

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

УДК 539.128, 539.188

На правах рукописи

Григорьев Кирилл Юрьевич

**Создание поляризованной водороднодейтериевой
газовой мишени для эксперимента ANKE
на внутреннем пучке накопительного кольца
ускорителя COSY**

01.04.01 – приборы и методы экспериментальной физики

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Гатчина-2007

Работа выполнена в Отделении физики высоких энергий Петербургского института ядерной физики им. Б.П. Константинова РАН.

Научные руководители:

кандидат физико-математических наук А.А. Васильев,

доктор философии Ф. Ратманн.

доктор технических наук Н.Н. Чернов.

Официальные оппоненты:

доктор физико-математических наук профессор Л.В. Краснов,

доктор физико-математических наук доцент Д.К. Топорков.

Ведущая организация: Объединенный институт ядерных исследований (ОИЯИ), Дубна.

Защита состоится " ____ " _____ 2007 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 ПИЯФ РАН.

Автореферат разослан " ____ " _____ 2007 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета

И.А. Митропольский

Общая характеристика работы

Работа посвящена созданию поляризованной газовой водороднодейтериевой струйной мишени и поляризованной мишени с использованием накопительной ячейки, а также их применению в экспериментах с двойной поляризацией на внутреннем пучке заряженных частиц ускорителя COSY¹, Национального исследовательского центра г. Юлих, Германия, в 2003-2007 годах.

Актуальность темы

В последнее десятилетие актуальной задачей стало изучение спиновой структуры заряженных частиц. В результате широкое распространение получили газовые поляризованные мишени, оказавшиеся уникальным инструментом для проведения исследований спиновых структур элементарных частиц. Эксперименты с двойной поляризацией, в которых известно спиновое состояние как налетающей частицы, так и частицы, входящей в состав газовой мишени, являются наиболее информативными. Спектрометр ANKE², расположенный на накопительном кольце ускорителя COSY (научно-исследовательский центр г. Юлих, Германия), является единственным в мире, где возможно проведение двойного поляризационного эксперимента ($\vec{d}\vec{p} \rightarrow ppn$) с использованием поляризованной мишени и поляризованного пучка заряженных частиц ускорителя. В рабочем диапазоне энергий COSY можно определить векторную и тензорную анализирующие способности и спин-корреляционные параметры протонов и поляризационные наблюдаемые дейтронов. Этот эксперимент позволяет получить новую информацию о структуре волновой функции дейтрона, поскольку $A_y^p, A_y^d, A_{yy}^d, C_{yy}, C_{yyy}$ зависят от отношения S - и D -компонент волновой функции.

Создание поляризованной газовой мишени для эксперимента ANKE на накопительном кольце ускорителя COSY позволило провести эксперименты, посвященные изучению спиновой структуры нуклона. Актуальными являются исследования столкновений двух поляризованных частиц (протонов и дейтронов) в диапазоне энергий около 1 ГэВ. Эта область энергий интересна тем, что одна из поляризационных наблюдаемых – векторная анализирующая способность A_y при энергии поляризованного

¹ COoler Synchrotron, Forschungszentrum Jülich, Germany.

² Apparatus for studies of Nucleon and Kaon Ejectiles.

протонного пучка 500 МэВ достаточно велика, а при 800 МэВ она близка к нулю. Проведение данных исследований позволит измерить векторную и тензорную анализирующие способности и спин-корреляционные параметры протона в диапазоне энергий $0,175 \div 2,88$ ГэВ.

Основным элементом при создании поляризованных мишеней является источник поляризованных атомов (ABS³), в котором формируется начальный пучок атомов с тепловыми скоростями. После прохождения области взаимодействия с пучком ускорителя оставшиеся в пучке атомы могут использоваться для определения поляризации. Поляризованные газовые мишени по сравнению с поляризованными твердотельными мишенями имеют ряд преимуществ:

- низкое радиационное повреждение (мишень не изменяет своих свойств и не разрушается под действием пучка ускорителя любой интенсивности);
- однородность материала газа (для создания газового потока используется один тип газа – водород или дейтерий без дополнительных примесей, усложняющих анализ полученных данных);
- высокий коэффициент поляризации газа мишени (с помощью современных источников получаемая поляризация, достигает 90 %, по сравнению с 40 ÷ 50 % поляризацией протонных твердотельных поляризованных мишеней);
- быстрое изменение знака поляризации мишени (положительная или отрицательная) и, в случае работы с дейтерием, типа поляризации (векторная или тензорная).

Относительно низкая плотность поляризованных струйных газовых мишеней (порядка $10^{11} \div 10^{12}$ ат/см²) в сравнении с поляризованными твердотельными мишенями (с плотностью 10^{14} ат/см² и выше) может компенсироваться за счет многократного прохождения пучка заряженных частиц через мишень. Это позволяет достичь высокой светимости в эксперименте. Для увеличения плотности создаваемой мишени используют накопительную ячейку, через которую пропускается пучок ускорителя. Она представляет собой Т-образную трубку, в центр которой подается пучок поляризованных атомов. В зависимости от геометрических размеров ячейки интегральная плотность такой мишени может быть на два порядка выше, чем у струйной мишени, полученной с помощью того же источника. Для снижения рекомбинации атомов и сохранения поляризации мишени

³ Atomic Beam Source.

применяют такие специальные покрытия, как политетрафторэтилен (тефлон) и др.

