

K-903

81684



ОБЪЕДИНЕННЫЙ ИНСТИТУТ ЯДЕРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

1-2007-44

На правах рукописи
УДК 539.1.07 + 539.17

КУЛИКОВ
Анатолий Владимирович

МЕТОДЫ ПОСТРОЕНИЯ И РЕАЛИЗАЦИИ СИСТЕМ
ОТБОРА СОБЫТИЙ ПО ХАРАКТЕРНЫМ ПАРАМЕТРАМ
ПАР ЧАСТИЦ В КОНЕЧНОМ СОСТОЯНИИ
В ЭКСПЕРИМЕНТАХ В ГэВ-НОЙ ОБЛАСТИ ЭНЕРГИЙ

Специальность: 01.04.01 — приборы и методы
экспериментальной физики

Автореферат диссертации на соискание ученой степени
доктора физико-математических наук

Объединенный институт
ядерных исследований
БИБЛИОТЕКА

Работа выполнена в Лаборатории ядерных проблем им. В.П.Джелепова
Объединенного института ядерных исследований.

Официальные оппоненты:

доктор физико-математических наук,
профессор

Будагов
Юлиан Арамович

доктор физико-математических наук,
профессор

Нурушев
Сандибек Байтемирович

доктор физико-математических наук,
профессор

Смирнова
Лидия Николаевна

Ведущая организация:

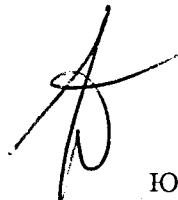
Институт теоретической и экспериментальной физики им. А.И.Алиханова

Защита диссертации состоится " ____ " _____ 2007 года в ____ часов
на заседании диссертационного совета Д 720.001.03 в Объединенном ин-
ституте ядерных исследований,
141980, г. Дубна, Московская область, Россия.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ОИЯИ.

Автореферат разослан " ____ " _____ 2007 года

Ученый секретарь диссертационного совета
доктор физико-математических наук,
профессор



Ю.А.Батусов

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы

При проведении экспериментальных исследований в области физики частиц и атомного ядра необходимо оптимальным образом организовать взаимодействие всех компонент экспериментальной установки: детекторов, триггерной системы и аппаратуры сбора данных. Все эти системы должны работать согласованно, обеспечивая высокую скорость приема данных при максимальной эффективности регистрации событий изучаемой реакции.

Задачей триггерной системы в любом эксперименте на ускорителе является выделение событий исследуемого процесса из большого потока информации с детекторов и управление системой сбора данных, которая осуществляет передачу и накопление отобранной полезной информации. При изучении редких процессов создание высококачественной системы отбора событий становится особенно актуальным: в условиях, когда общая частота взаимодействий на много порядков величины превосходит скорость генерации событий исследуемой реакции, необходимо максимальным образом подавить регистрацию всех процессов, не связанных с поставленной физической задачей.

Многие исследования фундаментальной важности проводятся на установках среднего масштаба, характерных для промежуточных энергий и нижнего сегмента области высоких энергий (до ~ 20 ГэВ). Триггерные системы таких экспериментов (к которым относятся все рассматриваемые в данной диссертации) имеют ряд особенностей, отчасти связанных с ограниченными доступными ресурсами, как материальными, так и по числу участников работ. Продуманное использование критериев оценки событий и применение многоуровневого отбора с помощью аппаратных процессоров позволяют, тем не менее, и в этих экспериментах создавать эффективные триггерные системы. Важным фактором при их построении является также умелое использование коммерчески доступной электроники, позволяющее сократить сроки создания аппаратуры и объем новых электронных разработок.

Диссертация посвящена вопросам создания триггерных систем трех экспериментов: ДИРАК в ЦЕРН, ANKE в Исследовательском центре Юлих и PAX в GSI. Физические цели этих экспериментов заметно различаются, однако в отношении отбора событий они имеют общую черту: в конечном состоянии регистрируются две частицы с характерными для изучаемого процесса параметрами. Разработка методов использования таких отличительных свойств при отборе событий позволяет создавать триггер-

ные системы, обеспечивающие существенное подавление фоновых запусков при высокой эффективности регистрации полезных событий.

Цель работы

К началу настоящей работы триггерных систем для экспериментов ДИРАК и ANKE не существовало, а сами установки находились в стадии проектирования. Для проекта PAX не имелось каких-либо оценок триггерных возможностей. Целью работы являлось:

1. Разработка и создание многоуровневого триггера установки ДИРАК в ЦЕРН для отбора пар частиц с малым относительным импульсом с целью измерения времени жизни атома, состоящего из положительного и отрицательного π -мезонов.
2. Разработка и реализация логики считывания информации, оптимизированной для уменьшения мертвого времени.
3. Разработка и создание триггерной системы переднего детектора установки ANKE на ускорителе COSY для изучения развала дейтрона протонами $pd \rightarrow (pp)n$, однопионного рождения $pp \rightarrow (pp)\pi^0$ и других процессов.
4. Исследование возможных способов построения триггерной системы для планируемого эксперимента PAX в GSI в области спиновой физики высоких энергий.

Научная новизна работы

Разработаны и реализованы методы построения триггерных систем для изучения процессов, сопровождающихся испусканием пар частиц, и с их применением получены новые физические результаты, в том числе

в эксперименте ДИРАК в ЦЕРН:

- Создана многоуровневая триггерная система, впервые выполняющая отбор пар частиц с малыми относительными импульсами. Система является полностью компьютерно-управляемой и не требует ручных операций.
- Разработаны и реализованы многоступенчатые процедуры контроля за качеством работы триггерной системы.

- Разработана и реализована логика считывания данных, позволяющая, путем оптимального взаимодействия с триггерной системой и с учетом временной структуры пучка ускорителя, сократить мертвое время.
- Разработан новый метод измерения потерь из-за мертвого времени аппаратуры с учетом всех его возможных источников.
- С применением созданной триггерной системы впервые измерено время жизни $\pi^+\pi^-$ атомов.

в экспериментах на установке ANKE на ускорителе COSY (Юлих):

- Создана триггерная система переднего детектора, позволившая выполнить большинство экспериментов на ANKE, в частности, впервые измерить сечения процессов с образованием протонной пары в 1S_0 состоянии: развала дейтронов протонами $pd \rightarrow (pp)_s n$ в коллинеарной кинематике при 0,6–1,9 ГэВ и однопионного рождения $pp \rightarrow (pp)_s \pi^0$ при 0,8 ГэВ, а также исследовать околопороговое рождение η и ω -мезонов и другие процессы.
- Разработан и реализован топологически-независимый триггерный отбор пар частиц в переднем детекторе, позволивший существенно уменьшить мертвое время и повысить скорость набора полезных событий.

в проекте PAX для GSI:

- Впервые проведен анализ особенностей установки PAX с точки зрения использования детекторов в триггерной системе.
- Впервые предложена возможная архитектура триггерной системы.

Научно-практическая значимость работы

Система многоуровневого триггера для эксперимента ДИРАК обеспечила успешное проведение исследований пионных атомов, в которых было измерено их время жизни, и послужит основой для второго этапа эксперимента, на котором будут изучаться также и πK атомы. Разработанные процедуры контроля за качеством работы триггерной системы, методы создания полностью компьютерно-управляемой системы отбора событий в реальном времени, методы измерения потерь из-за мертвого времени,

эффективная организация совместной работы аппаратуры сбора данных и многоуровневого триггера, позволяющая сократить мертвое время установки, могут быть полезны при проектировании других экспериментов.

Триггерная система переднего детектора ANKE позволила провести эксперименты по изучению развала дейтрона протонами $pd \rightarrow (pp)n$ с большой передачей импульса протонной паре, исследовать одноионное рождение $pp \rightarrow (pp)\pi^0$, а также обеспечила получение физических результатов и во многих других экспериментах на ANKE. Аппаратура и логика топологически-независимого двухчастичного триггера могут найти применение на других установках, в которых используются годоскопические детекторы.

Впервые рассмотрены вопросы, касающиеся создания триггерной системы для эксперимента PAX, предложенного для исследований с поляризованными антипротонами на новом ускорительном комплексе GSI. Этот анализ закладывает основу для создания в дальнейшем триггерной системы эксперимента PAX, многообещающего проекта в спиновой физике высоких энергий.

Материалы исследований, выполненных по теме диссертации, используются автором в учебных курсах, читаемых студентам МФТИ и Учебного центра ОИЯИ.

Автор защищает:

1. Результаты работ по созданию многоуровневого триггера установки ДИРАК с отбором событий, основанном на величине относительного импульса частиц пары.
2. Методы, разработанные для компьютерного управления триггерной системой с исключением ручных операций.
3. Методы полного контроля за качеством работы триггерной системы, реализованные в эксперименте ДИРАК.
4. Решения, реализованные для оптимального взаимодействия триггерной системы с системой сбора данных, и методы измерения потерь из-за мертвого времени.
5. Результаты работ по созданию триггерной системы переднего детектора установки ANKE, включая разработку топологически-независимого отбора пар частиц.
6. Предложенную архитектуру триггера для планируемого эксперимента PAX.

Апробация работы и публикации

Результаты работ, на которых основана диссертация, докладывались автором на семинарах Лаборатории ядерных проблем ОИЯИ, Института ядерной физики Исследовательского центра Юлих, рабочих совещаниях коллабораций ДИРАК, ANKE, PAX, международной конференции по ядерной физике на накопительных кольцах STORI05 (Бонн, 2005), международной конференции по спиновой физике адронов (Тбилиси, 2006), а также были представлены на ряде других международных конференций (STORI02, Уппсала, 2002; HadAtom03, Тренто, 2003; HadAtom05, Берн, 2005; HADRON05, Рио де Жанейро, 2005; ICHEP2006, Москва, 2006).

