

Эксперименты на установке ДЕЙТРОН

Ю.В. Шестаков

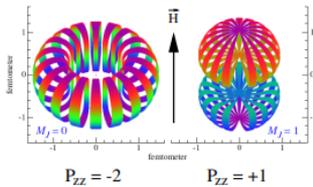
Научная сессия ИЯФ
01.02.2024

- В ИЯФе экспериментальное изучение Электро- и Фото- ядерных процессов базируется на использовании **Метода Сверхтонкой Внутренней Мишени** в накопителе.
- Метод предложен и развит в ИЯФ.
- Позволяет проводить уникальные эксперименты **с экзотическими мишенями** и/или **с уникальными пучками**.

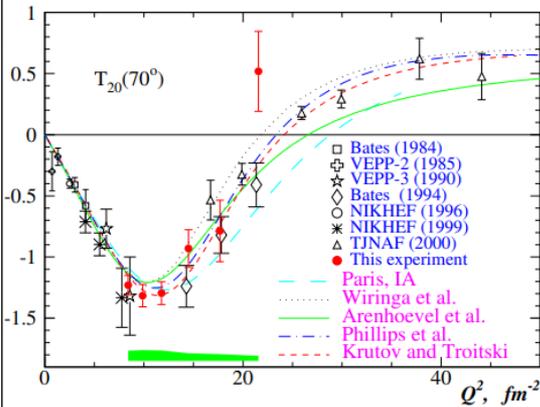


С.Г. Попов, Внутренние мишени в накопителях заряженных частиц, Ядерная Физика, 63 (1999) 291

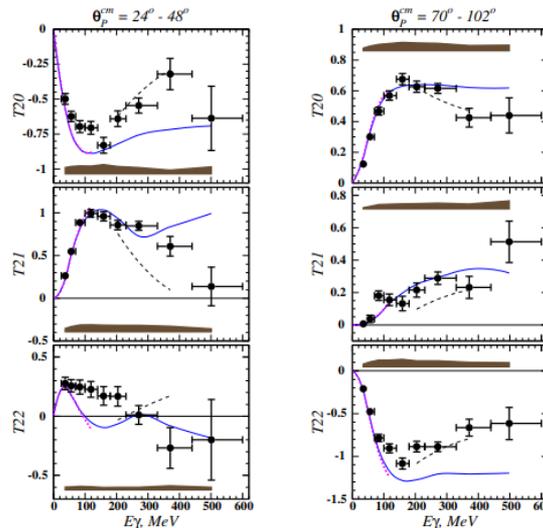
упругие форм-факторы дейтрона



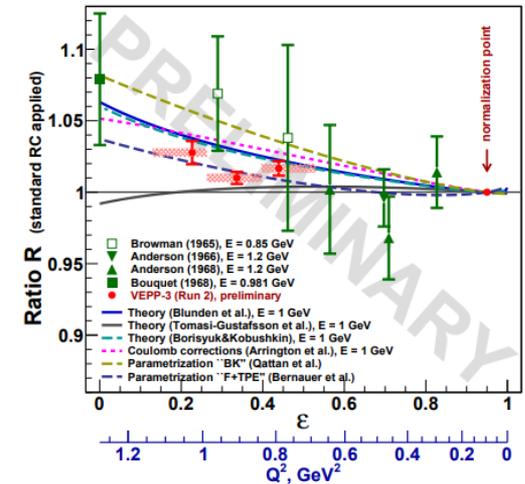
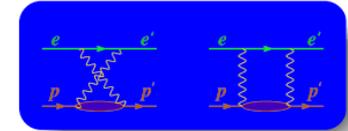
$P_{zz} = -2$ $P_{zz} = +1$



Фотодезинтеграция

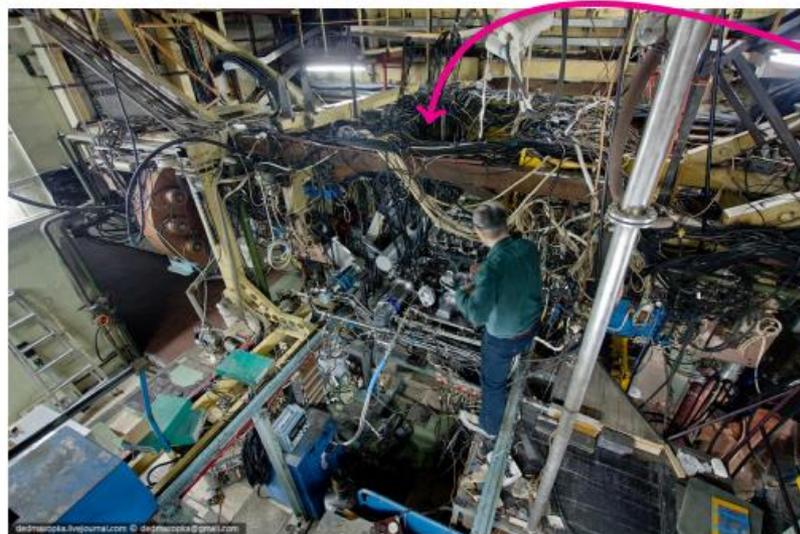


2γ вклад в упругое ер-рассеяние

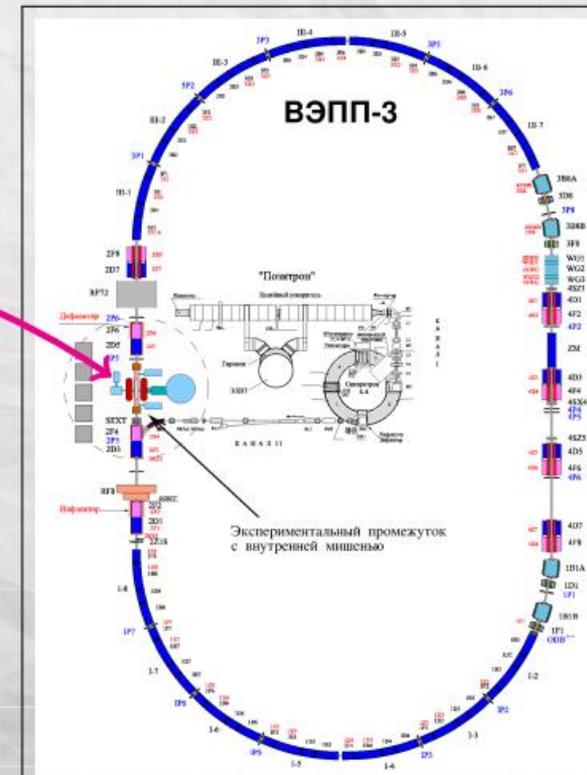


Группа "Дейтрон"

... в 2021-ом: 5 научных сотрудников + 4 лаборанта + 1 аспирант ...



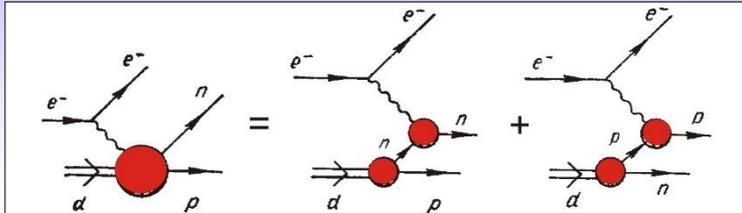
Работаем на 2-ом линейном промежутке ВЭПП-3



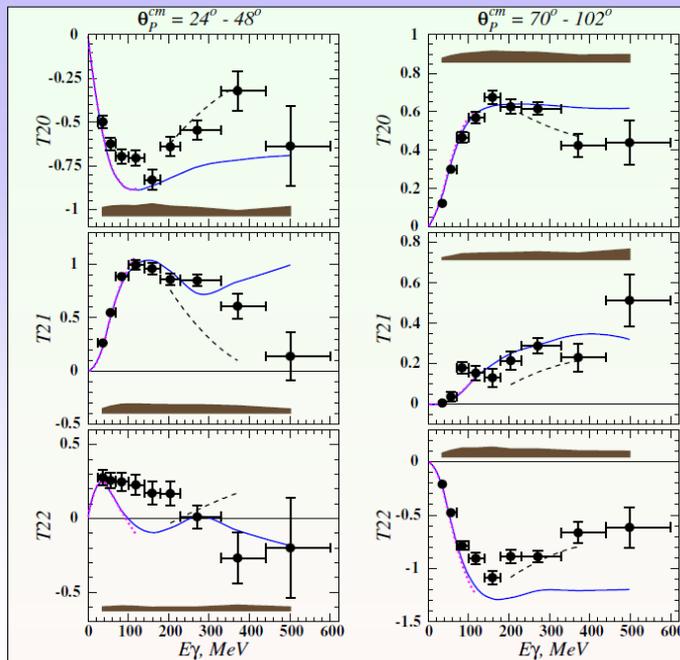
... в 2023-ом: 6 научных сотрудников + 1 инженер + 4 лаборанта + 1 студент

Фотодезинтеграция дейтрона

Scattering angle is small - \rightarrow q^2 close to zero - \rightarrow almost real photon - \rightarrow process of photodisintegration



$$\frac{d\sigma}{d\Omega} = \frac{d\sigma_0}{d\Omega} \left\{ 1 + \frac{1}{\sqrt{2}} P_{ZZ} \left[\frac{1}{2} (3 \cos^2 \theta_H - 1) T_{20} - \sqrt{\frac{3}{8}} \sin 2\theta_H \cos \varphi_H T_{21} + \sqrt{\frac{3}{8}} \sin^2 \theta_H \cos 2\varphi_H T_{22} \right] \right\}$$



I.A. Rachek et al.,
Phys.Rev.Lett 98 (2007)182303

ISSN 1063-7796, Physics of Particles and Nuclei, 2014, Vol. 45, No. 1, pp. 338–340. © Pleiades Publishing, Ltd., 2014.

