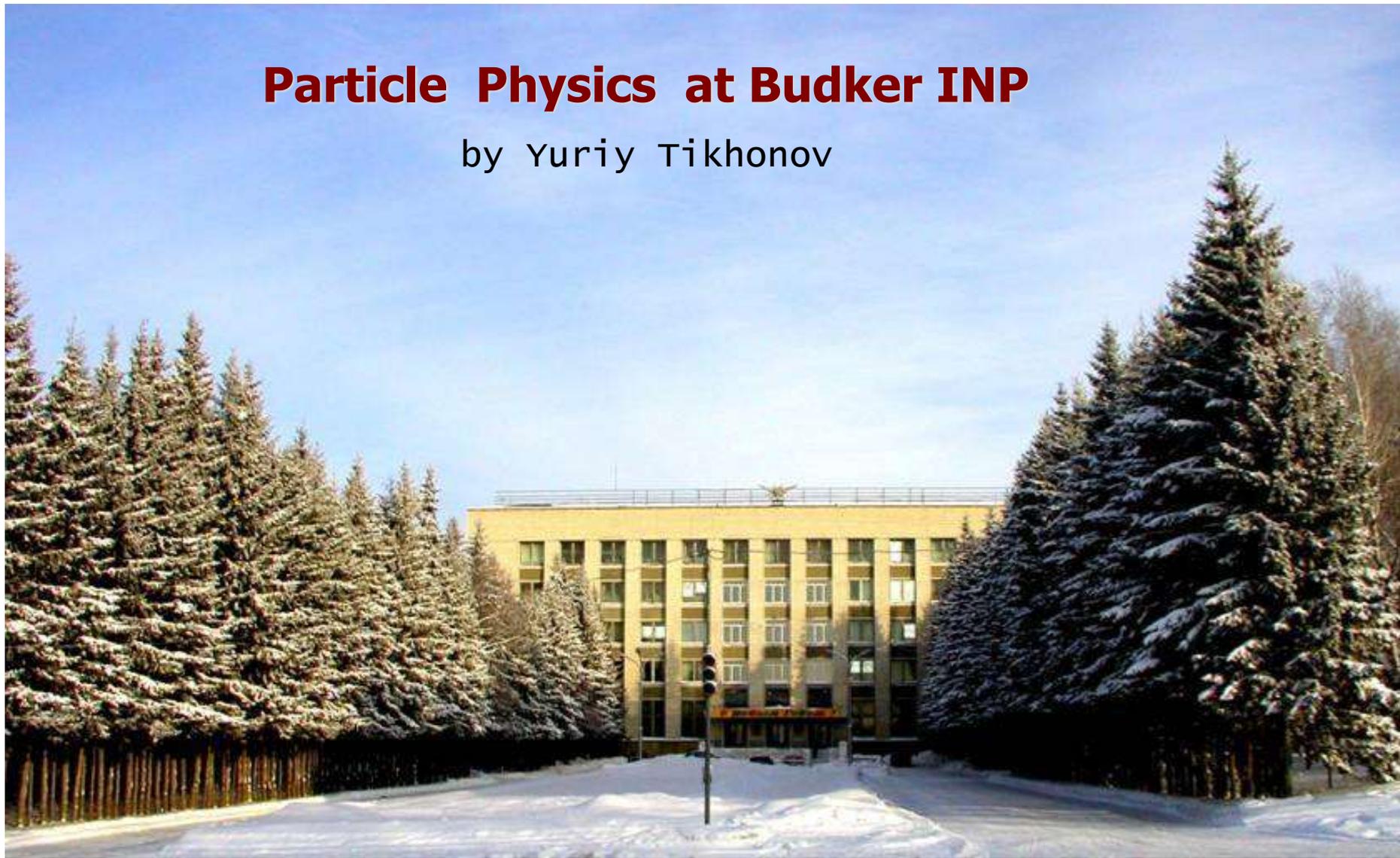


Particle Physics at Budker INP

by Yuriy Tikhonov



BINP - 60



Particle Physics at Budker INP

Outline

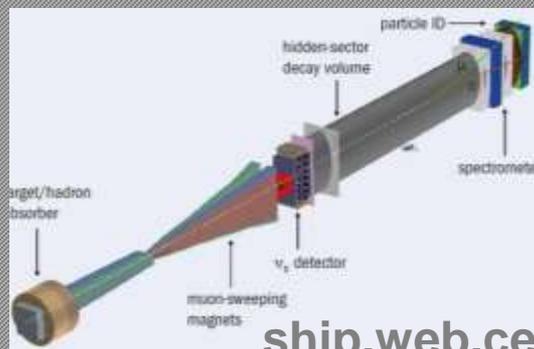
- ❑ *Introduction*
- ❑ *VEP-1, VEPP-2, VEPP-3, VEPP-2M, VEPP-4*
- ❑ *Operating machines and detectors*
 - *VEPP-2000 with SND-2 and CMD-3 detectors*
 - *VEPP-4M and KEDR detector*
 - *VEPP-3 and “DEITRON” experiment*
- ❑ *Detector R&D*
- ❑ *Theory*
- ❑ *Future plans*
 - *Super Charm-Tau Factory*
- ❑ *BNP outside collaboration*
- ❑ *Conclusion*

Физика элементарных частиц

- Динамично развивается, генерирует новые знания и технологии
- Имеет одно из самых больших, мощных и хорошо организованных научных сообществ в мире, которое объединяет самые сложные на сегодняшний день эксперименты и теории.
(детектор АТЛАС на LHC: 2000 участников, 135 институтов, 35 стран)
- Является основой очень перспективных мультидисциплинарных направлений (*синхротронное излучение, лазеры на свободных электронах, ядерная медицина, супервычисления и большие данные*)
- Лидирует в поиске новых фундаментальных законов природы.

- Регистрация космических частиц
- Орбитальные эксперименты
- Эксперименты с фиксированной мишенью
- Детекторы нейтрино
- **Коллайдеры**

Эксперименты в физике высоких энергий



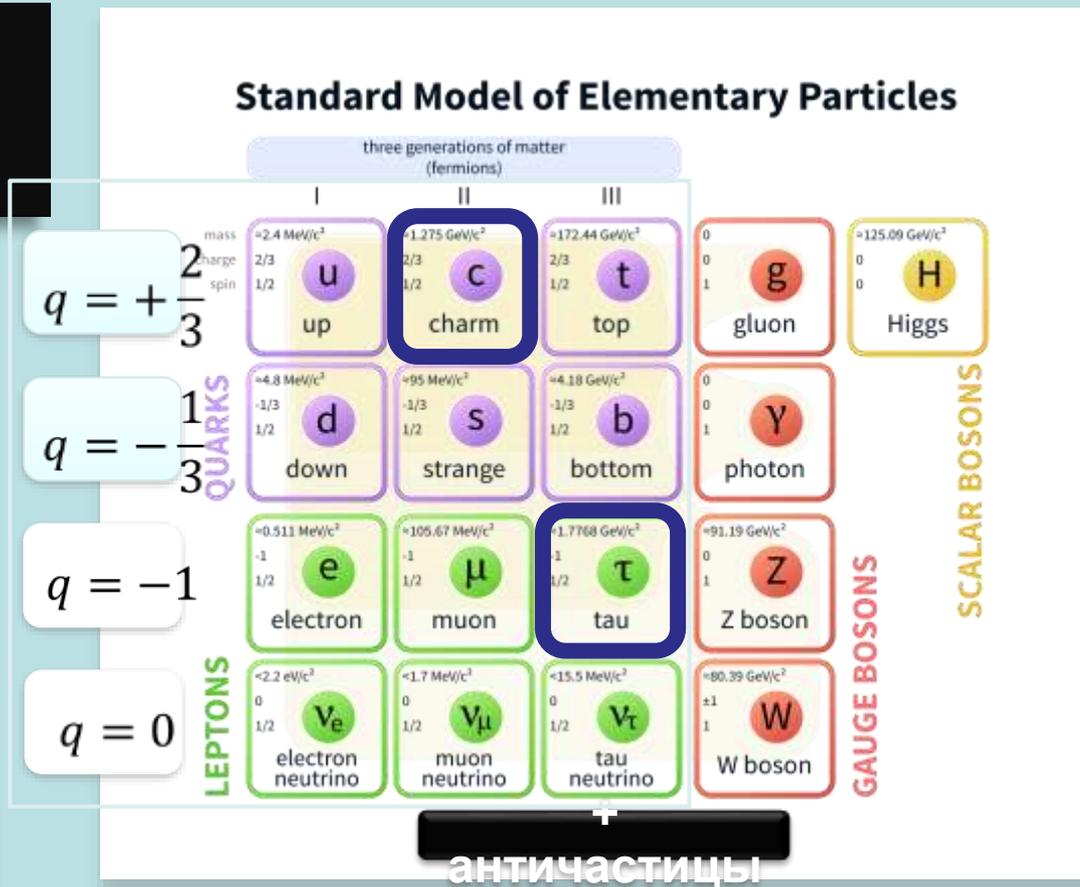
Ключевые параметры

- Тип взаимодействующих частиц
- Энергия взаимодействия

ship.web.cern.ch

Стандартная модель (СМ)

- Характерные масштабы физики элементарных частиц
- СМ описывает электрослабое и сильное взаимодействия средствами квантовой теории поля
- СМ – самая успешная физическая теория
- СМ согласуется с огромным количеством экспериментальных результатов



Проблема иерархий

Константы взаимодействий

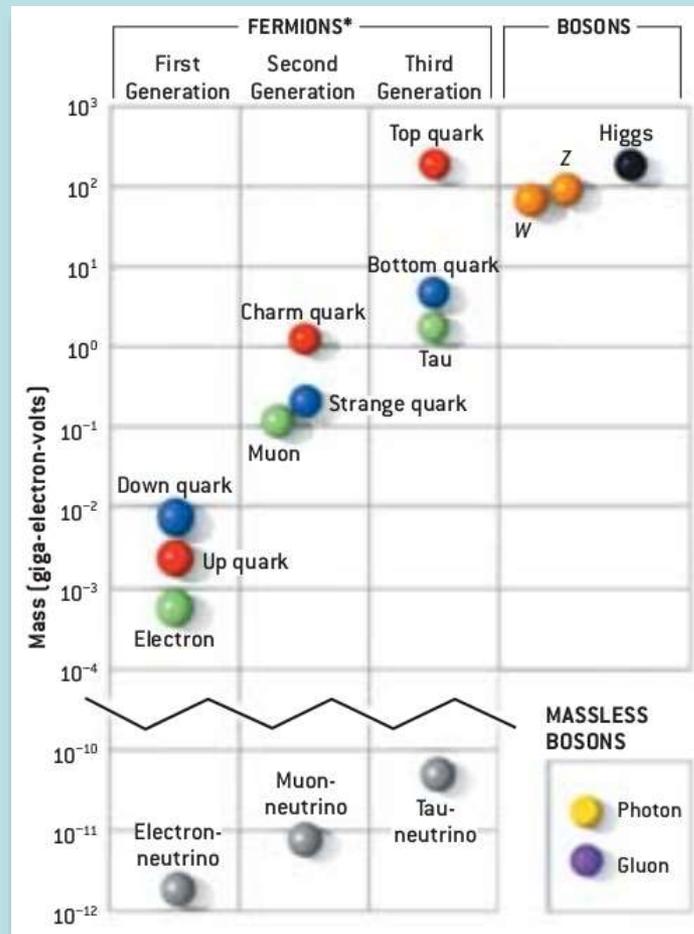
- Сильное: 1
- Электромагнитное: 1/137
- Слабое: 1/1000000
- Гравитационное: 10^{-38}

Какова причина для такого широкого диапазона?

Энергия Планка

10^{19} ГэВ

Нет ничего интересного между электрослабым (10^2 ГэВ) и планковским масштабами?



Gordon Kane, Scientific American, May 2000

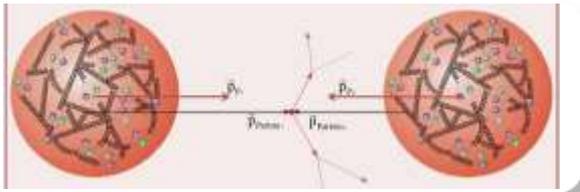
Высокая энергия vs. Высокая точность

Встречные pp

- Рождение состояний с любыми квантовыми числами
- Малые потери на синхротронное излучение → высокая энергия

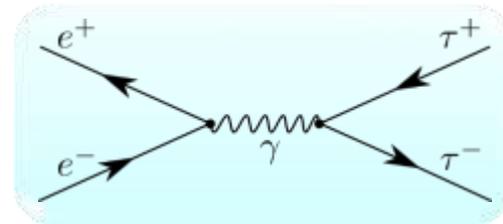
$$P_{\perp} \sim \frac{(\beta\gamma)^4}{\rho^2}$$

- Прямое рождение новых частиц



Встречные e^+e^-

- Ясное начальное состояние
- Низкая множественность
- Прецизионные измерения свойств частиц
- Непрямой поиск новой физики



Particle Physics at Budker INP

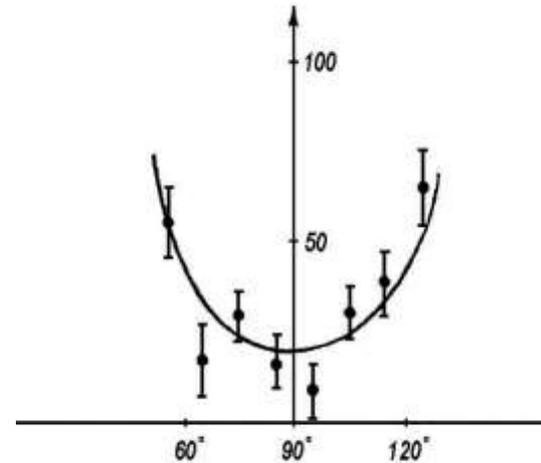
A few generations of the colliders and detectors

<u>Collider</u>	<u>2E, Gev</u>	<u>Detectors</u>	<u>Operation</u>
VEP-1 (e ⁻ e ⁻)	0.32	2 detectors	1965-67
VEPP-2	1.4	3 detectors	1967-72
VEPP-3 (booster and Nucl. Phys)	2.0	2 detectors	1972-
VEPP-4	11.0	OLYA, MD-1	1980-85
VEPP-2M	1.4	OLYA, ND, CMD SND, CMD-2	1974-2000
VEPP-4M	11.0	KEDR	2000-
VEPP-2000	2.0	SND, CMD-3	2009
Tau-Charm			?

ВЭП-1

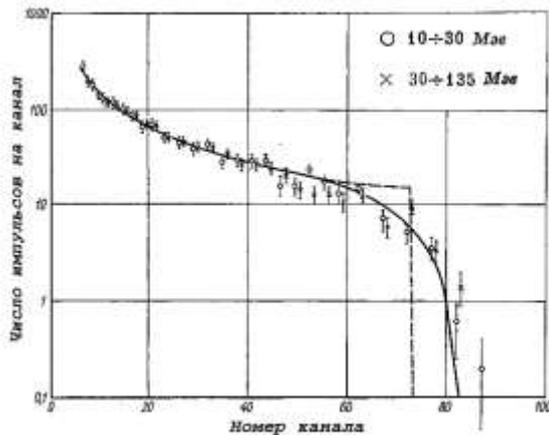


Г.И. Будкер и В.А.Сидоров
у первого детектора на встречных пучках



e^+e^- рассеяния на большие углы (1967)

$$1/q^2 \rightarrow 1/q^2 \cdot 1/(1-\lambda^2 \cdot q^2)$$
$$1/\lambda > 0.4 \text{ ГэВ/с}$$



Спектр ДТИ: $e^+e^- \rightarrow e^+e^- \gamma\gamma$ (1967)

Работы в Стэнфорде и Новосибирске внесли определяющий вклад как в развитие метода встречных пучков, так и в методику проведения физических экспериментов.

