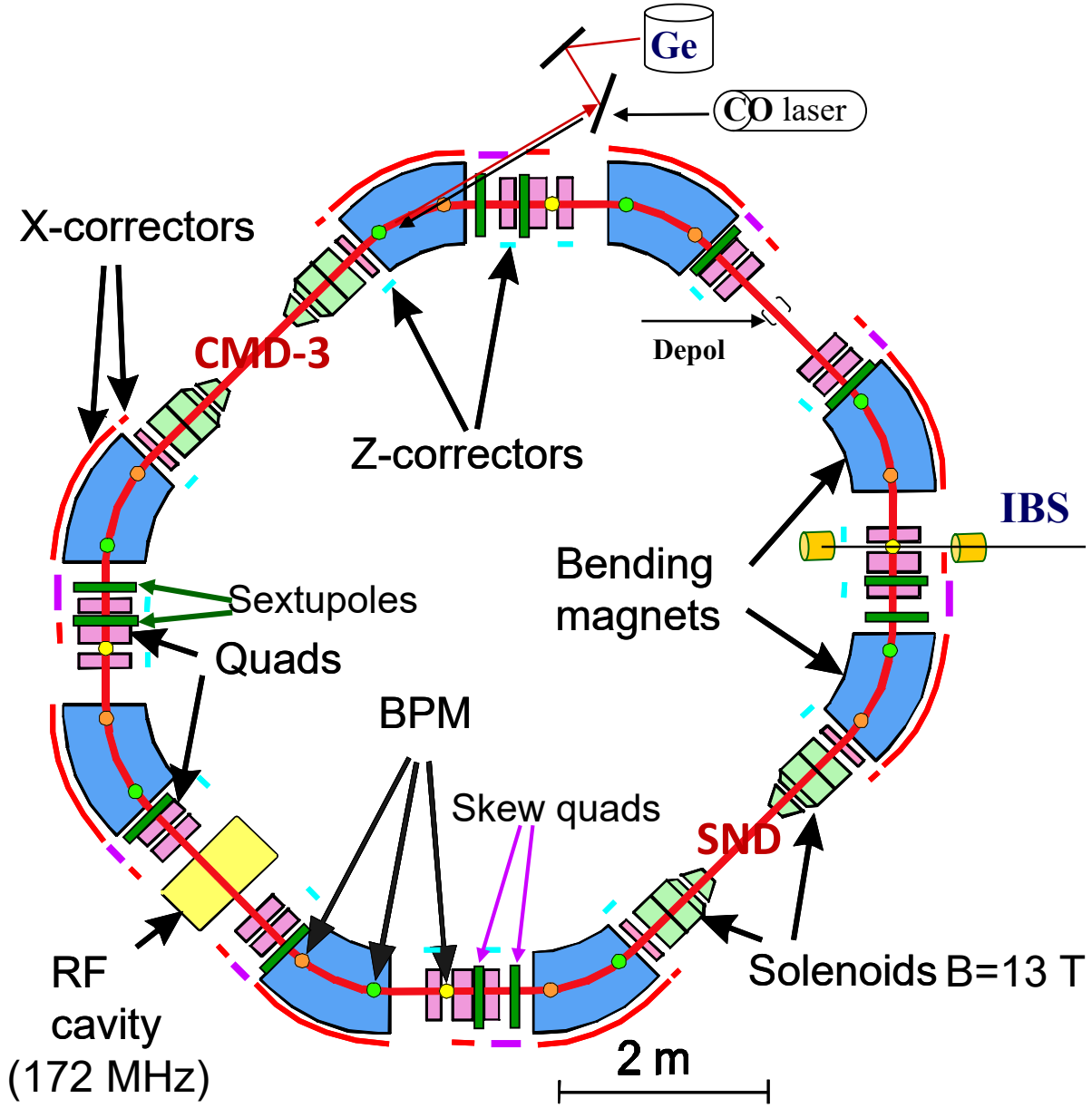
Основная структура:
8 дипольных магнитов
24 квадр. линзы
4 с.п. соленоида

Коррекции:
24 гор. дипольных корректора
20 верт. дипольных корректоров
12 секступолей
12 скью-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



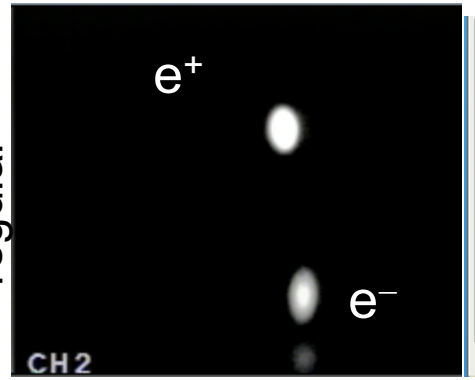
"Flip-flop" эффект

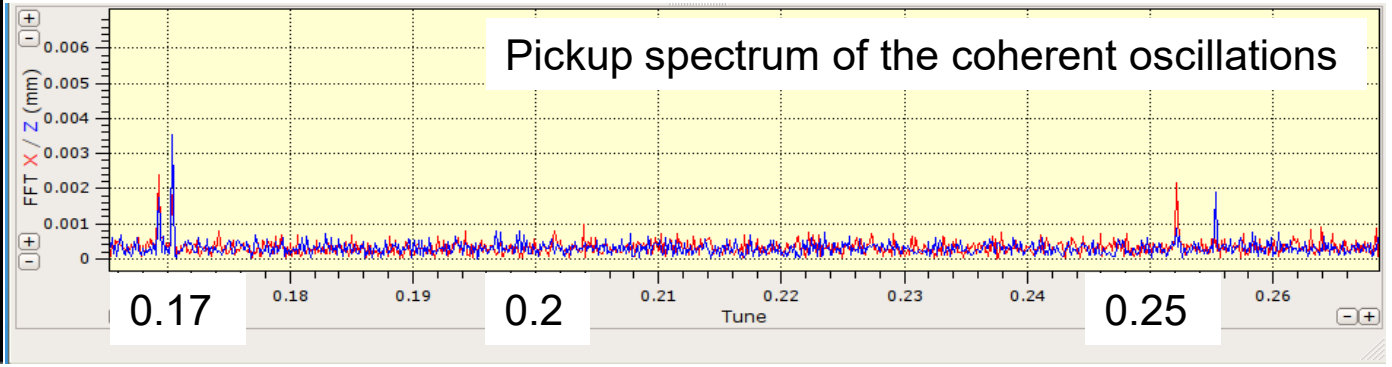
TV

σ-mode

π-mode

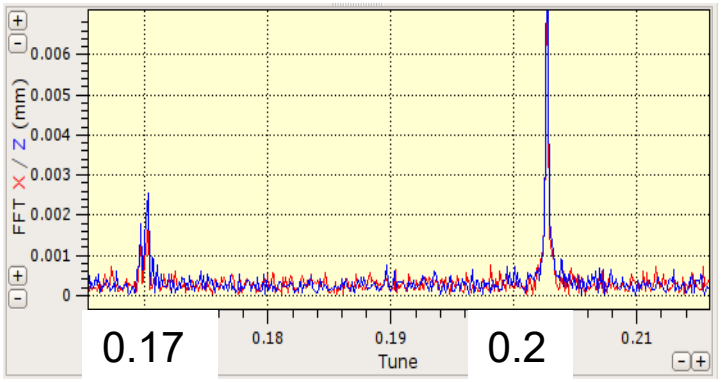
regular



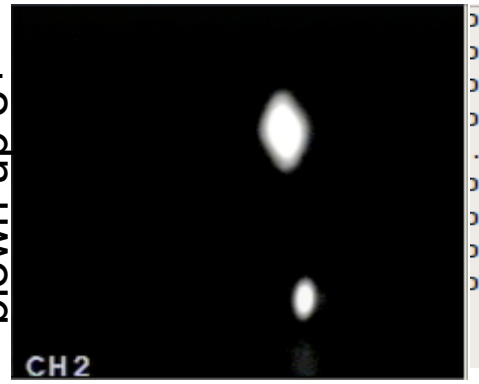


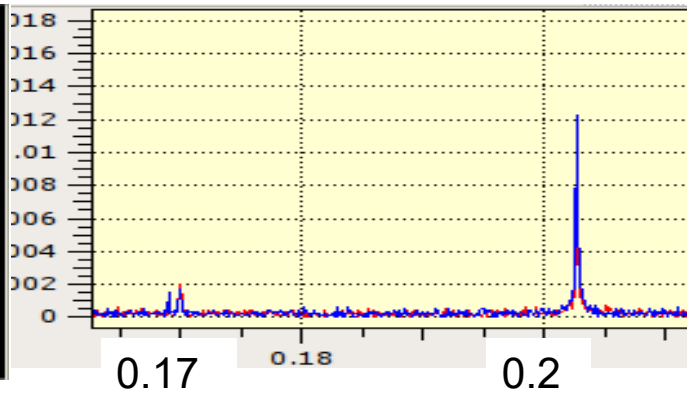
blown-up e–



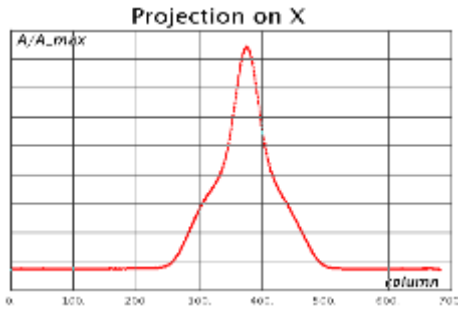


blown-up e+





E = 240 MeV,
I_{beam} ~ 5×5 mA



Coherent beam-beam π-mode interaction with machine nonlinear resonances?

Although the RCB works well and beam-beam parameter was significantly enhanced, the beams intensity still limited by one of the beam-beam effects, namely flip-flop effect.

This "strong-strong" effect appears as additional meta-stable states of the two-beam system above given intensity threshold. Except the state with equal beam sizes there are two states with one of the beams being blow-up.

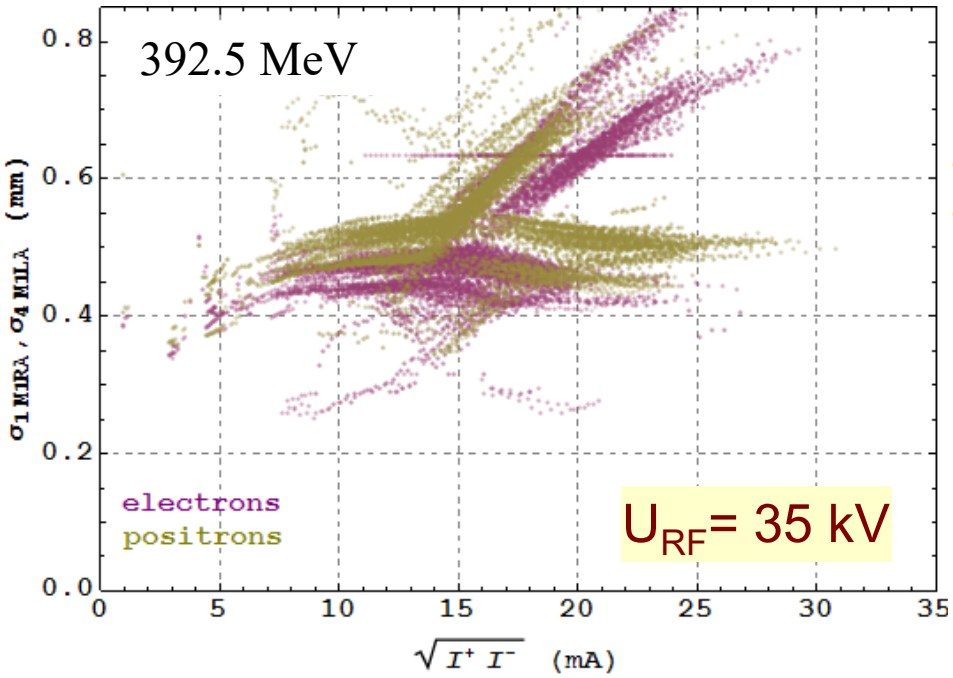
The transverse distribution becomes strongly non-Gaussian, the coherent modes spectra indicates some interplay with machine non-linear resonances.

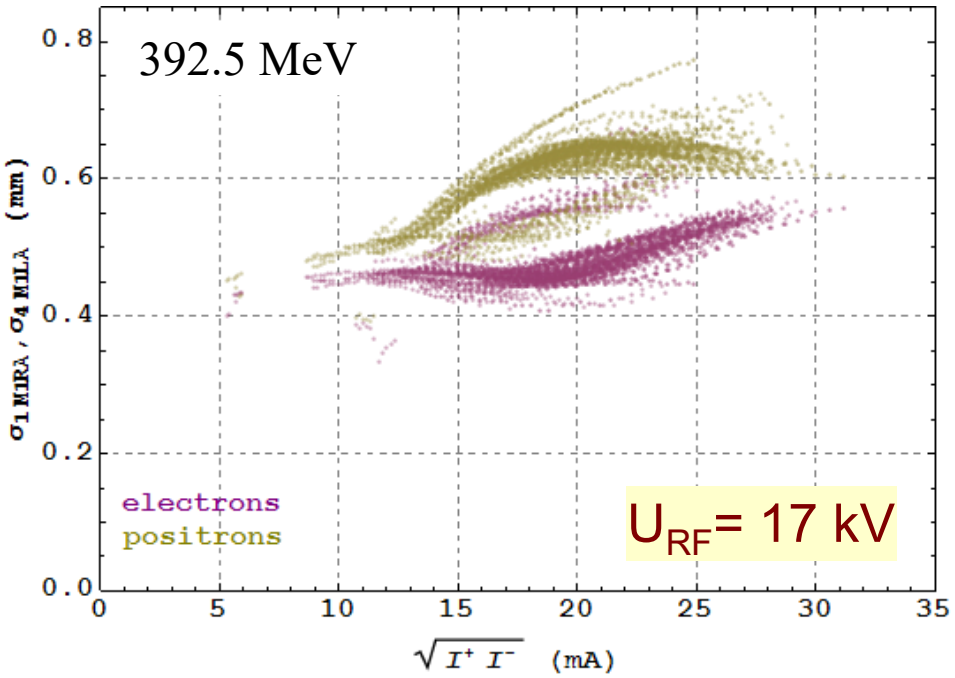
Опыт работы #1: удлинение сгустка (2013)

While operation at the low energy range it was founded that RF voltage lowering helps with flip-flop suppression. This enhancement is a result of bunch lengthening with intensity growth. The lengthening in turn appears not only due to RF cavity loading but in addition due to microwave instability.

