

1-2005-169

На правах рукописи  
УДК 539.172.138.5  
51-7:539.172.138.5

ИСУПОВ  
Александр Юрьевич



ИЗМЕРЕНИЯ  
ТЕНЗОРНОЙ АНАЛИЗИРУЮЩЕЙ СПОСОБНОСТИ  $T_{20}$   
В РЕАКЦИИ ФРАГМЕНТАЦИИ ДЕЙТРОНОВ  
В ПИОНЫ ПОД НУЛЕВЫМ УГЛОМ  
И РАЗРАБОТКА ПРОГРАММНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ  
ДЛЯ СИСТЕМ СБОРА ДАННЫХ УСТАНОВОК  
НА ПОЛЯРИЗОВАННЫХ ПУЧКАХ

Специальности: 01.04.16 — физика атомного ядра  
и элементарных частиц,  
01.04.01 — приборы и методы экспериментальной физики

Автореферат диссертации на соискание ученой степени  
кандидата физико-математических наук

Работа выполнена в Лаборатории высоких энергий  
Объединенного института ядерных исследований

Научные руководители:

кандидат физико-математических наук, Анатолий Григорьевич  
старший научный сотрудник ЛИТВИНЕНКО

доктор физико-математических наук, Леонид Сергеевич  
профессор ЗОЛИН

Официальные оппоненты:

доктор физико-математических наук, Владимир Львович  
старший научный сотрудник ЛЮБОШИЦ

кандидат физико-математических наук, Николай Прокофьевич  
доцент ЮДИН

Ведущее научно-исследовательское учреждение:

ГНЦ РФ Институт теоретической и экспериментальной физики  
имени А.И.Алиханова, г.Москва

Защита диссертации состоится “\_\_\_” \_\_\_\_\_ 2005 года  
в “\_\_\_” часов на заседании диссертационного совета Д 720.001.02  
в Лаборатории высоких энергий Объединенного института ядер-  
ных исследований, г.Дубна, Московской области.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ЛВЭ ОИЯИ.

Автореферат разослан “9” *ноября* \_\_\_\_\_ 2005 года

Ученый секретарь

диссертационного совета

кандидат физ.-мат. наук, старший научный сотрудник

*В.А.Арефьев* В.А.Арефьев

## Общая характеристика работы

**Актуальность темы.** К настоящему времени структура атомных ядер на расстояниях, меньших или сравнимых с размерами нуклона ( $\leq 1$  фм), изучена недостаточно как с экспериментальной, так и с теоретической точек зрения. Изучение поляризационных наблюдаемых дает более детальную, по сравнению с реакциями с неполяризованными частицами, информацию о гамильтониане взаимодействия, механизмах реакции и структуре частиц, участвующих в реакции. Дейтрон из всех ядер представляет особый интерес: во-первых, это наиболее изученное ядро как с экспериментальной, так и с теоретической точек зрения. Во-вторых, для дейтрона, как для простейшего ядра, легче разобраться с механизмами реакции. В-третьих, дейтрон имеет нетривиальную спиновую структуру (спин, равный 1, и ненулевой квадрупольный момент), предоставляющую широкие экспериментальные возможности для изучения спиновых наблюдаемых. Экспериментальные данные по тензорной анализирующей способности  $T_{20}$  реакции фрагментации поляризованных дейтронов в кумулятивные пионы под нулевым углом, представленные в диссертационной работе, связаны с такими не до конца исследованными теоретическими вопросами, как описание связанных состояний в системе релятивистских частиц, описание взаимодействия нуклонов на малых расстояниях, и с возможным проявлением ненуклонных степеней свободы в ядрах, а потому представляются актуальными. Полученные экспериментальные данные позволяют продвинуться в понимании спиновой структуры дейтрона на малых межнуклонных расстояниях и дополняют информацию о структуре дейтрона, полученную в экспериментах с лептонным пробником и при изучении реакции развала тензорно поляризованных дейтронов.

**Целью работы** являлось получение экспериментальных данных о тензорной анализирующей способности  $T_{20}$  реакции  $\vec{d} + A \rightarrow \pi^\pm (\Theta = 0^\circ) + X$  фрагментации тензорно поляризованных дейтронов в кумулятивные (подпороговые) пионы под нулевым углом на различных мишенях, а также создание программного обеспечения для систем сбора данных экспериментальных установок, проводящих поляризационные измерения на ускорительном комплексе ЛВЭ.

Объединенный институт  
ядерных исследований  
ФИЯИ

### Научная новизна работы.

- Получены единственные на настоящий момент экспериментальные данные [IV], [V] по тензорной анализирующей способности  $T_{20}$  реакции фрагментации поляризованных дейтронов в кумулятивные пионы под нулевым углом.
- Создана распределенная система сбора и обработки данных *qdpb* [VII], предоставляющая основу для построения систем сбора данных экспериментальных установок.
- Создана система сбора данных [VIII], [X] DAQ СФЕРА.
- Созданы системы сбора данных [IX], [XI], [XII] поляриметров ЛВЭ: высокоэнергетического на выведенном пучке, а также на внутренней мишени Нуклотрона – векторного поляриметра [XIII] и впоследствии – и векторно–тензорного поляриметра.

**Научно–практическая значимость работы.** В настоящее время вопросы описания реакций с участием релятивистских составных частиц и, в частности, спиновой структуры кора дейтрона исследованы недостаточно как с экспериментальной, так и с теоретической точек зрения. Так, имеющиеся теоретические модели описывают экспериментальные данные для сечений рождения кумулятивных частиц в случае неполяризованных дейтронов. Однако для того, чтобы понять поведение тензорной анализирующей способности  $T_{20}$  и коэффициента передачи поляризации  $\kappa$  для реакции фрагментации поляризованных дейтронов в протоны, часть моделей оказалась непригодна, часть потребовала серьезной доработки. Так, эмпирический учет ненуклонных степеней свободы в структуре дейтрона на малых расстояниях позволил понять экспериментальные данные по  $T_{20}$  и  $\kappa$  до значений внутреннего импульса нуклона в дейтроне  $\sim 0,5$  ГэВ/с, а также получить мотивированное КХД ограничение на величину  $T_{20}$  при асимптотически больших внутренних импульсах. Представленные же в диссертационной работе данные по тензорной анализирующей способности  $T_{20}$  реакции фрагментации поляризованных дейтронов в кумулятивные пионы под нулевым углом не описываются ни одной из известных моделей. Т.о., полученные данные представляются существенными для дальнейшего развития моделей, как предназначенных для описания структуры кора дейтрона, так и для

более общего случая связанных систем составных объектов, движущихся с релятивистскими скоростями.

Следует отметить, что представленные данные по  $T_{20}$  на настоящий момент являются единственными, поскольку для проведения такого рода измерений необходимы пучки поляризованных дейтронов с энергией в несколько ГэВ. Более того, в ближайшие несколько лет данные по спиновой структуре дейтронного кора в экспериментах с адронным пробником могут быть получены только на ускорительном комплексе ЛВЭ ОИЯИ.

Разработанная система сбора и обработки данных *qdpb* с возможностью распределенного исполнения на нескольких ЭВМ предоставляет современную программную базу, основанную на UNIX–подобных операционных системах, для построения систем сбора данных физических экспериментов, укомплектованных широко распространенной ядерной электроникой (в первую очередь – в стандарте КАМАК), с малым и средним объемом получаемых данных и невысокой скоростью их набора, существенно упрощая разработку, реализацию, сопровождение и использование таковых.

Принципы построения систем сбора данных на основе системы *qdpb*, использованные для высокоэнергетического поляриметра ЛВЭ, векторного поляриметра на внутренней мишени Нуклотрона и векторно–тензорного поляриметра на внутренней мишени, могут легко быть применены на других подобных физических установках, как и предложенные схемы распространения экспериментальных данных и доступа по HTTP к результатам поляризационных вычислений.

