

ААЭ 126296

На правах рукописи

ТОПОРКОВ Дмитрий Константинович

**ПОЛЯРИЗОВАННЫЕ МИШЕНИ
ДЛЯ НАКОПИТЕЛЕЙ**
(методика применения и эксперимент)

**01.04.16 - физика атомного ядра
и элементарных частиц**

А В Т О Р Е Ф Е Р А Т

**диссертации на соискание ученой степени
доктора физико-математических наук**

НОВОСИБИРСК - 2004

Работа выполнена в Институте ядерной физики
им. Г.И. Будкера СО РАН.

ОФИЦИАЛЬНЫЕ ОППОНЕНТЫ:

Пархомчук — чл.-корр. РАН,
Василий Васильевич доктор физико-математических наук,
Институт ядерной физики
им. Г.И. Будкера СО РАН,
г.Новосибирск.

Недорезов — доктор физико-математических наук,
Владимир Георгиевич Институт ядерных исследований РАН,
г.Москва.

Сербо — доктор физико-математических наук,
Валерий Георгиевич профессор, Новосибирский
государственный университет,
г.Новосибирск.

ВЕДУЩАЯ — ГНУ "Научно-исследовательский
ОРГАНИЗАЦИЯ: институт ядерной физики
при Томском политехническом
университете", г.Томск.

Защита диссертации состоится "30" июня " 2004 г.
в "10" часов на заседании диссертационного совета Д.003.016.02
при Институте ядерной физики им Г.И.Будкера СО РАН.

Адрес: 630090, г. Новосибирск-90,
проспект академика Лаврентьева, 11.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ИЯФ
им.Г.И.Будкера СО РАН.

Автореферат разослан "28" мая " 2004 г.
2010

Ученый секретарь
диссертационного совета
доктор физ.-мат. наук,
профессор



В.С. Фадин

2 А₉ 126396

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы.

Успехи в изучении свойств атомных ядер и элементарных частиц в полной мере определяются прогрессом в создании ускорителей и накопителей заряженных частиц со все более высокой энергией и светимостью. Естественное желание изучения все более малых объектов, составляющих ядра, реакций, имеющих малое сечение и повышения точности исследований требует создания весьма дорогостоящих установок. В последнее десятилетие было приложено много усилий для создания установок, позволяющих проводить ядерно-физические эксперименты с регистрацией рассеянного электрона и продуктов реакций на совпадениях. В этих экспериментах открывается возможность полной реконструкции событий, так как наряду с измерением параметров рассеянного электрона, здесь можно извлекать такие важные характеристики событий как сорт вторичных частиц, их угловые распределения и энергетические спектры. Эксперименты на совпадениях уже предоставили много интересных результатов.

Для их проведения используются три типа ускорителей.

1. Микротрон непрерывного действия и линейный ускоритель с непрерывным пучком и с рекуперацией.
2. Импульсный линейный ускоритель с высокой интенсивностью в паре с растяжителем.
3. Импульсный ускоритель в паре с накопительным кольцом, где помещена внутренняя мишень, работающая в сверхтонком режиме.

Две разновидности первого варианта, к примеру, успешно реализованы в Майнце и в TJNAF. Первый растяжитель на энергию до 130 МэВ был введен в Токио, успешно работает растяжитель в MAX-LAB, Лунд. Растяжитель с более высокой энергией (≈ 1 ГэВ) работал в NIKHEF, Амстердам, аналогичный сооружается в MIT-Bates, Бостон.

Третий метод нам кажется наиболее многообещающим. Идея использовать накопитель электронов с внутренней мишенью в сверхтонком режиме для постановки экспериментов была впервые высказана и затем получила развитие в Институте ядерной физики им. Будкера в Новосибирске. Первые эксперименты были проведены на накопительном кольце ВЭП-1 еще в конце шестидесятых годов.



Применение внутренней мишени в накопителе заряженных частиц открывает дополнительные экспериментальные возможности по сравнению с экспериментами на выведенном из ускорителя пучке. Это

1. Практически непрерывный режим работы
2. Проведение экспериментов с высокой точностью с сохранением большой скорости счета
3. Возможность регистрации вторичных частиц без нарушения мишенью их параметров
4. Возможность использования в накопителе уникальных первичных пучков (позитронных, антипротонных, мюонных, радиоактивных тяжелых ионов)
5. Возможность использования в накопителе уникальных, например, поляризованных мишеней.

Наиболее полно возможности этого метода проявляются в экспериментах с применением поляризованных газовых мишеней. Впервые поляризованная дейтронная мишень, представляющая собой струю поляризованных атомов дейтерия была применена в эксперименте по измерению компоненты T_{20} тензорной анализирующей способности реакции упругого рассеяния электрона на дейтроне в 1985 году на накопителе ВЭПП-2. Измерение уже одной компоненты анализирующей способности реакции T_{20} в совокупности с данными о дифференциальном сечении позволяет отдельно определить все три электромагнитных формфактора дейтрона, что является фундаментальной задачей ядерной физики.

В настоящее время методика применения поляризованных газовых мишеней в накопителях заряженных частиц является общепризнанной. Она с успехом использовалась, используется или будет применена во многих ведущих ускорительных центрах - ИЯФ им. Г. И. Будкера - Россия, NIKHEF - Голландия, DESY - Германия, IUCF, BATES, RHIC-BNL - США и других.

Физические программы этих центров, ориентированные на проведение экспериментов с поляризованными внутренними мишенями покрывают широкий класс актуальных задач ядерной физики и физики элементарных частиц -

так, эксперименты, проведенные в HERA по глубоконеупругому рассеянию поляризованных позитронов (электронов) на поляризованных нуклонах позволили установить выполнение фундаментального правила сумм Бьеркена для поляризационных структурных функций и определить вклад кварков в спин нуклона. Оказалось, что полный вклад валентных кварков в спин нуклона составляет около 30%. Вклад спинов других составляющих нуклона (глюонов), а также орбитальных момен-

тов кварков и глюонов еще не определен. Дальнейшая программа эксперимента HERMES направлена на изучение спинзависимых асимметрий, из которых можно будет получить эту недостающую информацию.

Применение поляризованной дейтериевой мишени дало возможность измерить зарядовый формфактор нейтрона в новой нетрадиционной постановке этого эксперимента, выполненного в NIKHEF, Амстердам, Голландия, с применением поляризованного электронного пучка.

В накопительном протонном кольце (UCF) университета шт. Индиана, США эксперименты с поляризованными протонными и дейтронными мишенями позволили максимально детально изучить особенности *pp* взаимодействия, а также надежно установить трехнуклонный вклад в ядерное взаимодействие.

Исследования, составляющие основу диссертации, были выполнены автором в 1985 - 2002 годах. Один год автор провел в Институте ядерной физики им. Макса Планка, г.Гейдельберг, Германия, где занимался исследованиями по оптимизации параметров источника поляризованных атомов, использованного в дальнейшем в экспериментах FILTEX на ионном накопителе TSR, Гейдельберг и HERMES на протон-позитронном накопителе HERA, Гамбург. Примерно такое же время автор провел в Аргоннской национальной лаборатории США, занимаясь разработкой и исследованиями по созданию интенсивного спин-обменного источника поляризованных атомов с лазерной накачкой поляризации. Актуальность проведенных исследований подтверждается все более возрастающим интересом научной общественности к экспериментам с поляризованными газовыми мишенями в накопителях заряженных частиц, который обусловлен практической значимостью исследований в области фундаментальных проблем и открывающимися новыми экспериментальными возможностями.

Цель работы состояла в следующем:

Исследование и развитие источников поляризованных атомов, основанных как на классическом методе Штерна - Герлаха, так и на методе спин-обменной лазерной накачки поляризации;

Создание на основе этих источников внутренних поляризованных мишеней для накопителей заряженных частиц - электрон-позитронных накопителей ВЭПП-2 и ВЭПП-3 в Новосибирске, TSR - накопителя тяжелых ионов в г. Гейдельберг и протон-позитронного коллайдера HERA, г.Гамбург, Германия, накопителя ионов университета шт. Индиана UCF, г.Блумингтон, США.