Tagging System for Almost-Real Photons at VEPP-3 Storage Ring

Yu. V. Shestakov^a, L. M. Barkov^a, V. F. Dmitriev^a, R. A. Golovin^a, V. N. Kudryavtsev^a,
B. A. Lazarenko^a, S. I. Mishnev^a, D. M. Nikolenko^a, I. A. Rachek^a, R. Sh. Sadykov^a,
V. N. Stibunov^b, D. K. Toporkov^a, L. I. Shekhtman^a, and S. A. Zevakov^a

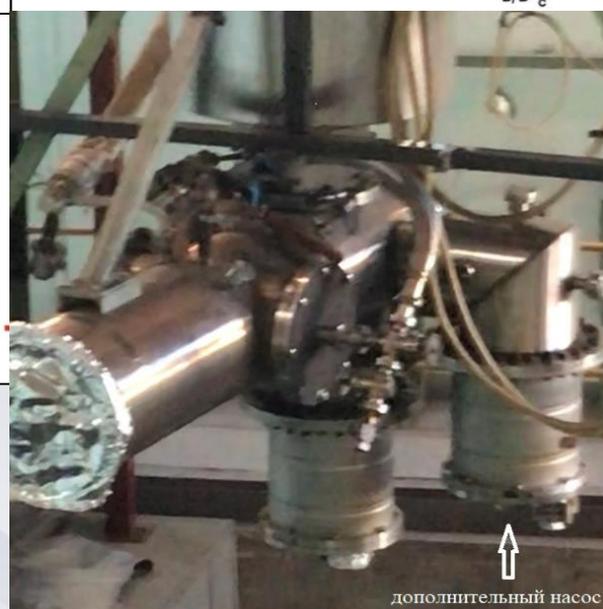
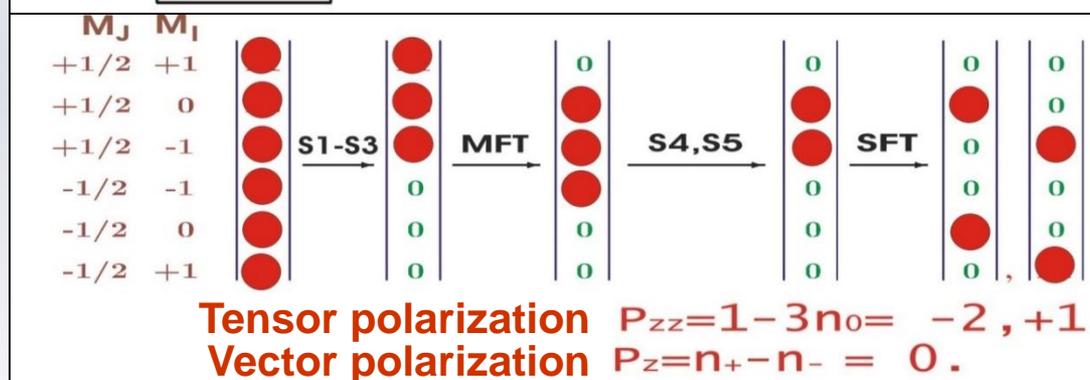
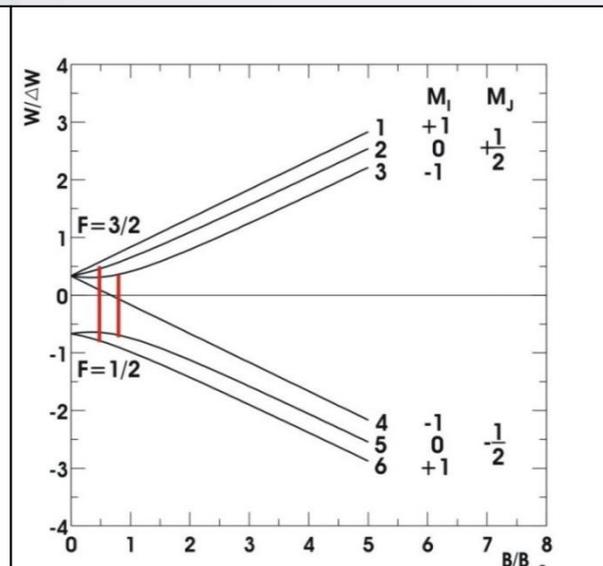
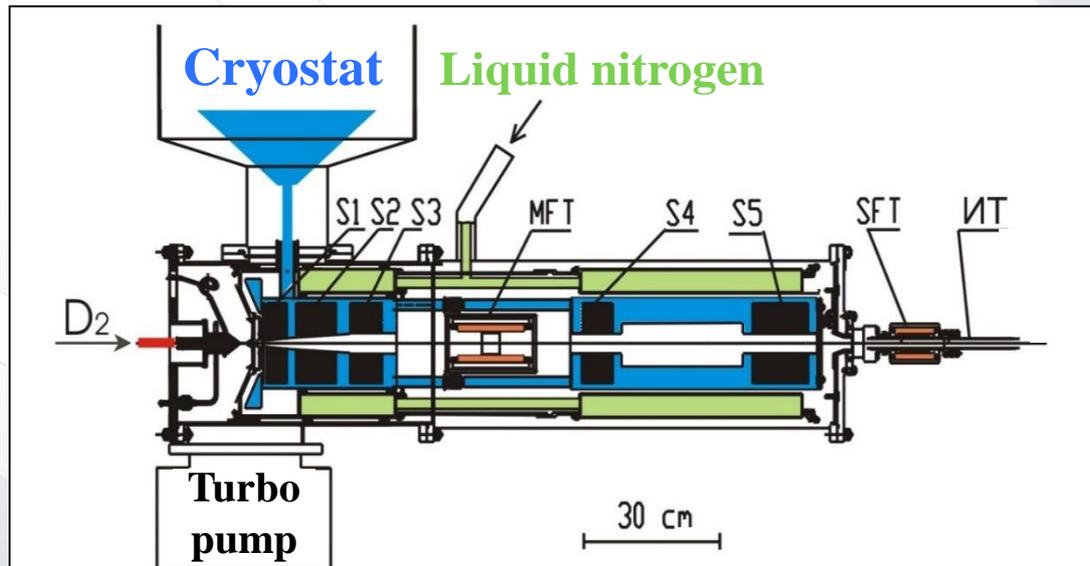
^a Budker Institute of Nuclear Physics, Novosibirsk, 630090 Russia

^b Nuclear Physics Institute at Tomsk Polytechnical University, Tomsk, 634050 Russia

Abstract—At BINP the construction of the tagging system for almost-real photons (TS) is in progress. The energy of tagging photons can be up to 1.5 GeV. The projected energy resolution of TS is better than 1%. For at least a half of photons the linear polarization can be determined. The tagging system will extend the possibilities for photoreaction studying at VEPP-3 significantly. TS would allow to perform a complete kinematics reconstruction, thus permitting a reliable rejection of the background processes; to extend the measurements to higher photon energy; to enabling Σ -asymmetry measurements and double polarization experiments.

DOI: 10.1134/S1063779614010924

Криогенный источник поляризованных атомов дейтерия

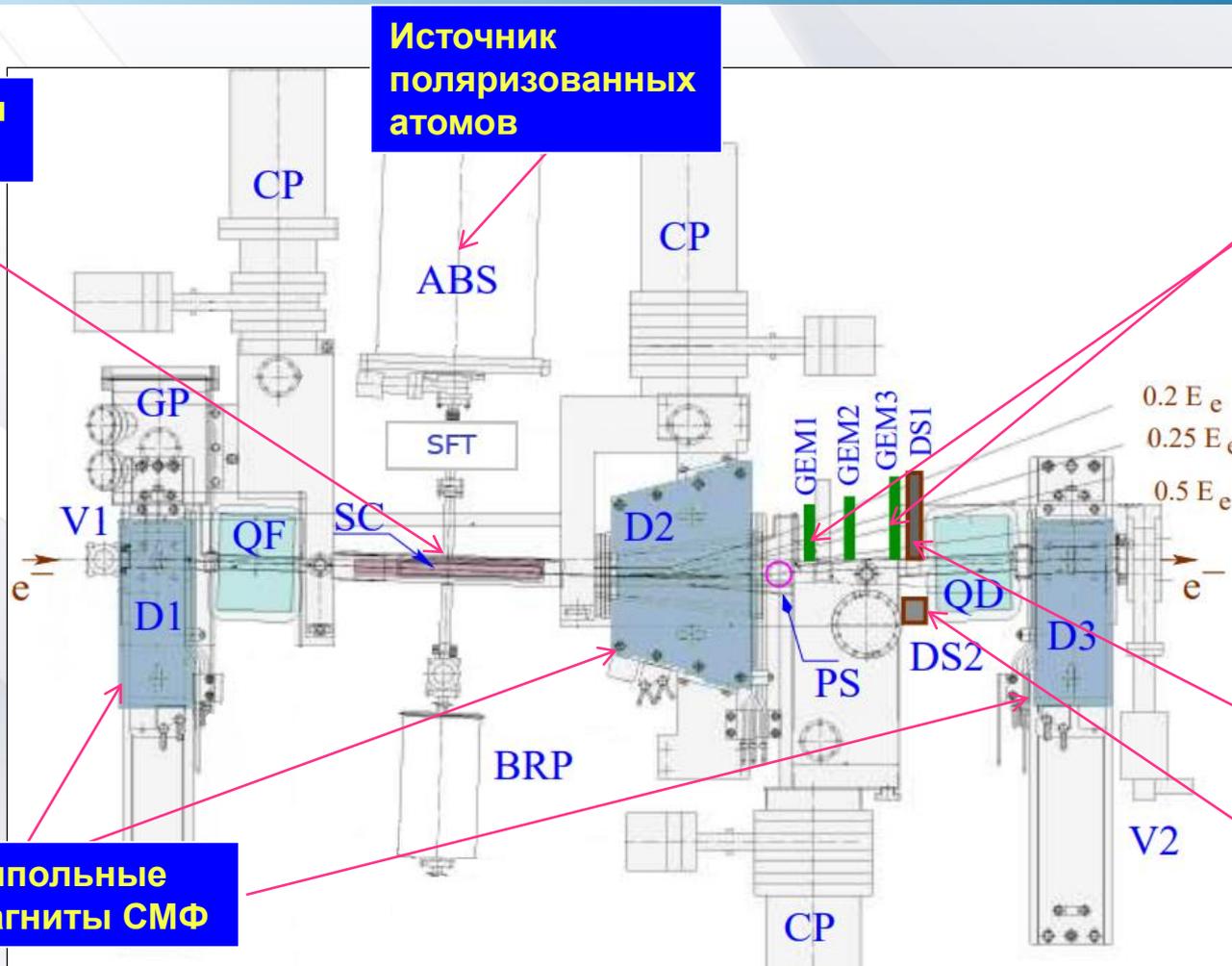


Поток атомов дейтерия – $8 \cdot 10^{16}$ ат./сек. $P_{zz} > 95\%$, $P_z < 5\%$

В 2023г. были внесены изменения в источник – добавлен второй ТМН в камере сопла, что увеличило поток на 10%.