**Апробация работы и публикации.** Результаты, лежащие в основе диссертационной работы, были доложены на семинарах по релятивистской ядерной физике ЛВЭ ОИЯИ, Международных рабочих совещаниях “Релятивистская ядерная физика: от сотен МэВ до ТэВ” (RNP’96, Созополь, Болгария, 1996; RNP’2001, Варна, Болгария, 2001; RNP’2003, Стара Лесна, Словакия, 2003), VI Рабочем совещании по спиновой физике высоких энергий (SPIN’96, Протвино, Россия, 1996), XII Международном симпозиуме по спиновой физике высоких энергий (SPIN’96, Амстердам, Нидерланды, 1996), Международной конференции “Симметрии и спин” (SPIN–Praha–2004,

Прага, Чехия, 2004).

Основные результаты диссертационной работы опубликованы в работах [I]–[XIII].

**Объем и структура работы.** Диссертационная работа изложена на 142 страницах, состоит из введения, трех глав и заключения, содержит 32 рисунка, 7 таблиц и список цитируемой литературы из 136 наименований.

**Автор защищает**

1. Процедуру и результаты измерений тензорной анализирующей способности  $T_{20}$  в реакции  $\bar{d} + A \rightarrow \pi^{\pm}(\Theta = 0^\circ) + X$  фрагментации тензорно поляризованных дейтронов в кумулятивные пионы под нулевым углом в двух постановках:
  - при фиксированном импульсе пионов  $p_{\pi} = 3,0$  ГэВ/с для импульсов дейтронов  $p_d$  в интервале от 6,2 до 9,0 ГэВ/с [IV];
  - при фиксированном импульсе дейтронов  $p_d = 9,0$  ГэВ/с для импульсов пионов  $p_{\pi}$  в интервале от 3,5 до 5,3 ГэВ/с [V].
2. Выводы из результатов измерений тензорной анализирующей способности:
  - величина  $T_{20}$  не зависит от атомной массы  $A$  ядра мишени в интервале  $A = 1 \div 12$ ;
  - величина  $T_{20}$  не зависит от знака регистрируемого пиона;
  - величина  $T_{20}$  даже качественно не описывается известными на данный момент теоретическими расчетами в импульсном приближении в нуклонной модели дейтрона.
3. Результаты работы по созданию распределенной системы сбора и обработки данных  $qdpb$  [VII] как основы для построения систем сбора данных экспериментальных установок.
4. Результаты работы по созданию на базе системы  $qdpb$  системы сбора данных [VIII], [X] DAQ СФЕРА, использовавшейся к настоящему моменту в 8 сеансах на выведенном пучке Синхрофазотрона и Нуклотрона ЛВЭ.
5. Результаты работы по созданию на базе системы  $qdpb$  систем сбора данных [IX], [XI], [XII] поляриметров ЛВЭ: высокоэнергетического на выведенном пучке, а также на внутренней мишени

Нуклотрона – векторного поляриметра [XIII] и впоследствии – векторно–тензорного поляриметра.

## Содержание диссертации

**Во введении** обоснована актуальность измерений, явившихся целью диссертации, представлены необходимые для дальнейшего изложения сведения о кумулятивных частицах, приведены определения, используемые при описании поляризационных наблюдаемых, приведен краткий обзор известных на настоящий момент результатов изучения реакции фрагментации дейтронов в кумулятивные протоны, сформулирована цель работы, приведено краткое содержание диссертации по главам.

**В первом параграфе** введения обоснована актуальность проведенных измерений. Свойства атомных ядер на малых межнуклонных расстояниях недостаточно изучены в настоящее время как теоретически, так и экспериментально. Особое место в такого рода исследованиях занимает дейтрон как простейшая ядерная система (легче разобраться с механизмами реакции), наиболее изученная и имеющая нетривиальную спиновую структуру, предоставляющую широкие экспериментальные возможности для изучения спиновых наблюдаемых.

Исследования на пучках поляризованных дейтронов являются традиционными для ЛВЭ ОИЯИ. Программа измерений, в рамках которой получены представленные в диссертационной работе экспериментальные данные, является естественным продолжением исследований структуры атомных ядер в реакциях с рождением кумулятивных частиц при столкновении неполяризованных ядер, а также поляризационных наблюдаемых в реакции развала дейтрона. Экспериментальные данные, представленные в диссертационной работе, важны для развития моделей, как предназначенных для описания структуры кора дейтрона, так и для более общего случая связанных систем составных объектов, движущихся с релятивистскими скоростями, а потому представляются актуальными.

**Во втором параграфе** приводится определение термина “кумулятивная частица” (см., например, [1] и ссылки в ней) и рассматрива-

ются некоторые закономерности реакций с выходом таких частиц, исследования которых ведутся с начала семидесятых годов XX века. Изучение рождения кумулятивных частиц дает информацию о поведении высокоимпульсной ( $\geq 0,2$  ГэВ/с) компоненты во фрагментирующих ядрах. Из экспериментальных данных следует, что для экспериментов на фиксированной мишени форма спектра кумулятивных частиц слабо зависит от энергии столкновения, начиная с энергий падающих частиц  $T_b \geq 3 \div 4$  ГэВ, т.е. независимость формы спектров от первичной энергии начинается с разности быстрот сталкивающихся частиц  $|Y_{A_{II}} - Y_{A_I}| \geq 2$ . Еще одной установленной закономерностью является независимость спектров кумулятивных частиц от вида частицы, на которой происходит фрагментация. Более подробно закономерности, установленные в реакциях с рождением кумулятивных частиц (зависимость от атомной массы фрагментирующего ядра, зависимость от сорта регистрируемой частицы и т.п.) можно найти в обзорах: [2], [3], [4], [5].

В третьем параграфе приводится краткий обзор понятий [6], [7], которые используются при описании реакций с участием частиц со спином 1.

Принятая в 1970 году т.н. Мэдисоновская конвенция [8], в частности, регламентирует обозначения и терминологию для поляризационных экспериментов. Параметры, описывающие изменения сечения реакции, когда либо пучок либо мишень (но не оба) поляризованы, называются анализирующими способностями реакции вида  $A(\vec{a}, b)B$ .

В обычных экспериментальных условиях ансамбль частиц со спином (пучок или мишень) описывается матрицей плотности  $\rho$ . При описании поляризации ансамбля (для определенности – пучка) частиц со спином 1 следует различать векторные и тензорные параметры поляризации, поскольку частицы со спином 1 описываются тензором ранга  $2I$ . Поляризационное состояние системы частиц со спином 1 может быть полностью описано  $(2I + 1)^2 - 1$  параметрами. Для частиц со спином 1 используются два различных набора определений для соответствующих поляризационных параметров – декартовы тензорные моменты  $p_i, p_{ij}$  [9] и спиновые тензоры  $t_{kq}$  [10]. Соответствующая матрица плотности может быть записана [7] в виде:

$$\hat{\rho} = \frac{1}{3} \left\{ 1 + \frac{3}{2} \vec{p} \hat{S} + \frac{1}{2} p_{ij} (\hat{S}_i \hat{S}_j + \hat{S}_j \hat{S}_i) \right\} . \quad (1)$$

где  $S$  – оператор спина 1,  $i, j = x, y, z$ .

В общем случае инвариантное сечение  $\sigma = E d\sigma/d\vec{p}$  реакции  $A(\vec{a}, b)B$  записывается [7] в виде:

$$\sigma = \sigma_0 \left( \sum_{k,q} t_{kq} T_{kq}^* \right) . \quad (2)$$

Величины  $T_{kq}$  называются анализирующими способностями реакции. Мэдисоновская конвенция рекомендует обозначать тензорные анализирующие способности как  $T_{kq}$  (сферические) и  $A_i, A_{ii}$  (декартовы). Четыре анализирующих способности – векторная  $iT_{11}$  и тензорные  $T_{20}, T_{21}$  и  $T_{22}$  – являются действительными вследствие сохранения четности, а  $T_{10} = 0$ . С учетом этих ограничений уравнение (2) принимает вид:

$$\sigma = \sigma_0 [1 + 2iT_{11} \text{Re}(it_{11}) + T_{20}t_{20} + 2T_{21} \text{Re}(t_{21}) + 2T_{22} \text{Re}(t_{22})] . \quad (3)$$

В декартовых координатах это же сечение записывается в виде:

$$\sigma = \sigma_0 \left[ 1 + \frac{3}{2} p_y A_y + \frac{1}{2} p_{zz} A_{zz} + \frac{2}{3} p_{xz} A_{xz} + \frac{1}{6} (p_{xx} - p_{yy}) (A_{xx} - A_{yy}) \right] . \quad (4)$$

Анализирующие способности  $T_{kq}$  извлекаются из измерений сечений при налетающем пучке с различными моментами поляризации.

