

ОБЪЕДИНЁННЫЙ ИНСТИТУТ ЯДЕРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

УДК 539.171.017.

На правах рукописи

Курилкин Алексей Константинович

**Изучение угловой зависимости  
анализирующих способностей реакции  
 $\vec{d}d \rightarrow {}^3\text{H}p$  при энергии 200 МэВ**

01.04.16 – Физика атомного ядра и элементарных частиц

Автореферат диссертации на соискание учёной степени кандидата  
физико-математических наук

Дубна – 2010

Работа выполнена в Лаборатории физики высоких энергий  
Объединенного института ядерных исследований.

Научный руководитель:

доктор физико-математических наук

Владимир Петрович  
ЛАДЫГИН

Официальные оппоненты:

доктор физико-математических наук,  
профессор

Юрий Анатольевич  
ПАНЕБРАТЦЕВ

доктор физико-математических наук

Алексей Борисович  
КУРЕПИН

Ведущее научно-исследовательское учреждение: Научно-исследовательский институт ядерной физики МГУ (г. Москва).

Защита состоится " \_\_\_\_ " \_\_\_\_\_ 2010 г. в " \_\_\_\_ " часов на заседании диссертационного совета Д. 720.001.02 в Лаборатории физики высоких энергий Объединенного института ядерных исследований, г. Дубна Московской области.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ЛФВЭ ОИЯИ.

Автореферат разослан " \_\_\_\_ " \_\_\_\_\_ 2010 года.

Ученый секретарь диссертационного совета  
кандидат физико-математических наук,  
старший научный сотрудник

В.А.Арефьев

## Общая характеристика работы.

**Актуальность темы.** Ядерные реакции с участием дейтронов традиционно используются как для изучения нуклон-нуклонного взаимодействия при высоких и промежуточных энергиях, так и для исследования структуры легких ядер на малых межнуклонных расстояниях. В последние десятилетия было накоплено большое количество материала по спиновой структуре легких ядер при использовании электромагнитных и адронных пробников. Главной задачей проведенных исследований при промежуточных и высоких энергиях являлось получение информации о высокоимпульсных компонентах легких ядер с целью изучения проявления релятивистских эффектов и ненуклонных степеней свободы. Интенсивные теоретические и экспериментальные исследования последних десятилетий, привели к новому поколению реалистических  $NN$  потенциалов, таких как,  $AV_{18}$ , CD-Bonn, Nijm I, II и 93. Эти  $NN$  потенциалы воспроизводят существующие данные по нуклон-нуклонному рассеянию вплоть до энергии 350 МэВ с большой точностью. Однако, в упругом нуклон-дейтронном рассеянии имеются существенные разногласия между экспериментальными результатами и теоретическими предсказаниями, основанными на точном решении уравнений Фаддеева с использованием только нуклон-нуклонных потенциалов. Эти разногласия наиболее существенны в области минимума поперечного сечения и при энергиях налетающих нуклонов более 60 МэВ. Включение трехнуклонных сил (3NF) таких как TM-3NFs или Urbana-3NFs в теоретические расчеты устраняют многие из них. Однако, существующие модели 3NFs не описывают данные по ряду поляризационных наблюдаемых. Ожидается, что детальное исследование структуры таких ядер как  $d$ ,  ${}^3H$  и  ${}^3He$  на малых межнуклонных расстояниях может пролить свет на причины разногласий между экспериментальными данными и теоретическими расчетами. Среди легких ядер наиболее интенсивно исследован дейтрон. Гораздо меньше существует данных с участием трехнуклонных систем ( ${}^3H$  и  ${}^3He$ ), особенно по их спиновой структуре. В этой связи новые экспериментальные данные, чувствительные к спиновой структуре  ${}^3H$ ,  ${}^3He$  и дейтрона, представляют огромную важность.

**Целью работы** является исследование векторной  $A_y$  и тензорных  $A_{yy}$ ,  $A_{xx}$  и  $A_{xz}$  анализирующих способностей реакции  $\vec{d}d \rightarrow {}^3\text{H}p$  при энергии 200 МэВ для получения новой информации о высокоимпульсной спиновой структуре  ${}^3\text{H}$  и дейтрона на малых межнуклонных расстояниях.

**Научная новизна работы.**

Впервые получены высокоточные данные по векторной  $A_y$  и тензорным  $A_{yy}$ ,  $A_{xx}$  и  $A_{xz}$  анализирующим способностям реакции  $\vec{d}d \rightarrow {}^3\text{H}p$  при энергии 200 МэВ в полном угловом диапазоне в с.ц.м. Анализирующие способности данной реакции чувствительны к спиновой структуре  ${}^3\text{H}$  и дейтрона. Результаты по анализирующим способностям сравнены с предсказаниями модели на основе однонуклонного обмена (ОНО) при использовании волновых функций  ${}^3\text{He}$  и дейтрона, полученных из Paris и CD-Bohn потенциалов. Теоретические расчеты в рамках данной модели не согласуются с экспериментальными данными по тензорным анализирующим способностям в полном угловом диапазоне в с.ц.м. Для учета возможного проявления релятивистских эффектов данные сравнивались с теоретическими вычислениями, основанными на минимальной схеме релятивизации с использованием Урбанской волновой функции  ${}^3\text{He}$ . Хотя, различие в релятивистском и нерелятивистском описании данных оказалось довольно велико, воспроизвести поведение анализирующих способностей только с учетом релятивистских поправок не удалось.

