

**ОБЪЕДИНЕННЫЙ ИНСТИТУТ ЯДЕРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ**

1-2011-125

На правах рукописи  
УДК 539.171.917

**КИСЕЛЕВ**

Антон Сергеевич

**ИЗУЧЕНИЕ АНАЛИЗИРУЮЩИХ СПОСОБНОСТЕЙ  
РЕАКЦИЙ  $\vec{d}d \rightarrow pX$  И  $\vec{d}^{12}C \rightarrow pX$   
ПРИ ПРОМЕЖУТОЧНЫХ ЭНЕРГИЯХ**

Специальность: 01.04.16 - физика атомного ядра и  
элементарных частиц

Автореферат диссертации на соискание учёной степени  
кандидата физико-математических наук

Дубна 2011

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

кандидат физико-математических наук

Александр Альбертович  
ЕРШОВ

Ведущее научно-исследовательское учреждение: Институт ядерных исследований РАН (г. Москва).

Защита состоится "\_\_\_" \_\_\_\_\_ 2011 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 "\_\_\_" \_\_\_\_\_ 2011 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 для изучения нуклон-нуклонного взаимодействия при промежуточных и высоких энергиях, а так же структуры легких ядер на малых межнуклонных расстояниях. Спиновая структура легких ядер широко исследовалась в течение последних десятилетий с использованием как электромагнитных, так и адронных пробников. Одной из основных задач этих исследований при промежуточных и высоких энергиях являлось получение информации о высокоимпульсных компонентах легких ядер с целью изучения проявления релятивистских эффектов и ненуклонных степеней свободы. Реакции  $dp \rightarrow pd$ ,  $\bar{d}d \rightarrow p\ ^3H$ ,  $\bar{d}\ ^3He \rightarrow p\ ^4He$  являются простейшими процессами с большой передачей импульса и поэтому могут использоваться как инструмент для изучения структуры легких ядер. В рамках модели однонуклонного обмена (ОНО), поляризационные характеристики данных реакций чувствительны к спиновой структуре легких ядер. Изучение реакции  $\bar{d}A \rightarrow pX$  вблизи порога развала дейтрона позволяет, с одной стороны, достигнуть минимальных межнуклонных расстояний в дейтроне при данной начальной энергии, и, с другой стороны, исследовать взаимодействие в конечном состоянии для системы  $X$ . Использование в качестве мишени ядра  $A$  позволяет достигнуть меньших межнуклонных расстояний, чем в случае взаимодействия дейтронов с водородом. Поляризационные наблюдаемые данной реакции, в частности, тензорная анализирующая способность  $T_{20}$ , чувствительна к отношению  $D/S$  волн в дейтроне. На настоящий момент не существует теории, которая может объяснить поляризационные наблюдаемые для реакции дейтрон-протонного рассеяния назад и инклюзивного развала дейтрона одновременно.

Реакции передачи одного или нескольких нуклонов используются в качестве инструмента для получения астрофизических  $S$ -факторов. Реакции с передачей одного нуклона, широко использовались для изучения структуры

стабильных ядер. Анализ таких реакций определяет передачу углового момента, которая дает информацию о спине и четности конечного состояния. Чувствительность сечения для однонуклонных компонент позволяет получить спектроскопические факторы. Эти наблюдаемые могут использоваться для вычисления заселенности одночастичных орбиталей в ядрах.

Таким образом, получение новых поляризационных данных для реакций  $\bar{d}d \rightarrow pX$  и  $\bar{d}^{12}\text{C} \rightarrow p^{13}\text{C}$ , чувствительных к спиновой структуре дейтрона и углерода, представляют огромную важность.

**Целью работы** являлось измерение энергетической зависимости тензорной анализирующей способности  $T_{20}$  для реакций  $\bar{d}d \rightarrow pX$  и  $\bar{d}^{12}\text{C} \rightarrow p^{13}\text{C}$  при энергиях  $T_d = 140, 200$  и  $270$  МэВ и угле рассеяния  $0^\circ$ , а также измерение угловой зависимости векторной  $A_y$  и тензорных  $A_{yy}$ ,  $A_{xx}$  и  $A_{xz}$  анализирующих способностей реакции  $\bar{d}^{12}\text{C} \rightarrow p^{13}\text{C}$  при  $T_d = 270$  МэВ и углах от  $6$  до  $18$  градусов в лабораторной системе при энергии  $270$ .

#### **Научная новизна работы.**

1. Впервые получены высокоточные данные по тензорной анализирующей способности  $T_{20}$  реакций  $\bar{d}d \rightarrow p^3\text{H}$  и  $\bar{d}d \rightarrow pX$  при начальных энергиях дейтрона  $T_d = 140, 200$  и  $270$  МэВ и угле рассеяния  $0^\circ$ .

2. Впервые получены данные по тензорной анализирующей способности  $T_{20}$  реакции  $\bar{d}^{12}\text{C} \rightarrow p^{13}\text{C}^*$  при начальных энергиях дейтрона  $T_d = 140, 200$  и  $270$  МэВ и угле рассеяния  $0^\circ$ . Тензорная анализирующая способность  $T_{20}$  принимает отрицательные значения как для каналов с возбуждением ядерных уровней  $^{13}\text{C}$ , так и для области континуума.

3. Впервые получены данные по векторной  $A_y$  и тензорным  $A_{yy}$ ,  $A_{xx}$  и  $A_{xz}$  анализирующим способностям реакции  $\bar{d}^{12}\text{C} \rightarrow p^{13}\text{C}^*$  при  $T_d = 270$  МэВ и углах детектирования протона от  $6$  до  $18$  градусов в лабораторной системе.

### **Научно-практическая значимость работы.**

Полученные результаты по анализирующим способностям реакций  $\bar{d} d \rightarrow p X$  и  $\bar{d} {}^{12}\text{C} \rightarrow p {}^{13}\text{C}$  при  $T_d = 140, 200$  и  $270$  МэВ расширяют экспериментальный материал и дают новую информацию, необходимую для развития теоретических моделей описания трехнуклонных систем и дейтрона на малых межнуклонных расстояниях, а также понимания механизмов рассмотренных реакций.

