

Я-603

45425

ОБЪЕДИНЕННЫЙ ИНСТИТУТ ЯДЕРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

1-2007-175

На правах рукописи
УДК 539.172.138.5

ЯНЕК
Мариан

Marian J.J.

ИЗУЧЕНИЕ УГЛОВОЙ ЗАВИСИМОСТИ
АНАЛИЗИРУЮЩИХ СПОСОБНОСТЕЙ
РЕАКЦИЙ $\bar{d}d \rightarrow {}^3\text{He}n$ И $\bar{d}d \rightarrow {}^3\text{H}p$
ПРИ ЭНЕРГИИ ДЕЙТРОНА 270 МэВ

Специальность: 01.04.16 — физика атомного ядра
и элементарных частиц

Автореферат диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Объединенный институт
Дубна 2007
ядерных исследований
БИБЛИОТЕКА

Работа выполнена в Лаборатории высоких энергий

Объединенного института ядерных исследований.

Общая характеристика работы.

Научный руководитель:

кандидат физико-математических наук

Владимир Петрович
ЛАДЫГИН

Официальные оппоненты:

доктор физико-математических наук,
профессор

Виктор Викторович
ГЛАГОЛЕВ

кандидат физико-математических наук

Александр Альбертович
ЕРШОВ

Ведущее научно-исследовательское учреждение: Физический институт
им. П. Н. Лебедева Российской академии наук (ФИАН, г. Москва)

Защита состоится "31" января 2008 г. в "13⁰" часов на заседании
диссертационного совета Д. 720.001.02 в Лаборатории высоких энергий
Объединенного института ядерных исследований, г. Дубна Московской
области.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ЛВЭ ОИЯИ.

Автореферат разослан "5" декабря 2007 года.

Ученый секретарь диссертационного совета

кандидат физико-математических наук,

старший научный сотрудник

 В.А.Арефьев

Актуальность темы.

Структура легких ядер интенсивно изучалась последние десятилетия с помощью электромагнитных и адронных пробников. В результате было накоплено немало экспериментального материала, в основном, по структуре дейтрона. Данных по структуре трехнуклонных систем (3H и 3He) мало и результаты неоднозначны. Еще меньше данных существует по их спиновой структуре.

Трехнуклонные системы (3He и 3H) имеют несколько интересных свойств. Они являются сильно связанными системами и их основные состояния можно описать с помощью Фаддеевских вычислений. Отличие от многонуклонных систем заключается в том, что спин в трехнуклонных системах создан всеми нуклонами, а в многонуклонных системах он обусловлен спинами нескольких валентных нуклонов.

Главной задачей исследований трехнуклонных систем при промежуточных энергиях является получение информации о высокоимпульсных компонентах ядер с целью изучения релятивистских эффектов и ненуклонных степеней свободы. Сравнивая предсказания модели с экспериментальными результатами можно проверить адекватность используемой модели нуклон-нуклонного взаимодействия.

Для подробного описания структуры и свойств трехнуклонных систем необходимо также учесть влияние разности масс кварков в изучаемой системе. Из разности масс кварков вытекают малые, но интересные эффекты. Одним из следствий является динамическое нарушение симметрии, приводящее к смешиванию легких мезонов и нарушению изоспиновой симметрии.

Целью работы является исследование векторной A_y и тензорных A_{yy} , A_{xx} и A_{zz} анализирующих способностей реакций $\bar{d}d \rightarrow ^3He n$ и $\bar{d}d \rightarrow ^3He p$ при энергии 270 МэВ для изучения спиновой структуры высоко-импульсной компоненты волновых функций 3He и 3H на малых межнуклонных расстояниях и поиск возможного нарушения зарядовой симметрии в зеркальных каналах $^3He n$ и $^3He p$. Для методических целей измерялись параметры выведенного дейтронного пучка на Нуклотроне, показана возможность использования реакции $\bar{d}p$ упругого рассеяния при энергии 270 МэВ для измерения поляризации дейтронного пучка

на станции внутренней мишени Нуклотрона.

Научная новизна работы.

Впервые получены высокоточные данные по векторной A_y и тензорным A_{yy} , A_{xx} и A_{zz} анализирующим способностям реакций $\vec{d}d \rightarrow {}^3\text{He}n$ и $\vec{d}d \rightarrow {}^3\text{H}p$ при энергии 270 МэВ в области, соответствующей малым межнуклонным расстояниям. Результаты по анализирующим способностям сравнены с предсказаниями модели на основе однонуклонного обмена (ОНО) с использованием Урбанской, Парижской и RSC волновых функций ${}^3\text{He}$. Описать экспериментальные данные по тензорным анализирующим способностям удалось только при малых углах и только качественно, в остальном интервале данная модель не воспроизводит данные. Для учета релятивизма данные сравнивались с теоретическими вычислениями, основанными на минимальной схеме релятивизации с использованием Урбанской волновой функции ${}^3\text{He}$. Хотя разница в релятивистском и нерелятивистском описании данных довольно большая, поведение данных описать не удалось.

Впервые выполнено сравнение данных по анализирующим способностям зеркальных реакций $\vec{d}d \rightarrow {}^3\text{He}n$ и $\vec{d}d \rightarrow {}^3\text{H}p$ при энергии 270 МэВ. Показано, что векторная и тензорные анализирующие способности зеркальных реакций совпадают в пределах достигнутой экспериментальной точности.

Впервые измерена векторная поляризация выведенного пучка дейтронов из Нуклотрона. Показана возможность использования реакции $\vec{d}p$ упругого рассеяния при энергии 270 МэВ для измерения поляризации дейтронного пучка на станции внутренней мишени Нуклотрона методом выделения событий по энергетическим потерям частиц в сцинтилляторах и разнице времен пролета. Получены результаты по измерению параметров дейтронного пучка на Нуклотроне. Показано, что для дальнейших поляризационных экспериментов необходимо улучшение параметров выведенного пучка дейтронов.