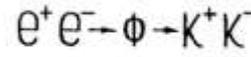
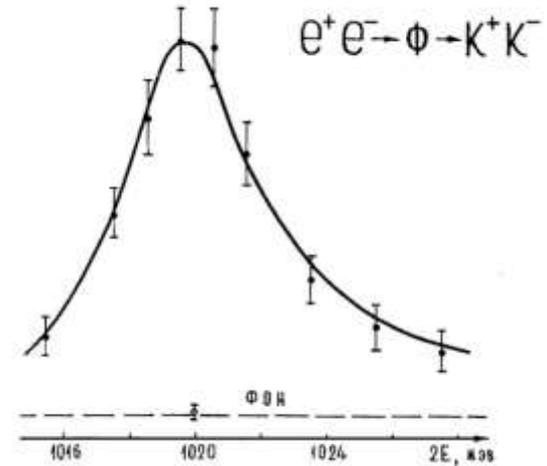
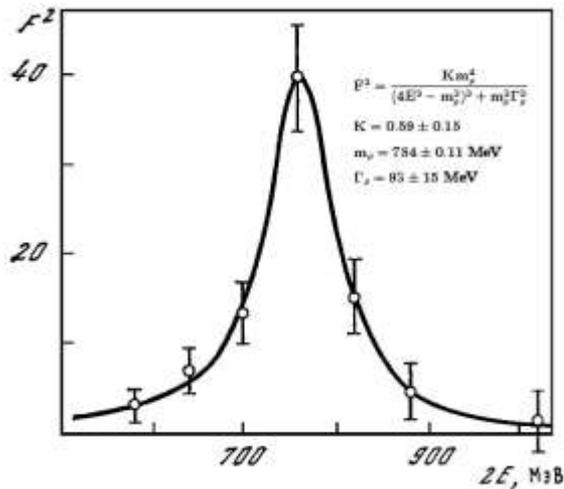
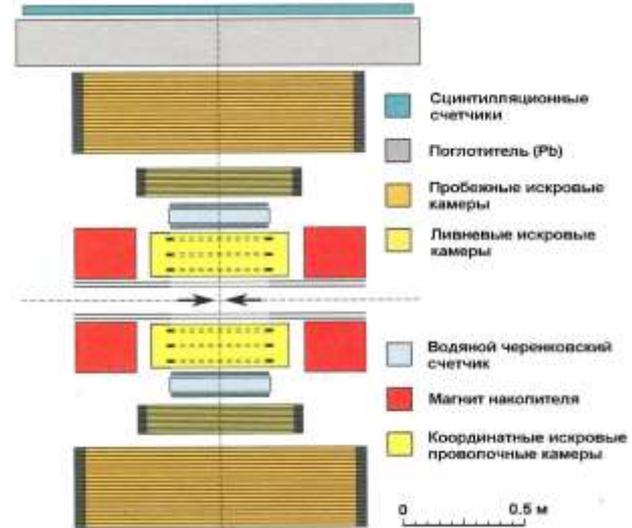
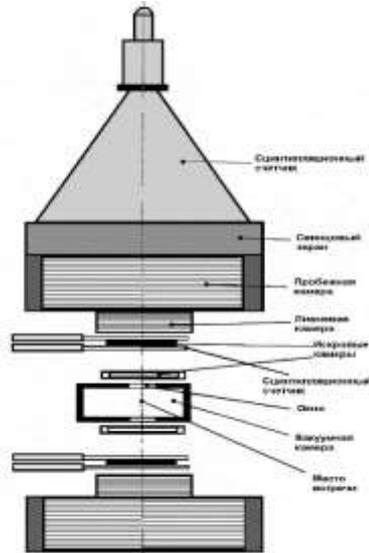
ДЕТЕКТОРЫ И ЭКСПЕРИМЕНТЫ НА ВЭПП-2

(1966-70)

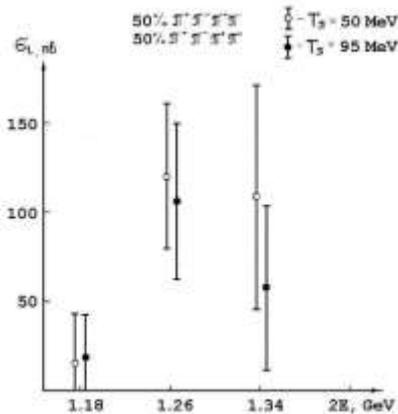
Первоначально целью физических экспериментов на ВЭПП-2 было изучение рождения векторных мезонов $\rho(770)$, $\omega(783)$ и $\phi(1020)$ и проверка квантовой электродинамики.

Детекторы на ВЭПП-2

(Ю.Н. Пестов, Е.В. Пахтусова, Л.М. Курдадзе, В.Е. Балакин, В.А. Сидоров, А.Г. Хабахпашев, А.П. Онучин....)



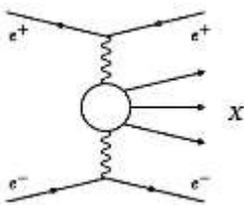
Эксперименты на ВЭПП-2



Обнаружение множественного рождения адронов (1970):

Сечение оказалось существенно больше чем предсказывала теория
На установке ADONA (Frascati) также были обнаружены многоадронные события при более высокой энергии.

Стало понятно что физика на встречных пучках гораздо интереснее, чем представлялось, и строительство новых коллайдеров было стремительным (ВЭПП-3, SPEAR, CEA, DORIS, CESR, PEP, TRISTAN, PETRA)



В 1971 г были обнаружены события двухфотонного рождения e^+e^- пар. Обозначилось еще одно важное направление на встречных пучках-двухфотонная физика! Сечение таких процессов логарифмически растет с энергией в отличие от аннигиляционного канала $\sigma \sim 1/E^2$

(Перспективы: $\gamma\gamma$ –коллайдеры!)

Наиболее значительные физические результаты экспериментов на ВЭПП-2:

1 — первые наблюдения и измерение параметров векторных мезонов на встречных пучках, 2 — проверка квантовой электродинамики, 3 — первое наблюдение процесса двухфотонного рождения e^+e^- -пар, 4 — первое наблюдение процесса многоадронного рождения, 5 — первое наблюдение превышения форм-факторов пи- и К-мезонов над предсказаниями модели векторной доминантности.

Наиболее важные методические достижения:

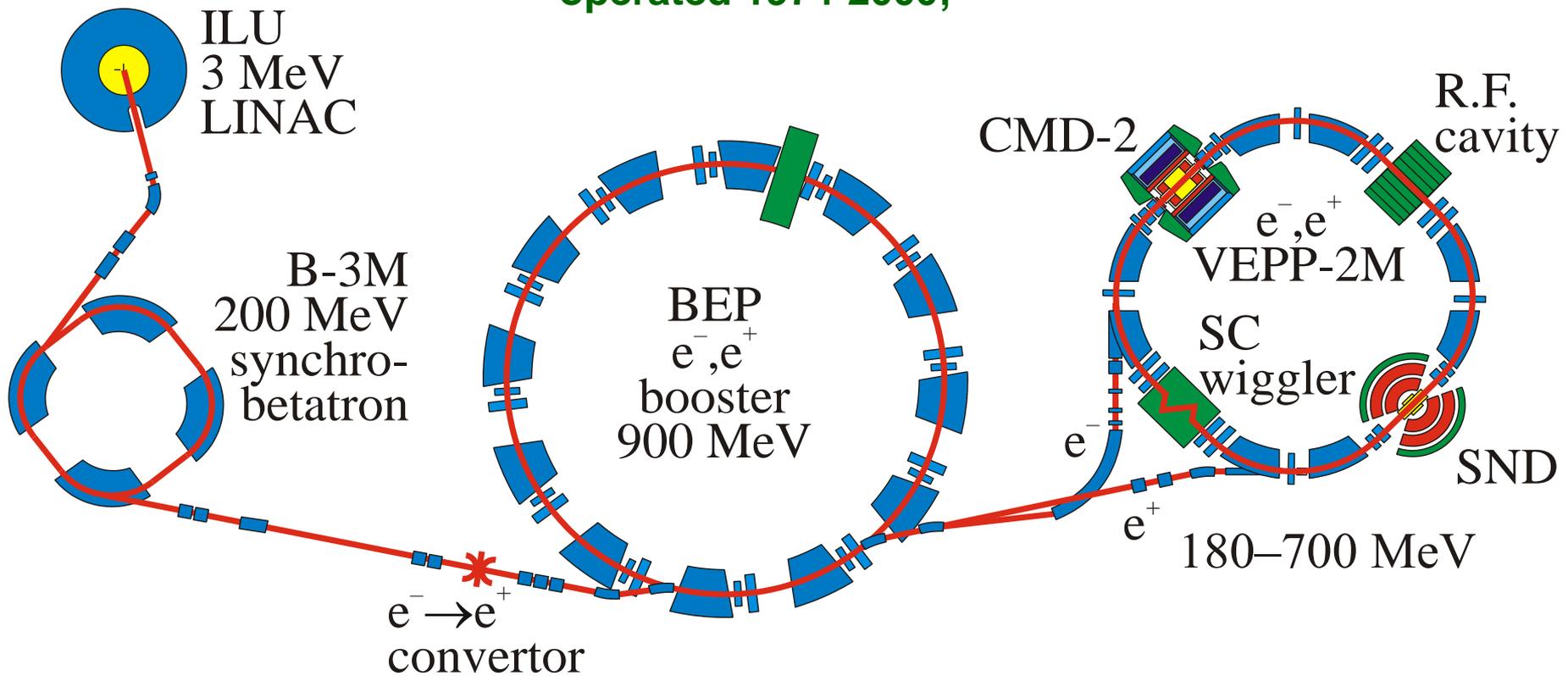
1 — первое применение проволочных камер в детекторе на встречных пучках в ИЯФ, 2 — первый эксперимент on-line — прямая запись данных с детектора на магнитофоны ЭВМ, 3 — впервые на встречных пучках использовался черенковский счетчик для идентификации частиц.

ВЭПП-3

- ВЭПП-3 начал работу в 1972 г (раньше чем SPEAR) и для него был создан детектор с оптическим съемом информации, в дальнейшем предполагалось, что он будет заменен на детектор с магнитным полем МД-1
- Однако разумной светимости не было получено (нехватка позитронов, плохая надежность и др.)
- В 1974 на SPEAR и в BNL был открыт J/ψ мезон- началась кварковая эра в физике элементарных частиц!
- Обидно, но к сожалению у ВЭПП-3 не было шансов открыть J/ψ мезон
- ВЭПП-3 с успехом используется:
 - инжектор в ВЭПП-4 и ВЭПП-4М
 - источник СИ
 - накопитель для экспериментов по ядерной физике (ДЕЙТОН)

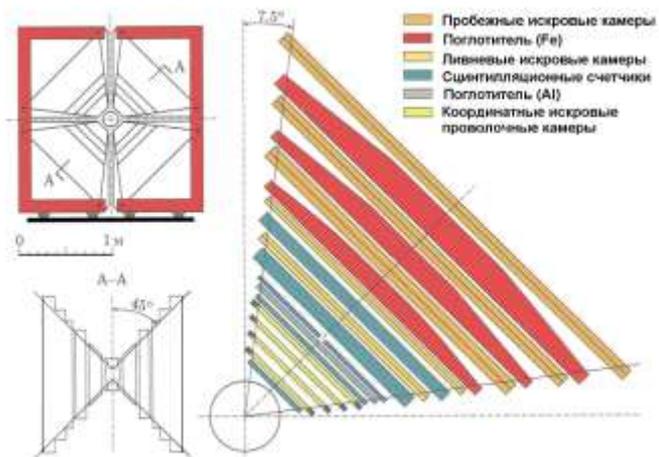
VEPP-2M Collider Complex

operated 1974-2000;



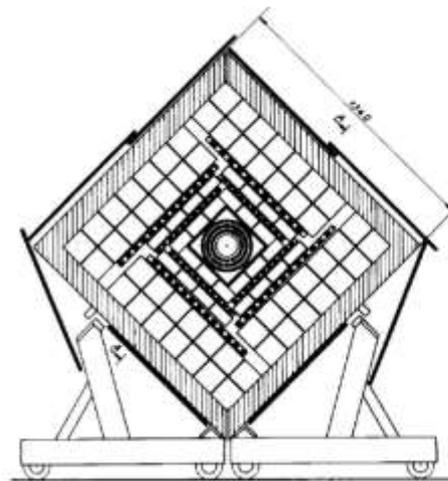
- $L_{\max} = 4 \times 10^{30} \text{ cm}^{-2} \text{ sec}^{-1}$ at $E_0 = 510 \text{ MeV}$; Total integrated luminosity 80 pb^{-1} .
- **Some results:**
 - Development of the resonant depolarization technique for precise measurements of particles masses (from 1975)
 - Detailed study of K , ρ , ω , and ϕ mesons (precise measurements of parameters, rare decays and etc)

Детекторы на ВЭПП-2М



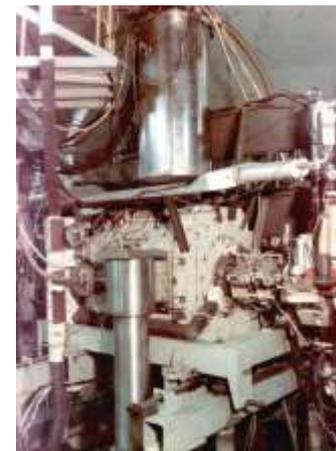
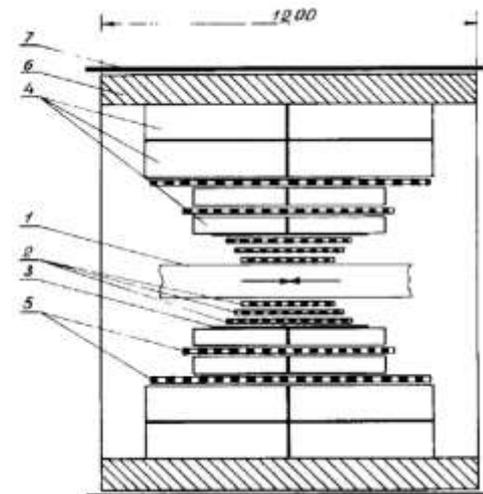
ОЛЯ (1974-79)

Л.М. Курдадзе и др.



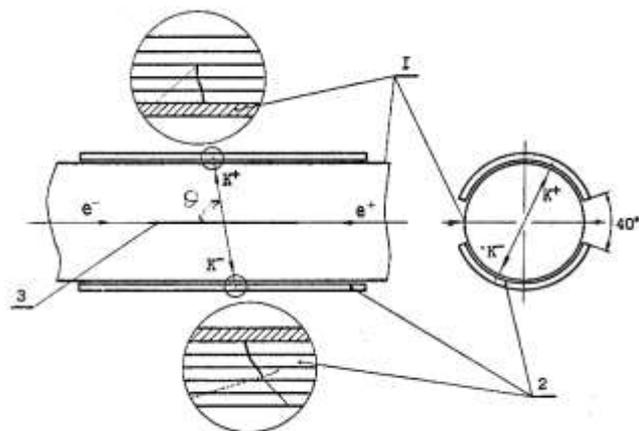
НД (1982-87)

С.И.Середняков и др.