### **Апробация работы и публикации.**

Основные результаты диссертации опубликованы в журналах "The European Physical Journal Special Topics", "International Journal of Modern Physics A", "Ядерная физика". Результаты докладывались на ряде международных конференций и семинаров, в том числе: на VII-ом и IX-ом рабочих совещаниях по релятивистской ядерной физике "Relativistic Nuclear Physics: from Hundreds of MeV to TeV" (Модра-Гармония, Словакия, 2006; Стара Лесна, Словакия, 2009); на международной конференции "Симметрии и спин" SPIN-Praha-2007 (Прага, Чехия, 2007); на XVIII-ом международном симпозиуме по проблемам физики высоких энергий ISHEPP (Дубна, 2006); на международном симпозиуме FM50 (Токио, Япония, 2007); на XIX-ой международной конференции по малочастичным системам FB19 (Бонн, Германия, 2009); на XII-ом и XIII-ом международных конференциях по спиновой физике "Workshop on High Energy Spin Physics" (Дубна, 2007, 2009); на IX-ой, X-ой, XI-ой, и XII-ой научных конференциях молодых ученых и специалистов ОИЯИ (Дубна, 2005-2008 гг.). Основные результаты диссертационной работы опубликованы в работах [1–18].

### **Объем и структура работы.**

Диссертация состоит из введения, четырех глав и заключения. Полный объем диссертации составляет 94 страницы, включая 18 таблиц, 36 рисунков и список литературы из 109 наименований.

## Автор защищает

1. Процедуру и результаты измерения тензорной анализирующей способности  $T_{20}$  реакций  $\vec{d} d \rightarrow p \text{ } ^3\text{H}$  и  $\vec{d} d \rightarrow p X$  при начальных энергиях дейтрона  $T_d = 140, 200$  и  $270$  МэВ и угле рассеяния  $0^\circ$ .

2. Процедуру и результаты измерения тензорной анализирующей способности  $T_{20}$  реакции  $\vec{d} \text{ } ^{12}\text{C} \rightarrow p \text{ } ^{13}\text{C}^*$  при начальных энергиях дейтрона  $T_d = 140, 200$  и  $270$  МэВ и угле рассеяния  $0^\circ$ .

3. Процедуру и результаты измерения векторной  $A_y$  и тензорным  $A_{yy}$ ,  $A_{xx}$  и  $A_{xz}$  анализирующим способностям реакции  $\vec{d} \text{ } ^{12}\text{C} \rightarrow p \text{ } ^{13}\text{C}^*$  при  $T_d = 270$  МэВ и углах детектирования протона от 6 до 18 градусов в лабораторной системе.

## Содержание диссертации

**Введение** посвящено обзору экспериментальных и теоретических работ по анализу нуклон-дейтронного и дейтрон-ядерного взаимодействий. В нем обоснована актуальность диссертации, её научная новизна и практическая значимость, приведено краткое содержание работы по главам.

**В первой главе** приведена общая схема для измерения поляризационных наблюдаемых на ускорительном комплексе RIKEN, описаны использованное экспериментальное оборудование, организация электроники считывания 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 реакций  $\vec{d} d \rightarrow p X$  и  $\vec{d} \text{ } ^{12}\text{C} \rightarrow p X$  при энергиях 140, 200 и 270 МэВ на ускорительном комплексе RARF (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.

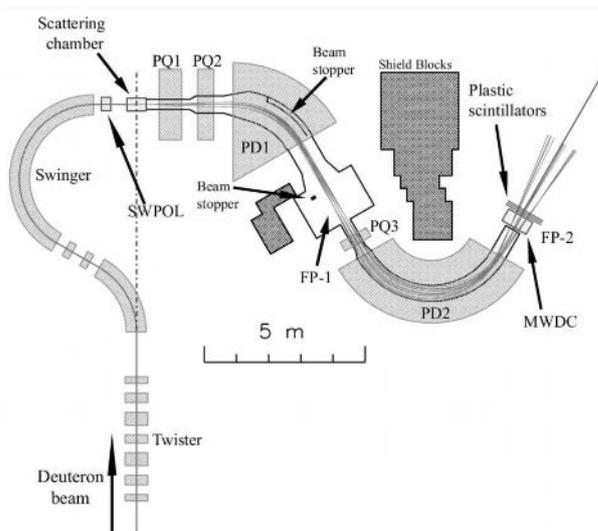


Рис. 1. Схема спектрометра SMART, SWPOL - поляриметр, PQ1, PQ2 и PQ3 - квадрупольные магниты, PD1 и PD2 - дипольные магниты, FP1 и FP2 - первая и вторая фокальная плоскость, MWDC - многопроволочная дрейфовая камера.

Во втором разделе описывается источник поляризованных ионов. В эксперименте 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 максимально возможных.

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  $dp$  рассеянии под углом, где величины тензорной и векторной анализирующих

способностей имеют большие значения. Поляризация дейтронного пучка вычислялась методом усреднения значений из SWPOL и Droom поляриметров.

Перед усреднением поляризация, измеренная Droom поляриметром, была скорректирована на релятивистское вращение спина магнитными элементами канала.

В четвертом 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.

В пятом 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. 1.

Требуемый угол падения пучка поляризованных дейтронов на мишень настраивался при помощи вращения SWINGER магнита вокруг оси пучка. Рассеянные частицы проходили через квадрупольные и дипольные магниты, расположенные в Q-Q-D-Q-D конфигурации. Рассеянные протоны регистрировались в угловом диапазоне от  $0^\circ$  до  $\sim 20^\circ$  в лабораторной системе соответственно. Ограничения на углы вылета частиц были обусловлены магнитной жесткостью оптической системы.

В пятом разделе первой главы описана процедура детектирования частиц. Для определения траекторий рассеянных частиц использовалась информация многопроволочных дрейфовых камер.

В шестом разделе кратко описывается электроника и схема триггера.

**Во второй главе** описана процедура выделения полезных событий и получения анализирующих способностей реакций  $\vec{d}d \rightarrow p\ ^3H$  и  $\vec{d}d \rightarrow pX$  при  $T_d = 140, 200$  и  $270$  МэВ и угле рассеяния  $0^\circ$ .

Первый раздел посвящен идентификации протонов, которая была основана на анализе энергетических потерь в пластических сцинтилляционных

детекторах, а также на информации о времени пролета частицы между мишенью и точкой регистрации.