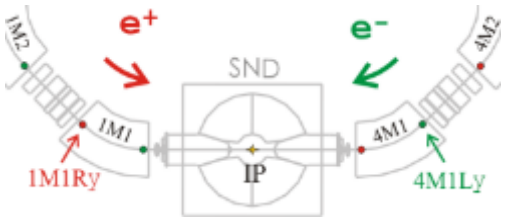
The bunch lengthening close to the β^* value is believed to be helpful due to betatron phase averaging along the beam-beam interaction area: *S. Krishnagopal, R. Seeman., Phys.Rev.D, 1990*

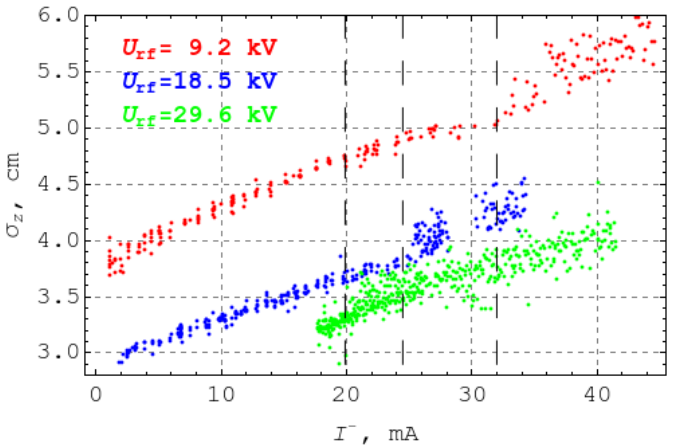
Another possible explanation – additional "close to integrabilily" of motion: *Danilov, Perevedentsev, 1997*

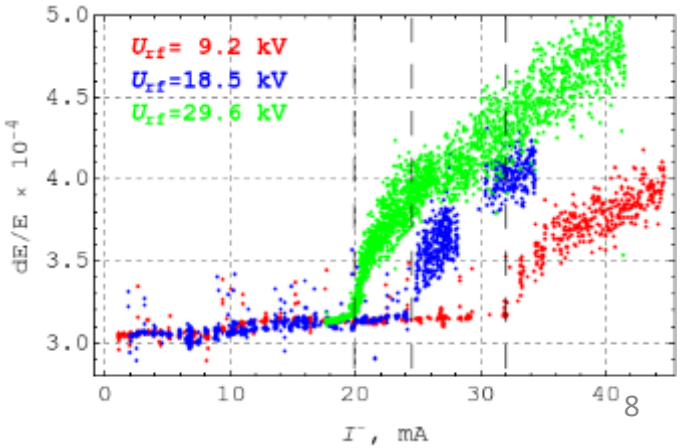




- Lengthening is a result of RF bucket flattening + microwave instability
- RF voltage decrease is available only at low energies (due to low SR losses)!







Опыт работы #2: раздувание пучка, Beam Shaker (2018)

At low energies the emittance growth is available up to the aperture restriction. That allows with the same beam-beam parameter (particles density) to increase the beam current and luminosity.

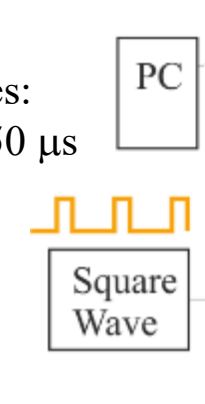
A. N. Skrinsky
Institute of Nuclear Physics
Novosibirsk, USSR

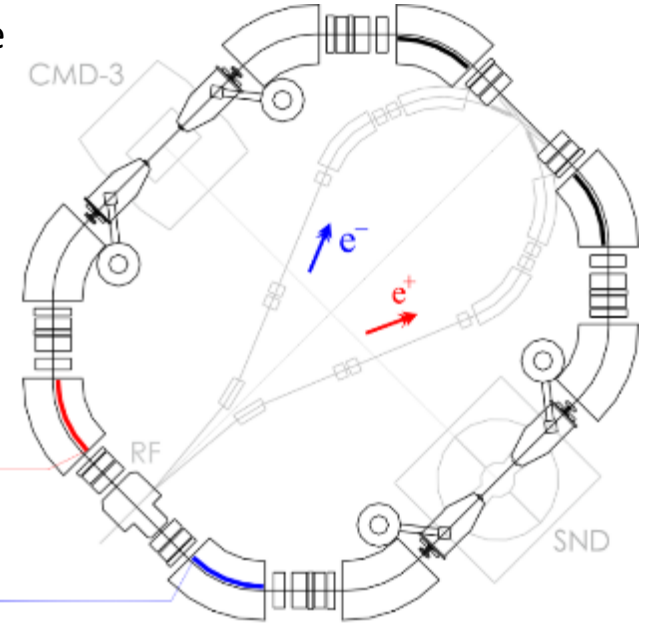
STORAGE RING PROGRAM IN NOVOSIBIRSK
(Review)

An attempt was made to raise the useful electron current value. The lateral dimensions of both beams were artificially maintained large enough in order to have the tune shift less than the permissible one and in order not to excite coherent oscillations. To this end, the stochastic regime was used, produced by means of multiple passing the resonance of the betatron oscillations with the external excitation. At an energy of 2 × 200 MeV, we succeeded in bringing the permissible current up from 10 mA to 100 mA, which was to increase the luminosity by the order of magnitude. But this study was not finished because of the machine reconstruction.

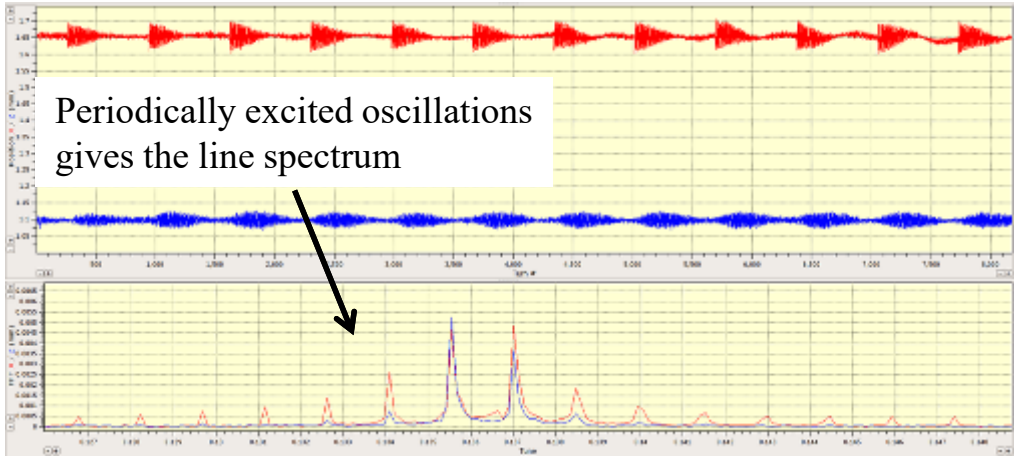
Typical pulse values:
50-100 V, 300 ns, 50 μs

(T_{rev} = 81.4 ns)

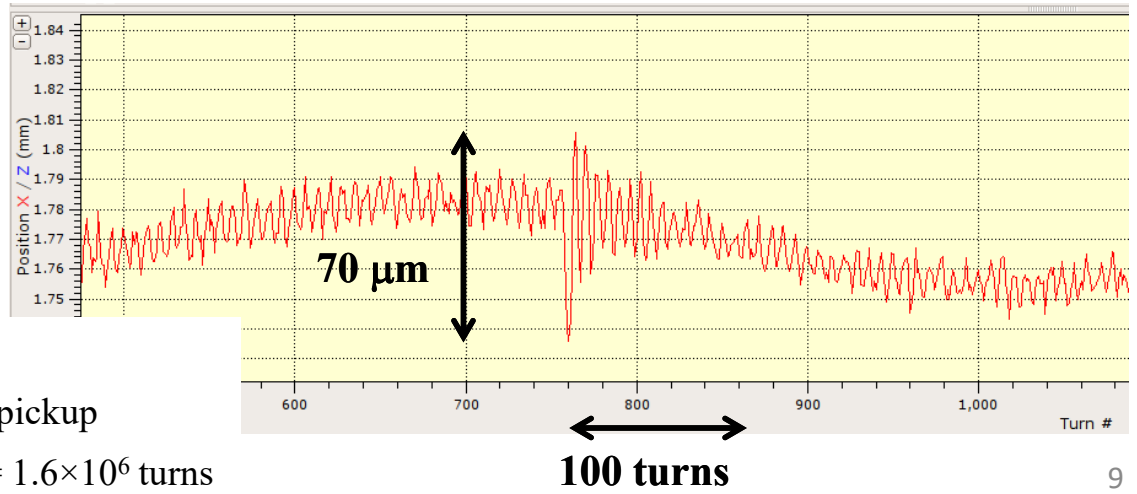




Pickup signal, without counter beam, 360 MeV



Pickup signal, with strong counter beam, 274 MeV



@ 274 MeV:

σ_x = 250 μm @ pickup

τ_{damp} = 130 ms = 1.6×10⁶ turns

Beam Shaker (2)

Experimentally: permanent excitation of “strong” beam size prevent it from shrinkage to natural value during injection cycle of “weak” beam, or other perturbations. Very effective suppression of flip-flop meta-stable states.

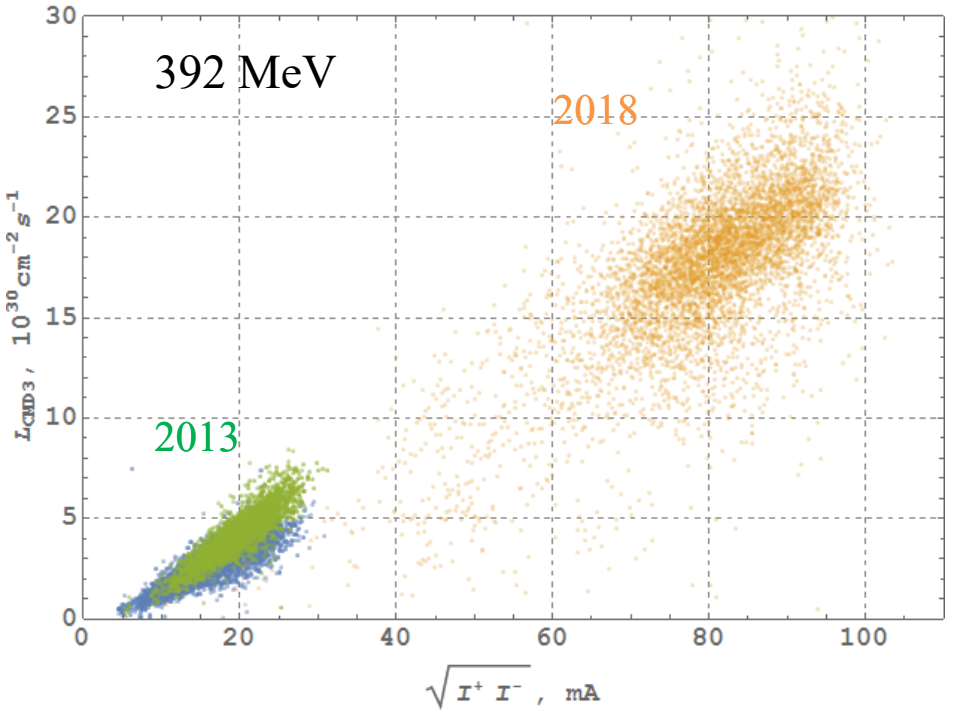
$$\xi_{nom} = \frac{N^- r_e \beta^*_{nom}}{4\pi\gamma\sigma^{*2}_{nom}}$$ - normalized beam current

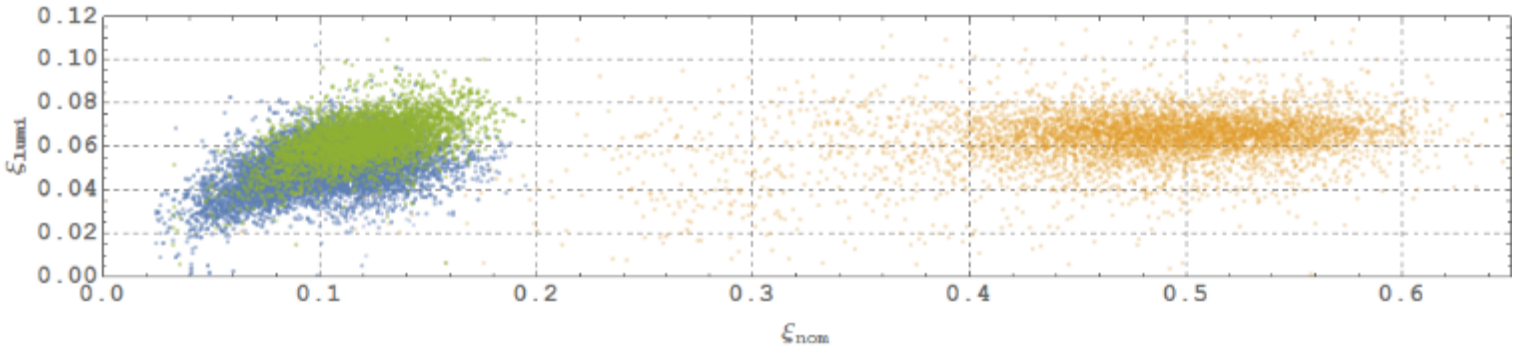
$$\xi_{lumi} = \frac{N^- r_e \beta^*_{nom}}{4\pi\gamma\sigma^{*2}_{lumi}}$$ - “beam-beam parameter”

$$L = \frac{N^+ N^-}{4\pi\sigma^{*2}} f_0 = \frac{N f_0 \gamma}{r_e} \frac{\xi_{lumi}}{\beta^*_{nom}}$$

