**Изучение спиновой структуры нуклона в сильных и электромагнитных взаимодействиях**

**Проект “GDH & SPASCHARM & NN”**

**(эксперименты с поляризованными мишенями и пучками)**

Дубна—Протвино—Москва—Харьков—Прага—Майнц—Глазго

Базель—Лунд—Загреб—Павия—Бохум

Бонн—Гиссен—Кент—Реджина—Саквилл

Вашингтон—Йорк

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

Н.А. Бажанов, Д.В. Белов, Н.С. Борисов, В.П.Вольных, А.С. Должиков, А.Н. Федоров, И.В. Гапиенко, И.С. Городнов, Г.М. Гуревич, В.Л. Кашеваров, А. Ковалик, Е.С. Кузьмин, А.Б. Неганов, Ю.А. Плис, А.А. Приладышев, А.Б. Садовский, Ю.А. Усов, Ю.Н. Узиков, В.П. **Дубна, Лаборатория теоретической физики им. Н.Н. Боголюбова, ОИЯИ** С.Б. Герасимов. **Дубна, Лаборатория физики высоких энергий им. В.И. Векслера и А.М.Балдина, ОИЯИ,** В.В. Фимушкин, Л.В. Кутузова, М.В. Куликов.

**Руководитель проекта – Ю.А.Усов; зам. рук. : И.С.Городнов, Ю.А.Плис.**

**Введение.**

Тематика исследований поляризационных явлений имеет большие традиции и возникла в ЛЯП ОИЯИ в результате успешной реализации нового метода получения сверхнизких температур (1966 г.) и предложение сотрудника Лаборатории Б.С.Неганова (*Международная конференция по электромагнитным взаимодействиям при низких и* *средних энергиях,* *Дубна,* *1967)* о возможности создания Поляризованной Мишени нового типа. Здесь подразумевается мишень «замороженного» типа, в которой в полной мере используется эффект охлаждения рабочего вещества мишени до сверхнизких температур ~ 20-50 mK. Уже в 1975г. на первой, созданной в ЛЯП ОТЯИ поляризованной «замороженной» мишени, были проведены на синхроциклотроне первые исследования: Yu. M. Kazarinov, и др. “Measurement of the polarization correlation coefficient Cnn of elastic pp scattering at energies of 550 and 630 MeV,, Zh. Eksp. Teor. Fiz. 73, 1679-1683 (November 1977). Более того, позднее был признан приоритет этой мишени и в мире (C.Keith, PSTP-2017).

В результате – в ЛЯП были созданы последовательно несколько поляризованных мишеней «замороженного» типа, которые, которые успешно использовались и используются на различных ускорителях (ЛЯП, ЛФВЭ, Гатчина, Протвино, Прага, Майнц и Бонн). Исследованию поляризационных явлений в нашей Лаборатории всегда придавалось особое значение, С другой стороны характерны высказывания известных теоретиков, например англичанина Эллиота Лидера: « Спин в экспериментах убил больше теорий, чем любой другой физический параметр» (Elliot Leader. Spin in Particle Physics, Cambridge U. Press (2001)) или американца Джеймса Бьёркена: «Поляризационные данные часто были кладбищем модных теорий. Если бы теоретики были в силах, в целях самозащиты им стоило бы вообще запретить такие измерения» (J.D.Bjorken. Proc. Adv. Workshop on QCD Hadronic Processes, St. Croix, Virgin Islands, 1987).

В настоящем Проекте представлены четыре основные «активности», в которых заняты авторы: “SPASCHARM”, “GDH”, “NN” и “MESA”.

1. Экспериментальное исследование одно-спиновых асимметрий при производстве различных легких частиц с использованием пучка пионов с энергией 28 ГэВ -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 глюонов в спин протона при больших значениях переменной Бьёркена *x* путем изучения спиновых эффектов при образовании чармония. Это позволит понять адронный механизм образования чармония и выделить глюонную поляризацию *Δg(x)* при больших значениях *x*.