дополнительный насос

Система Мечения Фотонов



Накопительная ячейка

Источник поляризованных атомов

GEMs (трековые детекторы)

Дипольные магниты СМФ

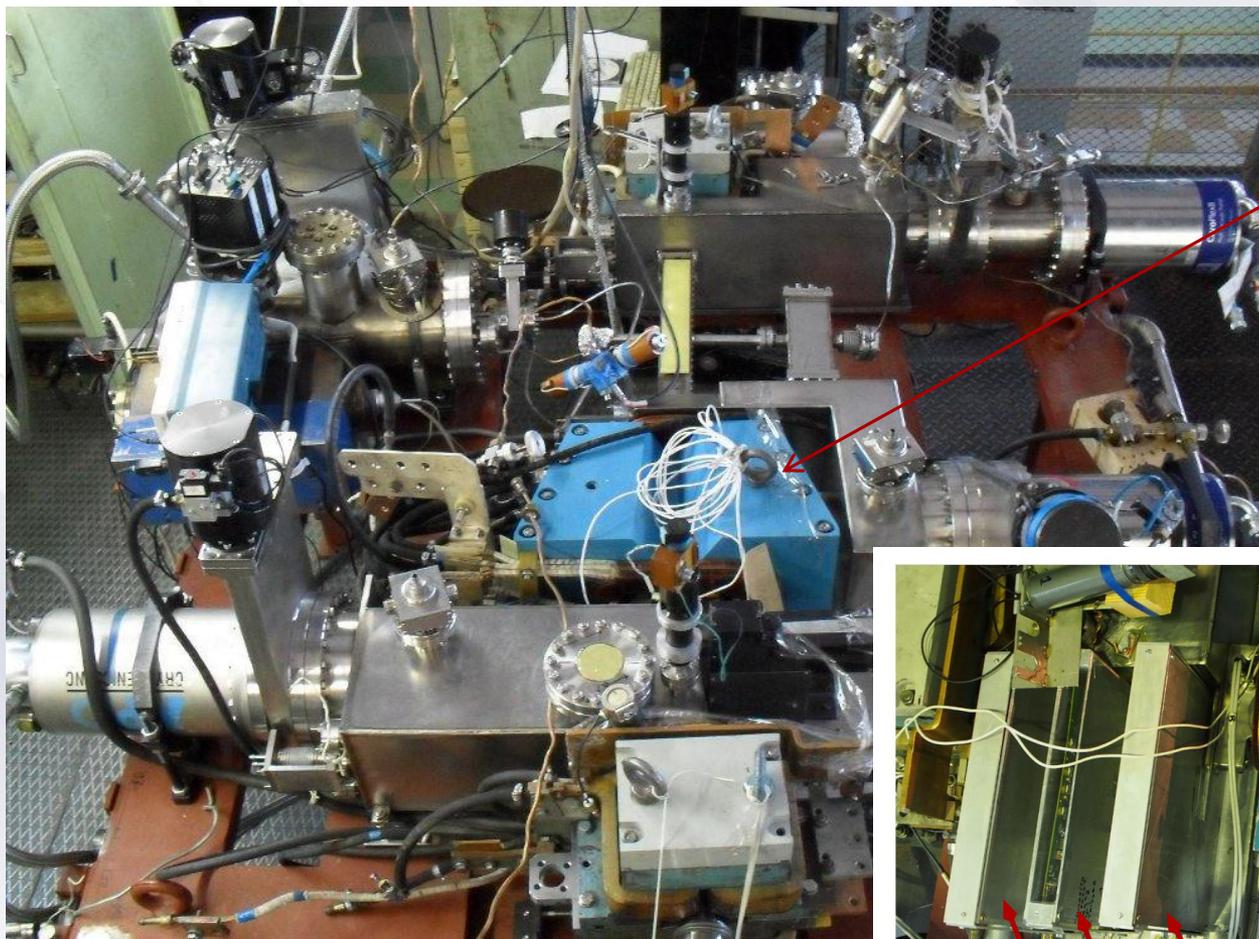
Электронный сэндвич

Фотонный сэндвич

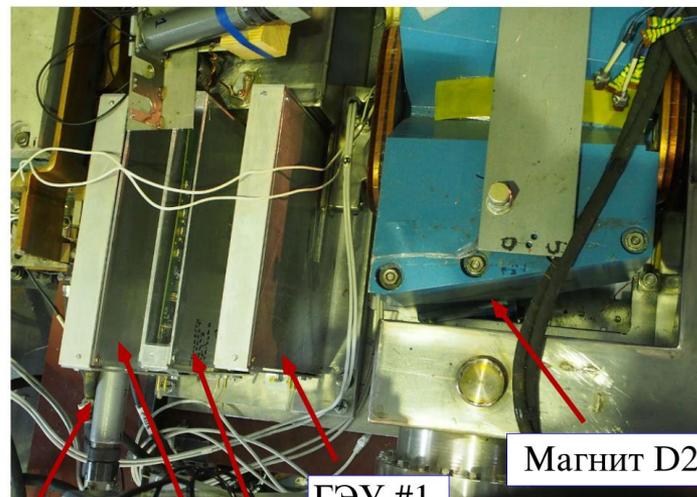
Магнит D2 и трековые детекторы GEMs образуют магнитный спектрометр электронов.

Измерив траекторию рассеянного электрона, можно определить энергию излученного γ .

Экспериментальный промежуток перед установкой на ВЭПП-3



Магнит D2



Магнит D2

ГЭУ #1

Сэндвич

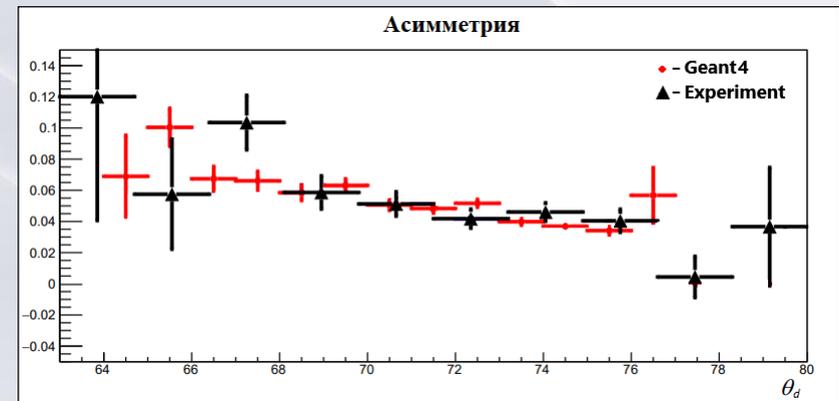
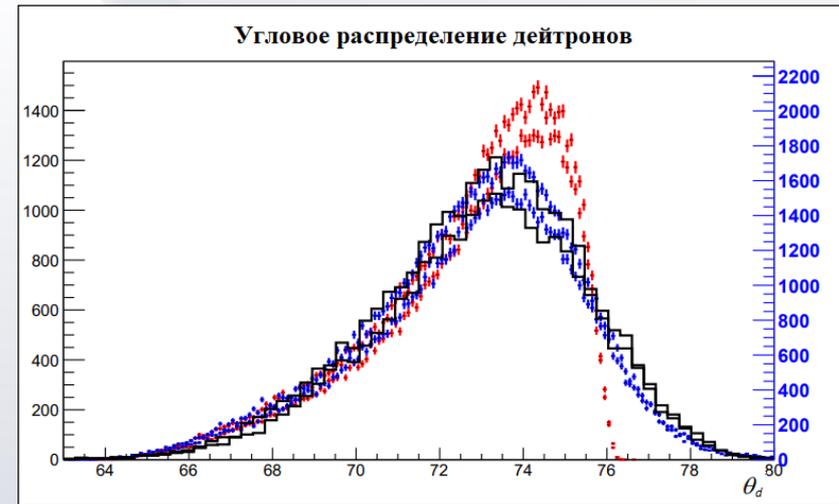
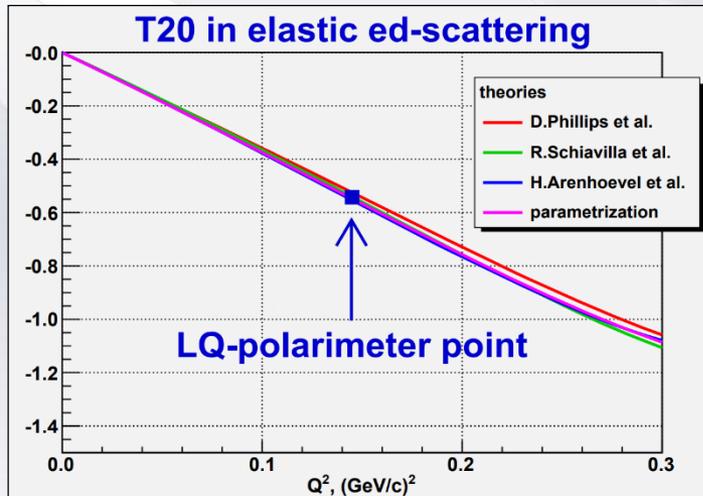
ГЭУ #2

ГЭУ #3

LQ-поляриметр мишени

Регистрируются события упругого (ed)-рассеяния на малый угол: $Q^2 \approx 0.15$ (GeV/c)²

Как видно на рисунке внизу, теоретические модели дают хорошее согласие друг с другом (<2%) и могут быть использованы для определения тензорной поляризации мишени по величине измеренной асимметрии в скорости счета.