x4 times increase in luminosity

Luminosity w/wo shaker

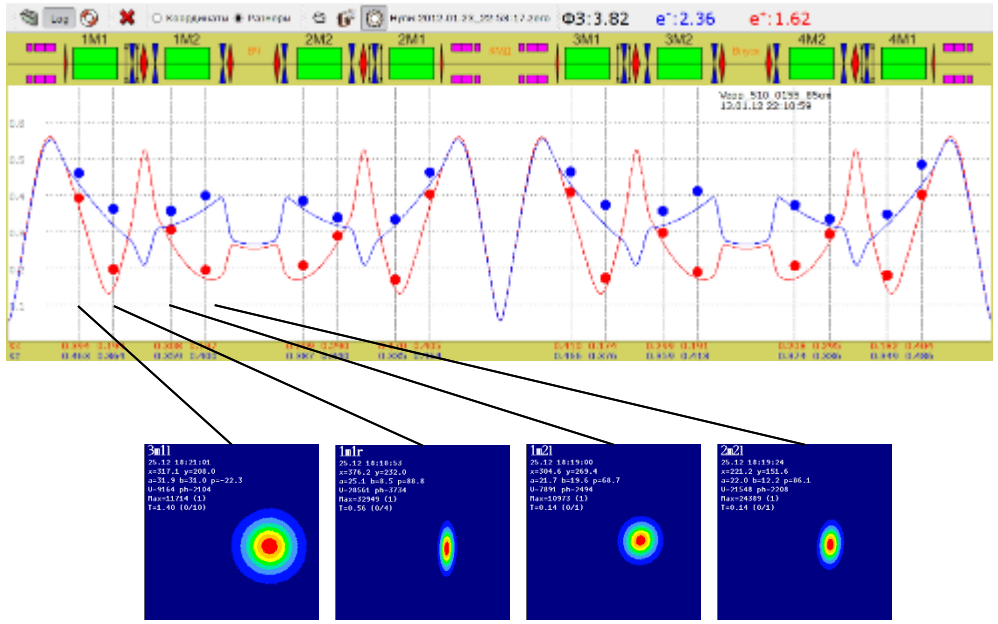




Beam-beam parameter as extracted from delivered luminosity

Опыт работы #3: настройка машины во время работы

Beams profile @ CCDs along the ring



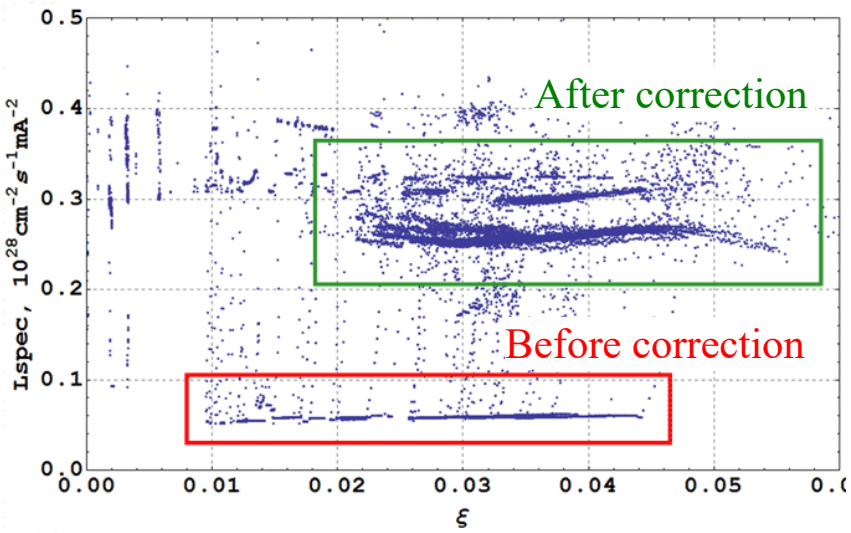
Machine tuning

1) Orbit correction & minimization of steerers currents using ORM techniques
2) Lattice correction via ORM SVD analysis ($\delta\beta < 5\%$)
3) Betatron coupling correction in arcs ($\delta\nu_{min} \sim 0.001$)
4) Working point fine tuning & small shift below coupling diagonal
5) Waist position (IP2IP phase advance symmetry)
6) Sextupoles fine tuning (chromaticity slightly undercompensated)

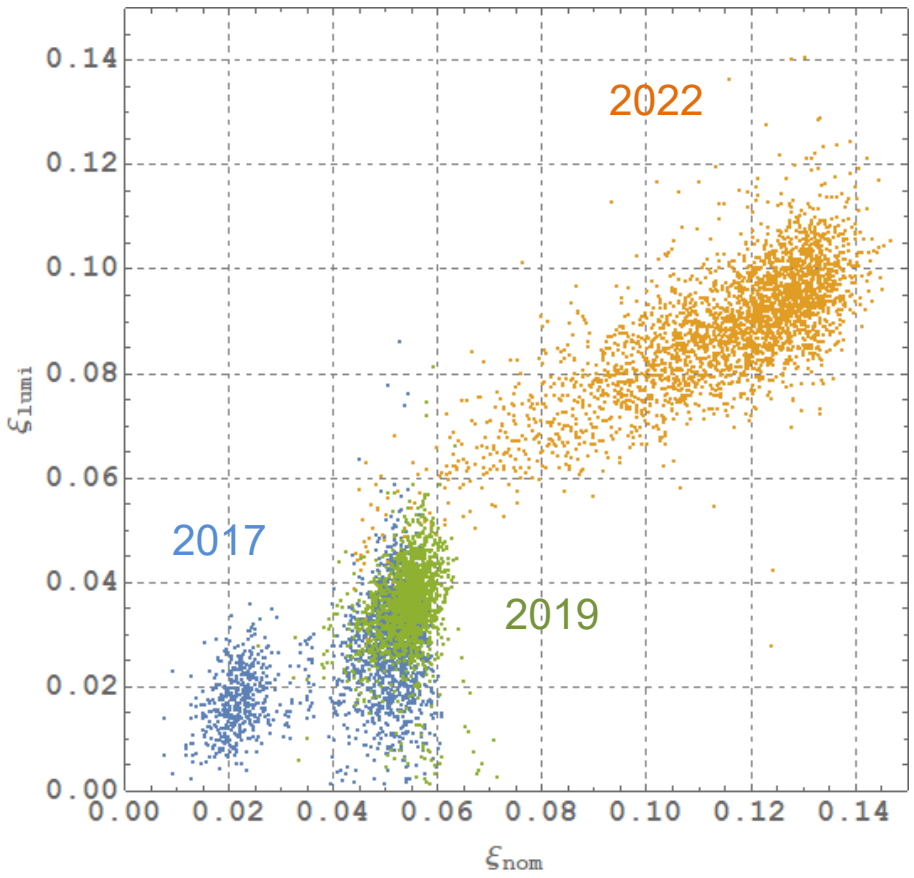
Reasons for data taking rate progress @ high energies:

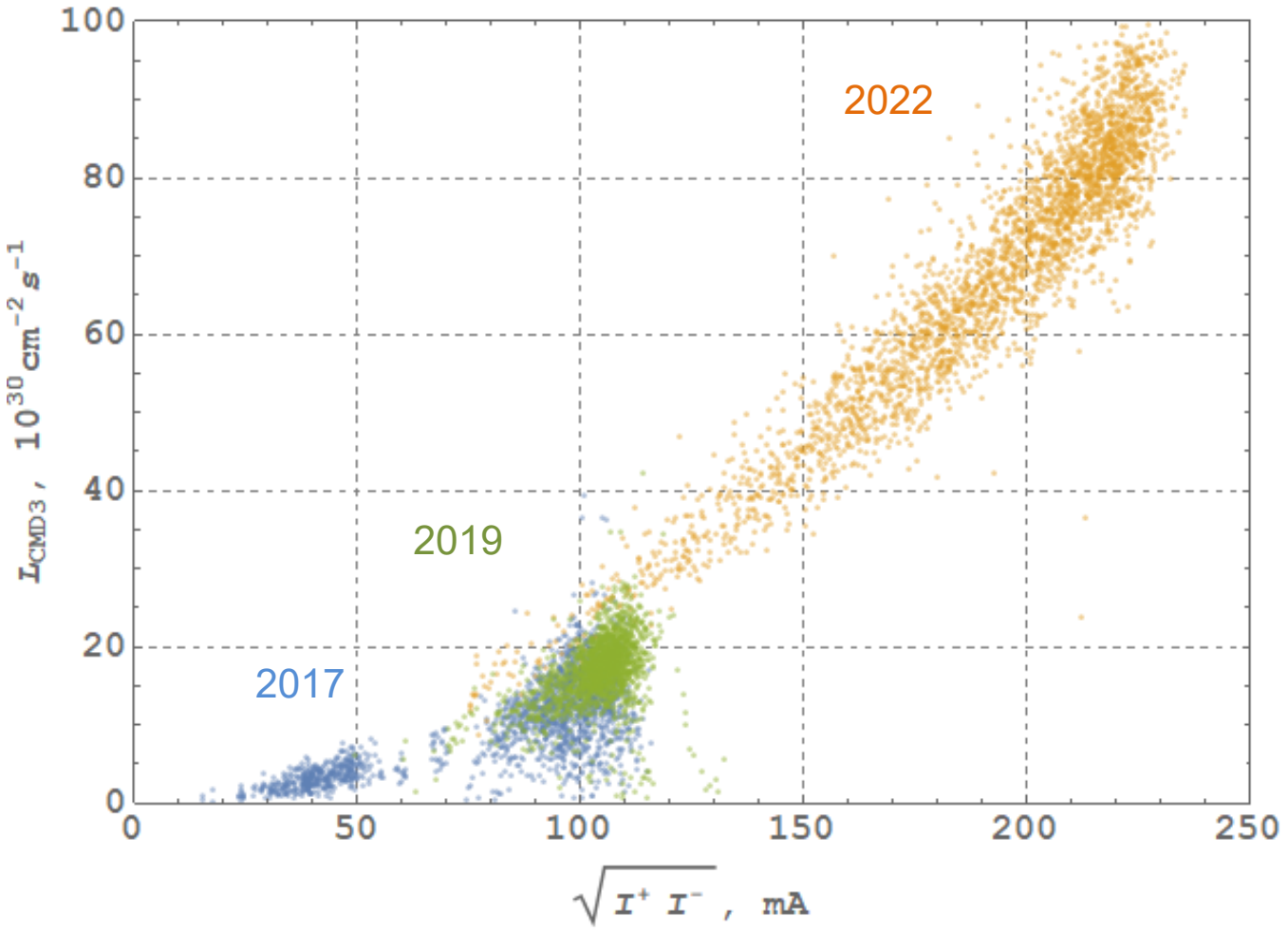
- β* increase ~10% (better top-up injection efficiency)
- Accurate IP2IP betatron phase advance tuning (emit. blow-up supp.)
- RF-frequency change (detectors background suppression)
- New PS for f1-quads (freedom for achromats tuning)
- IC stable & plentiful e^+ provision (peak2mean Lum <10%)

Specific luminosity & linear lattice correction



Achieved beam-beam parameter at high energy





$$\xi_{nom} = \frac{N^- r_e \beta^*_{nom}}{4\pi\gamma\sigma^{*2}_{nom}}$$ - normalized beam current

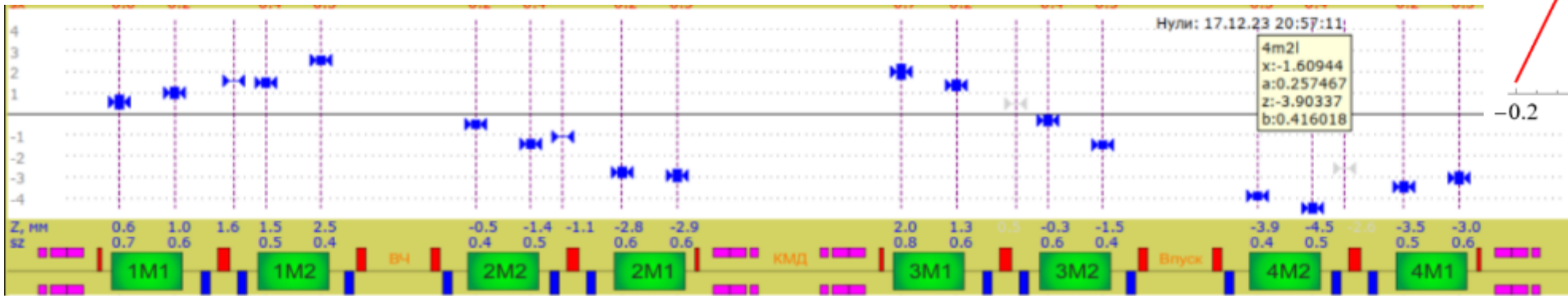
$$\xi_{lumi} = \frac{N^- r_e \beta^*_{nom}}{4\pi\gamma\sigma^{*2}_{lumi}}$$ - "beam-beam parameter"

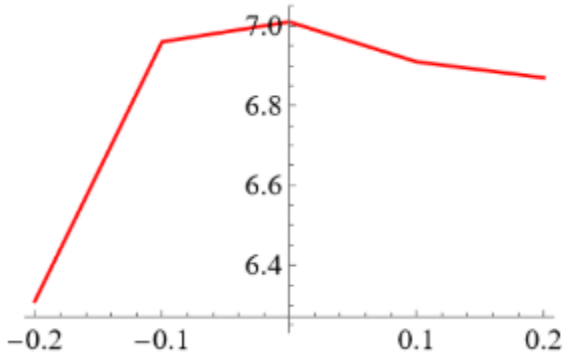
E = 890 MeV

$$L = \frac{N^+ N^-}{4\pi\sigma^{*2}} f_0 = \frac{N f_0 \gamma}{r_e} \frac{\xi_{lumi}}{\beta^*_{nom}}$$

Работа ВЭПП-2000 @ 2024-2025

- Energy range 380 - 400 MeV / beam (e+e- -> pi+ pi- @ rho-omega for (g-2));
- Opposite rotation of colliding beams (CMD-3 systematic estimation / asymmetry ~ 1% / sign);
- Software adaptation + Modernizations (transfer channel, regimes, magnetic system) end of 2024;
- Opposite magnets polarities (not solenoids) => significant unavoidable orbit distortions (due to solenoids “misalignment”);
- Sophisticated search for detector background and flip-flop suppression (RDT scans, DA optimization);
- Luminosity: 2-5 * 10^30 (x2 lower than earlier);
- Integral Luminosity @ run: ~50 nb-1 / detector (100 nb-1 / detector in 2024);

