

Study of the Nucleon Spin Structure in Strong and Electromagnetic Interactions

Изучение спиновой структуры нуклона в сильных и электромагнитных взаимодействиях

Проект “GDH & SPASCHARM & NN”

ТЕМА 04-2-1126-2015/2020

Дубна—Протвино—Прага—Москва—Майнц—Глазго—Лос-Анджелес
Базель—Лунд—Загреб—Павия—Лунд—Харьков—Бохум
Бонн—Амхерст—Гиссен—Галифакс—Иерусалим—Кент-Реджина—Саквилл
Вашингтон—Йорк

Аннотация

Дубна

2020

Изучение спиновой структуры нуклона в сильных и электромагнитных взаимодействиях

Проект “GDH & SPASCHARM & NN”

Дубна, Лаборатория ядерных проблем им. В.П. Джелепова, ОИЯИ

Н.А. Бажанов, Н.С. Борисов, А.С. Должиков, А.Н. Федоров, И.В. Гапиенко, И. Городнов, Г.М. Гуревич, В.Л. Кашеваров, А. Ковалик, Е.С. Кузьмин, А.Б. Лазарев, А.Б. Неганов, Ю.А. Плис, А.А. Приладышев, А.Б. Садовский, Ю.А. Усов, Ю.Н. Узиков, В.П. Вольных

Дубна, Лаборатория ядерных реакций им. Г.Н. Флерова, ОИЯИ

М.П. Иванов

Дубна, Лаборатория теоретической физики им. Н.А. Боголюбова, ОИЯИ

С.Б. Герасимов, С.С. Камалов

Содержание

1	Введение	1
2	Проект SPASCHARM.....	2
	2.1 Поляризованная замороженная спин-мишень в Протвино	4
	2.2 Основные результаты.....	4
3	GDH.....	5
	3.1 Основные результаты.....	6
4	NN-взаимодействия.....	9
	4.1 Основные результаты.....	13
5	Рабочий план: 2020 – 2021 – 2022.....	13

1 Введение

Огромный объем экспериментальных данных о сечениях ядерных реакций, накопленных за десятилетия измерений, тем не менее не представляется исчерпывающим без учета зависимости от спинов взаимодействующих частиц. Только поляризационные эксперименты позволяют получить все независимые амплитуды, описывающие конкретную реакцию. Другими словами, только поляризационные измерения позволяют получить полную информацию о любом изучаемом физическом процессе.

Теоретические и экспериментальные исследования в этой области являются традиционными для ОИЯИ [1]. В последние годы совершенствование экспериментальных методов открыло новые возможности для исследования поляризационных степеней свободы нуклона.

Этот проект охватывает три проблемы физики спинов:

1) Экспериментальное исследование одно-спиновых асимметрий при производстве различных легких частиц с использованием пучка с энергией 28 ГэВ π -на первом этапе и изучение одно-спиновых и двух-спиновых асимметрий в десятках реакций, в том числе с образованием чармония, с использованием поляризованного протонного пучка (проект SPASCHARM).

Конечной целью проекта SPASCHARM является изучение спиновой структуры протона, начиная с определения вклада глюона в спин протона при больших значениях переменной Бьоркена x путем изучения спиновых эффектов при образовании чармония. Это позволит понять механизм образования адронного чармония и выделить поляризацию глюона при больших значениях x .

2) Эксперименты с реальным пучком фотонов: фоторождение мезонов на нуклонах и ядрах и комптоновское рассеяние на нуклонах. Основные цели: экспериментальное подтверждение правила сумм Герасимова-Дрелла-Хирна (GDH), исследование спиральной структуры парциальных каналов реакции, разрешение спектра возбуждения барионов из легких кварков, поиск недостающих барионных резонансов и экзотических состояний (дибарионы, узкие нуклонные резонансы), изучение строения адронов.

3) Измерение $\Delta\sigma_T$ и $\Delta\sigma_L$ в эксперименте по пропусканию nd при энергиях нейтронов <16 МэВ, где имеются ограниченные экспериментальные данные и где теория предсказывает существенный эффект 3NF. Данная часть проекта является продолжением тех же измерений величин рассеяния нейтронов на протонах, которые проводились ранее.

Технически, три части данного проекта объединены использованием поляризованных протонных и дейтронных мишеней с замороженным спином.

2 Проект SPASCHARM

Высокая чувствительность к содержанию глюонов во взаимодействующих частицах является одной из основных особенностей образования чармония в адронных взаимодействиях. В случае столкновения двух продольно поляризованных протонов он используется для определения поляризации глюона $\Delta G/G$ в протоне. Для проведения этого исследования необходим поляризованный протонный пучок. Он будет использован на втором этапе эксперимента после завершения измерений одно-спиновых асимметрий при производстве чармония.

Наличие поляризации как протонов, так и антипротонов в CP-нейтральной pp -системе потенциально открывает возможности для изучения и сравнения сопряженных CP-реакций в этой системе. Это позволяет нам взглянуть на CP-инвариантность с нового ракурса, недоступного для столкновений неполяризованных частиц. Интересно, что коллаборация LHCb только что представила на Rencontres de Moriond EW и на специальном семинаре CERN первое наблюдение нарушения CP в распадах очарованных частиц. Окончательный результат, который использует, по существу, полную выборку данных LHCb, собранных до настоящего времени, представлен величиной $A_{CP} = (-0,154 \pm 0,029)\%$, отличие которой от нуля количественно определяет наблюдаемые нарушения CP [2].

Стратегические направления эксперимента SPASCHARM:

Этап 1. Одно-спиновая асимметрия на линии пучка 14 (2018-2021) [3], включая первые измерения поляризации и накопления.

Этап 2. Создание поляризованных протонных и антипротонных пучков (исследование планируется начать в 2022 – 2023 гг.).

На первом этапе будут использоваться неполяризованные пучки. Первый этап предусматривает изучение одно-спиновой асимметрии A_N легких частиц, состоящих из u -, d - и s -валентных кварков. Поперечная одно-спиновая асимметрия очень давно и хорошо известна. В стандартной модели QCD на уровне начального кручения все A_N малы или близки к нулю. Но эксперименты показывают очень большую величину A_N (до 40%) в области конфайнмента. Чтобы различить существующие теоретические подходы и стимулировать разработку новых подходов, необходимо систематическое изучение A_N для большого числа различных инклюзивных и эксклюзивных реакций, особенно в области конфайнмента, которая является наиболее неясной для теории. Такое систематическое исследование является основной целью первого этапа проекта SPASCHARM [4-7]. Это, наконец, подготовит экспериментальную установку ко второму этапу проекта, где потребуются только один новый элемент, а именно поляризованный протонный пучок от У-70.

Эффекты двойного вращения в десятках реакций будут измеряться с использованием поляризованной мишени и пучка (протон и антипротон) для исследования динамики спина и структуры спина протона.