В процессе создания поляризованной газовой водородно-дейтериевой мишени с использованием накопительной ячейки возникает ряд ключевых задач, решение которых определяет возможность проведения эксперимента:

- определение и оптимизация характеристик пучка ускорителя в месте размещения поляризованной газовой мишени;
- сокращение поперечных размеров накопительной ячейки увеличивает плотность газовой мишени, но, вместе с тем, снижает интенсивность пучка ускорителя. Оптимизация геометрических размеров мишени, располагающейся вдоль пучка ускорителя, направленная на повышение светимости в эксперименте, является серьезной задачей, определяющей длительность проведения эксперимента;
- накопительные ячейки являются тонкостенными мишенями, так как рассеянные частицы, проходя сквозь стенки, теряют энергию. Это создает дополнительные трудности для правильной идентификации продуктов реакции и повышает фон, мешающий проведению эксперимента. Создание мишеней из материала толщиной в несколько микрон, а также систем для их поддержки и перемещения является серьезной технической задачей;
- столкновение поляризованных атомов со стенками мишени вызывает процесс рекомбинации атомов в молекулы и их деполяризацию, что значительно снижает качество создаваемой мишени. Правильный выбор материала внутреннего покрытия накопительной ячейки и создание определенной технологии его нанесения позволят снизить влияние этих процессов, а значит, повысить среднюю поляризацию атомов мишени.

Целью работы является создание поляризованной газовой водороднодейтериевой струйной мишени, поляризованной мишени с использованием накопительной ячейки и проведение первого в мире эксперимента по развалу дейтрона с двойной поляризацией (поляризованной газовой мишенью и поляризованным пучком частиц в накопительном кольце). Комплекс работ по созданию поляризованной мишени и установке ее на накопительном кольце ускорителя COSY включает в себя:

1. разработку и создание установки для измерения профиля пучка в камере для установки мишеней на эксперимент ANKE;

2. проведение серии экспериментов по определению характеристик пучка ускорителя COSY в месте размещения мишени;
3. исследование возможностей различных методик инжекции и охлаждения пучка ускорителя, направленных на увеличение его интенсивности при использовании протяженной накопительной ячейки;
4. исследование влияния магнитных полей в районе установки мишени на работоспособность различных компонент источника ABS, свойства производимого пучка, а также измерительную систему – поляриметр, работающий на эффекте лэмбовского сдвига (LSP^4);
5. создание системы подачи неполяризованных газов (H_2 , D_2 , N_2 , He) в накопительную ячейку для проведения экспериментов с неполяризованной газовой мишенью, по плотности эквивалентной поляризованной мишени, и калибровка плотности мишени, создаваемой с его помощью;
6. исследование фоновых событий в эксперименте и определение способов их подавления;
7. создание поляризованной газовой водороднодейтериевой мишени максимальной плотности с накопительной ячейкой.

Достижение высокой светимости в экспериментах на накопительном кольце COSY требует не только максимальной плотности поляризованной мишени, но и высокой интенсивности поляризованного пучка ускорителя, проводимого через мишень. Для выполнения этой задачи на ускорителе COSY была проведена серия исследований, позволивших значительно увеличить интенсивность пучка ускорителя при использовании накопительной ячейки и создать мишень максимальной плотности с высокой поляризацией. В ходе экспериментов было создано несколько мишеней, отличающихся по геометрической форме, внутреннему покрытию и использованному типу газа.

Научная новизна

В процессе подготовки эксперимента с двойной поляризацией впервые на ускорителе COSY были проведены измерения профиля пучка в камере для установки мишеней на спектрометр ANKE. Для достижения максимальной интенсивности в экспериментах с накопительной ячейкой впервые одновременно использовались все возможные способы охлаждения.

⁴ Lamb-Shift Polarimeter.

Созданная поляризованная газовая водородная мишень с плотностью $1,3 \cdot 10^{13}$ ат/см² позволила достичь высокой светимости (порядка $\mathcal{L} \sim 10^{29}$ см⁻²с⁻¹) и провести первый в мире двойной поляризационный эксперимент. Поляризация мишени, полученная в результате обработки накопленных данных, является максимальной среди мировых поляризованных водородных газовых мишеней с использованием накопительной ячейки и составляет $0,79 \pm 0,07$. При анализе данных была применена модель точечной мишени, что снижает точность расчетов и позволяет надеяться на более высокие значения поляризации при использовании модели протяженной мишени, находящейся на данный момент в разработке.

Практическая ценность и реализация результатов работы

Практическая ценность заключается в следующем:

- созданная система измерения профиля пучка ускорителя позволила:
 - определить форму, положение и размеры пучка COSY в секции ускорителя, используемой для эксперимента ANKE;
 - оптимизировать размеры пучка и более чем в 3 раза увеличить интенсивность проведенного через накопительную ячейку пучка;
- проведенные исследования различных типов покрытий, сохраняющих поляризацию атомов в накопительной ячейке, и способов их нанесения на тонкую алюминиевую фольгу обеспечили поддержание стабильной поляризации газа мишени в эксперименте с поляризованной газовой водородной мишенью;
- был размещен на ускорителе и модернизирован для работы в сильных магнитных полях эксперимента ANKE источник поляризованных атомов – ABS;
- был проведен эксперимент с использованием поляризованной водородной газовой мишени плотностью $1,3 \cdot 10^{13}$ ат/см² с накопительной ячейкой и поляризованного дейтронного пучка ускорителя с энергией 1,2 ГэВ. В результате анализа данных была получена величина поляризации атомов водорода в накопительной ячейке, составившая $0,79 \pm 0,07$.
- созданная внутренняя поляризованная газовая мишень высокой плотности позволит в ближайшем будущем провести ряд экспериментов по развалу дейтрона, таких как $\bar{d}p \rightarrow ppn$ при других энергиях, а также $\bar{d}p \rightarrow {}^3\text{He} \pi^0$, $\bar{d}p \rightarrow dp$ и других.

Апробация работы

Основные результаты диссертационной работы докладывались на следующих конференциях:

1. 1st Caucasian-German School and Workshop on Hadron Physics, August 2004, Georgia, Tbilisi.
2. 16th International Spin Physics Symposium, October 15, 2004, Trieste, Italy.
3. German Physical Society Meeting 2005, March 4, 2005, Berlin, Germany.
4. 12th International Workshop on Polarized Sources and Targets, November 16, 2005, Tokyo, Japan.
5. 17th International Spin Physics Symposium, October 3, 2006, Kioto, Japan.
6. German Physical Society Meeting 2007, March 15, 2007, Giessen, Germany.