**Научно-практическая значимость работы.** Полученные результаты по векторной  $A_y$  и тензорным  $A_{yy}$ ,  $A_{xx}$  и  $A_{xz}$  анализирующим способностям реакции  $\vec{d}d \rightarrow {}^3\text{H}p$  при энергии 200 МэВ расширяют экспериментальный материал и дают новую информацию, необходимую для развития теоретических моделей описания трехнуклонных систем  ${}^3\text{He}$ ,  ${}^3\text{H}$  и дейтрона на малых межнуклонных расстояниях и понимания механизма реакции.

**Апробация работы и публикации.**

Основные результаты диссертации опубликованы в журналах "Ядерная физика", "Int. Journal of Modern Physics A", "Eur. Phys. J. ST". Результа-

ты докладывались на семинарах ЛФВЭ им. В.И. Векслера и А.М. Балдина ОИЯИ, IX-ом (Модра-Гармония, Словакия, 2006) рабочем совещании по релятивистской ядерной физике "Relativistic Nuclear Physics: from Hundreds of MeV to TeV"; на XVIII-ом и XIX-ом международных симпозиумах по проблемом физики высоких энергий (Дубна, 2006, 2007); на международном симпозиуме FM50 (Токио, Япония, 2007); на XIX-ой Международной конференции по малочастичным системам (FB19, Бонн, Германия, 2009); на XII-ом и XIV-ом международных конференциях по спиновой физике "Workshop on High Energy Spin Physics" (Дубна, 2007, 2009); на XI-ой, XII-ой, и XIII-ой научных конференциях молодых ученых и специалистов ОИЯИ (Дубна, 2007-2009 гг.). Основные результаты диссертации опубликованы в работах [1] - [2].

#### **Объем и структура работы.**

Диссертация состоит из введения, четырех глав и заключения. Полный объем диссертации составляет 99 страниц, включая 18 таблиц, 32 рисунка и список литературы из 120 наименований.

#### **Автор защищает**

- Процедуру и результаты измерения векторной  $A_y$  и тензорных  $A_{yy}$ ,  $A_{xx}$  и  $A_{xz}$  анализирующих способностей реакции  $\vec{d}d \rightarrow {}^3\text{H}p$  при энергии 200 МэВ, полученных на ускорительном комплексе RIKEN.
- Выводы из результатов по реакции  $\vec{d}d \rightarrow {}^3\text{H}p$ , чувствительность тензорных анализирующих способностей к отношению  $D/S$  волн в  ${}^3\text{H}$  ( ${}^3\text{He}$ ), при малых углах в с.ц.м., чувствительность тензорных анализирующих способностей к отношению  $D/S$  волн в дейтроне, при малых углах в с.ц.м.

#### **Содержание диссертации**

**Введение** приведена общая схема для измерения поляризационных наблюдаемых на ускорительном комплексе RIKEN, описано оборудование и работа триггера.

В первом разделе описывается общая схема по измерению векторной  $A_y$  и тензорных  $A_{yy}$ ,  $A_{xx}$  и  $A_{xz}$  анализирующих способностей  $\vec{d}d \rightarrow {}^3\text{H}p$  ре-

акции при энергии 200 МэВ на ускорительном комплексе RARF 1. (RIKEN Accelerator Research Facility). Поляризованный дейтронный пучок обеспечивался источником поляризованных ионов (ИПИ). Поляризация дейтронного пучка измерялась двумя поляриметрами (SWPOL и DroomPOL). Интенсивность пучка, которая измерялась с помощью чаши Фарадея, варьировалась от 1 до 120 нА в зависимости от угла детектирования. Живое время системы сбора данных составляло более 80%. Рассеянные частицы детектировались дрейфовыми камерами, расположенными перед 3-мя сцинтилляционными счетчиками. Идентификация частиц основывалась на анализе времени пролета частиц и ионизационных потерь в пластических сцинтилляционных детекторах. Импульс и угол вылета частицы восстанавливался по информации из дрейфовых камер и оптической матрицы спектрометра.

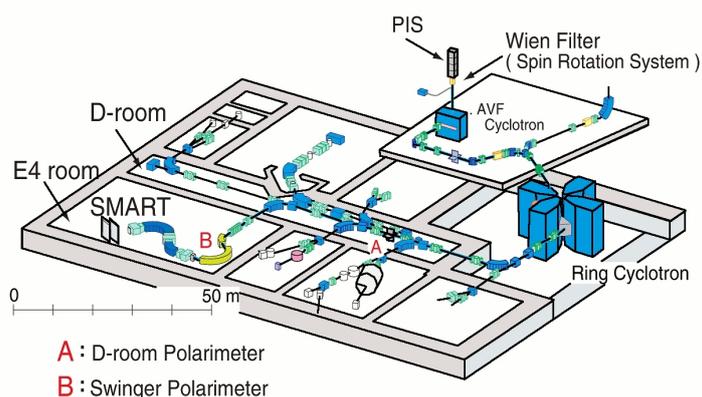


Рис. 1. RIKEN

Во втором разделе описывается источник поляризованных ионов. Использовались четыре моды поляризации: неполяризованная, чисто векторная, чисто тензорная и смешанная мода ( $M=0,1,2,3$ ). Измеренные значения поляризации составляли от 46% до 85% от идеальных.