Основные результаты диссертации опубликованы в российских и зарубежных журналах [1,3-5,8,10,14,16,18-20,22,24,26], материалах конференций [25,27], а также в виде препринтов ОИЯИ [17,23] и других изданий [2,6,7,9,11-13,15,21].

Объем и структура работы

Диссертационная работа изложена на 164 страницах и состоит из введения, четырех глав и заключения, содержит 57 рисунков, 2 таблицы и список цитируемой литературы из 114 наименований.

СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ

Во введении отмечена актуальность решаемой проблемы и изложена структура диссертации.

В первой главе обсуждаются общие требования к триггерным системам и методы их реализации [1].

Главными задачами, решаемыми системой отбора событий в любом эксперименте на ускорителе, являются *i*) подавление регистрации фоновых событий, не связанных с исследуемым процессом, и *ii*) эффективная регистрация событий исследуемой реакции. Критерии отбраковки фоновых событий, заложенные в логику отбора, не должны заметно подавлять прием полезных событий.

Кроме того, качество работы триггерной системы характеризуют и другие факторы: быстрота принятия решения о записи либо отбраковке события, возможность гибкого изменения критериев отбора, возможность параллельного функционирования разных типов триггеров, простота эксплуатации, допускающая использование системы экспериментаторами, не

газовые черенковские счетчики Ch, ливневые счетчики PSh и мюонные детекторы Mu, состоящие из двух плоскостей сцинтилляционных счетчиков, расположенных за поглотителем из железа.

При типичной интенсивности протонного пучка, равной 10^{10} протонов за сброс пучка (длительностью 400–500 мс), одиночные счета детекторов составляли за сброс около 3×10^6 в детекторах до магнита и до 8×10^5 после магнита. Триггерная логика должна была обеспечить снижение скорости поступления событий до уровня, приемлемого для системы сбора данных, который составлял около 2000 событий за сброс. Пионные пары рождаются в мишени, главным образом, в свободном состоянии и имеют широкое распределение по относительному импульсу Q . Триггерная система отбрасывала пары с $Q_L > 30$ МэВ/с или $Q_x > 3$ МэВ/с или $Q_y > 3$ МэВ/с, но в то же время обеспечивала высокую эффективность регистрации пар с компонентами Q ниже этих значений. (Q_L , Q_x и Q_y – продольная и две поперечные компоненты относительного импульса, соответственно.) Значение критерия отбраковки событий $Q_L > 30$ МэВ/с преднамеренно выбрано существенно большим, чем максимальное для $A_{2\pi}$ значение $Q_L = 3$ МэВ/с для того, чтобы проследить за формой распределения по Q за пределами области физического сигнала.

В установке ДИРАК реализован многоуровневый триггер [4] с использованием аппаратных процессоров. В выработке триггера участвовали, на разных уровнях, все детекторы, за исключением MSGC и Mu.

В течение нескольких лет проведения эксперимента схема триггера постоянно развивалась. Можно выделить его две основные конфигурации.

В первоначальной версии триггера использовалась схема, показанная на Рис. 2, включающая, помимо триггера 1-го уровня T1, триггерные процессоры T2, T3 и DNA (DIRAC Neural Atomic trigger). Триггер T1 в совпадении с T2 инициирует оцифровку данных в электронных модулях системы сбора данных (ADC, TDC, счетчики, регистры). На следующем уровне отбора используются триггерные процессоры T3 и DNA, накладывающие дополнительные ограничения на величину относительного импульса пары. Быстрый предварительный триггер T0 служит для запуска процесса обработки события в подсистемах T2 и DNA. Положительные решения T3 и DNA объединяются по функции ИЛИ для повышения эффективности к полезным событиям. В случае отрицательного решения в обоих процессорах T3 и DNA, производится быстрый сброс, и системы выработки триггера и сбора данных возвращаются в состояние готовности к приему нового события.

В окончательной, основной версии триггерной системы, Рис. 3, был внедрен процессор T4, использующий информацию с дрейфовых камер,

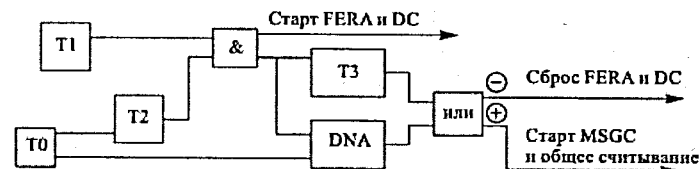


Рис. 2: Первоначальная версия многоуровневого триггера установки ДИРАК.

а нейронный триггер DNA был расширен до версии DNA/RNA (Revised Neural Atomic trigger) с улучшенными характеристиками. Это позволило существенно усилить избирательность триггера, а также повысить его эффективность к полезным событиям. С внедрением T4 и DNA/RNA триггерная логика T2 и T3 уже не обеспечивала вклада в избирательность и эффективность триггера и поэтому была исключена.

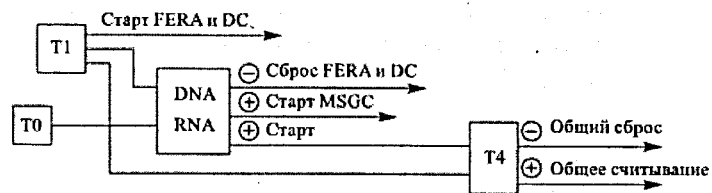


Рис. 3: Окончательная версия многоуровневого триггера установки ДИРАК.

Триггер первого уровня T1. Для выработки триггера первого уровня [5–7] используются сигналы со сцинтилляционных годоскопов VH и HH, черенковских счетчиков Ch и ливневых счетчиков PSh в каждом из плеч спектрометра, а также (в качестве опции) с годоскопа IH, расположенного до спектрометрического магнита.

Триггер первого уровня:

- 1) организует совпадения сигналов с детекторов отдельно в каждом из плеч спектрометра;
- 2) классифицирует частицу в каждом плече как пион или электрон²;

²На триггерном уровне в класс "пионов" включаются также протоны, каоны и мюоны.

- 3) организует совпадения между двумя плечами спектрометра;
- 4) для пионных пар выполняет отбор по копланарности;
- 5) отбирает события ряда физических процессов, необходимых для калибровки установки.

Надежное разделение пионов и электронов на триггерном уровне производится с использованием газового черенковского счетчика Ch. Различное включение сигналов Ch в логику отбора позволяет реализовать триггер с участием электронов либо, наоборот, с подавлением событий, в которых присутствуют электроны. Исследования прототипа черенковского счетчика [8] позволили создать детектор с эффективностью к электронам выше 99,5%.

Пионные пары подвергаются анализу на копланарность с использованием сигналов горизонтальных годоскопов НН. Поскольку относительный импульс пионов от развала пионного атома не превышает 3 МэВ/с, вертикальная составляющая относительного импульса, Q_y , также ограничена этим значением. Малые значения Q_y соответствуют малым расстояниям Δy между пионами в левом и правом плечах спектрометра. Поэтому отбрасывание триггером событий с большими значениями Δy приводит лишь к подавлению фона, не затрагивая полезных событий. Величина Δy в событии оценивается по разности номеров $N_{НН1}$ и $N_{НН2}$ сработавших счетчиков годоскопов.

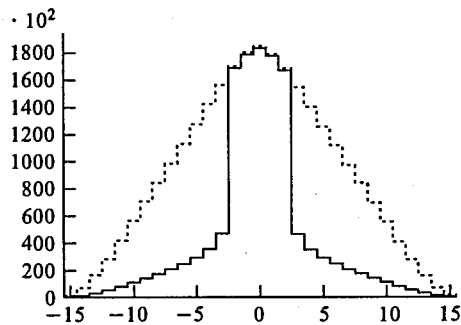


Рис. 4: Отбор по копланарности: распределение по разности номеров сработавших счетчиков в горизонтальных годоскопах НН1 и НН2. Сплошная линия – включен отбор $\Delta N \leq 2$, штриховая линия – без отбора.

Отбор по копланарности выполняется в специально разработанном³ электронном модуле. Схема проверки копланарности осуществляет такой

³Разработка выполнена В.В.Карпухиным.

отбор за 15 нс и уменьшает количество триггеров в 2 раза. На Рис. 4 показано распределение событий по величине разности $|N_{НН1} - N_{НН2}|$ при включенном и выключенном отборе.

Предварительный триггер T0. Для работы триггерных процессоров T2 и DNA/RNA необходим стартовый сигнал с возможно более короткой задержкой. Для этой цели формируется быстрый предварительный триггер T0 [9], вырабатываемый простыми совпадениями сигналов VH и PSh в самом начале их электронной цепи.

Триггер T2 – отбор по Δx . Триггер T2 организован для отбора пар частиц с малым расстоянием по горизонтальной координате x . В результате отбрасываются события с большими значениями компоненты Q_x относительного импульса. Отбор производится по сигналам ионизационного годоскопа ИИ и сцинтилляционного фиберного детектора SFD. Типичные значения относительного импульса пионов от развала $A_{2\pi}$ соответствуют в этой области расстояниям между частицами $\Delta x \leq 9$ мм.