Последние достижения в области определения функций распределения поляризованных партонов, обусловленные новыми измерениями в поляризованных протон-протонных столкновениях на Релятивистском коллайдере тяжелых ионов, позволили определить [8], что вклад глюона положителен при различных подходах и равен $\Delta G = 0,20^+ 0,06, 0,07$ для DSSV14 [9] и $\Delta G = 0,23 \pm 0,06$ для NNPDFpol 1.1. интегрированных в интервал x 0,05 - 1 и $Q^2 = 10$ ГэВ² [10]. Тем не менее, данные результаты зависят от модели, в то время как измерения SPASCHARM предоставят уникальную возможность измерять ΔG напрямую.

Информация о поляризации глюонов может быть получена путем одновременных измерений A_{LL} при инклюзивном образовании χ_{c2} и J/Ψ . Этот эксперимент был предложен в Fermilab (P838) при 200 ГэВ как продолжение E704 [11]. РАС Fermilab указал, что физика была очень интересной, но интенсивность поляризованного протонного пучка от распадов Λ -гиперона была бы небольшой, поэтому статистические данные были бы недостаточными. Данный эксперимент не был одобрен.

Целью предлагаемого эксперимента является измерение двойной спиновой асимметрии A_{LL} с использованием продольно поляризованного пучка и мишени в процессе:

$$p \rightarrow + p \rightarrow \chi_{c2}(J/\Psi) + X, (\chi_{c2} \rightarrow J/\Psi + \gamma). \quad (1)$$

J/Ψ будет регистрироваться через распад $\mu^+ + \mu^-$ из-за тормозного излучения в режиме распада $e^+ e^-$. Изучаемые состояния чармония: J/Ψ (3096, $J^{PC} = 1^-$), χ_{c1} (3510, $J^{PC} = 1^{++}$) и χ_{c2} (3555, $J^{PC} = 2^{++}$). Измеренная экспериментальная асимметрия определяется с помощью

$$A_{LL} = \frac{1}{P_B P_T} \cdot \frac{I^{++} - I^{+-}}{I^{++} + I^{+-}} \quad (2)$$

где P_B – поляризация пучка, P_T – поляризация мишени, I^{++} , I^{+-} количество событий, нормализованных по интенсивности налетающего пучка. Состояния спиральности ($^{++}$) и ($^{+-}$) соответствуют состояниям ($\rightarrow\rightarrow$) и ($\leftarrow\rightarrow$), соответственно, где стрелки указывают направление вращения пучка и мишени в лабораторной системе.

Экспериментальная установка SPASCHARM включает в себя:

- спектрометр с широкой апертурой с GEM, дрейфовыми и пропорциональными камерами;
- электромагнитный калориметр и

- мюонный детектор.

Будет построен тонкосегментный электромагнитный калориметр типа «шашлык» с энергетическим разрешением $\Delta E/E$ около 3%. Крайне необходимо очень точно детектировать γ -кванты из χ -распадов, чтобы разделить χ_{c1} и χ_{c2} с помощью высокоточного энергетического разрешения калориметра. Мы предлагаем одновременно измерять асимметрию двойного спина A_{LL} для инклюзивных χ_{c2} , χ_{c1} и J/Ψ , используя продольно поляризованный пучок протонов с энергией 45 ГэВ на продольно поляризованной мишени. Принципиальным вопросом для этого эксперимента является разделение двух состояний чармония со спинами, равными 1 и 2, а именно χ_{c1} (3510) и χ_{c2} (3555). Было проведено моделирование по методу Монте-Карло для 45 ГэВ. Мы видим, что эти два состояния хорошо разделены.

2.1 Поляризованная замороженная спин-мишень в Протвино

Авторы проекта предлагают использовать модернизированную мишень из замороженного спина, основанную на той, которая была разработана ранее в ЛЯП ОИЯИ [12,13].

Мишень включает в себя стационарный криостат с холодильником разбавления, электромагнит, высокочастотный генератор, обеспечивающий динамическую поляризацию, и матрицу обнаружения сигнала ЯМР.

В режиме DNP полюса магнита находятся в положении, когда магнитная цепь замкнута, магнитное поле достигает 2,5 Тл, а однородность не хуже 10^{-4} в пределах объема мишени. Когда полюса открыты, магнитное поле составляет 0,4 Тл в зазоре 20 см, а однородность составляет 10^{-2} .

Целевым материалом является 1,2-пропандиол $C_3H_8O_2$ (объем 20 см³) с парамагнитной примесью $Cr(V)$. Максимальная полученная протонная поляризация составила 93% и 98% для положительных и отрицательных значений соответственно. В режиме DNP $T = 200$ мК. Для динамического наращивания поляризации используется транзистор с кварцевым генератором с выходной мощностью ≈ 400 мВт на частоте ≈ 67 ГГц. Время поляризации, необходимое для получения $0.8P_{max}$, составляет ≈ 40 мин.

В режиме замороженного спина мишень поддерживается при температуре 20 мК в удерживающем магнитном поле 0,45 Тл. В этих условиях время спиновой релаксации составляло ≈ 1200 ч для положительной поляризации и 800 ч для отрицательной поляризации.

Измерение поляризации мишени выполняется с помощью многофункционального Q-метра с фазовым детектором на рабочей частоте около 102 МГц [14].

2.2 Основные результаты

Первые данные для изучения одно-спиновых асимметрий в эксперименте SPASCHARM были получены в 2018 году (анализ только начался).

Публикации:

1. The polarized proton and antiproton beam project at U-70 accelerator V.V. Abramov (Serpukhov, IHEP & Kurchatov Inst., Moscow) et al.. 2018. 7 pp. Published in Nucl. Instrum. Meth. **A 901** (2018) 62.
2. Measurements of the Beam and Target Analyzing Powers and Spin Correlation Parameter ANN in Elastic pp Scattering at 45 GeV/c. V.V. Abramov (Serpukhov, IHEP) et al.. 2018, Published in KnE Energ.Phys. **3** (2018) 326.
3. Comparative study of the inclusive asymmetries induced by polarized protons and antiprotons at 16 GeV/c at the U-70 accelerator V.A. Okorokov (Moscow Phys. Eng. Inst.) et al..

Oct 16, 2017. 7 pp. Published in J. Phys. Conf. Ser. **938** (2017) no.1, 012014.

4. Polarized proton and antiproton beams for the SPASCHARM experiment at Y-70 accelerator I.I. Azhgirey et al, Published in J. Phys. Conf. Ser. **798** (2017) no.1, 012177.

5. Study of single-spin asymmetries with polarized target at the SPASCHARM experiment at Y-70 accelerator V.V. Abramov (Serpukhov, IHEP) et al.. 2017. 5 pp. Published in J.Phys.Conf.Ser. 798 (2017) no.1, 012096.

6. Beam polarimetry at the SPASCHARM experiment at IHEP Y-70 accelerator A.A. Eng. Inst. & Kurchatov Inst., Moscow) et al.. 2017. 5 pp. Published in J. Phys. Conf. Ser. **798** (2017) no.1, 012179.