КМД (1979-84)

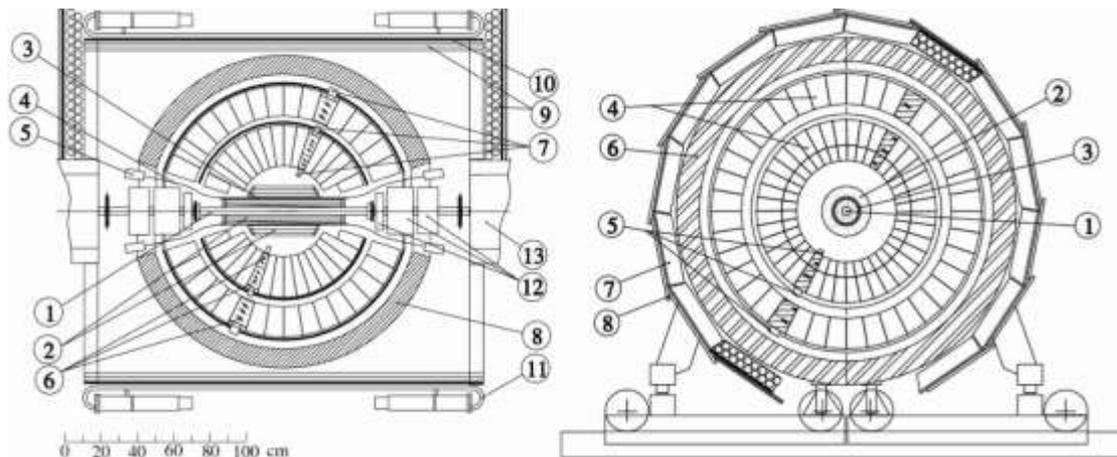
Л.М.Барков, Г.А.Блинов и др.



Эмульсии (1974-76)

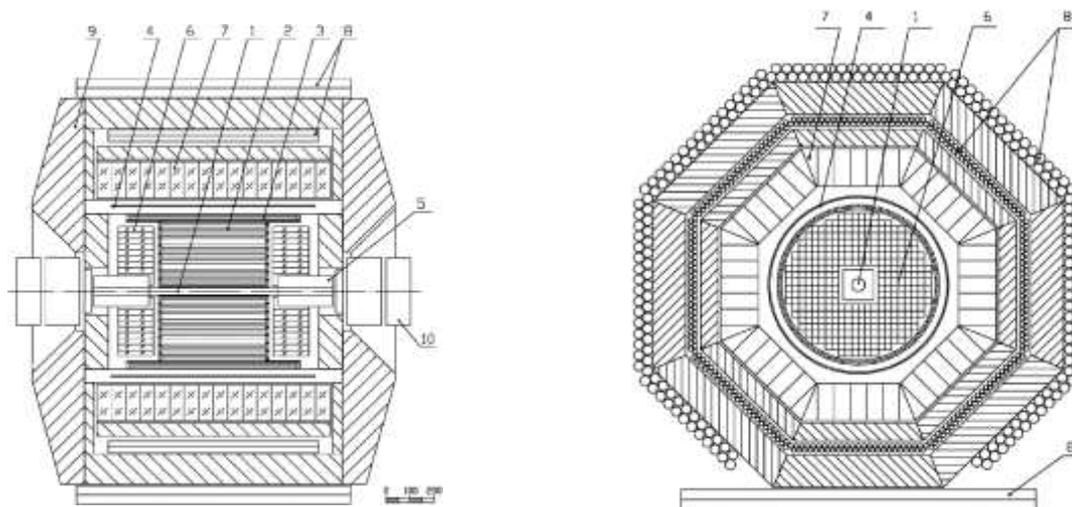
Л.М.Барков и В.П.Смахтин

Детекторы на ВЭПП-2М –новое поколение



СНД (1995-2000)

С.И.Середняков и др.

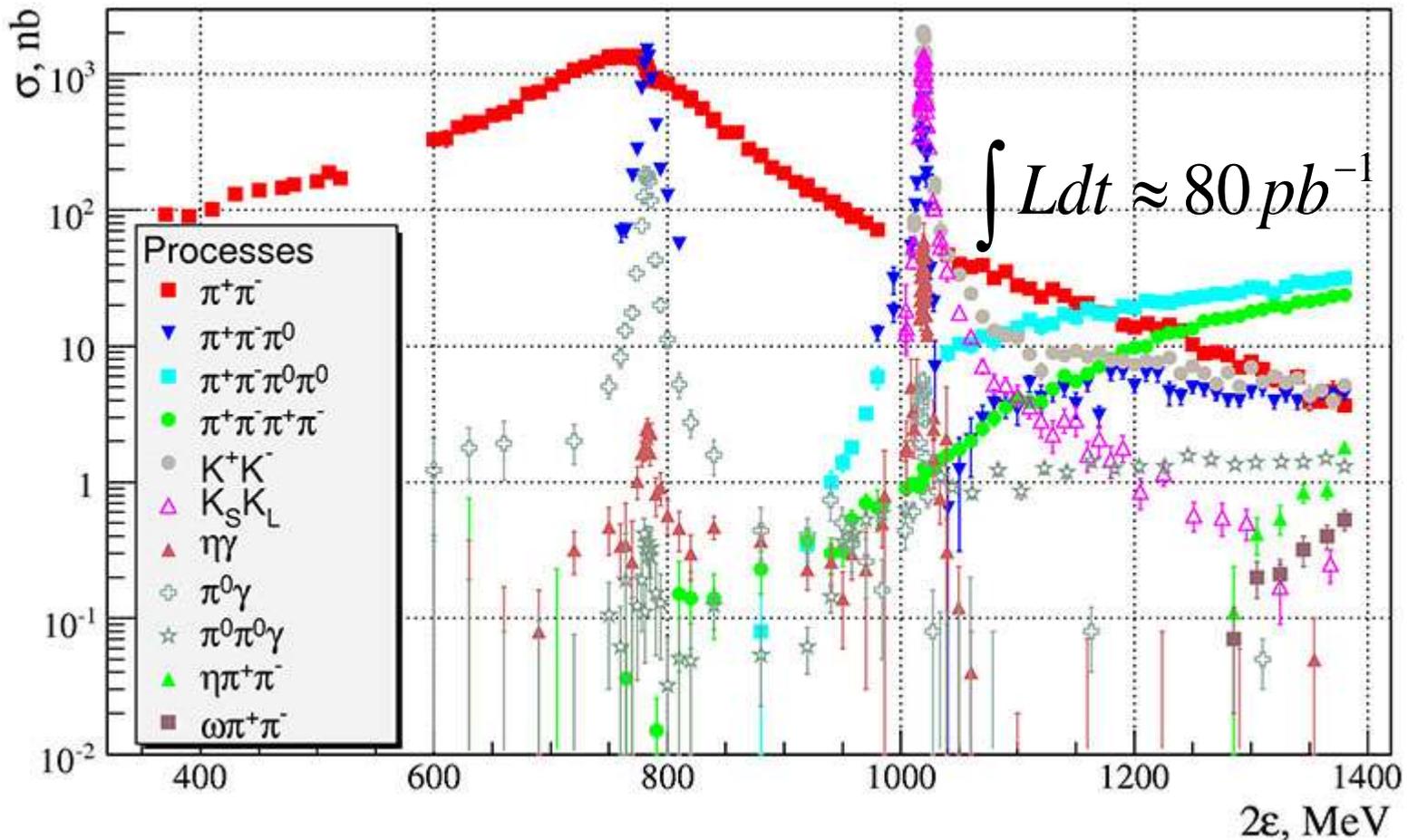


КМД-2 (1995-2000)

Л.М.Барков, Б.И.Хазин и др.

Results of e^+e^- annihilation cross section measurements by SND and CMD-2 detectors at VEPP-2M

precision now is ~1% and will be improved to ~0.3% at VEPP-2000!

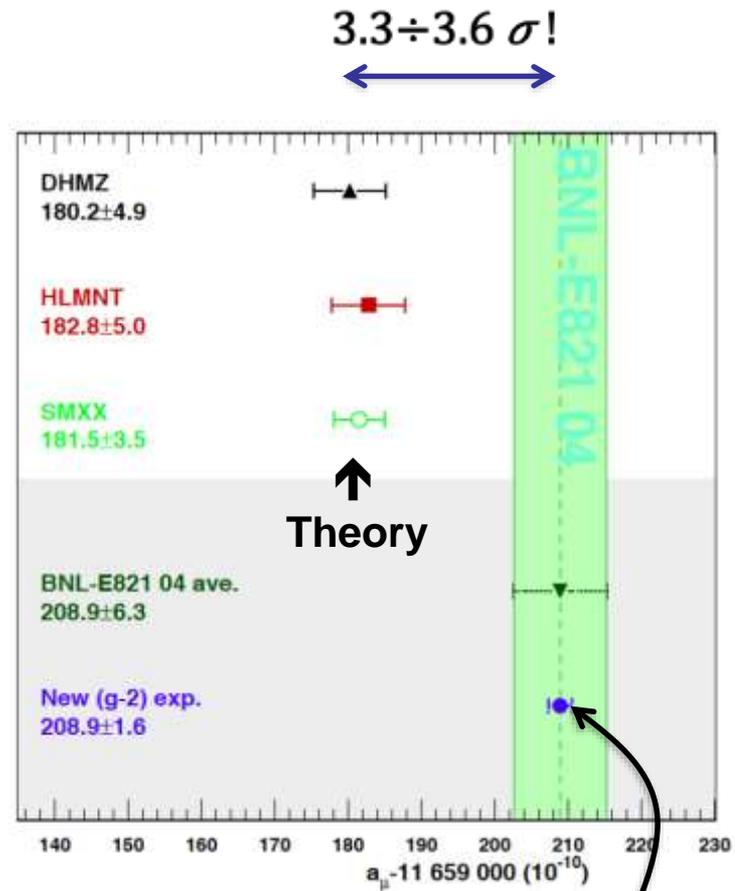


These measurements are necessary for determination $g-2$ and α

g-2 measurements



BNL



Fermilab

Expected precision
in Fermilab
5 times better!
+(g-2/EDM experiment at JPARC)

**New challenge for
e+e- → hadrons measurements !**

Наблюдение несохранения четности в атомах

Нейтральные токи могут приводить к несохранению четности при взаимодействии электрона с ядром. Эффект крайне, но может в принципе наблюдаться по повороту плоскости поляризации света (Я.Зельдович, 1957)

В 1974-78 гг (Л.Барков, М.Золотарев) в ИЯФ были проделаны уникальные эксперименты по изучению этого явления в парах висмута, эффект составлял около 10^{-7} рад и был измерен с точностью 10%!

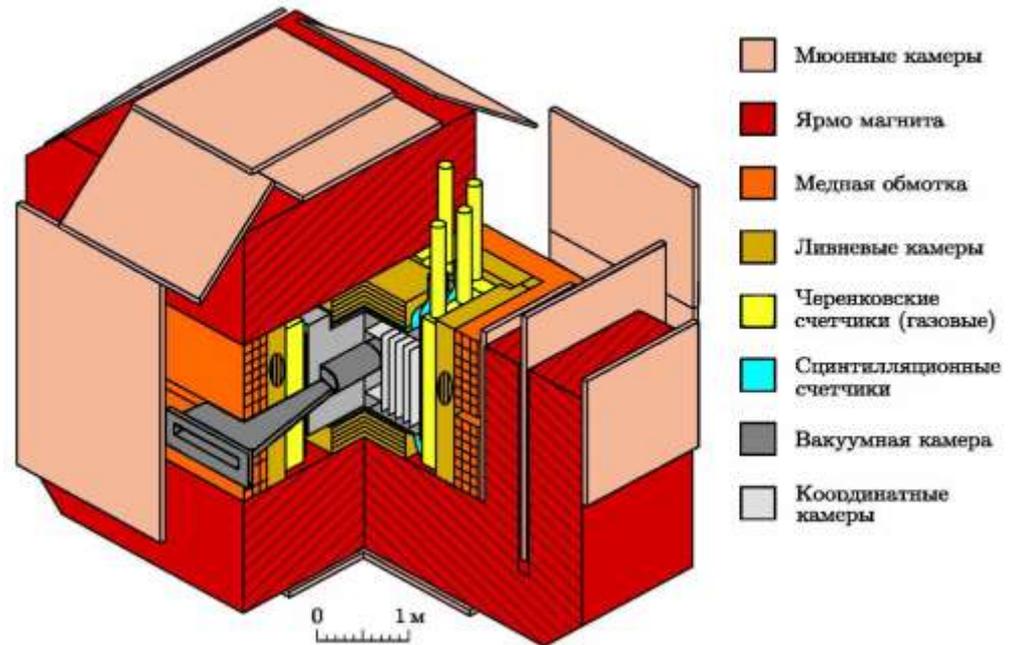
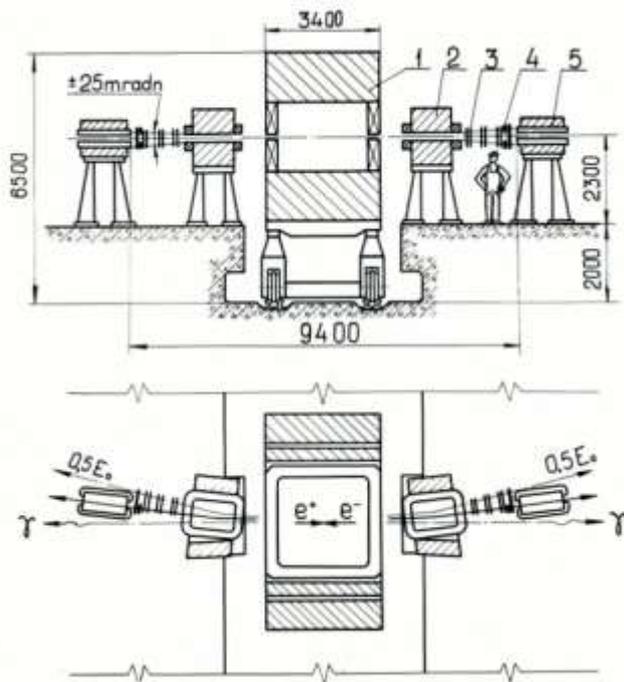
Детальные теоретические расчеты также были выполнены в ИЯФ (И.Хриплович, О.Сушков, В.Фламбаум) и хорошо согласовались с экспериментом.

На тот момент W и Z бозоны еще не были открыты и эти эксперименты являлись блестящим подтверждением теории Вайнберга-Салама

МД-1 на ВЭПП-4 (1981-85)

(А.П.Онучин, В.Грошев, В.Тельнов, А.Воробьев, Ю.Тихонов)

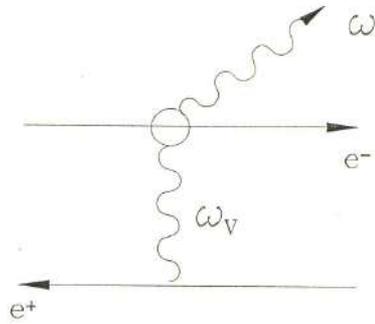
КБ, Радиогруппы, ВЦ, Цех.....



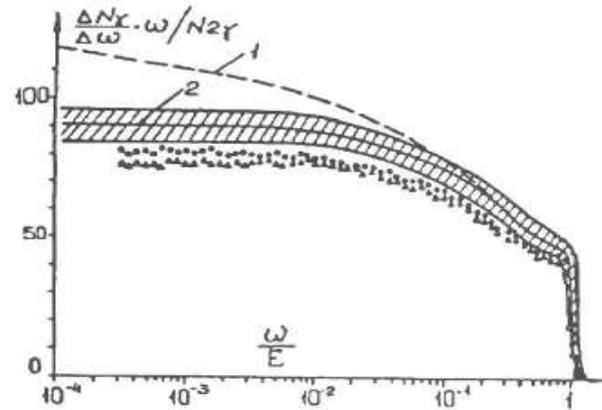
Эксперименты, проведенные с детектором МД-1:

- Измерение параметров $\Upsilon(1S)$ -, $\Upsilon(2S)$ -, $\Upsilon(3S)$ -мезонов (массы, электронные ширины, бранчинги)- **до сих самые точные данные в мире**
- Измерение полных сечений e^+e^- аннигиляции в адроны и поиск узких резонансов.
- Двухфотонная физика (с 0, 1, 2 рассеянными электронами)- **двухфотонные ширины C-четных резонансов η , η' , f_2 , a_2 , сечение $\gamma\gamma \rightarrow$ адроны**
- Разное (**QED процессы $e^+e^- \rightarrow e^+e^-\gamma$, $\gamma(CI)e \rightarrow ee^+e^-$**).