Триггер T2 включает три независимые моды, поясненные на Рис. 5. В модах 1 и 2 используется информация с ионизационного годоскопа ИИ, а в моде 3 – сцинтилляционного фиберного детектора SFD. Решения всех трех мод триггера T2 объединяются по функции ИЛИ.

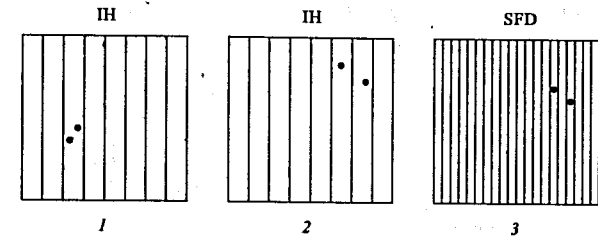


Рис. 5: Различные моды триггера T2. Для положительного решения требуется выполнение хотя бы одного из условий: 1 – двукратные ионизационные потери в одном счетчике первой плоскости ИИ и в сдвинутом на пол-шага соответствующем счетчике второй плоскости; 2 – срабатывание двух соседних счетчиков в первой или второй плоскости ИИ; 3 – сигналы с двух фиберных колонок в SFD, находящихся на расстоянии $\Delta x \leq 9$ мм.

Возможности использования сцинтилляционных фиберных детекторов для организации топологического триггера исследовались в [10]. Было показано, что применение многоанодных фотоумножителей и специального алгоритма электронной обработки сигналов позволяет сделать взаимное влияние каналов (*cross-talk*) несущественным и построить быстрый и эф-

фективный триггер. Детальное обсуждение использования ионизационного годоскопа ИИ в триггере Т2, а также разработка блок-схемы электроники выполнены в [11].

Коэффициент подавления запусков при применении триггера Т2 составляет около 1,4 по отношению к Т1. При этом эффективность регистрации событий с малыми Q составляет 90–95%.

Триггер Т3. Для дальнейшего подавления событий с большими значениями относительного импульса пары используется триггерный процессор Т3, в котором производится анализ карты сработавших элементов в вертикальных годоскопах VН1, VН2 и в ионизационном годоскопе ИИ. Возможные методы реализации такого отбора были впервые рассмотрены в [12]. Один из двух предложенных там способов впоследствии осуществлен на практике⁴.

Если регистрируется пара частиц с малым значением продольной составляющей относительного импульса ($Q_L < 30$ МэВ/с), то существует корреляция между номерами счетчиков, сработавших в VН1 и VН2: при попадании одной частицы в счетчик VН2_{*i*} частица в другом плече может быть обнаружена лишь в ограниченной группе счетчиков VН1_{*j*} ÷ VН1_{*k*}, см. Рис. 6. Избирательность алгоритма отбора становится намного лучше, если использовать также информацию об X -координатах частиц до входа в магнит, которую предоставляет годоскоп ИИ.

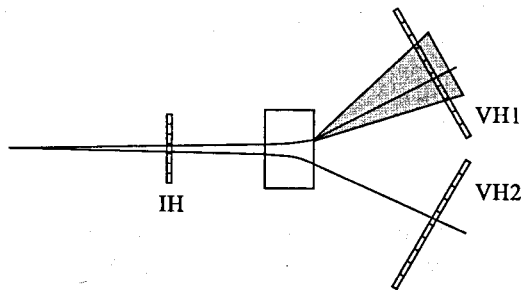


Рис. 6: Корреляция срабатываний вертикальных годоскопов VН1, VН2 и ионизационного годоскопа ИИ, используемая в логике отбора процессора Т3.

Логика отбора Т3 организована на базе программируемого универсального логического модуля LeCroy 2366. Интегральная схема *Xilinx* этого модуля запрограммирована в соответствии с необходимым триггерным ал-

⁴M.Gallas. NIM, A482 (2002) 222.

горитмом. Корреляционные карты допустимых срабатываний VН1, VН2 и ИИ были получены путем моделирования методом Монте-Карло и впоследствии проверены на экспериментальных данных.

Коэффициент подавления числа триггеров схемой Т3 при типичных условиях эксперимента составляет 2,0 по отношению к Т1. Эффективность Т3 к парам с малыми относительными импульсами составляет 97%.

Триггеры DNA и RNA. Еще один быстрый процессор⁵ для отбора событий с малыми Q создан на базе нейронной сети. Принцип отбора событий с малыми значениями относительного импульса близок к используемому в процессоре Т3, то есть заключается в учете корреляций срабатывания элементов детекторов в двух плечах спектрометра после магнита и в области до магнита. Подсистема DNA использует сигналы с ионизационного годоскопа ИИ, вертикальных годоскопов VН и ливневых счетчиков PSh, в то время как в RNA вместо ИИ анализируются данные со сцинтилляционного волоконного детектора SFD.

Нейронная сеть была тренирована на регистрацию пар частиц, удовлетворяющих критериям отбора по малой величине относительного импульса пары. Обучение системы производилось с помощью событий, построенных путем моделирования по методу Монте-Карло. В дальнейшем параметры алгоритма отбора и характеристики DNA/RNA в целом были проверены на экспериментальных данных.

Аппаратура DNA/RNA начинает обработку события с приходом предварительного триггера Т0 и выдает решение через фиксированное время, равное 250 нс. Коэффициент подавления фона составляет 1,9–2,0, эффективность к событиям с малыми Q равна 99%.

Триггер Т4 – отбор событий с использованием информации с дрейфовых камер. Триггер Т4 является завершающим уровнем отбора. В нем восстанавливаются прямолинейные треки в X -проекции и анализируются их параметры по отношению к относительному импульсу двух частиц. Процессор Т4 работает только с номерами проволок, времена дрейфа в триггере не используются⁶.

Процессор Т4 состоит из двух частей: распознавателей треков и анализатора треков. Принцип действия Т4 иллюстрируется на Рис. 7.

Распознаватель треков производит поиск сработавших проволок в пределах коридора заданной ширины с использованием опорных плоскостей. Если трек найден, ему присписывается уникальное значение "идентификатора трека". Если хотя бы по одному треку найдено в обоих плечах спектрометра, к работе приступает анализатор треков.

⁵P.Kokkas et al. NIM, A471 (2001) 358.

⁶Электроника Т4 разработана В.В.Карпухиным.

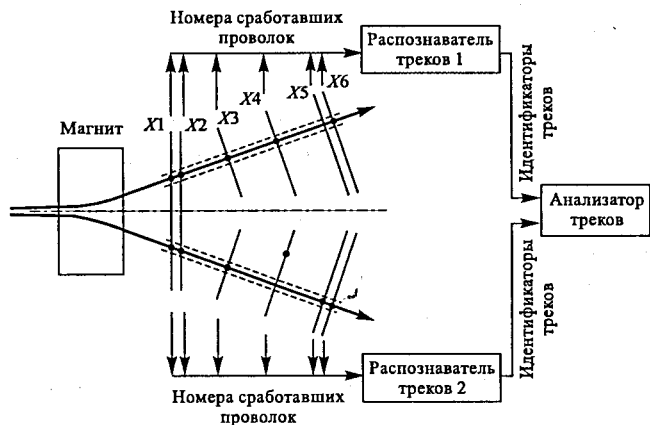


Рис. 7: Схема прохождения данных в триггерном процессоре дрейфовых камер T4. X1(X2), X5(X6) – опорные плоскости.

В анализатор треков поступают все найденные в данном событии идентификаторы треков, и среди них производится поиск пары, удовлетворяющей критериям $Q_L \leq 30$ МэВ/с и $Q_x \leq 3$ МэВ/с. В память процессора занесены необходимые для этого данные, полученные путем моделирования методом Монте-Карло с использованием точной геометрии установки. Как и в случае других триггерных процессоров, результаты моделирования проверялись на экспериментальной информации перед включением T4 в качестве активного триггера.

Время решения в процессоре T4 зависит от сложности события и составляет в среднем 3,5 мкс. Триггер T4 уменьшает поток событий в 5 раз по отношению к T1 или в 2,5 раза по отношению к DNA/RNA. При этом эффективность к событиям в области малых Q превышает 99%.

В окончательной версии полного триггера (Рис. 3) скорость счета составляла около 700 за сброс, что вполне соответствовало возможностям системы сбора данных, позволявшей принимать до 2000 событий.

Качество работы триггерной системы можно иллюстрировать распределениями по относительному импульсу и эффективностью регистрации событий с малыми Q . На Рис. 8 показано распределение событий по относительному импульсу после прохождения отдельных ступеней триггерного отбора. Видно, как по мере ужесточения отбора происходит обрезание событий с большими Q . На Рис. 9 отобразена зависимость от Q эффек-

тивности регистрации событий различными триггерами. Высокая эффективность при малых Q очевидна и составляет 98% при $Q < 22$ МэВ/с.

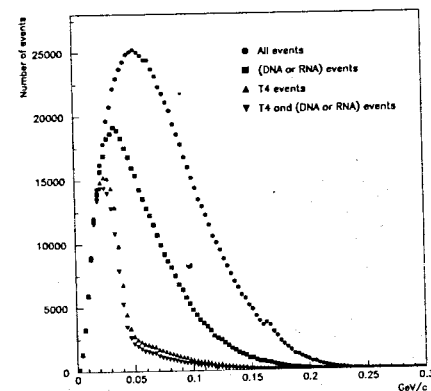


Рис. 8: Распределение по относительному импульсу Q для событий, прошедших различные уровни триггера.