7. Simultaneous measurements of spin observables AN and ANN in elastic pp scattering (extension of the SPASCHARM program at Y-70). V.V. Abramov (Serpukhov, IHEP) et al.. 2017, Published in J. Phys. Conf. Ser. **938** (2017) no.1, 012006.

3 GDH

Микротрон Института ядерной физики Университета им. Йоханнеса Гутенберга в Майнце был построен в 1979 году. Первым этапом был МАМІ-А1, где использование принципа микротрона привело к максимальной энергии электронов 14 МэВ. За ним последовал МАМІ-А2 в 1983 году, когда была введена в эксплуатацию установка с энергией 183 МэВ. В 1991 году был завершен МАМІ-В, производящий электроны до 855 МэВ. МАМІ-В представляет собой ускоритель электронов с непрерывной волной со 100% рабочим циклом, максимальным током 100 мкА и максимальной энергией 855 МэВ.

В 2006 году энергия пучка ускорителя электронов в Майнце была увеличена с 855 МэВ (МАМІ-В) до 1604 МэВ (МАМІ-С) при сохранении качества выдаваемого пучка. Система фотонных меток коллаборации А2 была соответственным образом модернизирована для использования расширенного диапазона энергий и теперь обеспечивает отмеченные энергией циркулярно-поляризованные фотоны с максимальной энергией свыше 1550 МэВ. Чтобы пометить высокоэнергетическую часть спектра тормозного излучения, был разработан специальный спектрометр с меткой конечной точки. Это особенно важно для измерения фоторождения η' мезонов. Использование кристалла алмаза в качестве излучателя позволяет получать линейно поляризованные фотоны.

Программа экспериментов направлена на изучение различных аспектов спин-вкусовой КХД структуры нуклонов. Она включает в себя проверку правила сумм Герасимова-Дрелла-Хирна (GDH) для протона и нейтрона в более широком диапазоне энергий. Точные измерения спиральной асимметрии фоторождения мезонов с различными конечными состояниями (включая нейтральные) дадут более подробную информацию о свойствах нуклонного резонанса и мультипольных амплитудах. Измерения с использованием различных комбинаций поляризации пучка и мишени позволят провести высоко-качественное определение поляризационных наблюдаемых. Предусматривается также извлечение информации о спиновой поляризуемости нуклонов из экспериментальных данных.

Мультипольный анализ полученных экспериментальных данных с помощью постепенно улучшающегося пакета MAID [15] обеспечивает прочную основу для теоретической обработки. Последняя модификация пакета [16] уже доступна в режиме онлайн:

<https://maid.kph.uni-mainz.de/eta2018/etamaid2018.html>. В настоящее время также ведется активная теоретическая работа по улучшению и оптимизации различных схем расчетов, включая КХД-решетку и теорию кирального возмущения.

Эксперименты проводятся с пучком фотонов ускорителя электронов МАМІ С,

Майнц, Германия. Основная экспериментальная установка:

- 1) Пучок меченых фотонов (неполяризованный, с круговой поляризацией, с линейной поляризацией).
- 2) Детекторная система:

– Спектрометр для 4π фотонов CB/TAPS (100% телесный угол покрытия для частиц, распадающихся на два или более вторичных фотонов, 97% от 4π для одиночных фотонов, обнаружение нейтронов и заряженных частиц также возможно в ограниченных областях энергии).

– Crystal Ball (CB) имеет перекрытие с полярным углом в диапазоне $20 - 160^\circ$ и TAPS: $(1 - 20)^\circ$. КБ состоит из 672 кристаллов NaI (Tl) с длиной излучения 15,7.

– TAPS состоит из 366 кристаллов BaF₂ с 12 длинами излучения и дополнен 5-миллиметровым пластиковым сцинтиллятором перед каждым модулем (VETO).

– MWPC, 2 цилиндрические многопроволочные пропорциональные камеры для восстановления вершин, коррекции положения мишени (z) и контроля положения пучка (x, y).

– PID (детектор идентификации частиц) состоит из массива пластиковых сцинтилляционных полосок толщиной 24 мм. Это детектор VETO для фотонов в Crystal Ball, он также работает как детектор $\Delta E/E$ для идентификации заряженных частиц в Crystal Ball.

– Протонный поляриметр отдачи. Метод: обнаружение протона, рассеянного в графитовом анализаторе, и сравнение его угла с кинематической реконструкцией.

- 3) Дубна-Майнц, замороженная спин-мишень (доступна с 05.2010).

Для проведения запланированных измерений двойной поляризации с помощью детектора Crystal Ball на поляризованных протонах и дейтронах, в сотрудничестве с Объединенным институтом ядерных исследований был построен специально разработанный большой горизонтальный холодильник для разбавления $^3\text{He}/^4\text{He}$ [17-24]. Сверхпроводящий удерживающий магнит допускает продольную и поперечную поляризации. Бутанол, легированный тритием, и дейтерированный бутанол являются лучшими материалами для этого эксперимента.

Основные параметры:

При общем потоке меченых фотонов $5 \times 10^7 \text{ сек}^{-1}$ и целевой температуре 30 мК было получено время релаксации около 2000 часов [25].

Целевая плотность протонов в ячейке диаметром 2 см: $N_T \approx 9,1 \cdot 10^{22} \text{ см}^{-2}$ (включая коэффициенты разбавления и наполнения).

Максимальные поляризации при 2,5 Т: для протонов $\approx 90\%$, для дейтронов $\approx 75\%$.

Средняя протонная поляризация $P_p = 70\%$.

Средняя нейтронная поляризация $P_n = 50\%$

3.1 Основные результаты

1. Первый в истории успешный эксперимент с активной поляризованной мишенью был реализован на пучке меченых циркулярно фотонов ускорителя МАМІ (Майнц). Высокая эффективность и низкий порог обнаружения протонов отдачи в мишени открывают новые перспективы для изучения спиновой структуры протонов и извлечения независимых от модели

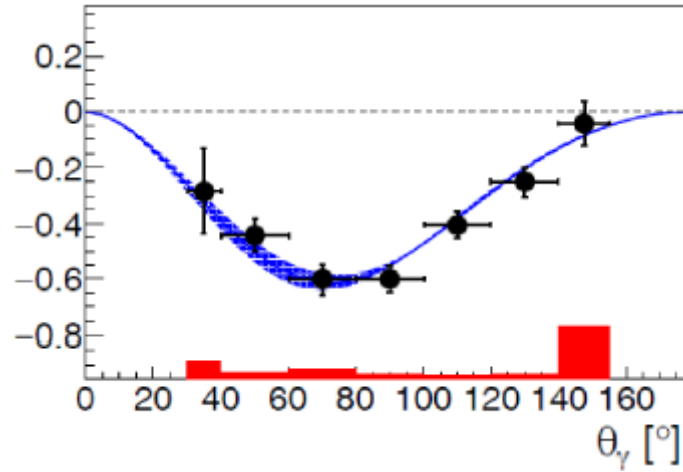


Рисунок 1: Асимметрия пучка Σ_3 в диапазоне 119-139 МэВ. Точки – эксперимент, кривая – расчет ЧПТ (публикация [1]).