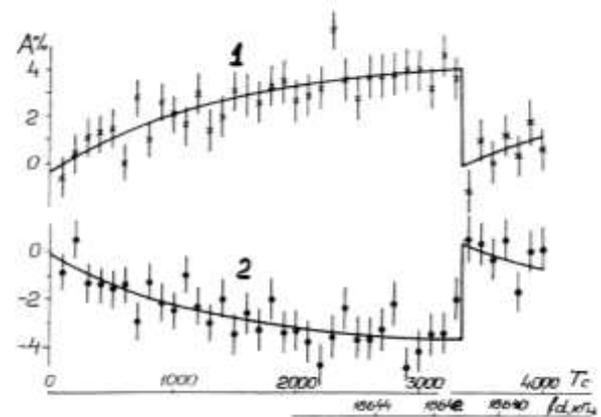
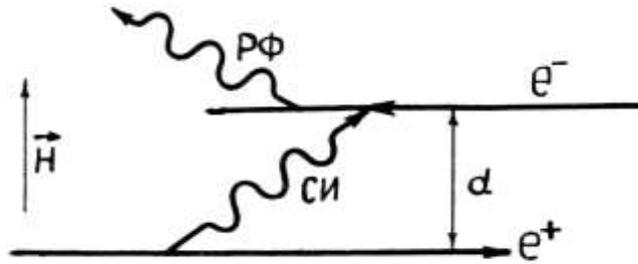
Эффект ограничения прицельных параметров в процессе $e^+e^- \rightarrow e^+e^- \gamma$



$$\omega_v \sim \omega/4\gamma^2 \quad \rho \sim 4\gamma^3/\omega$$



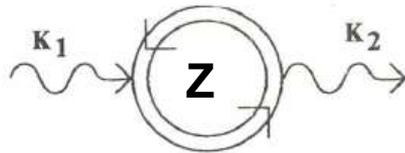
Измерение поляризации по рассеянию СИ на встречном пучке



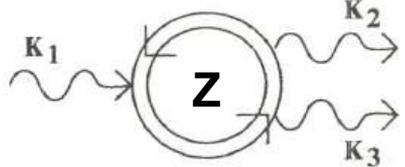
Нелинейные процессы КЭД на ВЭПП-4 (1995-96)

(Г.Кезерашвили, Ю.Тихонов, В.Панин и др.)

Дельбрюкковское рассеяние



Расщепление фотона



Точная теория ($Z\alpha \sim 1$!)
создана в ИЯФ
(А.Мильштейн, Р.Ли)

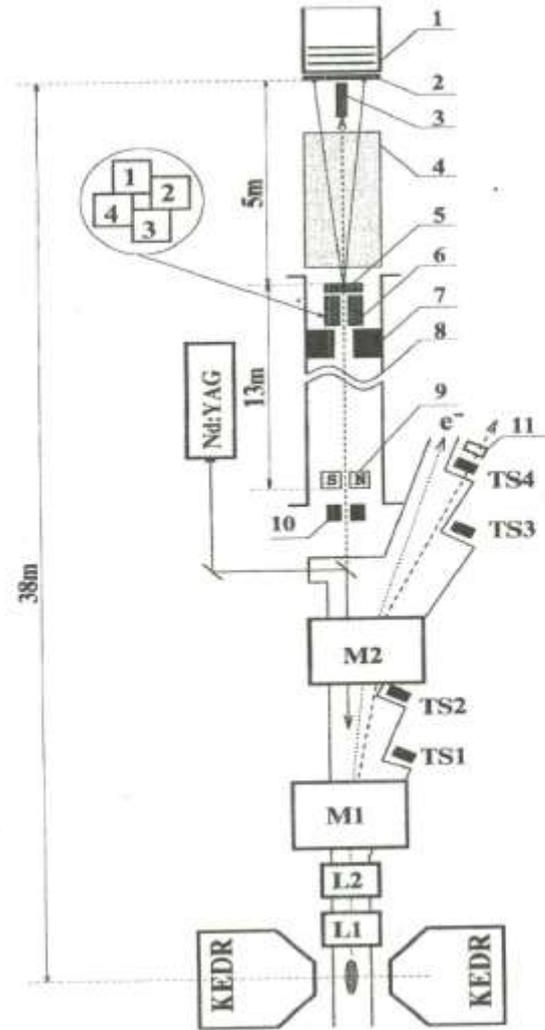


Рис. 2: Схема эксперимента по расщеплению фотона.

Действующие коллайдеры



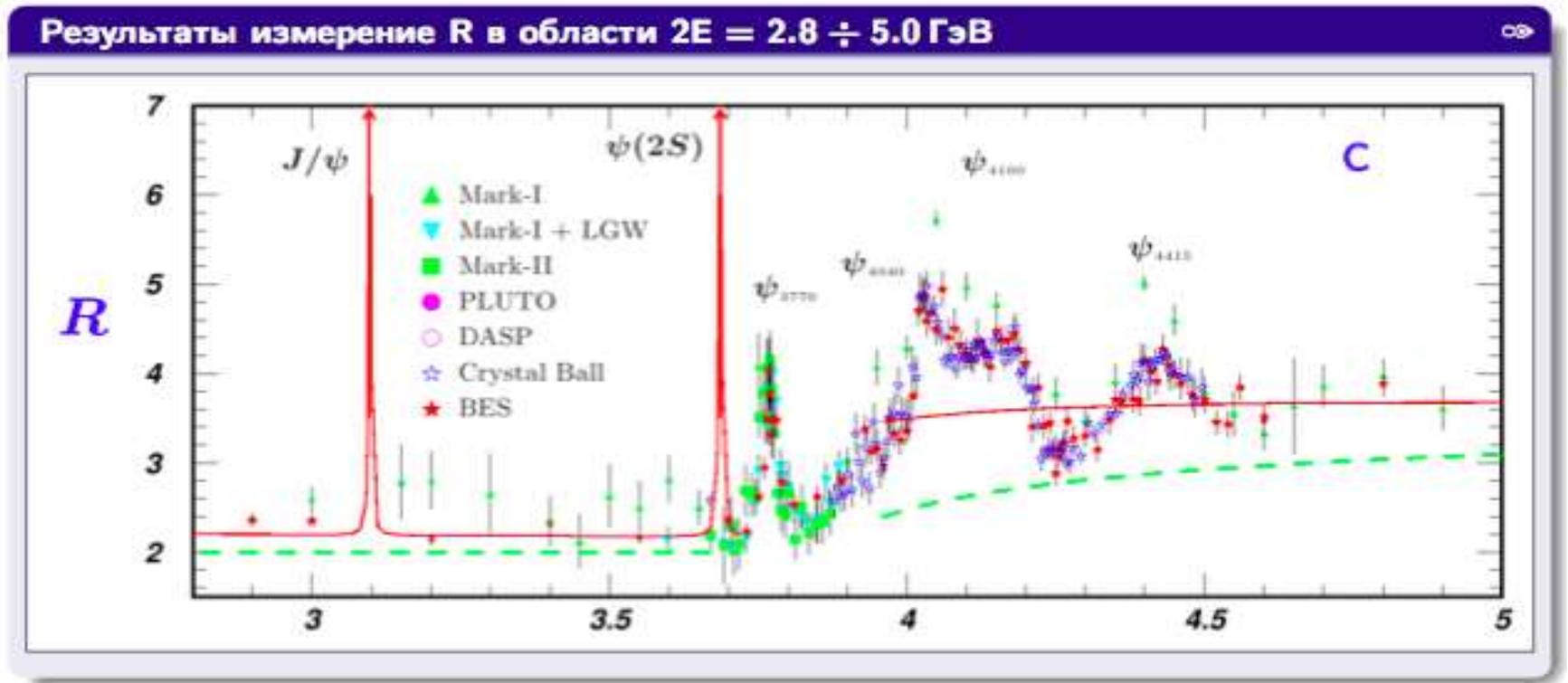
В ИЯФе работают
два из четырех
действующих
коллайдеров

$2E=0.3-12$ ГэВ

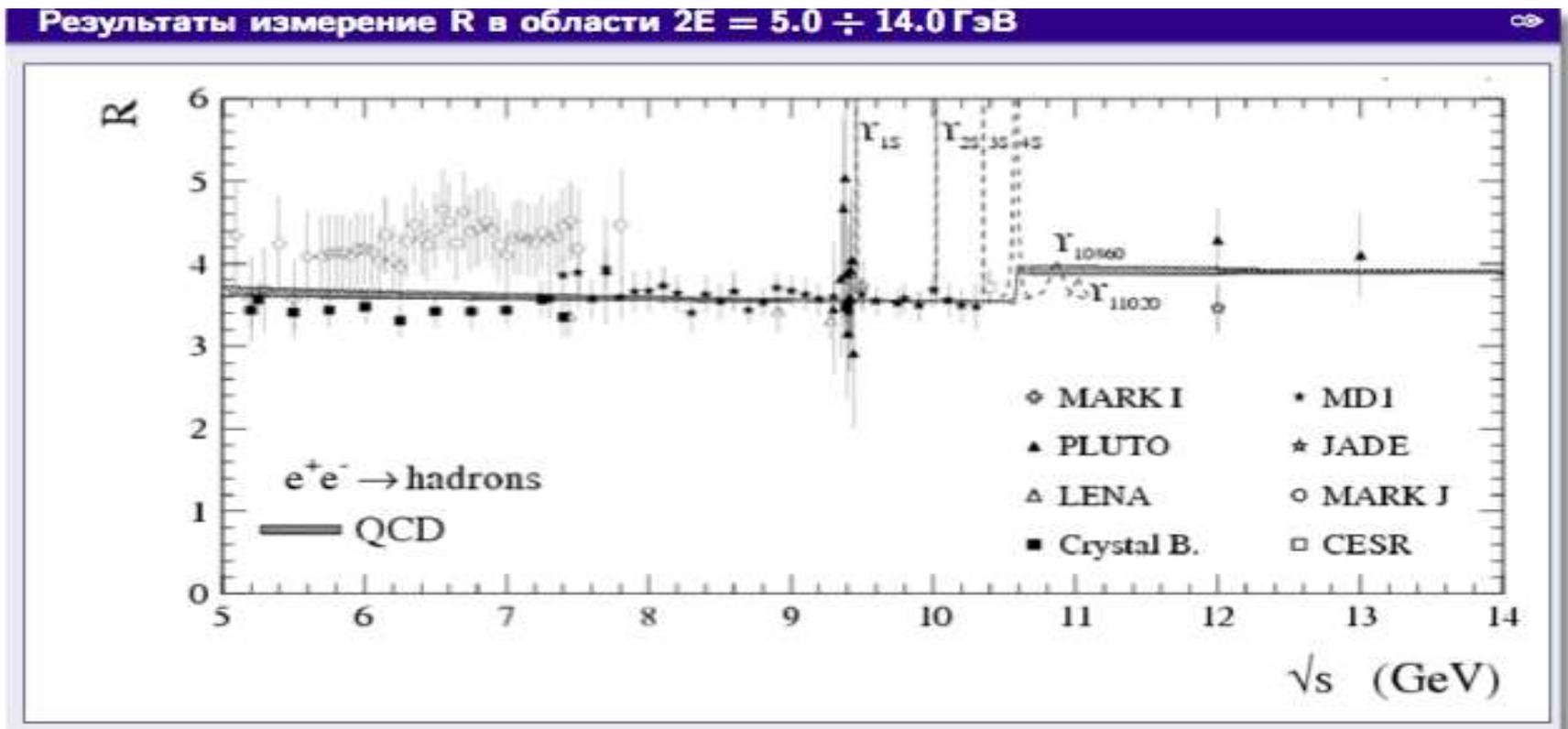
BINP's colliders: $2E=0.3-11.0$ GeV

(5 quarks from 6 are in the game!)

$2E=2.0-5.0$ ГэВ



2E=5.0-12.0 GeV

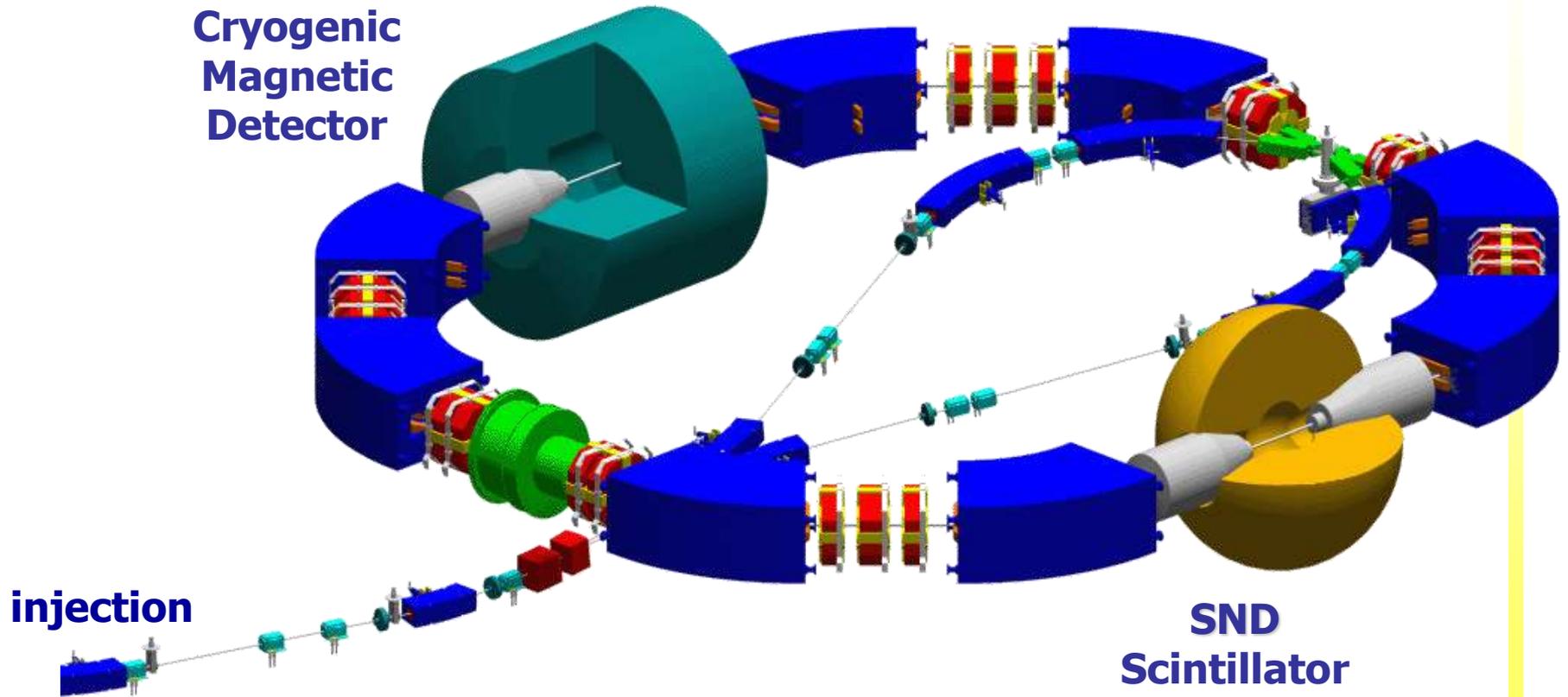


VEPP-2000 Collider

Round beams, 2 x 1000 MeV
(1x1 bunch)