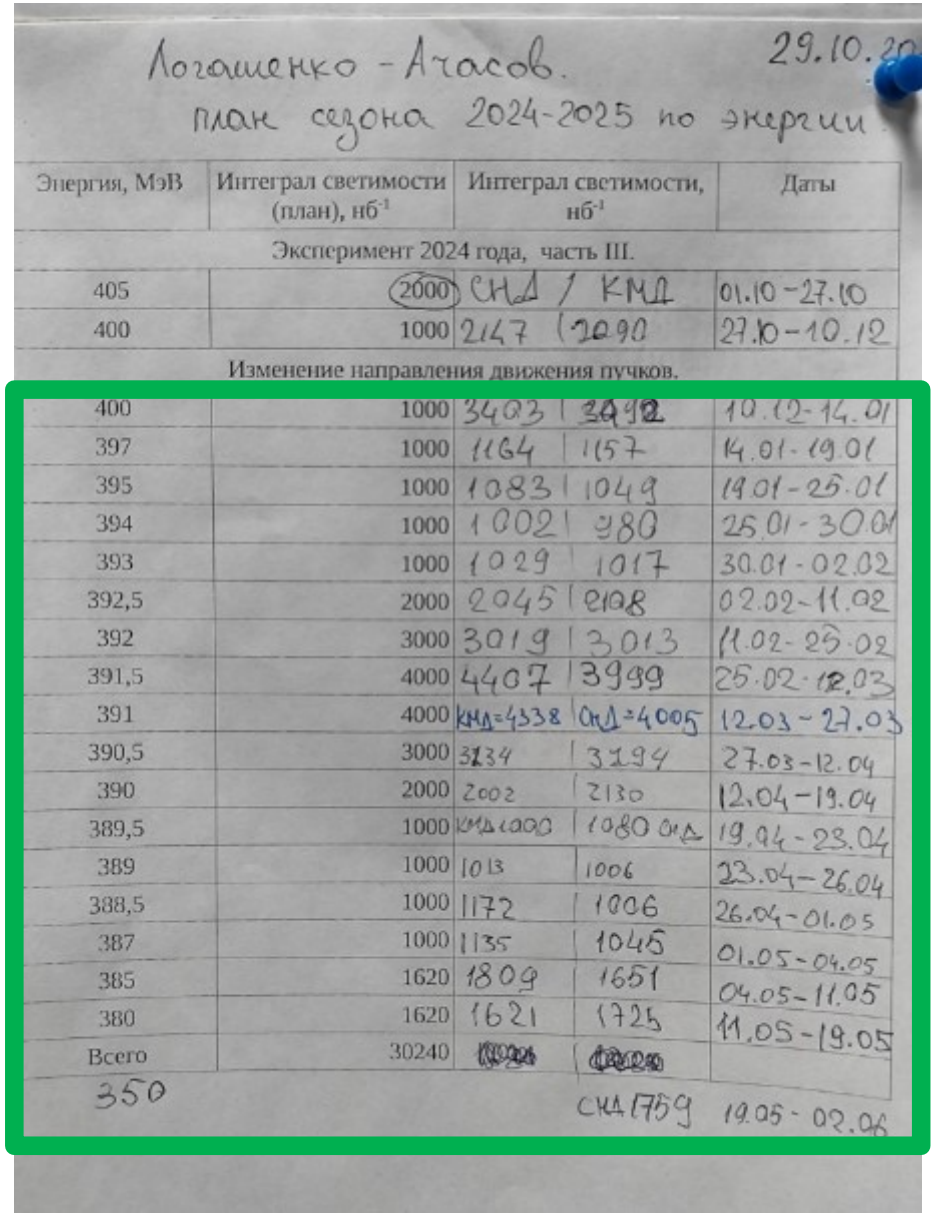




Хронология работ 2025-2026

- 02.09.2025 включение комплекса + остановка до середины октября + профилактика;
- 22.10.2025 первый пучок в ВЭПП осенью;
- 23.10-04.11.2025 обезгаживание ВЭПП;
- 05.11.2025 захолаживание азот + гелий соленоидов ВЭПП;
- 06.11.2025 эксперименты РД / поляризация + обезгаживание;
- 17.11.2025 холодная оптика, начало набора статистики (375 МэВ);
- 29.12.2025-10.01.2026 остановка НГ каникулы
- 10.2025 включение после НГ, начало набора статистики;
- 27.04.2026 окончание набора статистики, вывод поля КМД-3;
- 27.04-30.04.2026 теплая оптика, поляризация, измерение энергии (РД) (Тушековский счетчик);
- 30.05.2025 – 01.09.2026 летняя профилактика;

Набор данных @ 2024/2025 – 2025/2026



Логашенко - Агасов. 29.10.20

план сезона 2024-2025 по энергии

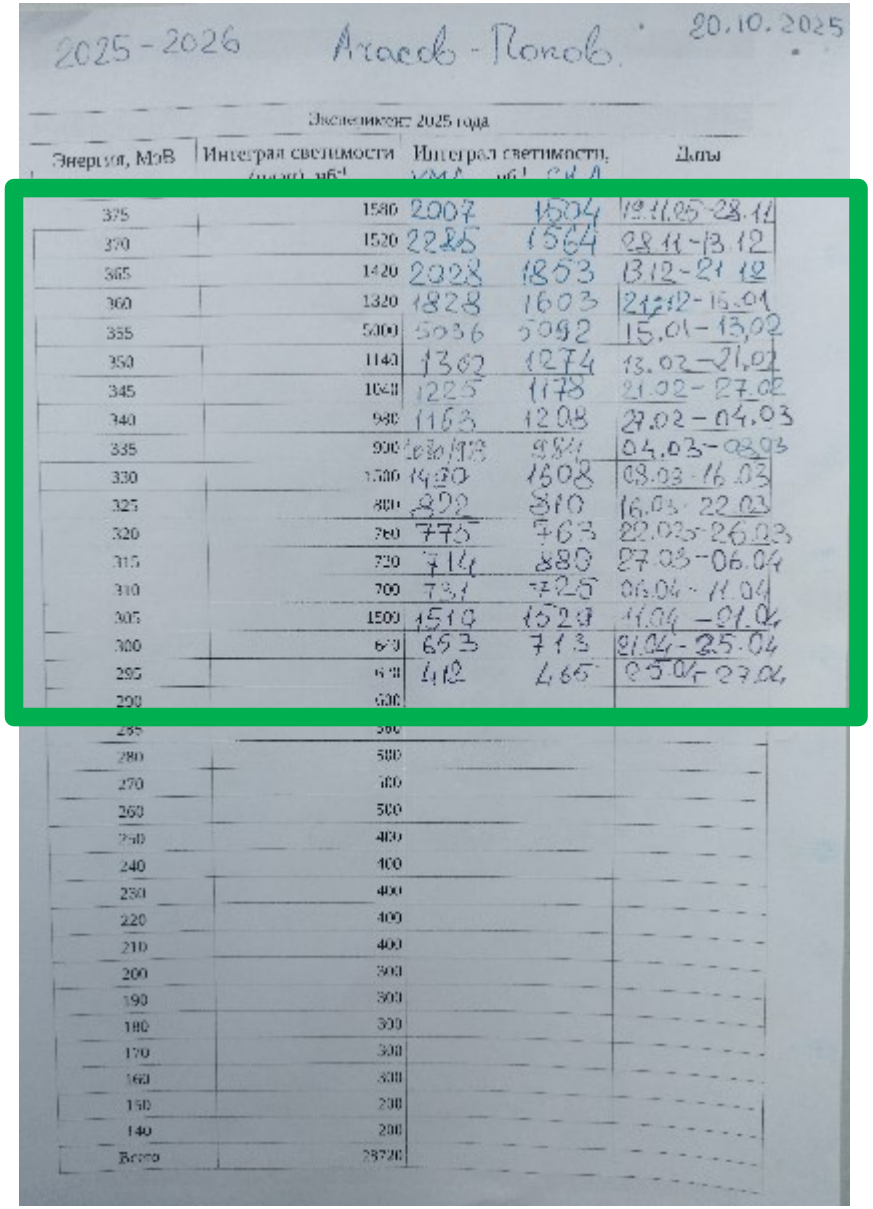
Энергия, МэВ	Интеграл светимости (план), нб$^{-1}$	Интеграл светимости, нб$^{-1}$	Даты
Эксперимент 2024 года, часть III.			
405	2000	СНД / КМД	01.10 - 27.10
400	1000	2147 / 2090	27.10 - 10.12
Изменение направления движения пучков.			
400	1000	3403 / 3492	10.12 - 14.01
397	1000	1164 / 1157	14.01 - 19.01
395	1000	1083 / 1049	19.01 - 25.01
394	1000	1002 / 980	25.01 - 30.01
393	1000	1029 / 1017	30.01 - 02.02
392,5	2000	2045 / 2108	02.02 - 11.02
392	3000	3019 / 3013	11.02 - 25.02
391,5	4000	4407 / 3999	25.02 - 12.03
391	4000	КМД=4338	СНД=4005	12.03 - 27.03
390,5	3000	3134 / 3194	27.03 - 12.04
390	2000	2002 / 2130	12.04 - 19.04
389,5	1000	КМД 1000 / 1080 СНД	19.04 - 23.04
389	1000	1013 / 1006	23.04 - 26.04
388,5	1000	1172 / 1006	26.04 - 01.05
387	1000	1135 / 1045	01.05 - 04.05
385	1620	1809 / 1651	04.05 - 11.05
380	1620	1621 / 1725	11.05 - 19.05
Всего	30240	[illegible] / [illegible]	
350		СНД 1759	19.05 - 02.06

Выполняется с лета 2025

Набраны интегралы светимости к 05.2026:
- КМД-3 – 60 пб-1
- СНД – 65 пб-1

Выполнено (~25-28 пб-1)

Выполнено полностью! (~35-37 пб-1)

