

# Эксперименты на установке ДЕЙТРОН

*Ю.В. Шестаков  
от команды Дейтрон, лаб. 2*

Научная сессия ИЯФ, 26.02.2026

- В ИЯФ экспериментальное изучение Электро- и Фото- ядерных процессов базируется на использовании **Метода Сверхтонкой Внутренней Мишени** в накопителе.

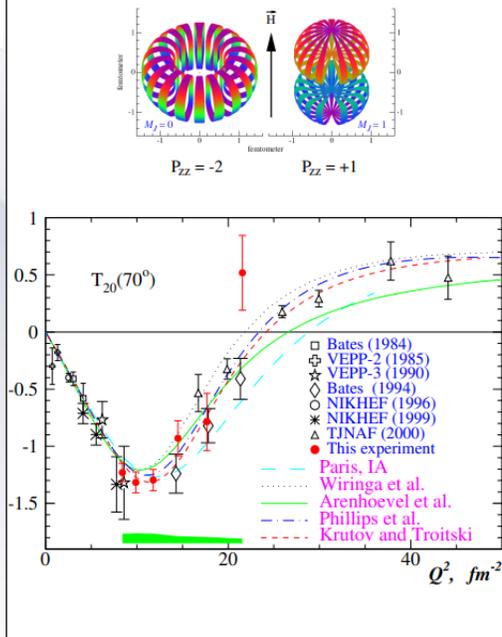
- Метод предложен (60-е годы) и развит в ИЯФ.

- Позволяет проводить уникальные эксперименты **с экзотическими мишенями** и/или **с уникальными пучками**.

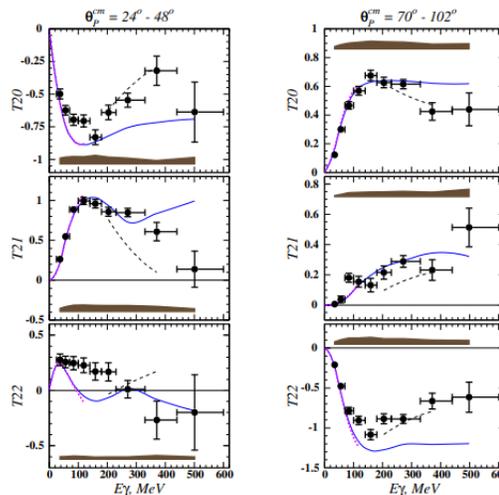


**С.Г. Попов**, Внутренние мишени  
в накопителях заряженных частиц,  
Ядерная Физика, 63 (1999) 291

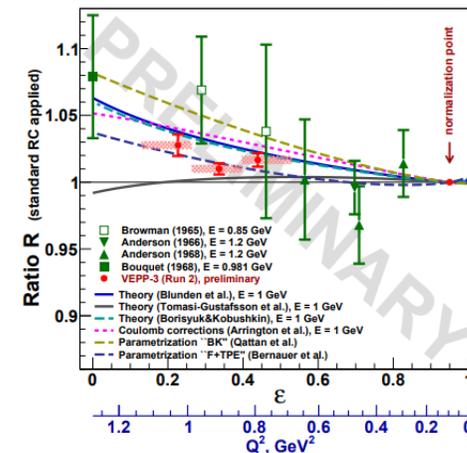
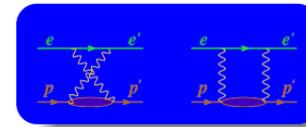
упругие форм-факторы дейтрона



Фотодезинтеграция



$2\gamma$  вклад в упругое ер-рассеяние



**В экспериментах участвуют > 40 человек. В том числе и иностранные коллеги.**

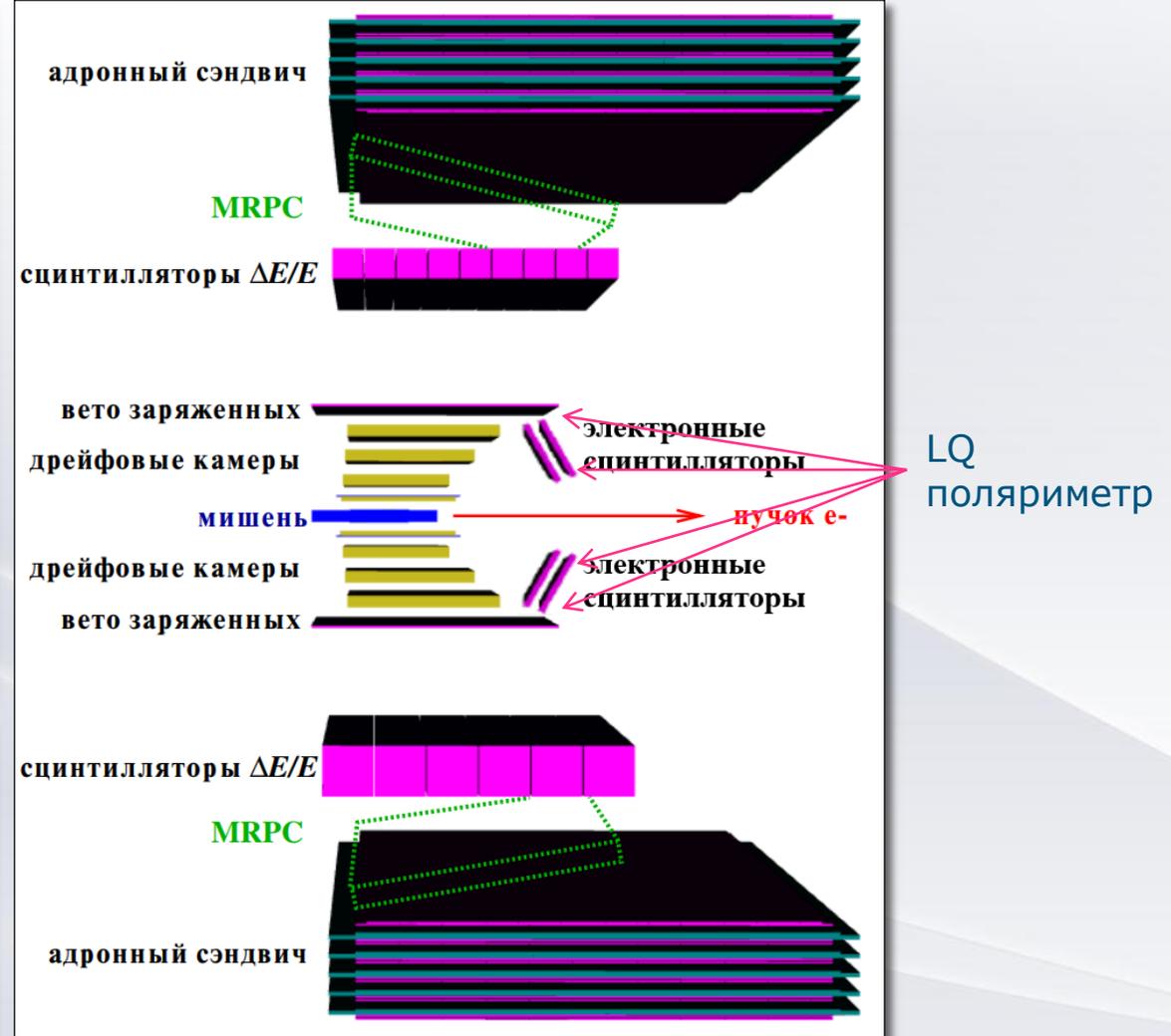
## состав каждого плеча

- 1 трековая система: многопроволочные пропорциональные и дрейфовые камеры;
- 2 слой сцинтилляторов для разделения заряженных/нейтральных частиц и для  $\Delta E/E$ -анализа;
- 3 адронный калориметр-сэндвич (железо+сцинтиллятор), сегментированный по X,Z  $\rightarrow$  для эффективной регистрации нейтронов большой энергии
- 4 MRPC – многозазорная камера с резистивными плоскостями для TOF

Поляризованные атомы инжектируются в накопительную ячейку, через которую проходит электронный пучок. Ячейка находится в магнитном поле, направление которого совпадает с направлением движения  $e^-$ .

Дифференциальное сечение имеет вид:

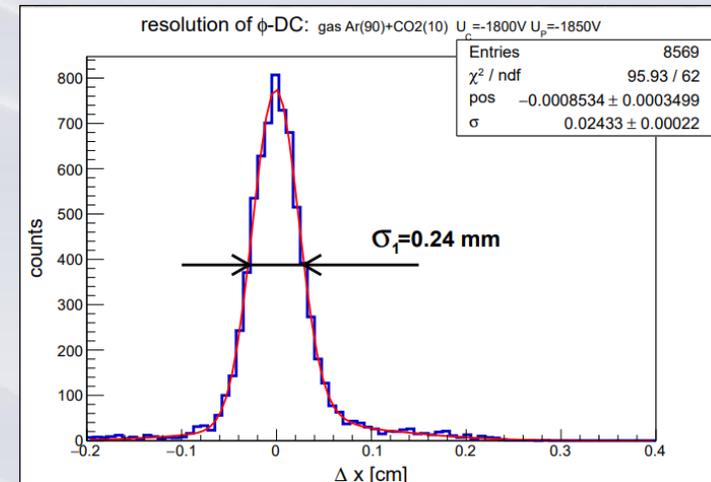
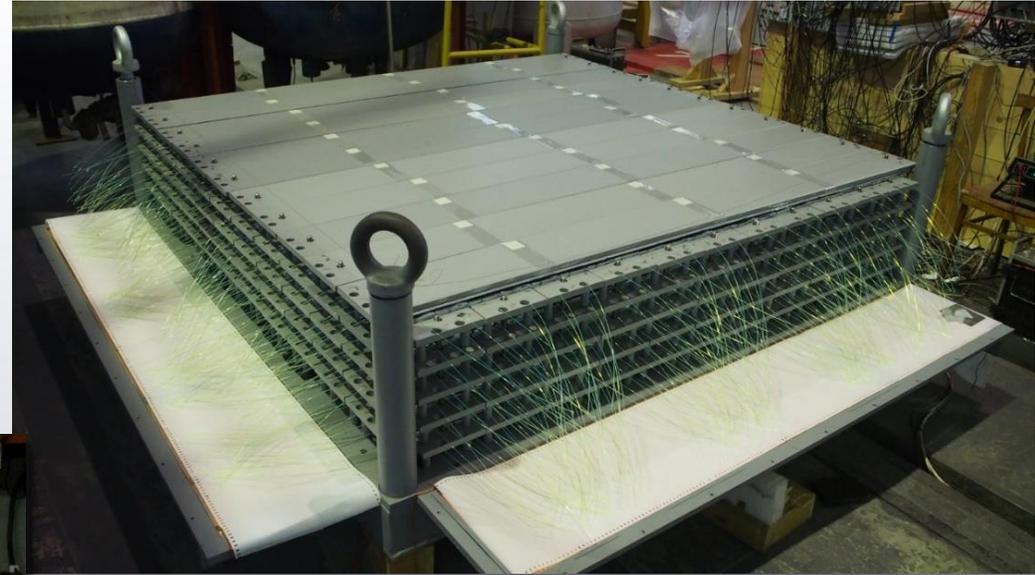
$$\frac{d\sigma}{d\Omega} = \frac{d\sigma_0}{d\Omega} \left\{ 1 + \frac{1}{\sqrt{2}} P_{zz} T_{20} \right\}$$