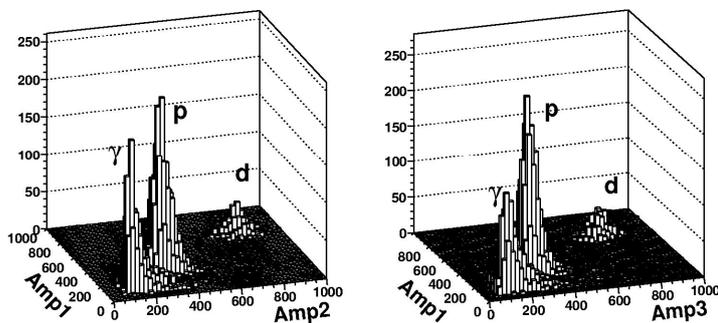


Рис. 2. Корреляция амплитуд сигналов в двух сцинтилляционных счетчиках AMP1 и AMP2 и AMP1 и AMP3.

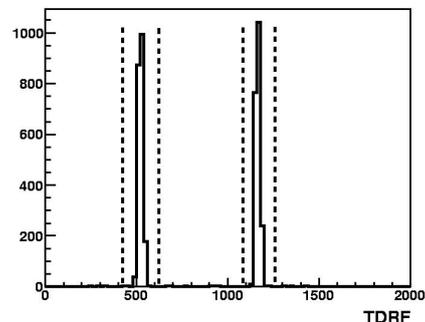


Рис. 3. Время-пролетный спектр для случая регистрации протонов

Вторичная частица (протон) 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. 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 разного сорта с одинаковым импульсом. На рис. 2 показаны корреляции амплитуд AMP1-AMP2 и AMP1-AMP3 для случая регистрации протона при энергии 270 МэВ. Так как система сбора записывала данные из двух банчей ускорителя, то полезные события накапливались в двух пиках. Выделение протонов по времени пролета показано на рис. 3.

Во втором разделе описана процедура восстановления углов рассеяния. Угол падения пучка изменялся вращением SWINGER магнита. Угол вылета частиц восстанавливался по информации из дрейфовых камер и параметрам оптической матрицы спектрометра SMART. Каждая настройка угла SWINGER магнита соответствует определенному интервалу углов вылета частиц. При

угле поворота SWINGER магнита на  $0^\circ$  выделялись события удовлетворяющие условию  $\theta_{cm} < 1.4^\circ$ .

В третьем разделе описана процедура получения полезных событий для реакций  $\bar{d}d \rightarrow p\ ^3H$  и  $\bar{d}d \rightarrow pX$ . Эффект на дейтерии был получен путем  $CD_2 - C$  вычитания энергетических спектров для каждой моды поляризации ИПИ. Для этой цели строились спектры по энергии возбуждения  $E_x$  для зарегистрированных протонов на  $CD_2$  и  $C$  мишенях. Полученные таким образом спектры по энергии возбуждения для  $CD_2$  и  $C$  мишеней в случае регистрации протона приведены на рис. 5. Открытые и заштрихованные гистограммы слева означают спектры, полученные на  $CD_2$  и углероде соответственно.

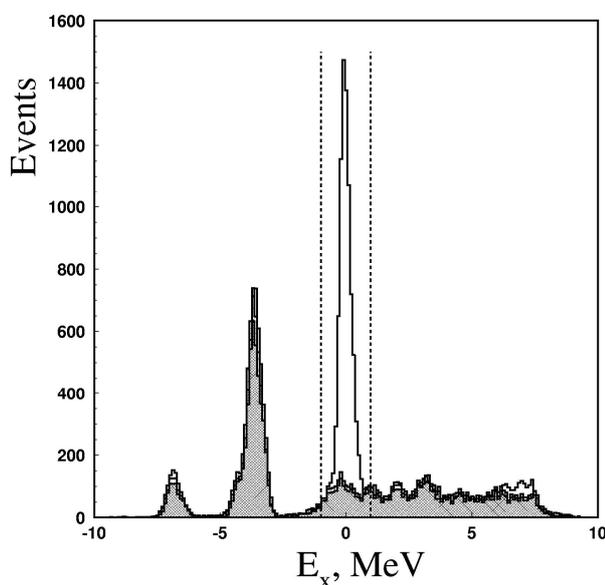


Рис. 4. Энергетические спектры протонов, полученные на дейтерированном полиэтилене( $CD_2$ ) и углероде( $C$ ) при угле рассеяния  $0^\circ$  для энергии 200 МэВ. Открытая гистограмма соответствует эффекту на  $CD_2$  мишени, пик при  $E_x=0$  МэВ соответствует бинарной реакции  $\bar{d}d \rightarrow p\ ^3H$ , область в районе  $E_x=7$  МэВ представляет собой реакции развала дейтрона  $\bar{d}d \rightarrow pX$ ; штрихованная гистограмма – эффекту на углероде.

В четвертом разделе описано получение анализирующих способностей для реакций  $\bar{d}d \rightarrow p\ ^3H$  и  $\bar{d}d \rightarrow pX$ , которые были получены из асимметрии полезных событий для разных мод ИПИ и поляризации дейтронного пучка.

В третьей главе описана процедура анализа экспериментальных данных и выделения полезных событий для реакций  $\bar{d} \ ^{12}\text{C} \rightarrow p \ ^{13}\text{C}$  при энергиях  $T_d = 140, 200$  и  $270$  МэВ и угле рассеяния  $0^\circ$ , а так же при энергии  $T_d = 270$  МэВ и в диапазоне угла рассеяния протона от  $4^\circ$  до  $18^\circ$  в лабораторной системе. Первый раздел посвящен отбору полезных событий для реакций  $\bar{d} \ ^{12}\text{C} \rightarrow p \ ^{13}\text{C}$ .

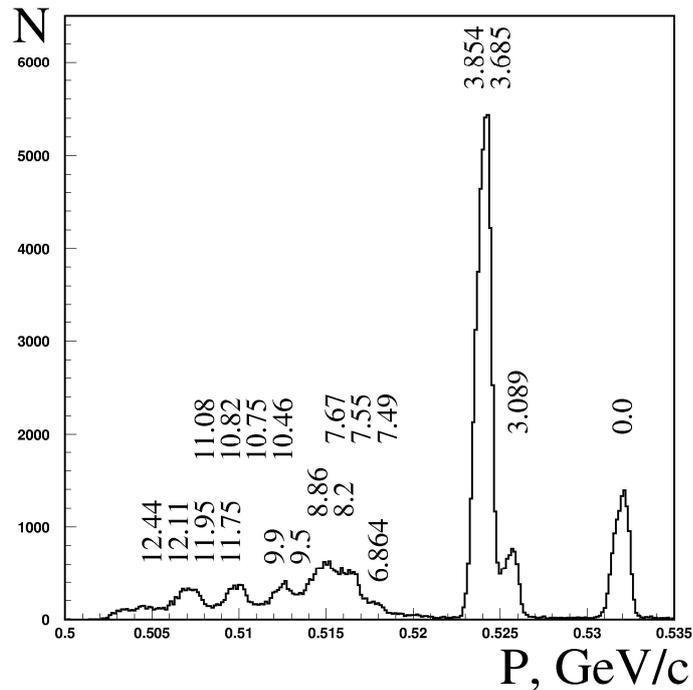


Рис. 5. Импульсный спектр протонов для реакции  $\bar{d} \ ^{12}\text{C} \rightarrow p \ ^{13}\text{C}^*$  при энергии 140 МэВ и угле рассеяния  $0^\circ$ . Пики соответствуют уровням ядерного возбуждения  $^{13}\text{C}$ .