В третьем разделе описываются поляриметры для измерения поляризации дейтронного пучка. Первый поляриметр (DroomPOL) использовался для постоянного мониторинга поляризации. Второй поляриметр (SWPOL) измерял поляризацию до и после каждого изменения угла падения поляризованного дейтронного пучка на мишень. Процесс измерения поляризации пучка основывался на измерении асимметрии в упругом  $\vec{d}p$  рассеянии под углом, где величины тензорной и векторной анализирующих способностей имеют большие значения. Поляризация дейтронного пучка вычислялась методом усреднения значений из SWPOL и D-room поляриметров. Перед усреднением поляризация, измеренная D-room поляриметром, была скорректирована на релятивистское вращение спина магнитными элементами канала.

В четвертом разделе описывается спектрометр SMART (Swinger and Magnetic Analyzer with a Rotator and a Twister), при помощи магнитной системы которого выполнялись измерения импульсов рассеянных частиц. Эскиз спектрометра SMART с детектирующей аппаратурой представлен на рис. 2.

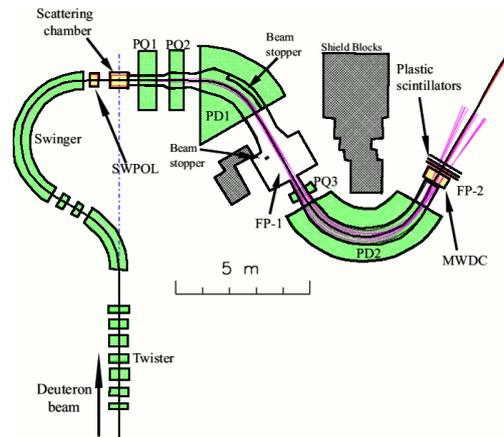


Рис. 2. Схема спектрометра SMART, SWPOL - поляриметр, PQ1, PQ2 и PQ3 - квадрупольные магниты, PD1 и PD2 - дипольные магниты, FP1 и FP2 - первая и вторая фокальная плоскость, MWDC - многопроволочная дрейфовая камера.

Требуемый угол падения пучка поляризованных дейтронов на мишень настраивался при помощи вращения SWINGER магнита вокруг оси пучка. SWINGER поляриметр был расположен непосредственно перед камерой рассеяния. Рассеянные частицы проходили через квадрупольные и дипольные магниты, расположенные в Q-Q-D-Q-D конфигурации. Рассеянные частицы,  ${}^3H$  и  $p$ , регистрировались в угловом диапазоне от  $0^\circ$  до  $\sim 95^\circ$  и от  $\sim 100^\circ$  до  $\sim 180^\circ$  в с.ц.м, соответственно. Ограничения на углы вылета частиц были обусловлены магнитной жесткостью оптической системы.

В пятом разделе первой главы описана процедура детектирования частиц. Для определения траектории рассеянных частиц использовалась информация MWDC.

В шестом разделе кратко описывается электроника и схема триггера.

**Во второй главе** описана схема измерения и методика оценки поляризации пучка дейтронов на ускорительном комплексе RIKEN при энергии 200 МэВ.

В первом разделе описывается общая схема измерения поляризации пучка.

Во втором разделе описывается процедура получения полезных и фоновых событий для определения поляризации дейтронного пучка. Процесс получения полезных и фоновых событий состоял из 3-х этапов. На первом этапе декодировалась информация из двоичного кода. Вторым этапом состоял из записи данных в NTUPLE для дальнейшей обработки. В NTUPLE записывались амплитуды, времена пролета, признак спиновой моды, номер сработавшей пары детекторов и информация о высокочастотном сигнале из циклотрона. На третьем этапе на амплитудные и время-пролетные спектры были наложены условия и получено количество полезных и фоновых событий для детекторов L, R, U и D для всех мод поляризации.

В третьем разделе описывается метод получения значений поляризации дейтронного пучка. Определение значений поляризации пучка осуществлялось из числа полученных полезных событий и известных величин анализирующих способностей реакции упругого  $\vec{d}p$  рассеяния. Эскиз поляриметра в горизонтальной плоскости показан на рис.3. Рассеянные дейтроны и протоны отдачи регистрировались в совпадениях четырьмя парами

сцинтилляционных счетчиков (пластический сцинтиллятор NE102A, ФЭУ Н1161). Для этого плечи поляриметра были выставлены согласно кинематике  $d p$ - упругого рассеяния при энергии 200 МэВ.

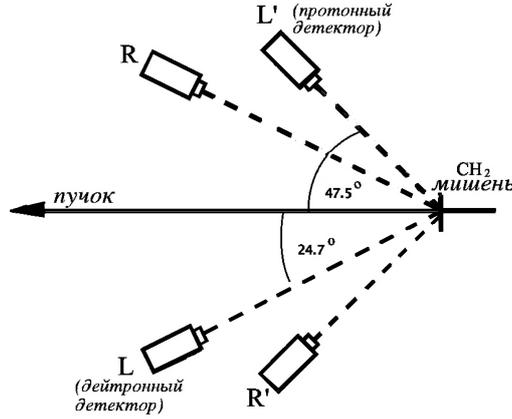


Рис. 3. Схема поляриметра в горизонтальной плоскости. Дейтронные и протонные детекторы расположены под углами  $24.7^\circ$  и  $47.5^\circ$ , что соответствует углу  $d p$ - упругого рассеяния  $82.5^\circ$  в с.с.м.