Структура и объем диссертации

Диссертация состоит из введения, 6 глав, заключения, 53 рисунков, 13 таблиц и списка литературы. Общий объем диссертации 119 страниц.

Краткое содержание диссертации

Введение содержит формулировку основной цели работы и её актуальность. Проводится сравнение различных экспериментов с использованием газовых и твердотельных поляризованных мишеней на ускорителях заряженных частиц. Обосновывается необходимость создания внутренней поляризованной водорододейтериевой газовой мишени с накопительной ячейкой для экспериментов на ускорителе COSY.

Первая глава посвящена обзору существующих в мире источников поляризованных атомарных пучков. В ней рассматриваются принципы, заложенные в основу работы источников, область применения, достигнутые с их помощью результаты, а также перспективы использования. Детальное рассмотрение конструкции источников поляризованных атомов проводится на основе источника, созданного для эксперимента ANKE на ускорителе COSY.

Вторая глава посвящена обзору внутренних газовых мишеней для ускорителей заряженных частиц.

Разработка источников поляризованных атомарных пучков позволила создать новый вид мишеней – внутренних, устанавливаемых на внутренних кольцах ускорителей заряженных частиц. Низкое радиационное

повреждение делает такие мишени более привлекательными для использования, а быстрая смена знака поляризации позволяет выполнять работу с различными мишенями без прерывания работы ускорителя. Однако такие мишени обладают низкой плотностью, которая может компенсироваться за счет многократного прохождения пучка через мишень. В этом случае светимость в эксперименте (\mathcal{L}) зависит не только от плотности газовой мишени (n_{target}) и количества частиц в ускорительном пучке (n_{beam}), но и от частоты обращения пучка (f) в накопительном кольце ускорителя:

$$\mathcal{L} = n_{beam} \cdot n_{target} \cdot f. \quad (1)$$

В середине девяностых годов прошлого столетия Уильямом Хаберли было предложено⁵ использовать Т-образную трубку для увеличения плотности внутренних газовых поляризованных мишеней. Таким образом, из-за газодинамического сопротивления трубок плотность созданной мишени могла быть увеличена на два порядка по сравнению со струйной мишенью, которая не имела удерживающих стенок. Важно отметить, что при высоких энергиях вторичные частицы вылетают под малыми углами к направлению пучка ускорителя и не задевают трубок.

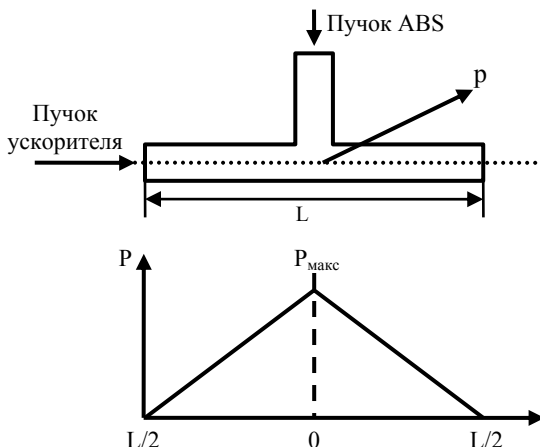


Рис. 1. Распределение давления в накопительной ячейке

Поперечные размеры накопительных ячеек намного меньше средней длины свободного пробега атомов, поэтому в области мишени газ

⁵ W. Haerberli, AIP Conf. Proc. 128 (1985), p. 251.

распространяется в свободномолекулярном режиме течения. Длина накопительной ячейки вдоль пучка ускорителя намного больше ее диаметра, поэтому можно полагать, что плотность в перпендикулярном сечении однородна, а вдоль пучка имеет треугольную зависимость с вершиной в точке сочленения трубок (Рис. 1).

Основными задачами при создании накопительных ячеек для внутренних поляризованных газовых мишеней являются повышение плотности мишени и поддержание коэффициента поляризации исходного пучка ABS. Также необходимо увеличивать интенсивность ускорителя, которая неизбежно будет снижаться с уменьшением поперечных размеров трубок мишени. Эти и другие особенности создания накопительной ячейки рассмотрены в следующих главах.

Третья глава посвящена описанию возможностей ускорителя COSY по работе с внутренними пучками и особенностей эксперимента ANKE, где планировалась установка поляризованной газовой мишени. Использование накопительной ячейки во время проведения эксперимента будет влиять на следующие факторы:

- низкая интенсивность инжектируемого пучка за счет обрезания частиц, находящихся вне трубки накопительной ячейки;
- увеличение фоновых событий во время одного цикла работы ускорителя, вызванное разогревом пучка при его взаимодействии с газом мишени;
- наличие фоновых событий из-за столкновений ускоренных частиц со стенками мишени.

Если с последним эффектом необходимо бороться, используя специальные методы отбора при анализе данных, то влияние первых двух можно уменьшить средствами ускорителя. Высокая интенсивность пучка ускорителя COSY во время инжекции и при низких энергиях ускоренного пучка (до 100 МэВ) достигается использованием электронного, а при высоких энергиях (от 1500 МэВ) – стохастического охлаждения. Кроме того, существует дополнительный метод увеличения количества частиц в накопительном кольце ускорителя – многократная инжекция. Использование электронного охлаждения между добавлением новых порций заряженных частиц позволяет сделать пучок более плотным и ведет к снижению потерь при ускорении.

Во второй части третьей главы дано краткое описание основных элементов, входящих в состав внутренней поляризованной газовой мишени для эксперимента ANKE:

- источник поляризованных атомарных пучков;

- вакуумная камера для установки мишеней;
- накопительная ячейка с системой поддержки и перемещения;
- устройство для измерения поляризации – поляриметр, работающий на эффекте Лэмбовского сдвига.