Также как и для реакций  $\bar{d} d \rightarrow p \ ^3\text{H}$  и  $\bar{d} d \rightarrow p X$ , идентификация вторичных частиц определялась по анализу энергетических потерь в пластических сцинтилляционных детекторах, информации о времени пролета между мишенью и точкой регистрации. С одной стороны, частица должна была регистрироваться всеми тремя сцинтилляционными детекторами и амплитуды сигналов AMP1, AMP2 и AMP3 должны быть скоррелированы. С другой стороны, условием являлось ограничение на время пролета. Импульс и угол вылета частиц восстанавливались по информации из многопроводочных дрейфовых камер и параметров оптической матрицы спектрометра SMART.

Во втором разделе описано определение уровней ядерного возбуждения углерода для реакций  $\vec{d} \ ^{12}\text{C} \rightarrow p \ ^{13}\text{C}^*$ , для чего использовались импульсные спектры. Экспериментальные данные сравнивались с расчетами полученными из кинематики (см. рис. 5).

В третьем разделе описано получение анализирующих способностей для реакции  $\vec{d} \ ^{12}\text{C} \rightarrow p \ ^{13}\text{C}^*$ .

В первом пункте третьего раздела описано получение анализирующей способности  $T_{20}$  для реакции  $\vec{d} \ ^{12}\text{C} \rightarrow p \ ^{13}\text{C}^*$  при  $T_d = 140, 200$  и  $270$  МэВ и угле рассеяния  $0^\circ$ .

Во втором пункте третьего раздела описано получение анализирующих способностей для реакции  $\vec{d} \ ^{12}\text{C} \rightarrow p \ ^{13}\text{C}^*$  при  $T_d = 270$  МэВ и угловом диапазоне рассеяния протона от  $4^\circ$  до  $18^\circ$  в лабораторной системе.

**В четвертой главе** представлены результаты по энергетической зависимости тензорной анализирующей способности  $T_{20}$  для реакций  $\vec{d} \ d \rightarrow p \ X$  и  $\vec{d} \ ^{12}\text{C} \rightarrow p \ ^{13}\text{C}$  при  $T_d = 140, 200$  и  $270$  МэВ и угле рассеяния  $0^\circ$ , а также по угловой зависимости векторной  $A_y$  и тензорных  $A_{yy}$ ,  $A_{xx}$  и  $A_{xz}$  анализирующих способностей реакции  $\vec{d} \ ^{12}\text{C} \rightarrow p \ ^{13}\text{C}$  при  $T_d = 270$  МэВ. Полученные поляризационные наблюдаемые сравниваются с предсказаниями модели ОНО и результатами, полученными при более низких энергиях.

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

Во втором разделе представлены результаты по анализирующим способностям реакций  $\vec{d} \ d \rightarrow p \ ^3\text{H}$  и  $\vec{d} \ d \rightarrow p \ X$  при  $T_d = 140, 200$  и  $270$  МэВ и угле рассеяния  $0^\circ$ , которые сравниваются с расчетами, основанными на механизме однонуклонного обмена.

Результаты по тензорной анализирующей способности  $T_{20}$  для реакции  $\bar{d}d \rightarrow {}^3H p$  с регистрацией протона под углом  $180^\circ$  в с.ц.м представлены на рис. 6. сплошными треугольниками. Ошибки являются среднеквадратичными от систематических и статистических ошибок. Систематические ошибки обусловлены точностью определения поляризации пучка. Сплошные и пунктирные линии – результаты расчетов, выполненных в рамках модели ОНО с использованием волновых функций дейтрона и трехчастичного связанного состояния, которые получены для CD-Бонн и парижского нуклон-нуклонных потенциалов соответственно. Знак  $T_{20}$  отрицателен, что свидетельствует о чувствительности к отношению D/S волн в дейтроне. На этом же рисунке показаны данные, полученные для реакций  $\bar{d}d \rightarrow {}^3H p$  и  $\bar{d}d \rightarrow {}^3He n$  с регистрацией  ${}^3H$  и  ${}^3He$  (для  $0^\circ$ ). Положительный знак  $T_{20}$  соответствует знаку отношения D/S волн в трехчастичной связанной системе.

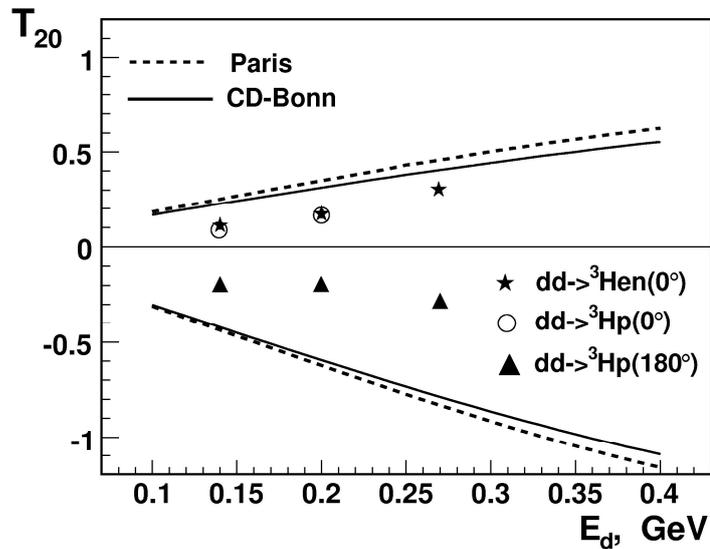


Рис 6. Экспериментальные результаты по тензорной анализирующей способности  $T_{20}$  реакций  $\bar{d}d \rightarrow {}^3H p$  (треугольные символы: под углом  $180^\circ$  в с.ц.м, открытые символы – под углом  $0^\circ$ ) и  $\bar{d}d \rightarrow {}^3He n$  (символы-звезды) при энергиях дейтрона  $E_d = 140, 200$  и  $270$  МэВ. Сплошные и пунктирные линии – результаты расчетов, выполненных в рамках модели ОНО, которые получены для CD-Бонн и парижского нуклон-нуклонных потенциалов соответственно.