В четвертом параграфе приведен краткий обзор известных к настоящему времени данных по реакции фрагментации дейтронов в кумулятивные протоны

$d(p_d \geq 1 \text{ ГэВ/с}) + A \rightarrow p(\Theta = 0^\circ) + X$ , (5)  
имеющей самое большое, по сравнению с фрагментацией в другие адроны, сечение. Двадцать лет исследований данной реакции дали большой объем экспериментальных данных, как для сечения фрагментации неполяризованных дейтронов с импульсами от 2,5 до 17,8 ГэВ/с, так и по поляризационным наблюдаемым, в частности по тензорной анализирующей способности  $T_{20}$  для развала тензорно поляризованных дейтронов, и инициировали появление целого ряда теоретических моделей, направленных на описание структуры дейтрона и механизма реакции. Сделаны следующие суммарные выводы:

1. Экспериментальные данные для сечения фрагментации неполяризованных дейтронов в протоны под нулевым углом в основном удается описать в рамках нуклонной модели.
2. Напротив, данные для тензорной анализирующей способности  $T_{20}$  той же реакции до настоящего времени описываются только с привлечением ненуклонных степеней свободы.

В пятом параграфе сформулирована цель диссертационной работы и приведено краткое содержание диссертации по главам.

В первой главе изложена мотивация проведенных исследований, описаны постановка эксперимента, использовавшаяся экспериментальная установка, организация триггера, рассмотрены результаты соответствующих методических измерений и моделирования.

В первом параграфе главы изложена экспериментальная программа [11] изучения тензорной анализирующей способности  $T_{20}$  реакций фрагментации поляризованных дейтронов в кумулятивные адроны, основанная на известных к 1995 году экспериментальных данных по кумулятивному рождению в столкновениях неполяризованных частиц, данных по изучению поляризационных наблюдаемых в реакции развала поляризованных дейтронов и на теоретических моделях, предложенных для описания указанных реакций.

Изучение поляризационных наблюдаемых в реакции  $\vec{d} + A \rightarrow \pi^\pm (\Theta = 0^\circ) + X$  фрагментации поляризованных дейтронов в кумулятивные пионы – адроны с кварковым составом, отличным от состава протонов – может дать дополнительную информацию о структуре дейтрона на малых расстояниях, в пользу чего можно привести следующие качественные аргументы:

- взаимодействие в конечном состоянии меняется с изменением типа вторичной частицы, что несет дополнительную информацию о механизме рождения кумулятивных частиц;
- регистрация частиц под нулевым углом позволяет упростить выражение для сечения и избежать поправок на наличие векторной компоненты поляризации в первичном тензорно поляризованном пучке дейтронов;
- различные кварковые составы протона и пионов позволяют сделать выбор между различными моделями, учитывающими нену-

клонные степени свободы в ядрах, на основании экспериментальных данных по  $T_{20}$  для кумулятивных протона и пионов.

Во втором параграфе представлена использовавшаяся при измерениях экспериментальная установка, описана постановка эксперимента, изложены условия проведения измерений. Измерения тензорной анализирующей способности  $T_{20}$  реакции  $\vec{d} + A \rightarrow \pi^\pm (\Theta = 0^\circ) + X$  фрагментации релятивистских поляризованных дейтронов в кумулятивные пионы проводились на канале 4В системы медленного вывода Синхрофазотрона ЛВЭ ОИЯИ [12]. Канал 4В расположен в основном измерительном зале ускорительного комплекса (корп. 205). Пучок тензорно поляризованных дейтронов создавался источником ПОЛЯРИС [13], а его тензорная поляризация измерялась до и после наших измерений  $T_{20}$  с помощью поляриметра АЛЬФА [14].

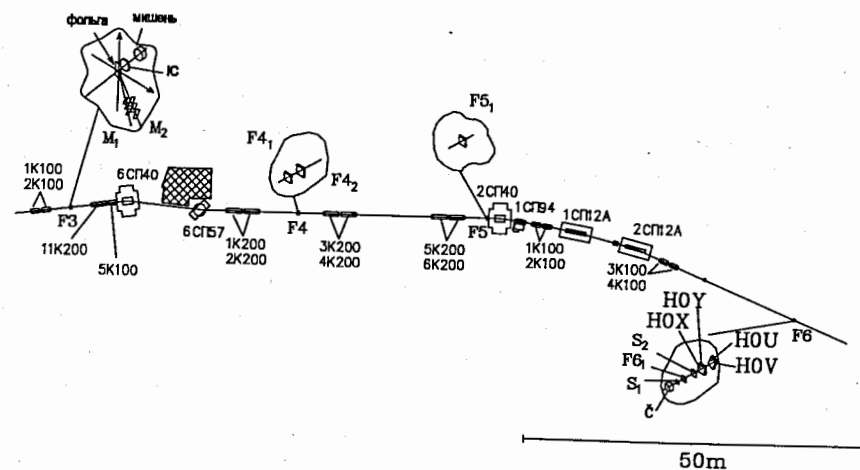


Рис. 1: Схема проведения эксперимента (мишень в фокусе F3, детекторы в фокусах F4, F5 и F6). 6СП40, 6СП57, 2СП40, 1СП94, 1СП12А и 2СП12А – дипольные отклоняющие магниты; iK100 и iK200 – квадрупольные линзы; M<sub>i</sub> – сцинтилляционный счетчик; НОХ, НОУ, НОВ – сцинтилляционные годоскопы; IC – ионизационная камера.

Измерения проводились в следующих условиях:

1. время вывода пучка составляло  $400 \div 500$  мсек;
2. частота повторений  $\sim 0,1$  Гц [12];

3. интенсивность в интервале от  $1 \cdot 10^9$  до  $5 \cdot 10^9$  дейтронов за сброс;
4. величина тензорной поляризации пучка дейтронов составляла  $p_{zz} \approx 0,60 \div 0,77$ , слабо (не более чем на 10 %, см. [15]) меняясь в пределах данной серии измерений, а примесь векторной поляризации составляла  $p_z \approx 0,20 \div 0,25$ ;
5. ось квантования для поляризации направлена вертикально;
6. обеспечивались три состояния поляризации – “+” (положительный знак поляризации), “-” (отрицательный знак поляризации), “0” (отсутствие поляризации), менявшиеся каждый цикл ускорителя, так что в трех последовательных циклах пучок имел различные состояния поляризации.

В первой серии измерений [II], [III], [VI], [IV] была использована показанная на Рис. 1 конфигурация установки с мишенью, расположенной в фокусе F3 (будем называть ее для краткости “первой постановкой”).

Первая постановка эксперимента позволяла уверенно выделять пионы только за счет критерия времени пролета и за счет наличия шести отклоняющих магнитов иметь пренебрежимо малое (меньше чем  $10^{-4}$ ) отношение фон/сигнал для времяпролетных спектров даже на положительно заряженных частицах. Подавление же протонов (на два порядка) в триггере с помощью черенковского счетчика использовалось для уменьшения мертвого времени. Использовались углеродные мишени ( $50,4 \text{ г/см}^2$  и  $23,5 \text{ г/см}^2$ ). Неудобство такой постановки связано с необходимостью перенастраивать большое количество магнитных элементов. Поэтому экспериментальные данные в первой постановке набирались только при одном значении импульса пионов (3,0 ГэВ/с), выделяемом каналом 4В, а увеличение степени их подпороговости достигалось за счет уменьшения импульса первичных дейтронов.