Совершенствование методики применения поляризованных мишеней в накопителях - использование накопительной ячейки с целью радикального повышения толщины мишени и изучение явления деполаризация атомов интенсивным циркулирующим пучком;

Проведение экспериментов по ядерной физике с поляризованными мишенями в накопителях.

Научная новизна работы.

1. Впервые мишень из тензорно поляризованных атомов дейтерия была применена в физическом эксперименте по измерению компонент тензорной анализирующей способности в реакциях упругого и неупругого рассеяния электронов на дейтроне, проведенном на электронном накопителе ВЭПП-2 в 1985 г.

2. Впервые произведено измерение компонент тензорной анализирующей способности в реакции упругого рассеяния электронов тензорно поляризованной дейтронной мишенью - 1985 г.

3. Впервые произведено измерение компонент тензорной анализирующей способности в реакции электродезинтеграции тензорно поляризованного дейтрона - 1986 г.

4. Впервые в физическом эксперименте на электронном накопителе ВЭПП-3 для увеличения толщины мишени была успешно применена накопительная ячейка для поляризованных атомов - 1988 г.

5. Впервые на электронном накопителе ВЭПП-3 было обнаружено, изучено и объяснено явление деполаризации атомов дейтерия циркулирующим электронным пучком - 1988 г.

6. Создан источник поляризованных атомов дейтерия со сверхпроводящими секступольными магнитами с полем 4.8 Тл, обладающий рекордной интенсивностью $8.2 \cdot 10^{16}$ ат/сек. - 2000 г.

7. Проведено измерение компонент тензорной анализирующей способности в упругом рассеянии электронов на дейтроне в области переданных импульсов $8.4 - 21.6 \text{ фм}^{-2}$ в области, где зарядовый формфактор дейтрона обращается в нуль и где экспериментальные данные отсутствуют (бедны) - 2002 г. Измеренные значения тензорных анализирующих способностей определяют ряд теоретических расчетов, наиболее адекватно описывающих экспериментальные результаты и позволяют уточнить положение пересечения нуля зарядовым формфактором.

8. Оптимизирован высокоинтенсивный источник поляризованных атомов водорода FILTEX/HERMES для экспериментов в ионном накопительном кольце. Параметры поляризованной водородной мишени с накопительной ячейкой, предназначенной для эксперимента в ионном на-

копительном кольце TSR, были измерены в эксперименте по рассеянию α -частиц - Гейдельберг, Германия, 1991 г.

9. Создан высокоинтенсивный спин-обменный источник поляризованных атомов водорода с лазерной накачкой поляризации - 1994 г. Впервые был применен в поляризованной газовой мишени в ионном накопителе IUCF, Блумингтон, США - 1997 г.

Научная и практическая ценность работы.

Проведен ряд физических экспериментов с поляризованной дейтериевой мишенью в электронном накопителе.

Проведено измерение компонент тензорной анализирующей способности в упругом рассеянии электронов на дейтроне в области переданных импульсов $8.4 - 21.6 \text{ фм}^{-2}$ в области, где зарядовый формфактор дейтрона обращается в нуль и где экспериментальные данные отсутствуют. Измеренные значения тензорных анализирующих способностей определяют ряд теоретических расчетов, наиболее адекватно описывающих экспериментальные результаты и позволяют уточнить положение пересечения нуля зарядовым формфактором.

Произведено измерение компонент тензорной анализирующей способности в реакции электродеинтеграции тензорно поляризованного дейтрона.

В физическом эксперименте на электронном накопителе ВЭПП-3 для увеличения толщины мишени была успешно применена накопительная ячейка для поляризованных атомов. Сейчас эта методика является общепринятой.

На электронном накопителе ВЭПП-3 было обнаружено, изучено и объяснено явление деполяризации атомов дейтерия циркулирующим электронным пучком. Это явление необходимо учитывать при проектировании экспериментов с внутренними поляризованными мишенями в накопителях.

Создан источник поляризованных атомов дейтерия со сверхпроводящими секступольными магнитами с полем 4.8 Тл, обладающий рекордной интенсивностью $8.2 \cdot 10^{16}$ ат/сек.

Создан высокоинтенсивный спин-обменный источник поляризованных атомов водорода с лазерной накачкой поляризации. Этот источник был применен в поляризованной газовой мишени в ионном накопителе IUCF, Блумингтон, США.

Исследованы и оптимизированы параметры источника поляризованных атомов водорода FILTEX/HERMES. В настоящее время источник

используется в эксперименте HERMES на коллайдере HERA в Гамбурге, Германия.

Дальнейшее развитие получило направление проведения экспериментов с внутренней мишенью в накопителе заряженных частиц.

Результаты экспериментов по измерению компонент тензорной анализирующей способности в упругом рассеянии электронов на дейтроне, проведенные на ВЭПП-3, наряду с другими данными могут быть использованы для построения теоретической модели, наиболее полно описывающей всю совокупность экспериментальных данных.

Результаты экспериментов по измерению компонент тензорной анализирующей способности в реакции электродезинтеграции тензорно поляризованного дейтрона, проведенных на ВЭПП-2 и ВЭПП-3, являются в настоящее время единственными и могут быть использованы для сравнения с теоретическим описанием этого процесса.

Результаты исследований, приведенные в диссертации, использовались и могут быть использованы при проектировании, создании и эксплуатации как поляризованных газовых мишеней, так и при создании высокоинтенсивных источников поляризованных ионов в различных научных центрах России и за рубежом, в частности, в Институте ядерной физики им. Будкера СО РАН (г.Новосибирск), Объединенном институте ядерных исследований (г.Дубна), Институте ядерных исследований (г.Москва), в центрах DESY (г.Гамбург, Германия), NIKHEF (г.Амстердам, Голландия), COSY (г.Юлих, Германия), BATES (г.Бостон, США), BNL (г.Аптон, США) и других лабораториях, ведущих эксперименты по ядерной физике и физике элементарных частиц.

Апробация работы.

Результаты исследований по созданию газовых поляризованных мишеней для накопителей прошли испытание на достоверность практикой. Мишени, в создании и исследовании которых принимал участие автор, работают в России, Германии и США.

Физические результаты экспериментов с применением поляризованной мишени, выполненных в ИЯФ СО РАН опубликованы в ведущих физических журналах и, следовательно, прошли экспертизу на самом высоком уровне, что подтверждает достоверность проведенных исследований.

Основные результаты исследований по теме диссертации опубликованы в физических журналах и доложены автором на ряде международных конференций, совещаний и семинаров, в том числе на Международных симпозиумах по спиновым явлениям в физике высоких энергий (Мин-

неаполис, США - 1988 г., Бонн, Германия - 1990 г., Блумингтон, США - 1994 г., Амстердам, Голландия - 1996 г., Протвино - 1998 г., Осака, Япония - 2000 г.), Международных рабочих совещаниях по спиновым явлениям в физике высоких энергий СПИН-84, СПИН-89 (Протвино), SPIN 2001 (Дубна), Международных рабочих совещаниях по поляризованным источникам и мишеням (Цукуба, Япония - 1990 г., Гейдельберг, Германия - 1991 г., Кельн, Германия - 1995 г., Урбана, США - 1997 г., Эрланген, Германия - 1999 г., Нэшвилл, США - 2001 г.), Рабочем совещании по электроядерной физике с внутренними мишенями и детектором BLAST (Феникс, США - 1992 г.), Международной 34 зимней школе ПИЯФ по физике частиц и атомного ядра (Санкт-Петербург, Репино 2000 г.), а также обсуждались на научных семинарах Института ядерной физики им. Г.И. Будкера СО РАН, Института ядерной физики им. М. Планка (Гейдельберг, Германия), Института ядерной физики NIKHEF (Амстердам, Голландия), Аргоннской национальной лаборатории (Аргонна, США), Университета штата Висконсин (Мэдисон, США) и других.