В четвертой главе описаны подготовительные работы и измерения на ускорителе COSY, направленные на создание накопительной ячейки для проведения двойного поляризованного эксперимента. Процесс подготовки к созданию первой накопительной ячейки можно разделить на четыре основных этапа:

- измерение профиля пучка ускорителя в месте установки мишени;
- размещение источника на ускорителе и ввод его в эксплуатацию;
- измерение магнитных полей вокруг источника ABS и вдоль оси распространения пучка;
- калибровка устройства измерения интенсивности пучка и создание неполяризованных молекулярных мишеней с известной плотностью.

Определение профиля инжектированного и ускоренного пучка в районе мишени позволяет оценить минимальные размеры ячейки, при которых ее можно использовать без значительного уменьшения интенсивности пучка ускорителя. Для этого была создана и использовалась в последующих экспериментах система поддержки и перемещения рамки с возможностью установки различных измерительных диафрагм и накопительных ячеек на пучок. Эта установка состояла из двух 3-координатных столов, поддерживающих рамку с установленными в ней диафрагмами. Вся система размещалась на фланце вакуумной камеры и была укомплектована гибкими тарельчатыми сильфонами, позволявшими перемещать систему внутри ускорителя на 150 мм в горизонтальном и 25 мм в вертикальном направлении в плоскости, перпендикулярной направлению распространения ускорительного пучка. Свободный ход рамки в горизонтальной плоскости позволял после окончания измерений выдвинуть систему из пучка без нарушения вакуума и продолжить работу со следующим экспериментом. Точность определения координат и плавное перемещение системы внутри камеры ускорителя обеспечивалось прецизионными двигателями с поступательным движением за полный оборот 0,25 мм. Специально для этой установки было разработано программное обеспечение, позволяющее удаленно управлять перемещением измерительных диафрагм.

Измерение профиля пучка производилось в момент инжекции частиц во внутреннее кольцо ускорителя, а также после их ускорения до энергии эксперимента. Полученные результаты обрабатывались с

применением закона двумерного распределения Гаусса для получения реального профиля пучка ускорителя (Рис. 2). Во время измерения для имитации газовой мишени была использована кластерная мишень с плотностью, эквивалентной накопительной ячейке, заполненной газом.

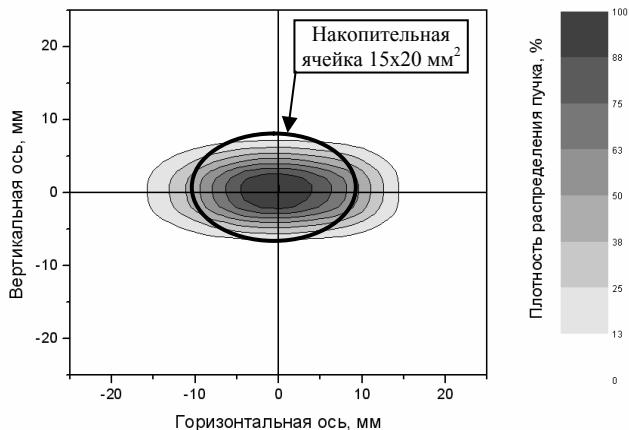


Рис. 2. Восстановленный профиль пучка на этапе инжекции в ускоритель. Максимум соответствует плотности пучка, инжектированного в ускоритель без использования диафрагм, начало координат – геометрическому центру камеры

Систематические измерения профиля пучка ускорителя COSY в районе эксперимента ANKE показали, что размеры пучка в момент инжекции составляют $36 \times 16 \text{ мм}^2$, а после ускорения – $9 \times 15 \text{ мм}^2$ без мишени и $15 \times 16 \text{ мм}^2$ с мишенью. Кроме определения профиля, проведенные измерения позволили сделать следующие выводы:

- невозможно использовать накопительную ячейку с поперечным сечением $15 \times 15 \text{ мм}^2$, т.к. однократная инжекция приведет к низкой интенсивности пучка ускорителя (не более 10% от исходной);
- на этапе инжекции размеры пучка ускорителя в районе установки мишени определяются качеством его проведения;
- после ускорения размеры пучка в большей степени зависят от плотности мишени, чем от энергии эксперимента;
- в экспериментах с накопительной ячейкой необходимо использовать дополнительные способы повышения интенсивности ускоренного пучка, такие, как многократная инжекция, электронное и стохастическое охлаждение;

- при изготовлении накопительной ячейки для проведения поляризационных экспериментов оптимальными размерами поперечного сечения являются $20 \times 15 \text{ мм}^2$.

Во время установки ABS на ускоритель были проведены измерения магнитного поля вокруг основных компонентов источника, содержащих движущиеся части (таких, как криогенные и турбомолекулярные насосы, шаговые двигатели прерывателя пучка и пр.). В результате было выявлено, что в некоторых областях магнитные поля в два-три раза превышают максимальные значения, полученные из расчетной карты магнитного поля эксперимента ANKE. Для некоторых турбомолекулярных и криоадсорбционных насосов, а также для всех датчиков давления в источнике эти величины находились выше допустимых пределов. При установке источника на ускоритель все необходимые компоненты были оснащены магнитными экранами, которые позволили снизить магнитные поля в их области до нормального уровня.

Предварительная экранировка отдельных частей источника не гарантировала стабильность работы всех блоков сверхтонких переходов, поэтому была произведена проверка работы одного из блоков радиочастотных переходов, создающих поляризацию. Для этого в рабочих условиях эксперимента ANKE при максимально возможном поле спектрометрического магнита D2 было измерено давление, создаваемое в камере ускорителя при включенном потоке атомов из источника.