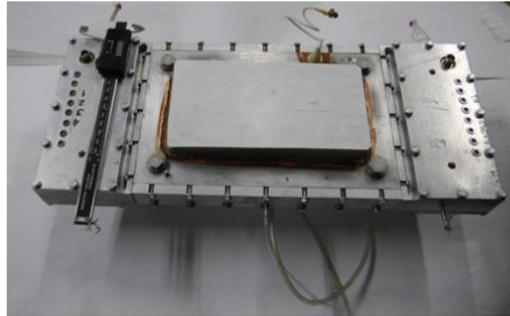
Подробное описание дано на экспериментальном семинаре ИЯФ: <https://disk.yandex.ru/d/oJ283ouAVItODg>

# Детектор

- 10 периодов, период = (16мм железо + 7мм X-стрип + 7мм Z-стрип)
- Размер стрипа 1760x80x7мм
- Свет от колонны из 10 стрипов собирается на 2 SiPM.
- В плече калориметра 22 колонны по Z и 22 колонны по X.



# Создание MRPC (многоззорная камера с резистивными плоскостями)

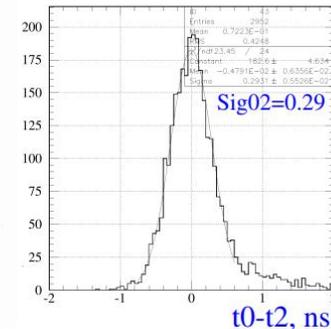
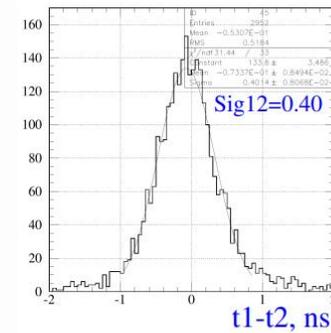


Прототип MRPC (PM) на основе гетинаксовых пластин толщиной 0.3 мм. Активная область PM 100x200 мм. Содержит 2 группы по 4 зазора в каждой, ширина зазора 0.25 мм.

При испытании на космических частицах прототип продемонстрировал устойчивую работу с эффективностью выше 90%. Временное разрешение прототипа было измерено с помощью двух сцинтилляционных счётчиков. Космические частицы проходили через два сцинтиллятора и прототип MRPC. Временное разрешение прототипа ( $\sigma_0$ ) определялось по следующей формуле:

$$\sigma_0^2 = \frac{\sigma_{01}^2 + \sigma_{02}^2 - \sigma_{12}^2}{2},$$

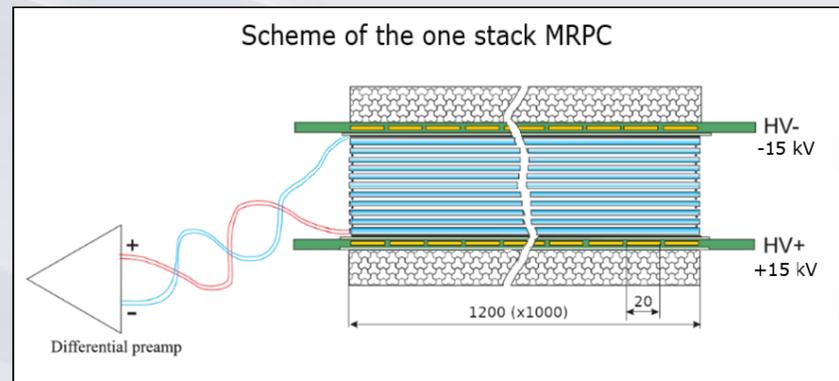
где  $\sigma_{01}^2$  ( $\sigma_{02}^2$ ) – дисперсия разности времён срабатывания прототипа и первого (второго) сцинтиллятора,  $\sigma_{12}^2$  – дисперсия разности времён срабатывания двух сцинтилляторов. Измерения показали, что временное разрешение прототипа MRPC составляет около 100 пс.

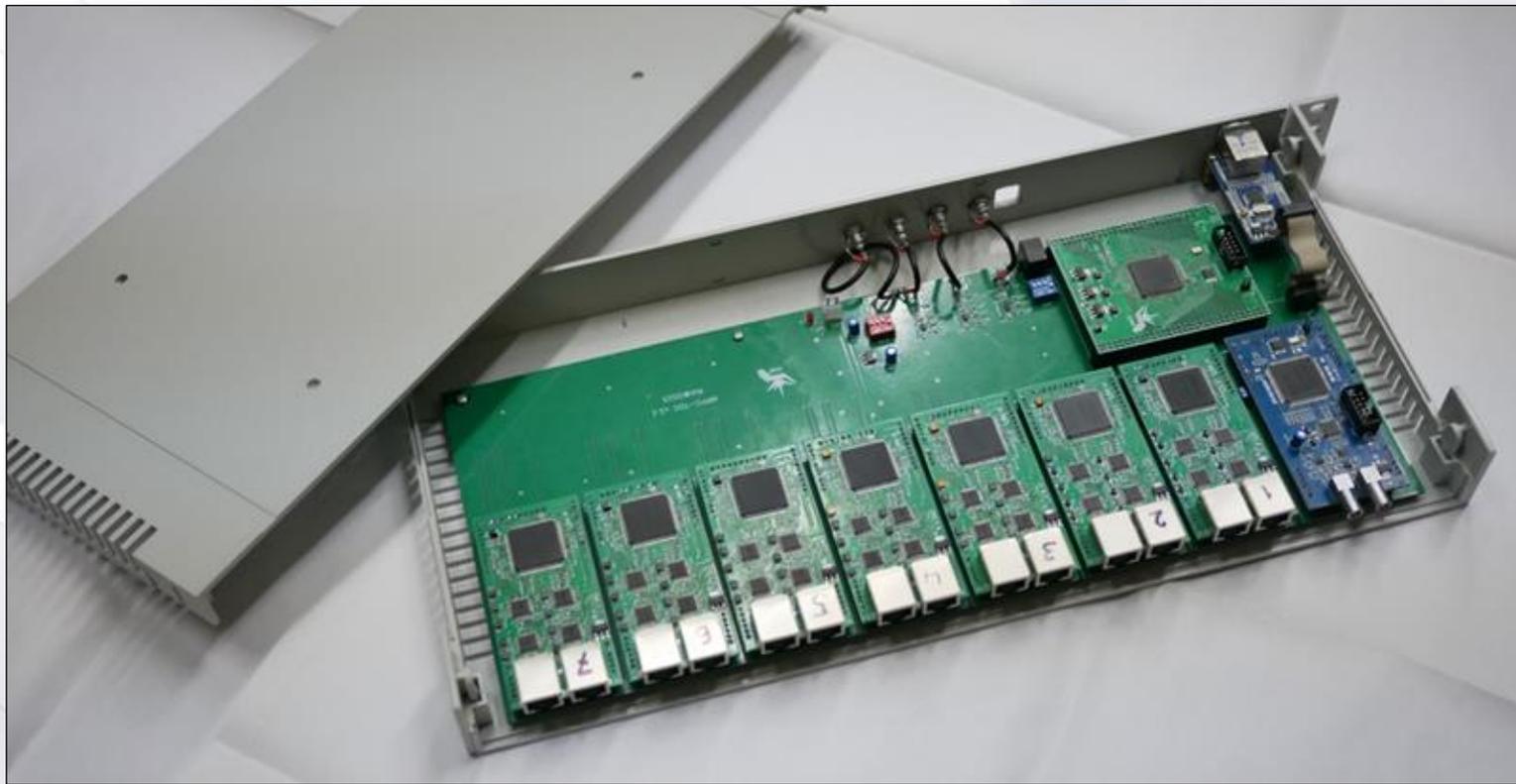


Две рабочие MRPC будут иметь активную область 100x120см<sup>2</sup>. Каждая содержит 1 стек с 10-ю зазорами, как показано на рисунке справа.

Заказ на изготовление деталей двух MRPC был отправлен в мастерские ИЯФ полтора года назад. Из-за загруженности последних заказ пока не выполнен.

Было решено сделать MRPC с меньшими размерами (30x35см<sup>2</sup>), производя детали на экспресс участке ИЯФ.





Завершена разработка аппаратуры высокоточного измерения времени для времяпролетных детекторов. На рис. показан первый экземпляр блока ВЦП. 30-канальный блок создан по модульному принципу и позволяет выполнять многохитовое измерение времени и длительности импульсов с шагом 5 пс и разрешением до 15 пс с частотой следования до 4 МГц. Для оцифровки планируемого числа каналов двух плеч MRPC требуется 8 таких блоков. В настоящее время идет их производство.