Вспомогательные триггеры. Помимо основного триггера, служащего для набора $\pi^+\pi^-$ пар от развала пионных атомов, организован ряд вспомогательных триггеров, служащих для регистрации событий других физических процессов, а также для калибровки и проверки функционирования аппаратуры. Эти триггеры могут работать параллельно с основным, либо применяться отдельно.

Различные вспомогательные триггеры осуществляют:

- 1) регистрацию e^+e^- пар (для временных калибровок и коррекции долговременного дрейфа аппаратуры);
- 2) выделение распадов $\Lambda \rightarrow p + \pi^-$ (для точной юстировки координатных детекторов по положению, восстановленной массы Λ -гиперона);
- 3) выделение распадов $K^\pm \rightarrow \pi^\pm \pi^+ \pi^-$;
- 4) регистрацию событий с образованием двух пар e^+e^- [13];
- 5) регистрацию $\pi^+\pi^-$ пар без наложения условия копланарности;
- 6) измерение пьедесталов ADC;
- 7) проверку работы систем выработки триггера и сбора данных от генератора, имитирующего реальные события;
- 8) прием данных с использованием простейшего триггера (*minimum bias trigger*) для проверки работы триггерной системы, главным образом, на низших уровнях T1 и T0.

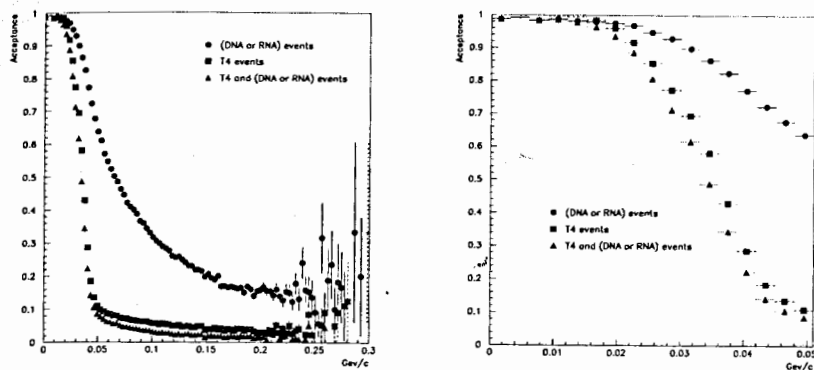


Рис. 9: Эффективность регистрации пар на разных триггерных уровнях как функция Q . Слева – во всем диапазоне, справа – в области малых Q .

Управление триггерной системой и контроль за ее работой. Управление триггерной системой и системой сбора данных полностью выполняется [14] с помощью компьютера. При этом исключены любые ручные операции, которые могли бы потребоваться для изменения триггерных условий (переключение кабелей, тумблеров и т.п.). Это позволило упростить управление и значительно уменьшить вероятность ошибок экспериментаторов при проведении длительных круглосуточных измерений. Состояние всех электронных блоков задается триггерным файлом, который описывает конфигурацию триггерной логики и *front-end* электроники. При загрузке файла в начале цикла измерений задаются значения порогов дискриминации, задержек, ширины сигналов, активируются нужные процессоры, выбираются типы вспомогательных триггеров и коэффициенты деления частоты для них и т.д.

Основная часть электронной аппаратуры эксперимента ДИРАК изготовлена в стандартах КАМАК и VME. Наряду с этим применяются также и модули в стандарте NIM, который не предусматривает связи с компьютером и обычно может использоваться только с ручным управлением. Чтобы осуществить полностью компьютерное управление, те из блоков NIM, состояние которых должно изменяться при разных триггерных условиях, включены в электронную логику специальным образом, с использованием выходных регистров в стандарте КАМАК. Это позволило реализовать управление от компьютера также и для электроники в стандарте NIM.

Качество работы триггерной системы постоянно контролировалась, поскольку ошибки при отборе событий могут приводить к потере данных или к регистрации их смещенной выборки. Такой контроль осуществлялся [14] как в реальном времени, так и путем *off-line* экспресс-анализа данных, получаемых при периодических специальных измерениях, и включал:

- проверку конфигурации электроники и работоспособности электронных модулей при загрузке триггерного файла;
- автоматическое тестирование процессора дрейфовых камер при начале каждого набора данных;
- контроль скорости счета всех типов триггеров на всех триггерных уровнях;
- контроль гистограмм в реальном времени;
- проверку качества работы процессоров при *off-line* экспресс-анализе;
- эпизодическое использование *minimum bias* триггера;
- проверку без пучка с использованием генератора;
- возможность получения сведений (из записанных данных) о параметрах электронной аппаратуры в любом прошедшем цикле измерений.

Для облегчения эксплуатации аппаратуры и диагностики неисправностей была разработана унифицированная техническая документация [15], детально описывающая конфигурацию всей электроники эксперимента.

Система сбора данных. Система сбора данных [16] организована с учетом временной структуры пучка ускорителя PS в ЦЕРН. В течение суперцикла ускорителя (длительностью 15–20 с) на установку ДИРАК производится от 1 до 5 сбросов пучка с интервалом между сбросами не менее 1 с. Чтобы уменьшить мертвое время при приеме данных, во время сброса пучка происходит только передача отобранных триггерной системой событий в буферные памяти, а считывание их содержимого в VME процессор, построение событий и другие относительно медленные компьютерные операции выполняются в промежутках между сбросами пучка.

Архитектура аппаратуры системы сбора данных показана на Рис. 10. Источники данных сгруппированы в ветви таким образом, чтобы в каждой из них получить приблизительно равные размеры под-событий. Всего имеется 12 ветвей считывания: четыре для микростриповых газовых камер MSGC, три для дрейфовых камер DC и пять ветвей FERA для всех остальных детекторов. Каждая ветвь подключена к отдельной буферной памяти в VME крейтах.

Во время сброса пучка все ветви передают в буферные памяти информацию параллельно со скоростью около 10 МГц под управлением созданной системы синхронизации считывания (ССС). СССР вырабатывает

сигнал, по которому начинается передача данных, и затем ожидает, когда передача закончится во всех ветвях. Получив индивидуальные сигналы окончания считывания от каждой ветви, ССС очищает все регистры данных и затем, после охранной паузы, снимает блокирующий сигнал, тем самым разрешая прием нового события.

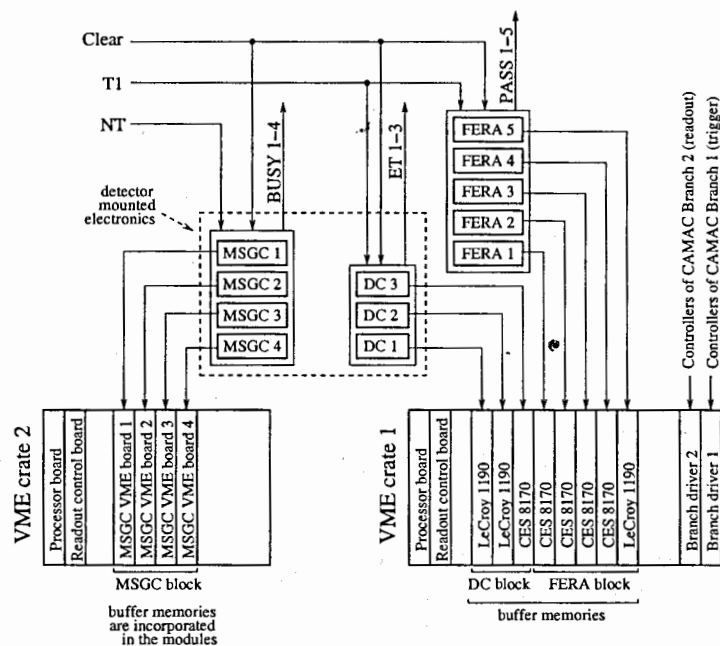


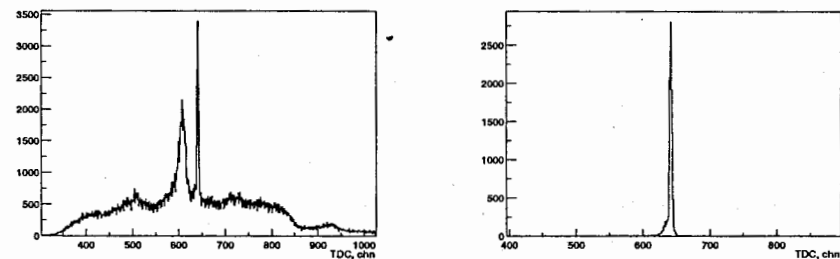
Рис. 10: Архитектура аппаратуры сбора данных эксперимента ДИРАК.

Логика считывания организована таким образом, чтобы минимизировать мертвое время, возникающее при анализе событий процессорами и при передаче данных в буферные накопители. При отрицательных решениях триггерных процессоров вырабатывается сигнал быстрого сброса. Для оптимальной настройки управляющих сигналов *Gate* и *Clear* применительно к разным детекторным группам была организована [17] работа системы FERA с использованием множественных сигналов запуска и очистки, что позволило уменьшить "подхват" случайных сигналов при измерении амплитудных спектров и уменьшить мертвое время.

Мертвое время. В эксперименте ДИРАК вклад в мертвое время дают *front-end* электроника, триггерные процессоры и система сбора данных. Помимо этих "прямых" потерь во время набора информации, мертвое

время в каналах детекторов может сказаться также и при *off-line* анализе данных.