Структура работы.

Диссертация состоит из введения, восьми глав и заключения.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении сформулирована направленность и актуальность задач данной работы, описана структура и содержание диссертации.

В первой главе дано описание режима сверхтонкой мишени в электронном накопителе.

При использовании внутренней мишени в накопителе возможно скомпенсировать средние энергетические потери пучка в мишени на пути его возвращения к мишени (так называемый, режим тонкой мишени), а также, благодаря диссипативным процессам подавить стохастический разогрев продольных и поперечных степеней свободы пучка (режим сверхтонкой мишени). Подходящими диссипативными процессами являются синхротронное излучение в электронных кольцах и электронное и/или стохастическое охлаждение в ионных накопительных кольцах.

Показано, что для энергий электронного пучка выше 200 – 300 МэВ, когда тормозное излучение является основным процессом взаимодействия пучка с мишенью, эффективная толщина мишени, то есть произведение реальной толщины на число проходов может достигать величины $0.2X_0$, если допустимый энергетический разброс в пучке со-

ставляет 1%. Здесь X_0 - радиационная единица длины вещества мишени. Это существенно больше, чем толщина мишени в экспериментах с выведенным пучком, которая обычно не превышает величины $10^{-3}X_0$.

Светимость эксперимента с внутренней мишенью в накопителе не зависит, в принципе, от толщины мишени. Однако, при уменьшении толщины время жизни пучка и, следовательно, накопленный ток должны возрастать. При этом, как результат, могут появиться ограничения, связанные с эффектами больших токов.

Далее рассматривается временной цикл обычной работы установки с мишенью, который определяется несколькими временными параметрами: периодом обращения, временем затухания колебаний, временем жизни пучка, периодом инъекции электронов. Из этого рассмотрения следует, что для получения максимальной светимости эксперимента необходимы специализированные накопители заряженных частиц.

Затем анализируются установившиеся параметры пучка (энергетический и угловые разбросы), которые определяются балансом сил затухания и разогревом пучка за счет взаимодействия с мишенью и флуктуаций синхротронного излучения.

В конце главы обсуждаются преимущества и недостатки метода внутренней мишени в накопителе. К преимуществам метода следует отнести следующие положения:

1. Высокая эффективность использования накопленных частиц.
2. Непрерывный режим работы и благоприятные кинематические условия эксперимента.
3. Возможность постановки уникальных экспериментов. Малая толщина мишени практически не мешает регистрации вторичных частиц, включая медленные ядерные фрагменты на совпадении с рассеиваемой частицей и не искажает их кинематические параметры. Возможны эксперименты как с уникальными пучками, например, позитронами, так и с уникальными мишенями, такими, например, как поляризованные газовые мишени. Отметим также, что предложены и осуществлены методы получения продольной поляризации электронов в накопителе и управления ею. Реальными представляются даже прямые измерения электромагнитных формфакторов радиоактивных ядер, которые, по-видимому, невозможны ни в какой другой постановке эксперимента.

Во второй главе дано описание метода получения поляризованных частиц.

На рис.1 приведена сверхтонкая структура основного состояния атомов водорода и дейтерия в магнитном поле. Если магнитное поле, в ко-

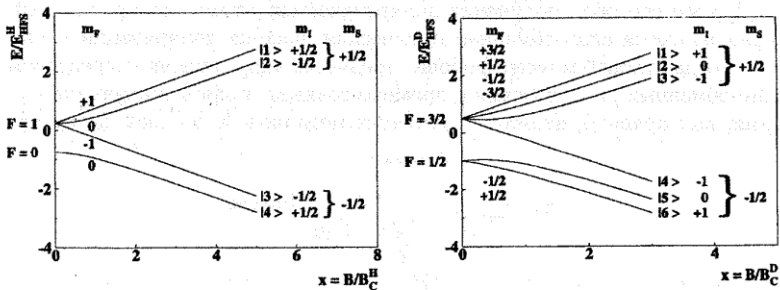


Рис. 1: Сверхтонкая структура энергетических уровней атома водорода и дейтерия в магнитном поле.

тором движется атом, неоднородно, то энергия становится функцией координаты, и на атом действует сила. При этом будет происходить пространственное разделение атомов с различными проекциями электронного спина, что и было впервые продемонстрировано Штерном и Герлахом в их классическом опыте. В современных источниках поляризованных частиц как правило применяются секступольные магниты, которые можно рассматривать как симметричные линзы, фокусирующие или дефокусирующие атомы в зависимости от знака магнитного момента.

Пучок атомов, отобранный магнитной системой и выпущенный в сильное магнитное поле имеет электронную поляризацию, близкую к единице. Однако ядерная поляризация в этом случае равна нулю. Если же пучок выпустить в слабое поле, то за счет восстановления связи между магнитным моментом электрона и ядра часть электронной поляризации переносится на ядерную. Для атомов водорода протонная поляризация в этом случае может достигать величины $P_z = 1/2$, для атома дейтерия $P_z = 1/3$ и $P_{zz} = -1/3$. Для получения большей степени поляризации, а также для изменения ее знака и величины используются вынужденные переходы между подсостояниями сверхтонкой структуры. В главе описан метод адиабатического прохождения через резонанс, преимуществами которого являются невысокие требования к стабильности величины магнитного поля и частоты и большая вероятность переходов. Размещая блоки ВЧ переходов в источнике поляризованных атомов, можно получать произвольное состояние ядерной поляризации атомного пучка.

Другим способом получения поляризованных атомов водорода и дейтерия является спин-обменная оптическая накачка поляризации - процесс, когда угловой момент фотона передается ядру мишени посредством спин-обменных столкновений с промежуточными поляризованными атомами, как правило, атомами щелочных металлов. Если свет циркуляр-

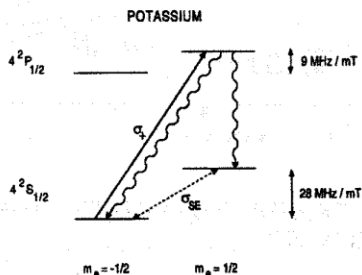


Рис. 2: Схема оптической накачки атомов калия.

но поляризован, то переход в слабом поле магнитном поле происходит между состояниями сверхтонкой структуры по правилам отбора, зависящим от вида поляризации, $\Delta m_F = 1$ для правой и $\Delta m_F = -1$ для левой круговой поляризации. Радиационный распад возбужденного состояния происходит по обычным правилам отбора $\Delta m_F = 0, \pm 1$. Из-за разных правил отбора во входном и выходном каналах процесса можно изменить установившуюся при данной температуре заселенность подсистем, тем самым поляризовать атомную систему. На рисунке 2 приведена схема оптической накачки атома калия с $J = 1/2, I = 3/2$ на $S_{1/2} \leftrightarrow P_{1/2}$ переходе. Далее, за счет спин-обменных столкновений с поляризованными атомами калия появляется электронная поляризация у атомов водорода или дейтерия. Недавно Walker и Anderson предложили модель, которая предполагает, что в условиях частых Н-Н или D-D столкновений устанавливается некоторая равновесная спиновая температура и ядра становятся поляризованными благодаря спин-обменным столкновениям. На рис.3 приведены значения поляризации для атома дейтерия в зависимости от параметра спиновой температуры. Как видно, тензорная поляризация в этом случае может быть только положительной.

В третьей главе приводится теоретическое рассмотрение формирования молекулярной/атомарной струи в вакууме.

