

УДК 539.1.07 + 539.16.08

## ТРИГГЕРНЫЕ СИСТЕМЫ В ЭКСПЕРИМЕНТАХ СРЕДНЕГО МАСШТАБА НА УСКОРИТЕЛЯХ ВЫСОКИХ И ПРОМЕЖУТОЧНЫХ ЭНЕРГИЙ

*А. В. Куликов*

Объединенный институт ядерных исследований, Дубна

ВВЕДЕНИЕ	650
ОБЩИЕ ТРЕБОВАНИЯ К ТРИГГЕРНЫМ СИСТЕМАМ	651
СРАВНЕНИЕ ТРИГГЕРНЫХ СИСТЕМ ЭКСПЕРИМЕНТОВ КРУПНОГО И СРЕДНЕГО МАСШТАБА	651
МЕТОДЫ ОТБОРА СОБЫТИЙ, ИСПОЛЬЗУЕМЫЕ В ТРИГГЕРНОЙ ЛОГИКЕ	653
ИСПОЛЬЗОВАНИЕ МНОГОУРОВНЕВОГО ТРИГГЕРА	655
МНОГОУРОВНЕВЫЙ ТРИГГЕР ЭКСПЕРИМЕНТА DIRAC: ОТБОР ПО ОТНОСИТЕЛЬНОМУ ИМПУЛЬСУ	656
ЭКСПЕРИМЕНТ RIBETA: ТРИГГЕР ПО ЭНЕРГОВЫДЕЛЕ- НИЮ	665
УСТАНОВКА ANKE. ТРИГГЕР ПО ВРЕМЕНИ ПРОЛЕТА. ТОПОЛОГИЧЕСКИ-НЕЗАВИСИМЫЙ ОТБОР ПАР ЧАСТИЦ	669
ЭКСПЕРИМЕНТ KLOE. ОТБОР ПО ЭНЕРГОВЫДЕЛЕНИЮ В СПЕКТРОМЕТРЕ И ПО МНОЖЕСТВЕННОСТИ В ДРЕЙФОВЫХ КАМЕРАХ	674
ЭКСПЕРИМЕНТ NA48: ТРИГГЕРНАЯ СИСТЕМА БЕЗ МЕРТВОГО ВРЕМЕНИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ КОНВЕЙЕРНОГО РЕЖИМА (PIPELINE)	679
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	683
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ	684

УДК 539.1.07 + 539.16.08

## ТРИГГЕРНЫЕ СИСТЕМЫ В ЭКСПЕРИМЕНТАХ СРЕДНЕГО МАСШТАБА НА УСКОРИТЕЛЯХ ВЫСОКИХ И ПРОМЕЖУТОЧНЫХ ЭНЕРГИЙ

*А. В. Куликов*

Объединенный институт ядерных исследований, Дубна

Обзор посвящен методам выработки триггера в экспериментах среднего масштаба на ускорителях высоких и промежуточных энергий. Рассматриваются общие требования к триггерным системам, а также особенности таких систем в конкретных экспериментах, позволяющие выполнять эффективный отбор событий изучаемого процесса. Обсуждаются методы отбора событий, основанные на использовании энерговыделения, множественности, времени пролета, ионизационных потерь, информации с трековых детекторов и других данных, доступных в реальном времени. Приведены примеры реализации многоуровневого триггера. Подчеркнута необходимость оперативного контроля за отбором событий, поскольку нарушения в работе триггерной системы могут приводить к невосполнимой потере данных.

The subject of the review is the triggering in medium scale experiments at high and intermediate energy accelerators. General requirements to trigger systems are discussed, and the features of such systems in concrete experiments allowing for effective event selection of the process in study are presented as well. The event selection methods based on energy deposit, multiplicity, time of flight, ionization losses, tracking information and other available in real time data are considered. The examples of using the multilevel trigger are given. The necessity of permanent control for the event selection process is stressed because its imperfections may result in irreplaceable loss of data.

### **ВВЕДЕНИЕ**

Система отбора событий в процессе измерений, или триггерная система, является необходимой составляющей любого эксперимента. В данном обзоре рассматриваются триггерные системы экспериментальных установок среднего масштаба. К «среднему масштабу» можно условно отнести установки, в которых используется достаточно разветвленный, но все же ограниченный набор детекторов и электронной аппаратуры. Как правило, число участников таких экспериментов менее 100 человек, а стоимость установок не превышает десятка миллионов долларов. Подобные эксперименты характерны для исследований при промежуточных энергиях и в нижнем диапазоне области высоких энергий (порядка десятков ГэВ). Таким образом, мы не будем подробно обсуждать триггерные системы в крупных экспериментах при энергиях в сотни ГэВ и выше, которые имеют как общие черты, так и существенные отличия от триггерных схем в экспериментах среднего масштаба.

Отметим, что понятие «средний масштаб» ни в коей мере не относится к научной значимости эксперимента, а определяет лишь качественную оценку объема и стоимости аппаратуры.

## 1. ОБЩИЕ ТРЕБОВАНИЯ К ТРИГГЕРНЫМ СИСТЕМАМ

Наличие эффективной триггерной системы является одним из ключевых факторов успешного проведения эксперимента. Главными задачами, решаемыми системой отбора событий в любом эксперименте на ускорителе, являются следующие.

- Подавление регистрации событий, не связанных с исследуемым процессом (фоновых событий). Такие события могут иметь как физическую причину (конкурирующие процессы в результате взаимодействия пучка с мишенью), так и чисто фоновую, когда детекторы регистрируют не частицы, рожденные непосредственно в мишени, а, например, продукты взаимодействия гало пучка с держателем мишени или стенками пучкового тракта, частицы, перерассеянные в апертуру установки на конструктивных элементах, космические лучи либо радиационный фон в измерительном зале.

- Эффективная регистрация событий исследуемого процесса. Критерии отбраковки фоновых событий, заложенные в логику отбора, не должны заметно подавлять прием полезных событий.

Помимо этого, качество работы триггерной системы определяется следующими характеристиками.

- Быстрота принятия решения о записи либо отбраковке события. Скорость принятия решения во многих случаях определяет мертвое время установки.

- Возможность гибкого изменения критериев отбора событий.

- Возможность параллельного функционирования разных типов триггеров. Это позволяет одновременно накапливать события нескольких физических процессов, обеспечивая, в частности, необходимые данные для калибровок.

Работа триггерной системы должна оперативно контролироваться, поскольку ошибки при отборе событий во время экспериментальных измерений могут приводить к записи смещенной выборки данных, либо к серьезным потерям статистики. Такие ошибки не могут быть исправлены на этапе «off-line»-обработки.

## 2. СРАВНЕНИЕ ТРИГГЕРНЫХ СИСТЕМ ЭКСПЕРИМЕНТОВ КРУПНОГО И СРЕДНЕГО МАСШТАБА

Триггерные системы крупных экспериментов имеют ряд особенностей, не всегда свойственных установкам меньшего масштаба. Главным отличием

больших экспериментов является необходимость переработки в реальном времени огромного потока данных, чем и определяется архитектура триггера. Рассмотрим, для примера, системы отбора событий в планируемых экспериментах на LHC [1].

При расчетной светимости, равной  $10^{34} \text{ см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$  для LHC, каждую секунду ожидается  $10^9$  взаимодействий. Частота столкновений пучков составляет 40 МГц, и при каждом столкновении, отделенном от соседнего временным интервалом в 25 нс, происходит в среднем 17 взаимодействий. Объем информации в каждом событии равен мегабайтам по порядку величины.

Чтобы иметь возможность записать информацию о полезных событиях, триггерная система должна подавить первоначальную скорость счета примерно в  $10^7$  раз, снизив количество записываемых событий до нескольких десятков или сотен в секунду. Такое радикальное уменьшение потока данных реализуется с помощью многоуровневого отбора событий.

На первом уровне (триггер 1) анализируется лишь часть доступной информации с детекторов (не со всех детекторов и с довольно грубой сегментацией). Применяются быстрые аппаратные процессоры с программируемой логикой. В течение времени, необходимого для принятия решения на первом уровне (порядка 1 мкс), полная информация о событии сохраняется в устройствах памяти, реализованных с использованием конвейерного режима (pipeline). Если триггер 1 принимает положительное решение, то данные о событии перемещаются в буферы, из которых они считываются и анализируются триггерными системами более высокого уровня. Технологически программируемая логика базируется на применении интегральных схем типа ASIC (Application Specific Integrated Circuits), FPGA (Field Programmable Gate Arrays), RAM (Random Access Memories).

