

**РОССИЙСКАЯ АКАДЕМИЯ НАУК
ПЕТЕРБУРГСКИЙ ИНСТИТУТ ЯДЕРНОЙ ФИЗИКИ
им. Б.П. КОНСТАНТИНОВА**

УДК 539.128, 539.188

На правах рукописи

Микиртычьянц Максим Сергеевич

**Разработка и исследование источника
атомарного водорода и дейтерия с ядерной поляризацией
для экспериментов на внутренних пучках ускорителей**

01.04.01 – приборы и методы экспериментальной физики

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Гатчина-2002

Работа выполнена в Отделении физики высоких энергий Петербургского института ядерной физики им. Б.П. Константинова Российской академии наук.

Научные руководители: кандидат физико-математических наук
В.П. Коптев,
кандидат физико-математических наук
А.А. Васильев.

Официальные оппоненты: доктор физико-математических наук
профессор Б.П. Лавров,
кандидат физико-математических наук
доцент С.С. Козловский.

Ведущая организация: Научно-исследовательский институт
электрофизической аппаратуры
им. Д.В. Ефремова

Защита состоится " ____ " _____ 2003 г. в _____ часов
на заседании диссертационного совета Д-002.115.01 в Петербургском
институте ядерной физики им. Б.П. Константинова РАН по адресу:

188300, г. Гатчина Ленинградской обл., Орлова роща, ПИЯФ РАН.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Петербургского
института ядерной физики им. Б.П. Константинова РАН.

Автореферат разослан " ____ " _____ 2003 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета

И.А. Митропольский

Общая характеристика работы

Данная работа посвящена созданию источника атомарного водорода и дейтерия с ядерной поляризацией для поляризационных экспериментов на внутренних пучках ускорителей, разработке методик измерения, исследованию и оптимизации параметров атомарного пучка, таких как интенсивность, степень поляризации и пространственное распределение плотности.

Актуальность

Несмотря на большие успехи современной ядерной физики в объяснении различных свойств ядерной материи, вопрос о высокоимпульсной компоненте ядерной волновой функции или, иными словами, о структуре ядерной материи на расстояниях порядка или меньше радиуса нуклона до сих пор остается открытым. В настоящее время основная проблема состоит в экспериментальном обнаружении этой структуры и определении интервала внутреннего момента относительного движения нуклонов в ядре, в котором справедливо традиционное описание ядра как совокупности нуклонов. Ожидается, что на расстояниях $R_{NN} < 0.5$ фм существует некая переходная область между мезон-нуклонными и кварк-глюонными степенями свободы в ядре. Одним из подтверждений существования такой области при высоких переданных импульсах может быть нарушение традиционной картины, основанной на феноменологическом потенциале NN -взаимодействия, соответствующем NN -фазовому анализу. В этом смысле проблема высокоимпульсной компоненты ядерной волновой функции тесно связана с проблемой выбора потенциала нуклон-нуклонного взаимодействия на близких расстояниях.

Особую роль в изучении этих вопросов играет дейтрон, как наиболее простая ядерная система. Несмотря на то, что дейтрон представляет собой относительно слабо связанную систему, он стал основным объектом изучения как теоретической, так и экспериментальной ядерной физики. Одним из экспериментов, нацеленных на изучение pd -взаимодействия при моменте относительного движения нуклонов внутри ядра $q = 0.3 \div 0.5$ ГэВ/с, является эксперимент на накопительном кольце COSY¹-Jülich, посвященный развалу дейтрона. Особый интерес представляет поляризационный эксперимент ($\vec{h}^{\uparrow}d \rightarrow ppn$), направленный на определение зависимости пяти поляризационных наблюдаемых ($A_y^p, A_y^d, A_{yy}^d, C_{yy}, C_{yyy}$) от внутреннего момента относительного движения нуклонов в реакции развала дейтрона.

¹ COoler SYnchrotron

Постановка такого эксперимента потребует использования как высокоинтенсивного пучка поляризованных протонов, так и поляризованной мишени высокой плотности. Традиционно, в качестве таких мишеней использовались твердотельные поляризованные мишени. Однако в течение последнего десятилетия бурное развитие получил новый тип поляризованных мишеней – газовые поляризованные мишени, которые обладают такими бесспорными преимуществами, как отсутствие радиационных повреждений и неполяризованных примесей (например, N в NH_3). Наиболее важными для физических экспериментов поляризованными газовыми мишенями являются $\overset{\uparrow}{H}$ -, $\overset{\uparrow}{D}$ - и ${}^3\overset{\uparrow}{He}$ -мишени, не содержащие примесей. Поскольку пространственная плотность таких мишеней невысока, они нашли широкое применение на ускорительных накопительных кольцах. При этом время жизни пучка ускорителя остается на достаточно высоком уровне, а высокая светимость обеспечивается за счет многократного прохождения пучка через мишень.

Основным элементом поляризованной газовой мишени является источник поляризованных атомов. Самыми интенсивными на сегодняшний день признаны источники, использующие пространственное разделение атомарного пучка по ориентации электронного спина в неоднородном магнитном поле и последующим индуцированием переходов между уровнями сверхтонкого расщепления.

Таким образом, актуальность настоящей работы по созданию, исследованию и оптимизации характеристик источника атомарного водорода и дейтерия с ядерной поляризацией – основного элемента поляризованной газовой мишени, обусловлена актуальностью эксперимента по развалу дейтрона, посвященному изучению высокоимпульсной компоненты волновой функции дейтрона.

Цель работы

Целью работы являлось создание и исследование характеристик источника поляризованного атомарного водорода для внутренней поляризованной газовой мишени, которая будет использована в эксперименте по развалу дейтрона ($\overset{\uparrow}{p}\overset{\uparrow}{d} \rightarrow ppn$), посвященном изучению высокоимпульсной компоненты волновой функции дейтрона. Эксперимент планируется провести на магнитном спектрометре ANKE², установленном на ускорителе COSY-Jülich.