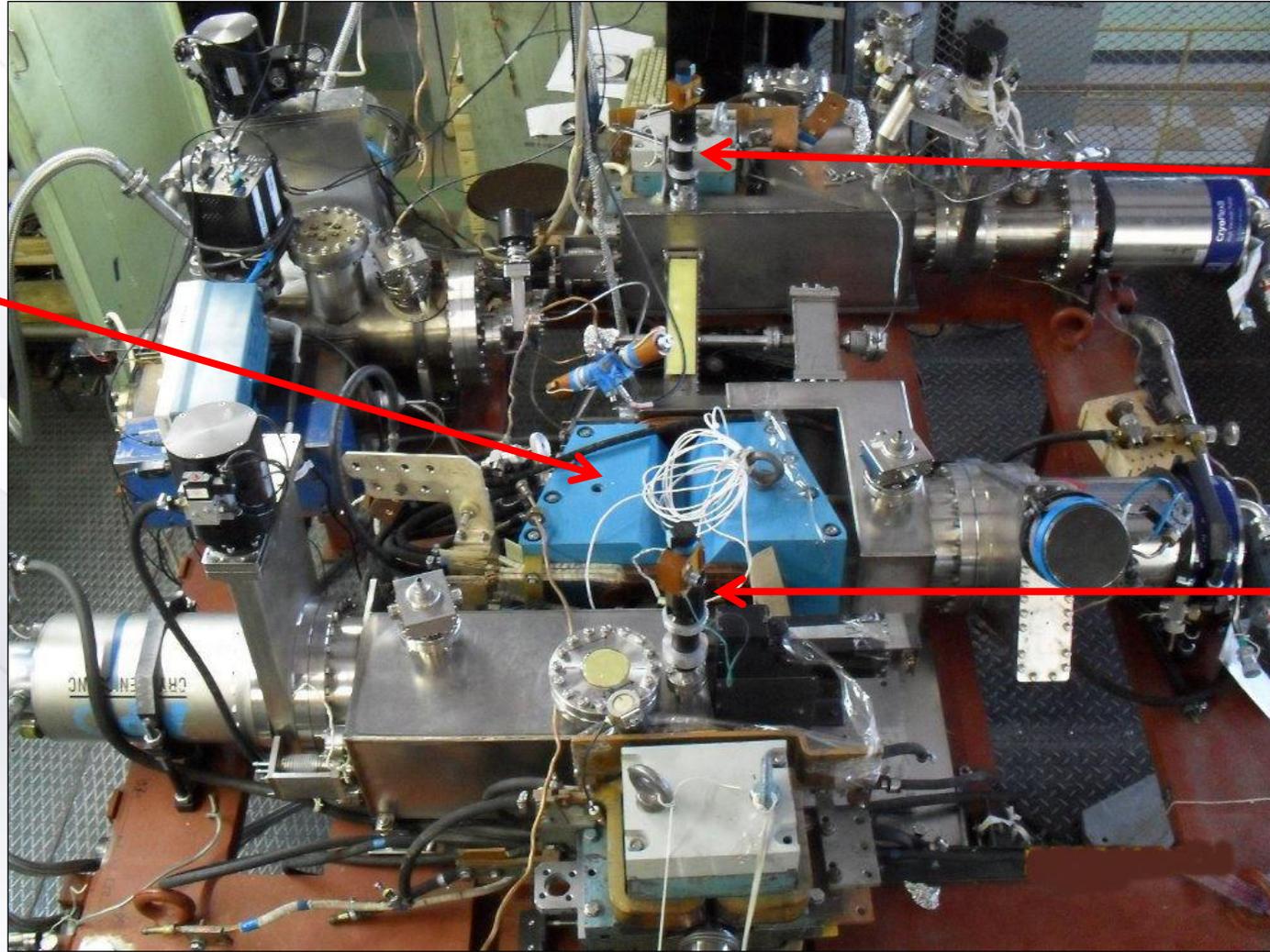
## Тестовый заход на ВЭПП-3 в 2025 г.

Осенью 2025 г. был проведен тестовый заход на ВЭПП-3 при энергии электронов 1200 МэВ. Цель захода – выбор оптимального режима работы ВЭПП-3 с установленной на экспериментальном промежутке системой мечения фотонов. В данном режиме работы величина фоновых событий должна быть минимальной, а время жизни электронного пучка – максимальным. Для снижения фона были установлены подвижные ограничители апертуры электронного пучка (пробники).



# Установка пробников на экспериментальный промежуток

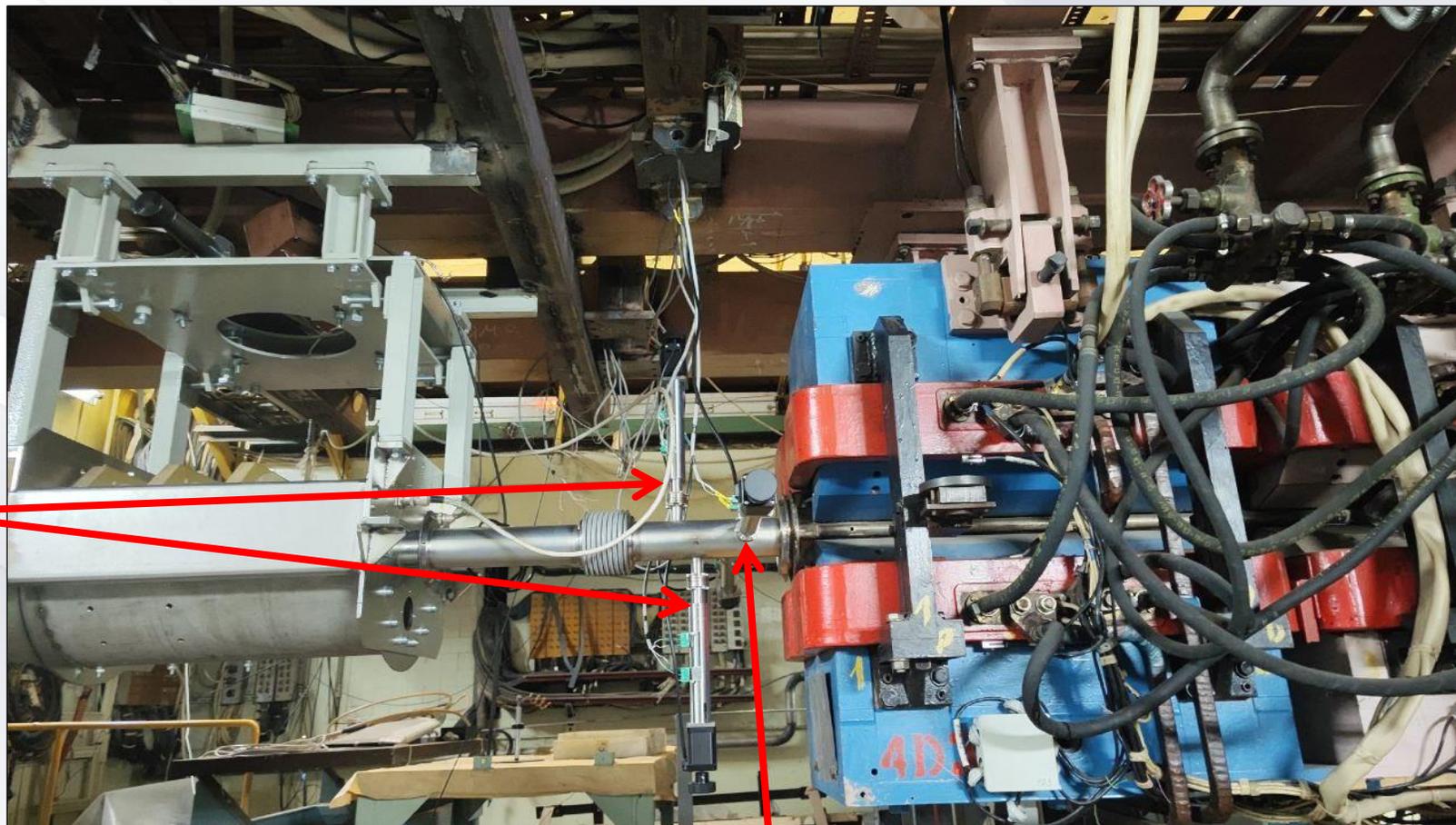
Магнит D2



Z-пробник

Z-пробник

## Установка пробников на 4-й линейный промежуток ВЭПП-3

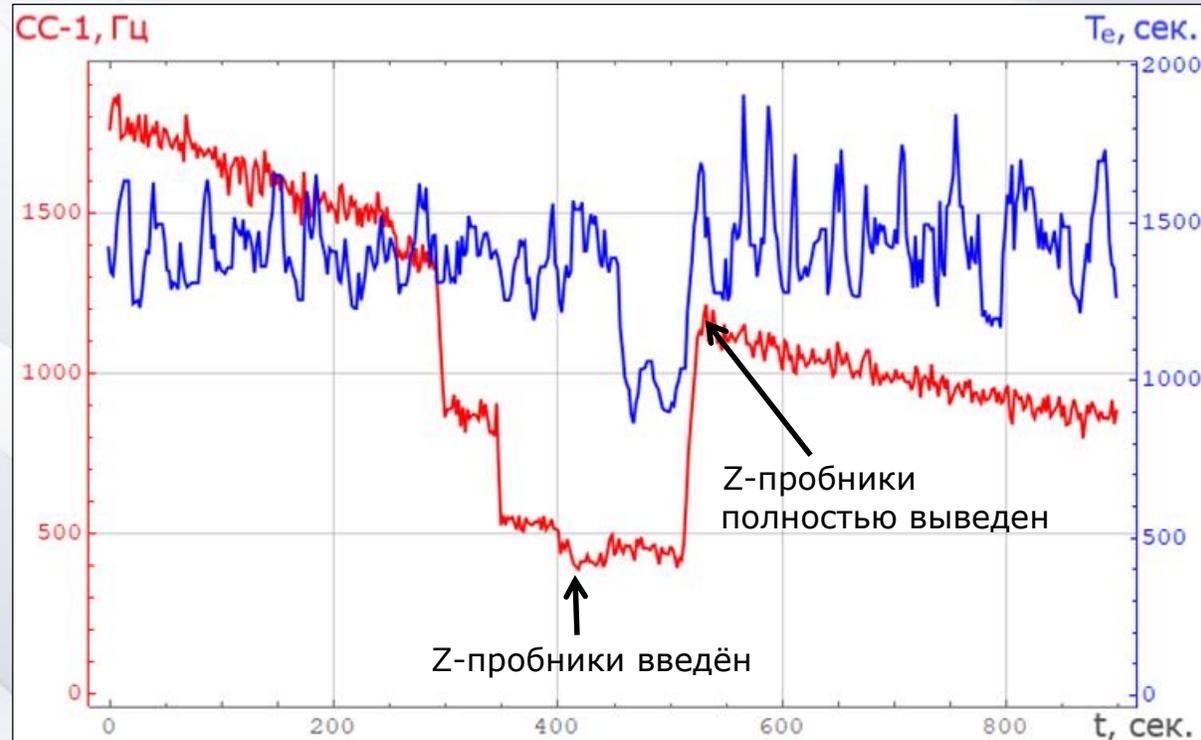


Z-пробники

R-пробники

## Тестовый заход на ВЭПП-3 в 2025 г.

В заходе LQ поляриметр регистрировал в основном события пучкового фона. Ниже представлен результат измерения скорости счета событий LQ поляриметра во время ввода одного из ограничителей апертуры электронного пучка ВЭПП-3. Данный ограничитель был установлен вблизи одного из резонаторов накопительного кольца ВЭПП-3, ближайшего к экспериментальному промежутку Дейтрон.