Результаты для тензорной анализирующей способности  $T_{20}$  для бинарной реакции и реакций развала дейтрона в  $dd$ - взаимодействии представлены на рис. 7. В рамках достигнутой экспериментальной точности значения  $T_{20}$  не отличаются для области, где существенен вклад каналов  $\bar{d}d \rightarrow pdn$  и  $\bar{d}d \rightarrow ppnn$ .

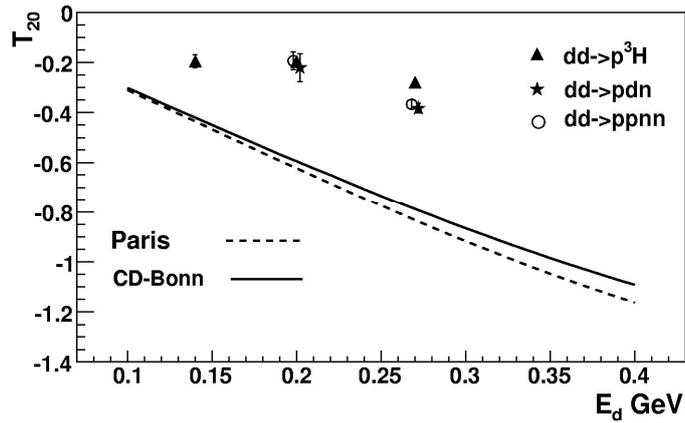


Рис. 7. Экспериментальные результаты для тензорной анализирующей способности  $T_{20}$  реакций  $\bar{d}d \rightarrow p^3H$  (треугольные символы) и  $\bar{d}d \rightarrow pX$  (открытые символы и звезды) при энергиях дейтрона  $T_d = 140, 200$  и  $270$  МэВ и угле рассеяния  $0^\circ$ . Сплошные и пунктирные линии – результаты расчетов, выполненных в рамках модели ОНО, которые получены для CD-Бонн и парижского нуклон-нуклонных потенциалов соответственно.

В третьем разделе представлены результаты по анализирующей способности  $T_{20}$  для  $\bar{d}^{12}C \rightarrow p^{13}C$  при  $T_d = 140, 200$  и  $270$  МэВ и угле рассеяния  $0^\circ$ . На рис. 8 представлены экспериментальные данные тензорной анализирующей способности  $T_{20}$  при  $T_d = 140, 200$  и  $270$  МэВ и угле рассеяния  $0^\circ$  для  $\bar{d}^{12}C \rightarrow p^{13}C(g.s.)$  - круглые символы, для  $\bar{d}^{12}C \rightarrow p^{13}C^*(3.089 \text{ МэВ})$  - квадратные символы, для  $\bar{d}^{12}C \rightarrow p^{13}C^*(3.6845, 3.854 \text{ МэВ})$  - треугольные символы. Величины  $T_{20}$  уменьшаются с увеличением начальной энергиях дейтрона. Тензорная анализирующая способность  $T_{20}$  совпадает для каналов  $\bar{d}^{12}C \rightarrow p^{13}C^*(3.089 \text{ МэВ})$  и  $\bar{d}^{12}C \rightarrow p^{13}C^*(3.6845, 3.854 \text{ МэВ})$ . Знак  $T_{20}$  для каналов с образованием  $^{13}C(g.s.)$  и  $^{13}C^*$  отрицателен, что говорит о чувствительности к

спиновой структуре дейтрона. Это может быть обусловлено тем, что кинематика данных реакций близка к кинематике  $dp$ - упругого рассеяния назад.

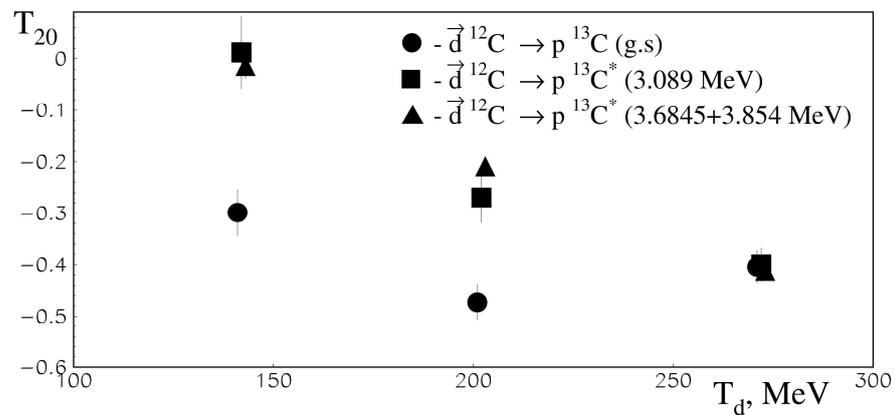


Рис. 8. Экспериментальные результаты для тензорной анализирующей способности  $T_{20}$  реакции  $\vec{d}^{12}\text{C} \rightarrow p^{13}\text{C}(g.s.)$  (круглые символы) и реакции  $\vec{d}^{12}\text{C} \rightarrow p^{13}\text{C}^*$  (квадратные символы – первый уровень ядерного возбуждения  $^{13}\text{C}$ , треугольные – сумма второго и третьего уровня соответственно) при энергиях дейтрона  $T_d = 140, 200$  и  $270$  МэВ и угле рассеяния  $0^\circ$ .