Научно-практическая значимость работы.

Полученные результаты по векторной A_y и тензорным A_{yy} , A_{xx} и A_{zz} анализирующим способностям реакций $\vec{d}d \rightarrow {}^3\text{He}n$ и $\vec{d}d \rightarrow {}^3\text{H}p$ при энергии 270 МэВ расширяют экспериментальный материал и дают новую информацию, необходимую для развития теоретических моделей описания трехнуклонных систем ${}^3\text{He}$ и ${}^3\text{H}$ на малых расстояниях и понимания механизма реакции.

Результаты по сравнению анализирующих способностей зеркальных реакций $\vec{d}d \rightarrow {}^3\text{He}n$ и $\vec{d}d \rightarrow {}^3\text{H}p$ при энергии 270 МэВ дают ограничения для моделей, учитывающих нарушение зарядовой симметрии.

Проведены измерения параметров выведенного дейтронного пучка Нуклотрона, измерение его поляризации и показана возможность использования реакции $\vec{d}p$ упругого рассеяния для измерения поляризации дейтронного пучка на станции внутренней мишени Нуклотрона. Данные методические результаты дают необходимую информацию для проведения дальнейших поляризационных экспериментов на Нуклотроне.

Апробация работы и публикации.

Основные результаты диссертации опубликованы в журналах "Acta Physica Slovaca", "Int. Journal of Modern Physics", "Eur.J.Phys.A", "Phys.Part.Nucl.Lett". Они докладывались на семинарах ВБЛВЭ ОИЯИ, на VII-ом (Стара Лесна, Словакия, 2003), VIII-ом (Дубна, 2005) и IX-ом (Модра-Гармония, Словакия, 2006) рабочих совещаниях по релятивистской ядерной физике "Relativistic Nuclear Physics: from Hundreds of MeV to TeV"; на международной конференции по структуре адронов "Hadron Structure 2004" (Смоленце, Словакия, 2004); на XVI-ом, XVII-ом и XVIII-ом международных симпозиумах по проблематике высоких энергий (Дубна, 2002, 2004); на X-ом и XI-ом международных конференциях по спиновой физике "Workshop on High Energy Spin Physics" (Дубна, 2003, 2005); на 11-ом международном симпозиуме по поляризованным источникам и мишеням "Intern. workshop on Polarized Sources and Targets"; на VII-ой, VIII-ой, IX-ой и X-ой научных конференциях молодых ученых и специалистов ОИЯИ (Дубна, 2003-2006 гг.). Основные результаты диссертации опубликованы в работах [1] - [20].

Объем и структура работы.

Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения и приложения. Полный объем диссертации составляет 96 страницы, включая 16 таблиц, 34 рисунка и списка литературы из 150 наименований.

Автор защищает

- Процедуру и результаты измерения векторной A_y и тензорных A_{yy} , A_{xx} и A_{zz} анализирующих способностей реакций $\vec{d}d \rightarrow {}^3\text{He}n$ и $\vec{d}d \rightarrow {}^3\text{H}p$ при

энергии 270 МэВ, полученных на ускорительном комплексе RIKEN.

- Выводы из результатов по реакциям $\vec{d}d \rightarrow {}^3\text{He}n$ и $\vec{d}d \rightarrow {}^3\text{He}p$, чувствительность тензорных анализирующих способностей к отношению D/S волн в ${}^3\text{He}$ (${}^3\text{H}$), при малых углах в с.ц.м.
- Выводы из результатов по сравнению анализирующих способностей реакций $\vec{d}d \rightarrow {}^3\text{He}n$ и $\vec{d}d \rightarrow {}^3\text{He}p$ при энергии 270 МэВ.
- Результаты по измерению интенсивности и векторной поляризации выведенного пучка дейтронов Нуклотрона при импульсах 3.5 и 5.0 ГэВ/с; а также параметров выведенного пучка дейтронов на Нуклотроне.
- Методику использования поляриметра, основанного на реакции $\vec{d}p$ упругого рассеяния для измерения поляризации дейтронного пучка на станции внутренней мишени Нуклотрона при энергии 270 МэВ.

Содержание диссертации

Во введении приводится обзор по вопросам, рассматриваемым в диссертации, обоснована актуальность диссертации, сформулирована цель работы, научно-практическая ценность, а также приведено краткое содержание диссертации по главам.

В первой главе 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_{zz} анализирующих способностей реакций $\vec{d}d \rightarrow {}^3\text{He}n$ и $\vec{d}d \rightarrow {}^3\text{He}p$ при энергии 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 пластике сцинтилляционных детекторов [7], [11], [13]. Импульс и угол вылета частицы восстанавливался по информации дрейфовых камер и оптической матрицы спектрометра.

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. Значения анализирующих способностей реакции $\vec{d}p$ упругого рассеяния были получены методом абсолютной калибровки поляризации дейтронного пучка из реакции ${}^{12}\text{C}(d, \alpha){}^{10}\text{B}^*[2^+]$. Поляризация дейтронного пучка вычислялась методом усреднения значений из SWPOL и D-room поляриметра. Перед усреднением поляризация, измеренная D-room поляриметром, была скорректирована на релятивистское вращение спина магнитными элементами канала.

В четвертом разделе описывается спектрометр SMART, на котором выполнялись измерения. Непосредственно перед камерой рассеяния находился поляриметр SWPOL. Рассеянные частицы проходили через квадрупольные и дипольные линзы, расположенные в Q-Q-D-Q-D конфигурации. Рассеянные частицы ${}^3\text{He}$ и ${}^3\text{H}$ регистрировались в угловом диапазоне от 0° до $\sim 100^\circ$ и от $\sim 30^\circ$ до $\sim 70^\circ$ в с.ц.м, соответственно.