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

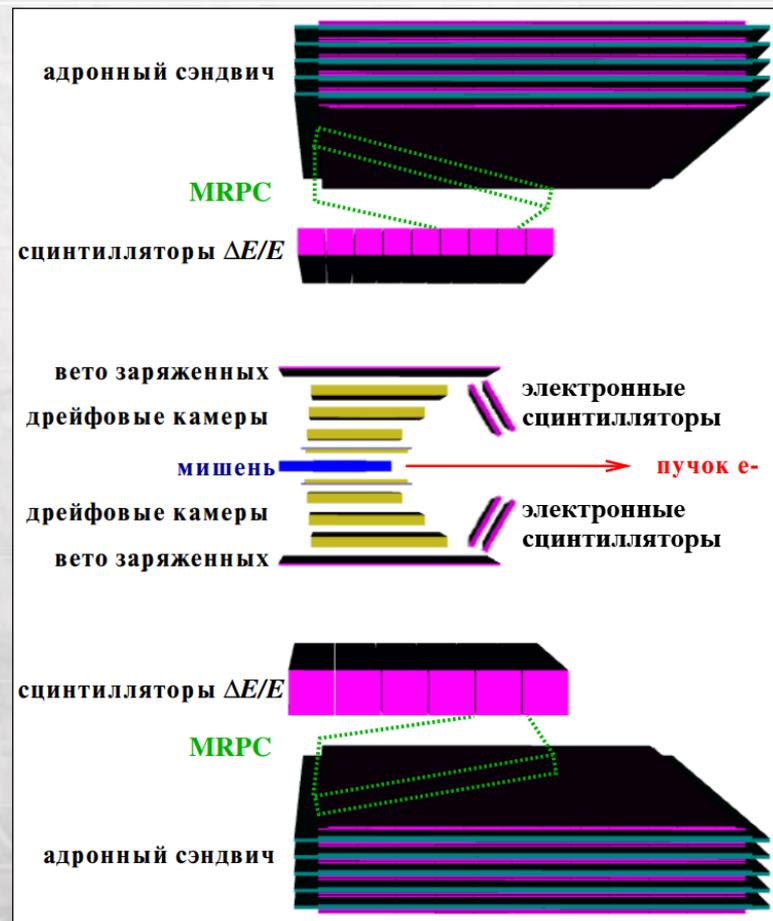
$P_{zz} = 0.39 \pm 0.03$ для одного состояния и $P_{zz} = -0.66 \pm 0.05$ для другого.

Детектор протонов/нейтронов

Симметричная система из двух плеч, регистрирующих протоны и нейтроны с энергией $200 \div 1000$ МэВ.

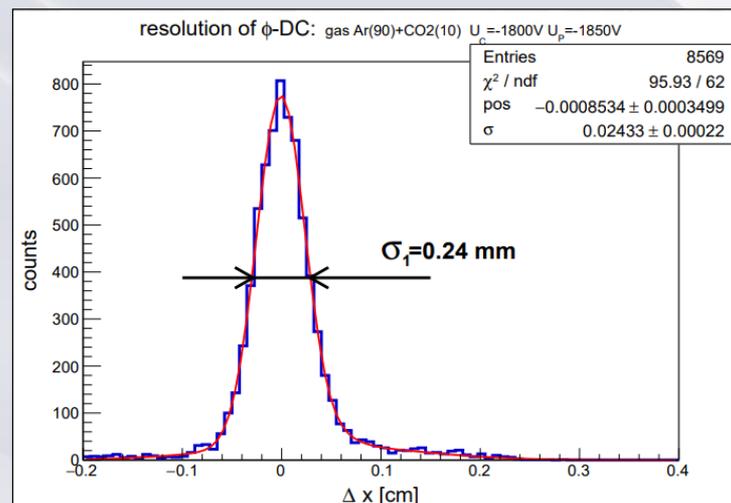
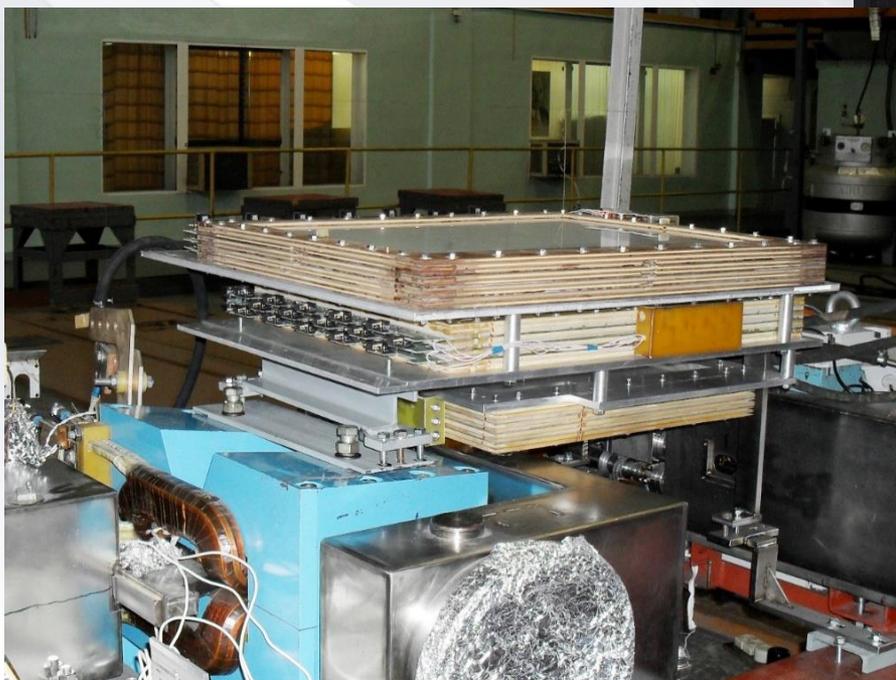
состав каждого плеча

- 1 трековая система: многопроводочные пропорциональные и дрейфовые камеры;
- 2 слои 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 – многозаязорная искровая камера с резистивными плоскостями для TOF (потребуется на последнем этапе эксперимента)



Детектор протонов/нейтронов

- 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.

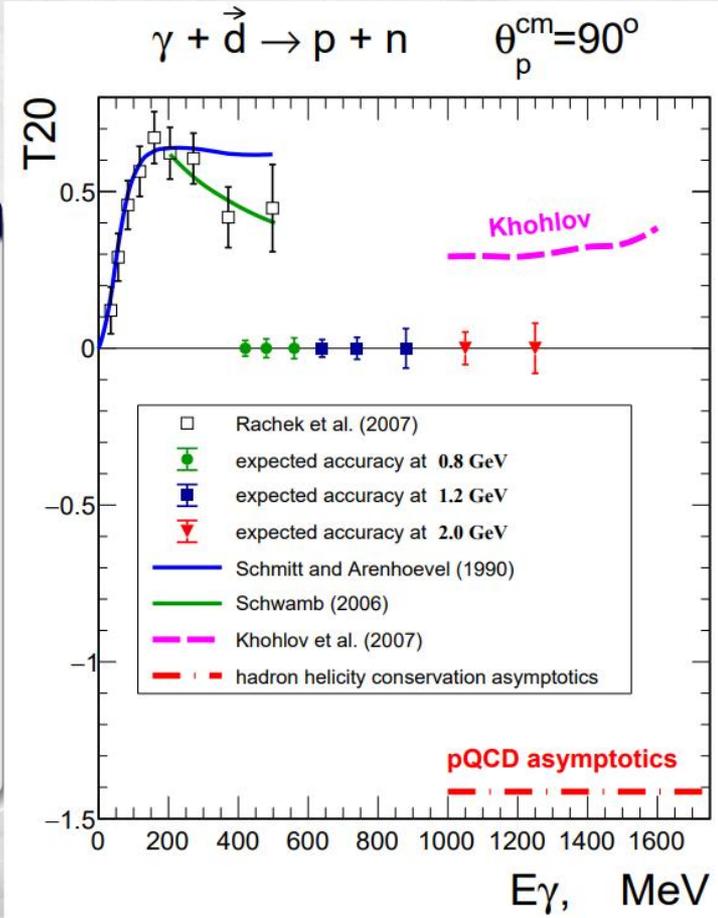


Этапы эксперимента по фотодезинтеграции дейтрона

- ... T_{20} измерена нами до $E_\gamma \approx 500$ МэВ: [Phys.Rev.Lett. 98 \(2007\) 182303](#)
- Система Мечения захватывает от 0.5 до 0.8 энергии пучка
- диапазон по энергии фотона $400 \div 1600$ МэВ можно перекрыть в три захода:

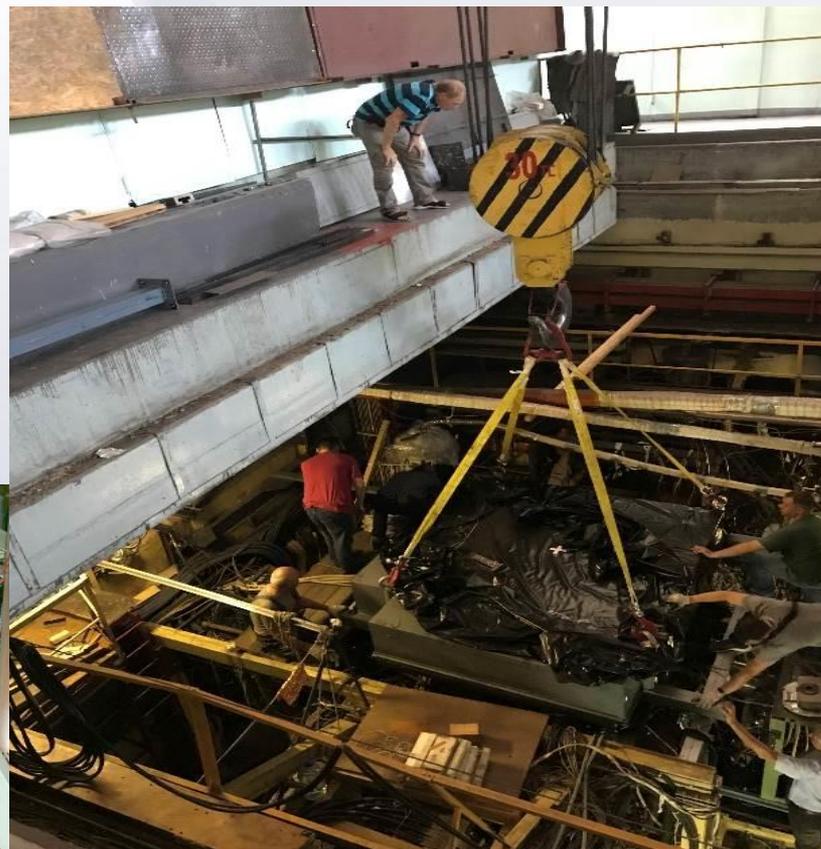
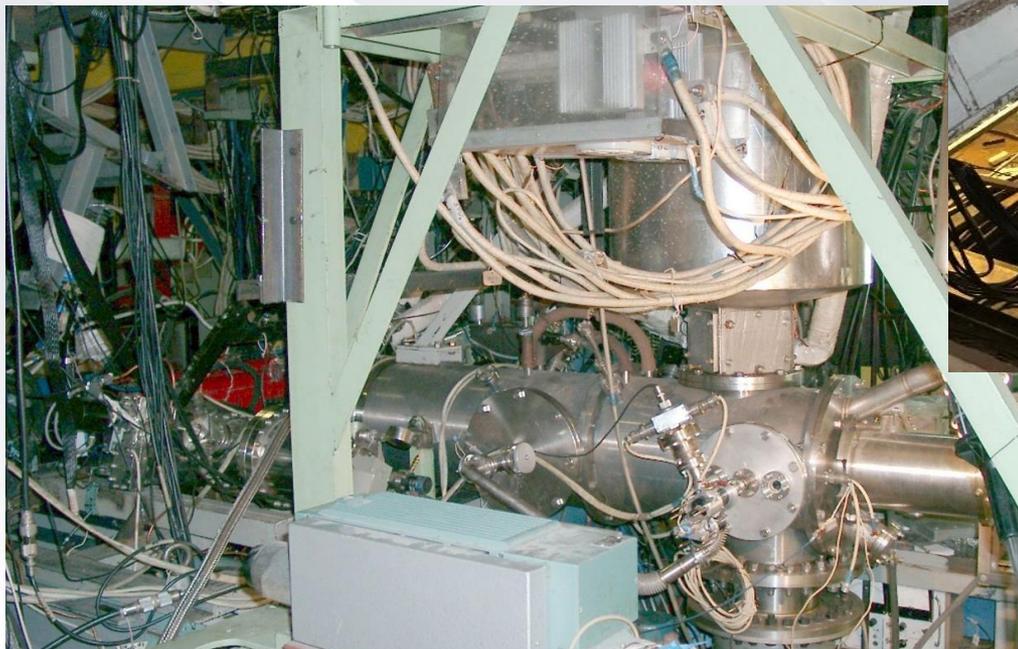
три этапа