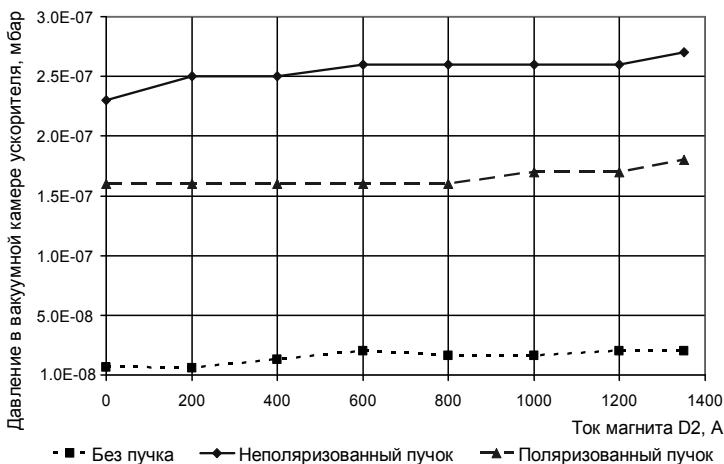


Рис. 3. Проверка на стабильность работы источника поляризованных атомов в изменяющемся магнитном поле спектрометрического магнита D2

Включение блока сверхтонких переходов должно было инициировать переход атомов водорода из состояния $|2\rangle$ в состояние $|3\rangle$, которое дефокусировалось из пучка вторым блоком секступольных магнитов и откачивалось источником, не попадая в ускоритель. Таким образом, при включении поляризации давление в вакуумной камере ускорителя должно снижаться в два раза вне зависимости от внешних условий. Изменение тока основного спектрометрического магнита с шагом 200 А не привело к значительному уменьшению поляризации, и отношение давлений в вакуумной камере при переключении блока сверхтонких переходов оставалось постоянным (Рис. 3).

Кроме прямого влияния магнитного поля на производительность и работоспособность отдельных составляющих источника, что в конечном итоге может снизить поляризацию атомарного пучка, существует также деполяризация атомов при прохождении областей с нулевым магнитным полем. На всей длине распространения поляризованного пучка, от первого блока сверхтонких переходов до входа в накопительную ячейку, есть несколько областей с низким магнитным полем. Для сохранения поляризации атомов важно, чтобы коэффициент R , равный отношению ларморовской частоты прецессии спина ядра атома к скорости изменения магнитного поля, был не менее 100 (Рис. 4). Проведенные измерения показали, что на всей длине распространения поляризованного пучка есть несколько областей, в которых магнитное поле меняет знак, но это не приводит к деполяризации пучка атомов.

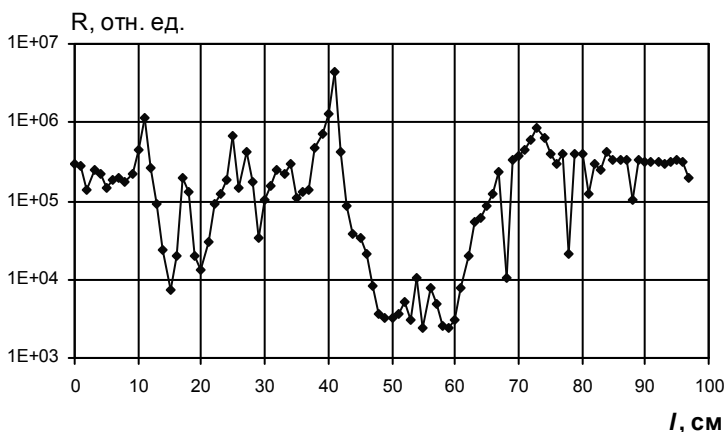


Рис. 4. Изменение коэффициента R вдоль оси источника ABS. Координаты по оси X отсчитываются от точки создания поляризации в источнике

В рамках подготовки к созданию накопительной ячейки для газовой мишени были проведены калибровки системы подачи неполяризованного газа для молекулярного водорода, дейтерия и азота. Основываясь на полученных зависимостях, были созданы и использованы в физических экспериментах на ускорителе COSY водородные и азотные газовые мишени необходимой плотности. Результаты калибровки и измерения интенсивности источника поляризованных атомов позволили с хорошей точностью предсказать плотности газовой струйной мишени и мишени с накопительной ячейкой.

Пятая глава посвящена измерениям, выполненным на ускорителе COSY с использованием накопительной ячейки. Эти эксперименты можно разделить на три основных группы по типу использованной мишени:

- накопительной ячейки без газа;
- неполяризованной газовой мишени с накопительной ячейкой;
- струйной газовой мишени;
- поляризованной газовой мишени с накопительной ячейкой.

Создание накопительной ячейки для внутренней газовой мишени в эксперименте ANKE требует исследования возможностей ускорительной техники по проведению пучка COSY через протяженную накопительную ячейку, а также свойств получаемой мишени. Были внесены дополнительные модификации в программу для удаленного управления системой поддержки и перемещения мишени. В систему управления добавлена возможность непараллельного смещения одной из осей движения, а из соображений безопасности накопительной ячейки – введен дополнительный параметр, ограничивающий относительное смещение в каждой плоскости движения пятью миллиметрами. Этого расстояния достаточно для оптимизации положения центров входного и выходного отверстия трубки, вдоль которой распространяется пучок ускорителя.

Первый эксперимент на COSY с использованием накопительной ячейки проводился без газовой мишени. Необходимость таких тестов обусловлена особенностью спектрометра ANKE, центральный магнит которого в рабочем состоянии должен быть смещен с оси пучка ускорителя, создавая тем самым локальное отклонение орбиты. Впервые в эксперименте ANKE была использована протяженная мишень со стенками, ограничивающими пучок ускорителя.