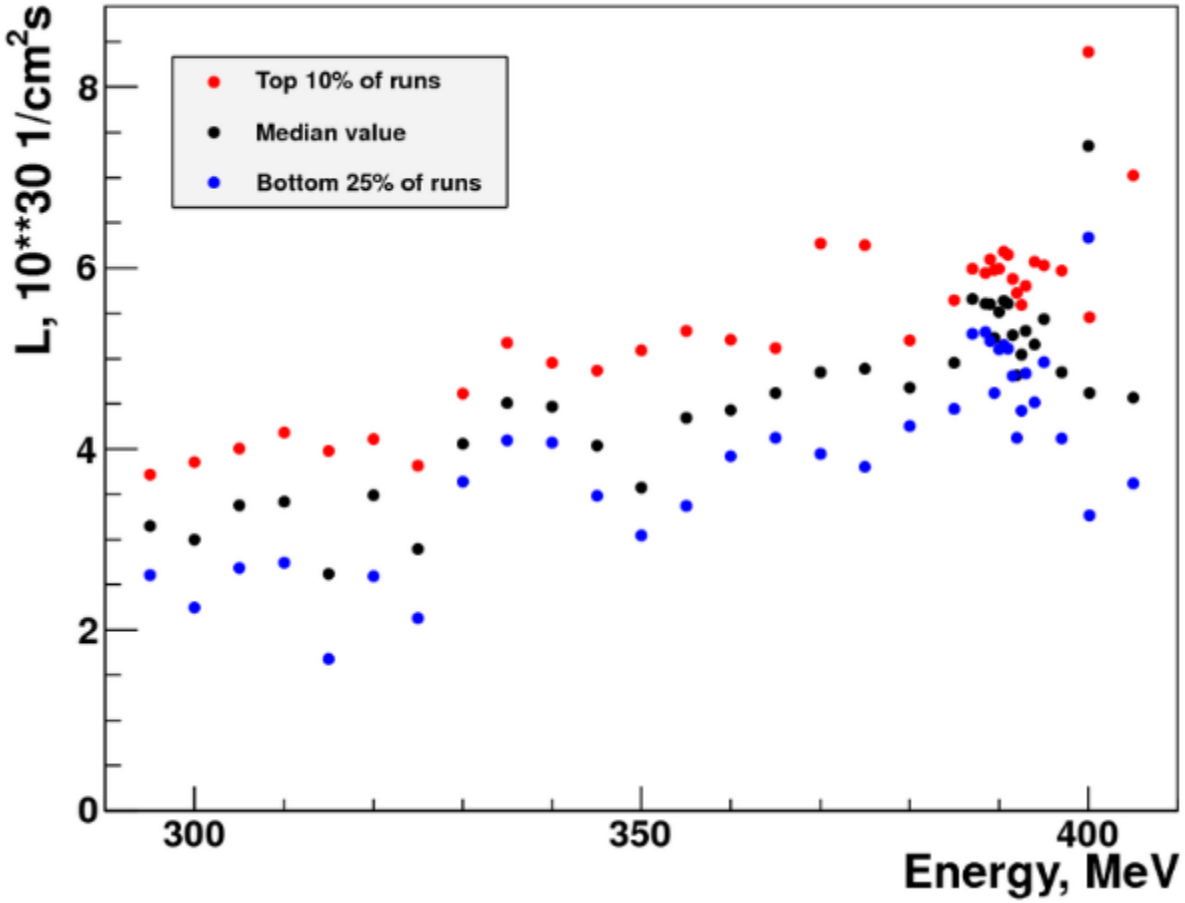


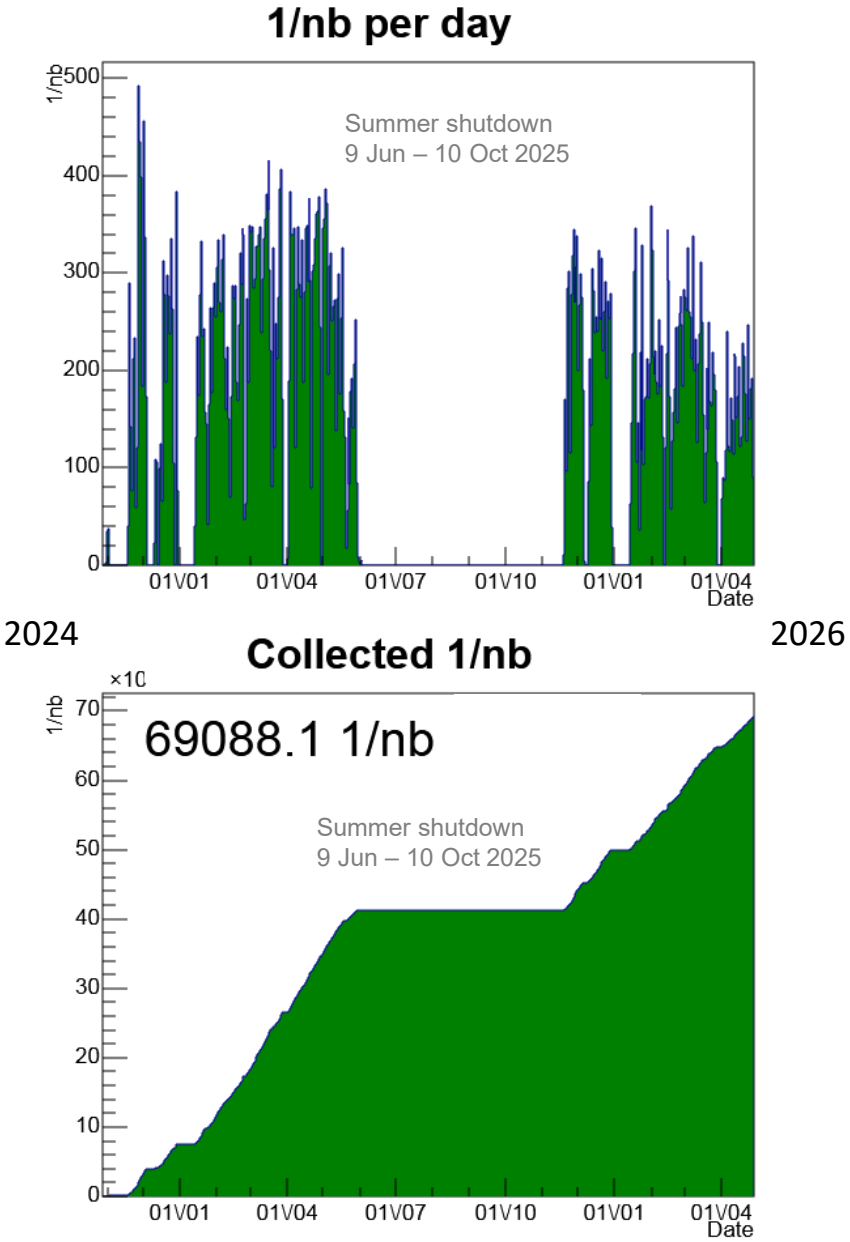
2025 - 2026 Агасов - Попов 20.10.2025

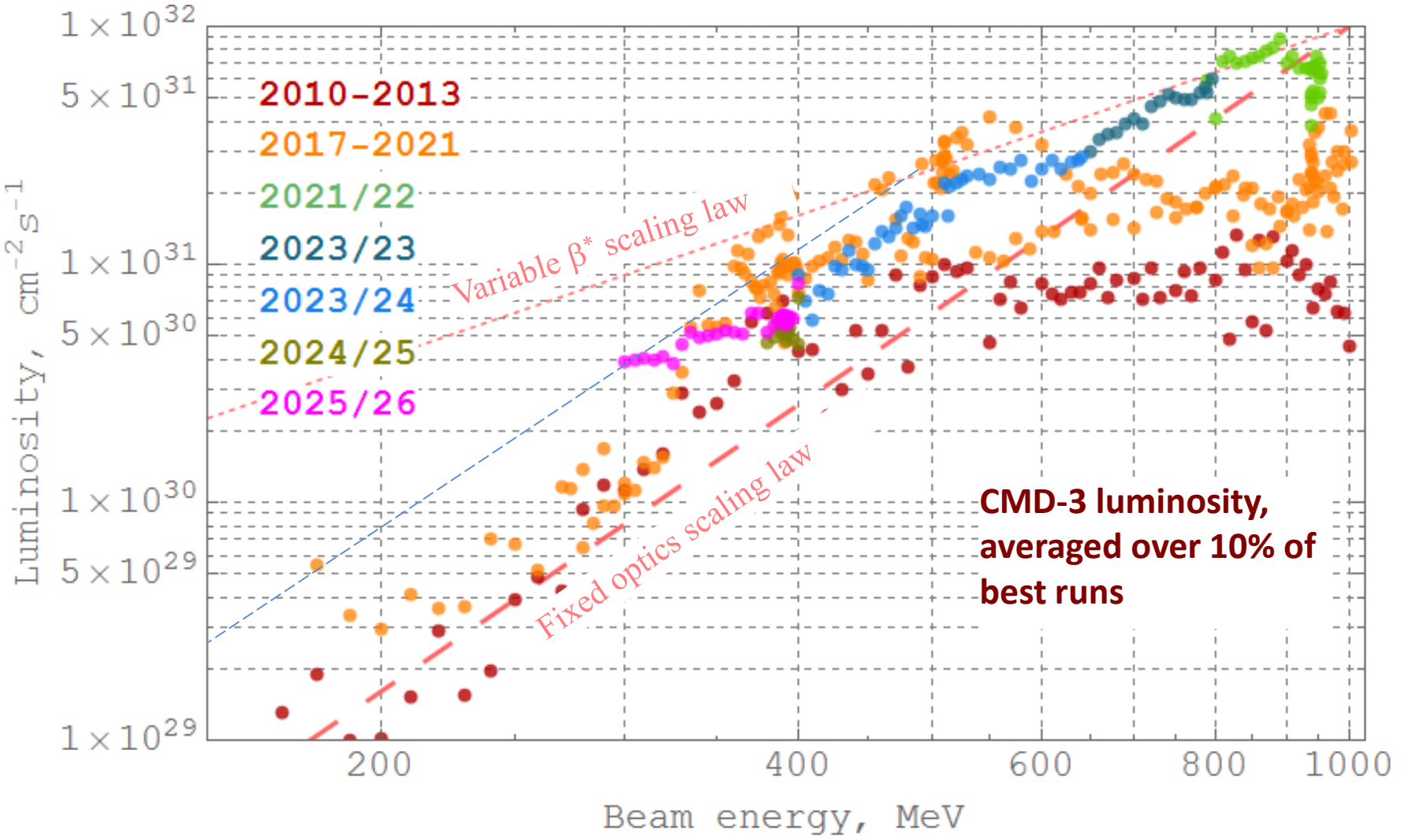
Эксперимент 2025 года

Энергия, МэВ	Интеграл светимости	Интеграл светимости,	Даты
375	1580	2007	1504	19.11.05 - 28.11
370	1520	2285	1564	28.11 - 13.12
365	1420	2028	1853	13.12 - 21.12
360	1320	1828	1603	21.12 - 15.01
355	5000	5036	5092	15.01 - 13.02
350	1140	1302	1274	13.02 - 21.02
345	1041	1225	1178	21.02 - 27.02
340	980	1163	1208	27.02 - 04.03
335	900	1030/913	954	04.03 - 08.03
330	1500	1430	1608	08.03 - 16.03
325	800	892	810	16.03 - 22.03
320	760	775	763	22.03 - 26.03
315	720	714	880	27.03 - 06.04
310	700	731	725	06.04 - 11.04
305	1500	1519	1529	11.04 - 21.04
300	693	693	713	21.04 - 25.04
295	638	412	465	25.04 - 27.04
290	530			
285	500			
280	500			
270	400			
260	500			
250	400			
240	400			
230	400			
220	400			
210	400			
200	300			
190	300			
180	300			
170	300			
160	300			
150	200			
140	200			
Всего	28720			

Достигнутая светимость @ КМД-3





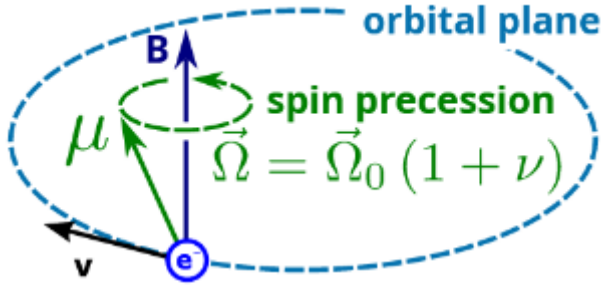


Current absolute record peak luminosity: L_{peak} = 0.9×10^{32} cm^{-2}s^{-1} @ 890 MeV in 1 x 1 bunch collision (ξ value ≥ 0.1)

Поляризованные пучки @ 2025 (I)

$\omega = \langle\Omega\rangle = 2\pi f_0(1+\nu)$ — average spin frequency

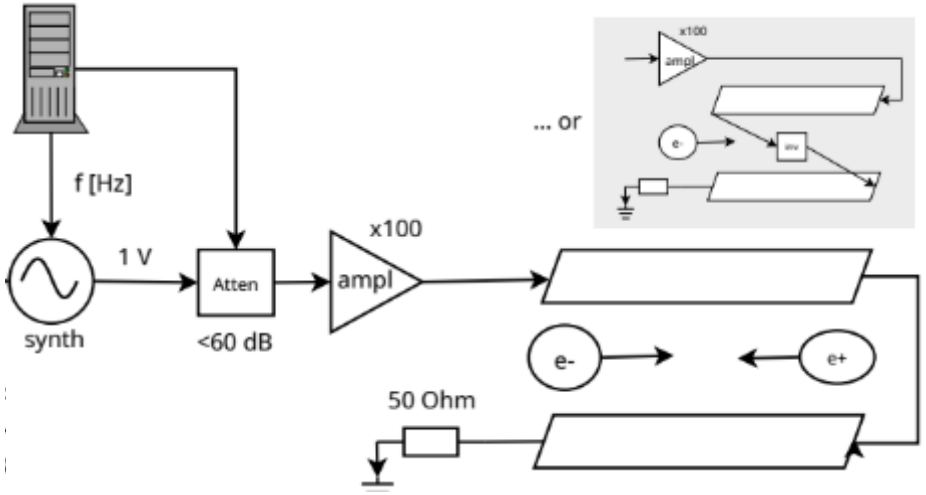
$\omega_0 = \langle\Omega_0\rangle = 2\pi f_0$ — average revolution frequency



Ω — spin precession frequency
Ω_0 — Larmor frequency
ν — spin tune parameter:

$$\nu = \frac{E}{m}\left(\frac{g-2}{2}\right) = \gamma a$$

$$\langle E\rangle = \frac{e}{2\pi}\oint B_\perp dl = \left(\frac{\omega}{\omega_0} - 1\right)\left(\frac{g-2}{2}\right)^{-1} mc^2 =$$
$$= \nu \cdot 440.648\,462\,134(137)\ \text{MeV}$$



1. Obtain polarized beam.
2. Create external spin resonance $\omega \pm \omega_d = k\omega_0 \quad k \in \mathbb{Z}$,
3. Scan ω_d external field frequency.
4. detect depolarization.
5. determine ratio ω/ω_0 and then beam particle energy.

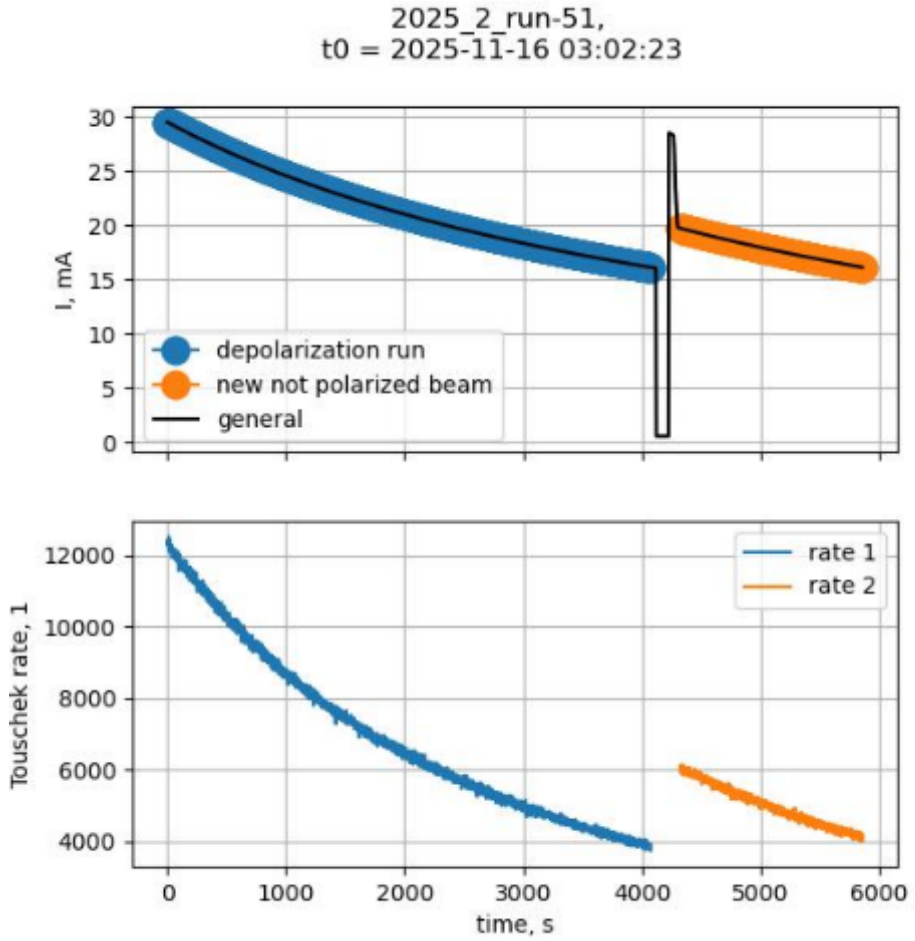
Relative accuracy ~ 10^−10 Is limited by fundamental constant knowledge