В [18] рассмотрены все источники потерь из-за мертвого времени и описана разработанная процедура их измерения. Во время сброса пучка к сигналам с детекторов подмешиваются тестовые сигналы, относительные задержки которых в разных каналах подобраны такими же, как у реальных событий. Поэтому, если тестовый сигнал генерирован не в мертвое время, он вызывает триггер. Сравнение числа генерированных тестовых событий с числом принятых и записанных системой сбора данных позволяет определить потери с учетом всех источников мертвого времени.



(а) для всех принятых событий (т.е. как от пучка, так и от тестовых сигналов). Вблизи канала 645 – пик от тестовых сигналов
(б) для событий с меткой тестового сигнала, отобранных из того же массива данных

Рис. 11: Временные спектры с тестовыми сигналами в канале вертикального годоскопа VH2.

Более полный анализ мертвого времени, включая также и его роль на этапе *off-line* обработки, можно провести при анализе временных спектров. Поскольку тестовые сигналы подмешиваются к сигналам ФЭУ в самом начале электронного канала, они распространяются по всему электронному тракту и, в частности, регистрируются в TDC соответствующих детекторов наряду с сигналами ФЭУ. Тестовый сигнал должен присутствовать в TDC-спектрах всех детекторов, а его временное положение не должно выходить за пределы, допускаемые при *off-line* обработке. Для иллюстрации на Рис. 11(а) показан временной спектр для всех событий, зарегистрированных в канале годоскопа VH2. Узкий пик от тестовых сигналов ясно выделяется на фоне широкого распределения от частиц, детектированных в истинных (в районе канала 600) и случайных совпадениях. На Рис. 11(б) видно, как меняется спектр, если из того же массива данных отобрать только события с меткой тестового сигнала.

Потери статистики из-за мертвого времени в течение эксперимента составляли 30–35%.

Физические результаты. С использованием созданных систем выработки триггера и сбора данных получен значительный экспериментальный материал. На основании анализа около 40% накопленных данных опубликованы первые физические результаты. В [19] показано выделение сигнала от $\pi^+\pi^-$ атомов с большой статистикой (~ 6500 событий). В результате последующей обработки того же массива информации было впервые измерено [20] время жизни пионных атомов:

$$\tau = [2.91_{-0.62}^{+0.49}] \times 10^{-15} \text{ с,}$$

в пределах ошибок совпадающее с теоретическим значением и, как следствие, новым модельно-независимым способом определена разность пионных длин рассеяния

$$|a_0 - a_2| = 0,264_{-0,020}^{+0,033} m_\pi^{-1}.$$

Базовые принципы триггерной системы эксперимента ДИРАК будут использованы на новом этапе исследований, который включает регистрацию πK атомов и измерение их времени жизни, а также позволит увеличить статистику $\pi\pi$ атомов. Необходимая для этого модификация триггерной системы описана в [21] и включает изменения во *front-end* электронике и триггерной логике, что вместе с новой аппаратурой считывания обеспечит более высокую скорость приема данных.

В третьей главе описывается триггер установки ANKE в целом и разработанная триггерная система переднего детектора. Установка ANKE располагается на внутреннем пучке ускорителя COSY в Юлихе (Германия) и служит для проведения исследований в области адронной физики при импульсах пучка до 3,7 ГэВ/с.

На ANKE проводится широкая программа исследований, связанных с рождением мезонов и динамикой NN взаимодействия: Ряд исследуемых процессов включает образование протонной пары в конечном состоянии реакции. Если отобрать только пары с малой относительной энергией, то в таких дипротонах доминирует 1S_0 состояние. Изучение процессов, содержащих в конечном состоянии 1S_0 протонную пару, представляет значительный интерес, поскольку, согласно существующим теоретическим представлениям, ожидается качественное изменение в наблюдаемых характеристиках, связанное с поведением NN взаимодействия на малых расстояниях.

В состав установки ANKE [22], Рис. 12, входит триплет магнитов D1–

D3, мишень, расположенная между D1 и D2, и несколько детекторных групп: боковые детекторы для положительных и отрицательных частиц, передний и задний детекторы, а также спектаторный детектор вблизи мишени для регистрации медленных частиц.

Боковой детектор положительных частиц включает в себя годоскоп *TOF-Start* сцинтилляционных счетчиков, пропорциональные камеры MWPC1,2 и телескопы счетчиков, расположенных на фокальной поверхности D2. Телескопы вырабатывают сигналы *Stop* для времяпролетной системы, а также используются для измерения ионизационных потерь. Аналогичный набор детекторов (с другим количеством элементов) имеется в боковом отрицательном плече.

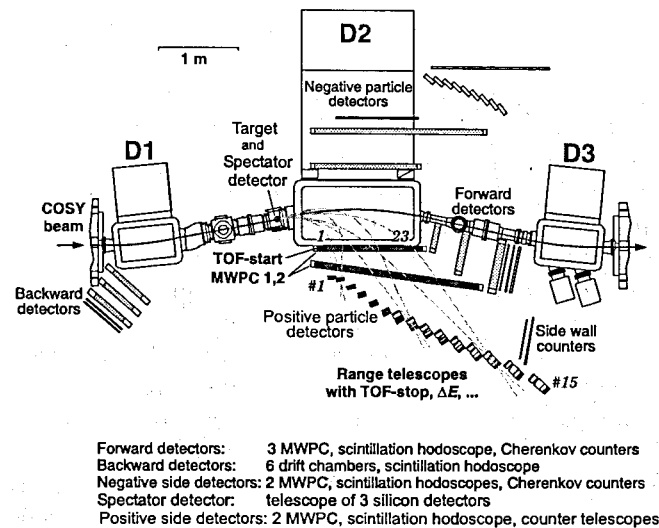


Рис. 12: Схема экспериментальной установки ANKE.

Передний и задний детекторы разработаны и изготовлены в ОИЯИ. Передний детектор⁷ служит для регистрации быстрых фрагментов, вылетающих из мишени под малыми углами ($\lesssim 10^\circ$) и покидающих вакуумную камеру D2 через переднее тонкое окно. Он состоит из трех пакетов

⁷B.Chiladze, ..., A.Kulikov et al. *Particles and Nuclei, Letters*, 4[113] (2002) 95.
 S.Dymov, ..., A.Kulikov et al. *Particles and Nuclei, Letters*, 2[119] (2004) 40.

пропорциональных камер, сцинтилляционного годоскопа и черенковских счетчиков, использующих полное внутреннее отражение. Задний детектор регистрирует частицы, вылетевшие из мишени назад под углами, близкими к 180° в лабораторной системе, покидающими вакуумную камеру через тонкое боковое окно D1, и включает три пакета дрейфовых камер и сцинтилляционный годоскоп.

Спектаторный детектор представляет собой телескоп из трех кремниевых полупроводниковых детекторов и служит для идентификации медленных протонов и дейтронов с энергиями менее 40 МэВ.

Триггер установки ANKE имеет одноуровневую конфигурацию, что связано со свойствами системы сбора данных, используемой в экспериментах на COSY. В зависимости от исследуемого физического процесса, в измерениях участвует та или иная комбинация детекторных групп. В каждой группе детекторов вырабатывается свой индивидуальный триггерный сигнал. Система сбора данных запускается либо непосредственно таким сигналом, либо результатом совпадения триггерных сигналов разных групп.

Телескопы бокового детектора положительных частиц расположены на фокальной поверхности магнита D2, поэтому в каждый из них попадают частицы с примерно одинаковыми импульсами и, следовательно, при разных массах с разными скоростями. Это позволило организовать триггер (*TOF-триггер*)⁸ на определенный тип частицы, основанный на измерении времени пролета между годоскопом *TOF-Start* и телескопами. В боковом детекторе отрицательных частиц триггерная логика ограничена использованием коммерческих схем совпадений NIM.

Для выработки триггера в передней и задней детекторных группах используются сигналы с соответствующих сцинтилляционных годоскопов. Триггерная аппаратура переднего и заднего детекторов [23] изготовлена в стандарте КАМАК и управляется от компьютера. В переднем детекторе, используемом в большинстве экспериментов на ANKE, предусмотрены варианты выработки триггера либо от одиночной частицы, пересекающей плоскости годоскопа, либо от пар частиц. В заднем детекторе применяется только одночастичный триггер.

Схема переднего и заднего годоскопов и их расположение в установке показаны на Рис. 13. Передний годоскоп состоит из двух плоскостей, A и B, с 8 и 9 счетчиками, соответственно, сдвинутых на половину ширины счетчика. Задний годоскоп включает плоскости A и B, каждая по 8 счетчиков, и, в качестве опции, Veto-плоскость из 3 счетчиков, расположенную за клинообразным железным поглотителем.

⁸Разработка *TOF-триггера* (VME) выполнена Р.Шляхертом (ИКР, Юлих).

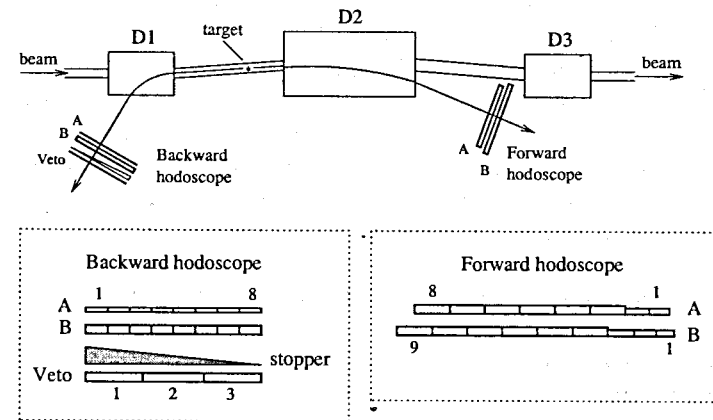


Рис. 13: Схема переднего и заднего годоскопов ANKE и их расположение в установке.