В камере для установки мишеней была размещена рамка, поддерживающая измерительную диафрагму ($40 \times 25 \text{ мм}^2$) и две накопительные ячейки разного поперечного сечения (15×15 и $30 \times 20 \text{ мм}^2$). Оптимизация проводилась в два этапа. Вначале, с помощью диафрагмы,

измерялись поперечные размеры пучка во время инжекции, после чего пучок пропусклся через большую накопительную ячейку. Затем, после улучшения проведения пучка и увеличения его плотности, пучок проводился через накопительную ячейку меньших поперечных размеров. Второй этап заключался в оптимизации процесса ускорения при достаточной интенсивности пучка COSY.

Сравнение результатов, полученных на разных этапах оптимизации проведения пучка, позволило сделать несколько выводов:

- на этапе инжекции количество частиц в накопительном кольце постоянно и не зависит от наличия скреперов⁶, ограничивающих пучок размерами ячейки. Это говорит о хорошей оптимизации, а также свидетельствует о стабильности и воспроизводимости проведения пучка;
- уменьшение количества частиц на 30% при ускорении через большую накопительную ячейку говорит о несогласованности изменения магнитных полей в процессе ускорения;
- неудавшаяся попытка ускорить 10^9 частиц, оставшихся в накопительном кольце после инжекции в меньшую ячейку, подтверждает необходимость использования более широкой накопительной ячейки.

В результате проведенных измерений было определено минимальное поперечное сечение основной трубки накопительной ячейки для дальнейших тестов, которое должно составлять 15 мм по вертикали и 20 мм по горизонтали.

Второй эксперимент проводился с использованием протонного пучка с энергией 600 МэВ и молекулярной водородной газовой мишенью с накопительной ячейкой. На начальном этапе оптимизации инжекции проведение пучка проводилось без сдвига спектрометрического магнита. Только после достижения высокой интенсивности ускоренного пучка система магнитов была смещена на угол $9,2^\circ$. При ненулевом положении спектрометрического магнита возможно искривление траектории пучка в районе мишени, что сказывается на количестве оставшихся в ускорителе частиц. Для дополнительного повышения интенсивности пучка использовался метод повторной инжекции в ускоритель с последующим электронным охлаждением. В результате, при нулевом положении спектрометрического магнита наблюдалось почти шестикратное увеличение

⁶ Скрепер (scrapers (англ.) – скребок, скрести) – устройство в виде заслонки, вдвигающееся в направлении центра идеальной траектории пучка, чтобы обрезать гало или сам пучок. На ускорителе COSY скреперы расположены парами и могут перемещаться независимо.

числа частиц, ускоренных через накопительную ячейку. Эта процедура позволяет сформировать достаточно плотное ядро пучка, которое почти не смещается со своей траектории в процессе ускорения, что позволяет сохранить в ускорителе до 80% инжектируемых частиц без мишени.

В третьем эксперименте на ускорителе COSY для создания струйной мишени был использован источник поляризованных атомарных пучков. Этот способ создания поляризованной газовой мишени обладает некоторыми преимуществами по сравнению с накопительной ячейкой:

- отсутствие дополнительных механизмов позиционирования мишени (максимальная плотность находится на оптической оси источника);
- отсутствие держателей или стенок у мишени;
- инжектируемые атомы, не испытавшие взаимодействия с пучком ускорителя, могут быть легко удалены из вакуумной камеры с помощью дополнительных вакуумных насосов или ловушек.

При работе источника ABS в качестве неполяризованной газовой мишени использовался протонный пучок ускорителя с энергией 600 МэВ. Низкая плотность создаваемой мишени требовала установки дополнительной ловушки пучка источника для снижения уровня фоновых событий. Из распределения восстановленных вершин реакции $pp \rightarrow d\pi^+$ (Рис. 5) видно, что их плотность в области распространения пучка ABS всего лишь в пять раз превышает фон. Ноль оси Z (направление распространения пучка ускорителя) соответствует оптической оси источника.

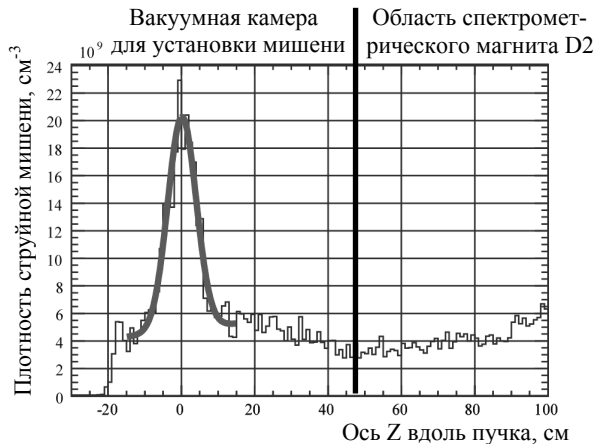


Рис. 5. Распределение плотности восстановленных вершин реакции $pp \rightarrow d\pi^+$

Проинтегрировав события в области мишени, за вычетом стабильных фоновых условий, получим плотность струйной мишени равную $(1,5 \pm 0,1) \cdot 10^{11} \text{ см}^{-2}$. Это значение хорошо соотносится с величиной плотности, рассчитанной из калибровки потока атомов с использованием системы подачи неполяризованного газа – $(1,6 \pm 0,1) \cdot 10^{11} \text{ см}^{-2}$.

Вторым тестом с источником поляризованных атомов являлось сравнение плотности распределения событий вдоль оси распространения ускорительного пучка при использовании накопительной ячейки. Для этого использовался блок сверхтонких переходов, позволяющий создавать поляризованную (состояние $|1\rangle$) и неполяризованную (состояния $|1\rangle + |2\rangle$) водородную мишень. Как показано на Рис. 6, соотношение числа событий в обоих случаях приблизительно равно двум. В области спектрометрического магнита также наблюдается сильное различие между состояниями, поэтому необходимо оптимизировать откачку вакуумной камеры ускорителя для улучшения фоновых условий.