1. 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.
2. Измерение *ΔσΤ* и *ΔσL* в эксперименте по трансмиссии поляризованных нейтронов через поляризованную дейтронную мишень при энергиях нейтронов <16 МэВ, где имеются ограниченные экспериментальные данные и где теория предсказывает существенный эффект трёхнуклонных сил (3NF). Данная часть проекта **(NN**) является продолжением измерений тех же величин при рассеянии нейтронов на протонах, которые проводились ранее.
3. Исследования и разработки поляризационного оборудования для **MESA**.

Сверхпроводящий ускоритель с рекуперацией энергии в Майнце (MESA) расположен в Майнце. В MESA были изучены физические возможности, предлагаемые с использованием недавно созданной технологии ускорителя с рекуперацией энергии (ERL), которая обеспечивает очень высокую светимость электронного пучка на внутренних мишенях при низких энергиях. Одной из целей этого нового ускорителя электронов MESA является измерение угла смешивания электрослабого взаимодействия в электрон-протонном рассеянии с точностью 0,13%. Поляризация пучка вносит значительный вклад в это измерение. Поляриметр Меллера, предложенный В. Лупповым и Е. Чудаковым, открывает путь к достаточно точному определению поляризации. Уже начаты исследования и разработки поляризационного оборудования MESA. В настоящее время мишень из поляризованного атомарного водорода строится коллективом Майнц-ОИЯИ. Важной частью этой цели является рефрижератор растворения, где ОИЯИ имеет многолетний опыт работы.

Технически, все части данного проекта объединены использованием поляризованных протонных (дейтронных) мишеней с замороженным спином.

**Отчёт:**

**(05.2022-03.2023)**

В декабре 2022 г. проведён методический сеанс на поляризованной мишени в ИФВЭ (Протвино) с целью определения состояния аппаратуры для последующей работы на пучке. По результатам запуска установки коллаборация «СПАСЧАРМ» приняла решение о разработке и изготовлению нового Криостата поляризованной мишени.

За отчётный период велось сотрудничество в удалённом формате по работе поляризованной мишени в Майнце, составлена инструкция по запуску криостата растворения данной поляризованной мишени. Проводилась работа по обработке полученных физических данных на ускорителях “MAMI C” и “ELSA”

Проведена обработка результатов экспериментов на установке источника поляризованных дейтронов в Чешском техническом университете в Праге. Подготовлена соответствующая публикация и запланирован доклад на семинаре 6 апреля 2023 г.

|  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- |
| **Публикации за 2022-2023 г.** | | | | |
| **№** | **Название публикации** | **Журнал, DOI** | **Ссылки на журналы** | **Ссылка на arxiv.org** |
| 1 | Measurement of Compton scattering at MAMI for the extraction of the electric and magnetic polarizabilities of the proton. | Physical Review Letters 128, 132503. DOI: [10.1103/PhysRevLett.128.132503](https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.128.132503).  01.04.2022.  Q1, Scopus. | <https://journals.aps.org/prl/abstract/10.1103/PhysRevLett.128.132503>  Received 5 November 2021, Revised 31 January 2022,  Accepted 25 February 2022, Published 1 April 2022. | https://arxiv.org/abs/2110.15691 |
| 2 | Measurement of the helicity dependence for single π0 photoproduction from the deuteron. | European Physical Journal A 58, 113 (2022). DOI:[10.1140/epja/s10050-022-00760-4](https://doi.org/10.1140/epja/s10050-022-00760-4).  Submitted 03.03.2022  Q1, Scopus. | <https://link.springer.com/article/10.1140/epja/s10050-022-00760-4>  Received 01 March 2022. Accepted 02 June 2022.  Published 30 June 2022. | https://arxiv.org/abs/2203.00535 |
| 3 | Target and beam-target asymmetries for the γp→π0π0p reaction. | 27 Sep. 2022 |  | https://arxiv.org/abs/2207.14079 |
| 4 | First measurement of polarisation transfer Cnx′ in deuteron photodisintegration and the signatures of the d∗(2380) hexaquark | Preprint submitted to EPJ |  | https://arxiv.org/abs/2206.12299 |
| 5 | Neutron polarisation transfer, Cx′, in π+ photoproduction off the proton | Preprint submitted to Physics Letters B |  | https://arxiv.org/abs/2211.09688 |

|  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- |
| **Протвино** | | | | |
| 1 | Концептуальный проект эксперимента СПАСЧАРМ | ФИЗИКА ЭЛЕМЕНТАРНЫХ ЧАСТИЦ И АТОМНОГО ЯДРА 2023. Т.54, вып.1. C.6–189 | <http://www1.jinr.ru/Pepan/v-54-1/02_abramov.pdf> |  |