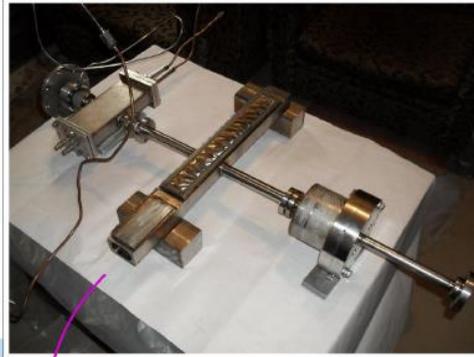


Изменение скорости счета событий LQ поляриметра при введении ограничителя апертуры электронного пучка (красная кривая). Синяя кривая – время жизни электронного пучка в накопителе ВЭПП-3. Электронный ток  $\sim I_e = 5\text{мА}$

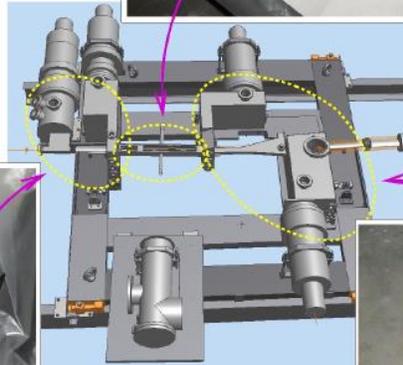
## Тестовый заход на ВЭПП-3 в 2025 г.

Было установлено, что узким местом, ограничивающим свободное прохождение электронного пучка, является входной участок вакуумной камеры экспериментального промежутка. Гало электронного сгустка касается стенок вакуумной камеры, что приводит к увеличению фоновых загрузок детекторов.

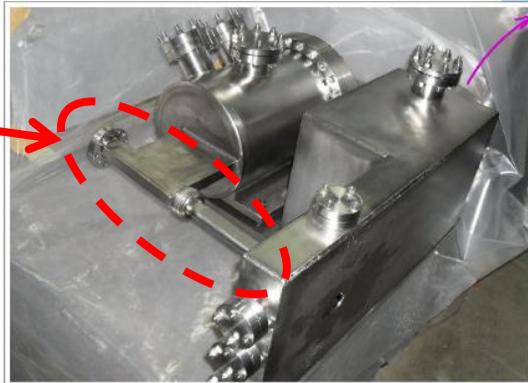
центральный участок  
с мишенью



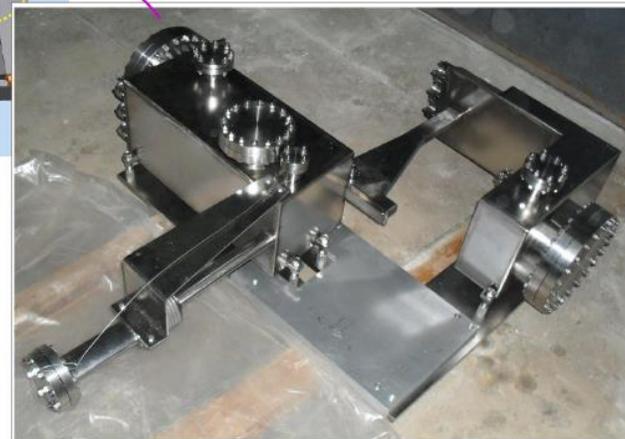
выходной участок



Надо переделать  
эту часть камеры



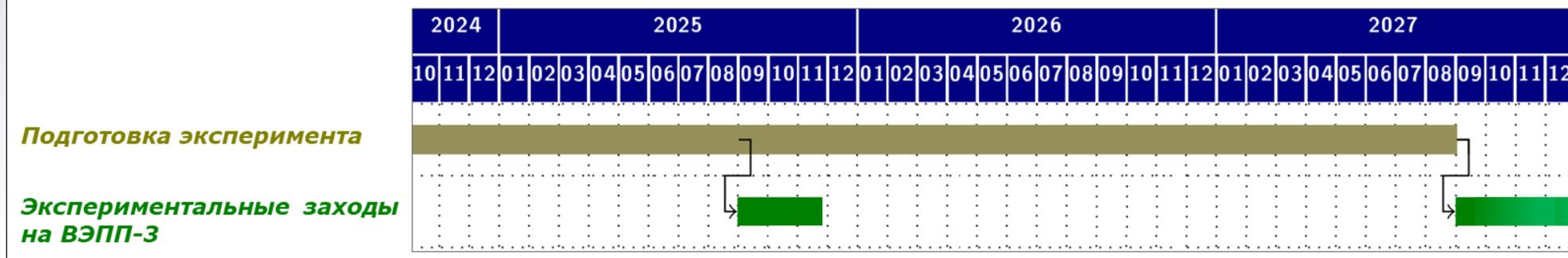
входной участок



## Ближайшие планы :: Подготовка и проведение следующего этапа эксперимента

| Stage:   | ①          | ②          | ③           |
|--|------------|------------|-------------|
| electron energy [MeV]                                  | 800        | 1250       | 2000        |
| $E_\gamma$ [MeV]                                       | 400 ÷ 640  | 620 ÷ 1000 | 1000 ÷ 1600 |
| $\frac{d\sigma_\gamma d}{d\Omega}(90^\circ)$ , [nb/sr] | 2030 ÷ 405 | 450 ÷ 44   | 44 ÷ 3.2    |
| L integral [ $\text{pb}^{-1}$ ]                        | 28         | 63         | 120         |
| detection efficiency for $n$ [%]                       | 35 ÷ 42    | 46 ÷ 60    | 63 ÷ 72     |
| detection efficiency for $p$ [%]                       | 80         | 70         | 80          |
| background events [%]                                  | 1 ÷ 4      | 5 ÷ 15     | 8 ÷ 10      |
| run time   | 2 months   | 4 months   | 8 months    |

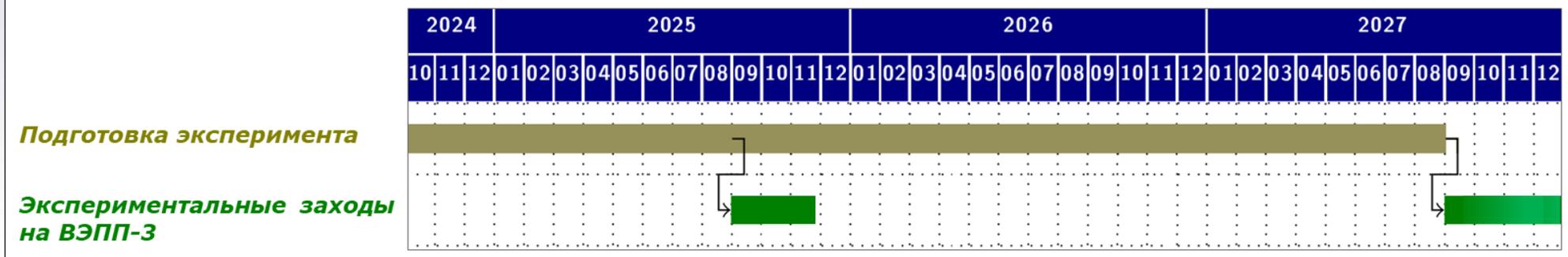
### Временной план-график до 2028 года



## Ближайшие планы :: Подготовка и проведение следующего этапа эксперимента

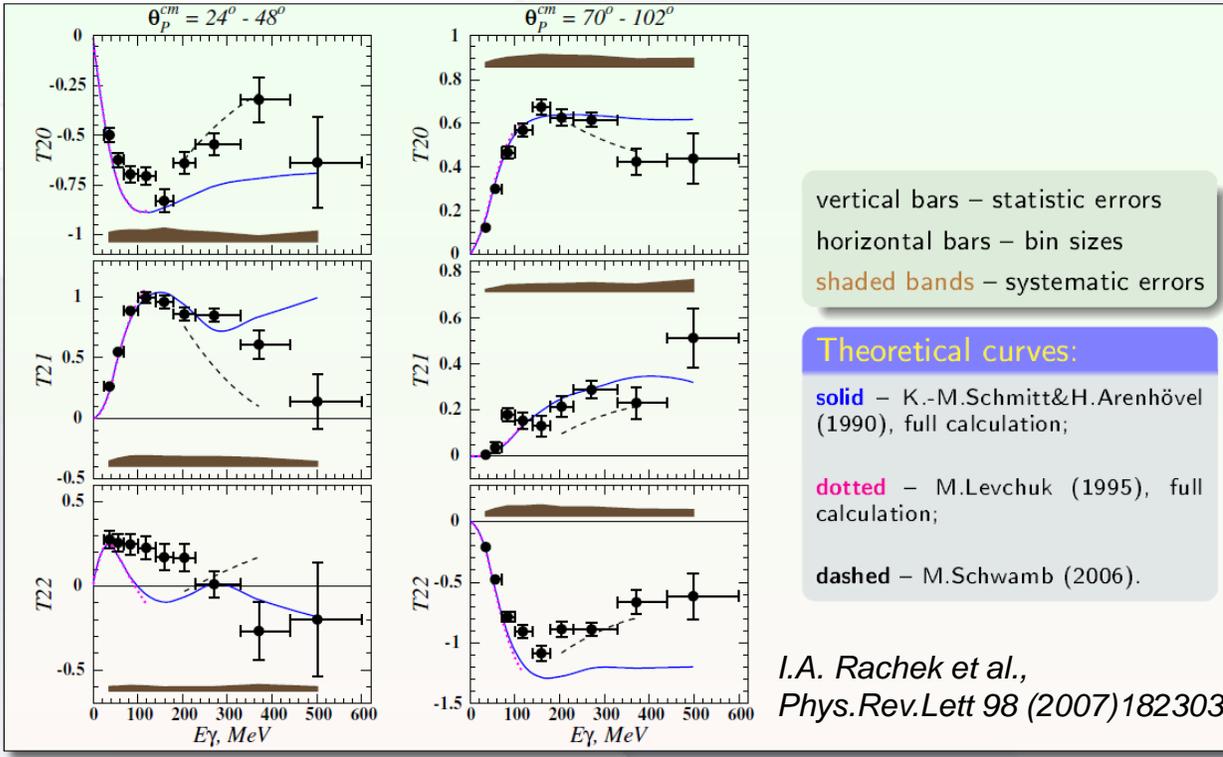
| Stage:   | ①          | ②          | ③           |
|--|------------|------------|-------------|
| electron energy [MeV]                                  | 800        | 1250       | 2000        |
| $E_\gamma$ [MeV]                                       | 400 ÷ 640  | 620 ÷ 1000 | 1000 ÷ 1600 |
| $\frac{d\sigma_\gamma d}{d\Omega}(90^\circ)$ , [nb/sr] | 2030 ÷ 405 | 450 ÷ 44   | 44 ÷ 3.2    |
| L integral [ $\text{pb}^{-1}$ ]                        | 28         | 63         | 120         |
| detection efficiency for $n$ [%]                       | 35 ÷ 42    | 46 ÷ 60    | 63 ÷ 72     |
| detection efficiency for $p$ [%]                       | 80         | 70         | 80          |
| background events [%]                                  | 1 ÷ 4      | 5 ÷ 15     | 8 ÷ 10      |
| run time   | 2 months   | 4 months   | 8 months    |