Этап:	①	②	③
энергия пучка [МэВ]	800	1250	2000
E_γ [МэВ]	400 ÷ 640	620 ÷ 1000	1000 ÷ 1600
$\frac{d\sigma_{\gamma d}}{d\Omega}(90^\circ)$, [nb/sr]	2030 ÷ 405	450 ÷ 44	44 ÷ 3.2
интеграл [pb^{-1}]	28	63	120
эффективность по n [%]	35 ÷ 42	46 ÷ 60	63 ÷ 72
эффективность по p [%]	80	70 </td <td>80</td>	80
неотделимый фон [%]	1 ÷ 4	5 ÷ 15	8 ÷ 10
время набора	4 недели	2 месяца	4 месяца



Экспериментальный заход 2023

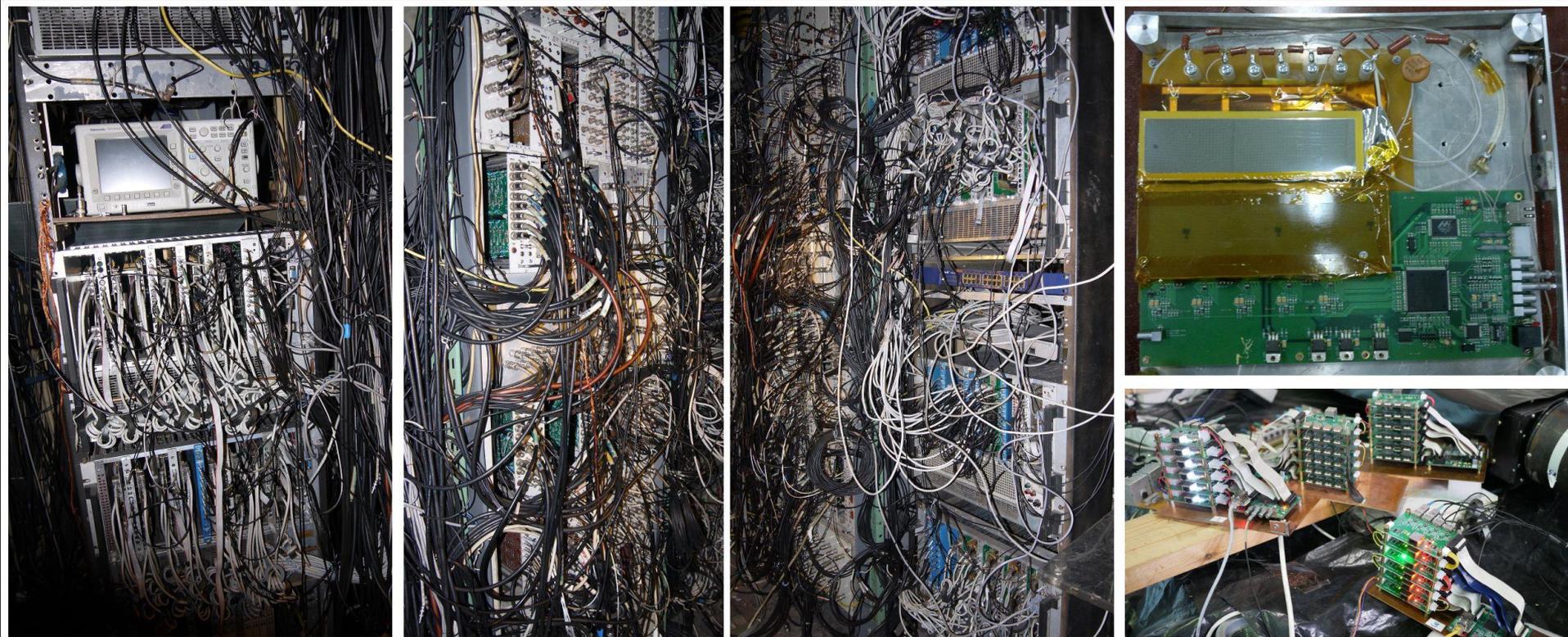
06.07–17.07 установка
экспериментального промежутка на
ВЭПП-3 , получение вакуума



18.07–31.08 установка,
подключение ABS, запуск мишени,
сборка и запуск детектора

Экспериментальный заход 2023

Аппаратура с электроникой размещалась рядом с детектором в зале ВЭПП-3



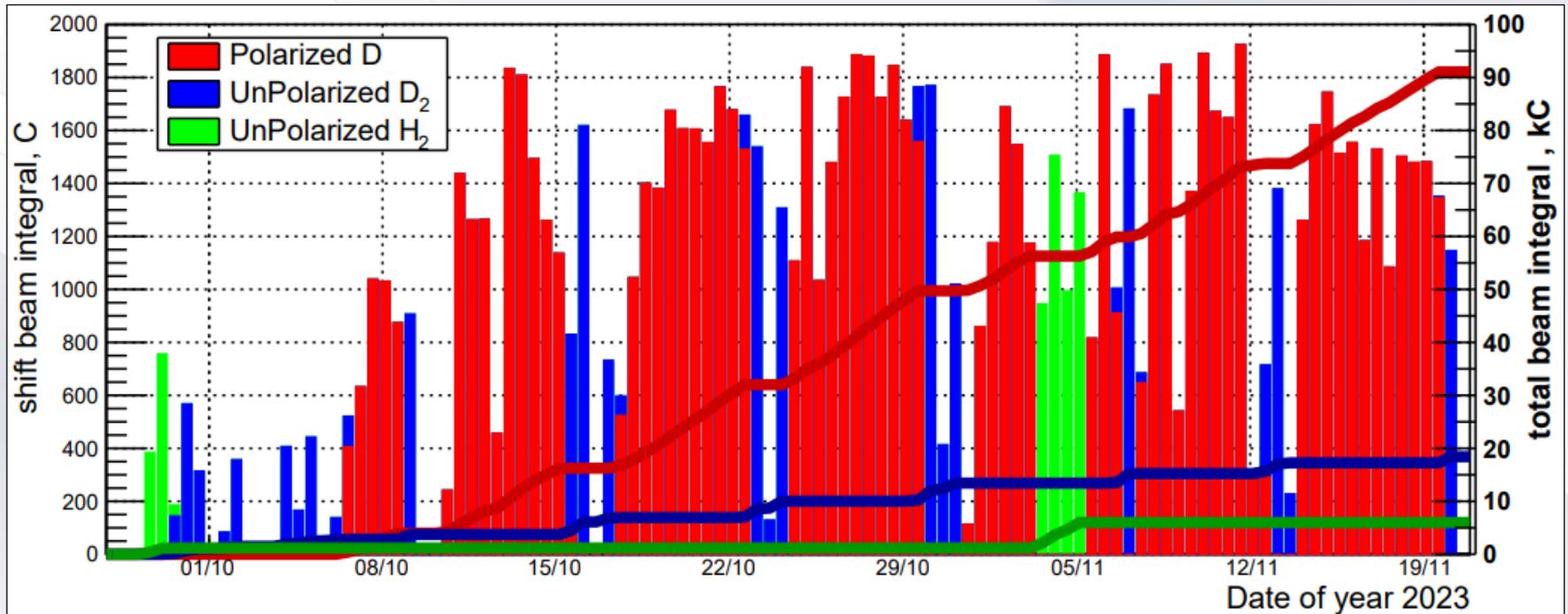
- 80% оцифровывающей и 100% триггерной электроники – собственные разработки.
- Оцифровка в КАМАКе и в отдельных блоках, триггерные модули в ВИШНе и КАМАКе
- Крейты КАМАК опрашивались контроллерами на базе МикроПК и ПЛИС Альтера.