Status: in operation since 2009

CMD-3
Cryogenic
Magnetic
Detector



injection

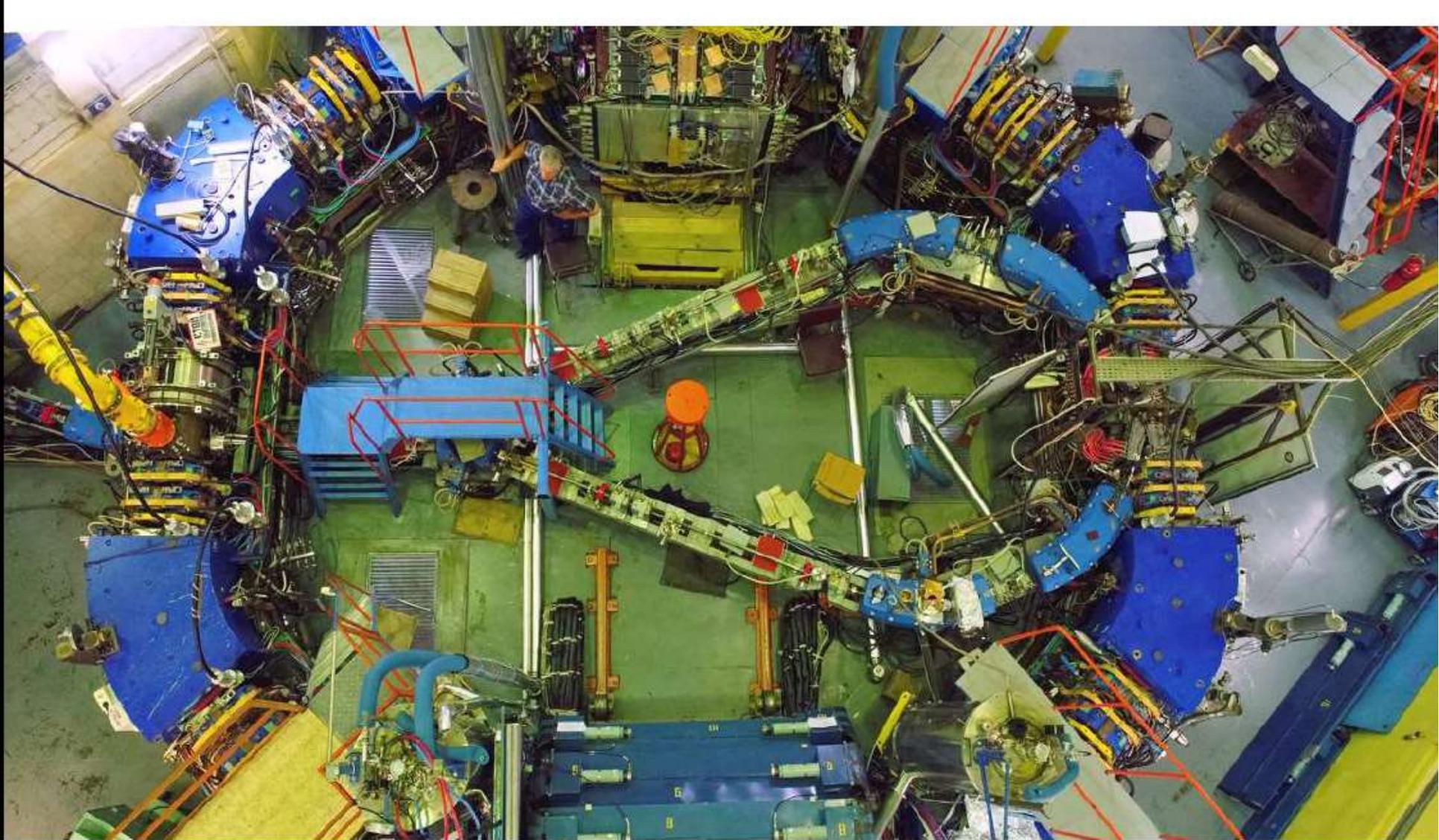
Present status: $\xi=0.14!$
 $L_{\max} = 4 \times 10^{31} \text{ cm}^{-2} \text{ c}^{-1}$ at $2E=1.0 \text{ GeV}$

SND
Scintillator
Neutral particles
Detector



VEPP-2000

“Bird view”





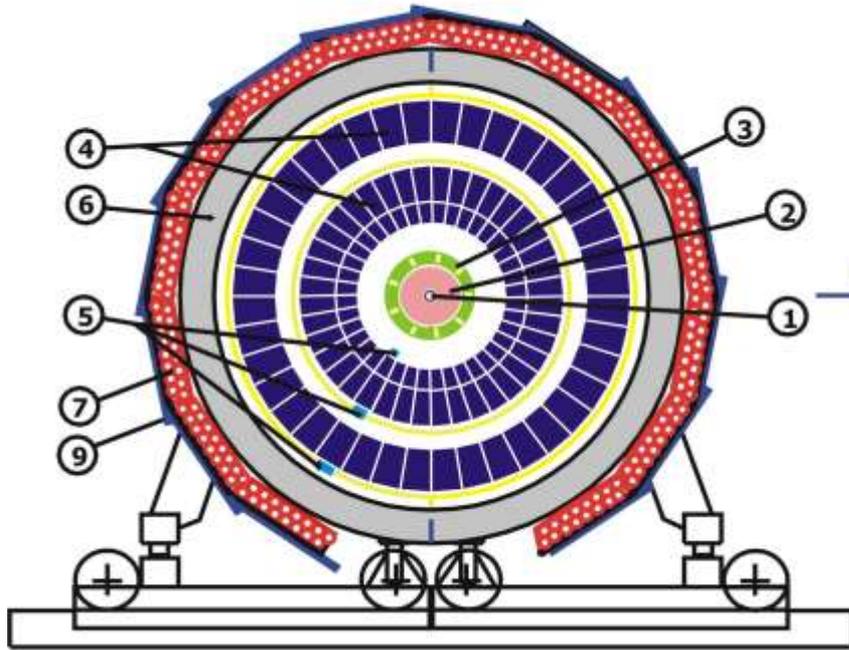
Physics at VEPP-2000



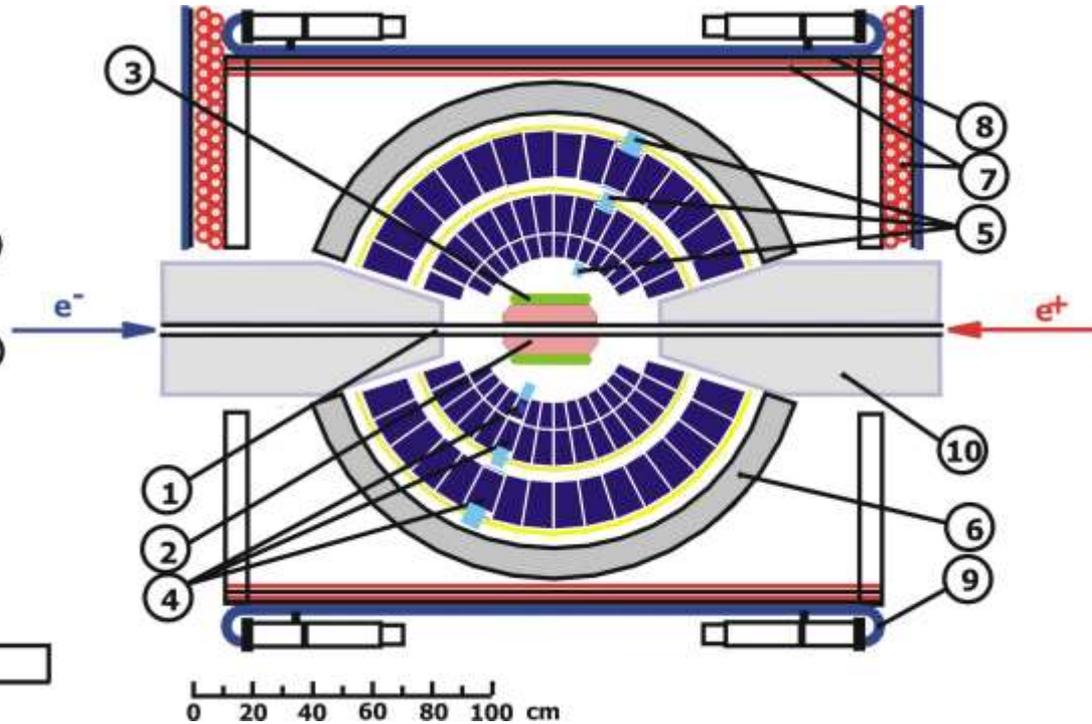
- Study of hadronic cross sections
 $e^+e^- \rightarrow 2h, 3h, 4h \dots, h = \pi, K, \eta, \dots$
- Precision measurement of
 $R = \sigma(e^+e^- \rightarrow \text{hadrons}) / \sigma(e^+e^- \rightarrow \mu^+\mu^-)$
- Study of light vector mesons excitations: $\rho', \rho'', \omega', \phi', \dots$
- Comparison of the energy dependence of $e^+e^- \rightarrow \text{hadr. (I=1)}$ cross sections with spectral functions in τ -decays
- Measurement of the nucleons electromagnetic form factors and search for **NN-resonances**
- Study of e^+e^- -annihilation into hadrons at low energy by radiative return (ISR)
- Two-photon physics
- High order OED processes

10 years of very interesting physics in future !

SND at VEPP-2000



1 – beam pipe, 2 – tracking system, 3 – aerogel, 4 – NaI(Tl) crystals, 5 – phototriodes, 6 – muon absorber, 7–9 – muon detector, 10 – focusing solenoid.



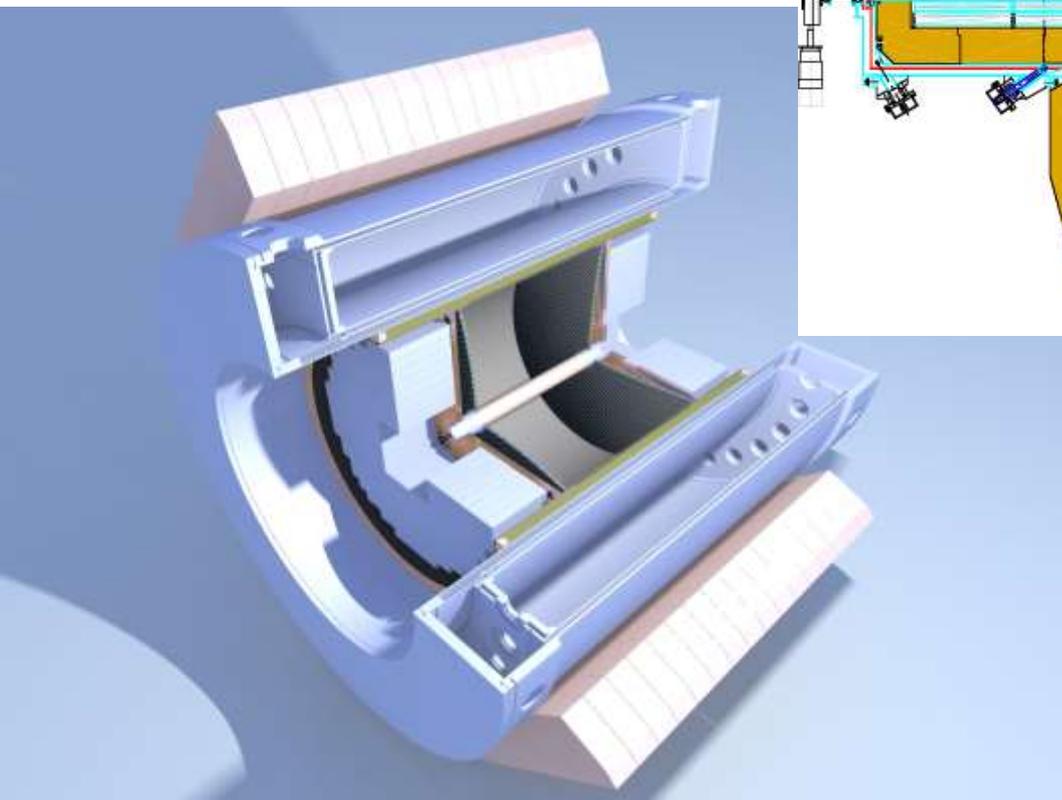
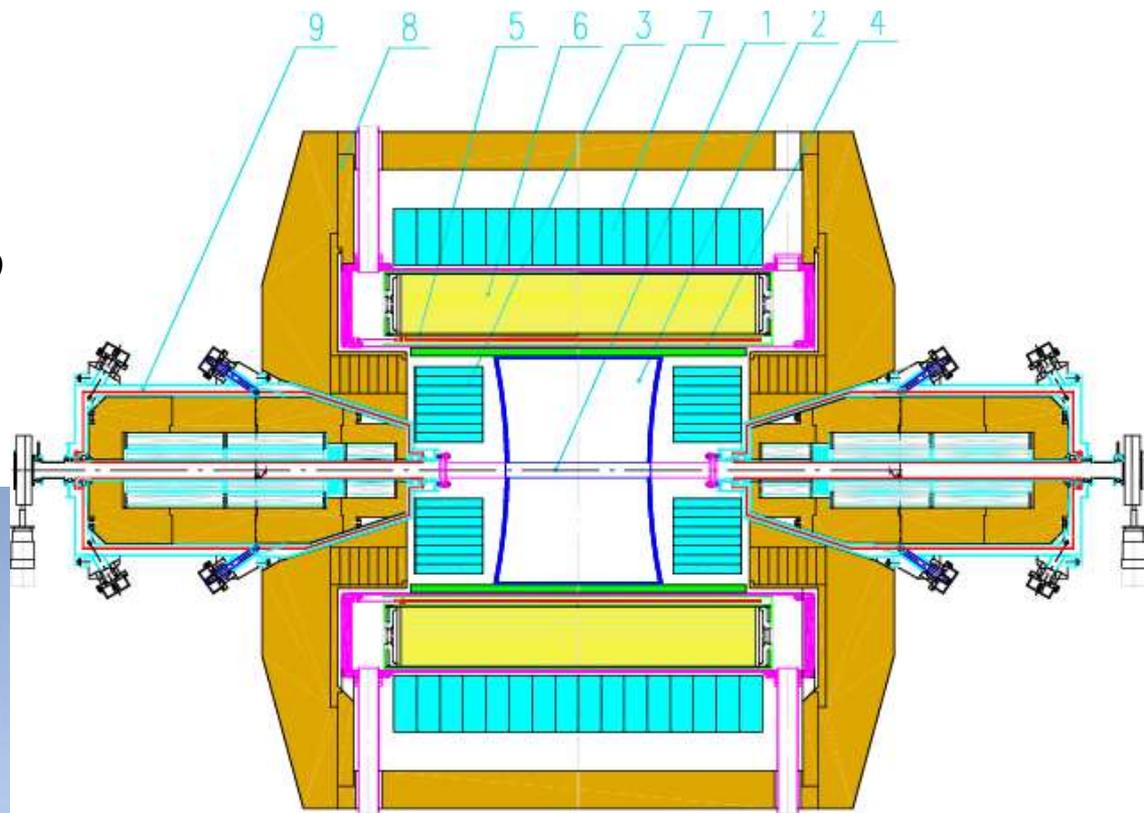
Advantages for VEPP-2000:

1- cherenkov counter, $n=1.05$, 1.13 – e/π separation $E < 450$ MeV, π/K separation $E < 1$ GeV,
2 – drift chamber – better tracking