### Временной план-график до 2028 года



# Ближайшие планы :: Измерение $T_{21}$ и $T_{22}$ , эксперименты с двойной поляризацией

Помимо  $T_{20}$ , можно измерить и другие компоненты тензорной анализирующей способности  $T_{21}$ , и  $T_{22}$ .

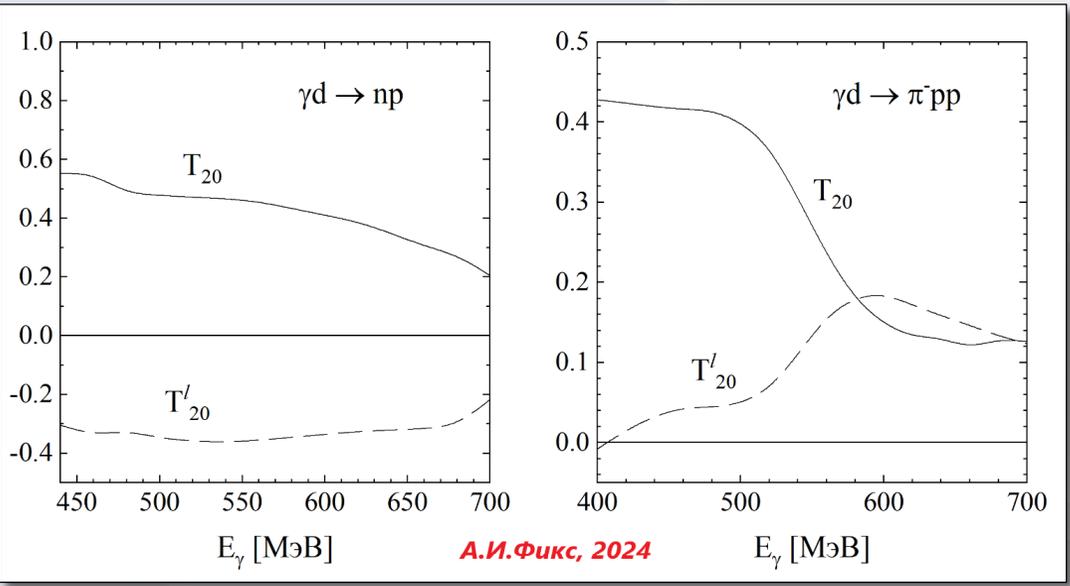


Чем больше поляризационных наблюдаемых мы измерим, тем более детально проверим теоретические модели.

Если фотон поляризован, то в сечении появляются дополнительные слагаемые с произведением двух поляризаций на корреляционные функции:

$$\frac{d\sigma}{d\Omega} = \frac{d\sigma_0}{d\Omega} \left\{ 1 + \dots + \frac{1}{2\sqrt{2}} P_{\gamma}^{\parallel} P_{ZZ} \cos 2\varphi_{\gamma} T_{20}^{\parallel} + \dots \right\}$$

Появилась возможность измерять поляризационные наблюдаемые, которые никто никогда не измерял.



### Доклады на конференциях

1. *А.В.Фикс*. Устный доклад: “Когерентное фоторождение  $\pi^0\pi^0$  на дейтроне в области энергий возбуждения дибариона  $d^*(2380)$ ”. Сессия-конференция секции ядерной физики ОФН РАН, посвященная 70-летию В.А. Рубакова, г. Москва, 17-21 февраля 2025 г.
2. *В.В.Гауштейн*. Устный доклад: “Pion photoproduction on a deuteron at the VEPP-3 electron beam”. Сессия-конференция секции ядерной физики ОФН РАН, посвященная 70-летию В.А. Рубакова, г. Москва, 17-21 февраля 2025 г.
3. *Ю.В.Шестаков*. Устный доклад: “Создание спинового интерферометра на базе криогенного источника поляризованных изотопов водорода”. LXXV Международная конференция «ЯДРО-2025», г. Санкт-Петербург, 1-6 июля 2025 г.
4. *Д.К.Топорков*. Устный доклад: “Status of experiments with polarized deuteron target at VEPP-3 electron storage ring”. The 26th International Symposium on Spin Physics (SPIN2025) in Qingdao, Shandong, China, 22-26 сентября, 2025.
5. *Д.К.Топорков*. Приглашённый доклад: “Кластерная внутренняя мишень для поляриметрии на NICA”. Семинар-совещание «Поляриметрия на ускорительном комплексе Nuclotron/NICA», г. Дубна, 12 октября 2025 г.
6. *Д.К.Топорков*. Удалённый доклад: “The storage cell with an absolute polarimeter”. Workshop LHCspin, Ferrara, Italy, 20–21 ноября 2025г.

### Список опубликованных статей

1. V.V.Gauzshtein, et al., Measurement of the tensor analyzing power  $T_{20}$  for the incoherent  $\pi^-$  meson photoproduction on a deuteron above the first resonance region. Phys. Lett. B 860 (2025) 139166.
2. Yu.M.Cherepennikov, et al., Pion photoproduction on a deuteron at the VEPP-3 electron beam. Nuclear Inst. and Method in Physics Research, A 1074 (2025) 170316.
3. A.Fix, Photodisintegration and coherent  $\pi^0\pi^0$  photoproduction on the deuteron in the  $d^*(2380)$  region. Physics of Atomic Nuclei, v.88 no.6 p.27 (2025).

[physics.ins-det] 15 Jan 2026

### The BigBite Calorimeter for the Super Bigbite Spectrometer Program at Jefferson Lab

P. Datta<sup>a,b,\*</sup>, K.T. Evans<sup>c</sup>, J. Bane<sup>d</sup>, H. Bhatt<sup>e</sup>, B. Devkota<sup>c</sup>, E. Fuchey<sup>a,c</sup>, T. Hague<sup>f</sup>, D.W. Higinbotham<sup>f</sup>, A. Hoebel<sup>l</sup>, M.K. Jones<sup>f</sup>, A. Karki<sup>c</sup>, M. Kubantsev<sup>g,h</sup>, S. Li<sup>i</sup>, M. Nycz<sup>j</sup>, R. Pomatsalyuk<sup>k</sup>, A.J.R. Puckett<sup>a</sup>, I. Rachek<sup>l</sup>, S. Riordan<sup>m</sup>, B. Sawatzky<sup>f</sup>, S.A. Seeds<sup>a</sup>, A. Shahinyan<sup>n</sup>, Y. Shestakov<sup>l</sup>, A.S. Tadepalli<sup>f</sup>, †V. Verebryusov<sup>g</sup>, H. Voskanyan<sup>o,n</sup>, B. Wojtsekhowski<sup>f</sup>, A. Yoon<sup>o,1</sup>

<sup>a</sup>University of Connecticut, Storrs, CT 06269, USA

<sup>b</sup>Lawrence Berkeley National Laboratory, Berkeley, CA 94720, USA

<sup>c</sup>William & Mary, Williamsburg, VA 23187, USA

<sup>d</sup>University of Massachusetts, Amherst, MA, USA

<sup>e</sup>Mississippi State University, Mississippi State, MS 39762, USA

<sup>f</sup>Thomas Jefferson National Accelerator Facility, Newport News, VA 23606, USA

<sup>g</sup>Institute of Theoretical and Experimental Physics, Moscow, Russia

<sup>h</sup>Northwestern University, Chicago, IL, USA

<sup>i</sup>University of New Hampshire, Durham, NH, USA

<sup>j</sup>University of Virginia, Charlottesville, VA, USA

<sup>k</sup>Kharkov Institute of Physics and Technology, Kharkov, Ukraine

<sup>l</sup>Budker Institute of Nuclear Physics, Novosibirsk, Russia

<sup>m</sup>Argonne National Laboratory, Lemont, IL, USA

<sup>n</sup>Yerevan Physics Institute, Yerevan, Armenia

<sup>o</sup>Christopher Newport University, Newport News, VA 23606, USA

Статья направлена в  
Nuclear Inst. and Methods in  
Physics Research, A.

А.И.Фикс. Правило сумм Герасимова-Дрелла-Херна для дейтрона. (ссылка на видео: <https://disk.yandex.ru/d/80YRLNR3NNhGmA>)

С целью непосредственной проверки справедливости правила сумм Герасимова–Дрелла–Херна (ГДХ) на дейтроне, представлены результаты вычислений спиновой асимметрии, учитывающие основные каналы фотопоглощения в области энергий фотонов ниже 1.5 ГэВ: фотодезинтеграцию, рождение одиночных и двойных пионов, а также эта-мезонов, странных частиц и векторных мезонов. Существенная компенсация вкладов от двух основных каналов (фотодезинтеграции и фоторождения мезонов) дает для результирующего интеграла ГДХ значение 60 мкб, что заметно превышает значение 0.65 мкб, даваемое правилом сумм. Также проанализированы предварительные результаты по инклюзивному измерению спиновой асимметрии для протона и дейтрона на микротроне MAMI в области энергий 200-1400 MeV.