Во второй серии измерений [V] данные набирались в несколько иной конфигурации установки с мишенью, расположенной в фокусе F5 (далее – “вторая постановка”), как показано на Рис. 2, что увеличило число пионов, достигающих фокуса F6 без распада, с 55 % до 85 % и позволило менять их импульс, выделяемый каналом 4В.

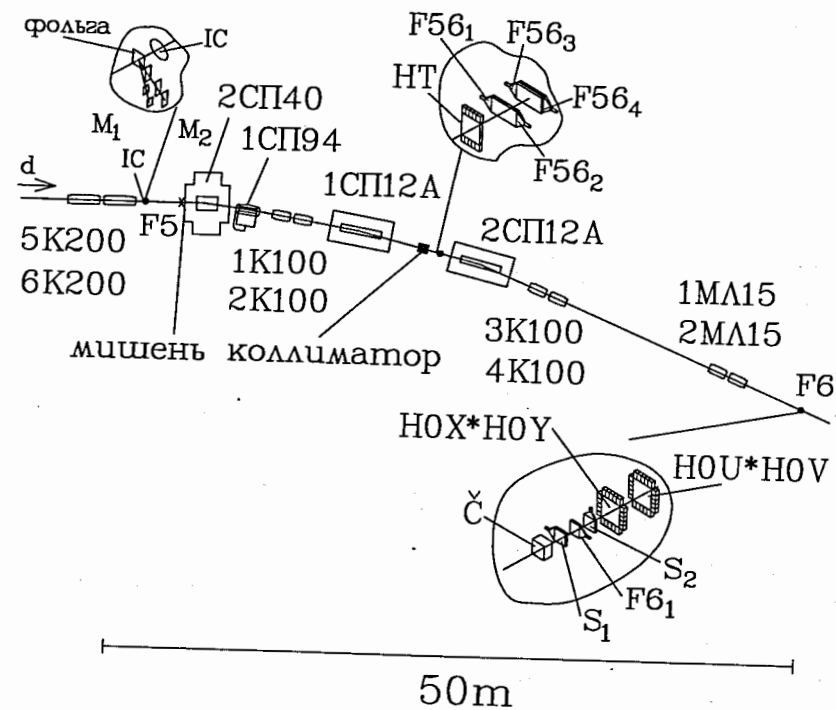


Рис. 2: Схема проведения эксперимента (мишень в фокусе F5, детекторы в фокусах F56 и F6). 2СП40, 1СП94, 1СП12А и 2СП12А – дипольные отклоняющие магниты; iK100, iK200, iM115 – квадрупольные линзы; M<sub>i</sub> – сцинтилляционные телескопы; F56<sub>i</sub>, F6<sub>i</sub>, S<sub>i</sub> – сцинтилляционные счетчики; С – черенковский счетчик; НТ, НОХ, НОУ, НОУ, НОВ – сцинтилляционные годоскопы; IC – ионизационная камера.

В третьем параграфе суммированы результаты проведенных моделирования и методических измерений. Угловой и импульсный аксептансы установки, а также состав вторичного пучка были получены из моделирования и методических измерений [I]. Для моделирования использовался программный пакет *GEANT3* [16].

Для второй постановки импульсный аксептанс установки  $\Delta p/p_0$  равен 1,7 % ( $\Delta p = 0,078 \text{ ГэВ/с}$ ), в то время как полный аксептанс  $\text{Acc}_{F5}(4,5 \text{ ГэВ/с}) = 1,8 \cdot 10^{-5} \text{ стер} \cdot \text{ГэВ/с}$ .

Для первой постановки импульсный аксептанс имеет приблизи-

тельно ту же величину, а полный акцептанс в два раза меньше:  $A_{accF3}(3 \text{ ГэВ/с}) = 0,9 \cdot 10^{-5}$  стер·ГэВ/с.

Оценка величины импульсного акцептанса на основе времяпролетных спектров для положительных частиц не противоречит величине, полученной из моделирования.

Полученные нами типичные времяпролетные спектры демонстрируют достаточность критерия времени пролета для выделения  $\pi^{\pm}$ -мезонов с отношением эффект/фон не менее  $10^3$  в случае наименьшего из измеренных сечений – кроме  $\mu$ -мезонов, отстоящих от пионов менее чем на 100 пикосекунд, т.е. находящихся в пионном времяпролетном пике. Для определения величины и происхождения примеси  $\mu$ -мезонов были проведены методические измерения уменьшения числа отсчетов при установке перед последним триггерным счетчиком ( $S_2$ ) в фокусе F6 (Рис. 1, 2) свинцового поглотителя толщиной (в см)  $l_1 = 20$ ,  $l_2 = 40$  и  $l_3 = 60$ , давшие для примеси мюонов величину  $7,8 \pm 0,7$  %. Дополнительное моделирование для определения примеси распадных  $\mu$ -мезонов, прошедших триггерные счетчики в F6, дало величину  $6,7 \pm 0,4$  %, что согласуется с результатами измерений со свинцовыми поглотителями и позволило считать все мюоны в F6 распадными из пионов, а все частицы, попавшие в пионный пик по времени пролета, – пионами.

Вклад от вещества в канале определялся в экспозициях без мишени и с соответствующей пустой мишенью и учитывался при вычислении сечений с помощью стандартной вычитательной процедуры.

**В четвертом параграфе** рассматривается организация триггера, применявшегося при проведении измерений, и излагаются принципы его работы.

Необходимо было разработать триггер, который позволял бы переходить от одной постановки к другой с минимальными перестройками и, в частности, с минимальными изменениями задержек, передающих сигналы на регистрирующую электронику. С учетом перечисленных особенностей была разработана и реализована схема двухуровневого триггера. Для реализации триггера (а также в качестве регистрирующей электроники) экспериментальной установки использовались электронные блоки в стандарте КАМАК, большая

часть которых разработана в ЛВЭ ОИЯИ. В качестве претриггера (триггера первого уровня) при измерениях на положительных частицах использовались совпадения сигналов счетчиков  $S_1$ ,  $S_2$ , F6<sub>1</sub> и  $\bar{C}$ , расположенных в фокусе F6. Регистрирующая электроника начинала преобразование сигналов сразу после выработки положительного решения претриггера, на что требуется не более нескольких десятков наносекунд. Окончательное решение о считывании регистрирующей электроники принималось после срабатывания логики триггера второго уровня, в которой использовались различные комбинации счетчиков из фокуса F4 (первая постановка), F56 (вторая постановка). Показано, что выбранная схема триггера позволяет набрать рабочую статистику ( $\sim 5 \div 10$  триггеров за сброс) даже при отношении  $N_{\text{претриг}}^{(0)}/N_{\text{триг}}^{(0)} \sim 10^4$  с приемлемым мертвым временем  $T_{\text{dead}}/T \leq 30 \div 40$  %, где  $N_{\text{триг}}^{(0)}$  и  $N_{\text{претриг}}^{(0)}$  обозначены соответственно числа частиц, вырабатывающих сигналы “триггер” и “претриггер” в течение одного сброса ускорителя. Тот факт, что выработка решения триггера второго уровня происходит во времени параллельно с подачей сигналов на регистрирующую электронику, показывает, что можно усложнять логику второго уровня триггера без существенных изменений остальной части электроники.

**Во второй главе** описано разработанное автором программное обеспечение, реализующее системы сбора и обработки данных – DAQ СФЕРА и поляриметров ЛВЭ (высокоэнергетического поляриметра [17], векторного поляриметра на внутренней мишени Нуклотрона [XIII] и векторно-тензорного поляриметра на внутренней мишени).

**В первом параграфе** главы делаются вводные замечания относительно доступных в настоящее время аппаратных и программных средств, которые могут применяться для организации электронного сбора данных экспериментальных установок, и оговаривается система обозначений, используемая во второй главе.