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. Для определения времени пролета частиц и получения энергетических потерь использовались три пластических сцинтилляционных счетчика. Сигналы от каждого фотоумножителя разветвлялись на три сигнала. Первый использовался для получения амплитудной информации, второй и третий поступали на формирователи со следящим порогом (CFD), с малым (LLD) и большим (ULD)

порогами срабатывания. Таким образом, частицы, не имеющие достаточную энергию на пролет через все три сцинтилляционных счетчика, либо с энергией выше порога ULD, были подавлены триггером. Так как пороги устанавливались программным образом, то существовала возможность отключить совпадение с третьим счетчиком при регистрации низко-энергетических частиц.

Во второй главе описана процедура анализа экспериментальных данных, определения поляризации дейтронного пучка, выделения полезных событий и получения векторной A_y и тензорных A_{yy} , A_{xx} и A_{zz} анализирующих способностей реакций $\vec{d}\vec{d} \rightarrow {}^3\text{He}n$ и $\vec{d}\vec{d} \rightarrow {}^3\text{He}p$.

В первом разделе описывается получение 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. Второй этап 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.

Во втором разделе описывается получение поляризации дейтронного пучка. Определение значений поляризации пучка осуществлялось из числа полученных полезных событий и известных величин анализирующих способностей реакции упругого $\vec{d}p$ рассеяния. Оба поляриметра (DroomPOL и SWPOL) состояли из 4 пар детекторов и работали на основе измерения асимметрии $\vec{d}p$ упругого рассеяния. Значения векторной p_Z^M и тензорной p_{ZZ}^M компонент проекции поляризации дейтронного пучка на ось Z, углов β и ϕ (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_{zz} реакции $\vec{d}p$ упругого рассеяния, был также учтен методом повторения процедуры минимизации с различными входными значениями анализирующих способностей.

В третьем разделе описана процедура отбора полезных событий для реакций $\vec{d}\vec{d} \rightarrow {}^3\text{He}n$ и $\vec{d}\vec{d} \rightarrow {}^3\text{He}p$. Идентификация частиц определялась по амплитуде

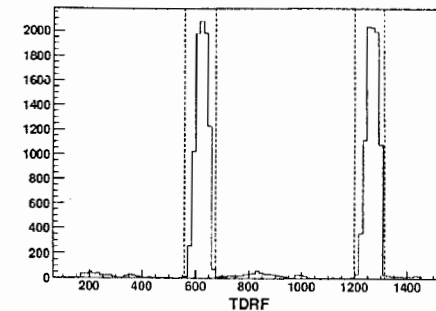
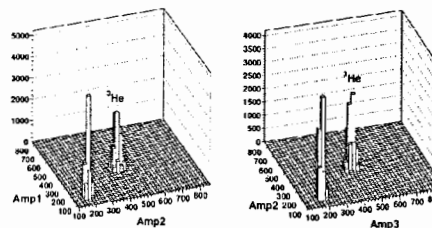


Рис. 1: Корреляции амплитуд AMP1 vs. AMP2 и AMP2 vs. AMP3 для ${}^3\text{He}$. Пик ${}^3\text{He}$. Штриховые линии показывают границы при малых амплитудах соответствует однозаряженным частицам.

сигнала в сцинтилляторе и времени пролета. На рис. 1 и рис. 2 показаны корреляции амплитуд AMP1 vs. AMP2, AMP2 vs. AMP3 и распределение по времени пролета для ${}^3\text{He}$.

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. 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.

Четвертый раздел посвящен описанию процедуры восстановления трека. Импульсы и угол вторичных частиц (${}^3\text{He}$ и ${}^3\text{H}$) анализировались с помощью информации MWDC. Энергетическое разрешение, которое обеспечивалось магнитной и трековой системами достигало ~ 300 кэВ. Для получения траектории частиц, пересекающих MWDC, использовался метод наименьших квадратов. Фитирование проводилось только тогда, когда частица регистрировалась как минимум в трех из четырех X-плоскостей. Эффективность восстановления траектории падала с ростом угла SWINGER магнита, тем не менее, ее значение было на уровне 99%.

В пятом разделе описана процедура восстановления углов рассеяния. Угол падения пучка на мишень варьировался вращением SWINGER магнита. В экс-

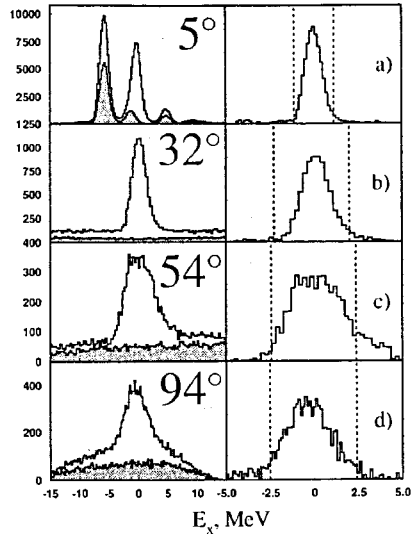


Рис. 3: Полученные спектры для реакции $\bar{d}d \rightarrow {}^3\text{He}n$ в зависимости от энергии возбуждения E_x при энергии 270 МэВ и углах 5° , 32° , 54° и 94° в с.ц.м. соответственно. Открытые и заштрихованные гистограммы слева означают спектры, полученные на CD_2 и углеводе соответственно. Справа показаны результаты $CD_2 - C$ вычитания.

перименте был покрыт диапазон углов от 0 до 110 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 шестом разделе описана процедура $CD_2 - C$ вычитания. Для получения анализирующих способностей реакций $\bar{d}d \rightarrow {}^3\text{He}n$ и $\bar{d}d \rightarrow {}^3\text{He}p$ данные набирались на двух мишенях (CD_2 и C). Эффект на дейтерии был получен путем $CD_2 - C$ вычитания [11], [13] для каждой моды поляризации ИПИ. На рис. 3 и рис. 4 показаны спектры для реакций $\bar{d}d \rightarrow {}^3\text{He}n$ и $\bar{d}d \rightarrow {}^3\text{He}p$ в зависимости от энергии возбуждения E_x под углами 5° , 32° , 54° , 94° и 32° и 54° в с.ц.м. соответственно. Видно хорошее качество процедуры вычитания.