На более высоких уровнях триггера учитывается уже информация с использованием тонкой сегментации детекторов вблизи координат, определенных на первом уровне отбора. Проверяется согласованность данных с различных детекторов, производится полная реконструкция треков, вводятся кинематические критерии отбора и, в конечном счете, выполняется идентификация физического процесса. Эти этапы отбора подразумевают использование значительных вычислительных мощностей и, в основном, реализуются не аппаратными, а программными средствами.

Менее масштабные, чем на LHC, но сходные по архитектуре методы построения триггерных систем внедрены в крупных экспериментах на уже существующих ускорителях высоких энергий в таких центрах, как, например, CERN, FNAL, DESY и других.

В экспериментах среднего масштаба потоки данных значительно меньше. Это позволяет упростить логику и аппаратуру триггера, однако все требования к системам отбора данных, перечисленные в разд. 1, остаются в силе. В некоторых случаях удается ограничиться всего одним уровнем отбора. Од-

нако при изучении редких процессов и при высоких загрузках детекторов от конкурирующих процессов и здесь нередко используют многоуровневый триггер. В отличие от больших экспериментов, многоуровневый триггер часто может быть реализован на аппаратном уровне, без применения сложных вычислительных операций в реальном времени. Если длительность интервала, необходимого для принятия решения на первом уровне, достаточно мала, то для сохранения информации на этот период можно использовать кабельные задержки, без применения конвейерных систем.

Следует отметить, что в экспериментах среднего масштаба доступные ресурсы (как финансовые, так и по числу исполнителей) нередко бывают весьма ограниченными. Поэтому не всегда возможна разработка, например, специализированных микросхем, которые были бы оптимальны для построения триггерных процессоров данного эксперимента. В большинстве случаев при разработке проблемно-ориентированных электронных модулей используется коммерчески доступная элементная база, которая, однако, обладает высокими технологическими параметрами и постоянно развивается. Заметная часть электронной логики также может быть реализована с использованием серийно выпускаемой электроники в стандартах VME, CAMAC, FASTBUS и NIM.

Все дальнейшее изложение будет относиться к экспериментам среднего масштаба, поэтому ниже мы не будем подчеркивать в каждом случае масштаб эксперимента.

### 3. МЕТОДЫ ОТБОРА СОБЫТИЙ, ИСПОЛЬЗУЕМЫЕ В ТРИГТЕРНОЙ ЛОГИКЕ

События исследуемого процесса характеризуются набором определенных параметров. К ним относятся тип и количество зарегистрированных частиц, их энергии и импульсы, взаимные кинематические соотношения. Чем больше характерных свойств процесса учтено в формировании триггерной логики, тем выше избирательность триггера.

Очевидным способом выделения нужных событий является, в первую очередь, использование комбинаторной логики для сигналов с различных детекторов, т. е. схем совпадений-антисовпадений и сумматоров, реализующих булевские функции И, НЕ, ИЛИ.

Мощным критерием отбора событий является идентификация частиц в реальном времени. Для этого существуют следующие методы.

- Применение черенковских детекторов — пороговых, дифференциальных или RICH-детекторов. При известном импульсе частицы черенковский счетчик однозначно идентифицирует ее тип в пределах своего рабочего диапазона по скорости  $\beta$ .

- Использование детекторов переходного излучения. Эти устройства позволяют производить идентификацию при столь высоких энергиях, что ее уже не способны выполнять черенковские счетчики (так как при приближении скорости  $\beta$  к единице выход черенковского света для всех заряженных частиц становится одинаковым). Однако в экспериментах среднего масштаба детекторы переходного излучения используются редко, поскольку, как правило, энергии не настолько высоки.

- Измерение времени пролета. Метод эффективен, в основном, при энергиях ниже или порядка 1 ГэВ, так как для более высоких энергий требуются большие базы пролета, часто недостижимые в конкретной экспериментальной установке.

- Измерение величины ионизационных потерь  $dE/dx$ . Этот метод используется, главным образом, в области промежуточных энергий, где наблюдается сильная зависимость  $dE/dx$  от энергии и потери частиц с разными массами при одинаковых импульсах заметно различаются.

Для выделения событий нужного типа применяются также топологические критерии. Топология полезного события определяется некоторой комбинацией срабатывания разных детекторов или их субэлементов, а также множественностью.

Критерии отбора по энергии, являющегося в некоторых экспериментах основным инструментом выделения физического процесса, могут накладываться как на полное энерговыделение в детекторе, так и на уровне его отдельных сегментов. В последнем случае обычно требуется определенная корреляция выделений энергии в различных элементах детектора.

Само расположение детекторов в установке (в случае, если она не является  $4\pi$ -детектором) уже выделяет некоторое фазовое пространство кинематических переменных для регистрируемых событий. Однако для улучшения избирательности триггера иногда в качестве критерия отбора используют и более точные кинематические соотношения между частицами, характерные для исследуемой реакции. Их учет несколько более сложен, может потребовать значительного времени и поэтому нередко выполняется на более высоких уровнях триггера. При этом в реальном времени может проводиться реконструкция треков в координатных детекторах, восстановление импульсов частиц, сравнение кинематических характеристик данного события с «образцами» для событий искомого процесса.

При проектировании триггера производится компьютерное моделирование изучаемого процесса для получения характеристик ожидаемых событий. Это позволяет выбрать критерии, закладываемые в логику отбора событий, оценить коэффициенты подавления фона и эффективность регистрации полезных событий. В дальнейшем определенные путем моделирования параметры проверяются на экспериментальных данных и контролируются в ходе измерений.

Простейшие триггерные схемы, основанные на использовании только комбинаторной логики, были характерны для исследований на заре физики частиц и в настоящее время практически не встречаются. Ниже будут рассмотрены несколько достаточно развитых триггерных систем в целом, а также представляющие интерес отдельные компоненты систем отбора событий некоторых экспериментальных установок.

#### 4. ИСПОЛЬЗОВАНИЕ МНОГОУРОВНЕВОГО ТРИГГЕРА

Архитектура триггера в значительной степени зависит от пропускной способности системы сбора данных, которая по аппаратным и программным причинам всегда лимитирована. Если алгоритм отбора достаточно прост, то решение может быть принято быстро, но степень подавления фоновых событий будет невелика. В результате на оцифровку данных и их последующую передачу в компьютер поступает большой поток информации, что приводит к существенному мертвому времени в системе сбора данных.

При достаточно сложных алгоритмах отбора фон подавляется сильнее, однако оценка события может занять значительное время — до десятков микросекунд и более. В случае одноуровневого триггера это приводит к отрицательным последствиям двойного рода. Во-первых, необходимы большие задержки во всех детекторных каналах для сохранения информации до момента выработки триггера. Во-вторых, что еще более существенно, при использовании неконвейерных схем возникает большое мертвое время: входы триггерной системы заблокированы, пока не завершилась оценка события.

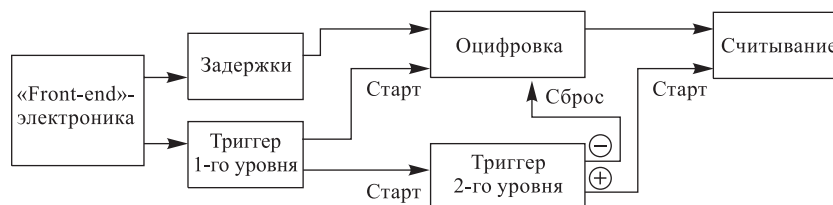


Рис. 1. Схема триггера с двумя уровнями отбора. Знаки плюс и минус на выходе триггера 2-го уровня обозначают соответственно его положительные и отрицательные решения

Применение триггера двух (или нескольких) уровней позволяет улучшить ситуацию. На первом уровне производится быстрый отбор событий с помощью несложных алгоритмов. На следующий уровень отбора, требующий большего времени, поступает уже меньший поток данных, прореженный на предыдущем уровне. Это позволяет сократить мертвое время. На рис. 1 показана возможная схема двухуровневого триггера. Сигналы с «front-end»-

электроники разветвляются на два пути: в триггерную систему и, через задержки, на оцифровку в модулях системы сбора данных (ADC, TDC). Триггер 1-го уровня запускает процесс конверсии данных и одновременно дает стартовый сигнал для обработки события в электронной логике триггера 2-го уровня. Сигнал положительного решения триггера 2-го уровня инициализирует считывание события. В случае отрицательного решения событие сбрасывается, причем очистка может производиться как после оцифровки данных, так и в процессе конверсии.