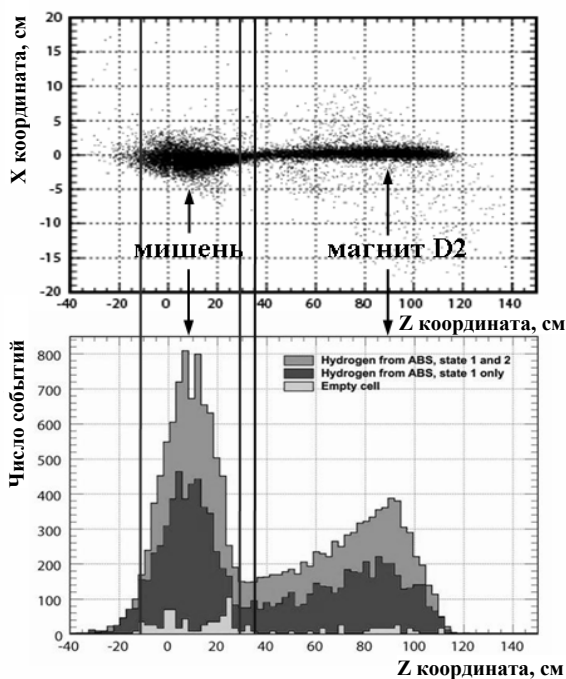


Рис. 6. Реконструкция вершины реакции с использованием накопительной ячейки

В результате работы со струйной мишенью была улучшена методика анализа данных, позволившая снизить систематические ошибки и частично избавиться от фоновых счетов.

Для заключительного эксперимента с поляризованным дейтронным пучком ускорителя энергией 1,2 ГэВ и поляризованной газовой водородной мишенью была создана новая система поддержки накопительной ячейки, показанная на Рис. 7, которая не предполагала наличия юстировочной диафрагмы. В камере для установки мишени на расстоянии 10 мм от ближней стенки ячейки и 20 мм от центра распределения плотности газа в мишени был расположен трековый детектор. В силу конструктивных особенностей системы охлаждения высокая интенсивность счета может вывести детектор из строя. Поэтому интенсивность инжекции искусственно уменьшалась при помощи метода микропульсаций, позволяющего контролировать, какая часть пучка в момент инжекции остается в накопительном кольце.

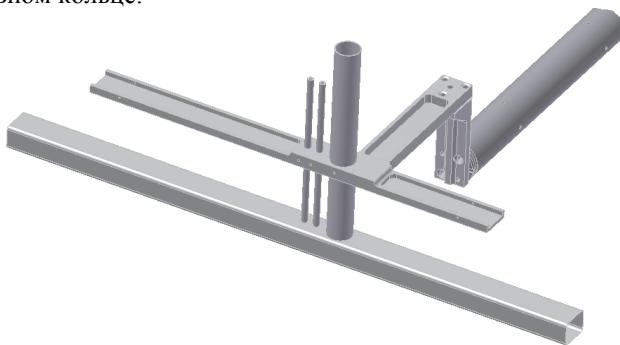


Рис. 7. Система поддержки и перемещения накопительной ячейки в камере ускорителя. Дополнительные трубки использовались для подачи неполяризованного газа для калибровок во время эксперимента

Подготовка к проведению эксперимента показала, что поляриметр, работающий на эффекте лэмбовского сдвига, не способен измерить абсолютную поляризацию пучка ABS в условиях сильного внешнего магнитного поля от спектрометрического магнита. С его помощью измерялось относительное изменение поляризации (ее асимметрия), остававшееся постоянным на всем протяжении эксперимента.

Для выделения фоновых событий, наблюдаемых при взаимодействии пучка с алюминиевыми стенками ячейки, и наложения ограничений на отбор событий использовались измерения с молекулярной азотной мишенью, т.к. его молярная масса (28) близка к атомной массе

алюминия (26,98). При анализе этих данных были выделены события, характерные для взаимодействия частиц ускорителя со стенками накопительной ячейки. Использование этих измерений позволило очистить полученные данные от фоновых событий и свести к минимуму время, необходимое для набора достаточной статистики при экспресс-анализе поляризации.

Использование неполяризованной газовой водородной мишени позволило провести калибровку детекторов и подтвердить правильность анализа поляризации при сравнении с данными, полученными с использованием поляриметра низкой энергии, измеряющим поляризацию создаваемого пучка до его инжекции в накопительное кольцо. Средняя величина векторной поляризации, измеренная с помощью поляриметра низких энергий, равнялась $P_{Z_LEP} = 0,66 \pm 0,003$, а полученная из анализа данных – $P_{Z_ANKE} = 0,51 \pm 0,04$.

В результате совместного использования всех возможных методик повышения интенсивности пучка была получена рекордная интенсивность пучка – $7 \cdot 10^9$ частиц во внутреннем кольце COSY, которую весьма сложно достичь с поляризованным пучком без накопительной ячейки.

Плотность поляризованной водородной газовой мишени, полученная в результате калибровок системы подачи неполяризованного газа, равнялась $1,3 \cdot 10^{13}$ ат/см². Это значение хорошо соотносится с измеренным с помощью метода Шоттки (расчет ионизационных потерь), составившим $1,6 \cdot 10^{13}$ ат/см².

Использование детектора траекторий частиц, расположенного в непосредственной близости от области максимальной плотности газовой мишени в накопительной ячейке, позволило:

- значительно снизить загрузку детекторной системы при использовании сигнала регистрации в нем частицы как триггера для включения слежения переднего детектора;
- распределение восстановленных траекторий частиц в вертикальной плоскости (Рис. 8) позволило определить области взаимодействия пучка ускорителя со стенками накопительной ячейки. Расстояние между ними составляло 15 мм, что в точности повторяет геометрию мишени.

Поляризация газовой водородной мишени с использованием накопительной ячейки составила $P_z = 0,79 \pm 0,07$. Эта величина была получена с использованием модели точечной мишени, поэтому реальное значение поляризации может быть выше.