Одним из основных факторов, определяющих эффективность эксперимента на ускорителе, является время набора статистики, которое имеет квадратичную зависимость от поляризации мишени и пропорционально плотности мишени, определяемой интенсивностью

² Apparatus for studies of Nucleon and Kaon Ejectiles

атомарного пучка источника. Поэтому именно к этим параметрам предъявляются особые требования:

- высокая ядерная поляризация атомарного пучка (более 80%);
- быстрое изменение знака поляризации (положительная/отрицательная) и типа поляризации (векторная/тензорная), в случае дейтериевого пучка;
- высокая интенсивность атомарного пучка (более $6 \cdot 10^{16}$ атомов/с).

Помимо физических параметров, источник должен соответствовать высоким требованиям, предъявляемым к экспериментальным установкам на современных накопительных кольцах (вакуумные условия, ограниченное пространство, быстрая интеграция в существующую экспериментальную установку и т. д.).

Достижение высоких значений параметров источника невозможно без изучения характеристик атомных пучков. Последнее подразумевает необходимость разработки методов и создания ряда приборов для измерения и оптимизации параметров источника.

Научная новизна и практическая ценность

Первым экспериментом, посвященным развалу дейтрона ($pd \rightarrow ppn$), в котором планируется использовать как поляризованный пучок, так и поляризованную мишень, является эксперимент на спектрометре ANKE. Целью этого эксперимента является измерение векторной и тензорной анализирующей способности и спин-корреляционных параметров для энергий протона в диапазоне 1÷2.5 ГэВ. Принимая во внимание особенности ANKE-спектрометра, эксперимент можно провести в условиях коллинеарной геометрии: протоны, испущенные назад (близко к 180°), будут регистрироваться в совпадении с протонами, испущенными вперед под малыми углами. В такой геометрии S - и D -волновые функции дейтрона могут быть изучены вплоть до внутреннего импульса 0.5 ГэВ/с.

Проведение этого эксперимента потребует использования как поляризованного пучка ускорителя, так и поляризованной мишени. В эксперименте предполагается использовать внутреннюю газовую мишень, представляющую собой криогенную накопительную ячейку. Поляризованный газ (H или D) поступает в мишень из источника поляризованного атомарного водорода и дейтерия, созданию, изучению и оптимизации которого посвящена настоящая работа.

Для того, чтобы источник соответствовал требованиям, предъявляемым к нему условиями эксперимента, в нем использованы следующие элементы, определяющие новизну всего устройства в целом:

- новая компоновка источника поляризованного атомарного водорода и дейтерия, продиктованная спецификой использования источника в эксперименте на ускорителе (ограниченное пространство для установки, сверхвысокий вакуум накопительного кольца и т.д.);
- оптимизированная система охлаждения сопла, имеющая минимальные холодные поверхности в области формирования атомарной струи;
- новая схема вакуумной системы, позволяющая создать улучшенные вакуумные условия в первой камере источника, где происходит формирование газовой струи;
- система регулировки геометрии источника без нарушения вакуума, что является существенным достоинством в процессе оптимизации характеристик источника;
- рекордная по своим параметрам спин-сепарирующая магнитная система, состоящая из постоянных 24-сегментных секступольных магнитов с полем на внутренней поверхности магнитов до 1.65 Т;
- набор новых методик и метрологически обеспеченных приборов для измерения и оптимизации характеристик источника.

Помимо этого, источник может быть легко адаптирован к условиям других экспериментов, а также использован для проведения лабораторных исследований с поляризованными атомарными пучками.

Положения, выносимые на защиту

Для планируемого на спектрометре ANKE эксперимента по исследованию реакции развала дейтрона создан источник поляризованного атомарного водорода и дейтерия, обладающий следующими характеристиками:

- ядерная поляризация водородного пучка:
 $P_z = +0.89 \pm 0.01$; $P_z = -0.96 \pm 0.01$;
- ядерная поляризация дейтериевого пучка:
 - векторная: $P_z = +0.73 \pm 0.05$; $P_z = -0.82 \pm 0.06$;
 - тензорная: $P_{zz} = +0.77 \pm 0.06$; $P_{zz} = -1.17 \pm 0.08$;
- максимальная интенсивность пучка атомарного водорода, измеренная с помощью компрессионной трубки, составила $(7.5 \pm 0.2) \cdot 10^{16}$ атомов/с (для двух сверхтонких состояний), что на ~10% превышает лучшие мировые показатели для источников такого типа и, в случае применения криогенной накопительной ячейки, позволит обеспечить эффективную плотность мишени порядка $1.7 \cdot 10^{14}$ атомов/см²;
- интенсивность дейтериевого пучка $(3.9 \pm 0.1) \cdot 10^{16}$ атомов/с (для трех сверхтонких состояний).

Создан ряд новых метрологически обеспеченных приборов и методик для оптимизации характеристик источника. В частности, впервые количественно исследовано пространственное распределение плотности и степени диссоциации в пучке поляризованных атомов.

Конструкция источника полностью удовлетворяет требованиям эксперимента и включает в себя ряд нововведений, позволяющих:

- сократить время технического обслуживания во время эксперимента на ускорителе;
- производить регулировку различных геометрических параметров источника без нарушения вакуума, что является существенным достоинством в процессе оптимизации характеристик пучка.

Апробация

Основные результаты диссертационной работы были представлены на следующих международных конференциях:

- 8th International Workshop on Polarized Sources and Targets (PST99), Эрланген, Германия, 1999;
- 14th International Spin Physics Simposium SPIN 2000, Осака, Япония, 2000;
- Deutsche Physikalische Gesellschaft Frühjahrstagung 2001 (DPG 2001), Эрланген, Германия, 2001;
- IX Workshop On High Energy Spin Physics (SPIN-01), Дубна, Россия, 2001;
- 9th International Workshop on Polarized Sources and Targets (PST-01), Нэшвилль, США, 2001.