Седьмой раздел посвящен описанию получения полезных событий в угловом диапазоне от 7° до 26° в с. ц. м. для случая детектирования ${}^3\text{He}$. В

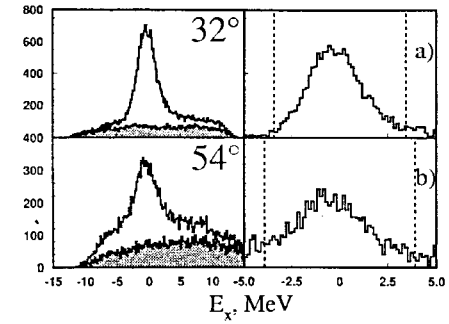


Рис. 4: Полученные спектры для реакции $\bar{d}d \rightarrow {}^3\text{He}p$ в зависимости от энергии возбуждения E_x при энергии 270 МэВ при углах 32° и 54° в с.ц.м. Открытые и заштрихованные гистограммы слева означают спектры, полученные на CD_2 и углеводе соответственно. Справа показаны результаты $CD_2 - C$ вычитания.

случае регистрации ${}^3\text{He}$ в угловом диапазоне от 7° до 26° в с.ц.м. разрешение по энергии возбуждения E_x было различно для углеродной и CD_2 мишени (из-за различной толщины). В данном угловом диапазоне процедура получения полезных событий была модифицирована. Спектр по энергии возбуждения на углеводе фитировался нормальным распределением. Ширина Гауссовских пиков для углевода была настроена таким образом, чтобы она соответствовала ширине пиков CD_2 спектра и затем для сохранения количества событий в пике была скорректирована его высота. Далее обработка производилась обычным способом. Данная процедура оказалась вполне надежной.

В восьмом разделе описано получение анализирующих способностей. Данные для каждой анализирующей способности были получены [1] – [13] с использованием определенных мод поляризации дейтронного пучка. Для получения векторной A_y и тензорной A_{yy} анализирующей способности данные набирались при неполяризованной, чисто векторной, чисто тензорной и смешанной модах. Для получения тензорной анализирующей способности A_{xx} использовалась только неполяризованная, чисто тензорная и смешанная мода.

В девятом разделе описана процедура получения анализирующих способностей при углах больше 7° в с.ц.м. Анализирующие способности при углах больше 7° были получены из асимметрии полезных событий для разных мод ИПИ, и поляризации дейтронного пучка.

В десятом разделе описано получение анализирующих способностей при углах менее 7° в с.д.м. При этих углах учитывалась не только зависимость от угла рассеяния θ , но и от азимутального угла Φ . Для получения анализирующей способности A_{yy} (A_{xx}) необходимо также учесть и вклад от A_{xz} (A_{yy}). Для этого угловой диапазон по углу Φ был разделен на части по 15 градусов. Анализирующие способности были получены методом фитирования асимметрии.

В третьей главе полученные поляризационные наблюдаемые сравниваются с расчетами, основанными на механизме однонуклонного обмена. Также сравниваются анализирующие способности для зеркальных каналов ${}^3\text{He} n$ и ${}^3\text{H} p$ при одинаковых углах с целью поиска нарушения зарядовой симметрии.

В первом разделе описано приближение модели однонуклонного обмена, в рамках которого тензорная анализирующая способность реакций $\vec{d}d \rightarrow {}^3\text{He}n$ и $\vec{d}d \rightarrow {}^3\text{H}p$ при промежуточных энергиях чувствительна к отношению D/S волновых функций ${}^3\text{He}$ и ${}^3\text{H}$ соответственно.

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 способностей реакций $\vec{d}d \rightarrow {}^3\text{He}n$ и $\vec{d}d \rightarrow {}^3\text{H}p$ при энергии 270 МэВ [1] – [13], [20] показаны на рис. 5. Можно видеть сильную вариацию полученных данных в зависимости от угла в с.д.м. При малых углах анализирующие способности A_{yy} и A_{xx} отрицательны, то есть противоположны величинам анализирующих способностей A_{yy} и A_{xx} реакций $d p \rightarrow p d$ и $d {}^3\text{He} \rightarrow p {}^4\text{He}$, которые чувствительны к внутренней структуре дейтрона. Отрицательные значения тензорных анализирующих способностей A_{yy} и A_{xx} реакции $\vec{d}d \rightarrow {}^3\text{He}n$ при малых углах могут быть объяснены в рамках модели ОНО. 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 даже при углах менее 15° в с.д.м. Что касается углов более 15° , то наблюдается серьезное отклонение между экспериментальными данными и нерелятивистскими вычислениями ОНО. Отклонение между данными и расчетами на рис.5 может быть связано с неадекватным описанием спиновой структуры ${}^3\text{He}$ на малых расстояниях.