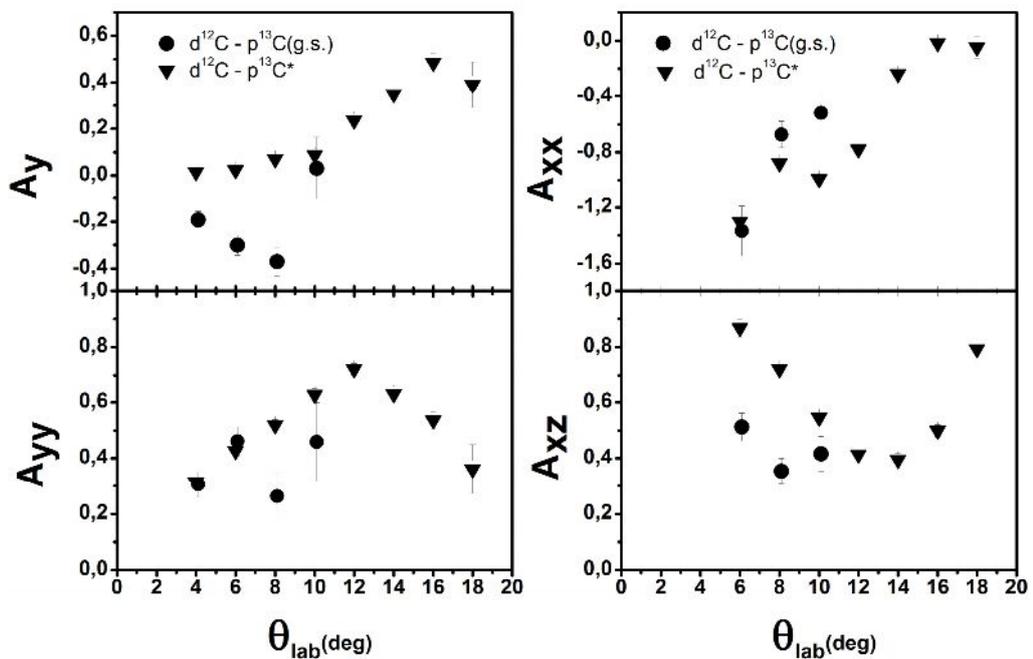


Рис. 9. Угловые зависимости векторной  $A_y$  и тензорных  $A_{yy}$ ,  $A_{xx}$ ,  $A_{xz}$  анализирующих способностей реакций  $\vec{d}^{12}\text{C} \rightarrow p^{13}\text{C}^*(g.s.)$  (круглые символы) и  $\vec{d}^{12}\text{C} \rightarrow p^{13}\text{C}^*$  (треугольные символы) при энергии 270 МэВ.

В четвертом разделе представлены результаты угловых зависимостей анализирующих способностей реакций  $\bar{d}^{12}\text{C} \rightarrow p^{13}\text{C}^*$  при  $T_d = 270$  МэВ. Данные по угловой зависимости векторной  $A_y$  и тензорных  $A_{yy}$ ,  $A_{xx}$  и  $A_{xz}$  анализирующих способностей реакций  $\bar{d}^{12}\text{C} \rightarrow p^{13}\text{C}(g.s.)$  и  $\bar{d}^{12}\text{C} \rightarrow p^{13}\text{C}^*$  при энергии 270 МэВ и углах детектирования протона от  $6^\circ$  до  $18^\circ$  в лабораторной системе показаны на рис. 9. Круглые символы соответствуют реакции  $\bar{d}^{12}\text{C} \rightarrow p^{13}\text{C}(g.s.)$ , а треугольные символы реакции  $\bar{d}^{12}\text{C} \rightarrow p^{13}\text{C}^*$  (3.089, 3.6845, 3.854 МэВ). Из рисунков видно, что при малых углах векторная  $A_y$  анализирующая способность для  $\bar{d}^{12}\text{C} \rightarrow p^{13}\text{C}(g.s.)$  - имеет положительный знак, а для  $\bar{d}^{12}\text{C} \rightarrow p^{13}\text{C}^*$  - отрицательный. В то время как тензорная  $A_{xx}$  способность для этих реакций – отрицательна,  $A_{yy}$  и  $A_{xz}$  – положительны. На рис. 10 представлено сравнение данных по анализирующим способностям  $A_y$ ,  $A_{yy}$ ,  $A_{xx}$  и  $A_{xz}$  для реакции  $\bar{d}^{12}\text{C} \rightarrow p^{13}\text{C}(g.s.)$  и  $d p \rightarrow p d$  полученные при энергии 270 МэВ в зависимости угла рассеяния в с.ц.м. Так как реакция  $\bar{d}^{12}\text{C} \rightarrow p^{13}\text{C}(g.s.)$  изучалась в кинематике близкой к кинематике  $dp$ -упругого рассеяния, то сравнение анализирующих способностей может дать информацию о механизме реакции и о чувствительности к структуре ядер  $^{12}\text{C}$  и  $^{13}\text{C}$ . Знак векторной анализирующей способности  $A_y$  для двух реакций – противоположен, что может говорить о различии спин-орбитального взаимодействия для случая  $dp$ - и  $d^{12}\text{C}$ - взаимодействий. Тензорная анализирующая способность  $A_{yy}$  ведет себя похожим образом для двух реакций. Она имеет положительную величину, что говорит о чувствительности к спиновой структуре дейтрона. Тензорная анализирующая способность  $A_{xx}$  для реакции  $\bar{d}^{12}\text{C} \rightarrow p^{13}\text{C}(g.s.)$  имеет большие отрицательные величины. С другой стороны  $A_{xx}(180^\circ)$  – положительна. Таким образом  $A_{xx}$  реакции  $\bar{d}^{12}\text{C} \rightarrow p^{13}\text{C}(g.s.)$  имеет гораздо более сильную угловую зависимость чем реакции  $dp$ -упругого рассеяния, что так же отражает чувствительность к структуре ядер  $^{12}\text{C}$  и  $^{13}\text{C}$ .

Знак тензорной анализирующей способности  $A_{xz}$  как для реакции  $\bar{d} \ ^{12}\text{C} \rightarrow p \ ^{13}\text{C}(g.s.)$ , так и для реакции  $d p \rightarrow p d$  - положителен.