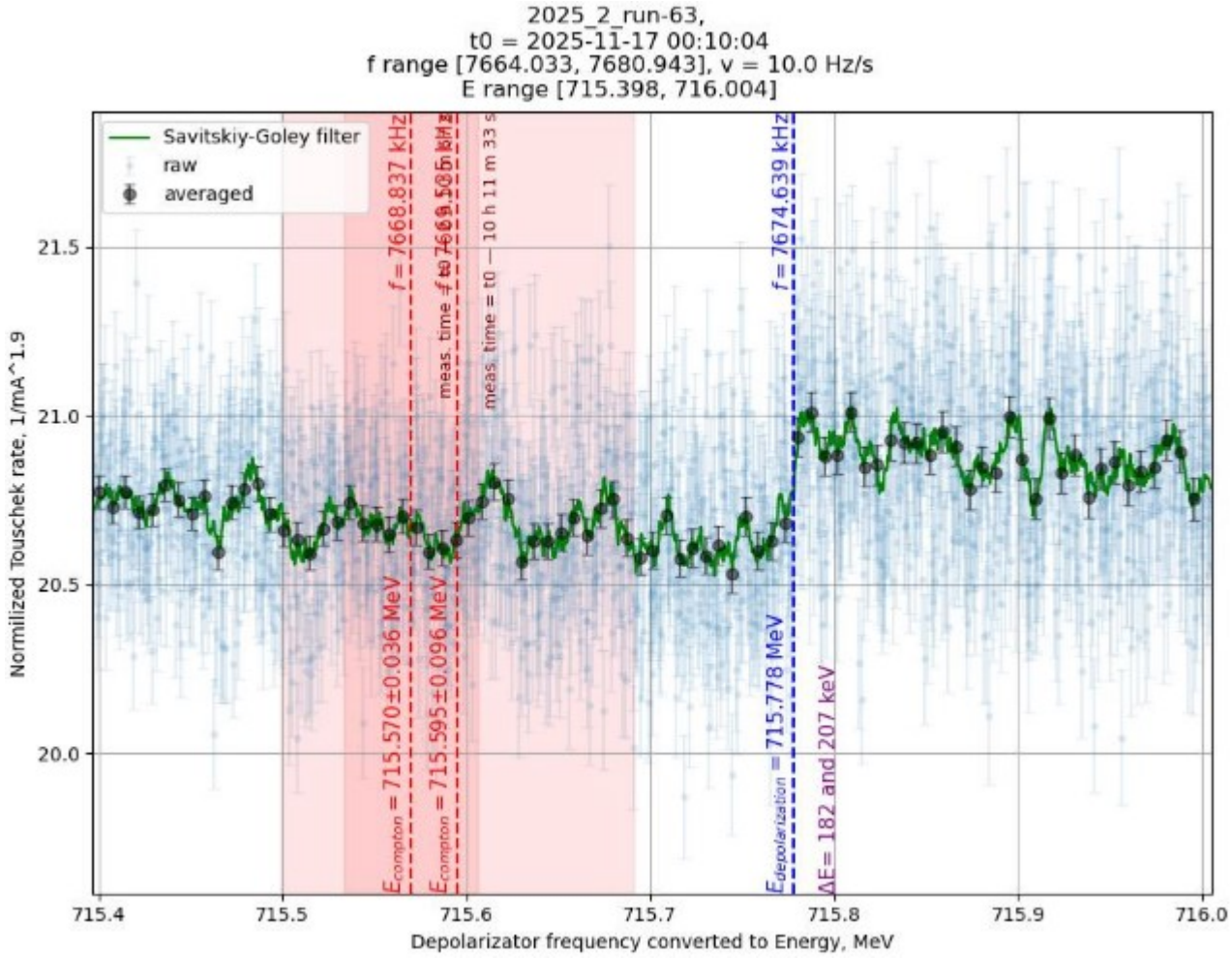
$$\delta\left(\frac{g-2}{2}\right) \approx 1.03 \times 10^{-10}, \quad \delta m_e \approx 2.94 \times 10^{-10}$$

Поляризованные пучки @ 2025 (II)

- Проведено 2 эксперимента по измерению энергии пучка в ВЭПП-2000;
  - 02 – 07 июня 2025 (30 сканирований)
  - 06 – 16 ноября 2025 (50 сканирований)
- Специальный режим работы – выключены соленоиды ФФ – «теплая» оптика;
  - Краевые / нелинейные поля нарушают процесс самополяризации;
- Энергия пучка:
  - Один вариант: 660 МэВ (Ep=770 MeV => Ed=661.5 MeV);
  - Два варианта: 705 МэВ, 707 МэВ;
- Время поляризации 65-70 мин. Поляризуемся 1.5 часа. 150 мА => 20 мА;
- ОКР (электроны) предсказание области, а РДП (позитроны) – измерение;
- Тушековский счет на электронах в 20 раз меньше чем на позитронах (не выяснено);

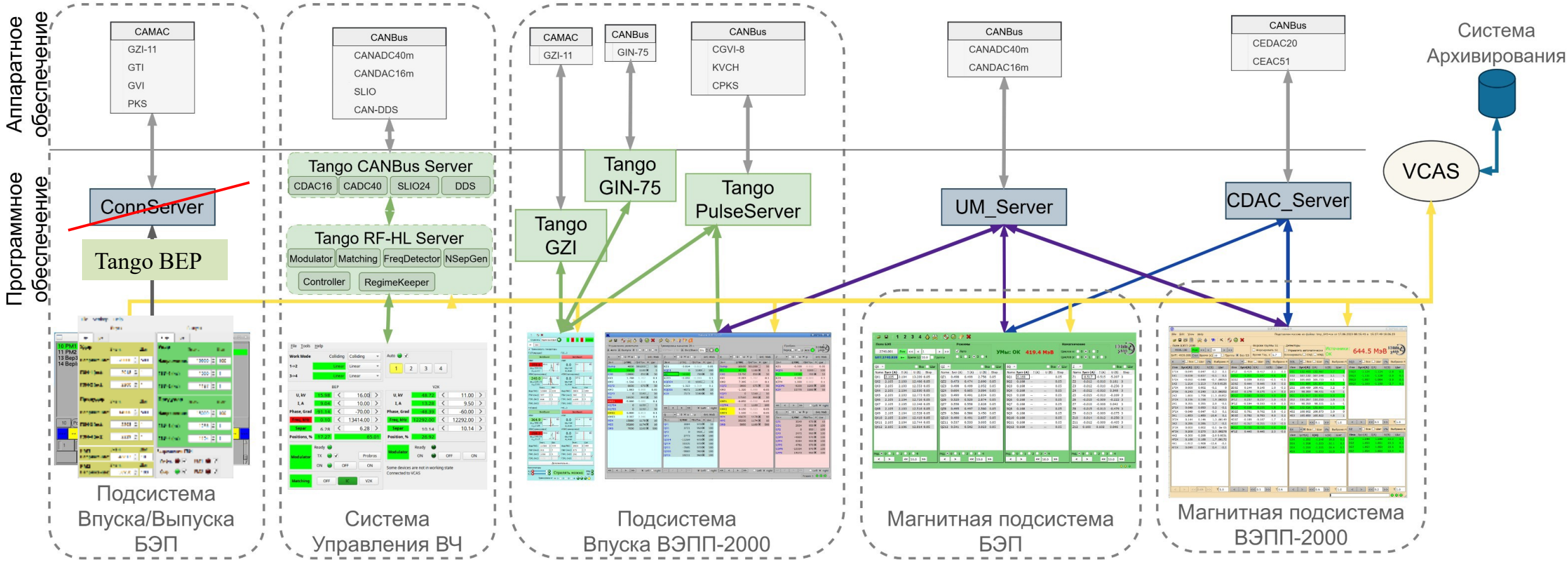
Поляризованные пучки @ 2025 (III)





Предварительный результат

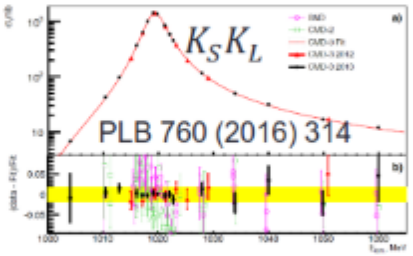
Обновление ПО для работы комплекса

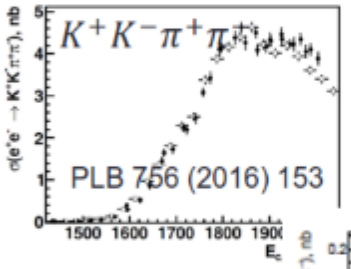


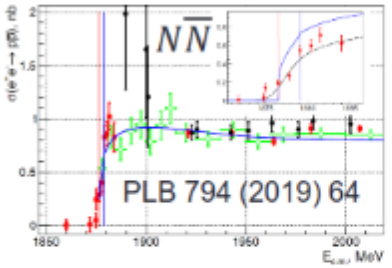
Courtesy A. Senchenko, T. Anashin

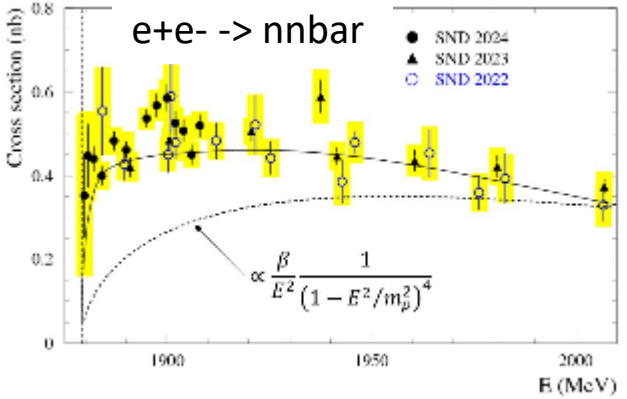
Результаты экспериментальной работы (ФВЭ)