В начале рассматривается свободно-молекулярное течение (эффузия) газа из отверстия. Принципиальным недостатком эффузионного источ-

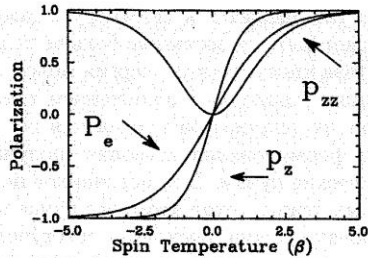


Рис. 3: Зависимость электронной и ядерной поляризации в атоме дейтерия от величины параметра спиновой температуры.

ника является небольшая интенсивность пучка, ограниченная низким значением плотности n_0 , соответствующим условию $Kn \geq 1$, а также плохая направленность пучка.

Невысокая направленность пучка формируемым простым отверстием может быть существенно улучшена применением длинного канала, обычно цилиндрической формы. В общем случае поток молекул на выходе канала представляется состоящим из трех частей: 1) излучение объема газа в трубке; 2) излучение "дна" (поток молекул непосредственно из резервуара источника); 3) излучение стенок (отраженные молекулы). Для случая, когда $\lambda_0 \gg L$, λ - длина свободного пробега молекулы или атома, L - длина трубки, r - ее радиус, задача была решена Clausing. Существенное увеличение интенсивности может быть получено, если молекулярное течение внутри трубки осуществляется лишь частично. При этом возрастает вклад в интенсивность под нулевым углом частиц, которые рассеялись в направлении оси за счет межмолекулярных столкновений в трубке. Этот режим исследован Giordmaine и Wang и более подробно Троицким. Применение пакета трубок (блока капилляров) позволяют существенно улучшить характеристики источника. Однако интенсивность таких источников невелика.

Когда плотность газа в источнике повышается настолько, что длина свободного пробега молекул становится меньше диаметра канала, движение газа происходит в вязкостном режиме и после выхода из канала имеет место его адиабатическое расширение. Отверстие или длинный канал в этом случае заменяется соплом. В источниках поляризованных атомов обычно используются сходящиеся сопла без расширяющейся части. Ниже по потоку расположена диафрагма, называемая скиммером, которая позволяет вырезать центральную сверхзвуковую часть струи.

В этих условиях газ движется к скиммеру с газодинамической скоростью, которая может быть существенно больше тепловой скорости. Во время расширения газа кинетическая энергия молекул конвертируется в энергию направленного движения с понижением температуры газа, что приводит к уменьшению ширины распределения по скоростям частиц в пучке. Такой метод формирования позволяет получать интенсивные и почти монохроматические пучки. Для источников поляризованных атомов, в основе которых лежит метод атомного пучка монохроматичность атомного пучка особенно важна, поскольку секступольные магниты могут принять и сфокусировать атомы, скорости которых лежат в довольно узком диапазоне.

В четвертой главе приведены результаты исследований по оптимизации параметров источника поляризованных атомов (ИПА) FILTEX/HERMES, конструкция поляризованной мишени и результаты измерения ее параметров, полученные во время испытания на пучке α -частиц из тандемного ускорителя г. Гейдельберг с энергией 34.5 МэВ, в которых автор принимал участие.

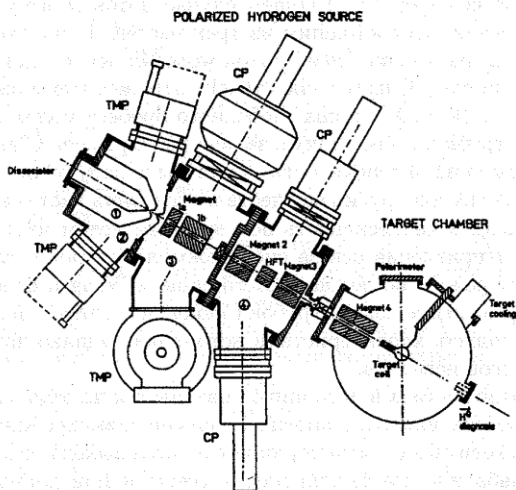


Рис. 4: Схема ИПА FILTEX/HERMES с накопительной ячейкой для атомов, установленной в вакуумной камере накопителя TSR.

Общая схема ИПА, соединенного с камерой мишени приведена на рис.4. Основными элементами ИПА являются мощная дифференциальная четырехступенчатая система откачки (полная номинальная скорость откачки насосов более 15000 л/сек), радиочастотный диссоциатор, в котором происходит развал молекул на атомы, система из пяти секstupольных постоянных магнитов и блок ВЧ переходов, размещенный в камере между вторым и третьим магнитом. Атомы водорода, вытекающие из диссоциатора, формируют с помощью скиммера и коллиматора пучок, который направляется в разделительные магниты.

Влияние скорости откачки камер ИПА на интенсивность атомного пучка было проверено следующим образом. При расходе газа через сопло 1.5 мбар л/сек измерялась интенсивность пучка в зависимости от давления газа в камерах, которое изменялось напуском газа через дополнительный натекатель. На рис.5 приведены результаты измерений, выполненные для каждой камеры. Экстраполяция в нулевое давление соответствует интенсивности, полученной при бесконечно высокой скорости откачки. Как видно из этих измерений, интенсивность пучка может возрасти только на $\approx 20\%$ и, следовательно, система откачки является достаточно мощной.

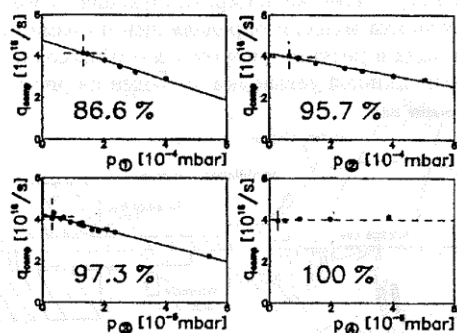


Рис. 5: Интенсивность атомного пучка в зависимости от давления в различных камерах ИПА.

Также были проведены измерения интенсивности атомного пучка в зависимости от расстояния между соплом и скиммером и в зависимости от температуры сопла.

Магнитная система ИПА состоит из постоянных секstupольных магнитов. Максимальное поле у полюса 1.5 Тл.

Для оптимизации фокусирующих свойств магнитной системы были использованы расчеты траекторий пробных частиц с применением метода Монте Карло. Поскольку эти расчеты существенным образом зависят от распределения частиц по скоростям, особое внимание было уделено его измерению. Подгонка результатов измерений к параметрам распределения атомов в пучке привела к следующей зависимости температуры и дрейфовой скорости атомов в пучке:

$$T_{beam} = 0.403T_{nozzle[K]} - 23 \text{ K}, \quad (1)$$

$$v_{drift} = 2.880T_{nozzle[K]} + 1312 \text{ /}, \quad (2)$$

для диаметра сопла 4 мм и

$$T_{beam} = 0.294T_{nozzle[K]} \text{ K}, \quad (3)$$

$$v_{drift} = 6.109T_{nozzle[K]} + 1354 \text{ /}, \quad (4)$$

для сопла диаметром 2 мм.

Поляризованной мишенью являются атомы водорода, инжектируемые из ИПА в накопительную ячейку, установленную на дорожке накопителя. Ячейка позволяет существенно увеличить толщину мишени, поскольку атомы могут пересекать циркулирующий пучок многократно. Поляризация и толщина мишени определялись по измерению асимметрии и полного выхода в реакции упругого $\alpha - p$ рассеяния. Схематический вид экспериментальной установки приведен на рис.6. Для среднего

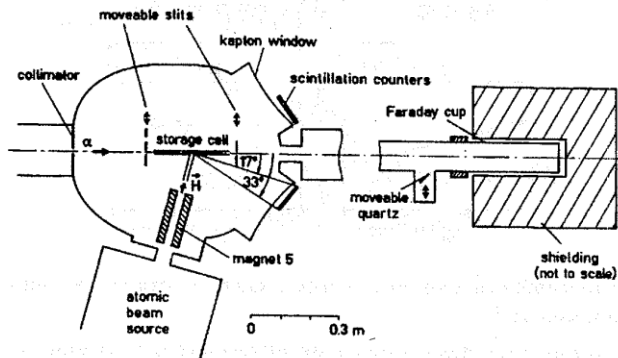


Рис. 6: Экспериментальная установка, включающая последний секступольный фокусирующий магнит, накопительную ячейку, детекторы, ИПА и приемник ионного пучка (вид сверху).