Значения векторной  $p_Z^M$  и тензорной  $p_{ZZ}^M$  компонент проекции поляризации дейтронного пучка на ось  $Z$ , углов  $\beta$  и  $\phi$  (направление вектора поляризации относительно оси симметрии) определялись методом наименьших квадратов. Вклад систематической ошибки измерения поляризации, обусловленный неопределенностью анализирующих способностей  $A_y, A_{yy}, A_{xx}$  и  $A_{xz}$  реакции  $\vec{d}p$  упругого рассеяния, был также учтен методом повторения процедуры минимизации с различными входными значениями анализирующих способностей.

В четвертом разделе приведены таблицы с компонентами поляризации пучка, необходимые для получения векторной  $A_y$  и тензорных  $A_{yy}, A_{xx}$  и  $A_{xz}$  анализирующих способностей реакции  $\vec{d}d \rightarrow {}^3\text{H}p$  при энергии 200 МэВ и их временные зависимости.

В третьей главе описана процедура анализа экспериментальных данных: описаны алгоритмы выделения полезных событий и получения векторной  $A_y$  и тензорных  $A_{yy}$ ,  $A_{xx}$  и  $A_{xz}$  анализирующих способностей реакции  $\vec{d}d \rightarrow {}^3\text{H}p$  при энергии 200 МэВ.

Первый раздел посвящен идентификации вторичных частиц, которая была основана на анализе энергетических потерь в пластических сцинтилляционных детекторах, а также информации о времени пролета между мишенью и точкой регистрации. Вторичная частица ( ${}^3\text{H}$  или  $p$ ) считалась идентифицированной, если выполнялись следующие условия. Во-первых, частица должна была регистрироваться всеми тремя сцинтилляционными детекторами и амплитуды сигналов AMP1, AMP2 и AMP3 должны быть скоррелированы. Для случая детектирования низко-энергетичных частиц условие смягчалось и требовалось чтобы скоррелированы были только две амплитуды: AMP1 и AMP2. На рис. 4 показаны корреляции амплитуд AMP1-AMP2 и AMP1-AMP3 для случая регистрации  ${}^3\text{H}$ . Вторым условием являлось ограничение на время пролета. Расстояние от места расположения мишени до фокальной плоскости FP-2 составляло 17 метров, что было достаточным для разделения частиц с одинаковым импульсом. На рис. 5 показано распределение по времени пролета для случая детектирования  ${}^3\text{H}$ . Так как система сбора записывала данные из двух банчей ускорителя, то полезные события накапливались в двух пиках. Штриховые линии на рис. 5 соответствуют границам интервалов отбора полезных событий по времени пролета.

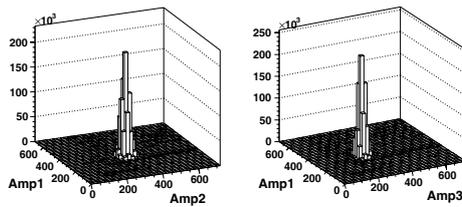


Рис. 4. Корреляции амплитуд AMP1-AMP2 и AMP1-AMP3 для случая регистрации  ${}^3\text{H}$ .

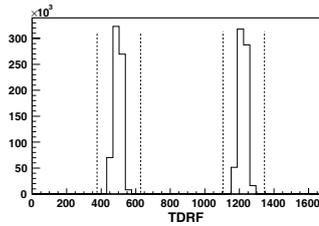


Рис. 5. Время-пролетный спектр для случая регистрации  ${}^3\text{H}$ .

Во втором разделе описана процедура восстановления углов рассеяния. Угол падения пучка на мишень варьировался вращением SWINGER магнита. В эксперименте был покрыт диапазон углов от 0 до 180 градусов в с.ц.м. Каждая настройка угла SWINGER магнита соответствует определенному интервалу углов вылета частиц. Разбиение углового интервала было выполнено таким образом, чтобы была обеспечена разумная статистическая ошибка для тензорной анализирующей способности  $A_{yy} \sim 0.02$ . Таким образом, угловой интервал был разбит на бины с шагом 2 градуса в с.ц.м.

В третьем разделе описана процедура  $CD_2-C$  вычитания. Для получения анализирующих способностей реакции  $\vec{d}d \rightarrow {}^3H p$  данные набирались на двух мишенях ( $CD_2$  и  $C$ ). Эффект на дейтерии был получен путем  $CD_2 - C$  вычитания для каждой моды поляризации ИПИ. Для этой цели строились спектры по энергии возбуждения для зарегистрированных протонов или  ${}^3H$  на  $CD_2$  и  $C$  мишенях.

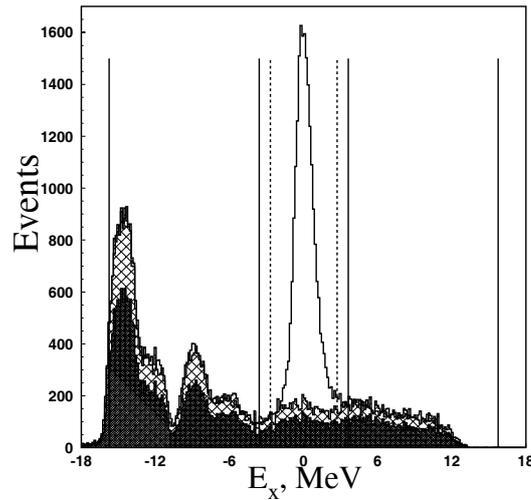


Рис. 6. Энергетические спектры  ${}^3H$ , полученные на дейтерированном полиэтилене( $CD_2$ ) и углеводе( $C$ ) при угле детектирования  ${}^3H$   $28^\circ$  в с. ц.м.