**Во втором параграфе** приводится мотивация создания системы сбора и обработки данных, позволяющей распределенное исполнение на нескольких ЭВМ, достаточно гибкой для работы с широким спектром аппаратных средств ядерной электроники и в достаточной



степени мобильной, т.е. независимой от архитектуры используемой ЭВМ. Так, распространение ЭВМ с архитектурой "Intel386" (начало 90-х гг.) и появление для них UNIX-подобных операционных систем (далее – "ОС"), в т.ч. свободно распространяемых на уровне программных текстов (середина 90-х), а также отсутствие свободно распространяемой системы сбора и обработки данных, удовлетворяющей вышеперечисленным требованиям, создали предпосылки для написания проекта системы *qdpb* [VII] (Data Processing with Branchpoints – система обработки данных с точками ветвления), который излагается далее вместе с ключевыми моментами его реализации.

Собственно система *qdpb* является объединением подсистемы обслуживания аппаратных средств и подсистемы обработки данных.

Подсистема обслуживания аппаратных средств, в свою очередь, может состоять из подсистем, работающих с ядерной электроникой различных стандартов через соответствующие средства сопряжения с ЭВМ. Подсистема обслуживания КАМАК, в качестве которой могут рассматриваться контроллер(ы) крейта КАМАК с адаптером, исполненным как плата для некоторой шины расширения ЭВМ, и соответствующим программным обеспечением (далее – "ПО"), является частью подсистемы обслуживания аппаратных средств.

В подсистеме обработки данных под событием понимается информация, полученная в результате обработки одного аппаратного триггера или сгруппированная по какому-либо иному признаку. Информация о событиях представляется в виде пакетов данных, каждый из которых представляет собой последовательность байтов и состоит из заголовка и тела, последнее содержит собственно информацию события. Информация в подсистеме обработки данных распространяется в виде потоков пакетов, т.е. последовательностей пакетов, которые могут содержать пакеты различных типов в произвольном порядке. Поток реализуется как неструктурированная последовательность байтов, не допускающая позиционирования. Подсистема обработки данных представляет собой совокупность соединенных потоками пакетов следующих элементов обработки информации:

1. рабочих модулей,

2. управляющих модулей,
3. служебных модулей,
4. точек ветвления потоков и/или сшивателей событий.

Ключевыми моментами реализации системы *qdpb* являются:

- формат пакета *packet(5)* и интерфейсы для работы с пакетами *packet(3)* и *packet(9)*;
- точка ветвления *branchpoint(4)* как загружаемый модуль ядра ОС, поддерживающий интерфейсы *bpio(2)* / *bpio(9)*;
- сеансонеzависимый рабочий модуль *writer(1)*;
- служебные модули для:
  1. серверной части сокетного соединения;
  2. клиентской части сокетного соединения;
  3. передачи пакетов из потока в буфер точки ветвления;
  4. передачи пакетов из буфера точки ветвления в поток.
- сеансонеzависимые управляющие модули.

Все программные тексты системы *qdpb* написаны на языке Си под более или менее общее современное UNIX-подобное окружение. Реализация всего кода, исполняемого в контексте задачи, ожидается легко переносимой под ОС, отличные от разработочной (FreeBSD). Порядок байтов в многобайтовых полях тел пакетов всегда от младшего к старшему (т.н. little endian byte order). Весь код для контекста ядра организован в виде устройств (device) и загружаемых модулей ядра ОС и реализует системные вызовы и обработчики аппаратных прерываний. Все вышеперечисленное является типичными элементами ядер современных UNIX-подобных ОС.

В третьем параграфе рассматриваются средства, предназначенные для поддержки описания экспериментальной установки: представление экспериментальных данных и описание аппаратуры КАМАК, оба конфигурируемые для обеспечения сеансонеzависимости. Эти средства позволяют существенно упростить реализацию сеансонеzависимой части программного обеспечения, а также формализовать его реконфигурацию при изменении от сеанса к сеансу решаемых физических задач, диктующем изменения состава аппаратуры и собираемых данных.

Схема программного представления экспериментальных данных [VIII] обеспечивает конфигурируемое (посредством конфигурационных файлов в форматах *cell.conf(5)*, *knobj.conf(5)*, *clean.conf(5)*, *RUN.conf(5)*) во время исполнения процесса описание данных, что позволяет реализовать рабочие модули и модули представления данных сеансонаезависимым образом. Такая схема реализована посредством следующих программных элементов:

- Универсальный вычислительный объект, т.н. **ячейка**.
- Универсальный объект представления (обработки) данных, т.н. **известный** (программе) **объект**, опирающийся в свою очередь на:
  - универсальное представление переменных, т.н. **известная** (программе) **переменная**, и
  - универсальное представление функций, т.н. **известная** (программе) **функция**.

Предоставляется (прикладной) программный интерфейс (далее – “API”) *cell(3)* для манипуляций с вычислительными ячейками. Предоставляются программные средства – т.н. API *known(3)* – для регистрации любой глобальной переменной внутри программного модуля как известной переменной с заполнением Си-структуры *knvar*, а также для манипуляций с известными переменными; для регистрации любой функции внутри программного модуля как известной функции с заполнением Си-структуры *knfun*, а также для манипуляций с известными функциями; для манипуляций с известными объектами.

Конфигурируемое описание аппаратуры КАМАК [VIII] предназначено для формализации и автоматизации написания программных текстов, реализующих работу с КАМАК в сложных многокрейтных установках, для таких элементов подсистемы обслуживания КАМАК, как загружаемые модули ядра ОС и процессы, работающие с КАМАК непосредственно. Основная идея состоит в реализации следующих программных элементов:

1. Описание аппаратуры КАМАК с “географической” точки зрения – посредством некой конфигурационной базы данных (т.н. глобального массива описания КАМАК), содержащей информацию о местоположении (в терминах номеров ветви, крейта и

станции) каждого блока КАМАК, используемого в данном сеансе.

2. Некая “библиотека” программных текстов Си, реализующих для каждого вида используемых блоков КАМАК (по крайней мере) следующее:
    - чтение экспериментальных данных из блока КАМАК;
    - сброс (приведение в исходное состояние) блока КАМАК;
    - тестирование блока КАМАК;
    - имитацию чтения экспериментальных данных из блока КАМАК без обращений к КАМАК (для отладочных целей).
  3. Описание аппаратуры КАМАК с точки зрения события, т.е. представление экспериментальных данных в терминах читаемых блоков КАМАК для каждого вида событий, предусмотренного в данной конфигурации установки.
  4. Утилиты для тестирования аппаратуры КАМАК и для генерации программных текстов Си на основе вышеперечисленных средств.
  5. Сеансонаезависимая часть кода, реализующего управление системой сбора и обработки данных в целом (например, распознавание вида события (триггера), разрешение/запрет генерации триггеров, запуск/остановка системы и т.д.).
  6. Сеансонаезависимая часть кода управления системой в целом (например, инициализация и сброс аппаратуры КАМАК, и т.д.).
- Сеансонаезависимым образом реализованы п. 2 – заголовочный файл *hwconf.h* (см. *hwconf(5)*) и интерфейс *hwconf(3)*; п. 4 – утилиты *gen\_gr(1)* и *ctest(1)*; п. 5 – заголовочный файл *hardware.h*.
- В четвертом параграфе описывается сеансонаезависимая часть [X] конфигурируемого представления экспериментальных данных – программный код, зависящий от состава и характера собираемых экспериментальных данных и, таким образом, варьирующийся от сеанса к сеансу. Такой код для каждого сеанса *<run\_name>* группируется в библиотеку *lib<run\_name>* и содержит:
- программное представление экспериментальных данных установки (объявления *eRUN(5)* структурированного представления данных и реализация интерфейса *fRUN(3)* для преобразования

данных из “сырого” двоичного представления *bRUN(3)* в структурированное), а также поддержку низкого уровня в заголовочном файле *bytemacros.h* ;

- объявления *pack\_types(5)* классификации видов событий (пакетов) и реализацию *pack\_types(3)* интерфейса для преобразования представлений видов событий.
- относительно сеансонеинзависимый интерфейс пользовательского уровня *get\_data(3)*, который поддерживает работу с файлами данных, как записанных системой *qdpb* (модулем *writer(1)* посредством интерфейса *packet(3)*), так и в старых (не-*qdpb*) форматах, набранных в ранних сеансах.