### 5. МНОГОУРОВНЕВЫЙ ТРИГГЕР ЭКСПЕРИМЕНТА DIRAC: ОТБОР ПО ОТНОСИТЕЛЬНОМУ ИМПУЛЬСУ

Целью эксперимента DIRAC [2] является измерение времени жизни элементарных атомов ( $A_{2\pi}$ ), состоящих из  $\pi^+$ - и  $\pi^-$ -мезонов. Время жизни  $A_{2\pi}$  связано с разностью длин  $s$ -волнового  $\pi\pi$ -рассеяния  $a_0 - a_2$  с изотопическим спином 0 и 2. Эта разность вычисляется в рамках киральной теории возмущений с высокой точностью, однако на опыте была ранее измерена либо с

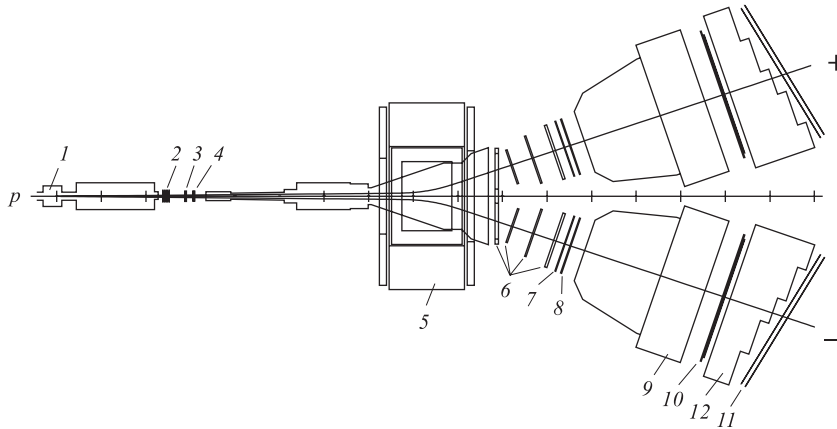


Рис. 2. Схема спектрометра DIRAC: 1 — мишень; 2 — микроstriповые газовые камеры MSGC; 3 — сцинтилляционный фиберный детектор SFD; 4 — сцинтилляционный годоскоп для измерения ионизации ИИ; 5 — магнит; 6 — дрейфовые камеры DC; 7, 8 — сцинтилляционные годоскопы с вертикальной (горизонтальной) ориентацией сцинтилляторов VH (HH); 9 — газовые черенковские счетчики Ch; 10 — годоскоп-преконвертор PSh; 11 — мюонный детектор Mu; 12 — поглотитель из железа. Масштаб: одно деление соответствует 1 м. Все детекторы, за исключением MSGC и Mu, участвуют в выработке триггера



большими ошибками, либо модельно-зависимым способом. Предсказываемое теорией время жизни  $A_{2\pi}$  примерно равно  $3 \cdot 10^{-15}$  с.

Эксперимент выполняется на выведенном протонном пучке с энергией 24 ГэВ ускорителя PS в CERN. Экспериментальная установка [3] представляет собой магнитный спектрометр (рис. 2) с детекторами до и после магнита. Пионные атомы рождаются при взаимодействии протонного пучка с твердотельной пленочной мишенью и при прохождении через вещество этой же мишени диссоциируют на  $\pi^+$ - и  $\pi^-$ -мезоны. Пионы из пар от развала  $A_{2\pi}$  обладают очень малым относительным импульсом  $Q$ , менее 3 МэВ/с, в то время как  $\pi^+$  и  $\pi^-$ , родившиеся в мишени в свободном состоянии (на много порядков величины более интенсивно), имеют весьма широкое распределение по  $Q$ .

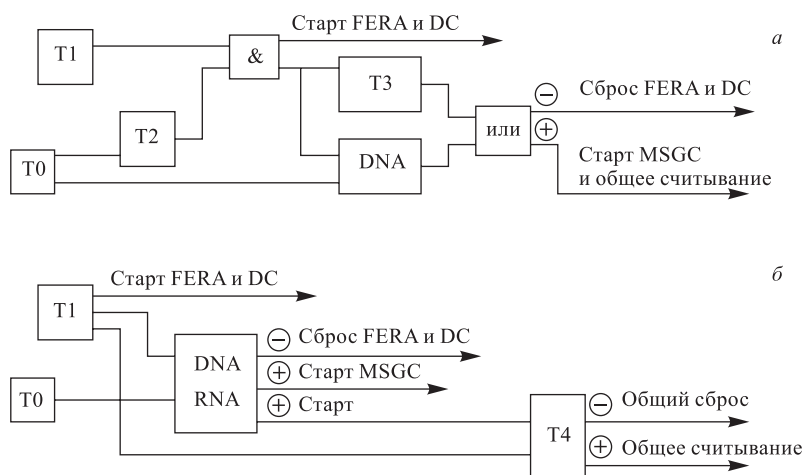


Рис. 3. Общая схема многоуровневого триггера эксперимента DIRAC. Варианты *a* и *б* использовались на раннем и более позднем этапе эксперимента соответственно. Запуск различных ветвей системы считывания (DC, MSGC и FERA [8]) выполняется триггерными сигналами разного уровня, что в условиях данного эксперимента помогает уменьшить мертвое время [9]

Типичные загрузки детекторов до и после магнита составляют соответственно  $3 \cdot 10^6$  и  $(6-8) \cdot 10^5$  за сброс пучка длительностью 400–500 мс. Задачей триггерной системы [4] является отбор пар  $\pi^+$  и  $\pi^-$  с малыми значениями  $Q$  с целью снижения потока принимаемых событий до уровня, приемлемого для системы сбора данных, который составляет около 2000 событий за сброс. Анализ событий производится быстрым триггером первого уровня T1 [5] и аппаратными процессорами [4, 6, 7], которые накладывают ограничения на различные компоненты относительного импульса частиц пары. Чтобы проследить за формой  $Q$ -распределения за пределами области физического сиг-

нала, отбор событий производится в более широкой области  $Q \leq 30$  МэВ/с, чем необходимо для регистрации  $A_{2\pi}$ .

Триггер Т1 инициирует оцифровку данных с детекторов в ADC и TDC и запускает работу процессоров. В зависимости от результата обработки в процессорах, информация о данном событии либо сбрасывается (в случае отрицательного решения), либо считывается (при положительном решении) в буферные памяти для последующей передачи в компьютер во время интервала между сбросами пучка.

В эксперименте применялись две конфигурации триггера, показанные на рис. 3, различающиеся методами отбора событий. В первоначальной версии (рис. 3, а) использовались процессоры Т2, Т3 и процессор DNA на базе нейронных сетей. Позднее была внедрена более совершенная версия (рис. 3, б) с модифицированным нейронным триггером DNA/RNA и процессором дрейфовых камер Т4, которая обеспечила лучшую избирательность триггерной системы.

**Триггер первого уровня и отбор по  $\Delta y$ .** Триггер первого уровня Т1 вырабатывается при совпадении сигналов с двух плеч спектрометра после магнита, в каждом из которых должны сработать годоскопы VH, HH, PSh при отсутствии импульса с черенковских счетчиков Ch (для подавления электронов). Использование черенковских счетчиков позволяет отбросить 98,5% электронов. Напротив, при включении счетчиков Ch на совпадения триггер отбирает электрон-позитронные пары.

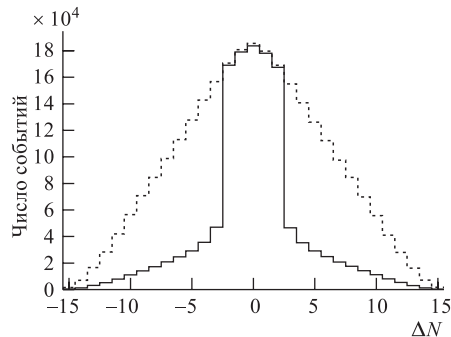


Рис. 4. Распределение по разности номеров сработавших счетчиков в горизонтальных годоскопах HH1–HH2. Штриховая линия — отбор по  $\Delta y$  выключен; сплошная — включен отбор  $|\Delta y| \leq 2$ . Крылья в распределении с отбором связаны с наличием событий с множественностью более двух (при этом для третьей частицы возможны любые значения  $\Delta y$ )

В триггере первого уровня вводится, кроме того, ограничение на разность вертикальных координат треков в левом и правом плече спектрометра. Тем самым отсеиваются события с большими значениями вертикальной составляющей относительного импульса  $Q_y$ . Для такого отбора используется информация с горизонтальных годоскопов HH (каждый из них содержит по 16 счетчиков): требуется, чтобы разность номеров сработавших счетчиков в HH правого и левого плеча была не более двух, что соответствует максимальному разлету по  $y$  пионов от диссоциации  $A_{2\pi}$ . Этот критерий уменьшает число триггеров в два раза. На рис. 4 показано распределение событий по

разности номеров сработавших элементов в двух горизонтальных годоскопах при выключенном и включенном отборе по  $\Delta y$ .