Поскольку в переднем детекторе счетчики в двух плоскостях годоскопа сдвинуты между собой, электронная логика одночастичного триггера конструируется из "мини-башен" T_i , каждую из которых можно логически описать как совпадение $T_i = A_i \cdot (B_i + B_{i+1})$. Полный триггерный сигнал переднего годоскопа формируется как логическое ИЛИ восьми секций $T_1 \div T_8$. С помощью команд по шине КАМАК можно активировать любую комбинацию минибашен T_i .

Потоки частиц через задний детектор малы (обычно менее 1000 с^{-1}), поэтому для детектирования в нем событий требуется простое совпадение сигналов в любом счетчике плоскости A и любом счетчике плоскости B. С помощью команд КАМАК в аппаратуре одночастичного триггера можно активировать триггер только от переднего детектора, только от заднего, либо от их совпадений.

Для выделения процессов с попаданием в передний детектор двух частиц был разработан более жесткий триггер [23]. Использование для этого обычной мажоритарной логики неэффективно, поскольку велика вероятность попадания обеих частиц в один и тот же счетчик годоскопа, в особенности для пар с малой относительной энергией. Поэтому в созданной триггерной аппаратуре отбор пар заряженных частиц производится независимо от топологии события, то есть как для частиц, попавших в разные счетчики годоскопа, так и в один и тот же счетчик. Чтобы различить прохождение одной или двух частиц через сцинтиллятор, используется

информация об амплитудах сигналов.

Триггерная система на две частицы выполнена в стандарте КАМАК и состоит из двух блоков интегратора-дискриминатора и блока логического отбора. В интеграторе-дискриминаторе производится зарядовая дискриминация суммарного сигнала с двух фотоумножителей, просматривающих сцинтиллятор с противоположных концов, и на выходе формируются логические сигналы, информирующие о превышении порога однократной или двойной ионизации в каждом счетчике. Блок логического отбора анализирует комбинации этих сигналов и в результате может генерировать триггерный сигнал.

На Рис. 14 показаны все возможные варианты прохождения частиц через счетчики годоскопа. В блоке логического отбора реализовано построение логических функций, соответствующих всем вариантам топологии события. Любую из них или любую их комбинацию можно активировать с помощью команд КАМАК.

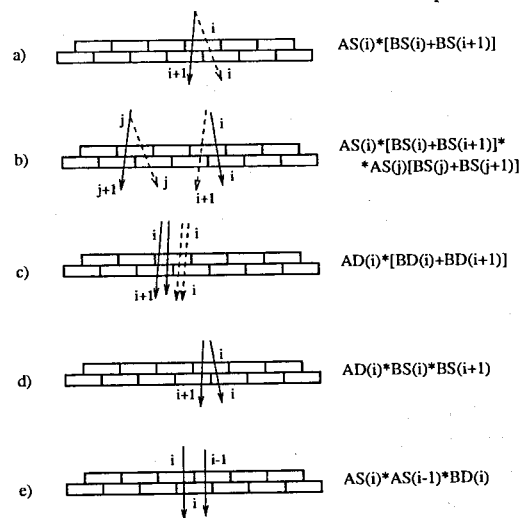


Рис. 14: Возможные комбинации срабатывания счетчиков переднего годоскопа при прохождении а) одной и б)-е) двух частиц. Справа указаны логические формулы отбора. A и B обозначают плоскость годоскопа, $S(i)$ и $D(i)$ – сигналы, соответственно, однократной или двойной ионизации в счетчике i .

Избирательность триггера на две частицы можно охарактеризовать коэффициентом K подавления числа триггеров по отношению к скорости

счета простого одночастичного триггера. Этот коэффициент зависит от энергетического диапазона частиц, попадающих в передний детектор, фоновыми условиями и оптимальным подбором порогов дискриминации для одиночных и двойных частиц.

Первые испытания двухчастичного триггера проводились при регистрации процесса $pd \rightarrow ppn\pi^0$ при энергии протонов 2 ГэВ. Было найдено, что скорость счета подавляется в $K=10 \div 11$ раз (по сравнению с одночастичным триггером), а эффективность регистрации событий искомого процесса составляет 95%. Применение этого триггера в дальнейших экспериментах существенно уменьшило мертвое время системы сбора данных и поэтому позволило в несколько раз увеличить скорость набора полезных событий.

С применением триггерной аппаратуры переднего детектора была впервые измерена⁹ в диапазоне от 0,6 до 1,9 ГэВ энергетическая зависимость развала дейтрона $pd \rightarrow (pp)_s n$ с большой передачей импульса протонной паре в 1S_0 состоянии. Теоретический анализ¹⁰ полученной зависимости позволил выбрать вид нуклон-нуклонного потенциала (*CD Bonn*), с которым достигается удовлетворительное описание экспериментальных данных, в то время как более жесткие потенциалы (*Paris, RSC*) им резко противостоят.

Впервые в области энергий значительно выше порога измерено [24] при 0,8 ГэВ дифференциальное сечение однопионного рождения $pp \rightarrow (pp)_s \pi^0$ с регистрацией 1S_0 дипротона. Полученное сечение на два порядка величины меньше, чем для кинематически аналогичного процесса $pp \rightarrow d\pi^+$, и имеет аномальную угловую зависимость, что демонстрирует различную динамику этих реакций и может быть использовано для проверки существующих моделей пионного рождения.

Функциональные возможности аппаратуры двухчастичного триггера позволяют использовать ее также для отбора событий с применением разных порогов при регистрации одиночных частиц. Такая конфигурация триггера была реализована при исследованиях¹¹ процесса $dd \rightarrow ^4\text{He}n$, где высокий порог применялся для выделения ядер ^4He , а низкий – для параллельной регистрации минимально ионизирующих частиц с целью получения данных для калибровок.

Помимо уже упомянутых процессов, триггерная аппаратура переднего детектора позволила также выполнить эксперименты по окологороговому

⁹V. Komarov, ..., A. Kulikov et al. *Phys. Lett.*, B553 (2003) 179.

¹⁰J. Haidenbauer and Yu. Uzikov. *Phys. Lett.*, B562 (2003) 227.

¹¹A. Wronska, ..., A. Kulikov et al. *Eur. Phys. J.*, A26 (2005) 421.

рождению ω -мезонов¹², измерить векторную и тензорную анализирующие способности в $\bar{d}p$ реакциях¹³, векторную анализирующую способность при развале дейтрона поляризованными протонами¹⁴, а также используется в других исследованиях.

В четвертой главе рассмотрены вопросы, связанные с организацией триггера в планируемом эксперименте PAX¹⁵. Проект PAX предложен для исследований в области спиновой физики высоких энергий на создаваемом комплексе FAIR в GSI, Дармштадт. Отличительной особенностью эксперимента является то, что в нем будет использоваться пучок поляризованных антипротонов высокой интенсивности, недоступный в существующих или планируемых где-либо в мире ускорительных комплексах.

В широкой программе планируемых опытов центральное место занимает определение распределения *transversity*, описывающего поперечную поляризацию кварков в поперечно поляризованном протоне и являющегося последним недостающим звеном для понимания партонной структуры нуклонов в квантовой хромодинамике. Источником получения сведений о *transversity* будет измерение поперечной двуспиновой асимметрии A_{TT} при рождении лептонных пар посредством механизма Дрелла-Яна в процессе $p\uparrow\bar{p}\uparrow \rightarrow e^+e^-X$. Другие физические задачи включают изучение односпиновых асимметрий, электромагнитных формфакторов адронов, жесткого и мягкого рассеяния антипротонов. Как при измерении *transversity*, так и для некоторых других процессов, необходимо выделять e^+e^- пары с большой инвариантной массой.

Планируется осуществить эксперимент в два этапа: сначала с фиксированной поляризованной водородной мишенью в пучке поляризованных антипротонов с импульсом 3,5 ГэВ/с, а затем на протон-антипротонном асимметричном коллайдере с импульсами $3,5(p)\times 15(\bar{p})$ (ГэВ/с)², где оба пучка поляризованы.

Схема детектора PAX приведена на Рис. 15. Он представляет собой широкоапертурный спектрометр с тороидальной конфигурацией магнитного поля. Основной, центральный, детектор имеет геометрическую апертуру в пределах полярных углов от $\pm 20^\circ$ до $\pm 130^\circ$ в лабораторной системе координат. Передний детектор (рассматриваемый в качестве опции) перекрывает область полярных углов от $\pm 8^\circ$ до $\pm 20^\circ$.

Центральный детектор включает в себя 3 двусторонних кремниевых

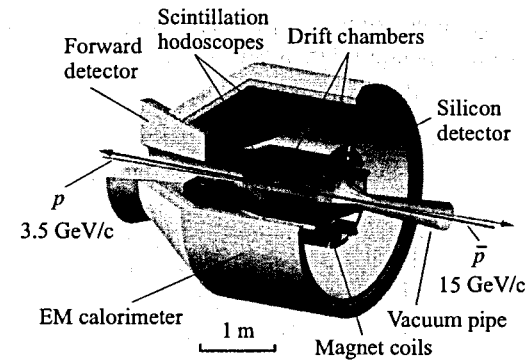


Рис. 15: Схема детектора PAX.