В пятом параграфе излагается реализация системы DAQ<sup>1</sup> СФЕРА [X], основанная на программных компонентах, описанных в предыдущих трех параграфах.

Глобальный массив описания КАМАК (п. 1 схемы конфигурируемого описания аппаратуры) и представление экспериментальных данных в терминах читаемых блоков КАМАК (п. 3) реализованы семейством файлов *b<run\_name>.\** (по одному заголовочному файлу *.h* и исходному файлу *.c* на каждый сеанс ускорителя). Сеансозависимая часть кода управления системой DAQ СФЕРА (п. 6) реализована семейством заголовочных файлов *<run\_name>hard.h* (по одному на каждый сеанс ускорителя). Дополнительно к предоставляемым системой *qdpb* реализованы следующие специфические для системы DAQ СФЕРА программные элементы:

- пользовательский обработчик прерываний КАМАК *sphere(4)*, являющийся загружаемым модулем ядра ОС;
- конфигурационная *sphereconf(8)* и управляющая *sphereoper(8)* утилиты для обработчика прерываний КАМАК;
- сборщик статистики *statman(1)*, являющийся рабочим модулем в терминах системы *qdpb*;
- модуль графического представления данных *histview(1)*;
- модуль текстового представления данных *cntview(1)*;
- утилита контроля загружаемых модулей ядра ОС *watcher(1)*.

<sup>1</sup>Data acquisition – сбор данных.

Описаны также: процедура реконфигурации системы DAQ СФЕРА при смене формата собираемых экспериментальных данных и аппаратного состава установки – “переход на другой сеанс ускорителя”, тестирование системы DAQ СФЕРА на стенде и использование ее в сеансах на ускорительном комплексе ЛВЭ ОИЯИ (четыре сеанса в 2002 году, по одному сеансу в 2003 и 2004 гг., и к настоящему времени – два сеанса в 2005 году).

В шестом параграфе описываются построенные на основе системы *qdpb* системы сбора, обработки, транспортировки и представления данных для ряда поляриметров, эксплуатирующихся в ЛВЭ ОИЯИ: высокоэнергетического поляриметра ЛВЭ [17], векторного поляриметра на внутренней мишени Нуклотрона [XIII] и векторно-тензорного поляриметра на внутренней мишени – соответственно DAQ ВЭП [IX], DAQ ПВМ [XI], [XII] и DAQ ВТП. Схожесть указанных установок по назначению и набору детекторов позволила единым образом организовать распределенное представление данных и применить принципиально аналогичные программные решения при реализации подсистемы обслуживания аппаратных средств – электроники в стандарте КАМАК.

Дополнительно к предоставляемым системой *qdpb* для каждой из перечисленных систем DAQ реализованы следующие специфические программные элементы:

- заголовочный файл описания аппаратных средств КАМАК и “сырого” двоичного представления данных;
- пользовательский обработчик прерываний КАМАК с соответствующими конфигурационной и управляющей утилитами;
- make-файл с командами оператора;
- программное представление экспериментальных данных с поляриметра (объявления *ePOLAR(5)* структурированного представления данных и реализация интерфейса *fPOLAR(3)* для преобразования данных из “сырого” двоичного представления в структурированное);
- вычислитель поляризации, являющийся рабочим модулем в терминах системы *qdpb*;

а также единая для всех поляриметров CGI-утилита *polar.cgi(1)* для управления вычислителями поляризации через HTTP.

Описано общее взаимодействие программных элементов систем DAQ ВЭП / ПВМ / ВТП, а также CGI-обслуживание запросов от HTTP-клиентов утилитой *polar.cgi(1)*. Приведены формулы поляризационных вычислений, используемые вычислителями поляризации ВЭП / ВТП и ПВМ, рассмотрены наборы выводных файлов последних и режимы их работы (статический run, динамический run, просмотр результатов текущего статического run'a), а также соответствующие режимы доступа по HTTP к результатам поляризационных вычислений. Предложен метод синхронизации "сырых" данных от ВЭП / ПВМ / ВТП с экспериментальными данными других физических установок и обсуждаются способы получения таких данных в online- или offline-режимах.

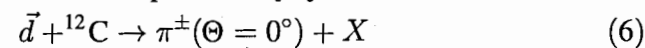
Система DAQ ВЭП с представлением результатов поляризационных вычислений через HTTP была использована в течение ряда сеансов Синхрофазотрона и Нуклотрона с поляризованными пучками – Июнь'2001, Октябрь'2001, Ноябрь'2002 и Декабрь'2002. Система DAQ ПВМ с аналогичным представлением результатов была успешно протестирована на поляризованном пучке в течение сеанса Нуклотрона Декабрь'2002. Системы DAQ ВТП и модернизированного ВЭП тестировались в сеансе Март'2005, первая успешно использовалась на внутреннем поляризованном пучке в сеансе Июнь'2005.

**В третьей главе** описана процедура получения экспериментальных данных, обсуждаются условия постановки эксперимента и точности измерений (систематические и статистические ошибки), приведены защищаемые экспериментальные данные, а также проведено их сравнение с результатами известных в литературе теоретических расчетов.

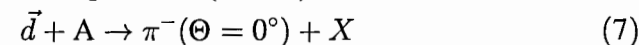
**В первом параграфе** главы проведен анализ источников систематических ошибок. Расходимость первичного пучка дейтронов  $\leq 10^{-2}$  радиан вносила разброс величины поляризации  $|\Delta t_{20}| \leq 10^{-2}$ , который заведомо меньше ошибки проведенных измерений величины  $t_{20}$  (3÷4 %) и к тому же эффективно учитывался процедурой измерений. По результатам моделирования показано, что вклад в измеренное сечение рождения членов, пропорциональных  $\sin(\phi)$  и  $\sin(2\phi)$ , не превышал  $0,5 \cdot 10^{-2}$ , что также заведомо меньше систе-

матической ошибки измерений  $t_{20}$ . Что касается влияния эффектов толстой мишени на величину извлекаемой анализирующей способности  $T_{20}$ , то зависимость полных (упругих и неупругих) сечений рассеяния дейтрона на углероде от величины тензорной поляризации по известным литературным данным [18], [19] не наблюдается на нашем уровне ошибок. Фоновый к изучаемому прямому процессу  $dA \rightarrow \pi X$  каскадный процесс  $dA \rightarrow NY$ ;  $NA \rightarrow \pi X$  (где  $N$  – нуклон) по проведенным нами оценкам дает вклад  $< 2\%$  в сечение рождения на самой толстой из использованных мишеней, что значительно меньше ошибки в определении величины  $t_{20}$  и статистических ошибок измерений  $T_{20}$ .

**Во втором параграфе** приведены экспериментальные данные для тензорной анализирующей способности  $T_{20}$  в реакции фрагментации тензорно поляризованных дейтронов в кумулятивные пионы:



в первой постановке эксперимента (Рис. 1) и



во второй постановке (с мишенями  $A = \text{H, Be, C}$ , Рис. 2).

Тензорная анализирующая способность  $T_{20}$  извлекалась из измеренных величин выходов пионов:

$$T_{20} = \frac{2\sqrt{2}(n_{\pi}^{+} - n_{\pi}^{-})}{n_{\pi}^{+}p_{zz}^{-} - n_{\pi}^{-}p_{zz}^{+}}, \quad (8)$$

где  $n_{\pi}^{\pm} = N_{\pi}^{\pm} / Mon^{\pm}$  – нормированное на число отсчетов в мониторинговом счетчике (ионизационная камера IC) число зарегистрированных пионов от фрагментации дейтронов, имеющих соответствующую тензорную поляризацию  $p_{zz}^{\pm}$ . Величины  $T_{20}$ , определенные с использованием всех полученных нами в первой постановке данных, относящихся к соответствующим кинематическим переменным, приведены в таблице 1 (см. [IV]) как функция кумулятивной переменной  $x_c$  ( $\pi^{-}$ -мезоны – шесть верхних рядов,  $\pi^{+}$ -мезоны – два нижних ряда).