Экспериментальный заход 2023

12.09–01.10 включение ВЭПП-3, настройка режима работы

22.09 подняли экспериментальный промежуток на 3мм относительно ВЭПП-3

01.10–19.11 набор статистики на $E_e = 800$ МэВ

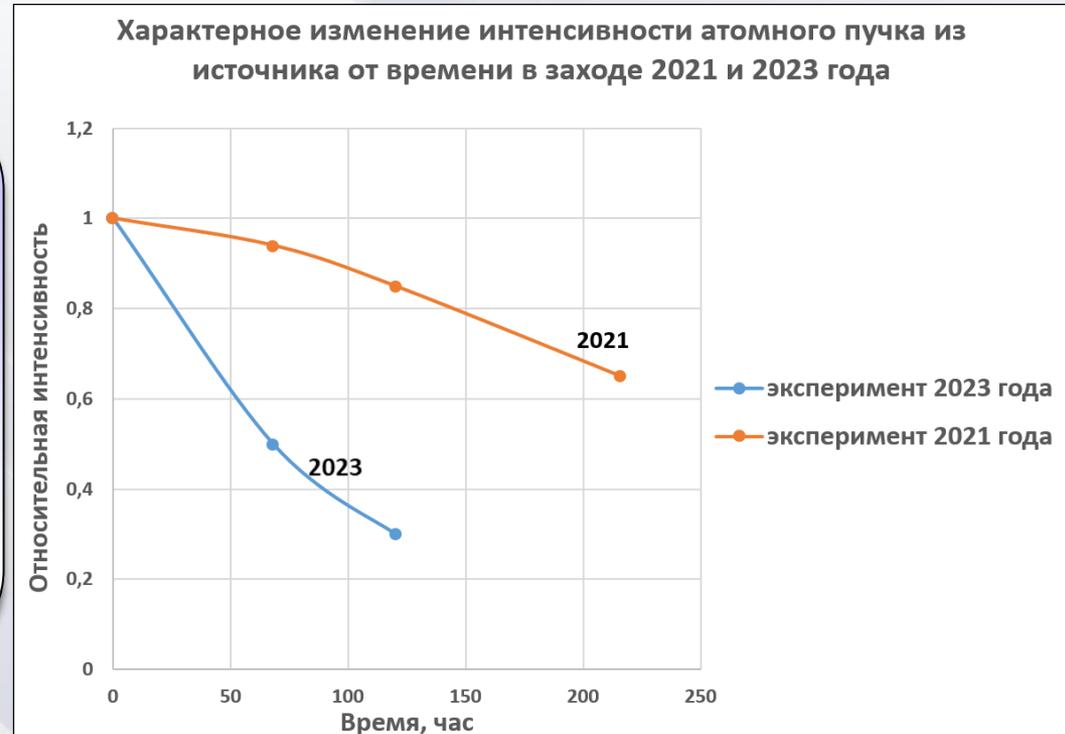


Набранный интеграл тока при работе с поляризованной мишенью составил 91 килокулон. Он равномерно распределен между двумя состояниями мишени с разными знаками тензорной поляризации. Отношение времени набора статистики на поляризованной мишени к полному (астрономическому) времени захода равно **0.44**.

Причины уменьшения толщины мишени:

✓ в начале захода было сбито нацеливание ABS относительно входной трубки накопительной ячейки;

✓ быстрое падение интенсивности атомного пучка из источника во время захода (см. график справа).



В настоящий момент источник поляризованных атомов готовится к стендовым испытаниям с целью выяснения причины резкого снижения интенсивности.

Также, по результатам захода составлен список работ по устранению возникших поломок и повышению надежности функционирования экспериментального оборудования.

The role of final-state interaction in tensor polarization effects of the reaction $\gamma d \rightarrow p n \pi^0$

Vyacheslav Gauzshtein^{1✉}, Alexander Fix², Bogdan Vasilishin², Eed Darwish^{3,4}, Matvey Kuzin², Michael Levchuk^{5,6}, Alexey Loginov⁷, Dmitry Nikolenko⁸, Igor Rachek⁸, Yuriy Shestakov^{8,9}, Dmitry Toporkov^{8,9}, Arseniy Yurchenko⁸, Sergey Zevakov⁸ & Zakaria Mahmoud^{10,11}

Tensor analyzing-power components T_{20} , T_{21} , and T_{22} for the reaction $\gamma d \rightarrow p n \pi^0$ have been studied for the first time in the photon energy range from 280 to 500 MeV. The data are extracted from the experimental statistics accumulated at the VEPP-3 storage ring in 2002–2003. The measured asymmetries are compared with the results of statistical simulations performed with the $\gamma d \rightarrow p n \pi^0$ amplitude from a spectator model, taking into account corrections for the final-state interaction. The comparison demonstrates quite good agreement between the experimental results and the theory.

Nucl. Phys. A 1041 (2024) 122781

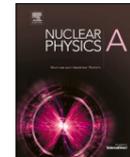
Contents lists available at ScienceDirect

Nuclear Physics A

journal homepage: www.elsevier.com/locate/nuclphysa



ELSEVIER



Measurement of the T_{20} component of tensor analyzing power for the incoherent π^- -meson photoproduction on a deuteron

V.V. Gauzshtein^{a,*}, E.M. Darwish^{b,c}, A.I. Fix^a, A.S. Kuzmenko^a, M.Ya. Kuzin^a, M.I. Levchuk^{d,e}, A.Yu. Loginov^f, D.M. Nikolenko^g, I.A. Rachek^g, Yu.V. Shestakov^{g,h}, D.K. Toporkov^{g,h}, A.V. Yurchenko^g, B.I. Vasilishin^a, S.A. Zevakov^g, G.N. Baranov^g, A.V. Bogomyagkov^g, V.M. Borin^g, V.L. Dorokhov^g, A.N. Zhuravlev^g, S.E. Karnae^g, K.Yu. Karyukina^g, A.A. Kovalenko^g, E.B. Levichev^g, I.B. Logashenko^g, S.I. Mishnev^g, I.N. Okunev^g, P.A. Piminov^g, E.A. Simonov^g, S.V. Sinyatkin^g, M.A. Skamarokha^g, E.V. Starostina^g

^a National Research Tomsk Polytechnical University, 634050 Tomsk, Russia

^b Physics Department, College of Science, Taibah University, Medina 41411, Saudi Arabia

^c Physics Department, Faculty of Science, Sohag University, Sohag 82524, Egypt

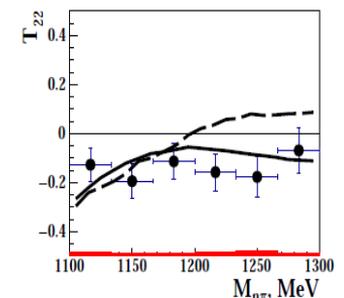
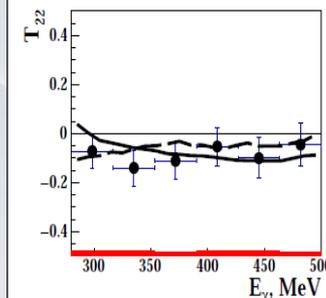
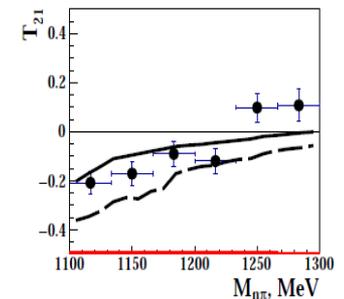
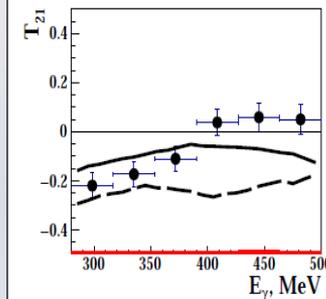
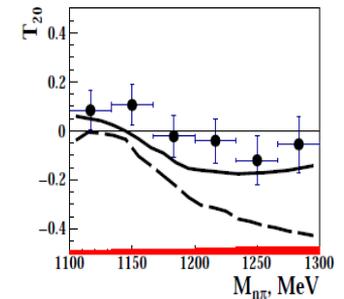
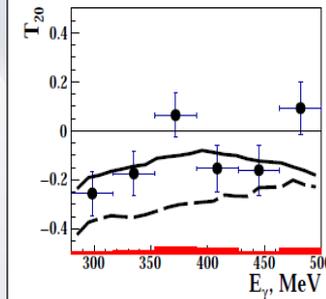
^d Stepanov Institute of Physics, 220072 Minsk, Belarus

^e Institute of Applied Physics, National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, 220072, Belarus

^f Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics, Tomsk, 634050, Russia

^g Budker Institute of Nuclear Physics, 630090 Novosibirsk, Russia

^h Novosibirsk State University, 630090 Novosibirsk, Russia



Зависимость компонент T_{20} , T_{21} и T_{22} тензорной анализирующей способности реакции $\gamma d \rightarrow \pi^0 p n$ от энергии γ -кванта (слева) и от инвариантной массы системы пион-нейтрон (справа). Кружки – экспериментальные результаты. Пунктирная линия – расчет в импульсном приближении, сплошная линия – расчет с учетом NN и πN взаимодействий.

Список публикаций за 2023 г.

1. Gauzshtein V.,...The role of final-state interaction in tensor polarization effects of the reaction $\gamma d \rightarrow p n \pi^0$ // Scientific Reports. - 2023. - Vol. 13. - Art.nr 7532. - Bibliogr.: 23 ref. - DOI 10.1038/s41598-023-34555-4.
2. Гаузштейн В.В.,...Измерение T_{20} -компоненты тензорной анализирующей способности реакции некогерентного фоторождения π^- -мезона на дейтроне // Письма в "Журнал экспериментальной и теоретической физики". - 2023. - Т. 117, № 11/12. - С. 803-807. - Библиогр.: 21 назв. - DOI 10.31857/S1234567823110010.
3. Топорков Д.К., ...Измерение поляризации дейтериевого атомного пучка с помощью поляриметра лэмбовского сдвига // Приборы и техника эксперимента. - 2023. - № 4. - С. 13-20. - Библиогр.: 6 назв. - DOI 10.31857/S0032816223030278.
4. Kuzmenko A.,...Measurement of the Tensor-Analyzing Power Component T_{20} for Incoherent Negative Pion Photoproduction on a Deuteron // Atoms. - 2023. - Vol. 11, Is. 6. - Art.nr 99. -7 p. - Bibliogr.: 23 ref. - DOI 10.3390/atoms11060099.
5. Vasilishin B.I.,...Measurement of the Tensor Analyzing Power T_{20} for the Reaction $\gamma d \rightarrow p n \pi^0$ in the Region of low Proton Energies // Moscow University Physics Bulletin. - 2023. - Vol. 78, Is. 2. - P. 149-154. - Bibliogr.: 29 ref. - DOI 10.3103/S0027134923020169.
6. Gauzshtein V.V.,...Measurement of the T_{20} Component of the Tensor Analyzing Power of the Incoherent Photoproduction of a π^- Meson on a Deuteron // JETP Letters. - 2023. - Vol. 117, Is. 11. - P. 799-803. - Bibliogr.: 21 ref. - DOI 10.1134/S002136402360132X.