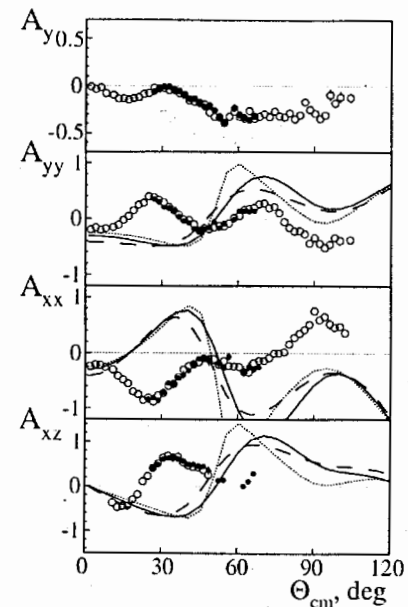


Рис. 5: Угловая зависимость векторной A_y и тензорных A_{yy} , A_{xx} и A_{xz} анализирующих способностей реакций $\vec{d}d \rightarrow {}^3\text{He}n$ (открытые символы) и $\vec{d}d \rightarrow {}^3\text{H}p$ (закрытые символы) при энергии 270 МэВ в с.д.м. Сплошные, точечные и штрихованные кривые представляют результаты нерелятивистских вычислений в рамках модели ОНО с использованием волновых функций ${}^3\text{He}$ на основе Урбанского, Парижского и RSC нуклон-нуклонных потенциалов соответственно.

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

На рис. 6 показана тензорная анализирующая способность A_{yy} реакции $\vec{d}d \rightarrow {}^3\text{He}n$ при энергии 270 МэВ и расчеты ОНО, использующие релятивистскую и нерелятивистскую волновую функцию ${}^3\text{He}$ на основе Урбанского нуклон-нуклонного потенциала. Релятивизм в волновой функции ${}^3\text{He}$ был учтен согласно минимальной схеме релятивизации. Видно, что использование релятивистской волновой функции ${}^3\text{He}$ не приводит к описанию данных по

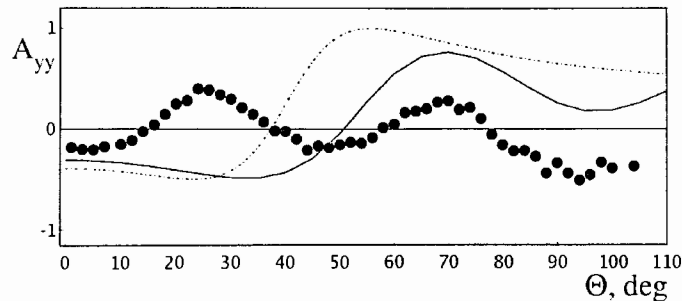


Рис. 6: Угловая зависимость тензорной анализирующей способности A_{yy} реакции $\bar{d}d \rightarrow {}^3\text{He}n$. Сплошная (точечная) кривая представляет результаты нерелятивистских (релятивистских) вычислений в рамках ОНО с использованием волновой функции ${}^3\text{He}$ на основе Урбанского нуклон-нуклонного потенциала.

тензорной анализирующей способности A_{yy} . Структура ${}^3\text{He}$ может зависеть от более чем одной переменной, как и в случае дейтрона, где наблюдается зависимость спиновой структуры от двух переменных.

Третий раздел посвящен поиску нарушения зарядовой симметрии. На рис. 7. показана разница между векторной A_y и тензорными A_{yy} , A_{xx} и A_{xz} анализирующими способностями реакций $\bar{d}d \rightarrow {}^3\text{He}n$ и $\bar{d}d \rightarrow {}^3\text{He}p$ при энергии 270 МэВ [4], [7], [12]. Полученные значения приводятся в таблицах.

В исследованном угловом диапазоне разницы анализирующих способностей близки к нулю. Кроме того, не наблюдается зависимости от угла.

В четвертой главе описывается эксперименты по исследованию структуры легких ядер на Нуклотроне.

Данная глава содержит результаты исследования параметров выведенного пучка дейтронов Нуклотрона, описание поляриметра и измерения векторной поляризации дейтрона на основе $\vec{p}p$ квазиупругого рассеяния, а также использование реакции $\vec{d}p$ упругого рассеяния для измерения поляризации дейтронного пучка.

В первом разделе описывается исследование параметров пучка Нуклотрона. Параметры дейтронного пучка были измерены в 2002 г. при кинетических энергиях пучка от 1.0 до 2.0 ГэВ. В качестве детектора положения пучка использовались многопроволочные дрейфовые камеры с расстоянием между про-

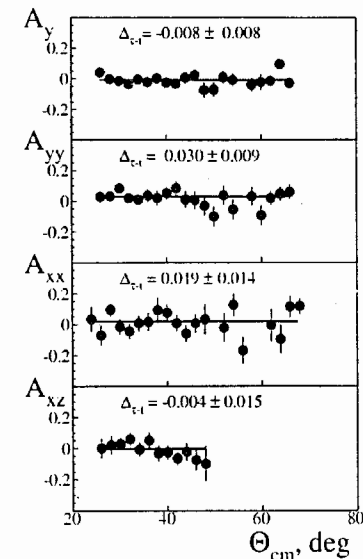


Рис. 7: Угловая зависимость разностей анализирующих способностей $A_{y3\text{He}} - A_{y3\text{H}}$, $A_{yy3\text{He}} - A_{yy3\text{H}}$, $A_{xx3\text{He}} - A_{xx3\text{H}}$ и $A_{xz3\text{He}} - A_{xz3\text{H}}$.

волочками 2 мм. Результаты приведенной работы можно обобщить следующим образом. Эмиттанс дейтронного пучка для энергий 1.0 - 2.0 ГэВ показывает значительную энергетическую зависимость (см. рис. 8) [14]. Между 1.0-2.0 ГэВ эмиттанс дейтронного пучка меняется ~ 2 раза для X и Y . Эмиттанс ϵ_Y имеет значение больше чем ϵ_X и отношение ϵ_Y/ϵ_X изменяется от 1.3 до 2 в интервале энергий 1.0-2.0 ГэВ. Для проведения эксперимента по измерению T_{20} и $C_{yy'}$ в реакции $d^3\text{He} \rightarrow p^4\text{He}$ необходимо существенно улучшить параметры выведенного пучка Нуклотрона, особенно в вертикальном направлении.