В.В.Гаузштейн. Результаты эксперимента на установке ДЕЙТРОН. (ссылка на видео: [https://disk.yandex.ru/d/Zve\\_Nka9OmZmWA](https://disk.yandex.ru/d/Zve_Nka9OmZmWA))

Обсуждается актуальность научных исследований. Дано описание экспериментальной установки в сеансах набора данных на ВЭПП-3 в 2021 и 2023 гг. Показана процедура отбора событий  $\gamma d \rightarrow \pi p \pi^-$  и  $\gamma d \rightarrow \pi n$ , приведено сравнение с результатами моделирования в GEANT4. Представлены экспериментальные результаты измерения  $T_{20}$  для некогерентного фоторождения отрицательно заряженного пиона на дейтроне и фотодезинтеграции дейтрона в диапазоне энергий фотона (350-680) МэВ. Результаты для фоторасщепления являются предварительными и будут дополняться необработанной статистикой.

Ю.В.Шестаков. Спиновый интерферометр и квантовые вычисления. (ссылка на видео: <https://disk.yandex.ru/d/qQ3IYvmyzII4MQ>)

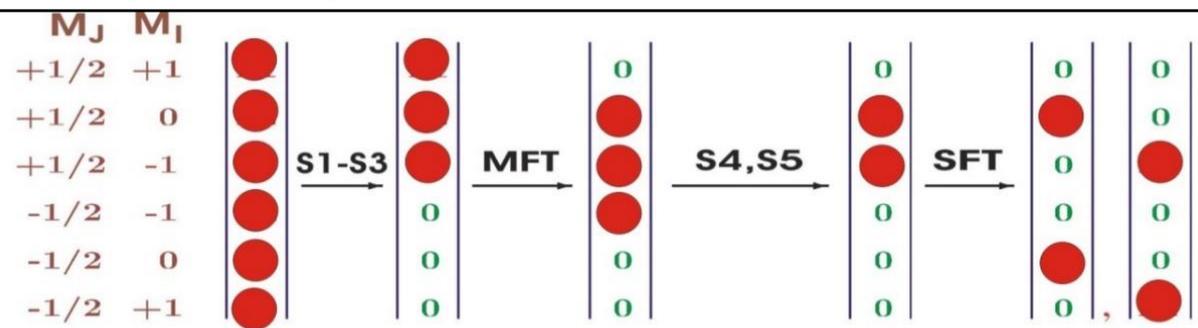
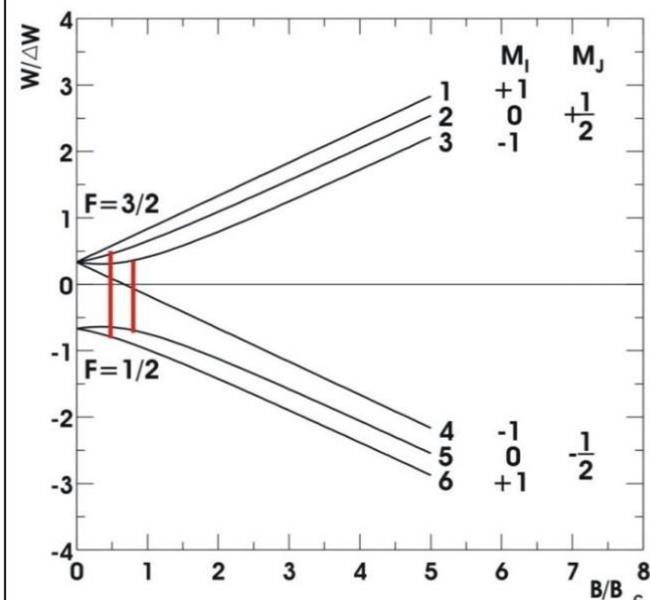
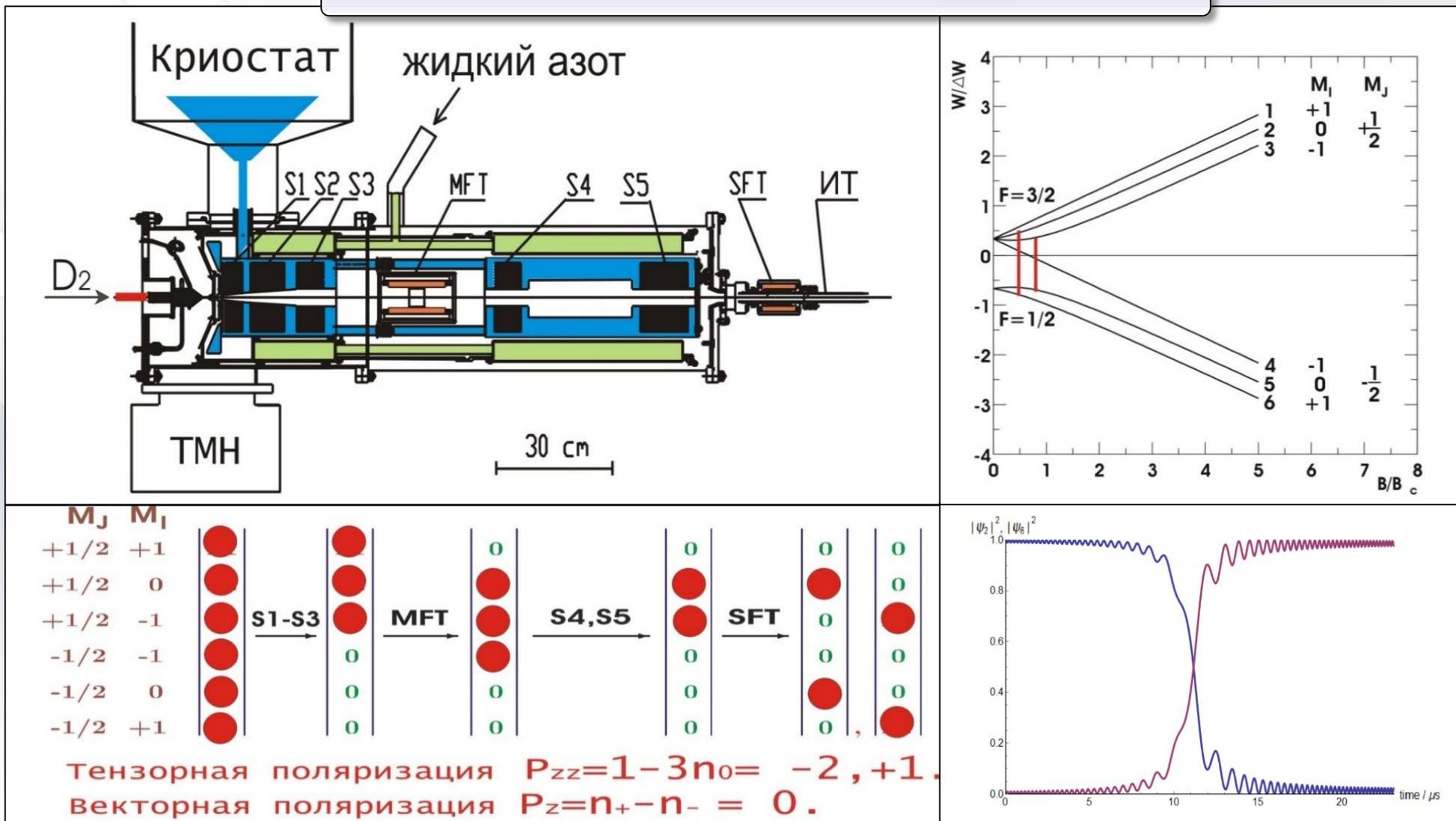
Изучена спиновая динамика атомарного водорода/дейтерия при его прохождении через периодическую магнитную структуру, созданную в пространстве тремя токовыми кольцами. Показано, что в этом случае изменение спинового состояния атома происходит по схеме, идентичной работе двухуровневого квантового интерферометра. Экспериментальные измерения согласуются с теоретическими расчётами.

Разработанный в ИЯФ СО РАН спиновый интерферометр имеет широкую область применения: от измерения сверхмалых магнитных полей до квантовых вычислений. Представлена схема реализации квантового алгоритма, аналогичного алгоритму Дойча, а также вариант, когда интерферометр выполняет функцию суммирования двух кубитов. Предложен новый тип квантового компьютера.

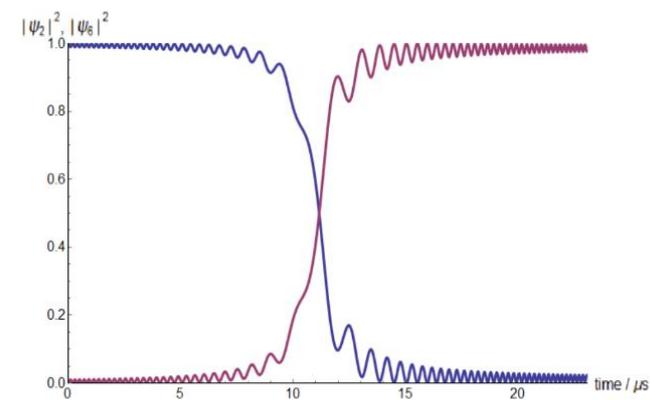
**СПАСИБО ЗА ВНИМАНИЕ !**



## Stern-Gerlach method + adiabatic rf transitions



Тензорная поляризация  $P_{zz}=1-3n_0 = -2, +1$ .  
 Векторная поляризация  $P_z=n_+-n_- = 0$ .