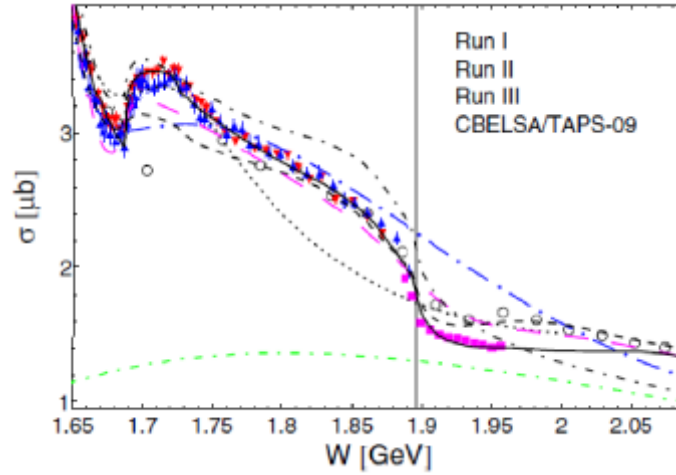


Рисунок 2: $\gamma p \rightarrow \eta p$ полное сечение.

данных. Измерены поляризационные наблюдаемые для фоторождения π^0 и π^+ , а также асимметрия комптоновского рассеяния, позволяющая извлечь модельно-независимые данные о поляризуемости спина протона.

2. Первые измерения асимметрии пучка Σ_3 для комптоновского рассеяния ниже порога фотопродуцирования пиона были проведены (рис. 1) с помощью коллаборации A2 на пучке меченых фотонов с поляризованной энергией ускорителя MAMI (Майнц). Данные результаты подтверждают существующие предсказания теории возмущений и моделей дисперсионных соотношений и заметно отличаются от члена Борна, в который не включены вклады поляризуемостей протонов. Полученные результаты показывают, что извлечение данных о скалярной поляризуемости из асимметрии пучка ниже порогового значения обеспечивает альтернативу извлечению из неполяризованного комптоновского сечения рассеяния (публикация [1]).

3. Реакции $\gamma p \rightarrow \eta p$ и $\gamma p \rightarrow \eta' p$ были измерены от их порогов до энергии центра масс $W = 1,96$ ГэВ с помощью установки на меченных фотонах на микротроне Майнца.

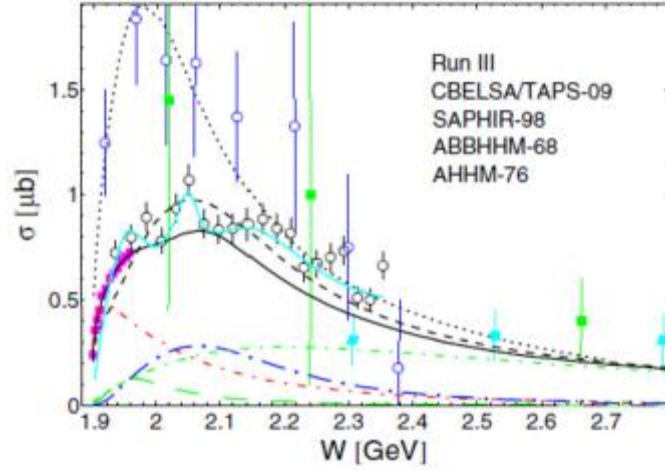


Рисунок 3: $\gamma p \rightarrow \eta' p$ полное поперечное сечение.

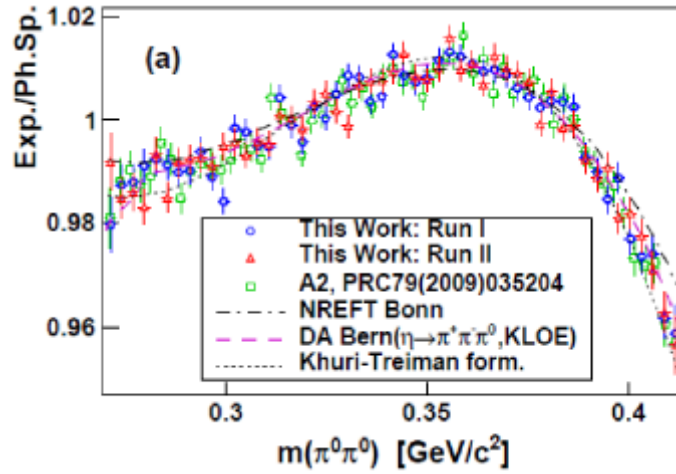


Рисунок 4: Объяснение – в тексте.

МАМІ. Дифференциальные сечения были получены с беспрецедентной точностью, обеспечивая точное распределение энергии и полный охват производственного угла. Сильный выступ наблюдается в общем сечении фотопроизводства η при энергиях в окрестности порога η , $W = 1896$ МэВ ($E_\gamma = 1447$ МэВ) (Рис. 2). Такое поведение в сочетании с резким увеличением общего сечения фотопроизводства η' относительно его порога (рис. 3) объясняется в пересмотренной изобарной модели η MAID2017 вкладом нуклонного резонанса $N(1895) 1/2^-$. Новые прецизионные данные позволили определить свойства данного резонанса (публикация [2]).

4. Распад $\eta \rightarrow 3\pi$, запрещенный изоспиновой симметрией, в основном происходит из-за разницы в массе u и d кварков. Прецизионное измерение этого распада как для заряженного, так и для нейтрального режимов может использоваться в качестве чувствительного теста на величину нарушения изоспина в КХД. Коллаборация A2 измерила реакцию $\gamma p \rightarrow \eta p$ с большим объемом статистики на ускорителе МАМІ. Наиболее точные на данный момент данные о распаде $\eta \rightarrow 3\pi^0$ были получены из этих измерений, что позволило детально изучить его динамику. Представленные данные сравниваются с последними теоретическими расчетами (рис. 4) (публикация [3]).