Во втором разделе описывается измерение векторной поляризации выведенного дейтронного пучка в рамках проекта РНеЗ. Приводится описание поляриметра, основанного на измерении лево-правой асимметрии квази-упругого $\vec{p}p$ рассеяния. Интенсивность впервые выведенного поляризованного дейтронного пучка Нуклотрона в ходе измерений составляла $\sim 2.5 \cdot 10^7$ частиц/цикл (см. рис. 9) [15], [16]. Поляриметр, помещенный в фокальной плоскости $F3$, был использован для измерения поляризации векторно поляризованного дейтронного пучка при импульсах 3.5 и 5.0 ГэВ/с. Поляризация выведенного дейтронного

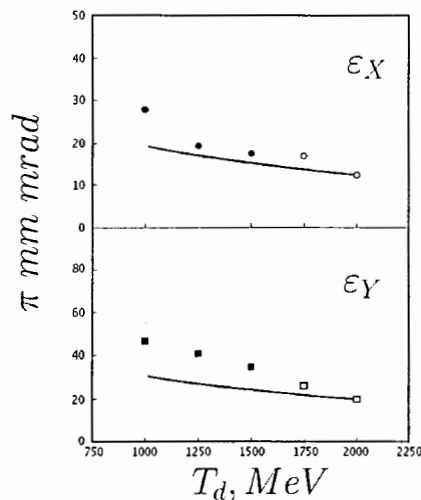


Рис. 8: Оценка эмиттанса дейтронного пучка для координаты X (верхний рисунок) и Y (нижний рисунок) от энергии дейтронного пучка. Ожидаемое поведение эмиттанса с нормировкой при больших энергиях нарисовано сплошной кривой.

пучка, усредненная по спиновым модам, составляла 0.540 ± 0.019 и 0.606 ± 0.014 при 3.5 и 5.0 ГэВ/с [15], [16]. Специальное исследование было посвящено оценке систематической ошибки триггера, используя неполяризованный дейтронный пучок. При импульсе 3.5 ГэВ/с было показано, что уменьшение количества совпадений мало влияет на систематическую ошибку измерений.

В третьем разделе описывается использование реакции $\vec{d}p$ упругого рассеяния для измерения поляризации дейтронного пучка на станции внутренней мишени Нуклотрона. Измерение анализирующих способностей A_y , A_{yy} и A_{xx} реакции $\vec{d}p$ упругого рассеяния в интервале 300-500 МэВ в области минимума поперечного сечения на внутренней станции Нуклотрона было предложено в рамках проекта LNS. Для получения достоверных значений анализирующих способностей необходимо иметь хороший мониторинг поляризации дейтронного пучка. Для этой цели проводилось исследование возможности выделения полезных событий $\vec{d}p$ упругого рассеяния [17], [18], [19].

Данное исследование проводилось в марте 2005 года с использованием стандартной детектирующей аппаратуры LNS при энергии 270 МэВ. Четыре пары

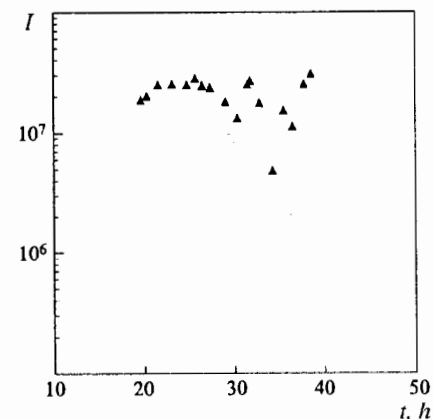


Рис. 9: Зависимость интенсивности выведенного поляризованного пучка дейтронов от времени.

детекторов были расположены симметрично, влево, вправо, вверх и вниз под углом 86.5° в системе центра масс. Каждый из детекторов состоит из двух сцинтилляционных счетчиков с толщиной сцинтиллятора 0.5 и 2 см на базе фотоумножителей FEU85.

На рис. 10 а) и б) показана корреляция энергетических потерь для протонов и дейтронов и распределение по разнице времени пролета между детекторами регистрирующими протоны и дейтроны. Из приведенных рисунков видна возможность выделения событий на основе энергетических потерь частиц в сцинтилляторах и времени пролета. Фон от углерода составляет $\sim 1\%$. Данная техника была применена ранее в ускорительном комплексе RIKEN.

В заключении сформулированы основные выводы диссертации:

1. Впервые получены высокоточные данные по векторной A_y и тензорным A_{yy} , A_{xx} и A_{zz} анализирующим способностям реакции $\vec{d}d \rightarrow {}^3\text{He}n$ при энергии 270 МэВ [1–13, 20].

- Результаты по анализирующим способностям сравнены с предсказаниями модели на основе однонуклонного обмена с использованием Урбанской, Парижской и RSC волновых функций ${}^3\text{He}$. Описать экспериментальные данные по тензорным анализирующим способностям

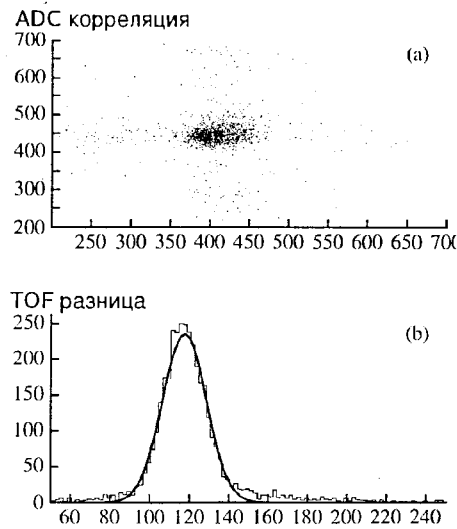


Рис. 10: Выделение $\vec{d}p$ упругих событий при энергии 270 МэВ. а)-корреляция энергетических потерь для протонов и дейтронов в пластике. б)-распределение по разнице времени пролета между протонным и дейтронным детекторами.