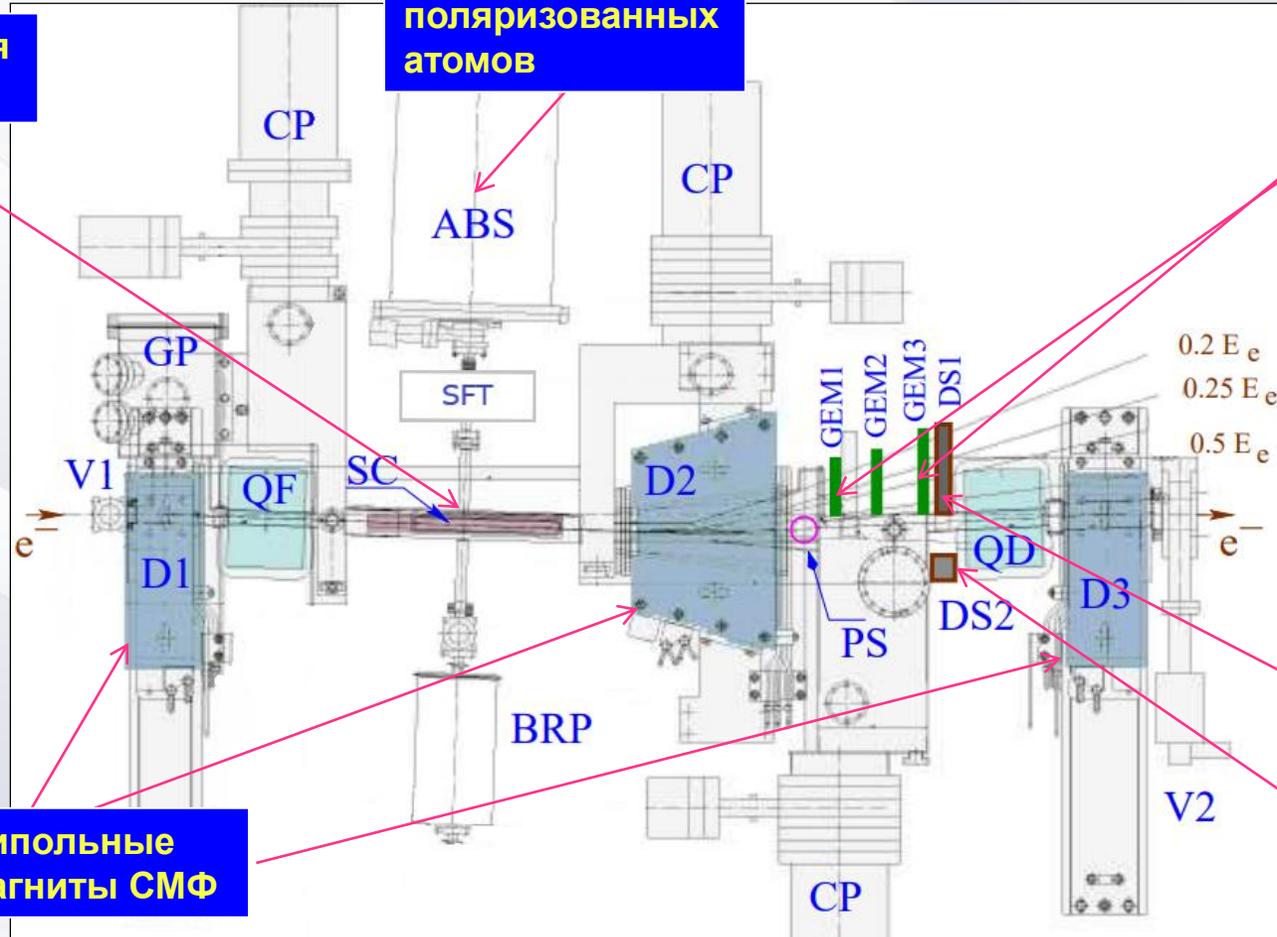


# Система Меченных Фотонов (СМФ)

Накопительная ячейка

Источник поляризованных атомов

GEMs (трековые детекторы)



Дипольные магниты СМФ

Электронный сэндвич

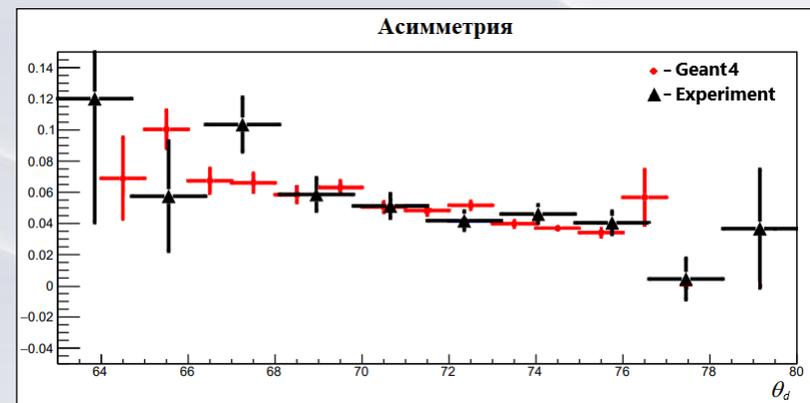
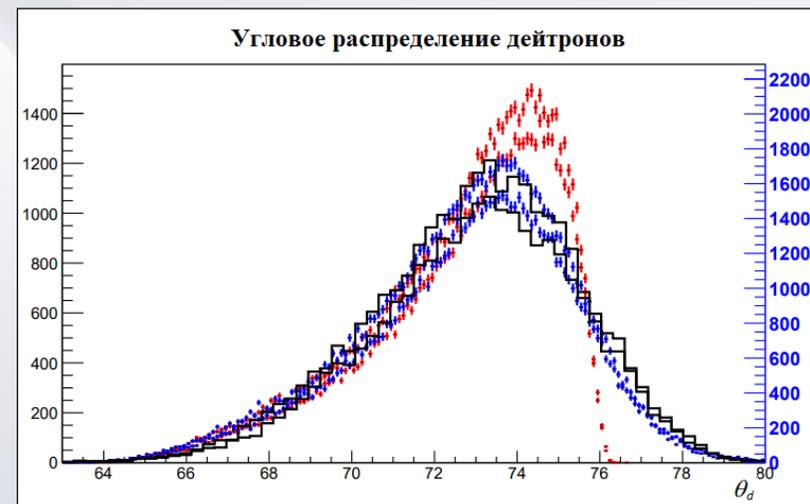
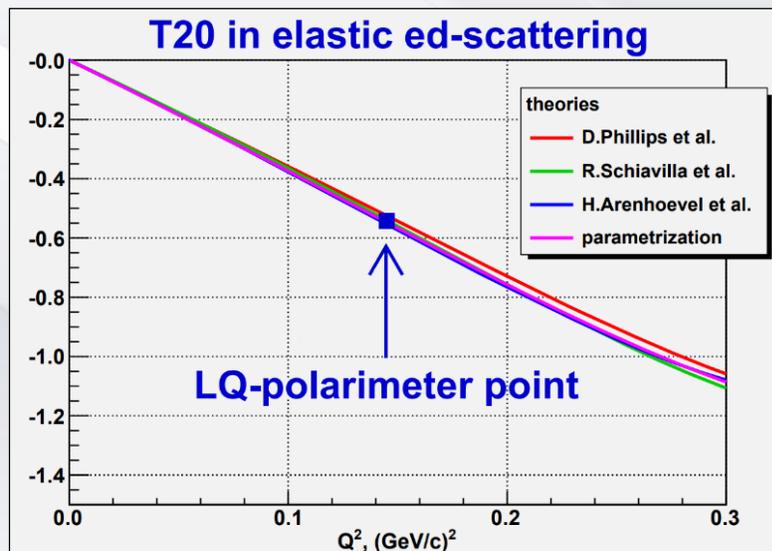
Фотонный сэндвич

Магнит D2 и трековые детекторы GEMs образуют магнитный спектрометр электронов.

Измерив траекторию рассеянного электрона, можно определить энергию излученного  $\gamma$ .

## LQ-поляриметр мишени

Регистрируются события упругого ( $ed$ )-рассеяния на малый угол с  $Q^2 \approx 0.14 (\text{GeV}/c)^2$ . Теоретические модели дают хорошее согласие друг с другом и могут быть использованы для определения тензорной поляризации мишени по величине измеренной асимметрии в скорости счета  $A \approx \frac{1}{\sqrt{2}} P_{zz} T_{20}$ .



Тензорная поляризация является свободным параметром в моделировании и выбирается так, чтобы вычисленная асимметрия совпадала с экспериментально измеренной.

$P_{zz} = 0.39 \pm 0.03$  для одного состояния и  $P_{zz} = -0.66 \pm 0.05$  для другого.

## Электро/фото-ядерные установки в мире

|   | Установка          | $E_{\max}$ | $I_e$   |  |
|---|--------------------|------------|---------|--|
| 1 | Jefferson Lab, США | 11 ГэВ     | 200 мкА | поляризованные электроны, тормозные меченные фотоны                      |
| 2 | MAMI, Германия     | 1.5 ГэВ    | 100 мкА | поляризованные электроны, тормозные меченные фотоны                      |
| 3 | ELSA, Германия     | 3.5 ГэВ    |         | меченные поляризованные фотоны   |
| 4 | LEPS, Япония       | 2.4 ГэВ    |         | фотоны из ОКР  |
| 5 | ELPH, Япония       | 1.3 ГэВ    |         | тормозные меченные фотоны  |
| 6 | HIGS, TUNL, США    | 0.11 ГэВ   |         | фотоны из ОКР, FEL   |
| 7 | Дейтрон@ВЭПП-3     | 2 ГэВ      | 100 мА  | электроны, <b>позитроны</b> , меченные фотоны, <b>внутренняя мишень.</b> |