микроstriповых детектора (SiDet), 2 станции дрейфовых камер (DC), газовый черенковский счетчик, электромагнитный калориметр (EMCal) и сцинтилляционные годоскопы (Hod).

Архитектура триггера PAX впервые кратко обсуждалась в [25]. Более подробно возможная структура триггера рассмотрена в [26, 27].

Основные требования к триггерной системе PAXа включают:

- высокую избирательность триггера. При частоте взаимодействий, достигающей нескольких МГц, и множественности около 10, необходимо подавить поток событий не менее чем в 10^3 раз;
- эффективный отбор e^+e^- пар в присутствии большого адронного фона. Сечение процессов с образованием пар Дрелла-Яна составляет $\approx 10^{-7}$ от полного сечения $\bar{p}p$ взаимодействия, поэтому необходим высокий уровень сепарации электронов и адронов на триггерном уровне;
- одновременное функционирование различных типов триггера;
- возможность гибкого изменения триггерной конфигурации при переходе от работы с фиксированной мишенью к коллайдерной стадии эксперимента, а также для изучения новых физических процессов, которые могут вызвать интерес в будущем.

Все эти требования могут быть выполнены, если организовать двухуровневый триггер, в котором анализ событий на первом уровне (*hardware trigger*) реализован на базе аппаратных процессоров, а на втором применяются вычислительные процессоры (*software trigger*) для окончательного отбора полезных данных. В триггерную систему предлагается включить все имеющиеся в установке детекторы и для выделения нужных процессов использовать идентификацию частиц черенковскими счетчиками, локаль-

¹²S. Barsov, ..., A. Kulikov et al. Eur. Phys. J., A31 (2007) 95–104.

¹³D. Chiladze, ..., A. Kulikov et al. Phys. Lett., B637 (2006) 170–175.

¹⁴S. Yaschenko, ..., A. Kulikov et al. Phys. Rev. Lett., 94 (2005) 072304.

¹⁵Antiproton-Proton Scattering Experiments with Polarization (PAX Collaboration). Technical Proposal. arXiv:hep-ex/0505054 v1, 17 May 2005.

ное и полное энергосодержание в калориметре, информацию о множественности, реконструкцию треков в DC и SiDet, восстановление импульсов частиц и вычисление инвариантной массы.

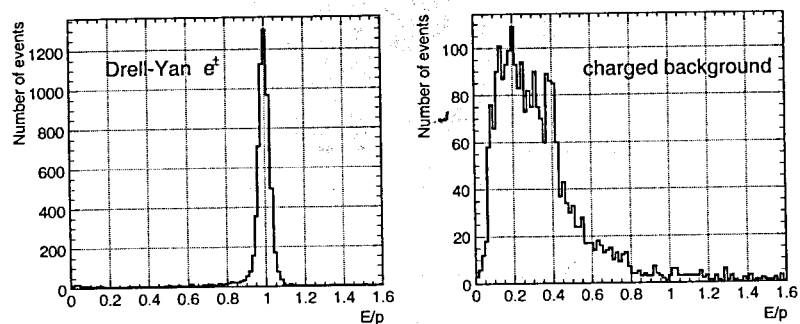


Рис. 16: Ожидаемое отношение энергии E , измеренной калориметром, к импульсу P для электронов из пар Дрелла-Яна (слева) и для фона заряженных частиц (справа).

В [26] показано, что в условиях PAXa для надежной идентификации электронов на триггерном уровне информации только черенковских счетчиков недостаточно. Необходимо также в реальном времени сравнивать величину отношения измеренных для каждой частицы энергии E и импульса P , что потребует использования и других детекторов. На Рис. 16 показаны ожидаемые распределения отношения энергии E , измеренной калориметром, к импульсу P для электронов из процессов Дрелла-Яна и для фоновых заряженных частиц. Из приведенных распределений следует, что при введении границ отбора $E/P = 1.0 \pm 0.1$ достигается значительное, примерно в 50 раз, подавление фона.

Возможная архитектура триггера показана на Рис. 17. Данные с детекторов разветвляются на два канала: в электронную логику триггера первого уровня ($T1$) и в задержки, реализованные как *pipeline memories* и обеспечивающие хранение данных до принятия решения триггером $T1$.

Поток данных фильтруется решениями $T1$, и отобранные под-события складываются в буферные памяти. Триггер второго уровня, $T2$, получает данные из буфера, строит событие и анализирует его в соответствии с заложенными алгоритмами. Положительное решение $T2$ приводит к генерации команды о считывании события и его записи в накопитель. На

всех этапах обработки событий производится мониторинг потока данных и триггерных решений.

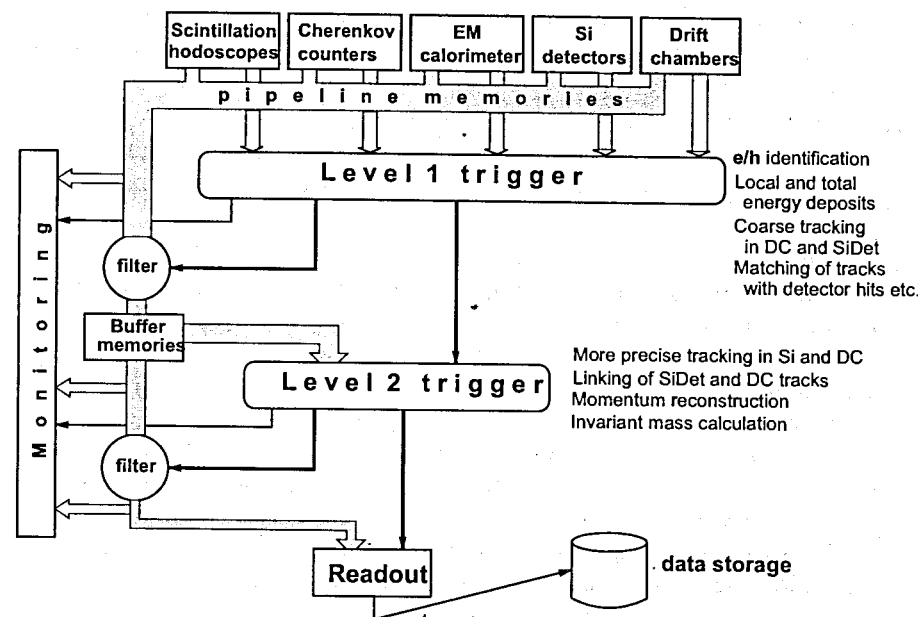


Рис. 17: Возможная архитектура триггерной системы PAX.

Аппаратура триггерной логики на уровне $T1$ будет основана на процессорах на базе интегральных схем типа FPGA. Такой выбор в настоящее время и в ближайшие годы представляется оптимальным для построения гибких триггерных конфигураций.

Чтобы легко создавать или видоизменять триггерную конфигурацию, сначала строятся триггерные "примитивы", логическая комбинация которых формирует затем сигнал $T1$. Примитивы включают годоскопический триггер HT , черенковский триггер CHT , триггер дрейфовых камер DCT , калориметрические триггеры $CALT$, $CALTOT$ и триггер силиконового детектора ST :

HT вырабатывается при совпадении разрешенных комбинаций счетчиков в плоскостях сцинтилляционных годоскопов;

CHT генерируется, если имеется сигнал с той ячейки черенковского счетчика, через которую прошла траектория частицы. Траектория определяется по сработавшим счетчикам годоскопов;

DCT возникает, когда в дрейфовых камерах найден (по номерам проволок) трек, ассоциированный со сработавшими счетчиками годоскопов;

CALT и *CALTOT* вырабатываются по информации с калориметра в том случае, когда амплитуда сигнала в кластере превышает установленный порог для локального или полного энерговыделения. В случае триггера на заряженные частицы требуется наличие сопоставленного кластеру трека; *ST* вырабатывается при совпадении сигналов в плоскостях микрострипового детектора с использованием грубой сегментации детектора на этом этапе.

Из построенных триггерных примитивов можно создать их логические комбинации для того, чтобы отбирать частицы-кандидаты в электроны, адроны или гамма-кванты.

Как видно из Рис. 18, поле тороидального магнита локализовано между трековыми подсистемами SiDet и DC, поэтому внутри каждой из них магнитное поле отсутствует и траектория частицы близка к прямолинейной. Как следствие, могут быть использованы довольно простые алгоритмы поиска сегментов трека, выполняемые на триггерном уровне. Предложено дополнить установку еще одним сцинтилляционным годоскопом (Hod2 на Рис. 18), что позволит существенно улучшить условия для триггерного отбора, в частности, для построения триггерных примитивов *HT*, *SHT* и *DCT*.

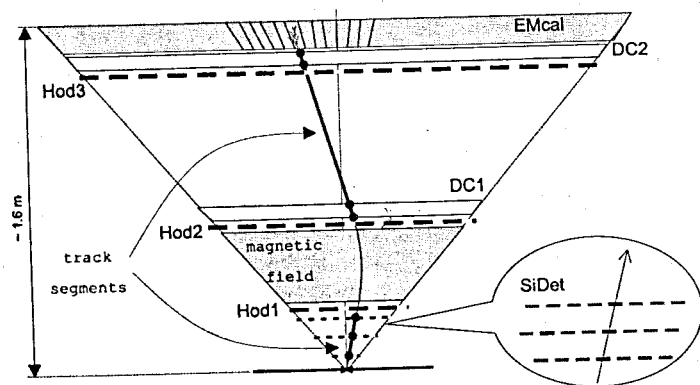


Рис. 18: Схема регистрации треков в центральном детекторе. Каждая из трековых подсистем SiDet и DC находится вне магнитного поля.