Схема триггера Т1 собрана на базе многоканальных программируемых модулей КАМАК производства фирм LeCroy и CAEN, за исключением специально разработанной электроники для отбора по  $Q_y$ . Выработка триггера Т1 производится примерно за 300 нс.

**Отбор по  $\Delta x$ .** Триггер Т2 производит отбор пар частиц с малыми расстояниями по горизонтали ( $\Delta x$ ). Поскольку магнитное поле разворачивает траектории частиц как раз в  $X$ -плоскости, отбор производится до магнита с использованием информации о топологии события, получаемой с годоскопа ИИ и сцинтилляционного фиберного детектора SFD. При этом отбраковываются события с большими значениями горизонтальной составляющей относительного импульса  $Q_x$ .

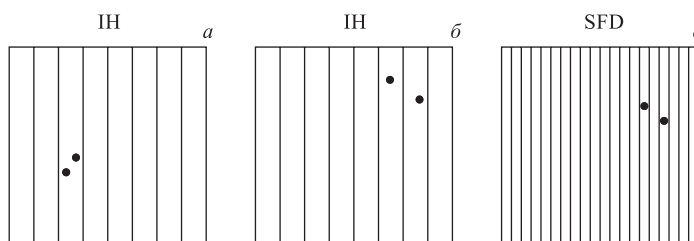


Рис. 5. Различные моды триггера Т2: а) две частицы попадают в одну палочку годоскопа ИИ ( $\Delta x \leq 6$  мм в каждой плоскости, в двух плоскостях на совпадении  $\Delta x \leq 3$  мм); б) совпадение в соседних палочках ИИ ( $\Delta x \leq 12$  мм); в) в фибрах SFD два срабатывания с  $\Delta x \leq 9$  мм

Триггер Т2 имеет три независимые моды (рис. 5), объединенные функцией ИЛИ. В моде 1 требуется попадание двух частиц в одну и ту же вертикальную палочку годоскопа ИИ. При ширине палочки в 6 мм и сдвинутых на полшага двух плоскостях годоскопа это соответствует условию отбора  $\Delta x \leq 3$  мм. Попадание двух частиц в один элемент ИИ идентифицируется по амплитуде, превышающей порог двойной ионизации. Для выполнения условий отбора в моде 2 необходимо срабатывание двух соседних палочек годоскопа. Мода 3 использует возможности, предоставляемые сцинтилляционным фиберным детектором SFD, для организации топологического триггера [10]. Сигнал на ее выходе возникает, если среди сработавших волокон (диаметром 0,5 мм) нашлась пара с расстоянием  $\Delta x \leq 9$  мм (все пары  $\pi^+$  и  $\pi^-$ , образовавшиеся в результате диссоциации атомов  $A_{2\pi}$ , как раз лежат в области  $\Delta x \leq 9$  мм). Электроника для мод 1 и 2 собрана, в основном, из коммерческих модулей КАМАК. Процессор моды 3 является разработкой коллаборации.

Логическое суммирование (ИЛИ) решений всех трех мод несколько снижает избирательность триггера, однако обеспечивает его высокую эффективность к полезным событиям с малыми относительными импульсами, восполняя некоторую неэффективность отдельных мод. Эффективность регистрации триггером Т2 пар с малыми  $Q_L$  достигала 95 % при подавлении числа запусков (по сравнению с Т1) в 1,4 раза.

**Отбор по  $Q_L$ .** При использовании схемы рис. 3, а дальнейшее снижение числа триггеров обеспечивает процессор Т3. В нем производится быстрый анализ номеров сработавших счетчиков в годоскопах до (в ИН) и после (в VH1 и VH2) магнита, позволяющий отбросить пары частиц с большими значениями продольной составляющей относительного импульса  $Q_L \geq 30$  МэВ/с.

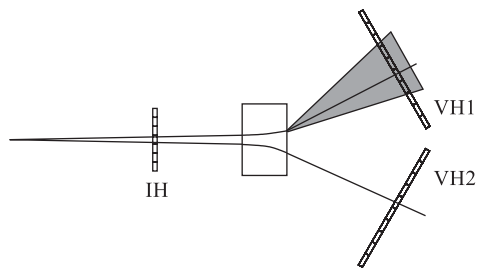


Рис. 6. Корреляция срабатываний счетчиков VH1, VH2 и ИН, используемая для отбора процессором Т3

Для событий с малыми  $Q_L$  попадания в счетчики годоскопов VH1 и VH2 коррелированы: каждому счетчику в VH1 соответствует группа счетчиков в VH2 (рис. 6). Карта разрешенных комбинаций номеров счетчиков меняется в зависимости от  $X$ -координаты до магнита, которая определяется номером счетчика в годоскопе ИН. Вся логика Т3 реализована на базе модуля КАМАК LeCroy 2366 (универсальная логическая матрица). Микросхема Xilinx этого модуля, использующая

FPGA-технология, была запрограммирована [7] с учетом карты возможных срабатываний детекторов, полученной путем моделирования по методу Монте-Карло процесса образования и развала пионных атомов и проверенной затем на экспериментальных данных.

Решение принимается процессором Т3 за 120 нс. Коэффициент подавления числа триггеров равен 2,0 (по отношению к Т1), эффективность регистрации пар с  $Q_L \leq 30$  МэВ/с составляет 97 %.

Наилучшие результаты по избирательности триггера и его эффективности к полезным событиям получены с более поздней версией (рис. 3, б), в которой используются процессор DNA/RNA (Dirac Neural Atomic и Revised Neural Atomic-триггер) на базе нейронной сети и процессор дрейфовых камер Т4. С их внедрением в эксперимент стадии отбора по  $\Delta x$  и  $Q_L$  процессорами Т2 и Т3 были исключены.

**Нейронный триггер.** Принцип действия и вопросы создания нейронных сетей описаны во множестве работ (см., например, [11]), мы не будем их подробно рассматривать в настоящем обзоре. Отметим лишь такие их

свойства, как способность к обучению, которое осуществляется путем настройки параметров сети с использованием массивов «хороших» и «плохих» событий, высокое быстродействие и помехоустойчивость. В эксперименте DIRAC нейронный триггер [4, 6] анализирует информацию о номерах сработавших элементов в годоскопе IH и фиберном детекторе SFD до магнита и в годоскопах VH и PSh в обоих плечах спектрометра после магнита. Аппаратура нейронного триггера и применяемые алгоритмы разработаны участниками коллаборации из Базельского университета на базе их предыдущих разработок [12, 13] для экспериментов CPLEAR и L3 в CERN.

Систему DNA/RNA тренировали на отбор пар частиц с малыми значениями относительного импульса:  $Q_x \leq 3 \text{ МэВ}/c$ ,  $Q_y \leq 10 \text{ МэВ}/c$  и  $Q_L \leq 30 \text{ МэВ}/c$ . Обучение проводилось с использованием событий, генерированных методом Монте-Карло. Функционирование системы с настроенными в результате обучения параметрами было проверено на экспериментальных дан-

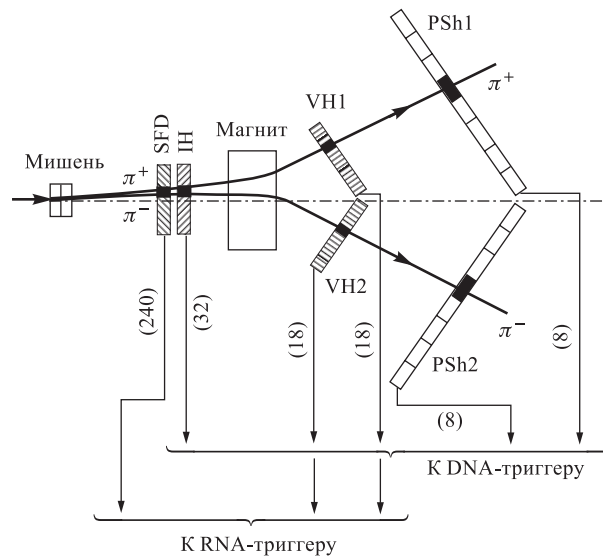


Рис. 7. Детекторы установки DIRAC, используемые в нейронном триггере DNA/RNA. Подсистемы DNA и RNA анализируют данные независимо, а их положительные решения объединяются функцией ИЛИ. В скобках приведено количество каналов информации с каждого из детекторов

ных до включения DNA/RNA в качестве активного триггера. Если множественность в событии превышает два (два  $\pi$ -мезона от развала атома могут сопровождаться и другими частицами), то среди зарегистрированных частиц

проводится поиск пары, отвечающей вышеприведенным критериям. Оценка принадлежности события к искомому классу занимает 250 нс. Схема подключения детекторов к системе нейронного триггера показана на рис. 7. В случае отрицательного решения вырабатывается сигнал быстрого сброса в модули ADC и TDC, которые к этому моменту уже начали конверсию данных. Положительное решение позволяет начать анализ события на следующем уровне процессором дрейфовых камер.