Cryogenic Magnetic Detector-3

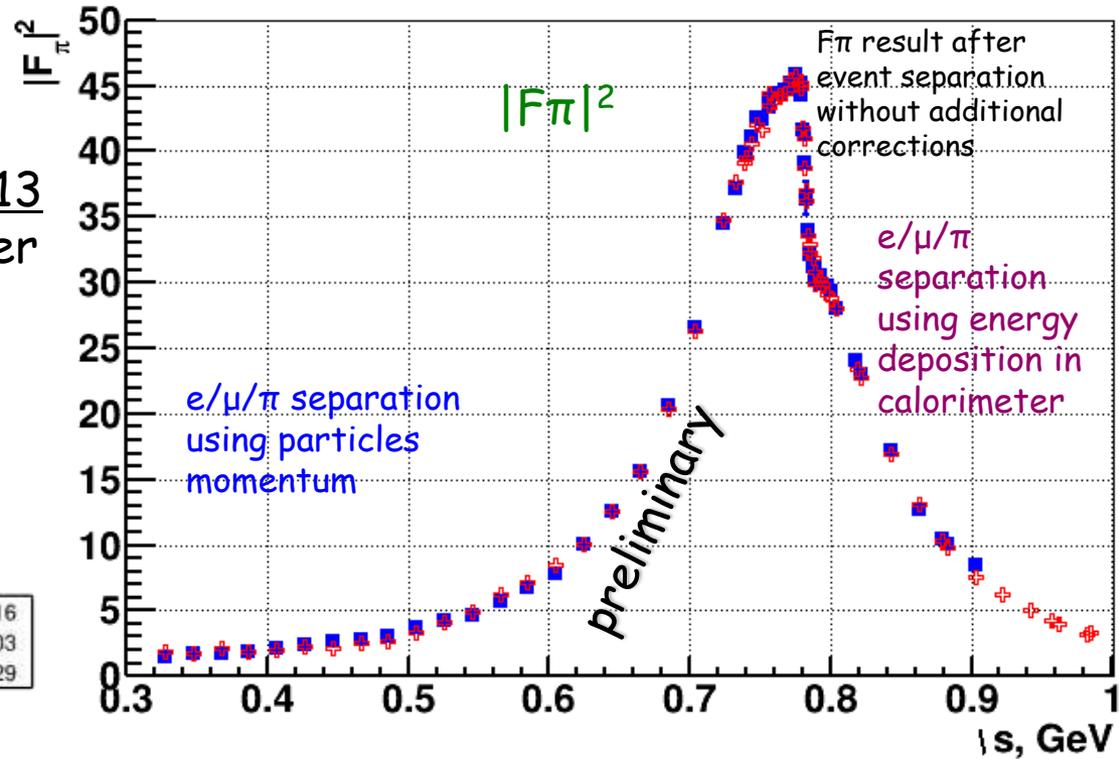
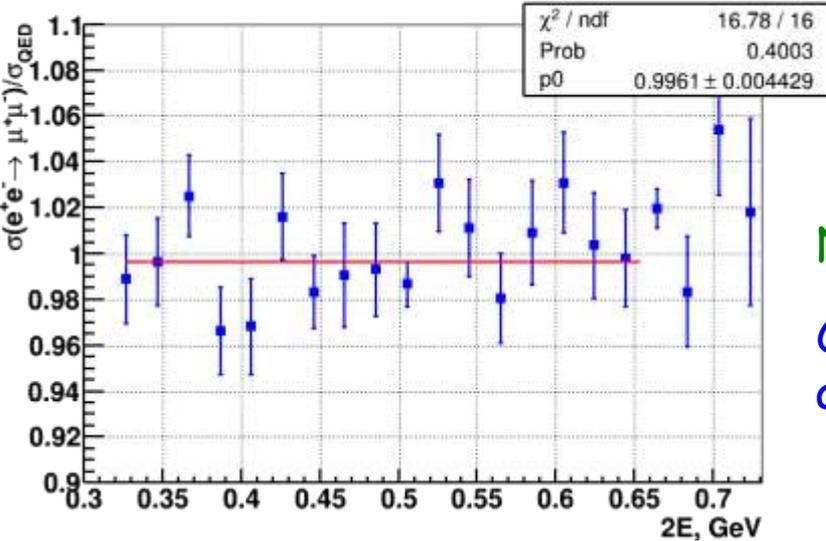
- 1 - vacuum chamber
- 2 - drift chamber
- 3 - electromagnetic calorimeter BGO
- 4 - Z - chamber
- 5 - CMD SC solenoid



- 6 - electromagnetic calorimeter LXe
- 7 - electromagnetic calorimeter CsI
- 8 - yoke
- 9 - VEPP-2000 solenoid

$e^+e^- \rightarrow \pi^+\pi^-$ by CMD-3

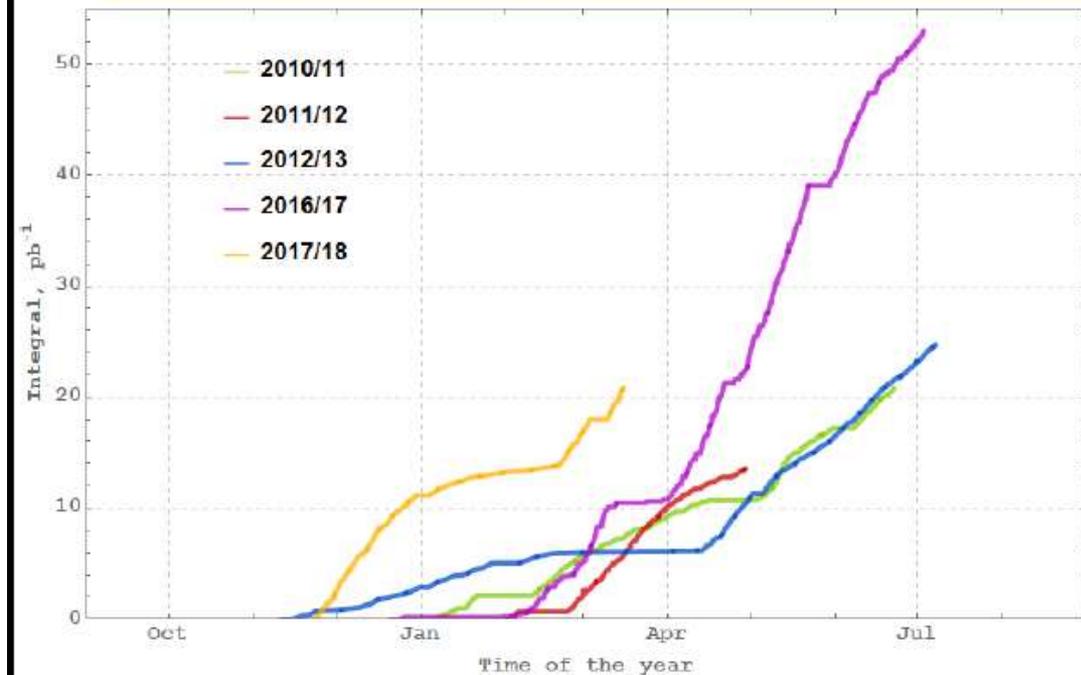
Statistical precision of cross section measurement for 2013 data is at the same level as all other experiments before



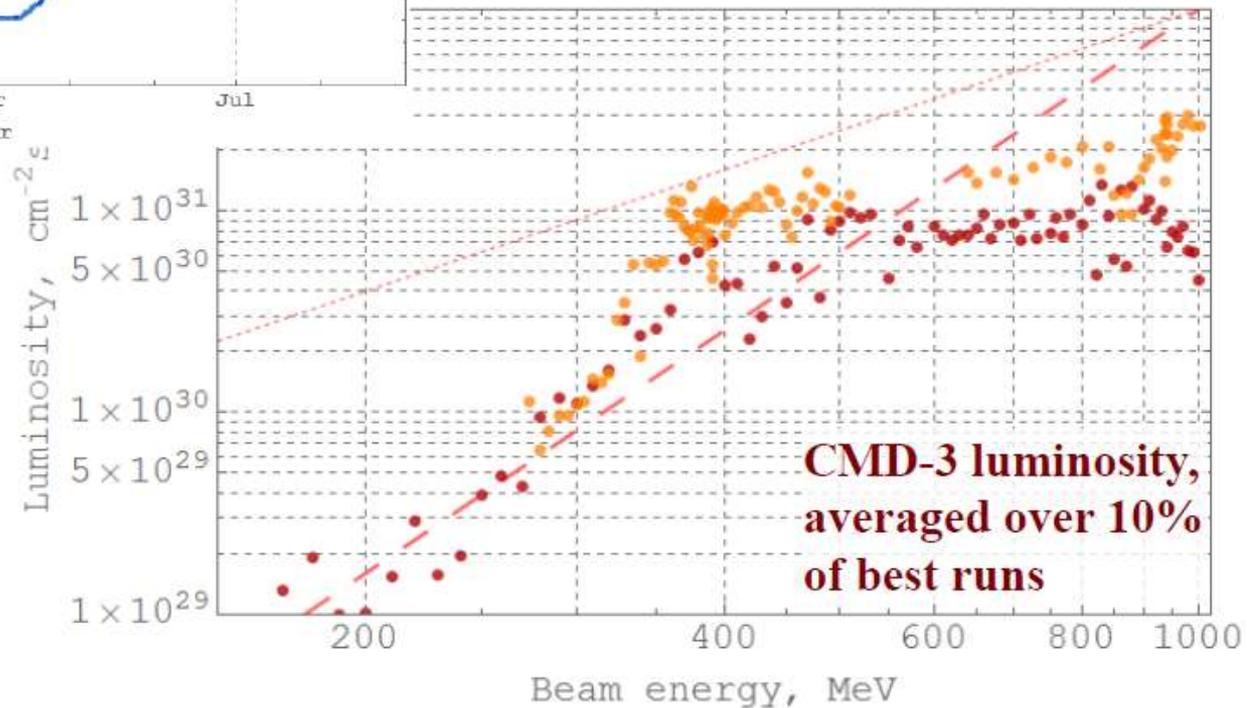
$N_{\mu\mu}/N_{ee}/\text{QED}$

Compatible with QED at the level of 0.5 %

Набор светимости с ИК

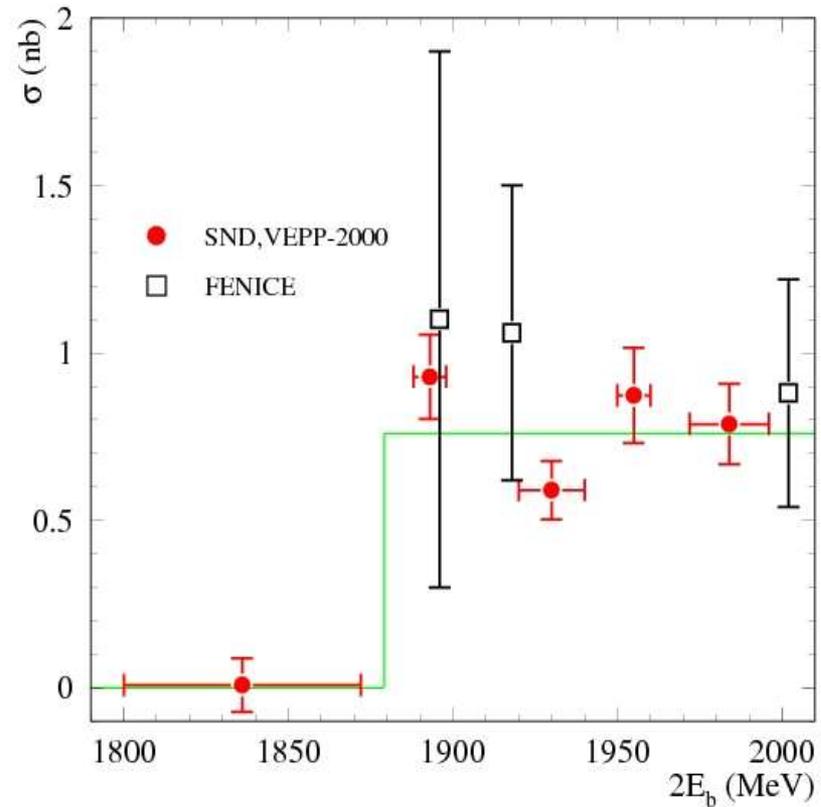
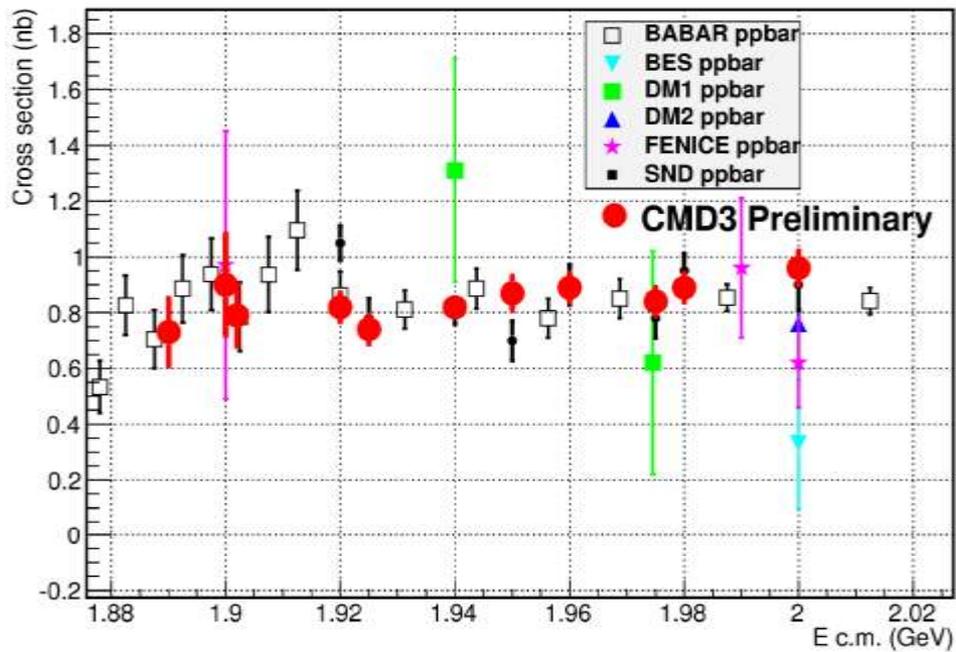