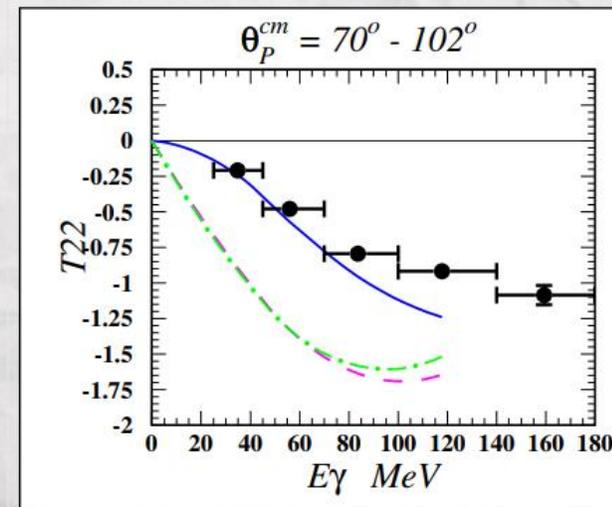
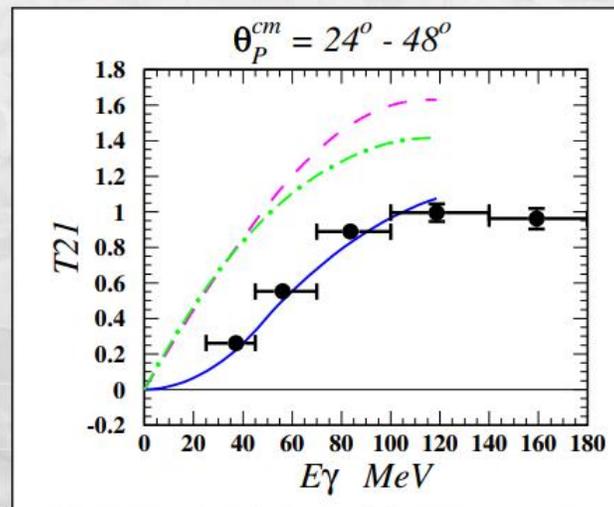
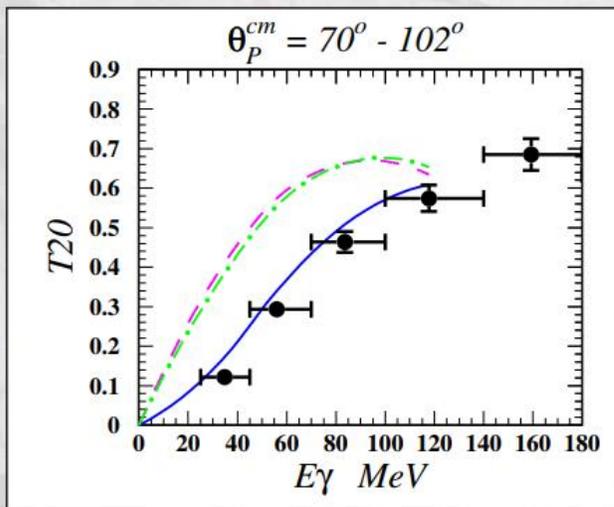
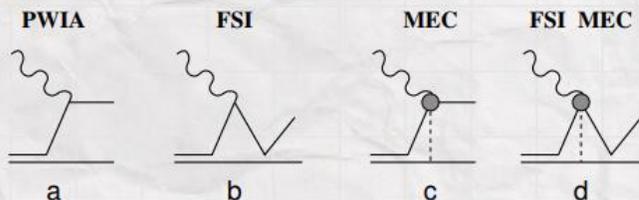
# Теоретические модели: пример для малых энергий

М.Левчук : Диаграммный подход для энергии фотона ниже порога рождения пиона

“Deuteron photodisintegration in the diagrammatic approach” Few Body Syst. 19 (1995) 77-108

Боннский ОВЕРР нуклон-нуклонный потенциал; учет мезонных обменных токов, взаимодействия нуклонов в конечном состоянии.

ингредиенты модели:



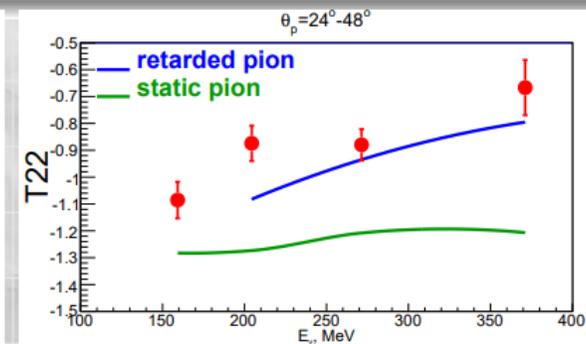
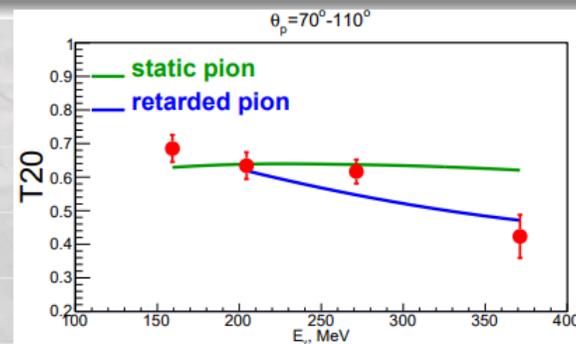
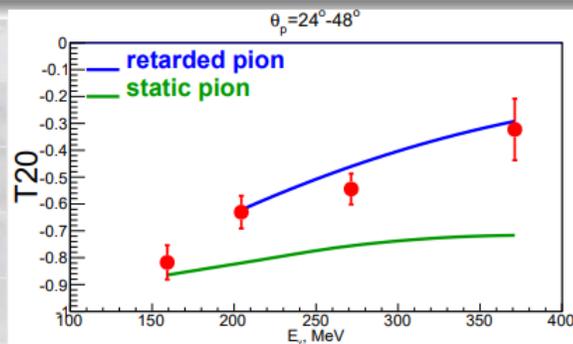
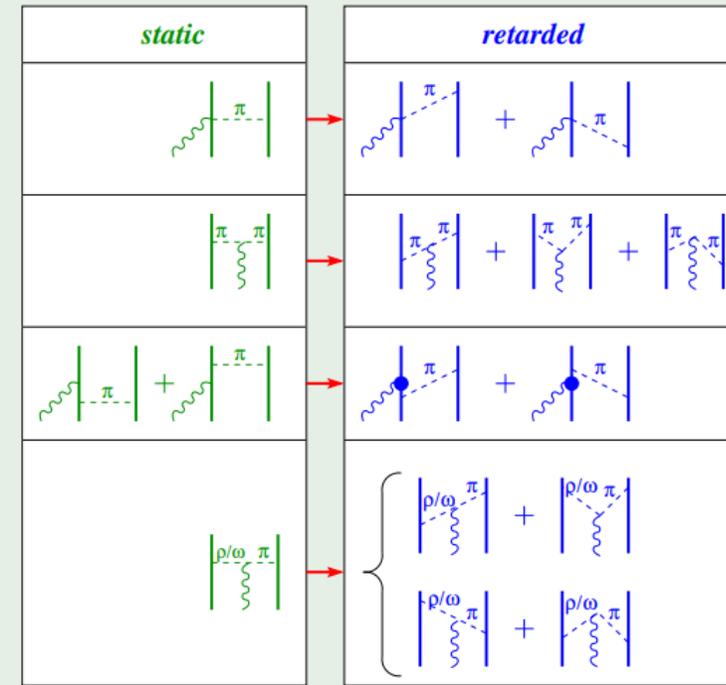
- Плосковолновое импульсное приближение (a)
- · - · - · - PWIA+ Взаимодействие в конечном состоянии (a+b)
- PWIA+FSI+ Мезонные обменные токи (a+b+c+d)

самая проработанная мезон-нуклонная модель для  $E_\gamma = 200 - 600$  МэВ

M. Schwamb and H. Arenhövel, Nucl. Phys. **A690** (2001) 682

M. Schwamb, Physics Reports, **485** (2010) 109–193

- метод связанных каналов  $NN$ ,  $N\Delta$ ,  $\pi NN$
- взаимодействие в виртуальной 3-х частичной  $\pi NN$ -системе *учитывается непертурбативно*
- Учет запаздывания (“retardation”) пиона в NN-потенциале и в мезонных обменных токах;
- никаких подгоночных параметров для фотодезинтеграции – все берется из нуклон-нуклонного и пион-нуклонного рассеяния и фоторождения пиона на нуклоне.



## Переход к кварк-глюонной картине дейтрона ?

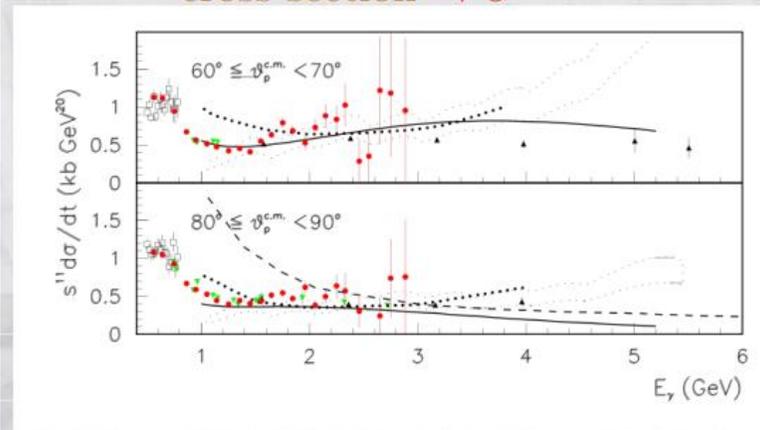
- pQCD: Правила Счета (CCR) и Сохранение Адронной Спиральности (ННС) предсказывают асимптотическое поведение наблюдаемых для реакции  $\gamma d \rightarrow pn$ :

$$d\sigma/dt \rightarrow s^{-11}$$

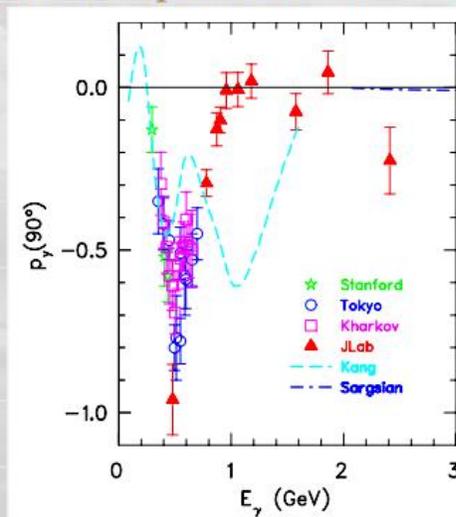
$$\text{при } \theta = 90^\circ: \quad p_y, C_{x'}, C_{z'}, O_{x'}, O_{z'}, T_{11}, T_{21}, T_{22} \rightarrow 0 \quad \Sigma \rightarrow +1 \quad T_{20} \rightarrow -\sqrt{2}$$

- результаты измерений фотодезинтеграции в JLAB при  $\theta_p^{cm} = 90^\circ$ :
  - диф сечение  $d\sigma/dt(90^\circ)$  выходит на pQCD скейлинг после  $E_\gamma \approx 1.5$  ГэВ
  - наведенная протонная поляризация  $p_y(90^\circ)$  зануляется при  $E_\gamma \approx 1$  ГэВ (в согласии с ННС)
  - фотонная асимметрия не совпадает с асимптотикой ННС (+1)  $\Sigma$ , но недалеко нее при  $E_\gamma \geq 1.5$  ГэВ

cross section  $\rightarrow s^{-11}$



induced polarization  $\rightarrow 0$



$\Sigma$  asymmetry  $\rightarrow +1$  ?