значения поляризации мишени была получена величина $P = 0.42 \pm 0.04$. Приведенная ошибка включает статистическую ошибку измерения асимметрии 0.035 и систематическую ошибку в определении величины анализирующей способности 0.015, сложенные квадратично. Величина поляризации составляет $(83 \pm 8)\%$ от максимального значения. Из интегрального выхода событий упругого $\alpha - p$ рассеяния была определена толщина мишени при температуре ячейки 100 K°. Эта величина оказалась равной $t = (2.6 \pm 0.1 \pm 0.2) \cdot 10^{13}$ ат/см². Первая ошибка здесь статистическая, а вторая включает систематические ошибки. Измеренная толщина мишени хорошо согласуется с ожидаемым значением, вычисленным по измеренному потоку.

Пятая глава посвящена описанию поляризованной водородной/дейтериевой мишени с лазерной накачкой поляризации. На рис.7 приведена схема источника с лазерной накачкой поляризации. В диссоциаторе происходит дезинтеграция молекул на атомы, которые вытекают в спин-обменную ячейку, содержащую пары калия. Пары калия оптически нака-

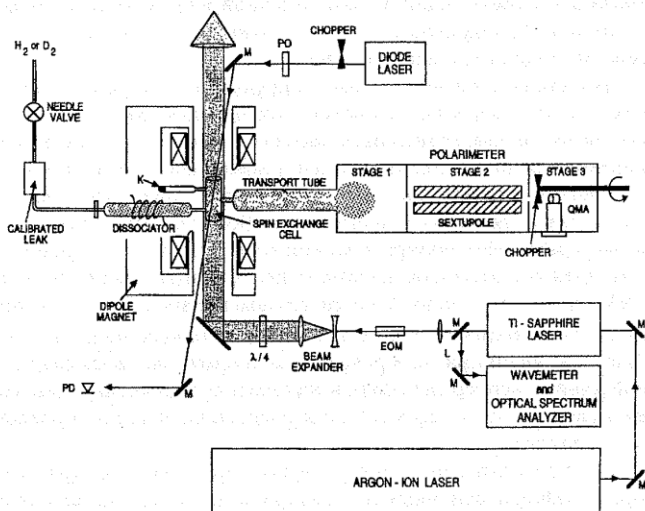


Рис. 7: Схема спин-обменного ИПА с лазерной накачкой поляризации. М - зеркало, L - линза, ЕОМ - электро-оптический модулятор, $\lambda/4$ - четверть - волновая пластинка, PD - фотодиод, QMA - квадрупольный масс-спектрометр.

чиваются лазерным светом в присутствии магнитного поля. В результате спин-обменных столкновений у атомов водорода или дейтерия появляется сначала электронная поляризация, а затем и ядерная. Далее атомы покидают ячейку и через транспортную трубку попадают в вакуумную камеру, содержащую электронный поляриметр.

Для оптической накачки паров калия использовался перестраиваемый одночастотный титан-сапфировый лазер, накачиваемый мощным аргоновым лазером. Лазерный пучок направлялся в электрооптический модулятор, где происходило уширение линии лазерного излучения с 10 МГц до величины порядка 1 ГГц, чтобы достигалось более полное перекрытие линий лазера и D_1 линии калия, уширенной эффектом Доплера. Затем лазерный пучок расширялся, коллимировался, проходил через четверть волновую пластинку для получения циркулярной поляризации. Циркулярно поляризованный свет направлялся через отверстие в полюсе дипольного магнита вдоль его оси, где размещалась спин-обменная ячейка, в которой происходила оптическая накачка паров калия. Плотность и поляризация атомов калия в спин-обменной ячейке контролировалась по ослаблению неполяризованного/поляризованного светового луча перестраиваемого однододового диодного лазера.

Электронная поляризация атомов водорода и дейтерия, вытекающих из ячейки измерялась в поляриметре, содержащем постоянный секстугульный магнит и квадрупольный масс-спектрометр. На рис.8 приведены измеренные величины поляризации в зависимости от плотности газа в спин-обменной ячейке. При проведении этих измерений степень диссоциации молекул довольно высока и практически постоянна ($\sim 75\%$). Первые эксперименты с поляризованной водородной и дейтериевой внутренней мишенью с лазерной накачкой поляризации были проведены в 1996 - 1998 годах в протонном накопительном кольце IUCF (Блумингтон, США) с целью измерения поляризационных наблюдаемых в $\vec{p} - \vec{d}$ реакции. Мишенью являются поляризованные атомы, вытекающие из спин-обменной ячейки непосредственно в накопительную ячейку для атомов, имеющую размеры $400 \times 13 \times 32$ мм и расположенную на дорожке протонного накопителя.

На рис.9 приведены величины ядерной векторной поляризации водородной и дейтериевой мишени. Поляризация водорода определялась по известной анализирующей способности в упругом $p - p$ рассеянии и, в среднем, оказалась равной 14.5%. Векторная поляризация дейтронов была определена из сравнения измеренной векторной спиновой корреляции в реакции развала дейтрона $\vec{p} + \vec{d} \rightarrow 2p + n$ при кинематике, когда

нейтрон-спектатор почти неподвижен, а спиновая корреляция в упругом $\vec{p}-\vec{p}$ рассеянии известна. Среднее значение векторной поляризации дейтериевой мишени за время эксперимента было найдено 10.2% и изменялось между 8.3% и 11.7%.

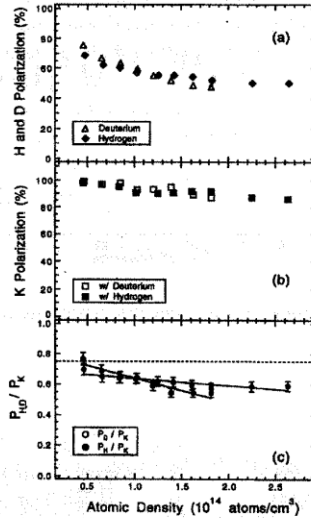


Рис. 8: Электронная поляризация атомов измеренная поляриметром в зависимости от плотности атомов: (a) - степень поляризации атомов водорода и дейтерия, (b) - степень поляризации атомов калия, (c) - отношение P_H/P_K и P_D/P_K .

Шестая глава посвящена описанию опыта эксплуатации поляризованных дейтериевых мишеней на накопителе ВЭПП-3, изучению явления деполаризации мишени полем электронного сгустка и описанию мишени со сверхпроводящими секступольными магнитами с полем до 4.8 Тл, которая с 1999 г. по настоящее время используется для проведения экспериментов на накопителе ВЭПП-3.

Для увеличения плотности мишени на накопителе ВЭПП-3 впервые была применена накопительная ячейка. В этом случае атомы, отражаясь от стенок ячейки, многократно пересекают циркулирующий пучок. При этом возрастает и деполаризирующее действие электромагнитного поля пучка на атомы. Это явление было обнаружено и исследовано экс-

249 126 396

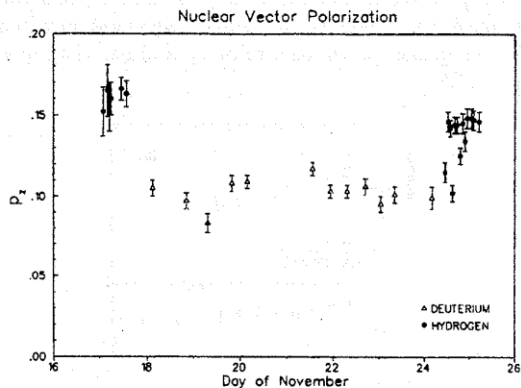


Рис. 9: Векторная ядерная поляризация мишени в зависимости от времени.