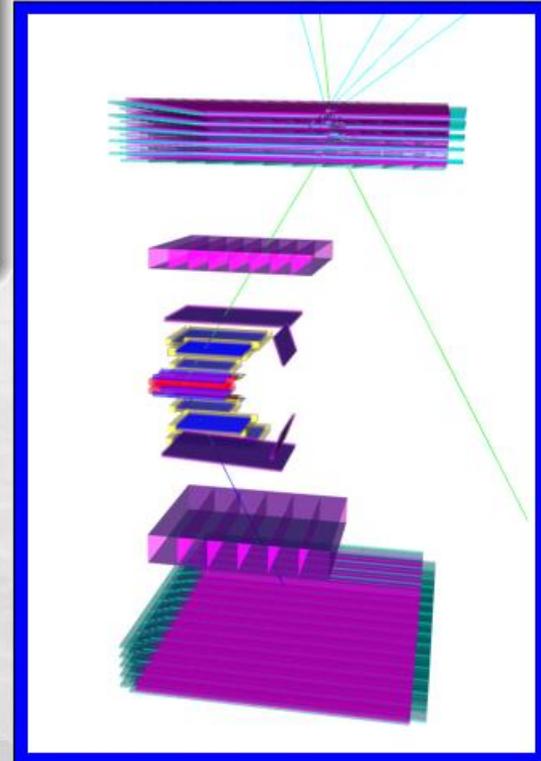
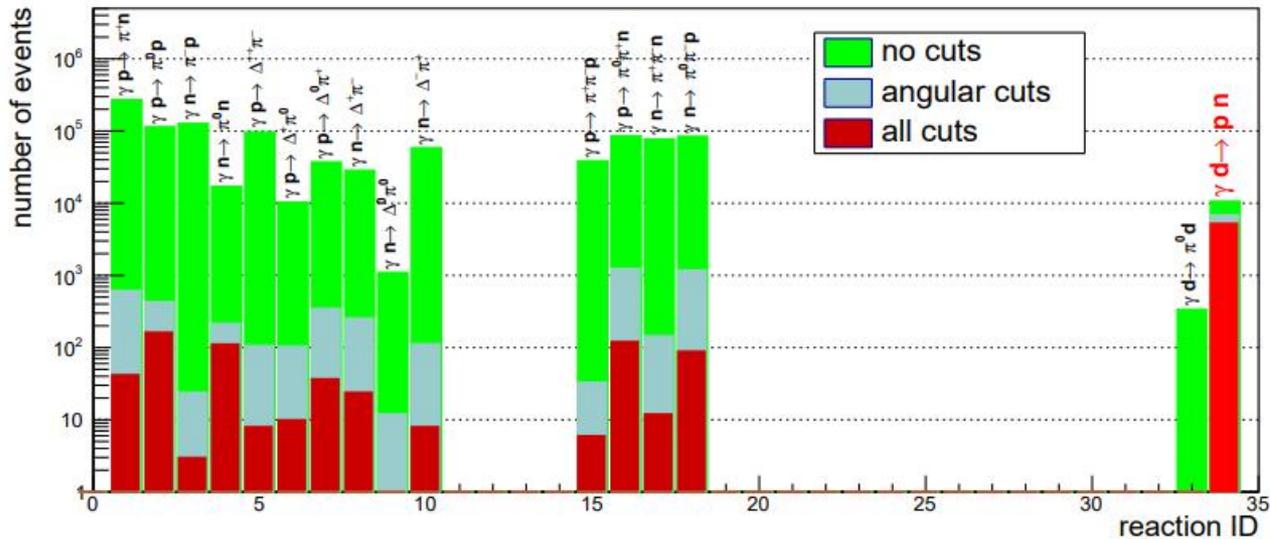
1. Обработка стат. данных заходов 2021 и 2023 гг.
2. Завершение работ с вершинными камерами.
3. Создание MRPC (многозаярная искровая камера с резистивными плоскостями):
 - в БФУ им. Канта изготовили для нас электропроводящую плёнку;
 - в ближайшие дни будет закончен прототип MRPC;
 - ближе к лету начнется разработка окончательного варианта MRPC.
4. Модернизация ABS (создание нового источника на постоянных магнитах).
5. Работы на стенде с ABS и LSP.
6. Ремонт пультовой "Дейтрон".

СПАСИБО ЗА ВНИМАНИЕ !

Моделирование

- создана конфигурация детектора в GEANT4
- использован пакет GENBOS в качестве генератора событий
 - фотореакции на нуклонах и дейтроне от порога рождения пиона до 10ГэВ
 - феноменологическое описание 31 каналов реакций
 - учтены резонансные и нерезонансные вклады
- проведен анализ эффективности селекции событий

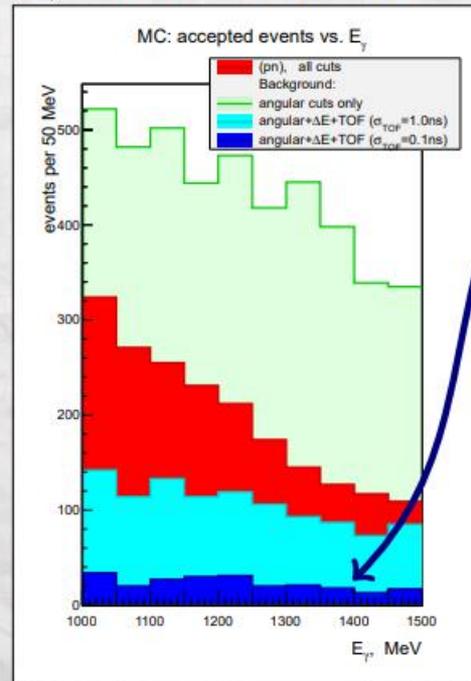
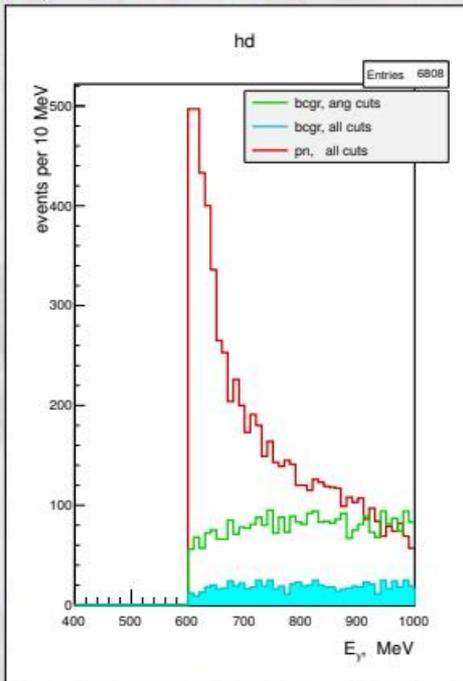
GENBOS+GEANT4, range 2: $E_\gamma = 600-1000 \text{ MeV}$



Моделирование: неотделимый фон

Эффект / фон: диапазон
 $E_\gamma = 600 - 1000$ МэВ

Эффект / фон: диапазон
 $E_\gamma = 1000 - 1500$ МэВ



Для подавления фона при $E_\gamma > \sim 1000$ МэВ нужно измерять TOF с разрешением лучше 100 псек \Rightarrow применить MRPC !

NUCLEAR EXPERIMENTAL
TECHNIQUES

Time Resolution of a 6-Gap Resistive Plate Chamber with Strip Readout

V. V. Ammosov^a, O. P. Gavrishchuk^b, V. A. Gapienko^a, V. G. Zaets^a, N. A. Kuz'min^b, Yu. M. Sviridov^a,
 A. A. Semak^a, S. Ya. Sychkov^b, E. A. Usenko^b, and A. I. Yukaev^b

^a Institute for High Energy Physics, ul. Pobedy 1, Protvino, Moscow oblast, 142281 Russia
^b Laboratory of High Energy Physics, Joint Institute for Nuclear Research, ul. Joliot-Curie 6, Dubna, Moscow oblast, 141980 Russia

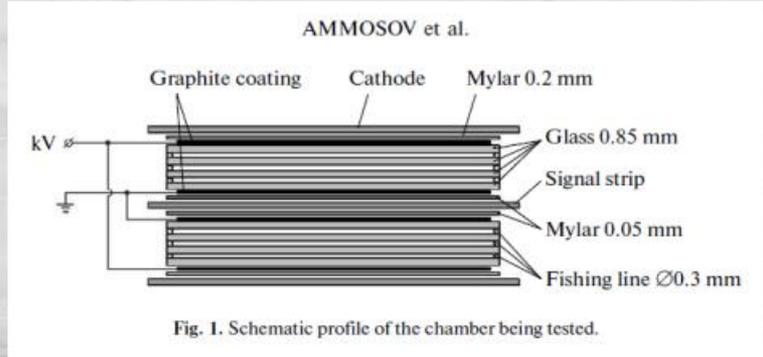
Received July 9, 2009

Abstract—A 6-gap glass resistive plate chamber with a strip readout was tested on the beam of the U-70 accelerator at the Institute for High Energy Physics. A time resolution of ~ 45 ps was attained at an efficiency of $>98\%$. The position resolution along a strip was estimated to be ~ 1 cm.