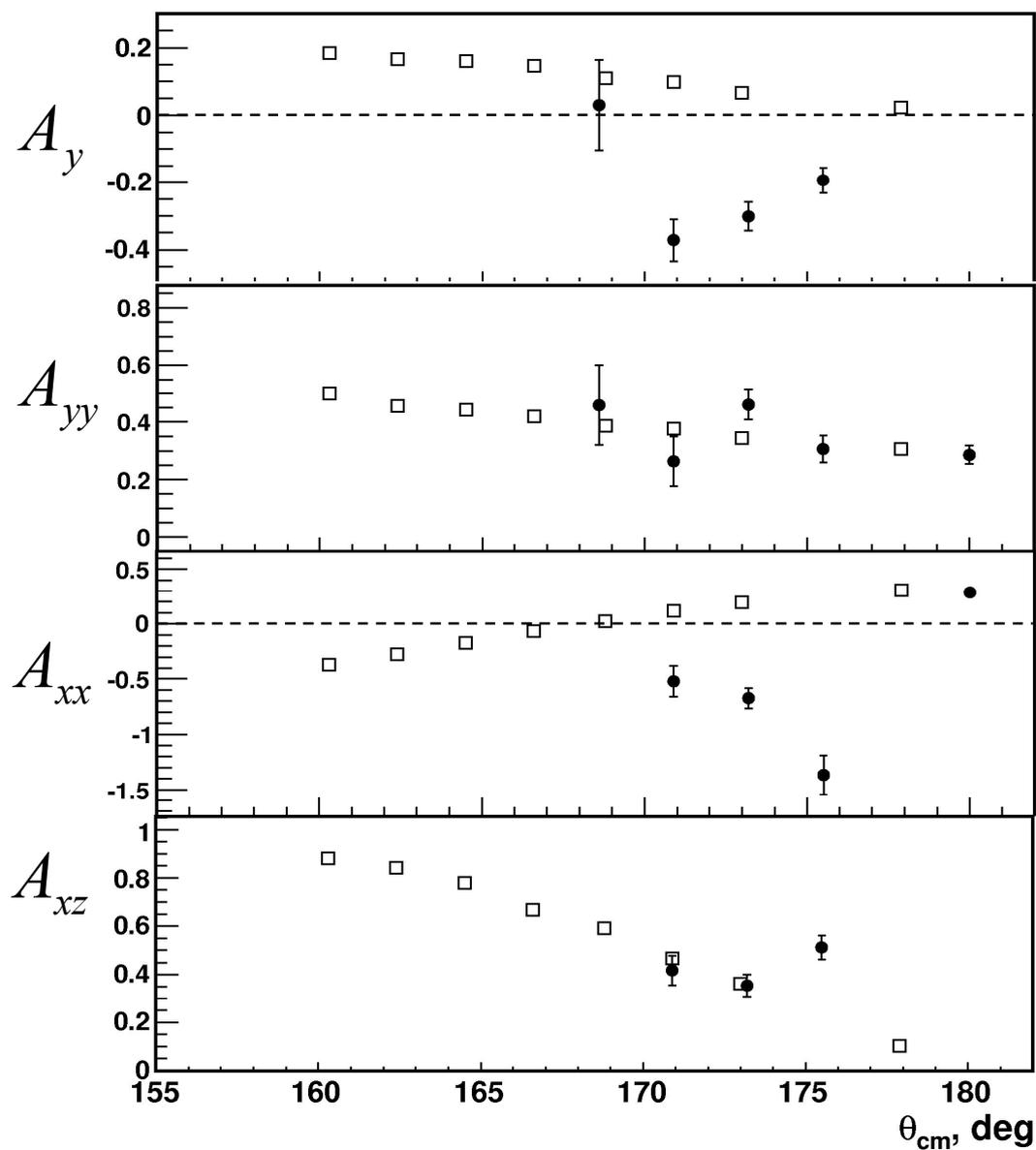


Рис. 10. Угловая зависимость анализирующих способностей реакций  $\bar{d} \ ^{12}\text{C} \rightarrow p \ ^{13}\text{C}^*(g.s.)$  (круглые символы) и  $d p \rightarrow p d$  (открытые символы) при энергии 270 МэВ.

**В заключении** сформулированы основные выводы диссертации:

1. Впервые получены высокоточные данные по тензорной анализирующей способности  $T_{20}$  реакций  $\vec{d}d \rightarrow p\ ^3H$  и  $\vec{d}d \rightarrow pX$  при начальных энергиях дейтрона  $T_d = 140, 200$  и  $270$  МэВ и угле рассеяния  $0^\circ$ . Экспериментальные данные по  $T_{20}$  свидетельствуют о ее чувствительности к спиновой структуре дейтрона. Отрицательный знак величины тензорной анализирующей способности  $T_{20}$  реакциях  $\vec{d}d \rightarrow p\ ^3H$  и  $\vec{d}d \rightarrow pX$  отражает знак отношения D/S компонент волновой функции дейтрона. Значения тензорной анализирующей способности  $T_{20}$  в реакции  $\vec{d}d \rightarrow pX$  совпадают в пределах достигнутой точности для области, где существенен вклад каналов  $\vec{d}d \rightarrow pdn$  и  $\vec{d}d \rightarrow p p n n$  соответственно.

2. Впервые получены данные по тензорной анализирующей способности  $T_{20}$  реакции  $\vec{d}\ ^{12}C \rightarrow p\ ^{13}C^*$  при начальных энергиях дейтрона  $T_d = 140, 200$  и  $270$  МэВ и угле рассеяния  $0^\circ$ . Тензорная анализирующая способность  $T_{20}$  принимает отрицательные значения как для каналов с возбуждением ядерных уровней  $^{13}C$ , так и для области континуума.

3. Впервые получены данные по векторной  $A_y$  и тензорным  $A_{yy}$ ,  $A_{xx}$  и  $A_{xz}$  анализирующим способностям реакции  $\vec{d}\ ^{12}C \rightarrow p\ ^{13}C^*$  при  $T_d = 270$  МэВ и углах детектирования протона от  $6$  до  $18$  градусов в лабораторной системе. Тензорные анализирующие способности  $A_{yy}$  и  $A_{xz}$  ведут себя похожим образом как для реакции  $\vec{d}\ ^{12}C \rightarrow p\ ^{13}C(g.s.)$ , так и для  $dp$ -упругого рассеяния. Они имеют положительную величину, что говорит о чувствительности к спиновой структуре дейтрона. Векторная  $A_y$  и тензорная  $A_{xx}$  анализирующие способности для реакции  $\vec{d}\ ^{12}C \rightarrow p\ ^{13}C(g.s.)$  имеют большие отрицательные величины. Экспериментальные данные по  $A_y$  и  $A_{xx}$  реакции  $\vec{d}\ ^{12}C \rightarrow p\ ^{13}C(g.s.)$  имеют гораздо более сильную угловую зависимость, чем для реакции  $dp$ -упругого рассеяния, что отражает чувствительность к структуре ядер  $^{12}C$  и  $^{13}C$ .