2017-2018 data



Some new results from SND and KMD-3

$$e^+e^- \rightarrow NN$$

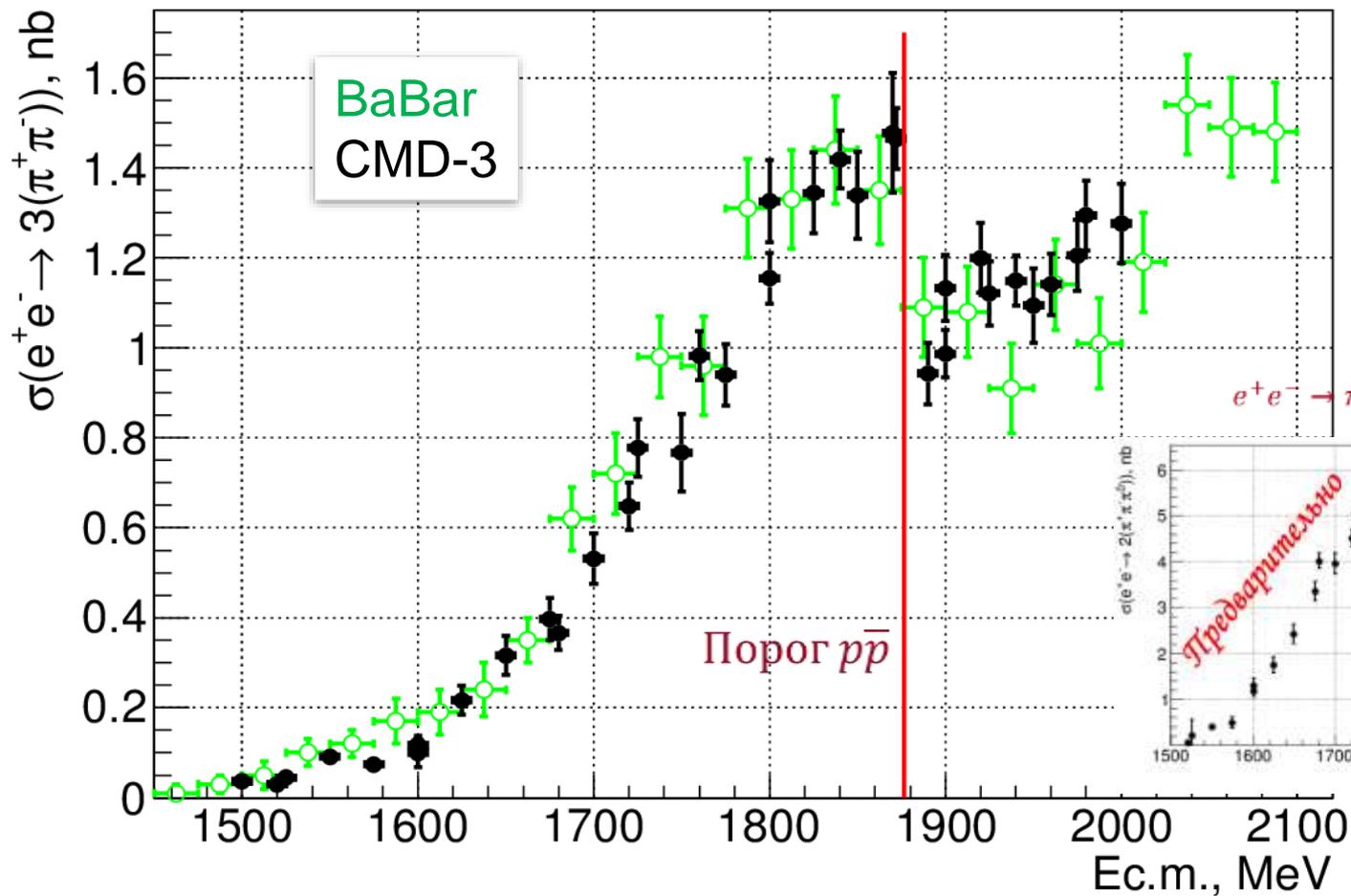


$$e^+e^- \rightarrow p^+p^-$$

$$e^+e^- \rightarrow nn$$

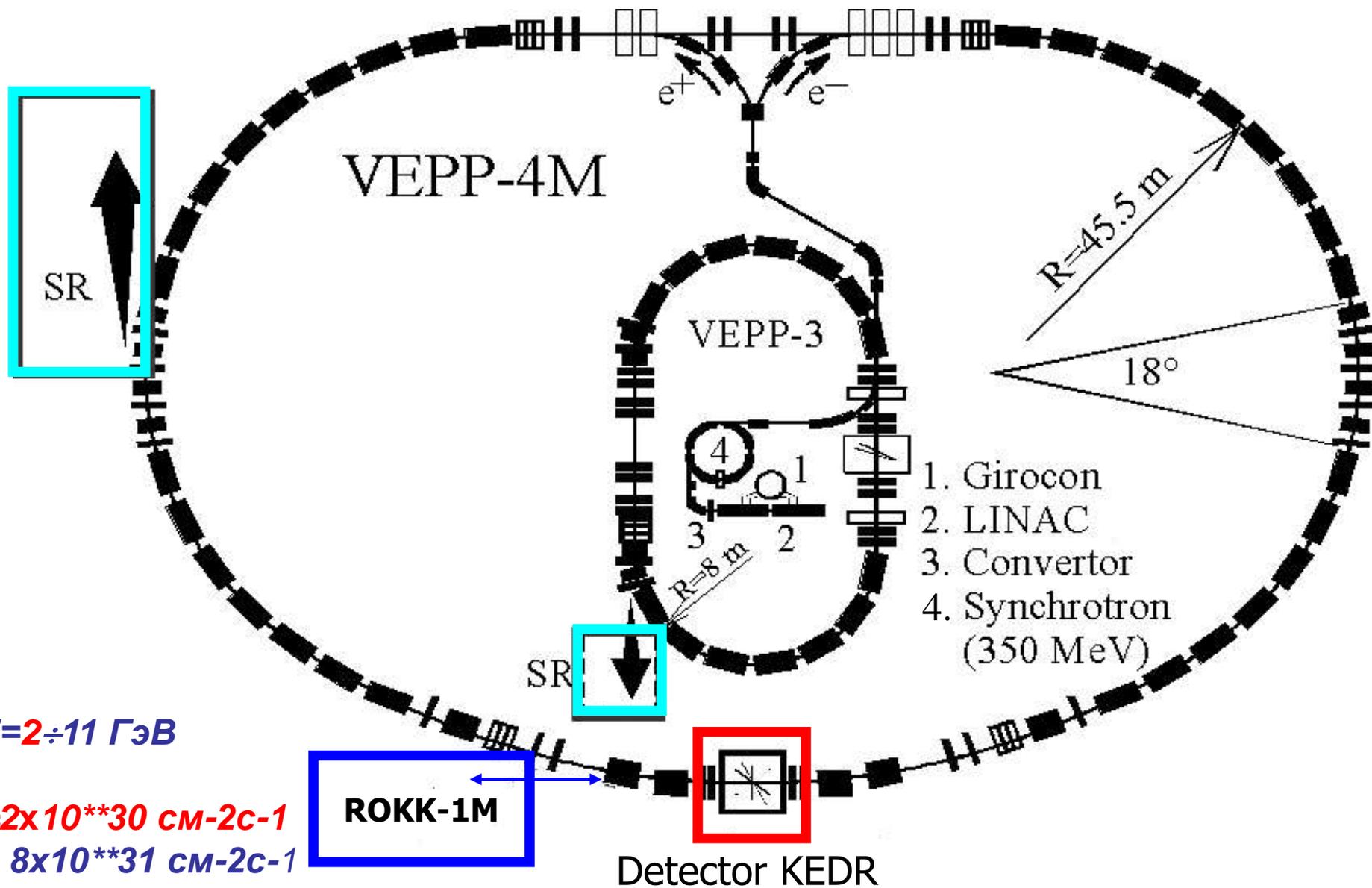
? Набор большей статистики позволит измерить G_e/G_m

Сечение $e^+e^- \rightarrow \pi^+\pi^-\pi^+\pi^-\pi^+\pi^-$

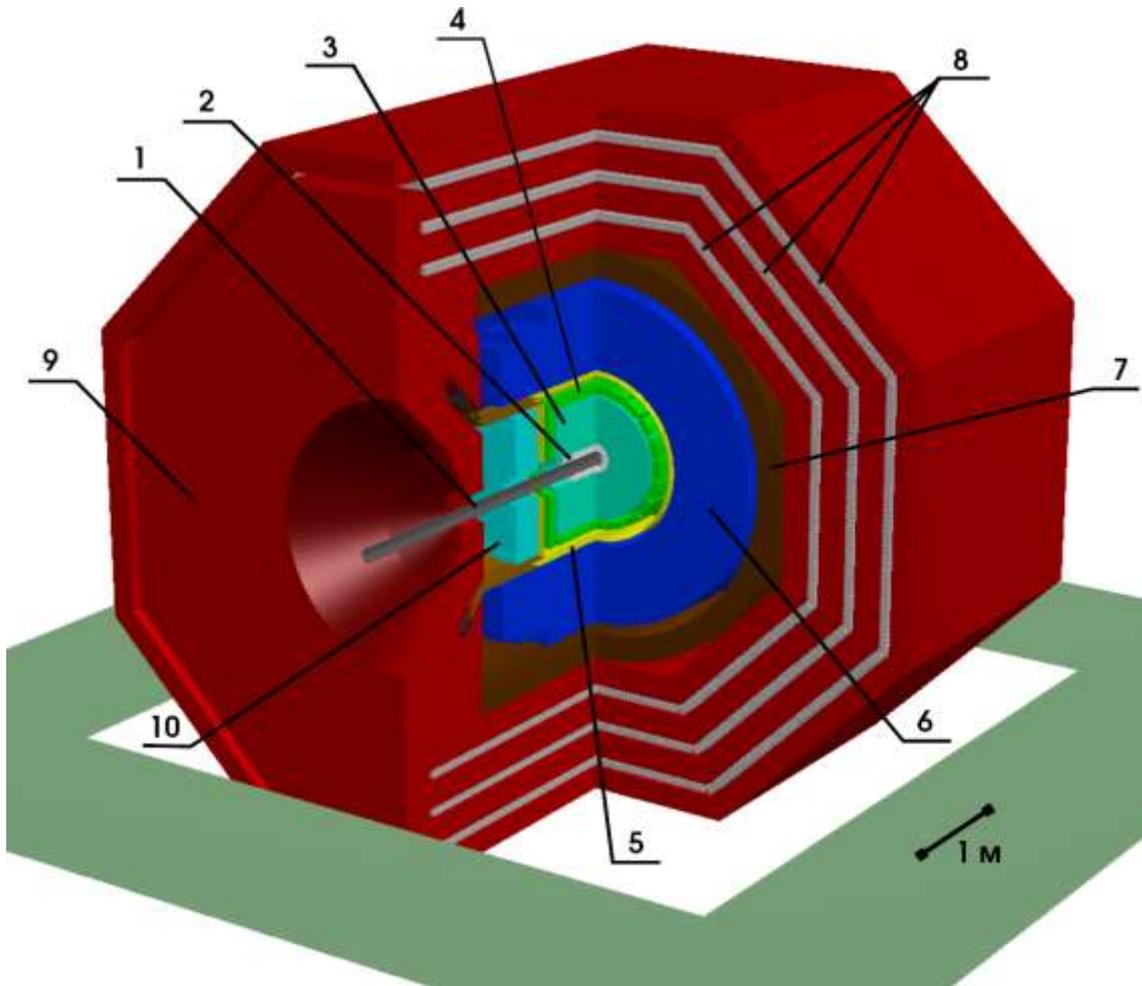


Phys.Lett. B723 (2016) 82-89

VEPP-4M Collider Complex



Detector KEDR



1. Vacuum chamber
2. Vertex detector
3. Drift chamber
4. Threshold aerogel counters
5. ToF counters
6. Liquid krypton calorimeter
7. Superconducting coil
8. Magnet yoke
9. Muon tubes
10. CsI calorimeter
11. Compensating s/c solenoid

- 2004-2011 $L = 21 \text{ nb}^{-1}$ was collected: study of Ψ - mesons, D-mesons, τ -lepton, R-measurements and etc.
- 2012-2013 –upgrade and reparation
- 2014-2018- next run

VEPP-4M and KEDR detector

❑ The luminosity of VEPP-4M is rather low than at B-factories

❑ But some advantages:

- Large energy region $2E=2\div 11 \text{ GeV}$
- Technology of high precision measurement of the beam energy (concentration on high precision particle mass measurement).
- Detector KEDR equipped by LKr calorimeter with high energy and space resolution.
- High resolution tagging system (two-photon physics).

❑ Physics at VEPP-4M & KEDR is concentrated on high precision measurements

• High precision measurements of particle masses:

J/ψ , $\psi(2S)$, $\psi(3S)$, D -mesons, τ -lepton, $Y(1S)$ $Y(2S)$ $Y(3S)$, $Y(4S)$

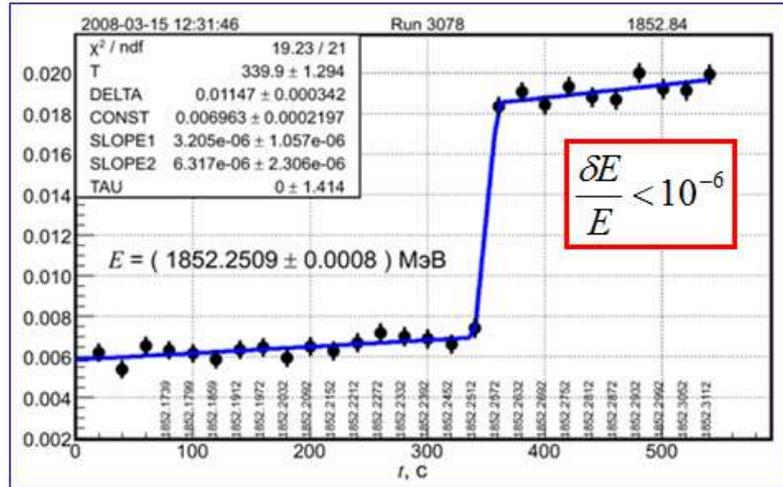
• Spectroscopy of cc and bb states

• The measurement of R in the energy region $2E=2-7 \text{ GeV}$

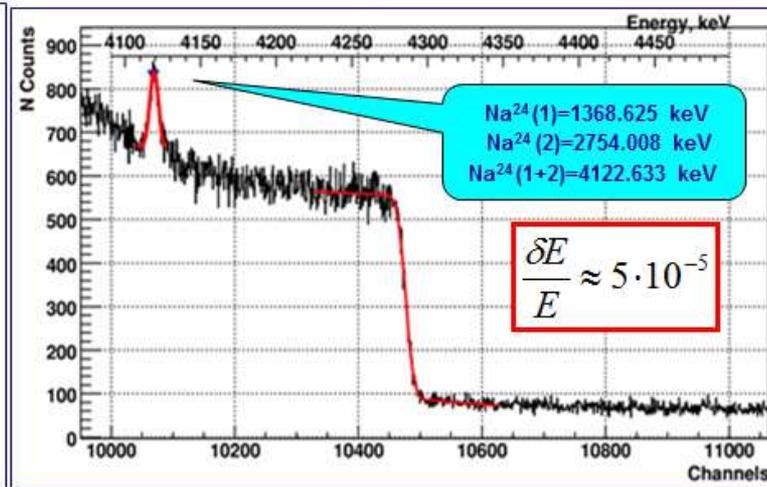
• Two photon physic: total cross section $\gamma\gamma\rightarrow\text{hadrons}$, study of C -even states

VEPP-4M energy calibration

Resonance depolarization



Compton backscattering



J/ψ, ψ(2S), ψ(3S), D-mesons, τ-lepton masses and some other parameters of these particles have been measured with best precision using these methods

Best known particle masses



Particle	$\Delta M/M$ (PDG)
p	$0.1 \cdot 10^{-6}$
n	$0.1 \cdot 10^{-6}$
e	$0.1 \cdot 10^{-6}$
μ	$0.1 \cdot 10^{-6}$
π^\pm	$2.5 \cdot 10^{-6}$
ψ'	$3.0 \cdot 10^{-6}$
J/ψ	$3.5 \cdot 10^{-6}$
π^0	$4.5 \cdot 10^{-6}$

Detector R&D at BINP

- **Cryogenic Avalanche Detector (Ar, Xe)- particle physics (dark matter, coherent neutrino detection....)**
- **MCP PMT- particle physics (PID, TOF)**
- **Aerogel counters - particle physics (PID)**
- **Crystal Calorimeters –particle physics +applications**
- **Detector for applications:**
 - synchrotron radiation detectors**
 - detectors for medicine**
 - detectors for security**

Теоретический отдел ИЯФ

Теоретики ИЯФ внесли значительный вклад в физику элементарных частиц: КЭД, СМ, КХД, ЯФ, Кварк-глюонная Плазма, Гравитация и Космология, Квантовая теория поля.....