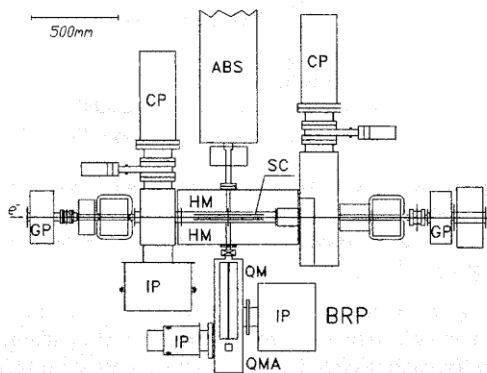


Рис. 10: Расположение мишени на экспериментальном промежутке ВЭПП-3 (вид сверху). ABS - источник поляризованных атомов дейтерия; CP - криогенный насос; SC - накопительная ячейка; HM - магнит, задающий направление поляризации мишени; GP - геттерный насос; BRP - Брейт-Раби поляриметр (QM - квадрупольный магнит, IP - магниторазрядный насос, QMA - квадрупольный масс-спектрометр).

периментально и были предложены меры для его подавления. Первая накопительная ячейка имела большие поперечные размеры (24×46 мм) и длину 94 см. Поперечные размеры определялись апертурой, необходимой при инжекции частиц. Следующая ячейка, имеющая поперечные размеры 17×8 мм и длину 57 см, была активной - при инжекции она раздвигалась для обеспечения необходимой апертуры. В настоящее время установлена стационарная ячейка размерами $400 \times 24 \times 13$ мм, охлаждаемая жидким азотом. Это стало возможным путем изменения размеров пучка при накоплении, для чего в экспериментальный промежуток были установлены две квадрупольные линзы и изменена оптика накопителя. Общий вид мишени и основные ее элементы приведены на рис.10. Основным элементом мишени является ИПА дейтерия. Применение двух блоков ВЧ переходов (MFT) и (SFT), изображенных на рис.11, позволяет получать максимальную тензорную поляризацию пучка $P_{zz} = 1$ и $P_{zz} = -2$.

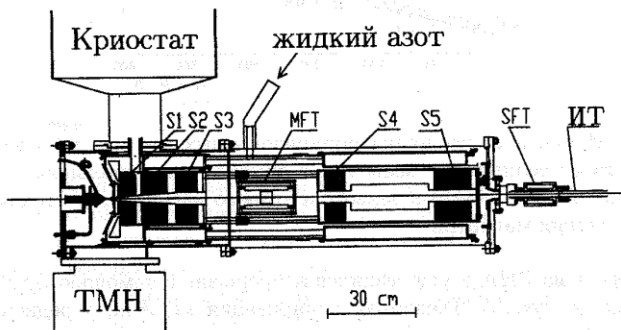


Рис. 11: Общий вид источника поляризованных атомов. S1-S5 - сверхпроводящие секступольные магниты; MFT - блок ВЧ переходов в промежуточном поле; SFT - блок ВЧ переходов в сильном поле; ИТ - инжекционная трубка накопительной ячейки; ТМН - турбомолекулярный насос.

Отличительной чертой ИПА является магнитная система, состоящая из пяти сверхпроводящих магнитов. Первые два магнита имеют конусную апертуру, остальные цилиндрическую. Компьютерное моделирование, проведенное на начальном этапе создания источника, позволило выбрать оптимальную геометрию магнитной системы, при которой достигается наилучшая фокусировка поляризованных атомов в ячейку.

На рис.12 представлены результаты измерений интенсивности источника в зависимости от токов в магнитах. Токи изменялись до значений $I_1 = 200A$ и $I_2 = 350$ для первой и второй группы магнитов соответственно. Эти значения были приняты как стандартные при проведении эксперимента на ВЭПП-3. Максимальная интенсивность пучка атомов дейтерия из криогенного ИПА равна 8.2×10^{16} ат/сек. Контроль поляри-

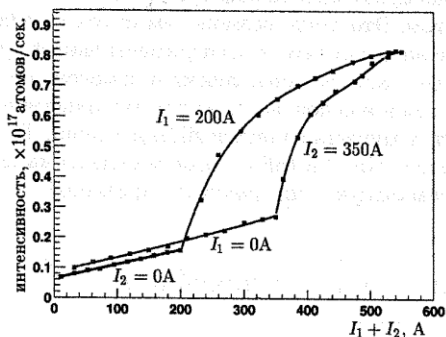


Рис. 12: Интенсивность пучка поляризованных атомов дейтерия в зависимости от величины суммы токов обмоток секступольных магнитов источника: I_1 - ток обмоток первого и второго магнитов; I_2 - ток обмоток трёх последних магнитов.

зации пучка из ИПА осуществлялся непрерывно с помощью Брейт-Раби поляриметра, рис.10. Тензорная поляризация мишени, усредненная по длине ячейки, определялась с помощью поляриметра, который измерял асимметрию в упругом рассеянии электронов при малом переданном импульсе (около 1.6 ферми⁻¹), где анализирующая способность реакции считается известной. Определенная таким образом средняя по полному времени эксперимента тензорная поляризация мишени оказалась равной $P_{zz} = 0.40 \pm 0.03$. Меньшее значение поляризации мишени в сравнении с поляризацией пучка ИПА очевидно связано с деполаризующими эффектами, имеющими место в накопительной ячейке. Толщина мишени, просматриваемая детектором, составила 8×10^{13} ат/см². Реальная толщина мишени несколько выше, так как эта величина была определена по скорости счета событий упругого рассеяния электронов без учета эффективности регистрации событий.

В седьмой главе описывается постановка экспериментов по упругому $e-d$ рассеянию, выполненных на накопителях ИЯФ СО РАН ВЭПП-2 и ВЭПП-3 в 1985 - 2000 г. с поляризованными дейтериевыми мишенями и приводятся их результаты. Целью этих экспериментов является раздельное измерение электромагнитных формфакторов дейтрона.

Предполагая P- и T-инвариантность, электромагнитная структура дейтрона - частицы, имеющей спин, равный единице, может быть полностью описана в виде трех формфакторов: электрического монополюсного $G_C(Q^2)$, электрического квадрупольного $G_Q(Q^2)$ и магнитного дипольного $G_M(Q^2)$. Раздельное измерение этих трех формфакторов в зависимости от величины переданного импульса представляет собой фундаментальную задачу ядерной физики. В случае, когда обе частицы непо-

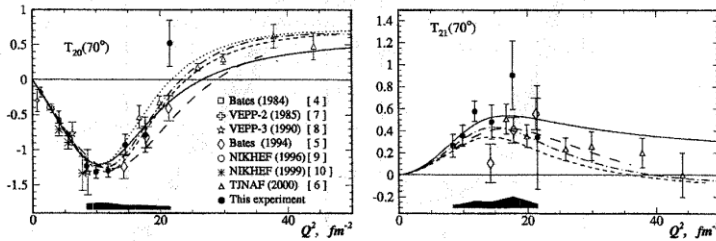


Рис. 13: Экспериментальные результаты и теоретические предсказания для компонент анализирующей способности реакции упругого ed рассеяния T_{20} и T_{21} . Длинная прерывистая линия - NRIA, нерелятивистское импульсное приближение, Парижский потенциал; нерелятивистские модели с релятивистскими поправками и учетом мезонных обменных токов - сплошная (Arenhovel) и точечная (Wiringa *et al.*) линии; предсказания релятивистского описания - прерывистая с точками (Phillips *et al.*) и прерывистая (Krutov and Troitsky). Затемненная область указывает величины систематических ошибок эксперимента.