Величины  $T_{20}$ , определенные на основе данных, полученных во второй постановке (см. [V]), приведены в таблице 2 (инвариантное сечение фрагментации  $\sigma_{inv}(x_c) = E_{\pi} d\sigma(x_c) / d\vec{p}_{\pi}$  представлено в единицах мкбарн · ГэВ<sup>-2</sup> · с<sup>3</sup> · ср<sup>-1</sup>/нуклон).

Таким образом:

Таблица 1:

$p_d$ , ГэВ/с	$x_c \pm \delta x_c$	$T_{20} \pm \text{стат.} \pm \text{сист.}$
9,0	$0,920 \pm 0,019$	$-0,0021 \pm 0,0455 \pm 0,0003$
8,6	$0,982 \pm 0,020$	$-0,0078 \pm 0,0299 \pm 0,0010$
7,4	$1,234 \pm 0,025$	$0,051 \pm 0,067 \pm 0,007$
7,0	$1,352 \pm 0,028$	$-0,043 \pm 0,080 \pm 0,006$
6,6	$1,495 \pm 0,031$	$0,21 \pm 0,11 \pm 0,03$
6,2	$1,674 \pm 0,036$	$0,017 \pm 0,138 \pm 0,002$
9,0	$0,920 \pm 0,019$	$0,0029 \pm 0,0368 \pm 0,0004$
7,4	$1,234 \pm 0,025$	$0,12 \pm 0,09 \pm 0,02$

Таблица 2:

$p_\pi$ , ГэВ/с	Мишень (толщина, г/см <sup>2</sup> )	$x_c \pm \delta x_c$	$\sigma_{inv}(x_c)$	$T_{20} \pm \text{стат.} \pm \text{сист.}$
3,5	H (7,1)	$1,08 \pm 0,03$	23,5	$0,064 \pm 0,059 \pm 0,004$
4,0	H (7,1)	$1,25 \pm 0,03$	19,6	$0,048 \pm 0,047 \pm 0,003$
4,5	H (7,1)	$1,43 \pm 0,04$	3,53	$0,120 \pm 0,058 \pm 0,008$
5,0	H (7,1)	$1,61 \pm 0,04$	0,75	$0,158 \pm 0,098 \pm 0,010$
5,0	Be (36)	$1,63 \pm 0,04$	6,59	$0,128 \pm 0,056 \pm 0,008$
5,3	C (55)	$1,76 \pm 0,05$	1,81	$0,162 \pm 0,118 \pm 0,010$

- величины тензорной анализирующей способности  $T_{20}$  для отрицательных и положительных пионов совпадают в пределах экспериментальных ошибок;
- не наблюдается значимой зависимости  $T_{20}$  от атомной массы  $A$  ядра мишени в интервале  $1 \div 12$ ;
- фитирование всех экспериментальных данных константой дает  $T_{20} = 0,04 \pm 0,02$ ;  $\chi^2/n_f = 1,3$  ( $n_f$  – число степеней свободы);
- экспериментальные данные хорошо описываются линейной зависимостью от кумулятивной переменной  $T_{20} = (-0,18 \pm 0,07) + (0,19 \pm 0,06) \cdot x_c$ ;  $\chi^2/n_f = 0,5$ .

В третьем параграфе проведено сравнение полученных величин тензорной анализирующей способности  $T_{20}$  с результатами известных в литературе теоретических расчетов. Так, в работе [20], где обсу-

ждалось предложение использовать реакцию (7) (для  $A$  – протон) фрагментации поляризованных дейтронов в пионы для исследования структуры кора дейтрона, качественно предсказывалась связываемая с анизотропией  $D$ -волны ВФД заметная величина тензорной анализирующей способности  $|T_{20}| \geq 0,4$ .

Первые расчеты анализирующей способности  $T_{20}$  были выполнены в импульсном приближении в работе [21] для дейтронов с импульсом 9 ГэВ/с. Однако результаты этих расчетов даже качественно не согласуются с полученными нами экспериментальными данными. Другие расчеты  $T_{20}$  для рассматриваемой реакции, которые были бы проведены до получения нами экспериментальных данных, автору не известны.

Подробный теоретический анализ реакции фрагментации поляризованных и неполяризованных дейтронов в пионы выполнен в работах [22], [23], [24], где дифференциальное сечение и тензорная анализирующая способность  $T_{20}$  рассчитывались в рамках релятивистского импульсного приближения в нуклонной модели дейтрона. По результатам этих расчетов можно сделать следующие выводы:

- В отличие от дифференциального сечения, тензорная анализирующая способность  $T_{20}$  слабо зависит от вида элементарного сечения  $d\sigma(NN \rightarrow \pi X)$ .
- Для значений инвариантной кумулятивной переменной  $x_c \geq 1,3$  вычисленная величина  $T_{20}$  существенно зависит от использованной при расчетах ВФД.
- Ни в каком из использованных в [24] подходов (ковариантный подход, основанный на уравнении Бете–Солпитера; квазипотенциальный подход Гросса; схема минимальной релятивизации) и ни с какой из использованных ВФД представленные в диссертационной работе экспериментальные данные не описываются в рамках нуклонной модели для  $x_c \geq 1,2$ .

В связи с перечисленными трудностями в работе [24] предпринималась попытка ввода в ВФД примеси нунуклонной компоненты, однако это также не позволяет описать полученные экспериментальные данные для  $T_{20}$  во всей изученной области.

Т.о., полученные экспериментальные данные указывают на необходимость дальнейших теоретических исследований рассматриваемой реакции (7) и, возможно, разработки более адекватных подходов для описания высокоимпульсной компоненты в ВФД.

**В заключении** сформулированы основные результаты и выводы диссертации:

1. Впервые измерена величина тензорной анализирующей способности  $T_{20}$  в реакции  $\vec{d} + A \rightarrow \pi^\pm(\Theta = 0^\circ) + X$  фрагментации тензорно поляризованных дейтронов в кумулятивные пионы под нулевым углом в двух постановках:
  - при фиксированном импульсе пионов  $p_\pi = 3,0$  ГэВ/с для импульсов дейтронов  $p_d$  в интервале от 6,2 до 9,0 ГэВ/с [IV];
  - при фиксированном импульсе дейтронов  $p_d = 9,0$  ГэВ/с для импульсов пионов  $p_\pi$  в интервале от 3,5 до 5,3 ГэВ/с [V].
2. Измеренная величина тензорной анализирующей способности  $T_{20}$  не зависит от атомной массы  $A$  ядра мишени в интервале  $A = 1 \div 12$ .
3. Измеренная величина  $T_{20}$  не зависит от знака регистрируемого пиона.
4. Измеренная величина  $T_{20}$  даже качественно не описывается известными на данный момент теоретическими расчетами в импульсном приближении в нуклонной модели дейтрона.
5. Создана распределенная система сбора и обработки данных  $qdpb$  [VII], предоставляющая основу для построения систем сбора данных экспериментальных установок.
6. На основе системы  $qdpb$  создана система сбора данных [VIII], [X] DAQ СФЕРА, использовавшаяся к настоящему моменту в 8 сеансах на выведенном пучке Синхрофазотрона и Нуклотрона ЛВЭ.
7. На основе системы  $qdpb$  созданы системы сбора данных [IX], [XI], [XII] поляриметров ЛВЭ: высокоэнергетического на выведенном пучке, а также на внутренней мишени Нуклотрона – векторного поляриметра [XIII] и впоследствии – векторно-тензорного поляриметра.