**Планы работы на 2024-2028 годы:**

• Разработка и создание нового криостата для поляризованной «замороженной» мишени установки «СПАСЧАРМ» - 2024-2026 гг.

• Разработка и создание основных узлов мощного рефрижератора растворения 3Не/4Не для установки “MESA”– 2024-2025.

• Завершение работ по созданию криостата для поляризованной мишени в Боннском университете. – 2024 г.

• Обратная транспортировка и полный запуск поляризованной мишени в Майнце для проекта “GDH” – 2024-2025 гг.

Проведение поляризационных исследований с использованием поляризованной «замороженной» мишени на ускорителе “MAMI C”,

- 2026-2028 гг.

• Проведение поляризационных исследований на новой поляризованной мишени на ускорителе Боннского университета, “ELSA”- 2025-2028 гг.

• Сборка, монтаж и тестирование мощного рефрижератора растворения 3Не/4Не на пучковом канале установки “MESA”. – 2026-2027.

• Запуск модифицированной поляризованной мишени установки “SPASCHARM” и начало набора физической статистики на ускорителе У-70, - 2027-2028 гг.

По программеNN-взаимодействиябудут проведены эксперименты по каналированию после модернизации стенда источника поляризованных дейтронов, - 2024-2025 гг.

Проведение точных измерений векторных и тензорных поляризаций пучка дейтронов, ускорителя VdG- 2025-2026 гг.

Подготовка специального устройства для использования нового материала для мишени на основе тритил-легированного бутанола, - 2025 г.

Изготовление и монтаж аппаратуры для измерения поляризации нейтронов с использованием рассеяния на мишени 4He, - 2026-2027 гг.

Проведение расконсервирования поляризованной дейтронной мишени и начало измерения разности сечений *ΔσΤ* и *ΔσL* в эксперименте по пропусканию nd при энергиях нейтронов <16 МэВ, - 2027-2028 гг.

**2.3. Предполагаемый срок выполнения 5 лет**

**2.4. Участвующие лаборатории ОИЯИ**

ЛТФ C.Б. Герасимов

ЛФВЭ В.В.Фимушкин, Л.Кутузова, М.В.Куликов.

**2.5. Участвующие страны, научные и научно-образовательные организации**

|  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- |
| **Организация** | **Страна** | **Город** | **Участники** | **Тип соглашения** |
| Чешский техни-  ческий универ-  ситет | ЧР | Прага | M. Solar | Соглашение о сотрудничестве |
| Университет г.Майнц  Университет г.Бонн | Германия  Германия | Майнц  Майнц  Бонн | А2 Collaboration at MAMI.  Collaboration P2 MESA  Collaboration  “Crystal Barrel” | Контракт  Контракт  Контракт |
| Институт физики высоких энергий | РФ | Протвино | В.В. Абрамов, А.Н. Васильев, В.В. Мочалов | Договор |
| МИФИ | РФ | Москва | М.В. Нурушева В.А. Окороков, В.Л. Рыков |  |
| ИЯИ РАН | РФ | Москва | Г.М. Гуревич |  |

**2.6. Организации-соисполнители** *(те сотрудничающие организации/партнеры без финансового, инфраструктурного участия которых выполнение программы исследований невозможно. Пример — участие ОИЯИ в экспериментах LHC в CERN)*