Типичный спектр по энергии возбуждения для  $CD_2$  и  $C$  мишеней в случае регистрации  ${}^3H$  приведен на рис. 6. Сплошные вертикальные линии обозначают области, события в которых использовались для нормировки углеродного спектра. Штриховые линии обозначают границы интервалов для выделения событий бинарной реакции. Полностью заштрихованная и незаштрихованная гистограммы соответствуют энергетическим спектрам, полученным на  $C$  и  $CD_2$  мишенях. Слегка заштрихованная гистограмма соответствует нормированному углеродному спектру относительно  $CD_2$ .

На рис. 7 показаны спектры для  ${}^3H$  в зависимости от энергии возбуждения  $E_x$  под углами  $12^\circ$ ,  $36^\circ$ ,  $56^\circ$ ,  $87^\circ$  в с.ц.м. Видно хорошее качество процедуры вычитания.

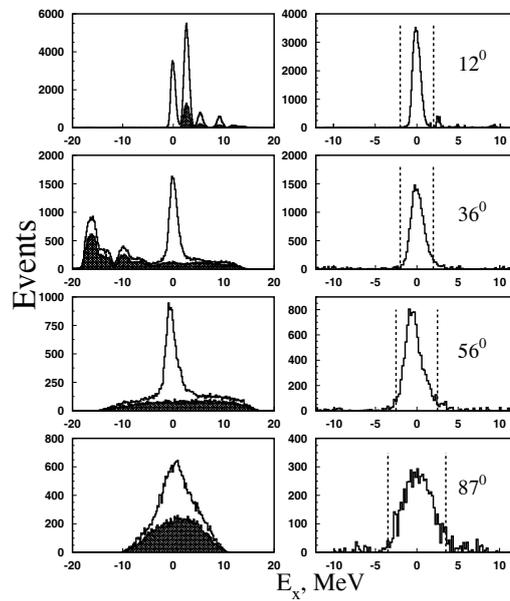


Рис. 7. Спектры по энергии возбуждения  $E_x$  для реакции  $\vec{d}\bar{d} \rightarrow {}^3He$  в случае регистрации  ${}^3H$  при энергии 200 МэВ и углах  $12^\circ$ ,  $36^\circ$ ,  $56^\circ$  и  $87^\circ$  в с.ц.м. соответственно. Открытые и заштрихованные гистограммы слева означают спектры, полученные на  $CD_2$  и углероде соответственно. Справа показаны результаты  $CD_2 - C$  вычитания. Штриховые линии - границы выделения полезных событий.

В четвертом разделе описано получение анализирующих способностей. Данные для каждой анализирующей способности были получены [1–16] с использованием определенных мод поляризации дейтронного пучка. Для получения векторной  $A_y$  и тензорной  $A_{yy}$  анализирующей способности данные набирались для 4-х спиновых мод ИПИ: неполяризованной, чисто векторной, чисто тензорной и смешанной. Для получения тензорных анализирующих способностей  $A_{xx}$  и  $A_{xz}$  использовались только неполяризованная, чисто тензорная и смешанная моды ИПИ. Реальное значение поляризации дейтронного пучка составляло 32 - 74% от максимального теоретического значения.

В первом пункте четвертого раздела описана процедура получения анализирующих способностей при углах больше  $7^\circ$  в с.ц.м. Анализирующие способности при углах больше  $7^\circ$  были получены из асимметрии полезных событий для разных мод ИПИ, и поляризации дейтронного пучка.

Во втором подпункте четвертого раздела описано получение анализирующих способностей при углах менее  $7^\circ$  в с.ц.м. При этих углах учитывалась не только зависимость от угла рассеяния  $\theta$ , но и от азимутального угла  $\Phi$ . Для получения анализирующей способности  $A_{yy}$  ( $A_{xx}$ ) необходимо также учесть и вклад от  $A_{xx}$  ( $A_{yy}$ ). Для этого угловой диапазон по углу  $\Phi$  был разделен на части по 15 градусов. Анализирующие способности были получены методом фитирования значений асимметрии.

**В четвертой главе** риведены результаты по векторной и тензорным анализирующим способностям реакции  $\vec{d}d \rightarrow {}^3\text{He}p$  при энергии 200 МэВ, которые сравниваются с теоретическими расчетами, основанными на механизме однонуклонного обмена.

В первом разделе описано приближение модели однонуклонного обмена, в рамках которого тензорные анализирующие способности реакции  $\vec{d}d \rightarrow {}^3\text{He}n({}^3\text{He}p)$  при промежуточных энергиях чувствительны к отношению  $D/S$  компонент волновых функций  ${}^3\text{He}({}^3\text{H})$  и дейтрона.