## Литература

- [1] *Kiselev A. S. et al.* Analyzing powers in the  $^{12}C(\vec{d}, p)^{13}C$  reaction at the energy  $T_d = 270$  MeV // *Eur. Phys. Journal Special Topics*. 2008. Vol. 162. Pp. 143-146.
- [2] *Kurilkin A. K., ... , Kiselev A. S. et al.* The angular distributions of the vector  $A_y$  and tensor  $A_{yy}, A_{xx}, A_{xz}$  analyzing powers in the  $dd \rightarrow {}^3He p$  and  $dd \rightarrow {}^3He n$  reactions at  $E_d = 200$  and 270 MeV // *Int. Journal of Modern Physics A*. 2009. Vol. 24. Pp. 526-529.
- [3] *Янек М., ... , Киселев А. С. и др.* Статус исследования спиновой структуры  $d, {}^3H, \text{ и } {}^3He$  в ЛВЭ с использованием поляризованных и неполяризованных дейтронных пучков // *Физика Атомного Ядра*. 2008. Т. 71. С. 1495-1501.
- [4] *Ladygin V. P., ... , Kiselev A. S. et al.* Short-range correlations studies in collisions of polarized nuclei at Nuclotron-M // *EPJ Web of Conferences*. 2010. P.04004.
- [5] *Ladygin V. P., ... , Kiselev A. S. et al.* Analyzing powers in the  $dd \rightarrow {}^3He n({}^3He p)$  reactions at intermediate energies // *AIP Conf. Proc.* 2008. Vol. 1011. P. 235.
- [6] *Janek M., ... , Kiselev A. S. et al.* Status of light nuclei spin structure investigation at VBLHE // *RNP: From Hundres of MeV to TeV*. 2007. Pp. 119-133.
- [7] *Kiselev A. S. et al.* Measurements of the  $A_{yy}, A_{xx}, A_{xz}$  and  $A_y$  analyzing powers in the  $^{12}C(\vec{d}, p)^{13}C^*$  reaction at the energy  $T_d = 270$  MeV // Proc. of the XIII Advanced Research Workshop on High Energy Spin Physics (DSPIN-09). 2010. Pp. 217-220.
- [8] *Kiselev A. S. et al.* The tensor analyzing power  $T_{20}$  for the  $^{12}C(\vec{d}, p)^{13}C$  and  $d(\vec{d}, p)X$  reactions at the energies  $T_d = 140, 200$  and 270 MeV and emission angle  $\Theta_{cm} = 0^\circ$  // *Relativistic Nuclear Physics and Quantum Chromodynamics: Proc. of the XVIII Intern. Baldin Seminar on High Energy Physics Problems, Dubna, 25-30 September 2006*. Vol. 2. 2008. Pp. 377-382.
- [9] *Kiselev A. S. et al.* Vector and tensor analyzing powers in the  $^{12}C(d, p)^{13}C^*$  reaction at energy  $T_d = 270$  MeV // Proc. of the XII Advanced Research Workshop on High Energy Spin Physics (DSPIN-07). 2008. Pp. 276-279.
- [10] *Киселев А. С. и др.* Взаимодействие поляризованных дейтронов с углеродом при энергии 270 МэВ // Девятая научная конференция молодых учёных и специалистов ОИЯИ : Материалы IX-ой конференции молодых ученых и специалистов ОИЯИ, 31 января - 6 февраля, 2005г, С. 299-302.

- [11] *Kiselev A. S. и др.* Тензорная анализирующая способность  $T_{20}$  в реакциях  $d^{12}C \rightarrow pX$  и  $dd \rightarrow pX$  при энергиях 140, 200 и 270 МэВ под нулевым углом // Десятая научная конференция молодых учёных и специалистов ОИЯИ : Материалы X-ой конференции молодых ученых и специалистов ОИЯИ, 6-10 февраля, 2006г, С. 230-233.
- [12] *Kiselev A. S. et al.* Measurements of the tensor analyzing power  $T_{20}$  for the  $^{12}C(d, p)^{13}C^*$  and  $d(d, p)X$  reactions at the energies  $T_d = 140, 200$  and  $270$  MeV and emission angle  $\theta_{cm} = 0$  // Одиннадцатая научная конференция молодых учёных и специалистов ОИЯИ: Материалы XI-ой конференции молодых ученых и специалистов ОИЯИ, 5-9 февраля, 2007г. 2007. С. 115-118.
- [13] *Kiselev A. S. et al.* The angular dependences of the vector and tensor analyzing powers in the  $^{12}C(d, p)^{13}C^*$  reaction at energy  $T_d = 270$  MeV // Двенадцатая научная конференция молодых учёных и специалистов ОИЯИ : Материалы XII-ой конференции молодых ученых и специалистов ОИЯИ, 4-8 февраля, 2008г. 2008. С. 203-206.
- [14] *Ladygin V. P., ... , Kiselev A. S. et al.* Recent results from JINR-VBLHE on spin effects in few-nucleon systems. // *Czech. J. Phys.* 2007. Vol. 56. Pp. F135-F150.
- [15] *Ladygin V. P., ... , Kiselev A. S. et al.* Study of  $2N$  and  $3N$  short-range correlations at Nuclotron-M // *Relativistic Nuclear Physics and Quantum Chromodynamics: Proc. of the XIX International Baldin Seminar On High Energy Physics Problems, Dubna, 29 September - 4 October, 2008.* Vol. 2. 2008. Pp. 67-73.
- [16] *Kurilkin A. K., ... , Kiselev A. S. et al.* Study of light nuclei spin structure from  $p(d, p)d$ ,  $^3He(d, p)^4He$  and  $d(d, p)^3H$  reactions // *Proc. of the XIII Advanced Research Workshop on High Energy Spin Physics (DSPIN-09).* 2010. Pp. 235-238.
- [17] *Kurilkin A. K., ... , Kiselev A. S. et al.* Analyzing powers  $A_{yy}$ ,  $A_{xx}$ ,  $A_{xz}$  and  $A_y$  in the  $dd \rightarrow ^3Hp$  and  $dd \rightarrow ^3Hen$  reactions at  $E_d = 200$  and  $270$  MeV // *Relativistic Nuclear Physics and Quantum Chromodynamics: Proc. of the XIX International Baldin Seminar On High Energy Physics Problems, Dubna, 29 September - 4 October, 2008.* Vol. 2. 2008. Pp. 40-45.
- [18] *Kurilkin A. K., ... , Kiselev A. S. et al.* Study of Light Nuclei Spin Structure from  $(d, p)$  and  $(d, ^3He)$  Reactions // *RNP: From Hundres of MeV to TeV.* 2010. Pp. 54-63.