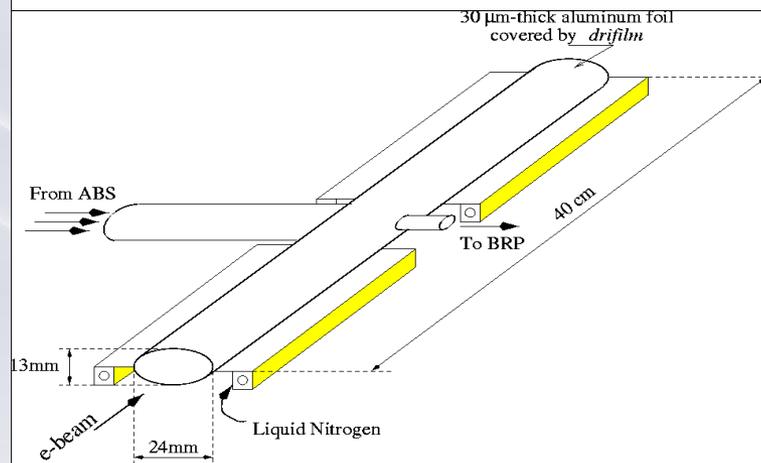
DOI: 10.1134/S0020441210020041

~45 ps

- ## отбор событий
- угловые корреляции 2-частичной реакции
 - ΔE -анализ и TOF-анализ для протона
 - анти-совпадетель в нейтронном плече
 - гамма/нейтрон по TOF (1нсек разрешение)



Поляризованная мишень с накопительной ячейкой



Выигрыш по сравнению со струей:

$$K = 1.1 \frac{(L/2)^2}{D^2} \sqrt{T_{jet}/T_{cell}} \approx 65$$

Измерение T_{20} в упругом ед-рассеянии

Сечение рассеяния электронов на неполяризованных дейтронах имеет вид

$$\frac{d\sigma_0}{d\Omega} = \sigma_{Mott}[A(q^2) + B(q^2) \operatorname{tg}^2(\theta_e/2)],$$

здесь σ_{Mott} - моттовское сечение (сечение рассеяния безмассовой частицы со спином 1/2 на бесспиновом точечном заряде ($Z = 1$))

$$A = G_C^2 + (8/9)\eta^2 G_Q^2 + (2/3)\eta G_M^2, \quad B = (4/3)\eta(1 + \eta)G_M^2, \quad \text{где } \eta = q^2/(4M_d^2).$$

в случае поляризованной мишени и неполяризованного пучка

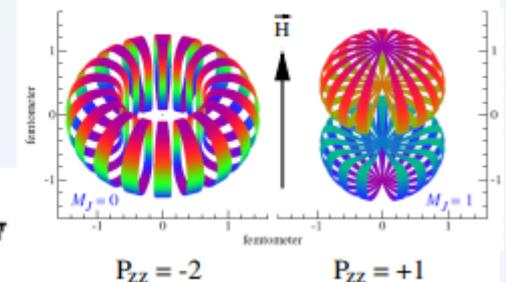
$$\frac{d\sigma}{d\Omega} = \frac{d\sigma_0}{d\Omega} \left\{ 1 - \sqrt{\frac{3}{4}} P_z \sin \theta_H \sin \phi_H T_{11} + \sqrt{\frac{1}{2}} P_{zz} \left[\frac{3 \cos^2 \theta_H - 1}{2} T_{20} - \sqrt{\frac{3}{8}} \sin 2\theta_H \cos \phi_H T_{21} + \sqrt{\frac{3}{8}} \sin^2 \theta_H \cos 2\phi_H T_{22} \right] \right\}$$

$P_z = n_+ - n_-$ – степень векторной поляризации мишени

$P_{zz} = 1 - 3 \cdot n_0$ – степень тензорной поляризации мишени

n_+, n_-, n_0 – заселенность подуровней с проекцией спина дейтрона +1, -1 и 0, соответственно.

Поверхность постоянной плотности $\rho = 0.24 \text{ фм}^{-3}$ в дейтроне



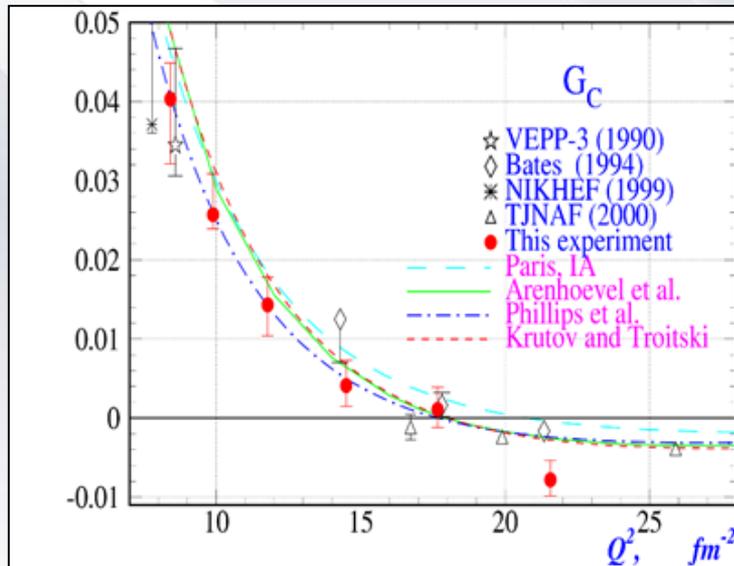
$$Q = \frac{1}{e} \int (3z^2 - r^2) \rho(\vec{r}) dV$$

Измерение T_{20} в упругом ед-рассеянии

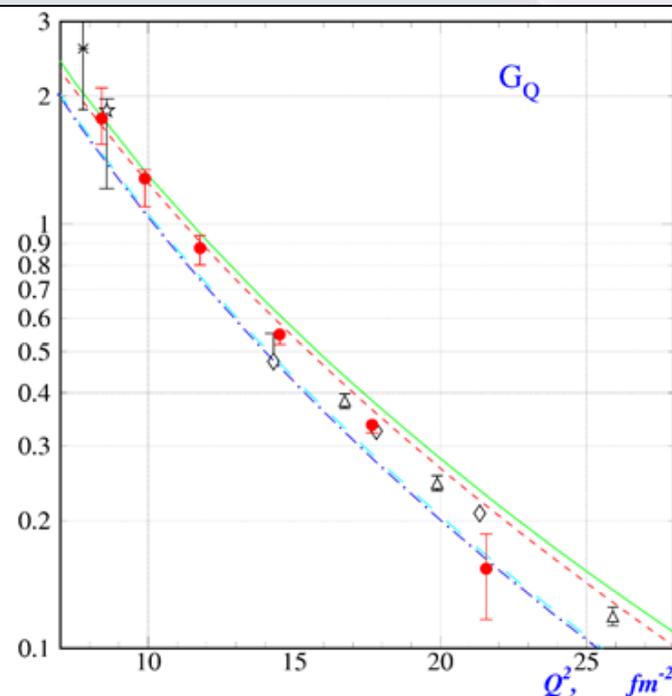
Компоненты анализирующей способности реакции выражаются через формфакторы дейтрона следующим образом:

$$T_{20} = -\frac{\sqrt{2}}{3}\eta \frac{4G_Q(G_C + \frac{\eta}{3}G_Q) + [1/2 + (1 + \eta)tg^2\theta/2]G_M^2}{A(q^2) + B(q^2)tg^2\theta/2},$$

$$T_{21} = \frac{2}{\sqrt{3}}\eta^{3/2} \frac{\sqrt{1 + (1 + \eta)tg^2\theta/2}G_Q G_M}{A(q^2) + B(q^2)tg^2\theta/2}, \quad T_{22} = \frac{\eta}{2\sqrt{3}} \frac{G_M^2}{A(q^2) + B(q^2)tg^2\theta/2}.$$



D. M. Nikolenko, H. Arenhövel, L. M. Barkov et al
Phys. Rev. Lett., **90** (2003) 072501

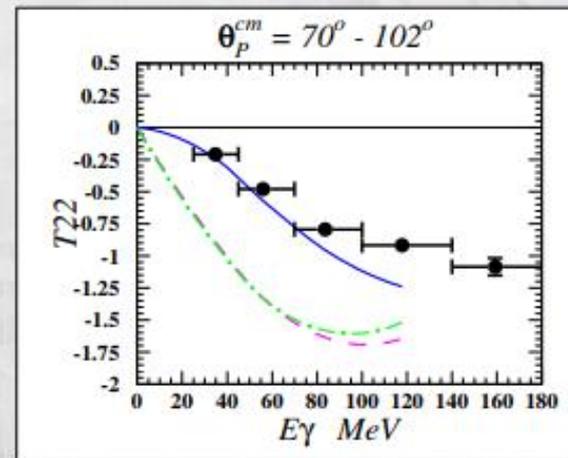
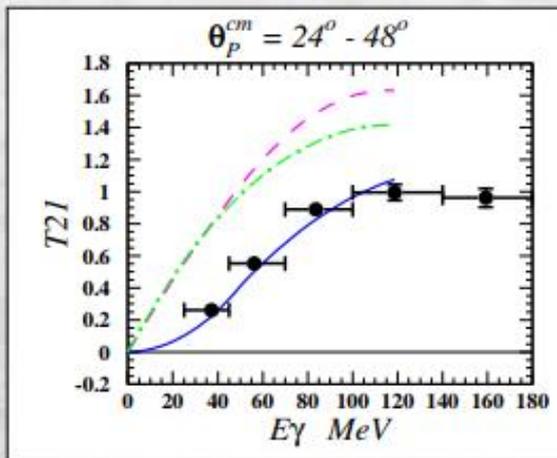
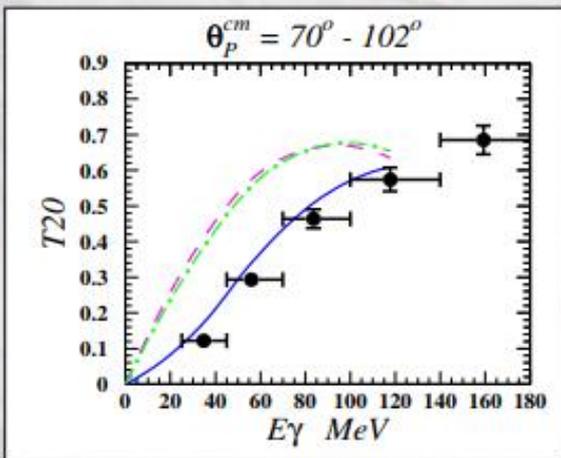
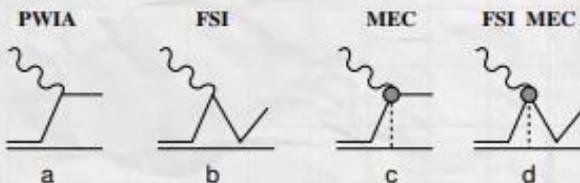


Сравнение с теорией :: пример для малых энергий

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)