Структура и объем диссертации

Диссертация состоит из введения, 5 глав и заключения; 5 таблиц, 65 рисунков и списка литературы. Общий объем диссертации 118 страниц.

Содержание работы

Введение содержит формулировку основной цели работы и ее актуальность.

Первая глава посвящена обзору методов получения пучков атомов молекулярных газов. В этом случае проблема состоит из двух самостоятельных задач – диссоциации молекул газа и формированию газовой струи. В первой части рассматриваются основные процессы, происходящие в газоразрядной плазме. Вторая часть посвящена краткому описанию вопросов, связанных с формированием пучка. На сегодняшний день не существует теории формирования газовой струи в режиме, переходном от гидродинамического течения к свободномолекулярному. Поэтому при проектировании источников атомарных пучков геометрия отдельных элементов системы формирования пучка (сопло, скиммер, коллиматор) выбирается эмпирически или является результатом полуэмпирических моделей, которые, тем не менее, позволяют произвести оценку ожидаемой интенсивности пучка.

Вторая глава включает в себя обзор методов создания ядерной поляризации в атомарных пучках. Рассмотрены три основных типа источников поляризованных атомов: источники, использующие лэмбовский сдвиг, источники с оптической накачкой и источники, использующие пространственное разделение атомарного пучка по ориентации электронного спина в неоднородном магнитном поле и последующим индуцированием переходов между уровнями сверхтонкого расщепления. Описаны основные достоинства и недостатки этих источников.

Третья глава посвящена описанию конструкции источника поляризованного атомарного водорода и дейтерия. Подробно описываются конструкционные особенности отдельных элементов источника.

Источник поляризованного атомарного водорода и дейтерия (ABS³) будет интегрирован в систему экспериментального оборудования магнитного спектрометра ANKE, установленного на накопительном кольце COSY [1]. Поскольку пространство в тоннеле накопительного кольца ограничено, источник будет установлен вертикально. Такая схема установки также позволит поместить источник наиболее близко к центральному магниту спектрометра, что, в свою очередь, является одним из основных факторов, определяющих угловой захват спектрометра. Кроме того, такая компоновка позволяет сохранить фиксированное

³ Atomic Beam Source

положение мишени относительно центрального магнита спектрометра во время его перемещения при изменении энергии протонного пучка.

Созданная конструкция [2–4] учитывает опыт создания и эксплуатации подобных источников в IUCF⁴ и HERMES/DESY⁵, однако имеет перед ними ряд преимуществ.

Для создания водородного или дейтериевого атомарного пучка используется радиочастотный диссоциатор. Охлаждение разрядной трубки обеспечивается потоком спиртоводной смеси между двумя внешними коаксиальными трубками большего диаметра. Для стабилизации температуры сопла в диапазоне 40÷100 К применен криогенератор, соединенный с соплом посредством гибкого медного теплового моста. Скиммер, служащий для формирования газовой струи, закреплен на перегородке, разделяющей первую и вторую ступени источника. Применение сильфонного вакуумного соединения между фланцем диссоциатора и верхним фланцем вакуумной камеры позволяет варьировать расстояние между соплом и скиммером без нарушения вакуума. На перегородке, разделяющей вторую и третью ступени источника, установлен коллиматор, окончательно формирующий газовую струю.

Первая группа спин-сепарирующих секступольных магнитов [5] обеспечивает, так же как и в классическом эксперименте Штерна-Герлаха, пространственное разделение пучка по электронному спину. При этом компонента с $m_j = +1/2$ фокусируется в сильном неоднородном магнитном поле секступоля и попадает в блок сверхтонких переходов, а компонента с $m_j = -1/2$ дефокусируется и удаляется насосами, обеспечивающими откачку вакуумной камеры. Блок сверхтонких переходов, как и магниты, жестко закреплен на центральном фланце ABS, определяющем всю геометрию источника.

В последней ступени расположены вторая группа спин-сепарирующих секступольных магнитов и дополнительные блоки сверхтонких переходов, отвечающие за создание тензорной поляризации дейтериевого пучка.

Специфика конструкции, продиктованная использованием источника в конкретных условиях эксперимента на ускорителе, состоит:

- в компактности, что позволяет установить источник в ограниченном пространстве туннеля накопительного кольца COSY и при этом обеспечить необходимое пространство для системы детекторов спектрометра ANKE;

⁴ T. Wise, A.D. Roberts and W. Haerberli. A High Brightness Source for Polarized Atomic Hydrogen and Deuterium. // Nucl. Instr. and Meth. **A 336** (1993), pp. 410-422.

⁵ F. Stock, K. Rith, H.G. Gaul *et al.* The FILTEX/HERMES Polarized Hydrogen Atomic Beam Source. // Nucl. Instr. and Meth. **A 343** (1994), pp. 334-342.

- в мобильности источника для быстрого монтажа и демонтажа на накопительном кольце, что позволяет резко сократить потери ускорительного времени при замене источника одной из неполяризованных мишеней (твердотельная, кластерная, пеллет-мишень), используемых в других физических экспериментах на спектрометре ANKE.

Одним из основных факторов, определяющих интенсивность атомарного пучка, а, следовательно, и плотность мишени, является скорость откачки рассеянных атомов и молекул в первой и второй камерах источника. Взаимодействие остаточного газа с частицами пучка разрушает направленный поток атомов и, в конечном итоге, приводит к уменьшению плотности мишени. Для сведения к минимуму влияния эффектов рассеяния и ослабления пучка на остаточном газе в источниках атомарных пучков применяется мощная система дифференциальной откачки, обеспечивающая вакуум в первой и второй камерах на уровне 10^{-4} - 10^{-5} мбар.