Во втором разделе полученные поляризационные наблюдаемые сравниваются с расчетами, основанными на механизме однонуклонного обмена. Полученные значения приводятся в таблицах. Данные по угловой зависимости векторной  $A_y$  и тензорных  $A_{yy}$ ,  $A_{xx}$  и  $A_{xz}$  анализирующих способ-

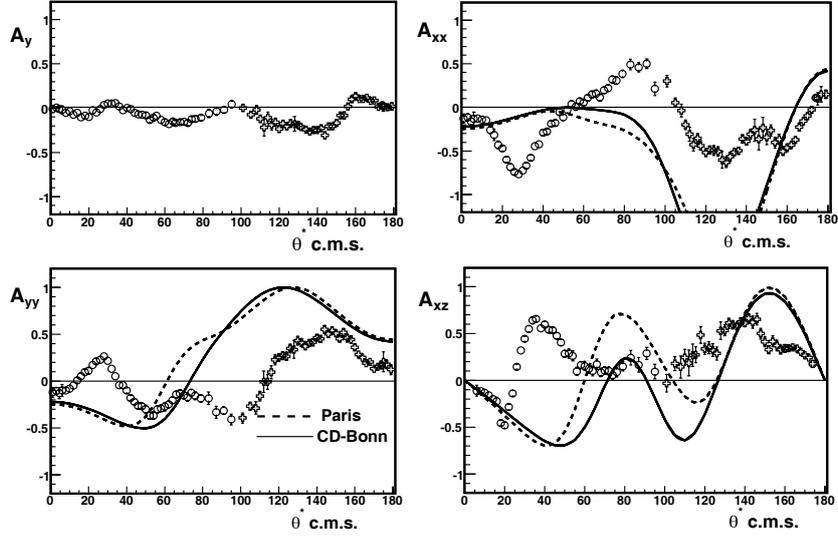


Рис. 8. Угловая зависимость векторной  $A_y$  и тензорных  $A_{yy}$ ,  $A_{xx}$  и  $A_{xz}$  анализирующих способностей реакции  $\vec{d}\bar{d} \rightarrow {}^3\text{He}p$  при энергии 200 МэВ в с.ц.м. Круги и кресты обозначают значения анализирующих способностей в случаях регистрации  ${}^3\text{He}$  и протонов. Сплошные, точечные кривые представляют результаты нерелятивистских вычислений в рамках ОНО.

ностей реакции  $\vec{d}\bar{d} \rightarrow {}^3\text{He}p$  при энергии 200 МэВ [1–16] показаны на рис. 8. Кружки и кресты обозначают значения анализирующих способностей в случаях регистрации  ${}^3\text{He}$  и протона соответственно. Полная ошибка анализирующих способностей была получена как среднеквадратичная из статистической и систематической ошибок. Систематическая ошибка составляет не более  $\sim 2\%$  для всех анализирующих способностей. На рис. 8 можно видеть сильную вариацию полученных данных в зависимости от угла в с.ц.м. Сплошные и точечные кривые на рис. 8 представляют результаты нерелятивистских вычислений в рамках ОНО с использованием волновых функций дейтрона и  ${}^3\text{He}$  на основе Боннского и Парижского нуклон-нуклонных потенциалов.

Наблюдается заметное различие между экспериментальными данными и нерелятивистскими вычислениями в рамках модели ОНО. Следует отметить, что модель ОНО может объяснить отрицательные значения тензорных анализирующих способностей  $A_{yy}$  и  $A_{xx}$  реакции  $\vec{d}d \rightarrow {}^3\text{H}p$  при малых углах рассеяния. Такое поведение данных находится в качественном согласии с теоретическими расчетами, в которых предсказана примесь  $D$ -состояния в  ${}^3\text{He}$ . С другой стороны, тенденция поведения тензорных анализирующих способностей противоположна расчетам ОНО уже при углах меньших  $15^\circ$ . Отклонение экспериментальных данных от теоретических расчетов на рис. 8 может быть связано с неадекватным описанием спиновой структуры  ${}^3\text{H}({}^3\text{He})$  и дейтрона на малых расстояниях.

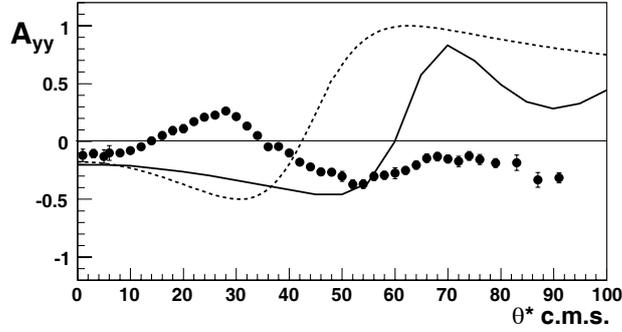


Рис. 9. Угловая зависимость тензорной анализирующей способности  $A_{yy}$  реакции  $\vec{d}d \rightarrow {}^3\text{H}p$ . Сплошная (точечная) кривая представляет результаты нерелятивистских (релятивистских) вычислений в рамках ОНО с использованием волновой функции  ${}^3\text{H}$  на основе Urbana нуклон-нуклонного потенциала.

В данных по векторной анализирующей способности  $A_y$  реакции  $\vec{d}d \rightarrow {}^3\text{H}p$  видны некоторые структуры, хотя расчеты, выполненные в рамках ОНО предсказывают, что  $A_y$  должна равняться нулю. Таким образом, данные по векторной анализирующей способности  $A_y$  явно указывают на наличие дополнительного механизма к ОНО для данной реакции. Ожидается,

что вклад дополнительных механизмов относительно невелик, поскольку абсолютные значения  $A_y$  малы. Одним из таких дополнительных к ОНО механизмов может быть многократное рассеяние. Кроме того, при данной энергии возможно проявление релятивистских эффектов.