Отбор событий системой DNA/RNA обеспечивает подавление числа триггеров в два раза. Эффективность детектирования событий с малыми  $Q$  составляет 99 %.

**Процессор дрейфовых камер.** Наибольший коэффициент подавления фоновых запусков обеспечивает созданный в ОИЯИ процессор дрейфовых камер Т4, применяемый на окончательном этапе отбора. Он восстанавливает прямые треки в  $X$ -проекции и анализирует их по отношению к относительному импульсу пары.

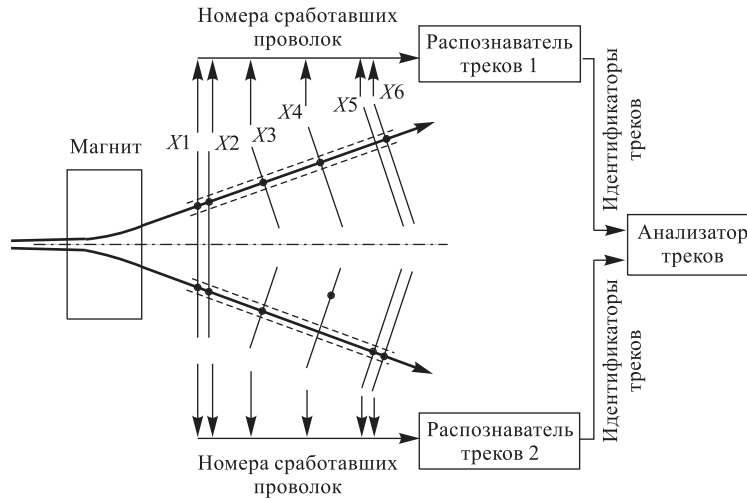


Рис. 8. Блок-схема работы процессора дрейфовых камер

Процессор Т4 состоит из двух подсистем, одна из которых осуществляет поиск треков («распознаватель треков»), а другая — их анализ («анализатор треков»). Распознаватель треков выполняет их поиск в коридоре, построенном с использованием базовых плоскостей  $X1$  (или  $X2$ ) и  $X5$  (или  $X6$ ), рис. 8. Ширина коридора и количество необходимых точек на треке задаются в качестве параметров поиска. Найденному треку присваивается уникальное

значение «идентификатора трека», содержащее номера сработавших проводок в базовых плоскостях.

Если хотя бы один трек найден в каждом из плеч спектрометра, событие начинает оцениваться анализатором треков, в который поступают все идентификаторы треков из данного события. По значениям идентификаторов производится поиск пары треков, для которых выполняется условие  $Q_L \leq 30 \text{ МэВ}/c$  и  $Q_x \leq 3 \text{ МэВ}/c$ . Если находится подходящая комбинация, то процессор генерирует положительное решение и начинается считывание события. Отрицательное решение влечет быстрый сброс всех данных о событии независимо от стадии его обработки в электронике (т. е. как во время, так и после конверсии в ADC и TDC).

Время выработки решения процессором T4 зависит от сложности события и в среднем равно 3,5 мкс. Коэффициент подавления запусков составляет 5–6 по отношению к T1. Эффективность T4 к событиям в области малых  $Q$  превышает 99%.

**Триггеры для калибровок и тестирования.** Помимо основного физического триггера, описанного выше, в эксперименте DIRAC организованы также другие типы триггера с целью калибровки установки и проверки работы электроники. Они могут применяться как независимо, при выполнении специальных измерений, так и параллельно с основным набором статистики. Используются схемы (prescalers) для уменьшения частоты запусков, чтобы поддерживать соотношение основного и вспомогательных триггеров на оптимальном уровне.

Созданы конфигурации триггера для набора  $e^+e^-$ -пар,  $\pi^+\pi^-$ -пар без отбора по  $Q$ , двойных  $e^+e^-$ -пар, регистрации распадов  $\Lambda \rightarrow p + \pi^-$ ,  $K^\pm \rightarrow \pi^\pm\pi^+\pi^-$ . Все типы триггеров вырабатываются с одинаковой временной задержкой. Имеются также варианты для измерения пьедесталов ADC и для проверки триггерной электроники и электроники системы считывания. В последнем случае используется генератор с частотой порядка 100 Гц, сигналы которого подаются во все модули «front-end»-электроники. Относительные задержки между сигналами, поступающими во «front-end»-электронику различных детекторов, подобраны близкими к значениям этих задержек при запуске от реальных событий. В результате вырабатывается триггер и записывается информация в ADC и TDC детекторов. Таким методом можно проверить работу каналов электроники и функционирование системы сбора данных, в том числе в отсутствие пучка.

Каждому из типов вспомогательных триггеров (а также основному) соответствует уникальная метка, которая записывается в предназначенный для этого многоканальный модуль TDC. Очевидно, что к событиям всех типов, кроме основного исследуемого процесса, не следует применять критерии отбора по относительному импульсу. Это достигается переводом процессоров с помощью сигнала метки вспомогательного триггера в «прозрачный» режим,

в котором процессоры всегда выдают положительное решение. После приема события от вспомогательного триггера процессоры снова переходят в стандартный режим отбора.

**Управление триггером и контроль за его работой.** Система отбора событий полностью управляется с помощью компьютера. В начале каждой сессии набора данных производится загрузка файла, в котором задаются параметры электронных модулей (пороги, задержки и т. п.), тип триггера (или некоторый их набор при параллельной работе нескольких вариантов), осуществляется загрузка памяти процессоров. Эти данные протоколируются в электронном журнале.

Скорость счета всех типов триггера на всех уровнях измеряется в каждом сбросе пучка. Счета вместе с другими данными записываются на ленту, а также отображаются на экране монитора во время измерений. Тем самым осуществляется контроль за стабильностью работы триггерной системы.

Эффективность отбора событий процессорами в зависимости от  $Q$  и обеспечиваемые ими коэффициенты подавления проверяются путем записи событий по триггеру первого уровня T1. Процессоры более высокого уровня при этом выполняют оценку событий и в случае положительного решения ставят метку в триггерном регистре. При экспресс-анализе (в режиме «off-line») событий с учетом записанных меток определяется качество работы процессоров.

Для оценки работы системы отбора событий в целом, включая также триггер первого уровня, используется так называемый «*minimum bias*»-триггер. Он вырабатывается простым совпадением сигналов в одном из детекторов до магнита (IH) и в одном после магнита (VH1 или VH2). В зарегистрированном по такому простейшему триггеру событии могут быть найдены (хотя и с малой вероятностью) сигналы и от всех других детекторов, включенных в стандартный триггер, и такое событие может быть положительно оценено процессорами (в этом случае они также ставят метку). При анализе данных, записанных с применением логики отбора «*minimum bias*», проверяется эффективность выработки триггера на всех уровнях.

**Суммарные характеристики триггерной системы DIRAC.** Как отмечалось выше, одиночный счет детекторов составляет  $\sim 3 \cdot 10^6$  в области до магнита и  $(6-8) \cdot 10^5$  после магнита за сброс пучка длительностью 400–500 мс. Количество триггеров первого уровня без какого-либо отбора по относительному импульсу составляет  $\sim 10000$ . После анализа на всех уровнях на ленту записывается  $\sim 800$  событий, из них 15 % составляют события, принятые по параллельно работающим вспомогательным триггерам. Совместная работа систем выработки триггера и сбора данных организована таким образом, чтобы минимизировать мертвое время установки [9, 14].

На рис. 9 показано распределение событий по относительному импульсу после отбора на разных уровнях триггера. Эффективность регистрации собы-



тий триггерной системой в зависимости от  $Q$  иллюстрируется рис. 10. Высокая эффективность при малых  $Q$  очевидна. Она составляет 98 % в области  $Q \leq 22$  МэВ/с и 95 % при  $Q \leq 30$  МэВ/с.