удалось только при малых углах и только качественно, в остальном интервале данная модель не воспроизводит данные. Несоответствие между экспериментом и теорией при больших углах в с.д.м. может быть связано с неадекватным описанием волновой функции ${}^3\text{He}$ на малых расстояниях и возможным проявлением релятивистских эффектов, которые могут играть существенную роль при данной энергии.

- Для учета релятивизма данные сравнивались с теоретическим вычислением основанным на минимальной схеме релятивизации с использованием Урбанской волновой функции ${}^3\text{He}$. Хотя разница в релятивистском и нерелятивистском описании данных довольно большая, поведение данных описать не удалось.
- В приближении однонуклонного обмена векторная анализирующая способность должна равняться нулю, что не наблюдается. В данных видна структура, которая объясняется наличием дополнительных механизмов реакции.

2. Впервые получены данные по векторной A_y и тензорным A_{yy} , A_{xx} и A_{zz} анализирующим способностям реакции $\vec{d}d \rightarrow {}^3\text{He}p$ при энергии 270 МэВ [1–10, 12, 20].

- Проведено сравнение данных по анализирующим способностям данной реакции с реакцией $\vec{d}d \rightarrow {}^3\text{He}n$ при энергии 270 МэВ с целью поиска возможного нарушения зарядовой симметрии.
- Данные по векторной и тензорных анализирующих способностях зеркальных реакций при одинаковых углах совпадают в пределах достигнутой экспериментальной точности.

3. Получены следующие методические результаты в рамках поляризационной программы ЛВЭ.

- Впервые измерена векторная поляризация выведенного пучка дейтронов Нуклотрона с помощью поляриметра, основанного на квазиупругом $\vec{p}p$ рассеянии [15, 16, 19]. В ходе измерений интенсивность поляризованного дейтронного пучка при импульсах 3.5 и 5.0 ГэВ/с составляла $\sim 2.5 \cdot 10^7$ частиц/цикл. Поляризация выведенного дейтронного пучка, усредненная по спиновым модам, составляла 0.540 ± 0.019 и 0.606 ± 0.014 при 3.5 и 5.0 ГэВ/с, соответственно.
- Показано, что для дальнейших поляризационных экспериментов на выведенном пучке Нуклотрона необходимо уменьшение эмиттанса пучка, особенно в вертикальном направлении [14].
- Показана возможность использования реакции $\vec{d}p$ упругого рассеяния при энергии 270 МэВ для измерения поляризации дейтронного пучка на внутренней станции Нуклотрона методом выделения событий по энергетическим потерям частиц в сцинтилляторах и разнице времен пролета [17–19].

В приложении описано определение анализирующих способностей. Приведена связь между анализирующими способностями в сферическом и декартовом представлении.

Основные результаты диссертации опубликованы в работах:

- [1] Janek M. et al., Measurement of the tensor A_{yy} and vector A_y analyzing powers for $dd \rightarrow {}^3\text{H}p$ and $dd \rightarrow {}^3\text{He}n$ reactions at 270 MeV. *Материалы Седьмой научной конференции молодых ученых и специалистов ОИЯИ*, 3 – 8 Февраля 2003 г., Дубна, Россия; ФГУП ГИЦ РФ – ВНИИгеосистем, Москва, 2003, с.71.
- [2] Janek M. et al., Angular dependences of the tensor A_{yy} and vector A_y analyzing powers for the $dd \rightarrow {}^3\text{H}p$ and $dd \rightarrow {}^3\text{He}n$ reactions at 270 MeV. *Материалы Восьмой научной конференции молодых ученых и специалистов ОИЯИ*, 2 – 6 Февраля 2004 г., Дубна, Россия; ФГУП ГИЦ РФ – ВНИИгеосистем, Москва, 2004, ISBN 5-8481-0025-X, с.176.
- [3] Janek M. et al., The angular dependences of the tensor A_{yy} , A_{xx} , A_{zz} and vector A_y analyzing powers for the $dd \rightarrow {}^3\text{H}p$ and $dd \rightarrow {}^3\text{He}n$ reactions at 270 MeV. *Материалы Девятой научной конференции молодых ученых и специалистов ОИЯИ*, 31 Января – 6 Февраля 2005 г., Дубна, Россия; ФГУП ГИЦ РФ – ВНИИгеосистем, Москва, 2005, ISBN 5-9751-0003-8, с.203.
- [4] Janek M. et al., The comparison of the polarization observables for the $dd \rightarrow {}^3\text{H}p$ and $dd \rightarrow {}^3\text{He}n$ reactions at the energy 270 MeV and verification of the charge symmetry. *Материалы Десятой научной конференции молодых ученых и специалистов ОИЯИ*, 6 – 10 Февраля 2006 г., Дубна, Россия, ФГУП ГИЦ РФ – ВНИИгеосистем, Москва, 2006, ISBN 5-9751-0024-0, с.147.
- [5] Janek M. et al., Recent results on spin structure of light nuclei from R308n experiment. In: *Proc. of Relativistic Nuclear Physics: from Hundreds of MeV to TeV*, August 25 – 30, 2003, Stará Lesná, Slovak Republic; E1,2-2003-225, 2003, Dubna, p.229; *Acta Physica Slovaca*, 2004, v.54, p. 367.
- [6] Janek M. et al., Tensor A_{yy} and vector A_y analyzing powers for $dd \rightarrow {}^3\text{H}p$ and $dd \rightarrow {}^3\text{He}n$ reactions at 270 MeV. In: *Proc. of X Advanced Research Workshop on High Energy Spin Physics "NATO ARW DUBNA-SPIN-03"*, September 16 – 20, 2003, Dubna, Russia; Eds. Efremov A. V. and Teryaev O. V., E1,2-2004-80, 2004, Dubna, p.306.
- [7] Janek M. et al., Comparison of polarization observables for the $\vec{d}\vec{d} \rightarrow {}^3\text{He}n$ and $\vec{d}\vec{d} \rightarrow {}^3\text{H}p$ reactions. In: *Proc. of XI Advanced Research Workshop on High Energy Spin Physics "NATO ARW DUBNA-SPIN-05"*, September 27 – October 1, 2005, Dubna, Russia; Eds. Efremov A. V. and Goloskokov S. V., E1,2-2006-105, 2006, Dubna, p.351.
- [8] Janek M. et al., Measurement of the tensor and vector analyzing powers for the $d + d \rightarrow {}^3\text{H} + p$ and $d + d \rightarrow {}^3\text{He} + n$ reactions at 270 MeV. In: *Proc. of 8th International Workshop on Meson Production, Properties and Interaction, "MESON 2004"*, 4 – 8 June, 2004, Krakow, Poland; *Int. Journal of Modern Physics*, 2005, v.A20, p. 646, Eds. Kistryn S., Magiera A., Machner H., Guaraldo C.
- [9] Janek M. et al., Sensitivity of the polarization observables A_y , A_{yy} and A_{xx} for the $dd \rightarrow {}^3\text{H}p$ and $dd \rightarrow {}^3\text{He}n$ reactions at energy 270 MeV to the spin structure of deuteron, ${}^3\text{H}$ and ${}^3\text{He}$. In: *Proc. of Hadron Structure 2004*, August 30 – September 3, 2004, Smolenice Castle, Slovak Republic, Eds. Dubnička S., Dubničková A. Z., Striženec P., Urbán J., ISBN 80-7097-590-3, 2005, Košice, p.143.
- [10] Janek M. et al., Measurements of the tensor A_{xx} , A_{yy} , A_{zz} and vector A_y analyzing powers for the $d + d \rightarrow {}^3\text{H} + p$ and $d + d \rightarrow {}^3\text{He} + n$ reactions at 270 MeV. In: *Proc. of Relativistic Nuclear Physics and Quantum Chromodynamics vol. II, XVII Intern. Balđin Seminar on High Energy Physics Problems*, September 27 – October 2, 2004, Dubna, Russia, Eds. Sissakian A. N., Burov V. V., Malakhov A. I., v.2, E1,2-2005-103, 2005, Dubna, p. 249.
- [11] Janek M. et al., The set of polarization observables for the $dd \rightarrow {}^3\text{He}n$ reaction at energy 270 MeV and their sensitivity to the spin structure of ${}^3\text{He}$. In: *Proc. of Relativistic Nuclear Physics: from Hundreds of MeV to TeV*, May 23 – 28, 2005, Dubna, Russia; E1,2-2006-30, 2006, Dubna, p.100.
- [12] Janek M. et al., Status of light nuclei spin structure investigation at VBLHE. In: *Proc. of 9th International Workshop "Relativistic Nuclear Physics: from Hundreds of MeV to TeV"*, May 22 – 27, 2006, Modra-Harmonia, Slovakia; E1,2-2006-189, 2007, Dubna, p.119.