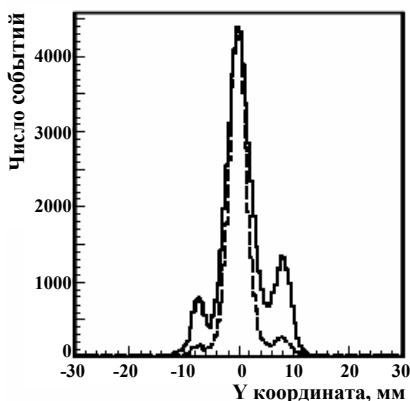


Рис. 8. Проекция распределения траекторий частиц в трековом детекторе на ось, перпендикулярную направлению распространения пучка ускорителя.

Шестая глава посвящена перспективам использования накопительной ячейки отдельно и совместно с внутренней поляризованной водороднодейтериевой мишенью. Также рассматриваются возможности по улучшению математической модели для восстановления вершины реакции при использовании протяженной мишени, способные повысить точность измерений.

Заключение содержит основные результаты проделанной работы.

Положения, выносимые на защиту

1. Создание системы для измерения и оптимизации пучка ускорителя в месте расположения поляризованной мишени на эксперименте ANKE. Полученные с ее помощью результаты позволили более чем в три раза увеличить интенсивность пучка ускорителя COSY, проводимого через накопительную ячейку.
2. Создание и использование в экспериментах на накопительном кольце ускорителя COSY трех типов мишеней:
 - поляризованной струйной водородной мишени плотностью $1,5 \cdot 10^{11} \text{ см}^{-2}$;
 - неполяризованной газовой мишени (H_2 , N_2 , D_2 , He) с накопительной ячейкой;
 - поляризованной газовой мишени с накопительной ячейкой плотностью $1,5 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-2}$ и поляризацией атомов $0,79 \pm 0,07$.

3. Исследование и улучшение вакуумных и магнитных условий источника в месте размещения на эксперименте ANKE. Анализ результатов, полученных с использованием поляризованной струйной мишени, позволил на порядок снизить фоновые условия при работе с источником как со струйной мишенью, и, более чем в два раза, при работе с накопительной ячейкой.
4. Использование неполяризованной газовой мишени позволило определить вклад взаимодействия пучка ускорителя со стенками накопительной ячейки и более чем на порядок снизить уровень фоновых событий во время проведения эксперимента с двойной поляризацией. Анализ распределения событий позволил в несколько раз уменьшить загрузку детекторов и сделал возможным оперативный анализ данных во время эксперимента.
5. Проведение первого в мире эксперимента на внутреннем кольце ускорителя с использованием поляризованной газовой водородной мишени и поляризованного дейтронного пучка ускорителя с энергией 1,2 ГэВ. Величина поляризации, полученная в результате обработки накопленных данных, является максимальной среди мировых поляризованных водородных газовых мишеней с накопительной ячейкой и составляет $0,79 \pm 0,07$. Высокая плотность созданной мишени ($1,5 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-2}$) позволила достичь светимость в эксперименте, превышавшую $10^{29} \text{ см}^{-2}\text{с}^{-1}$, достаточную для его успешного выполнения.

По теме диссертации опубликованы следующие работы:

1. R. Engels, R. Emmerich, K. Grigoryev *et al.* Background reduction by a getter pump around the ionization volume of a Lamb-shift polarimeter and possible improvements of polarized ion sources, *Rev. Sci. Instr.* 76 (2005) 053305, 6 pages.
2. K. Grigoriev, Cell tests for ANKE, 1st Caucasian-German School and Workshop on Hadron Physics, 2004, ISBN 3-89336-375-0.
3. K. Grigoriev, *et al.* The polarized internal gas target of ANKE at COSY, 16th International Spin Physics Symposium, Trieste, Italy. October 15, 2004 eds. K. Aulenbacher, F. Bradamante, A. Bressan, A. Martin pp. 800–803.
4. R. Engels, R. Emmerich, K. Grigoryev *et al.* Nuclear polarization measurement of H/D atoms extracted from a storage cell with a Lamb-shift polarimeter, *Nucl. Instr. Meth. A* 536 (2005) 334–337.
5. K. Grigoryev *et al.* The Polarized Internal Gas Target of ANKE at COSY. Meeting of the German Physical Society, 2005, Berlin.

6. K. Grigoryev *et al.* Storage cell tests and commissioning of the Polarized Internal Gas Target // IKP Annual Report 2005, pp. 20–21.
7. D. Chiladze, A. Kacharava, ..., K. Grigoriev, *et al.* Determination of deuteron beam polarizations at COSY, Phys. Rev. ST Accel. Beams 9, 050101 (2006), 13 pages.
8. H. Kleines, J. Sarkadi, ..., K. Grigoryev, *et al.* The control system of the polarized internal target of ANKE at COSY, Nucl. Instr. Meth. A560 Issue 2 (2006) pp. 503–516.
9. R. Engels, ..., K. Grigoriev, *et al.* Polarized Internal Target (PIT) for ANKE, 2st Caucasian-German School and Workshop on Hadron Physics, 2006, ISBN 3-89336-453-6.
10. K. Grigoryev *et al.* Commissioning of the Polarized Internal Gas Target of ANKE at COSY. Meeting of the German Physical Society, 2006, München.
11. K. Grigoryev, P. Kravtsov, M. Mikirtychians, A. Vasilyev *et al.* The Polarized Internal Target at ANKE: First Results, Proc. of the 17th International Spin Physics Symposium (SPIN06), Kyoto, Japan, October 2006 // AIP Conference Proceedings, Volume 915, pp. 979–982.
12. К.Ю. Григорьев, А.А. Васильев, П.А. Кравцов *и др.* Измерения профиля пучка ускорителя COSY // Препринт ПИЯФ-2713, Гатчина, 2007, 20 с.