Если на уровне *T1* принято положительное решение, то данные о событии помещаются в буферную память, где ожидают анализа логикой триггера *T2*. В буферную память записываются также *указатели*, полученные при обработке события на первом уровне, позволяющие ускорить выполнение компьютерных вычислений в *T2*, например, в дрейфовых камерах – номера проволок, вошедших в трек при формировании *DCT*, в SiDet – области срабатываний, найденные алгоритмом *ST*.

На втором уровне триггера могут выполняться следующие операции:

- реконструкция треков в дрейфовых камерах с использованием времен дрейфа;
- поиск сегментов трека в SiDet;
- сшивание сегментов трека, найденных в подсистемах DC и SiDet, с использованием карты магнитного поля;
- реконструкция вершины;
- восстановление импульсов частиц;
- улучшение качества идентификации электронов путем сравнения восстановленного импульса P с энергией E , измеренной калориметром;
- вычисление инвариантной массы.

Предложенная структура триггерной системы эксперимента PAX является первым шагом в направлении ее создания. В процессе дальнейшей разработки предстоит выполнить детальное моделирование исследуемых и фоновых физических процессов с учетом точной геометрии и структуры установки.

В заключении отмечается, что в ходе проведенных исследований сформировалось новое научное направление в методике эксперимента, связанное с разработкой и реализацией триггерных систем для изучения процессов в ГэВ-ной области энергий с отбором событий по характерным параметрам пар частиц в конечном состоянии. Результатом работы является создание систем отбора событий и получение с их применением новых физических результатов, в том числе:

1. Создана многоуровневая триггерная система, в которой впервые используется отбор пар частиц по величине их малого относительного импульса. Система, включающая триггер первого уровня и аппаратные процессоры на более высоких уровнях, реализована в эксперименте ДИРАК в ЦЕРН и обеспечила подавление фоновых запусков в 10^3 раз при эффективности к полезным событиям 98%.
2. Разработаны и реализованы методы компьютерного управления триг-

герной системой, позволившие полностью исключить ручные операции при задании или изменении триггерных условий. Разработаны и реализованы методы контроля за функционированием триггерной системы на всех уровнях, что позволило диагностировать любые отклонения в качестве принимаемой информации.

3. Разработана и реализована логика считывания данных, оптимизированная для уменьшения мертвого времени. Разработан и применен новый метод измерения потерь из-за мертвого времени электроники, позволяющий учесть все его источники.

4. С применением созданной триггерной системы впервые измерено время жизни атомов, состоящих из π^+ и π^- мезонов:

$$\tau = [2.91_{-0.62}^{+0.49}] \times 10^{-15} \text{ с,}$$

и, как следствие, новым модельно-независимым способом определена разность пионных длин рассеяния

$$|a_0 - a_2| = 0,264_{-0,020}^{+0,033} m_{\pi}^{-1}.$$

5. Создана система отбора событий в переднем детекторе ANKE, обеспечившая выполнение большинства экспериментов на этой установке. Разработан топологически-независимый отбор пар заряженных частиц для изучения процессов, сопровождающихся испусканием протонной пары $(pp)_s$ с малой относительной энергией, позволивший в несколько раз увеличить скорость набора полезных событий.

6. С применением триггерной системы переднего детектора ANKE впервые измерена энергетическая зависимость сечения развала дейтрона $pd \rightarrow (pp)_s n$ в диапазоне 0.6–1.9 ГэВ и впервые получено дифференциальное сечение однопионного рождения $pp \rightarrow (pp)_s \pi^0$ в области, существенно выше пороговой. Эти результаты позволили при теоретическом анализе сделать новые выводы о структуре NN взаимодействия на коротких расстояниях и динамике пионного рождения.

7. Для планируемого эксперимента PAX в GSI впервые выполнен анализ использования различных детекторов установки в триггерном отборе, состоящем в выделении электрон-позитронных пар с большой инвариантной массой на высоком уровне фона, и предложена двухуровневая архитектура триггера с применением аппаратных и вычислительных процессоров.

Список литературы

- [1] А.В.Куликов. Триггерные системы в экспериментах среднего масштаба на ускорителях высоких и промежуточных энергий. ЭЧАЯ, т.36, №3 (2005) 650–686.
- [2] B.Adeva, ..., A.Kulikov et al. Lifetime measurement of $\pi^+\pi^-$ atoms to test low energy QCD predictions. CERN/SPSLC 95-1, SPSLC/P284, Geneva 1995. <http://doc.cern.ch//archive/electronic/other/generic/public/cer-0222463.pdf>.
- [3] B.Adeva, ..., A.Kulikov et al. DIRAC: a high resolution spectrometer for pionium detection. NIM, A515 (2003) 467–496.
- [4] L.Afanasyev, ..., A.Kulikov et al. The multilevel trigger system of the DIRAC experiment. NIM, A491 (2002) 376–389.
- [5] L.Afanasyev, M.Gallas, V.Karpukhin, A.Kulikov. First level trigger of the DIRAC experiment. NIM, A479 (2002) 407–411.
- [6] A.Kulikov. First level trigger for DIRAC. DIRAC Note 96-26, CERN, 1996.
- [7] A.Kulikov. First level trigger for DIRAC. DIRAC Note 97-04, CERN, 1997. http://dirac.web.cern.ch/DIRAC/note/note9704_T1.pdf.
- [8] M.Bragadireanu, ..., A.Kulikov et al. A prototype threshold Cherenkov counter for DIRAC. NIM, A426 (1999) 254–267.
- [9] A.Kulikov. Fast zero level trigger. DIRAC Note 98-01, CERN, 1998. http://dirac.web.cern.ch/DIRAC/note/note9801_T0.pdf.
- [10] V.Agoritsas, ..., A.Kulikov et al. Development of a scintillating-fibre detector for fast topological triggers in high-luminosity particle physics experiments. NIM, A411 (1998) 17–30.
- [11] A.Kulikov. Trigger scheme of the ionization hodoscope. DIRAC Note 98-02, CERN, 1998. http://dirac.web.cern.ch/DIRAC/note/note9802_T2.pdf.
- [12] V.Karpukhin, A.Kulikov, V.Yazkov. Third level trigger for DIRAC. Versions of implementation. DIRAC Note 96-27, CERN, 1996. http://dirac.web.cern.ch/DIRAC/note/note9627_T3.pdf.

- [13] A.Kulikov, M.Zhabitsky. 4e-trigger for DIRAC. DIRAC Note 2003-05, CERN, 2003. <http://dirac.web.cern.ch/DIRAC/note/note0305.pdf>.
- [14] Л.Г.Афанасьев, В.В.Карпукхин, А.В.Куликов, В.Г.Ольшевский, С.В.Трусов. Управление триггерной системой и контроль за ее работой в эксперименте DIRAC. Письма в ЭЧАЯ, т.4, №1[137] (2007) 132–138.
- [15] A.Kulikov. Schematics of DIRAC trigger and readout electronics. DIRAC Note 2000-12, CERN, 2000.
- [16] V.Karpukhin, A.Kulikov, V.Olshevsky, S.Trusov. Readout logic and its hardware implementation in the DIRAC experiment. NIM, A512 (2003) 578–584.
- [17] V.Karpukhin, A.Kulikov. Multigate and fast clear logic in FERA readout. Preprint JINR E10-2001-2, Dubna, 2001, 8 p.
- [18] A.Kulikov, M.Zhabitsky. Dead time losses and their measurement in DIRAC. NIM, A527 (2004) 591–597.
- [19] B.Adeva, ..., A.Kulikov et al. Detection of $\pi^+\pi^-$ atoms with the DIRAC spectrometer at CERN. Jour.Phys.G: Nucl.Part.Phys., 30 (2004) 1929–1946.
- [20] B.Adeva, ..., A.Kulikov et al. First lifetime measurement of the $\pi^+\pi^-$ atom. Phys.Lett., B619 (2005) 50–60.
- [21] A.Kulikov. Upgrade of the DIRAC trigger system. DIRAC Note 2005-17, CERN, 2005. <http://dirac.web.cern.ch/DIRAC/note/note0517.pdf>.
- [22] S.Barsov, ..., A.Kulikov et al. ANKE, a new facility for medium energy hadron physics at COSY-Jülich. NIM, A462 (2001) 364–381.
- [23] S.N.Dymov, V.I.Komarov, A.V.Kulikov et al. Trigger electronics for the forward and backward hodoscopes of ANKE. JINR Communications E10-2002-19, Dubna, 2002, 15 p.
- [24] S.Dymov, ..., A.Kulikov et al. Production of the 1S_0 diproton in the $pp \rightarrow pp\pi^0$ reaction at 0.8 GeV. Phys.Lett., B635 (2006) 270–274.
- [25] A.Kulikov. Triggering at storage rings. Proc. of the 6th Int. Conf. on Nuclear Physics at Storage Rings (STORI05), Bonn, 23–26 May 2005, p.394–397.

- [26] A.Kulikov, G.Macharashvili. Prospects for triggering in experiment PAX at GSI. Письма в ЭЧАЯ, №1[137] (2007) 139–149.
- [27] A.Kulikov. Prospects for triggering in the PAX experiment. Proc. of the 2nd International Workshop "Spin in Hadron Physics" (CGSWHP), Tbilisi, 4–7 September 2006. Schriften des Forschungszentrum Jülich, Matter and Material, Vol. 33, ISBN-10:3-89336-453-6.

Получено 21 марта 2007 г.