- [13] Janek M. et al., Analyzing powers A_{yy} , A_{xx} , A_{zz} and A_y in the $dd \rightarrow {}^3\text{He}n$ reaction at 270 MeV., *Eur.Phys.J.*, 2007, v.A33, p.39; Препринт ОИЯИ, Е1-2007-108, 2007, Дубна, 21п.
- [14] Khrenov A. N., ..., Janek M. et al., The status of preparation of LNS and PHE3 projects at Nuclotron. In: *Proc. of Relativistic Nuclear Physics: from Hundreds of MeV to TeV*, August 25 – 30, 2003, Stará Lesná, Slovak Republic; E1,2-2003-225, 2003, Dubna, p.236.
- [15] Azhgirey L. S., ..., Janek M. et al., Measurement of the extracted deuteron beam polarization at Nuclotron. In: *Proc. of Relativistic Nuclear Physics: from Hundreds of MeV to TeV*, August 25 – 30, 2003, Stará Lesná, Slovak Republic; E1,2-2003-225, 2003, Dubna, p.147.
- [16] Azhgirey L. S., Janek M. et al., Measurement of the extracted deuteron beam vector polarization at Nuclotron., *Phys. Part. Nucl. Lett.*, 2005, v.2, p.122.; *Pisma Fiz.Elem.Chast.Atom.Yadra*, 2005, T.2, c.91.
- [17] Uesaka T., ..., Janek M. et al., Proposal on the measurements of d-p elastic scattering analyzing powers at 0.3-2.0 GeV at internal target station of the Nuclotron., *Phys. Part. Nucl. Lett.*, 2006, v.3, p.305.
- [18] Ladygin V.P., ..., Janek M. et al., Proposal on the calibration of the deuteron beam polarimeter at 0.3-2.0 GeV at Internal Target Station of the Nuclotron., In: *Proc. of XI Advanced Research Workshop on High Energy Spin Physics "NATO ARW DUBNA-SPIN-05"*, September 27 – October 1, 2005, Dubna, Russia; Eds. Efremov A. V. and Goloskokov S. V., E1,2-2006-105, 2006, Dubna, p.493.
- [19] Ladygin V. P., ..., Janek M. et al., Deuteron beam polarimetry at NUCLOTRON., In: *Proc. of the 11th intern. workshop on Polarized Sources and Targets.*, November 14 -17, 2005, Tokyo, Japan, ISBN-13 978-981-270-703-1, 2007, Singapore, p.117.
- [20] Ladygin V. P., ..., Janek M. et al., Recent results from VBLHE-JINR on spin effects in few-nucleon systems, In: *Proc. of "SPIN-PRAHA-2006"*, July 19 – 26, 2006, Prague, Czech Republic; *Czech. J. Phys. 6, Suppl. F, pp. F1-F386*, Eds. M. Finger, A. Janata, M. Virius, 2006, Czech Republic, p.135.

Получено 27 ноября 2007 г.