Для обеспечения дифференциальной откачки верхняя вакуумная камера разделена на три части двумя разделительными перегородками. Применение подвижных перегородок сложной формы позволило:

- впервые объединить три ступени источника в одной вакуумной камере, что существенно уменьшило ее линейные размеры и свело к минимуму количество уплотнений;
- уменьшить расстояние от источника газа до вакуумного насоса и отношение "пассивной" поверхности камер к "откачивающей", что привело к существенному улучшению условий откачки;
- провести экспериментальную оптимизацию геометрии системы формирования пучка.

Система дифференциальной откачки спроектирована таким образом, чтобы обеспечивать необходимый вакуум на уровне от 10^{-4} мбар в первой ступени до 10^{-7} мбар в последней камере источника при входных потоках газа до 5 мбар·л/с, и имеет следующие характерные особенности:

- впервые для поляризованных источников применена система с последовательным применением 3-х турбонасосов, что позволило сохранить скорость откачки в первой ступени постоянной при входных потоках газа до 5 мбар·л/с без использования больших масляных насосов;
- впервые для такого типа источников использована система безмасляной откачки, в которой последовательное использование компрессионных отношений турбомолекулярных насосов позволяет в качестве конечного использовать мембранный насос.

Конструкция газоразрядного диссоциатора ANKE ABS имеет ряд отличительных особенностей:

- впервые применена система жидкостного охлаждения разрядной трубки с коаксиальными потоками, что позволило разместить подводы жидкости в безопасной (верхней) области;
- впервые применено скользящее соединение для подачи ВЧ мощности и перемещаемый резонатор, что позволило оптимизировать систему по положению активной зоны ВЧ разряда относительно сопла диссоциатора;
- впервые сопло отделено от разрядной трубки диссоциатора, что существенно упростило смену как сопла, так и диссоциатора в целом, что особенно важно при использовании источника в экспериментах на ускорителе;
- впервые организован перехват тепла, поступающего из диссоциатора к соплу, что приводит к более однородному распределению температуры вдоль сопла и, тем самым, сужает распределение по скоростям атомов, вылетающих из сопла;
- для проведения обслуживания диссоциатор может быть легко демонтирован, в то время как сопло и его охлаждающая система остаются на своих местах.

Для создания высокочастотного поля, в котором образуется газовый разряд, был использован промышленный генератор с частотой 13.56 МГц и максимальной мощностью 600 Вт. Полностью автоматическая система минимизации отраженной мощности впервые была применена в источниках подобного типа. Это позволило существенно упростить и ускорить работу по оптимизации характеристик поляризованного источника при изменении режимов работы (температура сопла, поток газа и т.д.)

Впервые гибкие элементы системы охлаждения сопла, включающей в себя криогенератор, нагреватель и тепловой мост, расположены в непосредственной близости от холодной поверхности криогенератора, что позволило:

- свести до минимума наличие холодных поверхностей вблизи сопла и, тем самым, улучшить условия откачки в этой критической области;
- уменьшить сечение гибких элементов, поскольку в области низких температур теплопроводность меди существенно выше.

Система формирования газовой струи, включающая в себя сопло, скиммер и коллиматор, определяет важнейшие параметры пучка, такие как, например, распределение атомов по скоростям и угловая расходимость. Конструкция верхнего фланца позволяет производить

перемещение оси сопла относительно оси скиммера во всех направлениях. Благодаря простой и надежной конструкции элементов системы формирования газовой струи, позволяющей их быстрый монтаж и демонтаж, удалось экспериментально определить оптимальную геометрию отдельных элементов, что привело к увеличению интенсивности атомарного пучка на ~10%.

Для разделения атомарного пучка по ориентации электронного спина в ABS применены 6 постоянных секступольных магнитов (две группы по три магнита в каждой) [5], состоящих из 24 сегментов, изготовленных компанией Vakuumschmelze Hanau⁶. При производстве магнитов использованы три различных материала, различающихся по намагниченности и коэрцитивной силе. Применение современных магнитных материалов позволило создать рекордную по своим параметрам спин-сепарирующую магнитную систему с полем на внутренней поверхности магнитов до 1.65 Т.

Вторым важнейшим элементом источника, помимо спин-сепарирующих секступольных магнитов, отвечающим за создание поляризованного пучка, является система блоков сверхтонких переходов [6]. Именно здесь индуцируются переходы между уровнями сверхтонкого расщепления для создания той или иной конфигурации заселенности уровней. Из характерных особенностей конструкции блоков сверхтонких переходов ANKE ABS следует отметить:

- впервые в конструкцию включена защита от внешнего магнитного поля до 500 Гс, необходимая для правильного функционирования блоков в области сильных внешних магнитных полей, создаваемых главным магнитом (D2) спектрометра ANKE;
- впервые для создания градиентного магнитного поля применены плоские катушки, что позволило сделать конструкцию более компактной.

Использование высокочастотного оборудования последнего поколения, включенного в общую компьютерную систему управления, позволило существенно упростить работу по настройке блоков сверхтонких переходов и получить высокую степень ядерной поляризации атомарного пучка.

Четвертая глава содержит описание основных методик, использованных в ходе работы по исследованию и оптимизации характеристик источника, а также основные результаты измерений.

Важнейшими характеристиками источника, определяющими качество мишени, являются интенсивность атомарного пучка, его поляризация, а также степень диссоциации и пространственное распределение плотности

⁶ Vakuumschmelze GmbH, P.O.B. 2253, 63412 Hanau, Germany.

атомарного водорода в пучке или, иными словами, его геометрические размеры. В связи с этим одной из основных задач при подготовке источника к экспериментам на ускорителе является нахождение целого ряда параметров, при которых интенсивность, поляризация и степень диссоциации пучка максимальны, а геометрические размеры позволяют использовать в качестве мишени накопительную ячейку.