- ПУБЛИКАЦИИ: 1. V. Sokhoyan, N.S. Borisov, G.M. Gurevich, A.B. Lazarev, A.B. Neganov, Yu.A. Usov et al. Determination of the scalar polarizabilities of the proton using beam asymmetry Σ_3 in Compton scattering. *Eur. Phys. J. A* **53** No. 2 (2017) 14.
2. V.L. Kashevarov, N.S. Borisov, G.M. Gurevich, A.B. Lazarev, A.B. Neganov, Yu.A. Usov et al. Study of η and η' photoproduction at MAMI. *Phys. Rev. Lett.* **118** Iss. 21, 212001 (2017).
3. S. Prakhov, N.S. Borisov, G.M. Gurevich, A.B. Lazarev, A.B. Neganov, Yu.A. Usov et al. High-statistics measurement of the $\eta \rightarrow 3\pi^0$ decay at the Mainz Microtron. *Phys. Rev. C* **97** No. 6, 065203 (2018).
4. P. Adlarson et al., Measurement of the $\omega \rightarrow \pi^0 e^+ e^-$ and $\eta \rightarrow e^+ e^- \gamma$ Dalitz decays with the A2 setup at MAMI. *Phys. Rev. C* **95** (2017) 035208.
5. P. Adlarson et al., Measurement of the $\pi^0 \rightarrow e^+ e^- \gamma$ Dalitz decay at the Mainz Microtron. *Phys. Rev. C* **95** (2017) 025202.
6. L. Witthauer et al., Helicity-dependent cross sections and double-polarization observable E in η photoproduction from quasifree protons and neutrons. *Phys. Rev. C* **95** (2017) 055201.
7. M. Dieterle et al., First measurement of the polarization observable E and helicity-dependent cross sections in single π^0 photoproduction from quasi-free nucleons. *Phys. Lett. B* **770** (2017) 523.
8. P. Adlarson et al., Measurement of the decay $\eta' \rightarrow \pi^0 \pi^0 \eta$ at MAMI. *Phys. Rev. D* **98** (2018) 012001.
9. M. Dieterle et al., Photoproduction of π^0 Mesons off Protons and Neutrons in the Second and Third Nucleon Resonance Region. *Phys. Rev. C* **97** (2018) 065205.
10. A. Kaser et al., First measurement of helicity-dependent cross sections in $\pi^0 \eta$ photoproduction from quasi-free nucleons. *Phys. Lett. B* **786** (2018) 305.
11. M. Bashkanov et al., Deuteron photodisintegration by polarized photons in the region of the $d^*(2380)$. *Phys. Lett. B* **789** (2019) 7.

4 NN-взаимодействия

Проблема ядерных сил является одной из старейших, но все еще остается одной из наиболее важных проблем ядерной физики. Последние достижения в разработке методов нескольких тел в сочетании со значительным увеличением вычислительных ресурсов позволяют проводить точные микроскопические расчеты наблюдаемых с тремя и даже четырьмя нуклонами рассеяния и спектров легких ядер. Это открывает двери для точных проверок базовой динамики и, в частности, роли и структуры трехнуклонных сил (3NF).

Говоря о NN и 3NF, следует иметь в виду, что любое унитарное преобразование гамильтониана не меняет физики. Однако, такая унитарная трансформация, которая относится к потенциалу взаимодействия двух тел, являющихся эквивалентными на оболочке, но различными в области вне оболочки, генерирует силы трех тел [26].

Современный подход теории эффективного поля рассматривает двух- и трехнуклонные силы совместно, то есть самосогласованно [27-29]. Последние результаты по теории NN и 3NF приведены в статьях

[30-33]. Этот подход широко применяется в ядерной физике низких энергий и ядерной астрофизике. Необходимые низко-энергетические параметры теории должны быть извлечены из экспериментальных данных [34].

Ядерные силы подчиняются определенной иерархии, подразумевающей, что эффекты 3NF в среднем намного меньше, чем 2NF. Это может быть продемонстрировано с помощью инклюзивных данных общего pr и nd рассеяния, измеренных в Лос-Аламосе. Первые расчеты, включающие 3NF, показали, что современные модели 3NF могут объяснить примерно 1/2 отклонения расчетов от экспериментальных данных. Эти наблюдения демонстрируют необходимость эксклюзивных измерений, которые могут обеспечить значительно большую чувствительность к эффектам 3NF для конкретных областей в фазовом пространстве или для других наблюдаемых, чем полные сечения [35].

В последние десятилетия в различных лабораториях были разработаны системы детектирования, пригодные для изучения определенных аспектов динамики систем трех тел. Использование поляризованных пучков и/или поляризованных мишеней было очень распространено в последние два десятилетия. В дополнение к протонам и дейтронам, нейтронные пучки также широко используются в TUNL, Бонне, Эрлангене, PSI, Упсале, LANSCE и RCNP. Очевидный недостаток нейтронного пучка состоит в том, что им нельзя манипулировать в линиях пучка, что затрудняет проведение экспериментов. В отличие от детекторов заряженных частиц, где эффективность может быть близка к 100%, эффективность детекторов нейтронов обычно ниже и требует сложной калибровки. Все эти вопросы не составляют особой проблемы в этих экспериментальных исследованиях. Кроме того, теоретические оценки не зависят от модели, поскольку при использовании нейтронных пучков кулоновские искажения отсутствуют.

Было показано, что зависящая от спина разница сечений $\Delta\sigma_L(nd)$ в полном сечении nd чувствительна к тем же компонентам 3NF, которые исправляют проблему энергии связи тритона. $\Delta\sigma_L$ – это разница в полном сечении nd для спинов пучка и мишени, параллельных и антипараллельных друг другу, причем оба спина выровнены по оси импульса пучка. $\Delta\sigma_T$ определяется аналогично. Теоретические расчеты предсказывают, что трехнуклонная сила Тусона-Мельбуерна изменяет $\Delta\sigma_L$ на 5-10% [36] от ее значения, рассчитанного с использованием только потенциалов взаимодействия NN. Полная разность поперечных сечений $\Delta\sigma_L(nd)$ была впервые измерена в TUNL [37] для энергий налетающих нейтронов 5,0, 6,9 и 12,3 МэВ. Результаты сравнивались с теоретическими предсказаниями, основанными на расчетах NN потенциала CD Бонн, с включением и без включения ТМ-3NF, «но они не имеют достаточной точности, чтобы различить наличие или отсутствие в сечениях вклада трехнуклонных сил».

В ядерном центре Карлова университета измерения $\Delta\sigma_L(np)$ и $\Delta\sigma_T(np)$ были выполнены с использованием трансмиссионного метода, то есть была измерена относительная разница в затухании пучка поляризованных нейтронов, проходящего через поляризованную протонную мишень. Поляризованный нейтронный пучок был получен на электростатическом ускорителе Ван де Граафа HV 2500 Ядерного центра Карлова университета (в настоящее время входит в состав IEAP CTU) с использованием реакции $T(d, n)^4He$ с пучком дейтронов ($E_d = 1,82$ МэВ). Для получения моноэнергетического коллимированного нейтронного пучка использовался метод связанных частиц [38]. Поперечно поляризованный нейтронный пучок с энергией $E_n = (16,2 \pm 0,1)$ МэВ подавался под углом $\theta_{lab} = (62,0 \pm 0,7)^\circ$. Значение нейтронной поляризации взято из [39] и составляет $P_n = (-13,5 \pm 1,4)\%$. Физические результаты, полученные в Праге, позволяют по-новому взглянуть на более ранние данные в этом диапазоне энергий. Ранее экспериментальные результаты других авторов (университеты Бонна, Эрлангена, Треугольника) подтвердили гипотезу о минимальном значении ϵ_1 в окрестности 15 МэВ. Наши результаты опровергли это, что хорошо согласуется не только с другими экспериментальными данными в этом диапазоне энергий, но и с модельными предсказаниями, в частности [42,43].