На рис. 9 показана тензорная анализирующая способность  $A_{yy}$  реакции  $\vec{d}d \rightarrow {}^3\text{H}p$  при энергии 200 МэВ и расчеты ОНО, использующие релятивистскую и нерелятивистскую волновую функцию  ${}^3H$  на основе Урбанского нуклон-нуклонного потенциала. Релятивизм в волновой функции  ${}^3H$  был учтен согласно минимальной схеме релятивизации. Различие в описании данных при использовании релятивистской и нерелятивистской волновой функции  ${}^3H$  существенно. Однако, как и при использовании нерелятивистского подхода, отклонение теоретических расчетов от экспериментальных данных достаточно велико. Структура  ${}^3He({}^3H)$  может зависеть от более чем одной переменной, как и в случае дейтрона, где наблюдается зависимость спиновой структуры от двух переменных.

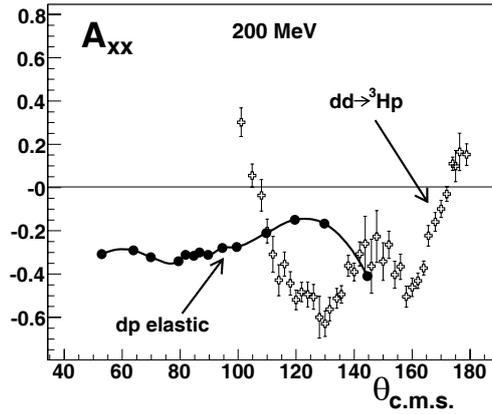


Рис. 10. Угловая зависимость тензорных анализирующих способностей  $A_{xx}$  реакции  $\vec{d}d \rightarrow {}^3\text{H}p$  и  $dp$ - упругого рассеяния при энергии 200 МэВ. Заштрихованные и открытые символы обозначают данные для  $dp$ - упругого рассеяния и  $\vec{d}d \rightarrow {}^3\text{H}p$  реакции, соответственно.

На рис. 10 показаны угловые зависимости тензорных анализирующих способностей  $A_{xx}$  реакций  $\vec{d}d \rightarrow {}^3\text{H}p$  и  $dp$ - упругого рассеяния при энергии 200 МэВ. Поведение  $A_{xx}$  для  $\vec{d}d \rightarrow {}^3\text{H}p$  реакции подобно поведению тензорной анализирующей способности  $dp$ - упругого рассеяния. В обоих распределениях выражены структуры, хотя они имеют различное положение максимумов в с.ц.м. Возможно, что включение в расчеты трехнуклонных сил улучшит описание экспериментальных данных в этой области углов.

**В заключении** сформулированы основные выводы диссертации:

1. Впервые получены высокоточные данные по векторной  $A_y$  и тензорным  $A_{yy}$ ,  $A_{xx}$  и  $A_{xz}$  анализирующим способностям реакции  $\vec{d}d \rightarrow {}^3\text{H}p$  при энергии 200 МэВ в полном угловом диапазоне в с.ц.м. [1–16].
  - Результаты по анализирующим способностям сравнены с предсказаниями модели на основе однонуклонного обмена с использованием волновых функций  ${}^3H$  и дейтрона полученных на основе Парижского и Боннского потенциалов. Описать экспериментальные данные по тензорным анализирующим способностям в рамках модели ОНО полном угловом диапазоне не удалось. Несовпадение между экспериментом и теорией может быть связано как с неадекватным описанием волновой функции трехнуклонного связанного состояния на малых межнуклонных расстояниях и возможным проявлением релятивистских эффектов, так и с дополнительными механизмами реакции.
  - Для учета релятивизма данные сравнивались с теоретическим вычислением основанным на минимальной схеме релятивизации с использованием Урбанской волновой функции  ${}^3H$ . Различие в описании данных при использовании релятивистской и нерелятивистской волновой функции  ${}^3H$  оказалось существенным. Однако, как и при использовании нерелятивистского подхода, отклонение от экспериментальных данных достаточно заметно. Хотя релятивизм вносит существенный вклад в поведение анализирующих способностей, одного его не достаточно для описания

экспериментальных данных. Поведение тензорной анализирующей способности  $A_{xx}$  при рассеянии назад подобно поведению  $A_{xx}$  в  $dp$ - упругом рассеянии назад, т.е. наблюдается характерная структура в обоих распределениях. Возможно, что включение в расчеты трехнуклонных сил улучшит описание экспериментальных данных в этой области углов.

- В приближении однонуклонного обмена векторная анализирующая способность  $A_y$  должна равняться нулю, что не наблюдается экспериментально. В данных видна структура, которая свидетельствует о наличии дополнительных механизмов реакции.
2. В ходе эксперимента определено поведение поляризации пучка дейтронов на ускорительном комплексе RIKEN при энергии 200 МэВ с использованием поляриметра, основанного на реакции  $dp$ - упругого рассеяния, и показана высокая степень долговременной стабильности измеренных компонент поляризации.