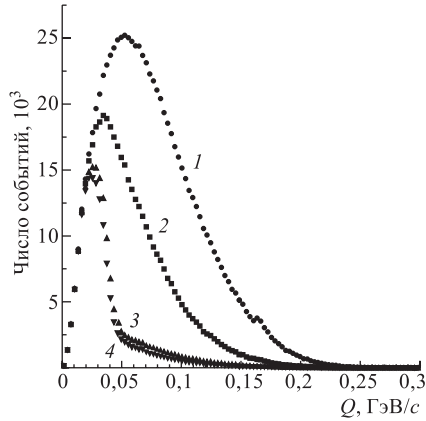


Рис. 9. Распределение по полному относительному импульсу  $Q$  для событий, отобранных на разных уровнях триггера: 1 — T1; 2 — T1 · DNA/RNA; 3 — T1 · T4; 4 — T1 · DNA/RNA · T4

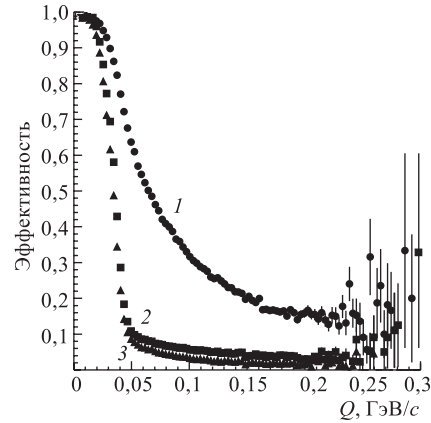


Рис. 10. Эффективность регистрации событий процессорами DNA/RNA и T4 по отношению к событиям, принятым по триггеру первого уровня T1, как функция  $Q$ : 1 — DNA/RNA; 2 — T4; 3 — DNA/RNA · T4

## 6. ЭКСПЕРИМЕНТ RIBETA: ТРИГГЕР ПО ЭНЕРГОВЫДЕЛЕНИЮ

В эксперименте RIBETA [15] отбор событий основан, главным образом, на информации об энерговыделении в спектрометре.

Эксперимент проводился в Институте Пауля Шерера (PSI, Швейцария) с целью измерения относительной вероятности бета-распада пиона ( $\pi\beta$ ),  $\pi^+ \rightarrow \pi^0 e^+ \nu_e$ . В наиболее точном из измерений скорости  $\pi\beta$ -распада, выполненных ранее, ошибка значения вероятности  $\Gamma_{\pi\beta}/\Gamma_{\text{tot}}$  составляла  $\sim 4\%$ , что не позволяло провести полноценное сравнение с предсказаниями Стандартной модели. В результате эксперимента RIBETA точность была улучшена примерно на порядок.

Установка RIBETA [16] (рис. 11) представляет собой немагнитный детектор с большой апертурой  $3\pi$  ср, оптимизированный для регистрации электронов и фотонов в энергетическом диапазоне 5–150 МэВ. Пучок  $\pi^+$ -мезонов с импульсом 113,4 МэВ/с проходит через тонкий сцинтилляционный счетчик

BC, активный замедлитель AD и останавливается в сегментированной активной мишени AT из пластического сцинтиллятора. Центральным элементом детектора является сферический калориметр высокого разрешения, состоящий из 240 кристаллов чистого CsI. Для идентификации продуктов распада и регистрации треков используются также две цилиндрические многопро-

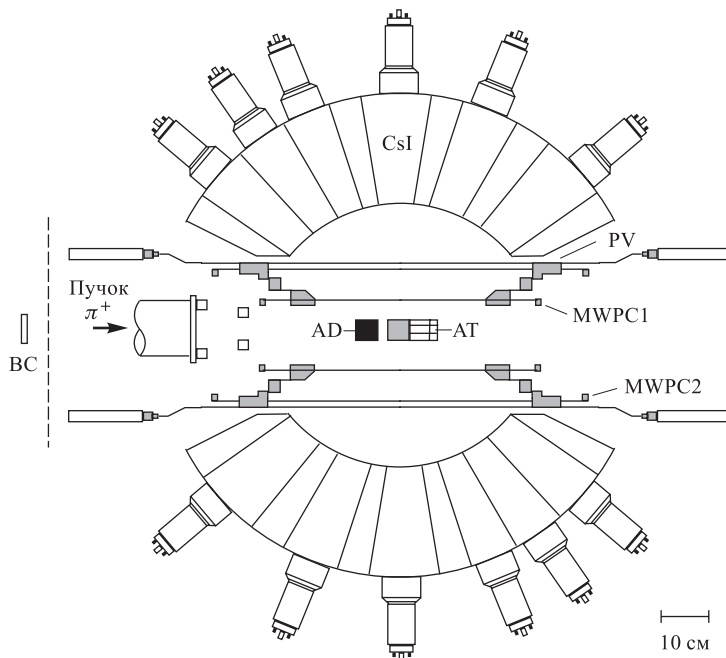


Рис. 11. Схема детектора RIBETA

волочные пропорциональные камеры MWPC1, MWPC2 и цилиндрический сцинтилляционный годоскоп PV. Для защиты от космических частиц и радиационного фона в зале вся установка окружена свинцом и снаружи, кроме того, сцинтилляционными вето-счетчиками CV (на рисунке не показаны) для активного подавления космических мюонов.

В эксперименте RIBETA используется один уровень отбора: система сбора данных записывает событие по сигналу триггера первого уровня. Имеется 12 вариантов триггера, большинство из которых при стандартном наборе данных работает параллельно, с соответствующими коэффициентами снижения частоты запусков. Для выделения различных физических процессов главным критерием оценки является энергосодержание в спектрометре и топология этого энергосодержания в событии.

Остановки частиц в мишени фиксируются с помощью «пучкового триггера»  $T_B$ , образованного совпадениями сигналов в счетчике BC, замедлителе AD и мишени AT с радиочастотным сигналом rf от ускорителя:  $T_B = BC \cdot AD \cdot AT \cdot rf$ . Имеются два варианта триггера для выделения  $\pi^+$ -мезонов или  $e^+$  в пучке, отличающиеся задержками сигналов при совпадениях и, главным образом, порогами в детекторах: используется тот факт, что пионы теряют в активной мишени 28 МэВ, а позитроны — всего 9 МэВ при импульсе пучка 114 МэВ/с. При регистрации остановок пионов генерируются два импульса: широкие (180 нс) «пионные ворота»  $\pi G$ , в которых регистрируются распады, и короткий (10 нс) сигнал  $\pi S$ , служащий для выделения мгновенных событий. Другой короткий сигнал, вырабатываемый по более простой формуле  $B_\pi = BC \cdot AD$ , отмечает просто факт присутствия  $\pi$ -мезона в установке. Сигналы  $T_B$ ,  $\pi G$ ,  $\pi S$  и  $B_\pi$  используются для формирования более сложных формул триггера, как описано ниже, в которых эти сигналы комбинируются с сигналами от ливней в калориметре.

Калориметрический триггер основан на энерговыделении в кластерах, образованных группой соседних кристаллов CsI (большинство которых имеет форму гексагональной усеченной пирамиды). При попадании фотонов или позитронов в центр кристалла в нем выделяется около 90 % энергии ливня. В группе из 9 кристаллов («кластере») поглощается  $\geq 98$  % энергии. Таким образом, отбор событий по величине энерговыделения целесообразно организовать, используя суммарную амплитуду в кластере. Поэтому в качестве базовых элементов для построения калориметрического триггера берутся перекрывающиеся кластеры из 9 кристаллов CsI, всего 60 групп кристаллов. При такой схеме кластеризации эффективность выработки триггера для гамма-квантов и позитронов с энергией 70 МэВ составляет соответственно 99,3 и 98,6 % при пороге дискриминации, равном 50 МэВ. В зависимости от физического процесса используется высокий или низкий порог дискриминации.

Дальнейшее группирование кристаллов для триггерных целей осуществляется объединением шести соседних кластеров в «суперкластер»: всего имеется 10 суперкластеров, каждый из которых содержит 24 индивидуальных модуля CsI. Суперкластер выдает сигнал  $C_S$ , если сработал хотя бы один из входящих в него кластеров, а кластер срабатывает, если суммарная выделенная энергия во входящих в него модулях превышает установленный порог дискриминации. Для суперкластеров, как и для кластеров, порог устанавливается на высоком либо низком уровне.