PPT была преобразована в замороженную спин-дейтронную поляризованную мишень (DPT). В качестве материала мишени используют дейтерированный 1,2-пропандиол с парамагнитной примесью Cr(V), имеющий концентрацию спина около 10^{20} см^{-3} . Максимальная достигнутая векторная поляризация дейтрона составила 40%. DPT была подробно описана в [24,41].

Последние эксперименты показали, что поляризация и интенсивность нейтронного пучка, а также дейтронная поляризация мишени недостаточны для достижения необходимой точности измерения разности сечений. В настоящее время проводится модернизация установки с целью увеличения дейтронной поляризации поляризованной мишени, а также интенсивности и поляризации нейтронного пучка. Мы заменим наш текущий материал мишени (пропандиол) новым материалом, тритил-легированным бутанолом. С этим материалом группой Майнца [44] была достигнута поляризация до $\sim 80\%$. Для улучшения параметров нейтронного пучка предлагается использовать реакцию $T(d, n)^4\text{He}$ с поляризованными дейтронами с энергией 100-150 кэВ. Это может быть достигнуто с помощью известного метода Каминского [45,46]. Первым шагом будет создание поляризованного пучка дейтронов с энергией до 200 кэВ с использованием канализации неполяризованного пучка дейтронов через намагниченную пленку Ni. Электронная поляризация образовавшихся атомов дейтерия возникает из-за преимущественного присоединения электронов одного спинового знака. Такая поляризация электронов передается ядрам посредством сверхтонкого взаимодействия. Им получено 500 нА/см^2 канализированных атомов дейтерия с энергией 100-200 кэВ с ядерной поляризацией $P_{zz} = -0,32 \pm 0,010$. Первое предложение, касающееся поляризации ядра при захвате поляризованных ферромагнитных электронов, было сделано Завойским в 1957 г. [47].

Фельдман и др. [48] также провели измерения поляризации с экспериментальной схемой, очень похожей на схему Каминского. Их данные качественно согласуются с данными Каминского ($P_{zz} = -0,14 \pm 0,06$). Также, как и в эксперименте Каминского, для поликристаллической фольги никакого эффекта не наблюдалось.

Схема и фотография экспериментальной установки [49] приведены на рис. 5, 6. Мы предлагаем применить метод Sona – переходы в нулевом поле с полным переносом поляризации электронов на дейтроны в атомном пучке [50]. Магнитное поле направлено вдоль плоскости фольги (вертикально), и мы должны использовать переходы Sona с вертикальными магнитными полями. Это отличается от стандартной конфигурации. Мы используем два постоянных магнита (2x20 см) с изменяющимся расстоянием между полюсами ($B_{\text{max}} = 0,1 \text{ Т}$). Заряженные дейтроны отклоняются электрическим и магнитным полями.

Монокристаллические никелевые фольги толщиной до 2 мкм выращивают эпитаксиально на кристаллах NaCl, расщепленных для экспонирования плоскости (110) (производства Princeton Scientific Corp.). Данный субстрат растворяли в воде, и фольги из Ni плавали на медном диске, установленном на гониометре (Princeton Scientific Corp.).

Если мы передадим пучок дейтерия на тритиевую мишень, нейтроны с энергией 14 МэВ dt -реакции, образованные под углом 90° (центр масс), будут иметь почти такую же векторную поляризацию, что и дейтроны [51].

Поляризация вектора дейтрона может быть измерена с использованием реакции $D(d, p)T$ [52]. Сначала мы решили измерить тензорную поляризацию с мишенью TiT, поскольку сечение для реакции $T(d, n)^4\text{He}$ [53] примерно в 200 раз больше, чем для реакции dd .

Сечение зависит от гр. Угла между спином и направлением α -частицы ϑ [45,53]:

$$\sigma(\vartheta) = \sigma_0 \left[1 - \frac{1}{4}(3\cos^2\vartheta - 1)P_{zz} \right] \quad (3)$$

Для измерений мы использовали два значения ϑ : $\vartheta = 90^\circ$ и $\vartheta = 20^\circ$. В результате, $P_{zz} =$

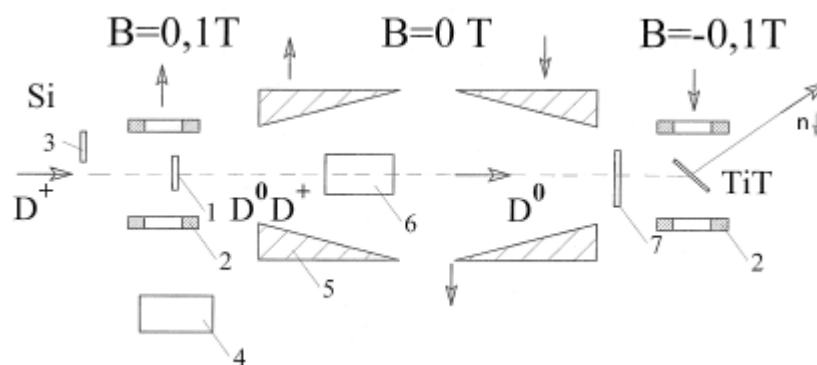


Рисунок 5: Схема источника поляризованных дейтронов; 1 – никелевая фольга, 2 – постоянный магнит (0,07 Тл), 3 – твердотельный детектор, 4 – гониометр, 5 – поляризационные постоянные магниты (для переходов Sona), 6 – электростатические пластины, 7 – мишень поляриметра.



Рисунок 6: Фотография экспериментальной установки.

$-0,12 \pm 0,04$ (теоретическое значение $P_{zz} = -0,33$ при энергии дейтрона 500 кэВ для толщины Ni-фольги 1,5 мкм (энергия атома дейтерия составляет 250 кэВ)). Во время данного эксперимента гониометр находился в случайном положении, и мы использовали только первый магнит системы перехода Sona, а детектор находился в слабом магнитном поле. Представляется возможным, что эффект каналирования позволяет увеличить доступный ток дейтерия в мишени и поляризацию.

Если материал мишени TiT_N содержит $N = 1,5$ атома трития / атома титана, общий выход нейтронов составляет $1,5 \times 10^7$ нейтронов на стерадиан на один из дейтронов. При радиусе пучка 3 мм у нас будет $\sim 0,14$ мкА атомов дейтерия. При телесном угле 3×10^{-4} нейтронный пучок будет иметь $\sim 6,3 \times 10^2$ нейтронов/сек.