**3. Кадровое обеспечение**

**3.1. Кадровые потребности в течение первого года реализации**

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| **№№ п/п** | **Категория работника** | **Основной персонал, сумма FTE** | **Ассоциированный персонал, сумма FTE** |
| 1. | научные работники | 8 |  |
| 2. | инженеры | 7 |  |
| 3. | специалисты | 1 |  |
| 4. | служащие |  |  |
| 5. | рабочие |  |  |
|  | **Итого:** | **16** |  |

**3.2. Доступные кадровые ресурсы**

**3.2.1. Основной персонал ОИЯИ**

|  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| **№№ п/п** | **Категория работников** | **ФИО** | **Подразделение** | **Должность** | **Сумма FTE** |
| 1. | научные работники | Бажанов Н.А.  Борисов Н.С.  Гапиенко И.В.  Должиков А.С  Неганов А.Б.  Плис Ю.А.  Усов Ю.А.  Кашеваров В.Л. | ляп снт  ляп снт  ляп снт  ляп снт  ляп снт  ляп снт  ляп снт  ляп снт | нс  снс  мнс  нс  нс  снс  нач. сектора  снс | 1  1  1  1  1  0,5  1  0,5 |
| 2. | инженеры | Белов Д.В.  Городнов И.С.  Иванова Л.В.  Коломиец В.Г.  Фёдоров А.Н.  Приладышев А.А.  Усов Д.Ю. | яп снт  ляп снт  ляп снт  ляп снт  ляп снт  ляп снт  ляп снт | инженер  вед. инженер  инженер  инженер  вед. инженер  инженер  инженер | 1  1  1  1  1  0,5  0,5 |
| 3. | специалисты | Титенкова Л.В. | ляп снт | специалист по документо-обороту | 1 |
| 4. | рабочие |  |  |  |  |
|  | **Итого:** |  |  |  | **16** |

**3.2.2. Ассоциированный персонал ОИЯИ**

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| **№№ п/п** | **Категория работников** | **Организация-партнер** | **Сумма FTE** |
| 1. | научные работники |  |  |
| 2. | инженеры |  |  |
| 3. | специалисты |  |  |
| 4. | рабочие |  |  |
|  | **Итого:** |  |  |

**Предлагаемый план-график и необходимые ресурсы для осуществления   
Проекта / Подпроекта КИП**

|  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| **Наименования затрат, ресурсов,**  **источников финансирования** | | | **Стоимость (тыс. долл.) потребности в ресурсах** | **Стоимость,**  **распределение по годам** | | | | |
| 1 год | 2 год | 3 год | 4 год | 5 год |
|  | | Международное сотрудничество (МНТС) | 220.0 | 50.0 | 50.0 | 50.0 | 35.0 | 35.0 |
| Материалы | 42.0 | 10.0 | 8.0 | 8.0 | 8.0 | 8.0 |
| Оборудование и услуги сторонних организаций  (пуско-наладочные работы) | 96.0 | 22.0 | 22.0 | 22.0 | 15.0 | 15.0 |
| Пуско-наладочные работы | 15.0 | 9.0 | 4.0 | 2.0 |  |  |
| Услуги научно-исследовательских организаций | 9.0 | 4.0 | 1.0 | 1.0 | 3.0 |  |
| Приобретение программного обеспечения | 5,0 | 2.0 | 2.0 | 1.0 |  |  |
| Проектирование/строительство |  |  |  |  |  |  |
| Сервисные расходы (*планируются в случае прямой принадлежности к проекту)* |  |  |  |  |  |  |
| **Необходимые ресурсы** | **Нормо-час** | Ресурсы |  |  |  |  |  |  |
| * сумма FTE, |  |  |  |  |  |  |
| * ускорителя/установки, |  |  |  |  |  |  |
| * реактора,….. |  |  |  |  |  |  |
| **Источники финансирования** | **Бюджетные средства** | Бюджет ОИЯИ *(статьи бюджета)* | 387.0 | 97 | 87 | 84 | 61.0 | 58.0 |
| **Внебюджет (доп. смета)** | Вклады соисполнителей  Средства по договорам  с заказчиками  Другие источники финансирования |  |  |  |  |  |  |