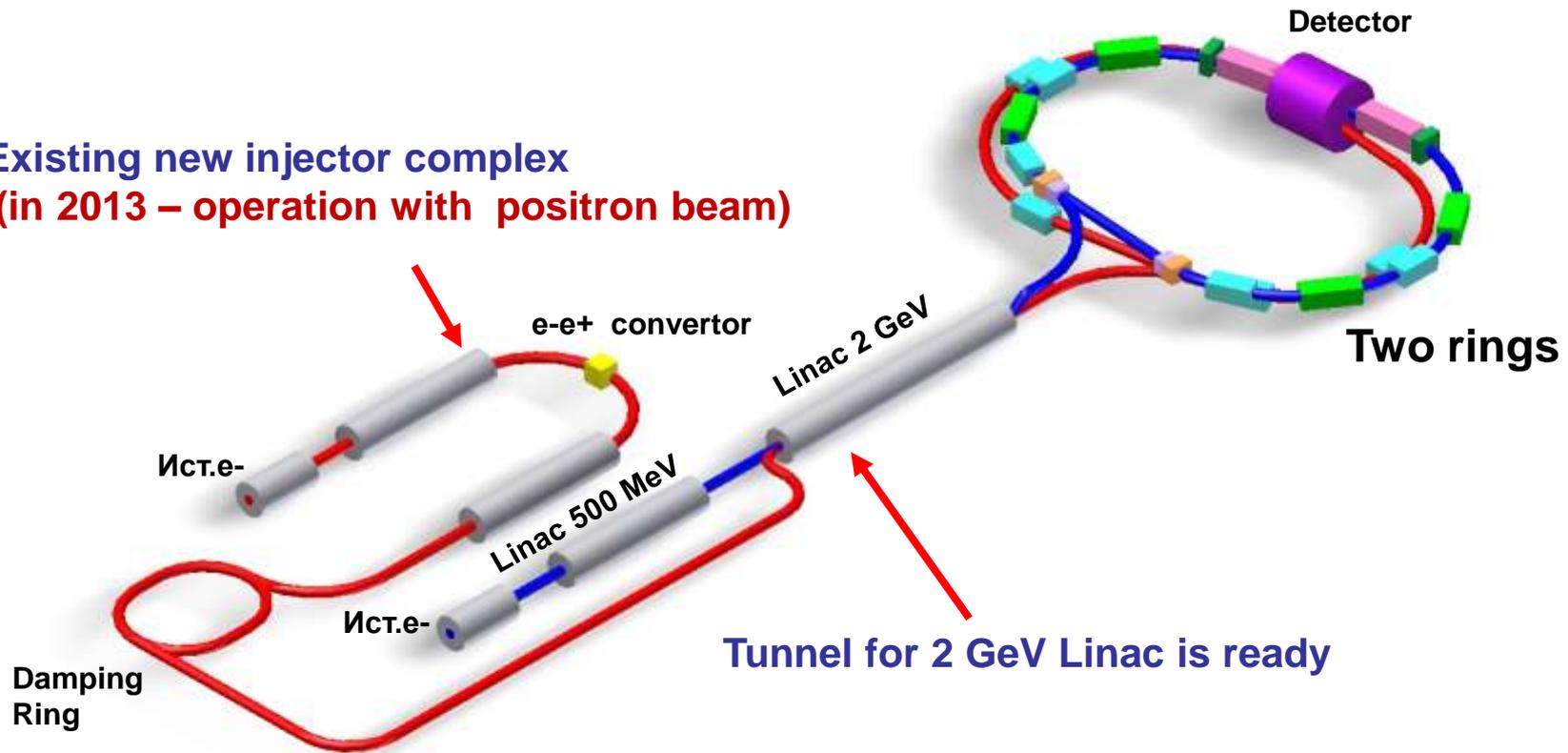
Без их интеллекта, отзывчивости и квалифицированной работы реализация экспериментальных программ в ИЯФ была бы невозможна!

Сейчас:

- Рассеяние поляризованных нуклонов и антинуклонов; рождение нуклон-антинуклонных пар и пионов вблизи порога реакции в $e+e^-$ аннигиляции и в распадах ψ, ψ' ... (Дмитриев, Сальников, Мильштейн).
- Рождение $e+e^-$ пар в столкновении релятивистских ядер (Ли, Мильштейн).
- Разработка аналитических методов вычисления вкладов высших порядков теории возмущений в процессах КЭД и КХД (Ли, Грозин).
- Разработка квазиклассического подхода к описанию процессов КЭД в сильных полях при высоких энергиях (Крачков, Ли, Мильштейн).
- Разработка методов описания процессов квантовой хромодинамики при высоких энергиях и малых углах вылетающих частиц (Грабовский, Козлов, Фадин).
- Исследование в области физики конденсированных сред (Ли, Терехов, Мильштейн).
- Исследование нелинейных процессов в каналах связи (Резниченко, Терехов).
- Гравитация и космология (Померанский, Руденко).
- Квантовый и классический хаос (Жиров).
- Квантовая теория поля (Черняк, Фадин).

Super Charm-Tau Factory

Existing new injector complex
(in 2013 – operation with positron beam)



- Two rings
- Crab waist
- $L = 1 \times 10^{35} \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$,
- Variable energy $E_{\text{cm}} = 2 - 5 \text{ GeV}$
- Longitudinal polarization

Электрон-позитронный коллайдер Супер С-Тау фабрика: научная значимость, задачи и преимущества проекта

- Подход «пределной энергии» (LHC) пока не позволил найти явления, не описываемые Стандартной Моделью
- Подход «пределной точности» становится все более актуальным: получены яркие результаты в экспериментах на фабриках тяжелых кварков, в эксперименте LHCb@LHC

Стратегические задачи Супер С-Тау фабрики

- Измерения в области непертурбативной КХД
 - Формфакторы и распадные константы
 - Спектроскопия адронов
 - Динамика многочастичных распадов
- Изучение слабого взаимодействия кварков первого и второго поколений и лептонов
- Поиск “ Новой физики”

Преимущества Супер С-Тау фабрики

- Пороговое рождение пар τ лептонов и очарованных адронов
- Продольная поляризация электронов в месте встречи
 - CP нарушение в распадах очарованных барионов и τ лептонов
- Когерентное рождение пар $D^0\bar{D}^0$ мезонов
 - Измерение фаз амплитуд распадов
- Метод двойного мечения
- Измерение абсолютных величин вероятностей редких распадов

Super C/tau Factory at Novosibirsk

(physics)

- ▶ D-Dbar mixing
- ▶ CP violation searches in charm decays
- ▶ Rare and forbidden charm decays
- ▶ Standard Model tests in τ leptons decays
- ▶ Searches for lepton flavor violation $\tau \rightarrow \mu \gamma$
- ▶ CP/T violation searches in τ leptons decays

Requirements: $L > 10^{35} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$, longitudinal polarization, General Purpose with perfect PID

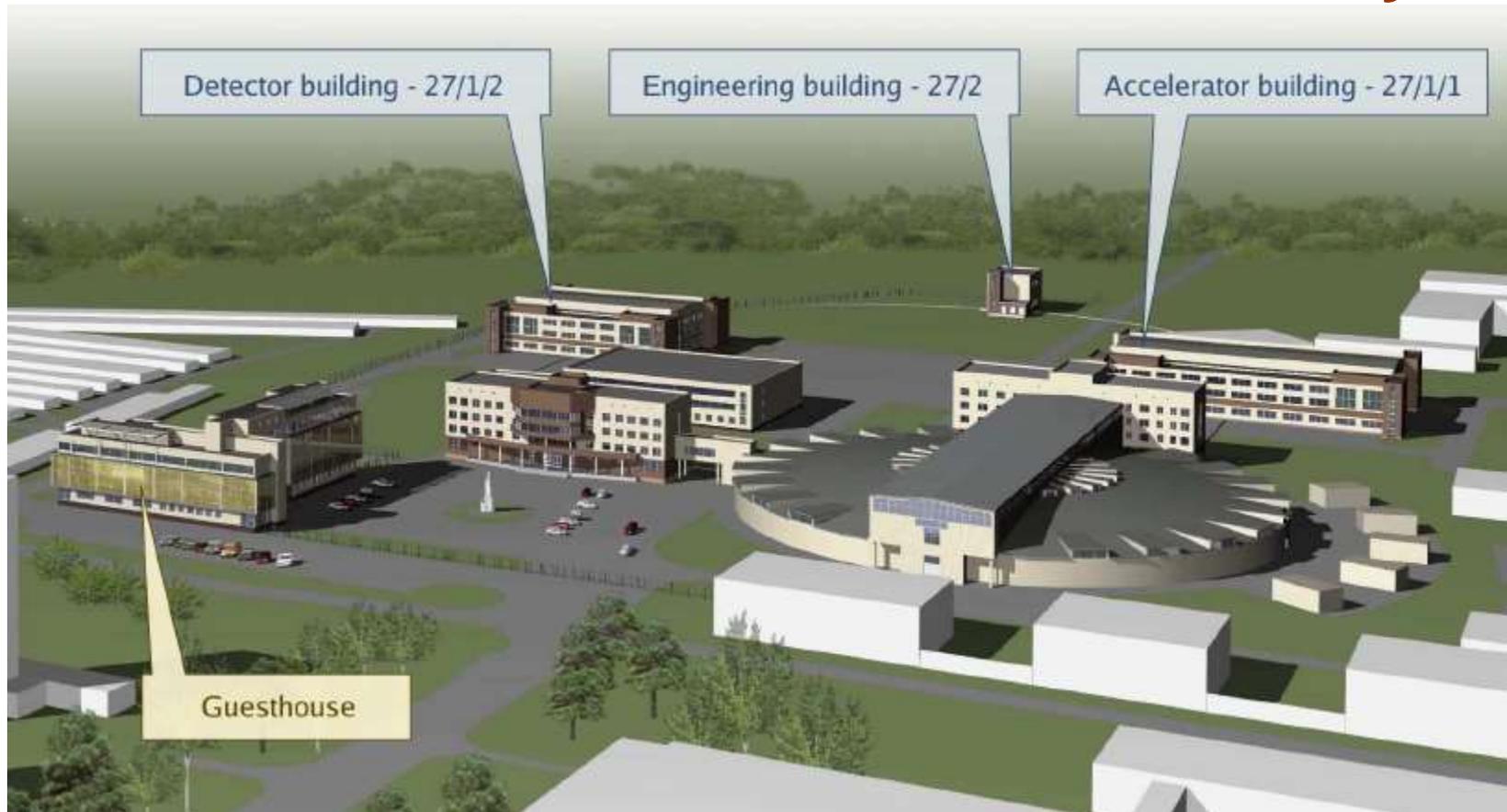
Polarization at Super C-tau Factory

If even one beam polarized, τ almost 100% longitudinally polarized near the threshold

- Michel parameters
- CP-violation in τ -decays

Polarization may increase sensitivity by several times!

Artistic view of future Charm-tau factory



- Accelerator Complex 207 MEuro
- Detector 91 MEuro
- Buildings infrastructure – 100 MEuro
- BINP has already invested **37 MEuro** in the capital construction and injection complex

Электрон-позитронный коллайдер Супер С-Тау фабрика: текущий статус реализации проекта

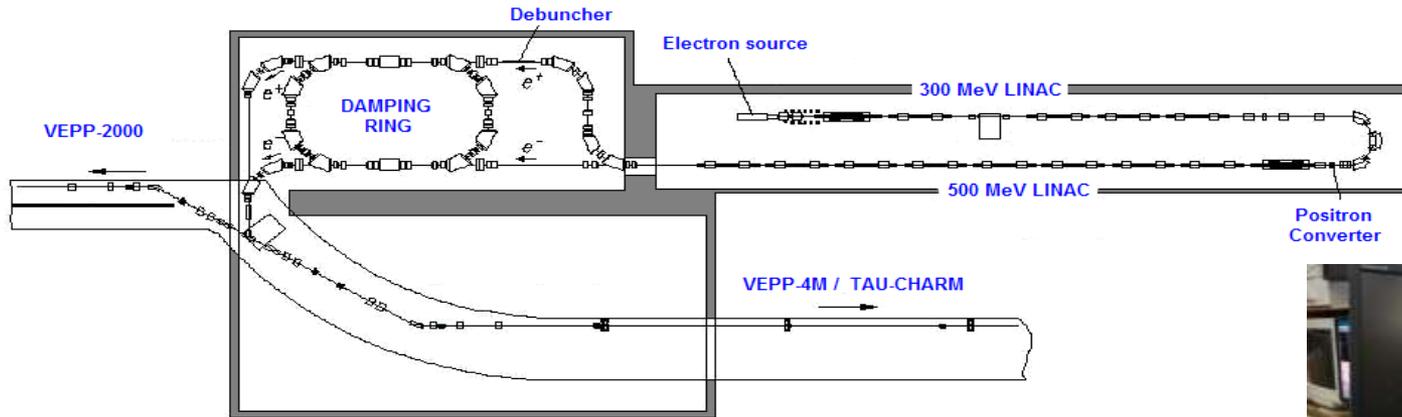
- Проект базируется на успешном 60-летнем опыте ИЯФ СО РАН как одной из ведущих ускорительных лабораторий мира – единственной, в которой всегда работал хотя бы один коллайдер.
- Проект одобрен Европейским комитетом по будущим ускорителям (ECFA), получил высокие оценки двух независимых международных экспертиз, ряда авторитетных ученых, включая бывших руководителей крупнейших лабораторий мира – А.Сузуки и Р.Хойера, нобелевского лауреата М.Перла.
- Завершается актуализация концептуального проекта Супер С-Тау фабрики (физическая программа, ускорительный комплекс, детектор, информационная инфраструктура, инженерия...).
- В активной стадии разработка ключевых элементов ускорительного комплекса и детектора.
- Продолжается формирование и развитие национального и международного сотрудничества по реализации проекта, подготовка к созданию международной коллаборации и других органов



*В июне 2017 года
проект Супер С-Тау фабрики
включен в План реализации
Стратегии
научно-технологического
развития Российской Федерации*

New injection complex

(now is using for VEPP-2000, VEPP-4M and will be used Super Charm-Tau)



$E = 500 \text{ MeV}, N_{\text{max}} = 10^{11} \text{ e}^{\pm}/\text{s}$

**First positron beam -
March 2013**



500 MeV Linac



Damping ring



Transfer line

Budker INP collaborations

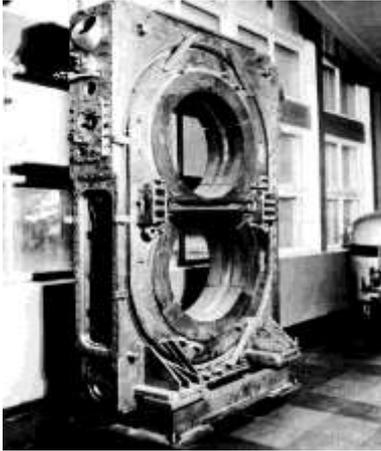
- CERN: **ATLAS , CMS, LHCb**
- KEK: **BELLE, BELLE-2,**
- JPARC: **Comet, g-2/EDM**
- SLAC: **BaBar**
- PSI: **MEG**
- FAIR: **PANDA, CBM**
- BNL/FNAL: **g-2**
- IHEP (Beijing):**BES-III**
- DUBNA: **NICA**
- GRAN SASO: **Dark Side**
- BAIKAL: **TAIGA**
- **FCC, ILC.....**

Conclusion

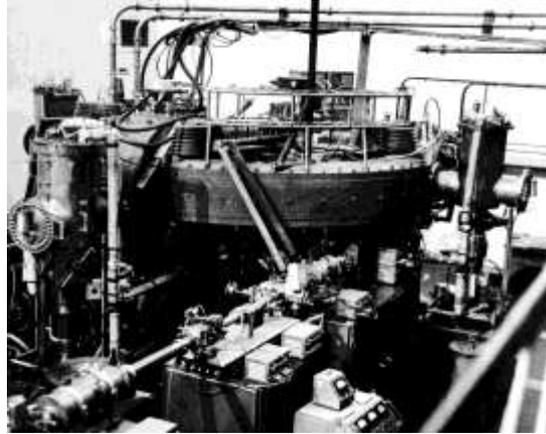
- A few generations of colliders and detectors successfully operated at Budker INP with world-wide recognized contributions to particle physics
- VEPP-4M and VEPP-2000 with 3 detectors are in operation at present → interesting physics in the coming years
- Budker INP successfully collaborates in many outstanding experiments outside
- Super Tau-Charm Factory is the future!

From VEP-1 to Tau-charm factory!

VEP-1



VEPP-2



VEPP-3



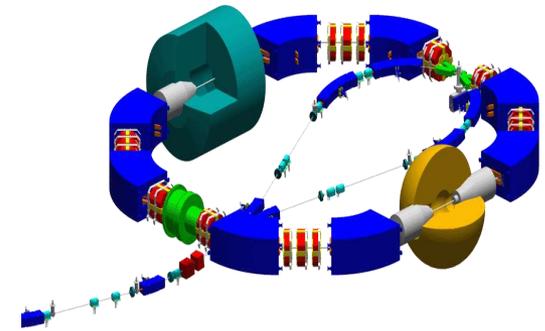
VEPP-4M



VEPP-4



VEPP-2000



Tau-charm