Традиционно, задача по измерению потока нейтральных частиц с параллельными или близкими к параллельным скоростями решается с помощью компрессионной трубки. Принцип действия такой трубки основан на эффекте увеличения давления, создаваемого пучком частиц, в замкнутом (компрессионном) объеме. При этом величина потока пропорциональна давлению в этом объеме. Калибровка сводится к измерению давления в компрессионном объеме, создаваемого известным потоком газа из калибровочного объема. Поскольку калибровка производится с помощью молекулярного водорода (дейтерия), в процессе измерений необходимо исключить систематическую ошибку, связанную с различной чувствительностью ионизационного манометрического преобразователя к атомарному и молекулярному водороду (дейтерию). Для этого в конструкцию компрессионной трубки включен специальный рассекатель, позволяющий увеличить количество столкновений атомов со стенками, что приводит к рекомбинации и, тем самым, позволяет исключить попадание атомарной фракции в чувствительный объем ионизационного манометрического преобразователя.

Устройство для измерения интенсивности атомарного пучка [7, 8] состоит из двух основных частей: компрессионной трубки, предназначенной для измерения интенсивности атомарного пучка, и системы подачи неполяризованного газа для ее калибровки.

Устройство обеспечивает:

- легкую настройку и юстировку компрессионной трубки;
- перемещение компрессионной трубки вдоль оси пучка, что обеспечивает возможность поиска фокуса магнитной системы;
- легкую замену компрессионной трубки и возможность использования трубок разных диаметров.

Компрессионная трубка, закрепленная на трехкоординатном столе, была установлена на расстоянии 300 мм от края последнего спин-сепарирующего секступольного магнита. Для обеспечения фоновых измерений, т.е. определению давления в компрессионном объеме, создаваемом остаточным газом, был использован цилиндрический прерыватель пучка с оптической системой контроля положения.

В ходе оптимизации поочередно изменялись три основных параметра источника, а именно: входной поток, радиочастотная мощность,

подаваемая в диссоциатор и температура сопла. Во всех измерениях помимо основного потока водорода в диссоциатор подавался небольшой ($1 \cdot 10^{-3}$ мбар-л/с) дополнительный поток кислорода, что привело к образованию тонкой пленки воды на поверхности сопла и, тем самым, позволило снизить скорость рекомбинации атомов водорода.

Результаты измерений интенсивности атомарного пучка как функции входного потока молекулярного водорода выявили хорошо выраженный максимум в районе 1.2 мбар-л/с и характерный спад в области меньших и больших входных потоков. Очевидно, что при потоках меньше 1 мбар-л/с входной поток недостаточен. Падение же интенсивности при потоках свыше 1.3 мбар-л/с обусловлено как перерасеянием частиц внутри пучка, так и снижением степени диссоциации в пучке.

Экспериментальные данные, полученные в ходе исследований зависимости интенсивности атомарного пучка от радиочастотной мощности, подаваемой в диссоциатор, показали, что при достижении радиочастотной мощностью значения 350÷400 Вт рост интенсивности прекращается, и она выходит на постоянный уровень, что говорит о том, что при этих условиях достигнуто максимально возможное значение степени диссоциации в пучке.

Зависимость интенсивности атомарного пучка от температуры сопла была исследована для различных диаметров сопла ($D = 2.0, 2.3, 2.5$ мм) в диапазоне температур от 55 до 100 К. Результаты измерений представлены на рис. 1. Наибольшая интенсивность пучка получена при использовании сопла диаметром $D = 2.3$ мм. При этом зависимость имеет хорошо выраженный максимум в районе 60 К, что согласуется с результатами моделирования. Различное положение максимумов связано с изменением распределения атомов по скоростям, определяемым не только температурой, но и геометрией самого сопла. Падение интенсивности в области высоких температур обусловлено быстрым ростом коэффициента рекомбинации с ростом температуры поверхности сопла. Это подтверждается и измерениями степени диссоциации в пучке. С понижением температуры ухудшается проводимость области вокруг сопла, что приводит к ослаблению газовой струи из-за рассеяния на остаточном газе.

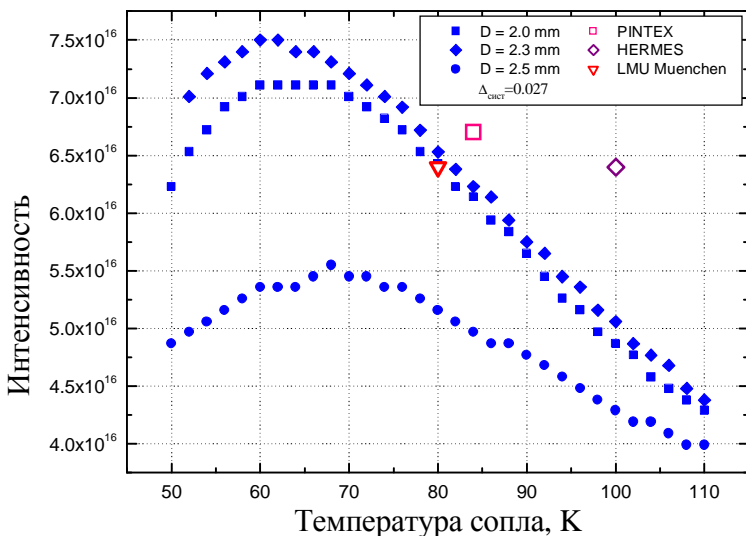


Рис. 1: Зависимость интенсивности атомарного пучка от температуры сопла для различных диаметров сопла ($D = 2.0, 2.3, 2.5$ мм). Радиочастотная мощность, подаваемая в диссоциатор $W = 350$ Вт и входной поток молекулярного водорода $q(\text{H}_2) = 1.2$ мбар·л/с. Для сравнения показаны результаты измерений интенсивности источников HERMES (\diamond), PINTEX (\square) и источника поляризованных ионов Мюнхенского университета (∇).