Согласно [42,43] статистическая ошибка для $\Delta\sigma_{LT}$ может быть записана как

$$\Delta\sigma_{L,T} = \frac{\ln \xi(\text{antiparallel}) - \ln \xi(\text{parallel})}{\omega P_b P_t} \quad (4)$$

где ω – поверхностная плотность дейтронов поляризованной мишени, дейтронов / см^2 , P_b, P_t – поляризация пучка и мишени соответственно, и $\xi = N_{\text{det}}/N_{\text{mon}}$, где N_{det} и N_{mon} – скорости счета нейтронов детектора и монитора соответственно, Монитор подсчитывает интенсивность нейтронов до поляризованной мишени.

Абсолютная статистическая ошибка

$$\delta(\Delta\sigma) = \frac{\sqrt{2}}{\omega P_b P_t} \times \sqrt{\frac{1}{\bar{N}_{\text{mon}} t} + \frac{1}{\bar{N}_{\text{det}} t}} \quad (5)$$

где $\bar{N}_{\text{mon, det}} = \frac{1}{2} (N_{\text{mon, det}}(\text{parallel}) + N_{\text{mon, det}}(\text{antiparallel}))$

Для поляризованной мишени (пропандиол) $\omega = 3 \times 10^{-4}$ мбарн $^{-1}$. При $P_t = 0,8$ и $P_b = 0,6$, получаем $1/\omega P_b P_t \approx 7 \times 10^3$ мбарн.

Если эффективность детектора составляет 10^{-2} , а телесный угол 3×10^{-4} , то при $N_{\text{mon}} \sim N_{\text{det}} = 6,3$ нейтрона/сек для получения $\delta_{\text{stat}}(\Delta\sigma) = 7$ мбарн необходимо $t = 180$ часов сбора данных по двум значениям поляризационного знака.

При энергии нейтронов 14 МэВ $\Delta\sigma_T \approx -300$ мбарн. Включение 3NF уменьшает разницу сечений [36] до 20 мбарн, поэтому мы можем обнаружить эту разницу.

4.1 Основные результаты

Была разработана экспериментальная установка для получения пучка атомов дейтерия с энергиями 100-400 кэВ с поляризованными ядрами и для измерения векторной и тензорной поляризации дейтронов.

Для неканализованного пучка (гониометр в случайном положении) измерения тензорной поляризации проводились с мишенью TiT в реакции $T(d, n)^4\text{He}$. Наш результат $P_{zz} = -0,12 \pm 0,04$ для слабого поля на мишени.

Публикации:

1. Yu.A. Plis et al., Research and Development of the Polarized Deuteron Sources for the Van de Graaff Accelerator. Physics of Particles and Nuclei Letters. **16** (2019) 256-263; preprint JINR E13-2018-69. Dubna, 2018. Report in SPIN2018, to be publ.

5 Рабочий план: 2020 – 2021 – 2022

Сбор данных в SPASCHARM будет проводиться с использованием пучка отрицательных частиц и поляризованной замороженной мишени в Дубне.

0 Одно-спиновая асимметрия будет измеряться при инклюзивном производстве заряженных пионов. Одно-спиновая асимметрия будут измеряться при инклюзивном образовании p (770), ω (782), η' (958), f_0 (980), a_0 (980), f_2 (1270).

1 Также будет исследована возможность измерения поляризации Λ -гиперона и выравнивание векторных мезонов.

2 Будут добавлены многоканальные черенковские счетчики для измерения спиновых эффектов с помощью К-мезонов.

GDH

0 Ввод в эксплуатацию новой замороженной спиновой мишени для экспериментов с установкой Crystal Barrel / ELSA в Боннском университете.

1 Прецизионные широкомасштабные приемочные измерения асимметрии спина пучка для фоторасщепления дейтрона в области экзотического шестикваркового состояния d^* (2380).

2 Изучение спектра и свойств барионных резонансов через измерения поляризационных наблюдаемых при фотообразовании мезонов.

NN

0 Эксперименты по каналированию на стенде источника поляризованного дейтронов.

1 Создание более мощного источника поляризованных нейтронов на основе источника поляризованных дейтронов и его соединение с замороженной мишенью поляризованных дейтронов. Точное измерение векторных и тензорных поляризаций дейтронов. Подготовка специальных устройств для использования нового материала для мишени на основе тритил-легированного бутанола.

2 Подготовить аппарат для измерения поляризации нейтронов используя рассеяние на мишени ^4He .

В проекте участвуют 21 участник из ОИЯИ. Авторы проекта имеют публикации хотя бы по одной из частей проекта.

Форма № 26

Предлагаемый график и необходимые ресурсы для реализации проекта "SPASCHARM-GDH-NN" (тыс. долл. США)

Название статьи расходов	Общая стоимость	Предложение Лаборатории по распределению финансов		
		2020	2021	2022
1. Модификация УВЧ системы поляризованной мишени	15,0	9,0	2,0	4,0
2. Дизайн и подготовка деталей "Активной мишени"	6,0	4,0	2,0	-
3. Модификация системы измерения поляризации	4,0	2,0	2,0	-
4. Покупка стандартных устройств	41,0	16,0	14,0	11,0
Всего (оборудование)	66,0	31,0	20,0	15,0
Материалы	26,0	10,0	8,0	8,0
ИТОГО	158,0	72,0	48,0	38,0
Источники финансирования				
Бюджетные расходы				
а) прямые (немедленные)	201,0	71,0	65,0	65,0
б) Грант Германии (BMBF)	30,0	10,0	10,0	10,0
с) Грант CR	54,0	18,0	18,0	18,0
Всего немедленных расходов	285,0	99,0	93,0	93,0

Таблица 1:

Руководители проекта

А. Ковалик, Ю.А. Усов

Форма № 29

Смета расходов по проекту "SPASCHARM-GDH-NN" (тыс. долл. США)

	Название статьи расходов	Общая стоимость	2020	2021	2022
1	Расходы по соглашению о НИОКР	12,0	8,0	2,0	2,0
2	Стоимость работ в экспериментальном цехе ЛЯП	3,0	1,0	1,0	1,0
3	Материалы	66,0	22,0	22,0	22,0
4	Транспортные расходы	4,5	1,5	1,5	1,5
5	Непредвиденные расходы	6,0	2,0	2,0	2,0
6	Электронные инструменты	45,0	15,0	15,0	15,0
6	Ежегодный вклад в коллаборацию "A2"	24,0	8,0	8,0	8,0
7	Командировочные расходы	124,5	41,5	41,5	41,5
	в том числе				
	а) в страны за пределами рублевой зоны	108,0	36,0	36,0	36,0
	б) в страны рублевой зоны	12,0	4,0	4,0	4,0
	в) поездки в ОИЯИ	4,5	1,5	1,5	1,5
	Всего прямых расходов	285,0	99,0	93,0	93,0

Таблица 2:

Руководители проекта А. Ковалик, Ю.А. Усов

Директор Лаборатории В.А. Бедняков

Помощник директора по финансам Г.А. Усова

Ссылки

- [1] A.V. Efremov, in Proc of 15th Intern. Spin Physics Symposium Upton, 2002, p.235.
- [2] <http://lhcb-public.web.cern.ch/lhcb-public/Welcome.html>.
- [3] V.V. Abramov et al. J. Phys. Conf. Ser. 798 (2017) 012096.
- [4] V.V. Mochalov et al. Int. J. Mod. Phys. Conf. Ser. 40 (2016) 1660106.
- [5] V.V. Abramov et al. Nucl. Instr. and Meth. A 901 (2018) 62.
- [6] V.D. Apokin et al., in Proc. of the IV Workshop on high energy spin physics, Protvino (1991) 288.
- [7] V.D. Apokin et al., Russ. J. Phys. Atom. Nucl. **45** (1987) 840.