#### Основные результаты диссертации опубликованы в работах:

- [I] Ю.С.Анисимов, ..., А.Ю.Исупов и др. Изучение зависимости сечений фрагментации релятивистских дейтронов в кумулятивные  $\pi^-$ -мезоны от атомного веса ядра мишени. *Ядерная Физика*, **60**(6), 1070–1077, (1997).
- [II] Ю.С.Анисимов, ..., А.Ю.Исупов и др. Измерение тензорной анализирующей способности реакции фрагментации тензорно-поляризованных дейтронов с импульсом от 6,2 до 9,0 ГэВ/с в кумулятивные пионы. *Краткие сообщения ОИЯИ*, **5**[73]–**95**, 31–40, (1995).
- [III] S.V.Afanasiev, ..., A.Yu.Isupov, A.G.Litvinenko, et al. Measurement of the Tensor Analyzing Power for the Reaction of Fragmentation of Tensor Polarized Deuterons into Cumulative Pions. In *Proc. of the VI Workshop on High Energy Spin Physics*, pages 55–62, Protvino, (1996).
- [IV] S.Afanasiev, ..., A.Yu.Isupov, T.Iwata, et al. Tensor Analyzing Power  $T_{20}$  for Cumulative Pion Production from Deuterons in the GeV Energy Region. *Nuclear Physics A*, **A(625)**, 817–831, (1997).
- [V] S.V.Afanasiev, ..., A.Yu.Isupov, et al. Fragmentation of Tensor Polarized deuterons into cumulative pions. *Phys.Lett.B*, **B(445)**, 14–19, (1998).
- [VI] S.Afanasev, ..., A.Isupov, T.Iwata, et al. Measurement of  $T_{20}$  for the cumulative pion production from tensor polarized deuterons in the momentum region 6.2–9.0 GeV/c. In *Proc. of the 12th Int. Symposium on High Energy Spin Physics*, SPIN'96, pages 371–373, Amsterdam, The Netherlands, (1996). World Scientific, Singapore, 1997.
- [VII] K.I.Gritsaj and A.Yu.Isupov. A Trial of Distributed Portable Data Acquisition and Processing System Implementation: the  $qdpb$  – Data Processing with Branchpoints. *JINR Communications*, **E10–2001–116**, 1–19, (2001).

- [VIII] A.Yu.Isupov. Configurable Data and CAMAC Hardware Representations for Implementation of the SPHERE DAQ and Offline Systems. In *Proceedings of the International Workshop – Relativistic Nuclear Physics: from Hundreds of MeV to TeV*, volume II of *RNP'2001*, pages 204–214, Varna, Bulgaria, (2001). JINR, Dubna, 2001.
- [IX] A.Yu.Isupov. DAQ System for High Energy Polarimeter at the LHE, JINR: Implementation Based on the *qdpb* (Data Processing with Branchpoints) System. In *Proceedings of the International Workshop – Relativistic Nuclear Physics: from Hundreds of MeV to TeV*, volume I of *RNP'2001*, pages 160–168, Varna, Bulgaria, (2001). JINR, Dubna, 2001.
- [X] A.Yu.Isupov. SPHERE DAQ and off-line systems: implementation based on the *qdpb* system. In *Proceedings of the International Workshop – Relativistic Nuclear Physics: from Hundreds of MeV to TeV*, RNP'2003, pages 214–228, Stara Lesna, Slovakia, (2003). JINR, Dubna, 2003.
- [XI] A.Yu.Isupov. Software for realtime polarimetry on the LHE Nuclotron: design, implementation and usage. In *Proceedings of the XIX International Symposium on Nuclear Electronics and Computing*, NEC'2003, pages 157–163, Varna, Bulgaria, (2003). JINR, Dubna, 2004.
- [XII] A.Yu.Isupov. Data acquisition systems for the high energy and Nuclotron internal target polarimeters with network access to polarization calculation results and raw data. *Czech. J. Phys. Suppl.*, **A55**, A407–A414, (2005).
- [XIII] Ю.С.Анисимов, . . . , А.Ю.Исупов и др. Поляриметр для внутреннего пучка Нуклотрона. *Письма в ЭЧАЯ*, **1**(1[118]), 68–79, (2004).

### Дополнительная литература

- [1] A.G.Litvinenko, A.I.Malakhov, and P.I.Zarubin. Scale Variable for Description of Cumulative Particle Production in Nucleus–Nucleus Collisions. *JINR Rapid Communications*, **1**[58]–93, 27–34, (1993).
- [2] А.М.Балдин. *Физика элементарных частиц и атомного ядра*, **8**(3), 429, (1977).
- [3] А.В.Ефремов. *Физика элементарных частиц и атомного ядра*, **13**(3), 613, (1982).
- [4] В.С.Ставинский. *Физика элементарных частиц и атомного ядра*, **10**(5), 949, (1979).
- [5] В.К.Лукьянов и А.И.Титов. *Физика элементарных частиц и атомного ядра*, **10**(4), 815, (1979).
- [6] W.Haeblerli. *Ann. Rev. Nucl. Sci.*, **17**, 373, (1967).
- [7] Л.И.Лapidус. *Физика элементарных частиц и атомного ядра*, **15**(3), 493, (1984).
- [8] Н.Н.Barshall and W.Haeblerli. In *Proc. 3rd Int. Symp. Polarization Phenomena Nucl. Reactions*, page XXV, Madison, USA, (1970). Univ. of Wisconsin Press, Madison, 1971.
- [9] L.J.B.Goldfarb. *Nucl.Phys.*, **7**, 622, (1958).
- [10] W.Lakin. *Phys.Rev.*, **98**, 139, (1955).
- [11] L.Zolin, A.Litvinenko, and P.Rukoyatkin. The Study of the Tensor Analyzing Power in Cumulative Particle Production on a Polarized Deuteron Beam at the Dubna Synchrophasotron. *JINR Rapid Communications*, **1**[69]–95, 53, (1995).
- [12] I.B.Issinsky et al. *Acta Phys. Polonica*, **25**, 673, (1994).
- [13] A.A.Belushkina et al. In *Proc. of the 7-th Int. Symp. on High Energy Spin Physics*, volume 2, page 215, Protvino, USSR, (1986). IHEP, Serpukhov, 1987.

- [14] V.G.Ableev et al. Nucl.Instr.and Meth.in Phys.Res., A(306), 73, (1991).
- [15] Л.С.Золин, А.Г.Литвиненко, Ю.К.Пилипенко, С.Г.Резников, П.А.Рукояткин и В.В.Фимушкин. Мониторинг тензорной поляризации дейтронных пучков высокой энергии. Краткие сообщения ОИЯИ, 2[88]–98, 27–36, (1998).
- [16] R.Brun et al. *GEANT Users Guide.*, volume Entry W5013 of *CERN Program Library*. CERN, Geneva, Switzerland, (1994).
- [17] Л.С.Ажгирей и др. Приборы и техника эксперимента, 1, 51, (1997).
- [18] T.Aono et al. Phys.Rev.Lett., 74, 4997, (1995).
- [19] L.S.Azhgirey et al. Phys.Lett.B, B(387), 37, (1996).
- [20] L.L.Frankfurt and M.I.Strikman. Nuclear Physics A, A(407), 557, (1983).
- [21] M.V.Tokarev. In *Proceedings of the International Workshop DEUTERON'91*, volume E2–92–25 of *DEUTERON'91*, page 84, Dubna, Russia, (1991). JINR, Dubna, 1992.
- [22] A.Yu.Illarionov, A.G.Litvinenko, and G.I.Lykasov. Czech. J. Phys. Suppl., A51, A307, (2001).
- [23] A.Yu.Illarionov, A.G.Litvinenko, and G.I.Lykasov. Polarization Phenomena in Fragmentation of Deuterons to Pions and Non-nucleon Degrees of Freedom in the Deuteron. Eur. Phys. J., A(14), 247, (2002).
- [24] А.Ю.Илларионов, А.Г.Литвиненко и Г.И.Лыкасов. Теоретический анализ тензорных анализирующих способностей в реакции фрагментации дейтронов в пионы. Ядерная Физика, 66(2), 1–14, (2003).

Получено 27 октября 2005 г.