ляризованы, сечение упругого рассеяния может быть выражено через структурные функции A и B , из которых B является функцией только от $G_M(Q^2)$, а A зависит от всех трех формфакторов. Формфакторы G_Q и G_C раздельно могут быть определены лишь в поляризационных экспериментах, когда поляризационные степени свободы дают дополнительные комбинации формфакторов.

В этих экспериментах в случае применения поляризованной дейтронной мишени измеряются асимметрии рассеяния при разных поляриза-

ционных состояниях мишени, из которых определяются компоненты T_{ij} тензорной анализирующей способности реакции, зависящие от формфакторов дейтрона. Эти результаты представлены на рис.13, где также приведены данные Bates и TJNAF, полученные в экспериментах с измерением тензорной поляризации дейтрона отдачи в реакции упругого рассеяния электрона на неполяризованной дейтронной мишени. В диапазоне

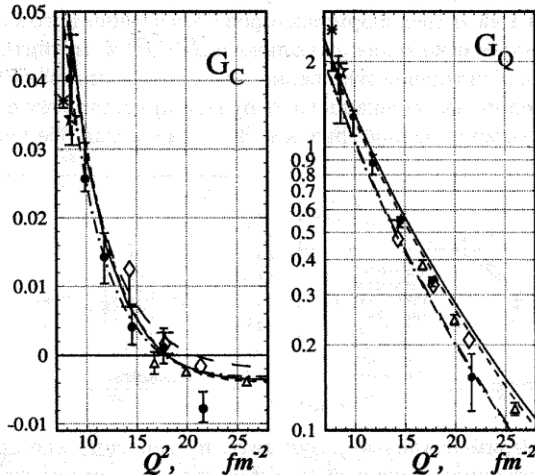


Рис. 14: Экспериментальные результаты и теоретические предсказания для монополюсного (G_C) и квадрупольного (G_Q) зарядовых формфакторов дейтрона. Линии и экспериментальные точки такие же как на рис.13.

квадрата переданного импульса $8 - 12$ ферми $^{-2}$ полученные результаты существенно улучшают точность T_{20} и T_{21} . Как показал анализ, наилучшим образом результаты эксперимента по измерению T_{20} согласуются с релятивистским описанием Phillips *et al.* и Krutov and Troitsky, которые хорошо описывают данные TJNAF при больших значениях Q^2 . Однако при сравнении измеренных величин T_{21} с расчетными описание Phillips гораздо лучше. На рис.14 приведены экспериментальные результаты и теоретические расчеты для формфакторов. Как видно, измерения на ВЭПП-3 согласуются с другими данными и улучшают имеющиеся до настоящего времени результаты по формфакторам. Сравнение с теоретическими моделями показывает хорошее согласие с расчетами Phillips *et al.* и сильно отличается от вычислений NR1A.

Был также проведен анализ с целью локализации нуля зарядового формфактора в интервале $Q^2 = 10 - 27$ ферми⁻². Если использовать только наши данные, то формфактор обращается в нуль при $16.9_{-1.0}^{+1.8}$ ферми⁻², с учетом всех имеющихся измерений и этого эксперимента положение нуля находится при $Q^2 = 17.41 \pm 0.32$ ферми⁻².

В восьмой главе описывается эксперимент по электродезинтеграции поляризованного дейтрона и приводятся его результаты. Поскольку при изучении этого процесса регистрировались события, когда электрон рассеивался на малый угол или кинематически отбирались такие события, то виртуальный фотон, поглощаемый дейтроном, весьма слабо отличался от реального, для которого квадрат четырехмерного импульса $Q^2 = 0$. Для качественного описания основных свойств рассматриваемого процесса, можно рассматривать процесс фотодезинтеграции дейтрона вместо электродезинтеграции. В этом эксперименте также измеряется

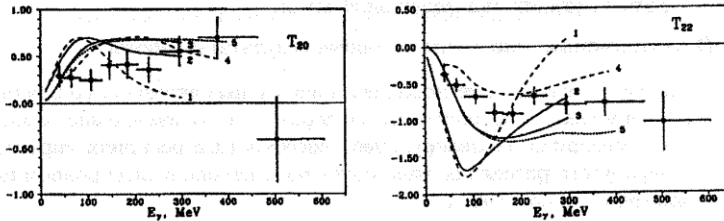


Рис. 15: Экспериментальные результаты и теоретические предсказания. Ошибки указаны только статистические. 1 - PWIA; 2 - IA; 3 - IA + MEC (все три из работы Levchuk); 4 - Korchin *et al.*; 5 - Schmitt and Arenhovel.

асимметрия, которая, совместно с результатами неполяризованных измерений, позволяет определить неупругие формфакторы дейтрона. В более последовательном описании реакции, учитывающим взаимодействия нуклонов в конечном состоянии, наблюдаемая асимметрия может быть выражена более сложным образом в терминах связанного состояния дейтрона в начальном состоянии и конечных волновых функций протона и нейтрона в непрерывном спектре. Поэтому физическая информация, получаемая в процессе изучения дезинтеграции дейтрона богаче по сравнению с информацией, получаемой в упругом рассеянии. Измеренные величины T_{20} и T_{22} приведены на рис.15 в зависимости от энергии γ -кванта совместно с теоретическими предсказаниями. Указанные ошибки являются статистическими. Schmitt и Arenhovel использовали потенциал

Bonn OBEPR и включили мезонные обменные токи (МЕС), изобарные конфигурации (IC) и релятивистские поправки (RC). Korchin, Mel'nik и Shebeko использовали потенциал Paris с однопионным обменом в качестве МЕС. Levchuk использовал диаграммный подход с Paris потенциалом, с учетом МЕС и IC. Взаимодействие нуклонов в конечном состоянии (FSI) было учтено во всех работах. Также приведены результаты двух простых вычислений (Levchuk) основанных на плосковолновом импульсном приближении (PWIA) и с добавлением взаимодействия в конечном состоянии (IA).

Из сравнения экспериментальных результатов с расчетами, можно заключить, что два последних расчета не согласуются с измерениями, тогда как другие находятся в гораздо лучшем согласии. Анализирующие способности здесь имеют форму и величину, грубо совпадающие с измеренными и это указывает, что эти расчеты включают реально существующие явления - особенно это касается включения мезонных обменных токов - хотя в деталях они могут ошибаться.

В заключении приведены основные результаты работы.

1. Впервые мишень из тензорно поляризованных атомов дейтерия была применена в физическом эксперименте по измерению компонент тензорной анализирующей способности в реакциях упругого и неупругого рассеяния электронов на дейтроне в электронном накопителе - 1985 - 1986 г.
2. Впервые произведено измерение компонент тензорной анализирующей способности в реакции упругого рассеяния электронов тензорно поляризованным дейтроном - 1985 г.
3. Впервые произведено измерение компонент тензорной анализирующей способности в реакции электродезинтеграции тензорно поляризованного дейтрона - 1986 г.
4. Впервые в физическом эксперименте на электронном накопителе ВЭПП-3 для увеличения толщины мишени была успешно применена накопительная ячейка для поляризованных атомов - 1988 г.
5. Впервые на электронном накопителе ВЭПП-3 было обнаружено, изучено и объяснено явление деполяризации атомов дейтерия электромагнитным полем циркулирующего электронного сгустка - 1988 г.
6. Создан источник поляризованных атомов дейтерия со сверхпроводящими секступольными магнитами с полем 4.8 Т, обладающий рекордной интенсивностью $8.2 \cdot 10^{16}$ ат/сек. - 2000 г.