## Литература

1. Kurilkin A. K. et al. The angular distributions of the vector  $A_y$  and tensor  $A_{yy}$ ,  $A_{xx}$ ,  $A_{xz}$  analyzing powers in the  $dd \rightarrow {}^3\text{He}p$  and  $dd \rightarrow {}^3\text{He}n$  reactions at  $E_d=200$  and 270 MeV. // *Int. Journal of Modern Physics A*. 2009. Vol. 24. Pp. 526–529.
2. Ladygin V. P., . . . , Kurilkin A. K. et al. Short-range correlations studies in collisions of polarized nuclei at Nuclotron-M // *EPJ Web of Conferences*. 2010. P. 04004.
3. Kurilkin A. K. et al. Measurement of the vector  $A_y$  and tensor  $A_{yy}$ ,  $A_{xx}$ ,  $A_{xz}$  analyzing powers for the reaction at 200 MeV. // *Eur. Phys. Journal ST*. 2007. Vol. 162. Pp. 133–136.
4. Kurilkin A. K. et al. Measurement of the tensor and vector analyzing powers for the  $dd \rightarrow {}^3\text{He}p$  reaction at the energy 200 MeV // *Relativistic Nuclear Physics and Quantum Chromodynamics: Proc. of the XVIII Intern. Baldin Seminar on High Energy Physics Problems, Dubna, 25–30 September 2006*. Vol. II. 2008. Pp. 322–327.
5. Kurilkin A. K. et al. The angular distributions of the vector and tensor analyzing powers in the  $dd \rightarrow {}^3\text{He}p$  reaction at 200 MeV // XII Advanced Research Workshop on High Energy Spin Physics (DSPIN-07): Proc. of the XII Advanced Research Workshop on High Energy Spin Physics (DSPIN-07), Dubna, 3–7 September 2007. 2008. Pp. 301–304.
6. Kurilkin A. K. et al. Analyzing powers  $A_{yy}$ ,  $A_{xx}$ ,  $A_{xz}$  and  $A_y$  in the  $dd \rightarrow {}^3\text{He}p$  and  $dd \rightarrow {}^3\text{He}n$  reactions at  $E_d = 200$  and 270 MeV. // *Relativistic Nuclear Physics and Quantum Chromodynamics: Proc. of the XIX Intern. Baldin Seminar on High Energy Physics Problems, Dubna, 25–30 September 2008*. Vol. II. 2008. Pp. 40–45.
7. Kurilkin A. K. et al. Study of light nuclei spin structure from  $p(d,p)d$ ,  ${}^3\text{He}(d,p){}^4\text{He}$  and  $d(d,p){}^3\text{H}$  reactions. // XIII Advanced Research Workshop on High Energy Spin Physics (DSPIN-09): Proc. of the XIII Advanced Research Workshop on High Energy Spin Physics (DSPIN-09), Dubna, 1–5 September 2009. 2009. Pp. 235–238.

8. *Kurilkin A. K. et al.* The angular dependences of the tensor and vector analyzing powers in the  $dd \rightarrow {}^3H p$  reaction at 200 MeV. // Одиннадцатая научная конференция молодых учёных и специалистов ОИЯИ : Материалы XI-ой конференции молодых ученых и специалистов ОИЯИ, 5-9 февраля, 2007г. 2007.
9. *Kurilkin A. K. et al.* The set of polarization observables for the  $dd \rightarrow {}^3H p$  reaction at 200 MeV. // Двенадцатая научная конференция молодых учёных и специалистов ОИЯИ : Материалы XII-ой конференции молодых ученых и специалистов ОИЯИ, 4-8 февраля, 2008г. 2008.
10. *Курилькин, А. К. и др.* Поляризационные наблюдаемые реакций  $dd \rightarrow {}^3H p$  и  $dd \rightarrow {}^3H p$  при промежуточных энергиях. // Тринадцатая научная конференция молодых учёных и специалистов ОИЯИ : Материалы XIII-ой конференции молодых ученых и специалистов ОИЯИ, 16-21 февраля, 2009г. 2009.
11. *Янек М., ..., Курилькин А. К. et al.* Статус исследования спиновой структуры  $d$ ,  ${}^3H$ , и  ${}^3He$  в ЛВЭ с использованием поляризованных и неполяризованных дейтронных пучков // *Физика Атомного Ядра*. 2008. Vol. 71. Pp. 1495–1501.
12. *Ladygin V. P., ..., Kurilkin A. K. et al.* Recent results from JINR-VBLHE on spin effects in few-nucleon systems. // *Czech.J.Phys.* 2007. Vol. 56. Pp. F135–F150.
13. *Janek M., ..., Kurilkin A. K. et al.* Status of light nuclei spin structure investigation at VBLHE // *ISBN 5-9530-0131-2*. 2007. P. 119.
14. *Ladygin V. P., ..., Kurilkin A. K. et al.* Recent results from VBLHE-JINR on few-nucleon systems structure // *Relativistic Nuclear Physics and Quantum Chromodynamics: Proc. of the XVIII Intern. Baldin Seminar on High Energy Physics Problems, Dubna, 25–30 September 2006*. Vol. II. 2008. Pp. 339–352.
15. *Ladygin V. P., ..., Kurilkin A. K. et al.* Analyzing powers in the  $dd \rightarrow {}^3He n({}^3H p)$  reactions at intermediate energies // *AIP Conf. Proc.* 2008. Vol. 1011. P. 235.
16. *Ladygin V. P., ..., Kurilkin A. K. et al.* Study of 2N and 3N short-range correlations at Nuclotron-M // *Relativistic Nuclear Physics and Quantum Chromodynamics: Proc. of the XVIII Intern. Baldin Seminar on High Energy Physics Problems, Dubna, 25–30 September 2008*. Vol. II. 2008. Pp. 67–72.