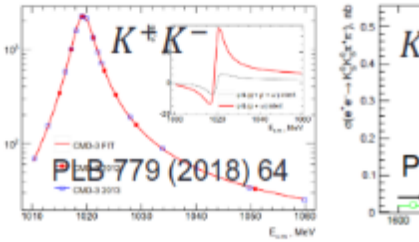
CMD-3 published results

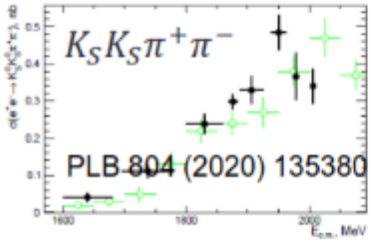


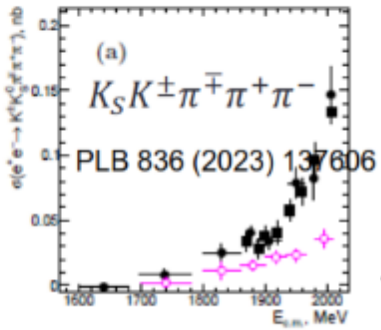


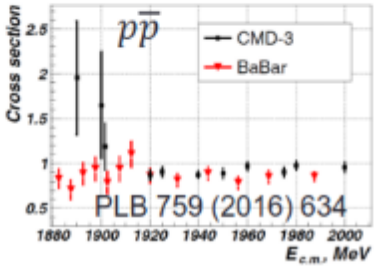


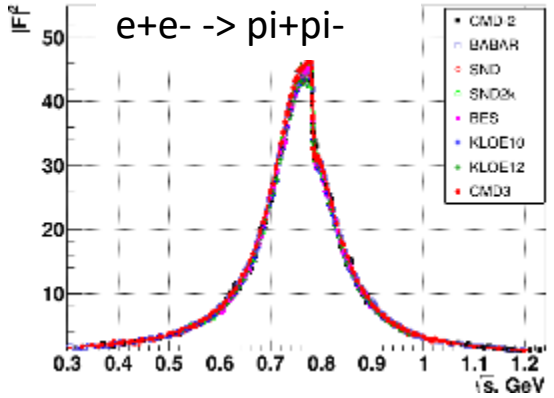


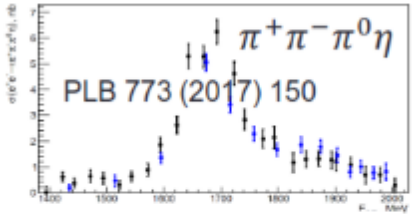


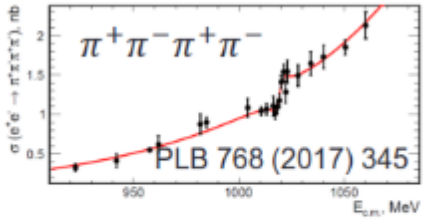


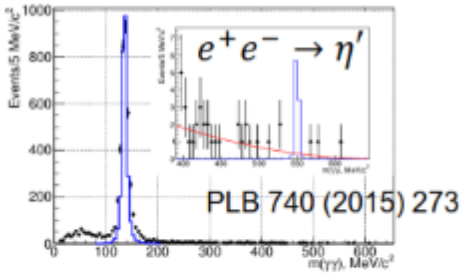


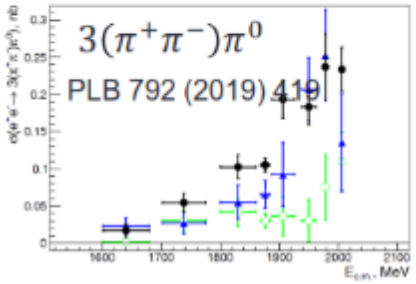


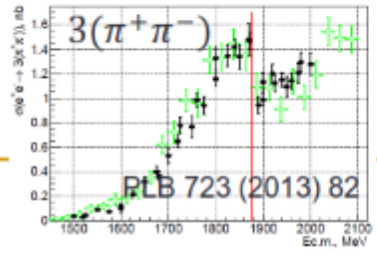


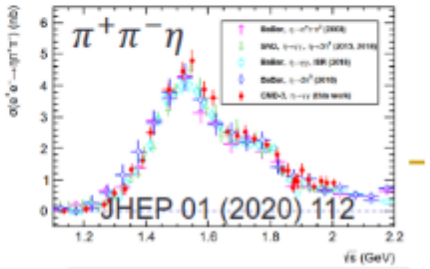


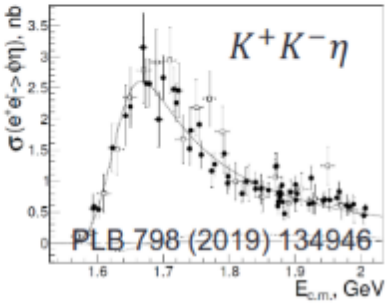


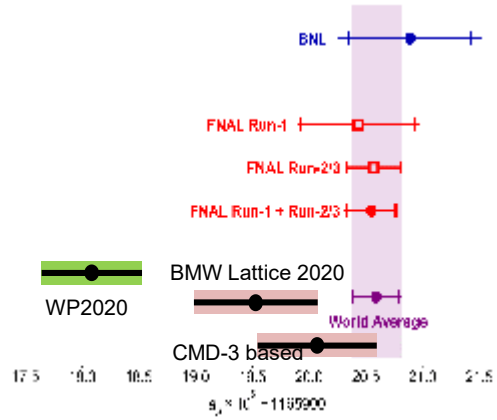




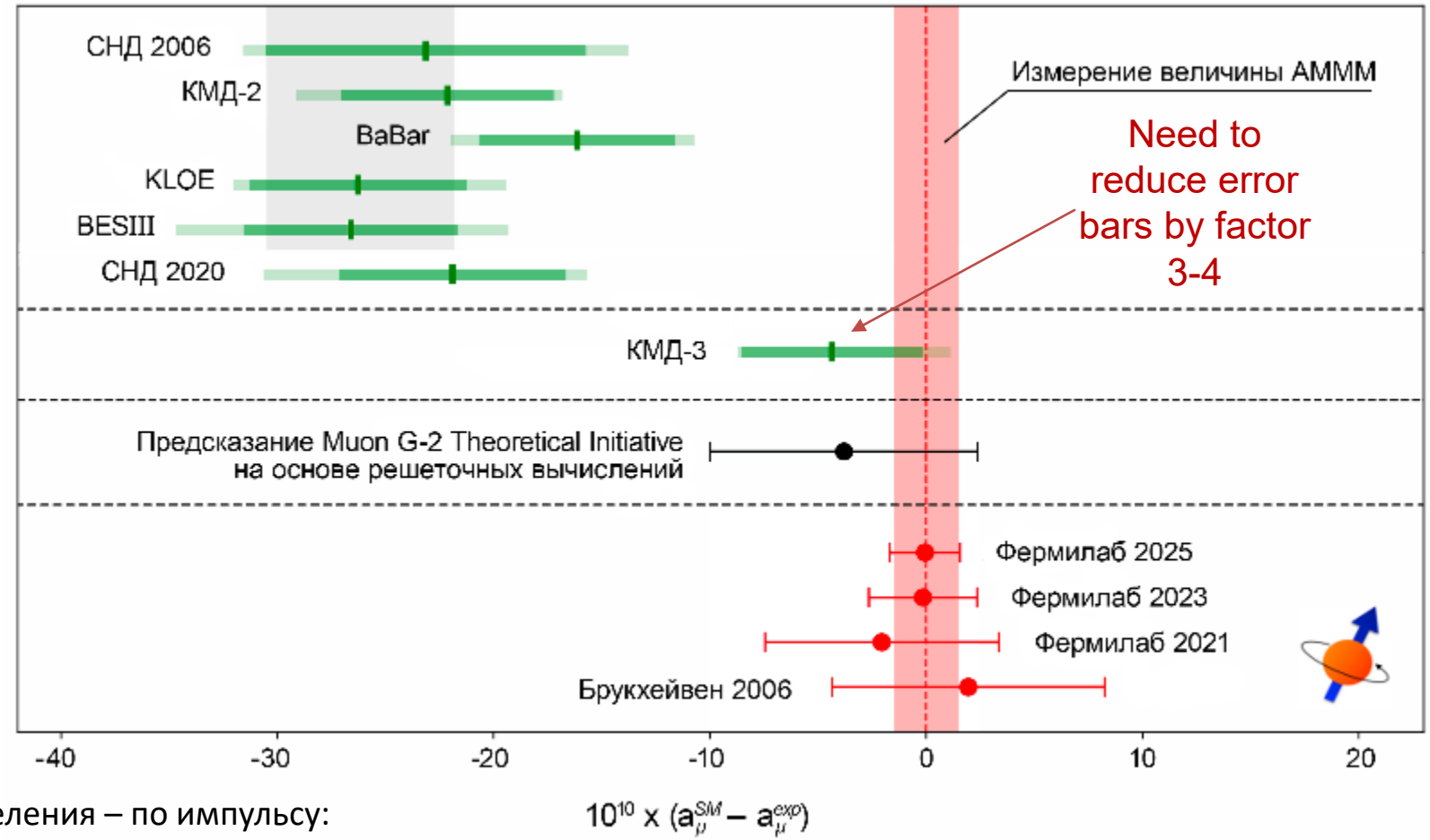








G-2 и систематика КМД-3



WP 2025

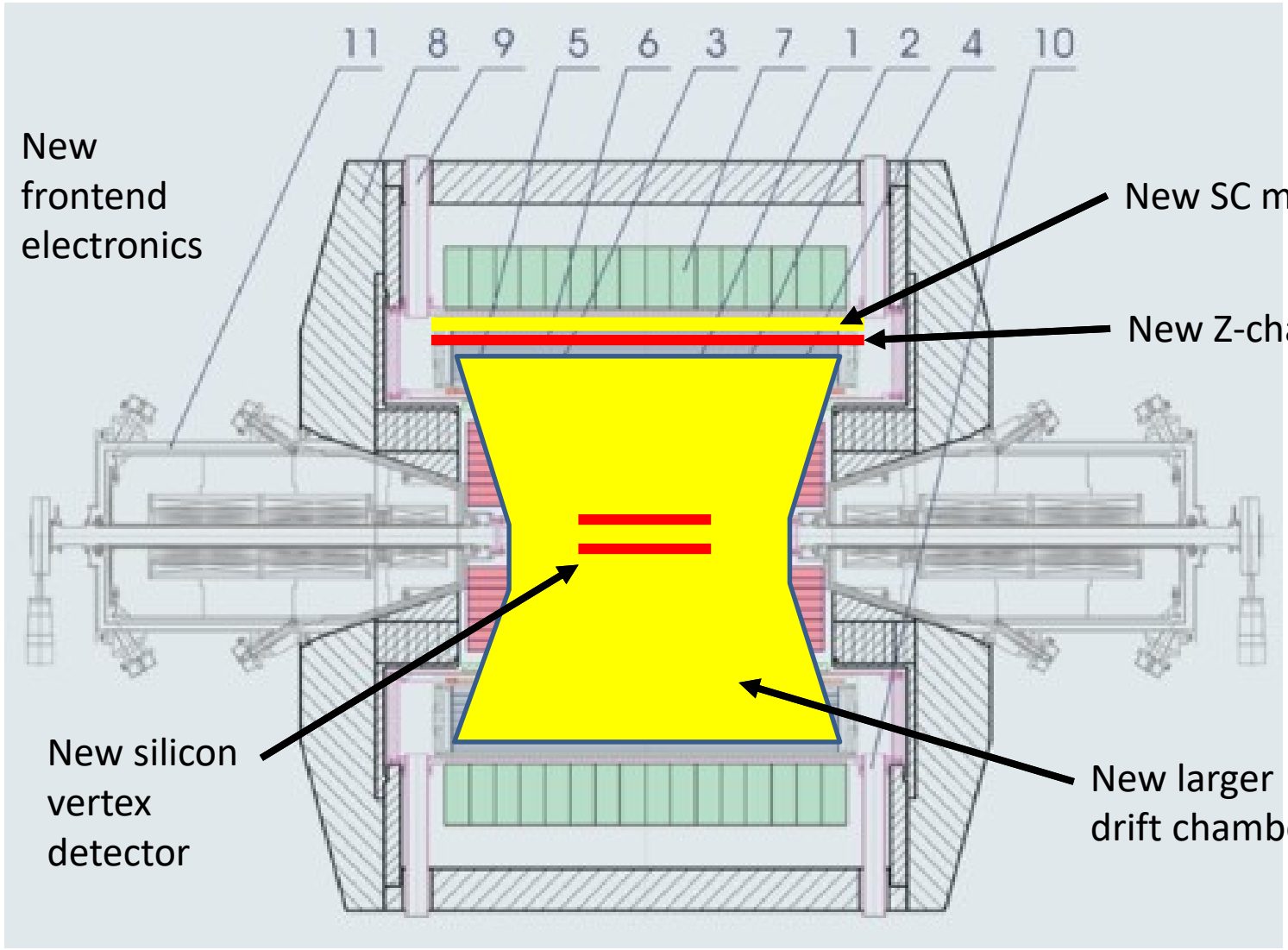
Основной метод разделения – по импульсу:

- Независимое измерение e^+e^-, 2μ, 2π до 1 ГэВ
- π/μ: $\Delta p/p$ = 3.2% (ω), 1.8% (φ) => разрешение $\Delta p/p$=0.8% (φ)
- Множество побочных измерений: 3π, космика, распады на лету, фоны,…

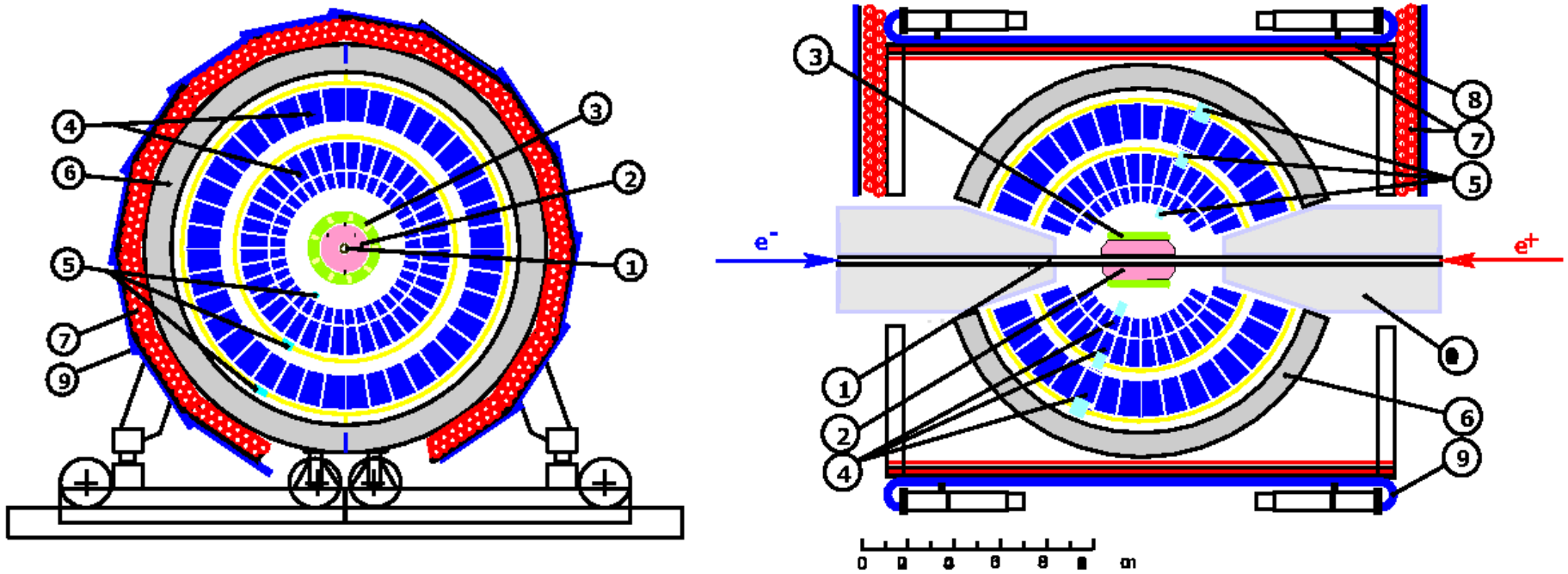
Второй метод – разделение по углам

- Ограничен статистикой, если не расширить угол регистрации

Концепция модернизации КМД-3

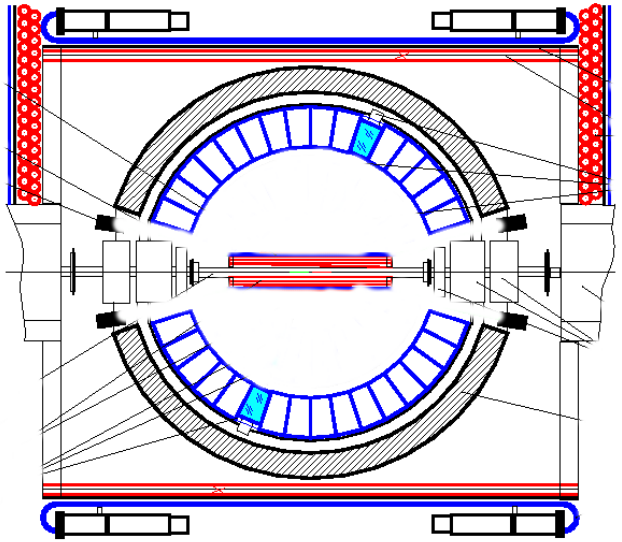


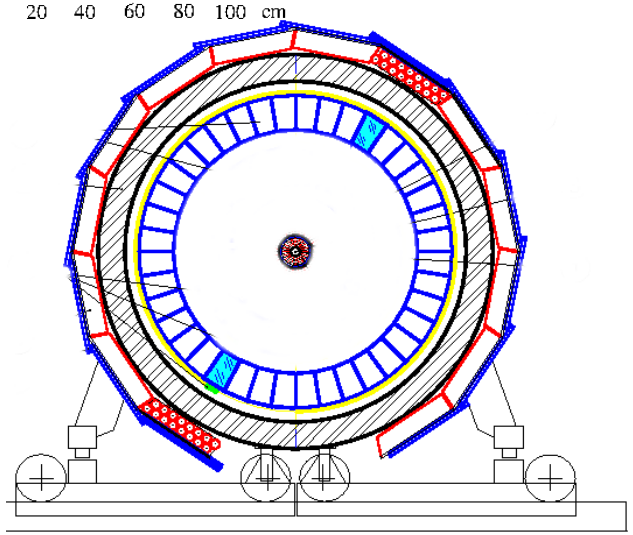
Сферический нейтральный детектор (СНД)



1-вакуумная камера, 2-трековая система, 3-черенковские счётчики, 4-кристаллы NaI(Tl), 5-вакуумные фототриоды, 6-железный поглотитель, 7-пропорциональные трубки, 9-сцинтилляционные счётчики, 10-соленоиды ВЭПП-2000.