Проведенные исследования позволили установить оптимальные рабочие параметры источника поляризованного атомарного пучка и получить интенсивность пучка $(7.5 \pm 0.2) \cdot 10^{16}$ атомов/с [7], что на $\sim 10\%$ превосходит лучшие мировые показатели для источников такого типа. Для сравнения на рис. 1 показана интенсивность пучка лучших на сегодняшний день источников поляризованного атомарного водорода и дейтерия: HERMES⁷, PINTEX⁸ и источник поляризованных ионов

⁷ J. Stewart for the HERMES Collaboration. The HERMES Polarized Hydrogen Internal Gas Target. // Proc. 7th Int. Workshop on Polarized Gas Targets and Polarized Beams, eds. R.J. Holt, M.A. Miller, Urbana, Illinois, USA 1997, AIP Conf. Proc. **421** (1997), pp. 69-78.

⁸ F. Rathmann, W. Haerberli, B. Lorentz *et al.* The Wisconsin-IUCF Polarized Gas Target. // Proc. 7th Int. Workshop on Polarized Gas Targets and Polarized Beams, eds. R.J. Holt, M.A. Miller, Urbana, Illinois, USA, 1997, AIP Conf. Proc. **421** (1997), pp. 89-98.

Мюнхенского университета⁹.

Плотность мишени линейно зависит от интенсивности атомарного пучка, инжектируемого в вертикальную трубку накопительной ячейки, поэтому она может быть увеличена за счет более полного использования пучка. Иными словами, геометрические размеры вертикальной трубки накопительной ячейки должны соответствовать геометрическим размерам атомарного пучка источника. В связи с этим представляется важным измерить и оптимизировать пространственное распределение плотности атомарного пучка, создаваемого источником.

Для измерений пространственного распределения плотности атомарного пучка был использован квадрупольный масс-спектрометр (QMS¹⁰), закрепленный на двухкоординатном столе. Вертикальное положение QMS соответствовало положению вертикальной трубки накопительной ячейки. Для обеспечения фоновых измерений был применен прерыватель пучка, установленный над диафрагмой.

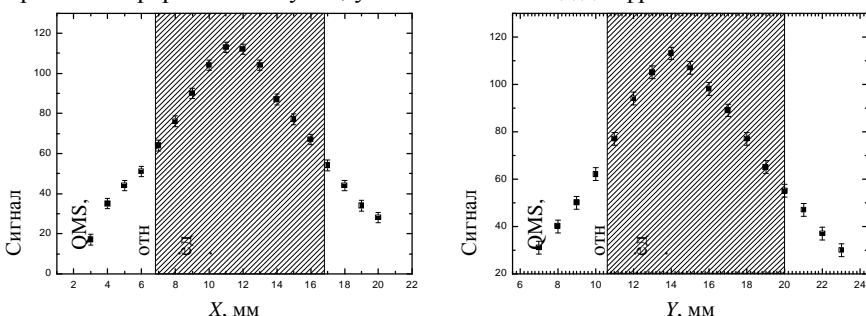


Рис. 2. Профили пучка атомарного водорода вдоль осей X и Y, проходящих через оптическую ось источника (ось Z). Заштрихованная область соответствует геометрическим размерам вертикальной трубки накопительной ячейки.

Результаты измерений профиля пучка представлены на рис. 2. Определив коэффициент использования пучка (h) как отношение числа частиц, попавших в круг с радиусом вертикальной трубки накопительной ячейки к полному потоку, получаем, что для ANKE ABS $h = 0.477$.

В ходе измерений была также разработана оригинальная методика прецизионной юстировки сопла, использующая симметрию пространственного распределения плотности атомарного пучка.

⁹ R. Hertenberger, Y. Eisermann, A. Metz *et al.* A HERMES Type Stern-Gerlach Source with ECR Ionizer and Charge Exchange in Cesium Vapour for Intense Ion Beams of Negative Deuterium // Proc. 9th Int. Workshop on Polarized Sources and Targets (PST-01), Nashville, Indiana, USA, eds. V.P. Derenchuk, B.von Przewoski, World Scientific Publishing, ISBN 981-02-4917-9 (2001), pp. 215-219.

¹⁰ Quadrupole Mass Spectrometer.

Кроме распределения плотности, определяющего коэффициент использования пучка, важно знать и о степени диссоциации (a) в пучке, поскольку наличие в нем молекулярной компоненты может привести к снижению интегральной поляризации мишени. В общем случае поляризация мишени определяется как:

$$P_t = aP_a + (1-a)P_m, \quad (1)$$

где a – степень диссоциации, P_a и P_m – поляризация атомарной и молекулярной компоненты. Поскольку степень диссоциации в мишени, в случае использования накопительной ячейки, может только уменьшаться, очень важно добиться максимального значения a в самом пучке.

Степень диссоциации также была измерена с помощью QMS. Степень диссоциации определяется через атомарную и молекулярную плотности как

$$a = \frac{n_a}{n_a + 2e n_m} = \left(1 + 2e \frac{n_m}{n_a} \right)^{-1}, \quad (2)$$

где e – коэффициент, учитывающий разницу в сечениях ионизации атомарного и молекулярного водорода, разную эффективность их регистрации и отношение скоростей, определяющее время пребывания частиц в чувствительном объеме QMS, а n_a и n_m – сигналы QMS, учитывающие поправки на фон и диссоциативную ионизацию.