Выделение различных физических процессов осуществляется путем организации одно-, двух- и трехплечевого триггера в калориметре. Во всех этих вариантах сигнал с калориметра комбинируется с сигналами  $\pi G$ ,  $B_\pi$  и  $\pi S$ , выделяющими пучковые частицы: при регистрации распадных событий необходимо появление сигнала с калориметра в пределах ширины ворот  $\pi G$  при отсутствии сигнала  $B_\pi$  (последнее условие подавляет мгновенные собы-

тия, оставляя только задержанные акты распада), а для отбора мгновенных событий сигнал  $\pi S$  включен на совпадения.

При одноплечевом триггере в калориметре требуется срабатывание любого из 10 суперкластеров. Сигнал  $C_{2S}$  для двухплечевого триггера возникает при совпадении любого суперкластера с логическим ИЛИ пяти суперкластеров, не являющихся соседним с первым. Наконец, трехплечевой сигнал  $C_{3S}$  вырабатывается при совпадении любых трех несоседних суперкластеров. В табл. 1 приведены реализованные типы триггера и выделяемые с их помощью физические процессы.

**Таблица 1. Типы триггера, реализованные в электронной логике эксперимента РИВЕТА**

Тип триггера	Формула триггера	Физический процесс	Кэфф. разрядки	Скорость счета, $c^{-1}$
Распадные:				
Одноплечевой	$C_S^H \cdot \pi G \cdot \bar{B}_\pi$	$\pi^+ \rightarrow e^+ \nu_e$	16	40
Одноплечевой	$C_S^L \cdot \pi G \cdot \bar{B}_\pi$	$\mu^+ \rightarrow e^+ \nu_e \bar{\nu}_\mu$	32768	4
Двухплечевой	$C_{2S}^H \cdot \pi G \cdot \bar{B}_\pi$	• $\pi^+ \rightarrow \pi^0 e^+ \nu_e$ , $\pi^+ \rightarrow e^+ \nu_e \gamma$	1	8
Двухплечевой	$C_{2S}^L \cdot \pi G \cdot \bar{B}_\pi$	$\mu^+ \rightarrow e^+ \nu_e \bar{\nu}_\mu \gamma$	512	6
Двухплечевой	$C_{2S}^{HL} \cdot \pi G \cdot \bar{B}_\pi$	$\pi^+ \rightarrow e^+ \nu_e \gamma$ с малой $E_e$ или $E_\gamma$	4	5
Трехплечевой	$C_{3S}^L \cdot \pi G \cdot \bar{B}_\pi$	$\pi^0 \rightarrow e^+ e^- \gamma$ , $\mu^+ \rightarrow e^+ \nu_e \bar{\nu}_\mu e^+ e^-$	64	8
Мгновенный	$C_S^H \cdot \pi S$		1024	2
Калибровочные:				
$\pi$ в пучке	$BC \cdot AD \cdot AT \cdot rf$		$1,6 \cdot 10^6$	0,5
$e$ в пучке	$BC \cdot AD \cdot AT \cdot rf$		32	0,2
От космич. частиц	$CV \cdot C_S^H \cdot \bar{B}_\pi$		1	46
От космич. частиц	$CV \cdot C_S^L \cdot \bar{B}_\pi$		8	0,5
Случайный	Случайный		1	2

*Примечание.*  $C_S, C_{2S}$  и  $C_{3S}$  обозначают одно-, двух- и трехплечевой триггерный сигнал с калориметра. Индексы  $L$  и  $H$  для сигнала суперкластера  $C$  означают соответственно низкий (4,5 МэВ) и высокий (52,0 МэВ) пороги дискриминации. В двух последних колонках указаны типичные значения коэффициентов разрядки и скорости счета при интенсивности пучка  $10^6 c^{-1}$ . Значком • помечен основной исследуемый процесс.

В табл. 1 указаны также триггеры, используемые для калибровок: мгновенный, генерируемый как одноплечевой триггер, но без задержки после остановки пионов; триггер от космических частиц, возникающий при совпадении

сигналов от вето-счетчиков CV с любым суперкластером в отсутствие сигнала остановок пучковых частиц; случайный триггер, вырабатываемый одиночным счетчиком, расположенным с внешней стороны радиационной защиты за пределами установки.

Суммирование сигналов и их дискриминация для формирования сигнала кластеров выполняется в специально разработанных NIM-модулях. Группировка в суперкластеры производится в блоках КАМАК производства фирмы LeCroy. Формирование, разрядка скорости счета и смешивание описанных выше триггеров осуществляются с помощью разработанных в PSI логических модулях LB500, ключевым элементом которых является программируемая микросхема типа CPLD (Complex Programmable Logic Device).

Триггер от космических частиц при низком пороге регистрации применяется отдельно, во время остановок ускорителя. Все остальные варианты триггера, приведенные в табл. 1, работают параллельно, причем каждому типу соответствует выделенный бит в триггерном регистре. Это позволяет одновременно с регистрацией основного  $\pi\beta$ -распада производить набор данных для других физических процессов и накапливать калибровочные данные в реальных условиях измерений.

В результате успешно проведенного эксперимента намеченная цель улучшения точности измерения вероятности  $\pi\beta$ -распада была достигнута [17].

## **7. УСТАНОВКА ANKE. ТРИГТЕР ПО ВРЕМЕНИ ПРОЛЕТА. ТОПОЛОГИЧЕСКИ-НЕЗАВИСИМЫЙ ОТБОР ПАР ЧАСТИЦ**

Установка ANKE [18] представляет собой магнитный спектрометр для исследования широкого класса процессов при промежуточных энергиях. Установка расположена на ускорителе COSY (Cooled Synchrotron) в Юлихе (Германия), который обеспечивает пучки протонов и дейтронов (в том числе поляризованных) с импульсами до 3,7 ГэВ/с.

Схема ANKE на внутреннем пучке COSY показана на рис. 12. Магниты D1 и D3 служат для отклонения пучка и его возвращения на стационарную орбиту соответственно, а спектрометрический магнит D2 — для импульсного анализа продуктов взаимодействия в мишени. Имеется четыре группы детекторов: два боковых детектора для регистрации положительных и отрицательных частиц, вылетающих через боковые окна помещенной в зазор D2 вакуумной камеры, а также передний и задний детекторы для частиц, испущенных в этих направлениях. В зависимости от изучаемого физического процесса используется какая-либо одна группа детекторов или их комбинация.

На ANKE применяется одноуровневый отбор событий. Система сбора данных имеет четыре входа для триггеров разных типов. Каждому входу мо-

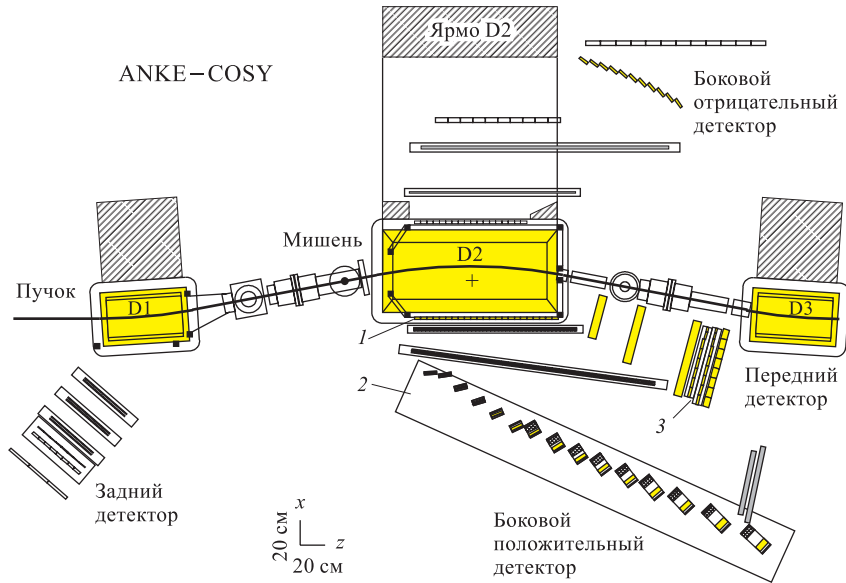


Рис. 12. Схема установки ANKE на внутреннем пучке ускорителя COSY. Отмечены элементы, используемые в изложенной ниже части триггерной схемы: 1 — стартовый боковой годоскоп; 2 — стоповые телескопы; 3 — передний годоскоп

жет быть сопоставлена индивидуальная конфигурация считывания электронных модулей, что позволяет для разных типов триггера передавать только необходимую информацию и тем самым уменьшить мертвое время, связанное со считыванием. Тип триггера для каждого события распознается системой сбора данных и регистрируется в потоке данных.