Эксперимент СНД: e+e- -> nnbar





Цель эксперимента:

измерение отношения электрического и магнитного форм-факторов *нейтрона* $|G_E / G_M|$ в процессе e+e−→nn в области энергии √s<2 ГэВ с точностью 10%.

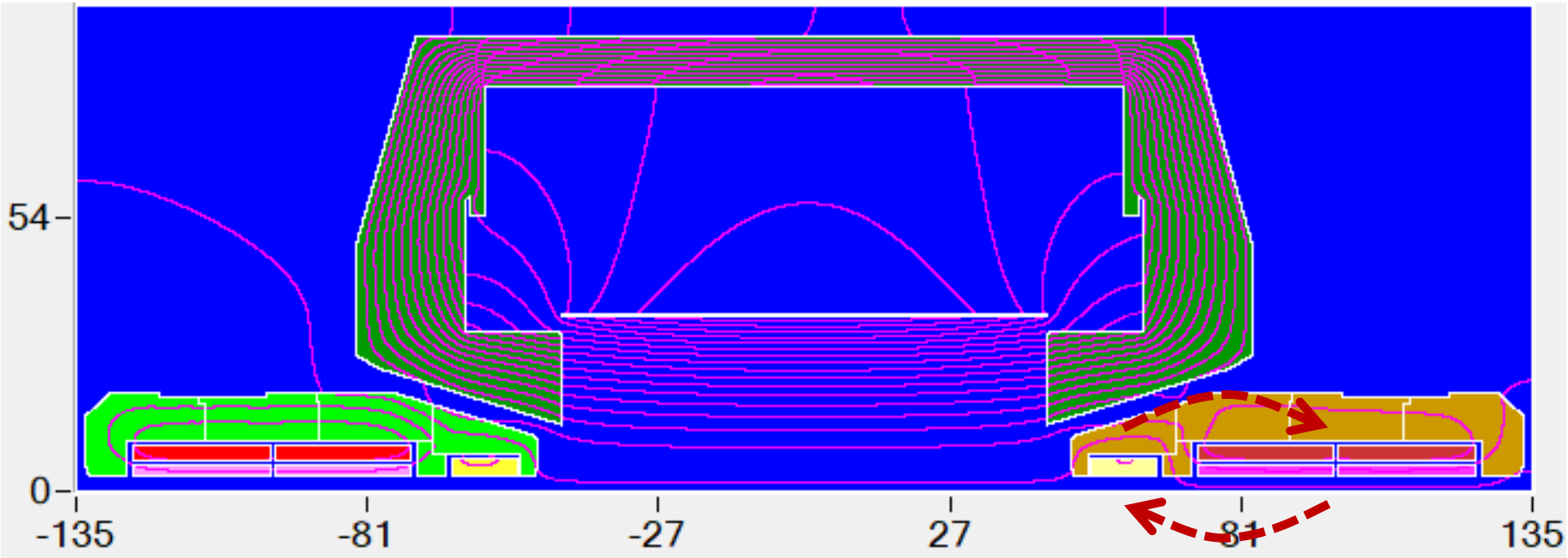
Улучшение подавления пучкового фона и фона от физических процессов достигается путём увеличить время пролёта n.

«Новая» трековая система: дрейфовая камера длиной 40см улучшает однородность для регистрации n за счёт того, что торцы камеры не перекрывают телесного объёма калориметра.

Детектор симметричен по углу.

СНД для эксперимента по измерению $|G_E / G_M|$ *нейтрона*.

ВЭПП-2000: соленоид финального фокуса

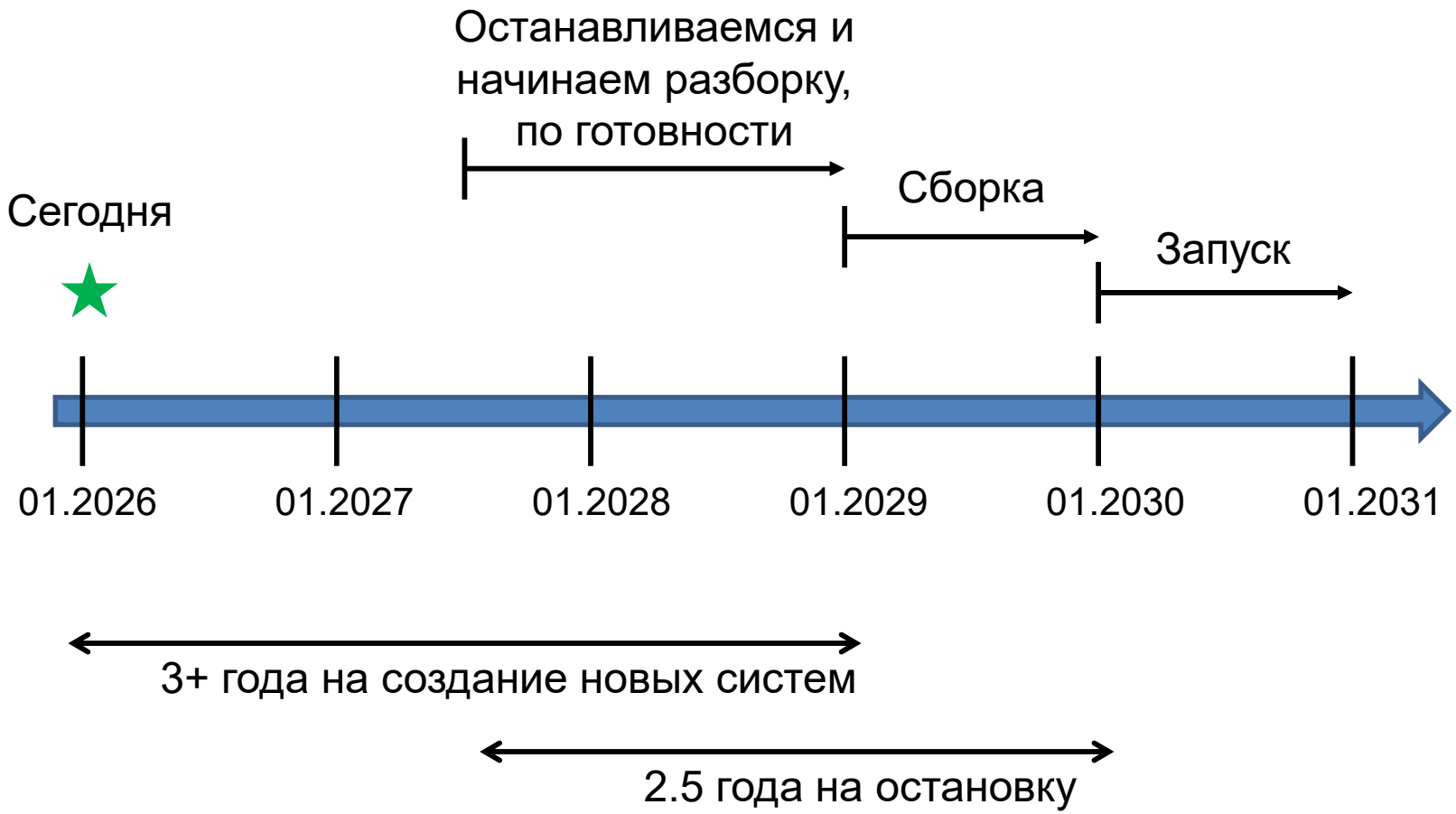


- ~~Новые Final Focus cct-like сверхпроводящие компактные соленоиды ?!~~

- Поменять местами FF фокусировку и компенсацию поля детектора.

- Полностью новый проект FF (оптика коллайдера) необходим (в работе).

Предположительный оптимистичный план



Вместо заключения

- ВЭПП-2000 успешно выполнил программу работ в 2025-2026 году;

- Набор интеграла светимости осуществлялся непрерывно (с перерывами предусмотренными ТК):
  - Январь – Июнь 2025;
  - Октябрь 2025 – май 2026

- Проведены специализированные заходы:
  - Измерение энергии РД в сравнении с ОКР (цель #1);
  - Изучение достижимой степени равновесной поляризации вблизи резонансов (академический интерес);

- Ведутся плановые (и не очень) работы по повышению надежности / эффективности работы комплекса?
  - Модернизация оборудования / замена на новое;
  - Питание ВЧ систем БЭП/ВЭПП, импульсное питание КБВ, впуск-выпуск БЭП/ВЭПП;
  - Модернизация ПО и алгоритмов;
  - Быстрый монитор светимости по динамическим размерам пучка вдоль кольца;

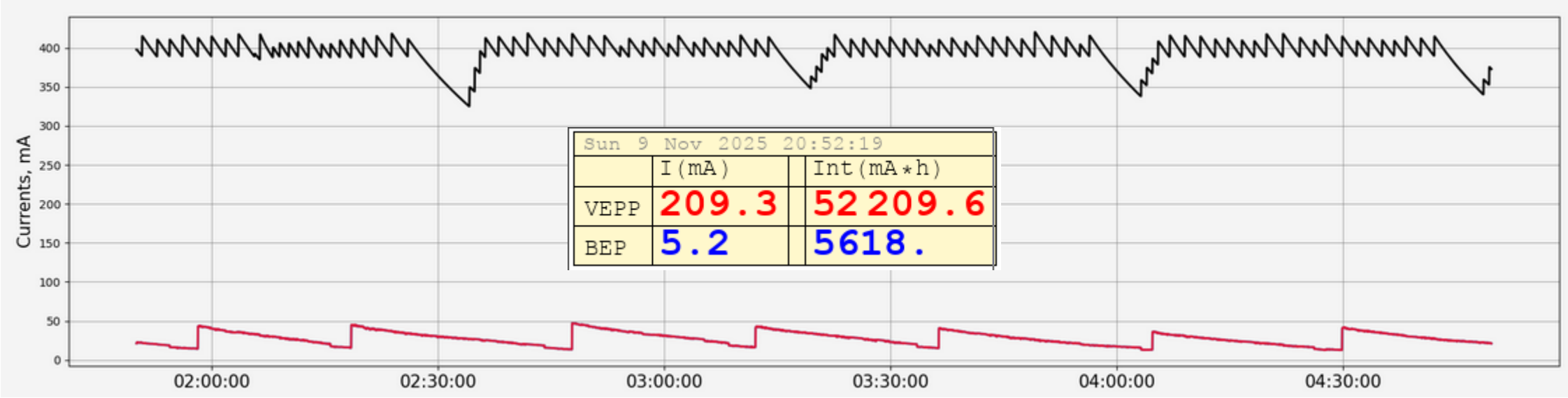
- В остальном в ВЭППе – всё по-прежнему!
  - Продолжаем и будем продолжать работы по набору статистики СНД / КМД;
  - Для постоянных клиентов – скидки;
  - Интерес к работам по физике пучков не ослабевает;

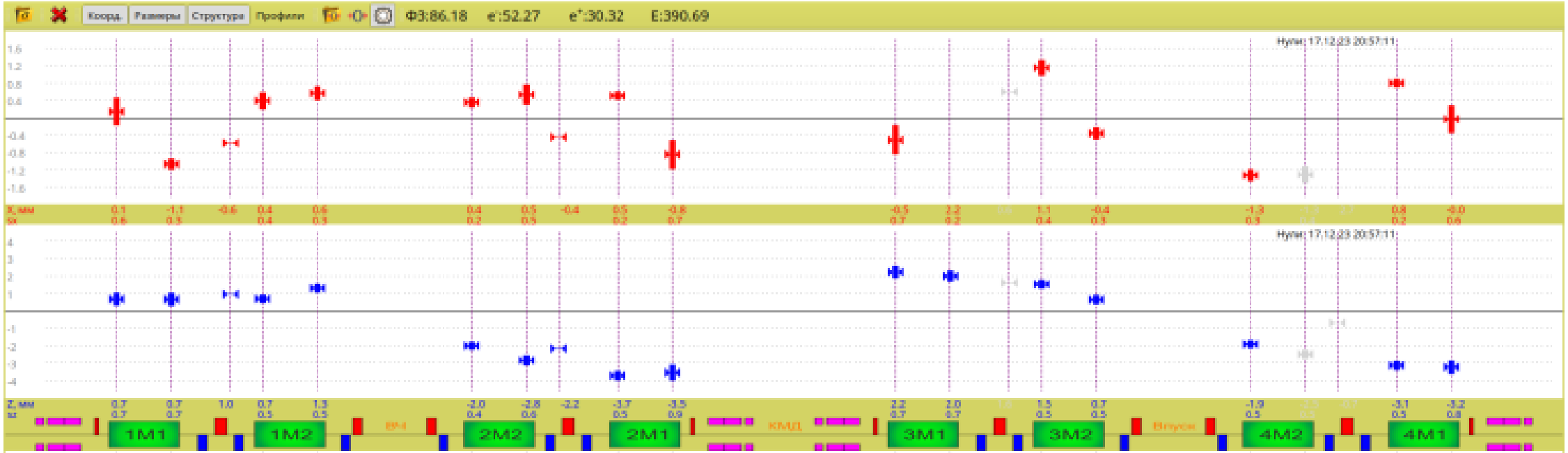
Резюме

- Концепция круглых пучков обеспечивает увеличение светимости на коллайдере VEPP-2000.
- Рекордная светимость достигнутая на коллайдере VEPP-2000 в столкновении 1 x 1 пучка составляет $0{,}9\times10^{32}$ при ~0,9 ГэВ.
- Параметр встречи достигает значения $\xi \geqslant 0{,}1$ при ~0,9 ГэВ.

- Коллайдер VEPP-2000 продолжает сбор данных в полном энергетическом диапазоне 150–1000 МэВ/пучок.
- Целевой интеграл светимости 1 $фб^{-1}$ / детектор достигнут в марте 2024 года.
- Более десятка результатов, полученных на коллайдере VEPP-2000 (в экспериментах SND, CMD3), определяют текущий уровень знаний о свойствах элементарных частиц.

- Планы модернизации детекторов/коллайдера есть (ведется прототипирование / модоелирование).





Спасибо всем участникам работы!