7. Проведено измерение компонент тензорной анализирующей способности в упругом рассеянии электронов на дейтроне в области переданных импульсов 8.4 - 21.6 фм⁻², в области, где экспериментальные данные отсутствуют (бедны) и где зарядовый формфактор дейтрона обращается в нуль - 2002 г. Измеренные значения тензорных анализирующих способностей определяют ряд теоретических расчетов, наиболее адекватно описывающих экспериментальные результаты и позволяют уточнить положение пересечения нуля зарядовым форм фактором.
8. Оптимизирован высокоинтенсивный источник поляризованных атомов водорода для экспериментов в ионном накопительном кольце. Параметры поляризованной водородной мишени с накопительной ячейкой, предназначенной для эксперимента в ионном накопительном кольце TSR, были измерены в эксперименте по рассеянию α - частиц - Гейдельберг, Германия, 1991 г.
9. Создан высокоинтенсивный спин-обменный источник поляризованных атомов водорода с лазерной накачкой поляризации - 1994 г. Впервые применен в поляризованной газовой мишени в ионном накопителе IUCF, Блумингтон, США - 1997 г.

Основные положения диссертации опубликованы в следующих работах:

1. D.M.Nikolenko, S.G.Popov, D.K.Toporkov, B.B.Voitsekhovski, V.G.Zelevinski. Electron scattering by a polarized deuteron. Nucl. Phys., **A446** (1985) 393.
2. V.F.Dmitriev, D.M.Nikolenko, S.G.Popov, ..., D.K.Toporkov *et al.* First measurement of the asymmetry in electron scattering by a jet target of polarized deuterium atoms. Phys. Lett. **B157** (1985) 143.
3. Д.К.Весновский, Б.Б.Войцеховский, В.Ф.Дмитриев, ..., Д.К.Топорков и др.. Измерение асимметрии в упругом и неупругом рассеянии электронов на тензорно-поляризованной дейтериевой мишени при энергии 180 и 400 МэВ. Препринт ИЯФ 86-75, Новосибирск, 1986.
4. Б.Б.Войцеховский, Д.М.Николенко, К.Т.Оспанов, ... Д.К.Топорков и др.. Асимметрия в реакции $\vec{d}(e, e'd)$ при переданном импульсе 1 - 1.5 ф⁻¹. Письма в ЖЭТФ, т.43 (1986) 567.
5. M.V.Mostovoy, D.M.Nikolenko, K.T.Ospanov, ..., D.K.Toporkov *et al.*. The measurement of the asymmetry of tensor-polarized deuteron

- electrodisintegration at 180 MeV electron energy. Phys. Lett. B188 (1987) 181.
6. R.J.Holt, R.Gilman, E.R.Kinney, ..., D.K.Toporkov *et al.*. Test of a polarized source of hydrogen and deuterium based on spin-exchange optical pumping and a storage cell for polarized deuterium. AIP Conf. Proc., v.187 (1988) 1535.
 7. S.I.Mishnev, D.M.Nikolenko, S.G.Popov, ..., D.K.Toporkov *et al.*. Polarized deuteron target in an electron storage ring: measurements and perspectives. AIP Conf. Proc., v.187 (1988) 1286.
 8. R.Gilman, R.J.Holt, E.R.Kinney, ..., D.K.Toporkov *et al.*, Measurement of tensor analyzing power in electron-deuteron elastic scattering. Phys. Rev. Lett. 65 (1990) 1733.
 9. D.K.Toporkov. Measurement of the Tensor Analyzing Powers T20 and T22 in Deuteron Photodisintegration. Proc. of Workshop on Electronuclear Physics with Internal Targets and BLAST Detector. Arizona, USA. March 19-21, 1992. Ed. by R. Alarcon and M. Butler. World Scientific. P.221-225.
 10. K.P. Coulter, R.J.Holt, E.R.Kinney, ..., and D.K.Toporkov. Spin-exchange optical pumping as a source of spin-polarized atomic deuterium. Phys. Rev. Lett. 68, (1992) 174
 11. M.Duren, Z.Moroz, M.Veltri, ..., D.K.Toporkov *et al.*. Test of a polarized hydrogen gas target based on the storage cell technique. Nucl. Inst. and Meth. A322 (1992) 13.
 12. S.I. Mishnev, D.M.Nikolenko, S.G.Popov, ..., D.K.Toporkov *et al.*. Measurement of the analyzing power components in photodisintegration of the polarized deuteron. Phys. Lett. B302 (1993) 23.
 13. R.Gilman, R.J.Holt, E.R.Kinney, ..., D.K.Toporkov *et al.*. A polarized gas internal target using a storage cell in an electron storage ring. Nucl. Instr. and Meth. A327 (1993) 277.
 14. F.Stock, K.Rith, H.G.Gaul, ..., D.K.Toporkov *et al.*. The FILTEX/HERMES polarized hydrogen atomic beam source. Nucl. Instr. and Meth. A343 (1994) 334.
 15. M.Poelker, K.P.Coulter, R.J.Holt, ..., D.K.Toporkov *et al.*. High-density production of spin-polarized atomic hydrogen and deuterium. Phys. Rev. A50 (1994) 2450.

16. K.P.Coulter, R.Gilman, R.J.Holt, . . . , D.K.Toporkov *et al.*. An active storage cell for a polarized gas internal target. Nucl. Instr. and Meth. **A350** (1994) 423.
17. M.Poelker, K.P.Coulter, R.J.Holt, . . . , D.K.Toporkov *et al.*. Laser-driven source of spin-polarized atomic hydrogen and deuterium. Nucl. Instr. and Meth. **A364** (1995) 58.
18. W.J.Cummings, H.Gao, R.Kowalczyk, . . . , and D.K.Toporkov. Nuclear Vector Polarization in the Laser Driven Polarized Target at IUCF and Measurement of $\vec{d}(\vec{p}, pp)n$ Reaction. Physics Division Annual Report 1998. Argonne National Laboratory, ANL - 99/12, p.153.
19. L.G.Isaeva, B.A.Lazarenko, S.I.Mishnev, . . . D.K.Toporkov *et al.*. High Field Superconducting Sextupole Magnets. Nucl. Instr. and Meth. **A411** (1998) 201.
20. D.K.Toporkov and B.B.Wojtsekhowski. Mechanical Filter for Alkali Atoms. Nucl. Instr. and Meth. **A444** (2000) 631.
21. Ю.В.Шестаков, М.В.Дюг, С.А.Зеваков, . . . , Д.К.Топорков *и др.*. Поляризованная газовая дейтериевая/водородная мишень для поляриметрии и экспериментов на накопителях. Препринт ИЯФ 2001-76, Новосибирск, 2001.
22. D.M.Nikolenko, H.Arenhövel, L.M.Barkov, . . . , D.K.Toporkov *et al.*. Measurement of polarization observables in elastic and inelastic electron-deuteron scattering at the VEPP-3 storage ring. Nucl. Phys. **A684** (2001) 525c.
23. M.V.Dyug, L.G.Isaeva, B.A.Lazarenko, . . . , D.K.Toporkov *et al.*. Internal polarized deuterium target with cryogenic atomic beam source. Nucl. Instr. and Meth. **A495** (2002) 8.
24. D.M.Nikolenko, H.Arenhövel, L.M.Barkov, . . . , D.K.Toporkov *et al.*. Measurement tensor analyzing power in elastic electron-deuteron scattering at momentum transfer range 8.4-21.6 fm⁻². Phys. Rev. Lett. **90** (2003) 072501.

ТОПОРКОВ Дмитрий Константинович

**Поляризованные мишени в накопителе
(методика применения и эксперимент)**

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
доктора физико-математических наук

Сдано в набор 7.05.2004 г.

Подписано к печати 12.05.2004 г.

Формат 60×90 1/16 Объем 1,8 печ.л., 1,4 уч.-изд.л.

Тираж 100 экз. Бесплатно. Заказ №28

Обработано на IBM PC и отпечатано
на ротапринтере ИЯФ им. Г.И. Будкера СО РАН,
Новосибирск, 630090, пр. академика Лаврентьева, 11.