- [8] E.R. Nocera, Achievements and open issues in the determination of polarized parton distribution functions, *Int. J. Mod. Phys. Conf. Ser.* **40** (2016) 1660016; arXiv:1503.03518 [hep-ph].
- [9] D. de Florian et al., *Phys. Rev. Lett.* **113** (2014) 012001.
- [10] E.R. Nocera et al., *Nucl. Phys.* **B 887** (2014) 276
- [11] M.E. M.E.
Beddo et al., Fermilab proposal P838, January 1991.
- [12] N.S. Borisov et al., JINR communications 13-10253, Dubna, 1976.
- [13] N.S. Borisov et al., *Sov. Phys. JETP* **60** (1984) 1291.
- [14] N.A. Bazhanov, A.I. Kovalev, LIYaP, preprint No. 1642, 1990, Leningrad.
- [15] D. Drechsel, S.S. Kamalov, L. Tiator,
Unitary isobar model - MAID2007,
Eur. Phys. J. A **34** (2007) 69.
- [16] L. Tiator, M. Gorchtein, V.L. Kashevarov et al.,
Eta and Eta prime Photoproduction on the Nucleon with the Isobar Model Eta MAID2018, *Eur. Phys. J. A* **54** (2018) 210.
- [17] B.S. Neganov, N.S. Borisov and M.Yu. Liburg, *JETP* **50** (1966) 1445.
- [18] B.S. Neganov, *Vestn. Akad. Nauk SSSR* **12** (1968) 49.
- [19] F. Lehar et al., *Nucl. Instr. and Meth. A* **356** (1995) 58.
- [20] N.A. Bazhanov et al., *Nucl. Instr. and Meth. A* **402** (1998) 484.
- [21] Yu.A. Usov, *Nucl. Instr. and Meth. A* **526** (2004) 153.
- [22] Yu.A. Usov. Frozen spin target developed at Dubna. History and Traditions. XVI International Workshop in Polarized Sources, Targets and Polarimetry. PSTP2015, Ruhr- University Bochum, Germany, 14-18 September 2015, PoS (PSTP2015) 021.
- [23] G.M. Gurevich, A.A. Lukhanin, F. Maas, Yu.A. Plis, A.O. Sidorin, A.V. Smirnov, A. Thomas, Yu.A. Usov. On the feasibility of using an extracted polarized antiproton beam of the HESR with a solid polarized target. XVI International Workshop in Polarized Sources, Targets and Polarimetry. PSTP2015, Ruhr-University Bochum, Germany, 14-18 September 2015, PoS(PSTP2015)043.
- [24] Yu.A. Usov. Frozen spin target developed at Dubna. History and Traditions. XVI International Workshop in Polarized Sources, Targets and Polarimetry. PSTP2015, Ruhr- University Bochum, Germany, 14-18 September 2015, PoS(PSTP2015)021.
- [25] A. Thomas et al., *Nucl. Phys.* **B 79** (1999) 591.
- [26] W.N. Polizou, W. Glockle, *Few-Body Syst.* **9** (1990) 97-121.

- [27] E. Epelbaum, H.-W. Hammer, Ulf-G. Meißner, Rev. Mod. Phys. **81** (2009) 1773.
- [28] L. Platter, Phys. Rev. **C 74** (2006) 037001.
- [29] J. Rotureau et al., Phys. Rev. **C 85** (2012) 034003.
- [30] D.R. Entem et al., Phys. Rev. **C 96** (2017) 024004.
- [31] P. Reinert, H. Krebs, E. Epelbaum, Eur. Phys. J. **A 56** (2018) 86.
- [32] E. Epelbaum et al., Phys. Rev. **C 99** (2019) 024313.
- [33] S. Binder et al., Phys. Rev. **C 98** (2018) 014002.
- [34] Yu.N. Uzikov, Three-nucleon forces and some aspects of nuclear astrophysics, in The Universe Evolution, nuclear astrophysics. Eds. I. Strakovsky, L. Blokhintsev. New York: Nova Science Publisher, Inc., 2013. pp.269-292. ISBN 978-1-62808-547-7.
- [35] Yu.N. Uzikov, On the contribution of three-body forces to Nd interaction at intermediate energies. JETP Lett. **75** (2002)5; Pis'ma v ZHETF, **75** (2002) 7.
- [36] H. Witala et al., Phys. Lett. **B 447** (1999) 216.
- [37] R.D. Foster et al., Phys. Rev. **C 73** (2006) 034002.
- [38] I. Wilhelm et al., Nucl. Instr. & Meth. **A317** (1992) 553.
- [39] M. Koch et al. Nucl. Phys. Spring Meeting, Salzburg, 1992.
- [40] N.S. Borisov et al., Nucl. Instr. & Meth. **A 345** (1994) 421.
- [41] N.S. Borisov et al., Nucl. Instr. & Meth. **A 593** (2008) 177.
- [42] J. Broz et al., Z. Phys. **A 35** (1996) 401.
- [43] J. Broz et al., Z. Phys. **A 359** (1997) 23.
- [44] S.T. Goertz et al., Nucl. Instr. & Meth. **A 526** (2004) 43.
- [45] M. Kaminsky, Phys. Rev. Lett. **23** (1969) 819.
- [46] M. Kaminsky, in Proc. of 3rd Int. Symp. on Polarization Phenomena in Nuclear Reactions, Madison, 1970, p. 803.
- [47] E.K. Zavoiskii, J. Exp. Theor. Phys. **32** (1957) 408; english translation, Sov. Phys. - JETP **5** (1957) 338.
- [48] L.C. Feldman et al., Radiation Effects **13** (1972) 145.
- [49] Yu.A. Plis et al., Research and Development of the Polarized Deuteron Sources for the Van de Graaff Accelerator. Physics of Particles and Nuclei Letters. **16** (2019) 256-263; preprint JINR E13-2018-69. Dubna, 2018.

- [50] P.G. Sona, *Energia Nucleare*. **14** (1967) 295-299.
- [51] G.G. Ohlsen, *Rep. Progr. Phys.* **35** (1972) 717.
- [52] A.A. Naqvi, G. Clausnitzer, *Nucl. Instr. & Meth. A* **324** (1993) 429.
- [53] A. Galonsky et al., *Phys. Rev. Lett.* **2** (1959) 349.