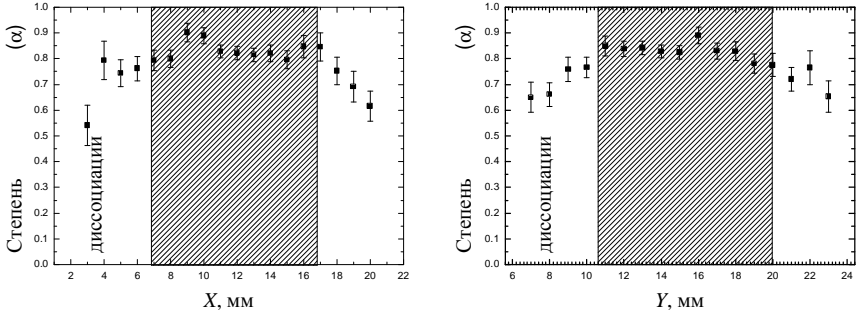


Рис. 3: Профили степени диссоциации пучка в плоскостях X и Y по центру компрессионной трубки. Заштрихованная область соответствует геометрическим размерам компрессионной трубки.

На рис. 3 представлены результаты измерений профиля степени диссоциации в пучке в плоскости компрессионной трубки. Заштрихованная область соответствует геометрическим размерам компрессионной трубки. Среднее значение степени диссоциации пучка составило $a = 0.82$. Следует отметить, что измеренное значение степени

диссоциации является заниженным, поскольку определяется, в основном, изотропным фоном молекулярного водорода.

Поскольку одним из основных факторов, определяющим успешную и эффективную работу эксперимента на ускорителе, является время набора статистики (t_{exp}), которое в сильной мере зависит от поляризации мишени ($t_{\text{exp}} \propto 1/P_z^2$), особенно важной задачей представляется повышение степени ядерной поляризации атомарного пучка источника.

Измерения поляризации пучка атомарного водорода и дейтерия проводились с помощью поляриметра, использующего лэмбовский сдвиг [9].

Следует отметить, что в силу не 100%-ой эффективности элементов поляриметра измеренная поляризация пучка метастабильных атомов – P_{Ly-a} отличается от поляризации атомарного пучка на входе в ионизатор. В результате метрологических измерений были определены поправочные коэффициенты как для отдельных элементов, так и для всего поляриметра в целом. Для водорода поправочный коэффициент составляет $C_H = 1.113 \pm 0.010$, а для дейтерия $C_D = 1.075 \pm 0.075$ [9]. Таким образом, поляризация пучка определяется как

$$P_{z(z)} = C_{H(D)} \cdot P_{Ly-a} . \quad (3)$$

В результате проведенной работы по оптимизации блоков сверхтонких переходов ядерная поляризация пучка составила: +0.89 и – 0.96 для водорода, +0.73 и –0.82 (векторная), +0.77 и –1.17 (тензорная) для дейтерия. Относительная ошибка измерений ($\Delta P_{z(z)} / P_{z(z)}$) составила ~1% для водорода и ~6% для дейтерия.

Пятая глава посвящена перспективам использования источника в качестве мишени в ядерно-физическом эксперименте.

В случае использования ANKE ABS в качестве внутренней газовой поляризованной мишени струйного типа, в которой газовая струя пересекает пучок частиц в накопительном кольце и попадает в ловушку, где и откачивается, эффективная плотность такой мишени, с учетом максимальной интенсивности атомарного пучка, составит $\leq 6.5 \cdot 10^{11}$ атомов/см².

Использование криогенной накопительной ячейки позволяет повысить плотность мишени примерно на два порядка по сравнению с простой газовой струей. Идея накопительной ячейки состоит в следующем: на пути пучка заряженных частиц располагается трубка диаметром D и длиной L (рис. 4). В трубку попадает параллельный поток атомов, который, рассеиваясь только в центре Т-образной накопительной ячейки, растекается в трех направлениях. При этом в центре плотность газа увеличивается. Интегральная плотность мишени вдоль пучка ускорителя определяется как

$$n_{lin} = \int_{-L/2}^{L/2} n(x) dx = \frac{P_{max} L}{2kT} = Rk^{-\frac{3}{2}} \frac{M^{\frac{3}{2}} L}{m D^3 \sqrt{pT}}, \quad (4)$$

где P_{max} – давление в центре трубки, T – температура поверхности трубки, M – молекулярная масса, m – молярная масса, R – газовая постоянная, k – постоянная Больцмана.

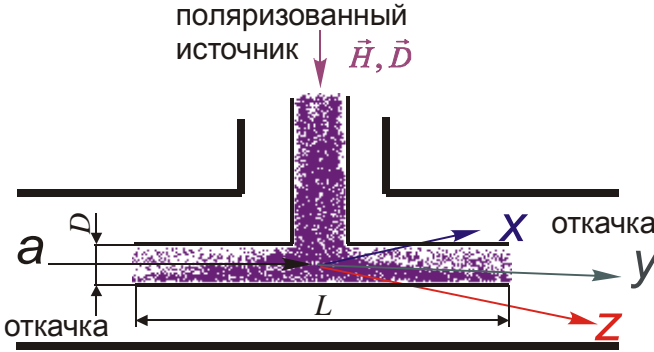


Рис. 4. Накопительная ячейка для поляризованного источника.

Из приведенного выражения видно, что наибольшее влияние на плотность мишени оказывает диаметр накопительной ячейки ($n_{lin} \mu D^{-3}$), поэтому его желательно сделать минимальным. В момент инжекции пучок имеет размеры большие, чем в режиме накопления, и его орбита может быть неустойчивой. Именно это и определяет предельное значение диаметра накопительной ячейки. Длина (L) определяется возможностями разрешения детектирующей системы. Зависимость плотности мишени от температуры достаточно слабая ($n_{lin} \mu T^{-1/2}$), но именно она позволяет увеличить плотность мишени, без изменения линейных размеров, путем перехода в криогенные области температур.

Из выражения (4) видно, что, задавшись планируемыми параметрами накопительной ячейки ($L = 200$ мм, $D = 10$ мм, $T = 100$ К) и учитывая полученную интенсивность атомарного пучка $I = (7.5 \pm 0.2) \cdot 10^{16}$ атомов/с, эффективная плотность мишени составит $\leq 1.7 \cdot 10^{14}$ атомов/см². Таким образом, при достигнутой на ускорителе COSY интенсивности пучка поляризованных протонов $\sim 10^{16}$ частиц/с применение накопительной ячейки позволит обеспечить светимость эксперимента на уровне $L \sim 1.7 \cdot 10^{30}$ 1/см²·с.

Заключение содержит основные результаты диссертации.

Основные результаты диссертации

В настоящей работе создан, исследован и оптимизирован основной элемент поляризованной газовой мишени для эксперимента на магнитном спектрометре ANKE, посвященного исследованию реакции развала дейтрона (${}^{\mu}_{\nu}d \rightarrow ppn$). Это источник атомарного водорода и дейтерия с ядерной поляризацией, который обеспечивает:

- ядерную поляризацию водородной мишени:
 $P_z = +0.89 \pm 0.01$; $P_z = -0.96 \pm 0.01$;
- ядерную поляризацию дейтериевой мишени:
 - векторную: $P_z = +0.73 \pm 0.05$; $P_z = -0.82 \pm 0.06$;
 - тензорную: $P_{zz} = +0.77 \pm 0.06$; $P_{zz} = -1.17 \pm 0.08$;
- максимальную интенсивность пучка атомарного водорода $(7.5 \pm 0.2) \cdot 10^{16}$ атомов/с (для двух сверхтонких состояний), что на ~10% превышает лучшие мировые показатели для источников такого типа и в случае использования криогенной накопительной ячейки позволит получить эффективную плотность мишени порядка $1.7 \cdot 10^{14}$ атомов/см²;
- интенсивность дейтериевого пучка $(3.9 \pm 0.1) \cdot 10^{16}$ атомов/с (для трех сверхтонких состояний).

Для оптимизации характеристик источника создан ряд новых методик и приборов, которые, в частности, позволили впервые количественно исследовать пространственное распределение плотности и степени диссоциации в пучке поляризованных атомов.

Разработанный и исследованный в настоящей работе источник не только имеет высокие характеристики атомного пучка, но и удовлетворяет всем требованиям, предъявляемым к экспериментальным установкам на современных накопительных кольцах. Он может быть легко адаптирован для использования в других экспериментах и лабораторных исследованиях, требующих применения пучков поляризованных атомов водорода или дейтерия.

По теме диссертации опубликованы следующие работы

1. F. Rathmann, S. Dymov, ..., M. Mikirtychiants *et al.* The Polarized Internal Gas Target for the Deuteron Break-up Experiment of ANKE at COSY-Jülich. // Proc. Int. School-Workshop Praha-Spin-01, 15-28 July 2001, Prague, Czech Republic;
Czechoslovak Journal of Physics, **52** Suppl. A (2002) pp. C681-687.
2. М.С. Микиртычянц, А.А. Васильев, В.П. Коптев и др. Источник поляризованного атомарного водорода и дейтерия для внутренней

- газовой мишени спектрометра ANKE. Препринт ПИЯФ-2491, Гатчина (2002) 34 с.
3. R. Brueggemann, R. Emmerich, R. Engels, ..., M. Mikirtychiants *et al.* The Polarized Internal Gas Target for ANKE at COSY. // Proc. 14th International Spin Physics Symposium SPIN 2000, October 16-21, Osaka, Japan, eds. K. Hatanaka, T. Nakano, K. Imai, H. Ejiri; AIP Conf. Proc. **570** (2001) pp. 830-834.
 4. M. Mikirtychiants, R. Brüggenmann, R. Emmerich, *et al.* The Polarized Gas Target for the ANKE Spectrometer at COSY/Jülich. // Proc. 9th Int. Workshop on Polarized Sources and Targets (PST-01), 30 Sept. – 4 Oct. 2001, Nashville, Indiana, USA, eds. V.P. Derenchuk, B. von Przewoski, World Scientific Publishing, ISBN 981-02-4917-9, (2001) pp. 47-51.
 5. A. Vassiliev, V. Nelyubin, ..., M. Mikirtychiants *et al.* 24 Segment High Field Permanent Sextupole Magnets. // Rev. Sci. Instrum., **71**, №9, (2000) pp. 3331-3341.
 6. М.С. Микиртычьянц, А.А. Васильев, В.П. Коптев и др. Блоки сверхтонких переходов для создания ядерной поляризации в источнике поляризованного атомарного водорода и дейтерия ANKE ABS. Препринт ПИЯФ-2487, Гатчина (2002) 22 с.
 7. М.С. Микиртычьянц, А.А. Васильев, В.П. Коптев и др. Измерения интенсивности пучка источника поляризованного атомарного водорода и дейтерия. Препринт ПИЯФ-2481, Гатчина (2002) 36 с.
 8. M. Nekipelov, V. Koptev, A. Kovalev, ..., M. Mikirtychiants *et al.* Compression Tube Measurements of the ANKE ABS Beam Intensity. // Proc. 8th Int. Workshop on Polarized Sources and Targets (PST99), eds. A. Gute, S. Lorenz, E. Steffens, (Universität Erlangen-Nürnberg, 1999) pp. 486-489.
 9. R. Engels, R. Emmerich, J. Ley, ..., M. Mikirtychiants *et al.* A Lamb-shift Polarimeter for the Polarized Target at ANKE. // Proc. 9th Int. Workshop on Polarized Sources and Targets (PST-01), 30 Sept. – 4 Oct. 2001, Nashville, Indiana, USA, eds. V.P. Derenchuk, B. von Przewoski, World Scientific Publishing, ISBN 981-02-4917-9 (2001) pp. 52-56.