Не всегда, однако, в эксперименте достаточно четырех типов триггера. В этом случае организованные «дополнительные» типы добавляются логическим суммированием по ИЛИ на какой-либо из основных четырех входов с одновременной записью метки типа триггера в регистр, в качестве которого используется модуль LeCroy FERA ADC. Естественно, конфигурация считывания для всех триггеров, поступающих на один и тот же вход системы сбора данных, является одинаковой.

Ниже мы рассмотрим триггерные системы для положительного бокового и переднего детекторов.

**Триггер по времени пролета.** На ANKE выполнен (см., например, [19, 20]) и планируется в дальнейшем целый ряд экспериментов с образованием положительных  $K$ -мезонов в конечном состоянии реакции. Выделение

$K^+$ -мезонов производится с помощью бокового детектора положительных частиц. Он состоит из годоскопа 23 стартовых сцинтилляционных счетчиков, находящихся вплотную к боковой мембране вакуумной камеры, двух многопроволочных пропорциональных камер (не включенных в триггер) и 15 телескопов сцинтилляционных и черенковских счетчиков. При вылете продуктов реакции через боковую грань магнита D2 последний работает как магнитная линза: частицы одинакового импульса, испущенные из мишени под разными углами, фокусируются на фокальной поверхности, при этом положение фокуса определяется значением импульса. Телескопы бокового детектора расположены как раз на фокальной поверхности, поэтому в каждый из них попадают частицы из довольно узкого импульсного интервала, и, следовательно, они имеют близкие скорости (при равной массе). Данное обстоятельство используется для организации триггера по времени пролета.

При измерении времени пролета стоповым сигналом является сигнал с счетчика из телескопа  $T_i$ , а стартовым — сигнал стартового счетчика  $S_j$ . Для частиц, испущенных из мишени, срабатыванию какого-либо телескопа соответствует сигнал в одном из нескольких соседних стартовых счетчиков: от 4 счетчиков на нижней до 14 на верхней границе импульсного диапазона спектрометра. Для каждой старт-стоп-комбинации можно выбрать времен-

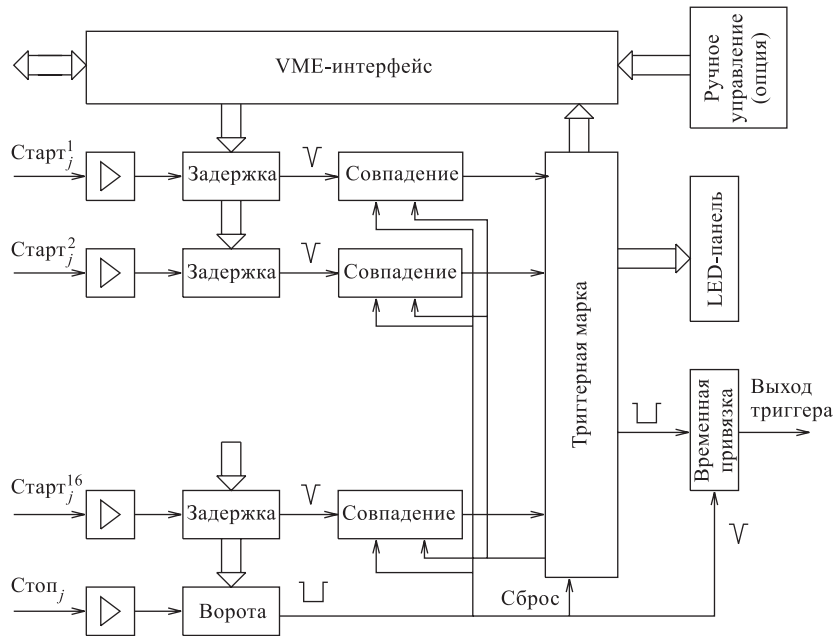


Рис. 13. Блок-схема триггерного модуля TOF для отбора событий по времени пролета

ное окно, соответствующее определенному типу частиц (пионам, каонам или протонам).

Для внедрения времяпролетного метода в триггерную логику эксперимента в Исследовательском центре Юлиха был разработан специализированный модуль TOF [21, 22] в стандарте VME. В него поступает сигнал «стоп» от определенного телескопа и до 16 сигналов «старт» от соответствующих ему стартовых счетчиков (рис. 13). Стоп-сигнал открывает ворота, ширина которых может быть установлена от 2 до 20 нс (с шагом 5 пс) в соответствии с необходимой шириной захвата спектра по времени пролета. Для каждого из стартовых счетчиков в модуле устанавливается индивидуальная задержка в интервале от 0 до 20 нс. Таким образом, в TOF-модуле обеспечивается до 16 временных ворот для комбинации одного стопового телескопа с 16 стартовыми счетчиками. Временная отметка выходного триггерного сигнала определяется стоповым сигналом. Для включения всех 15 телескопов в систему времяпролетного отбора событий используется 15 однотипных модулей, их выходные сигналы объединяются логической функцией ИЛИ.

Значения задержек и ширин временных ворот устанавливаются с помощью компьютерного файла загрузки. Эти параметры определяются при калибровке во время настройки аппаратуры.

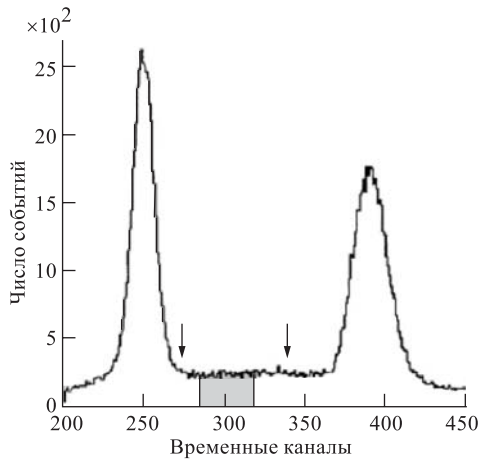


Рис. 14. Спектр по времени пролета, измеренный при полностью открытых (около 20 нс) временных воротах в модуле TOF. Левый пик соответствует  $\pi$ -мезонам, правый — протонам. Стрелками указано положение временных ворот для регистрации  $K$ -мезонов, затененная область соответствует ожидаемому положению каонов. Цена канала по оси абсцисс — 44 пс. Невидимый на рисунке пик от  $K$ -мезонов проявляется при дальнейшей «off-line»-обработке

На рис. 14 показан спектр по времени пролета, измеренный [23] при максимально открытых временных воротах в TOF-модулях. Видно, что область, где могут находиться каоны, составляет небольшую долю всего спектра. При установке ворот и задержек в TOF-модулях, соответствующих регистрации  $K$ -мезонов, скорость счета триггеров падает в 9–10 раз по сравнению с полностью открытыми воротами (последнее эквивалентно использованию вместо TOF-системы обычных схем совпадений с разрешающим временем 20 нс) и



составляет, в зависимости от условий эксперимента, от  $4000 \text{ с}^{-1}$  и выше. Без TOF-системы эта скорость возрастает до десятков тысяч в секунду, и, с учетом мертвого времени системы сбора данных ANKE, эффективность работы не превышает 10–15 %.

**Триггер переднего детектора.** В переднем детекторе [24] триггер выработывается сцинтилляционным годоскопом, состоящим из двух плоскостей с 8 и 9 счетчиками соответственно. Счетчики в первой и второй плоскостях сдвинуты на полшага. При изучении процессов, в которых в передний детектор попадает одна частица, триггер образуется простым совпадением сигнала с любого счетчика первой плоскости с сигналом одного из двух соответствующих ему счетчиков второй плоскости (рис. 15, а) согласно логической формуле

$$T = \sum_{i=1}^8 S1_i(S2_i + S2_{i+1}),$$

где  $S1_i$  и  $S2_i$  обозначают счетчик первой и второй плоскости с номером  $i$ .

В некоторых экспериментах, например, при исследовании развала дейтрона  $pd \rightarrow ppn$  с вылетом протонной пары вперед [25], передний детектор пересекают две частицы. С большой вероятностью оба протона при малой относительной энергии могут попасть в один и тот же счетчик, поэтому триггер, требующий, чтобы множественность в переднем детекторе равнялась 2, будет неэффективен. С целью отбора пар частиц независимо от топологии события в ОИЯИ разработана соответствующая электроника [26]. Аналоговые сигналы с каждого счетчика обеих плоскостей поступают на дискриминаторы с порогами, соответствующими одиночной и двойной ионизации. Если в каждой плоскости срабатывает по два

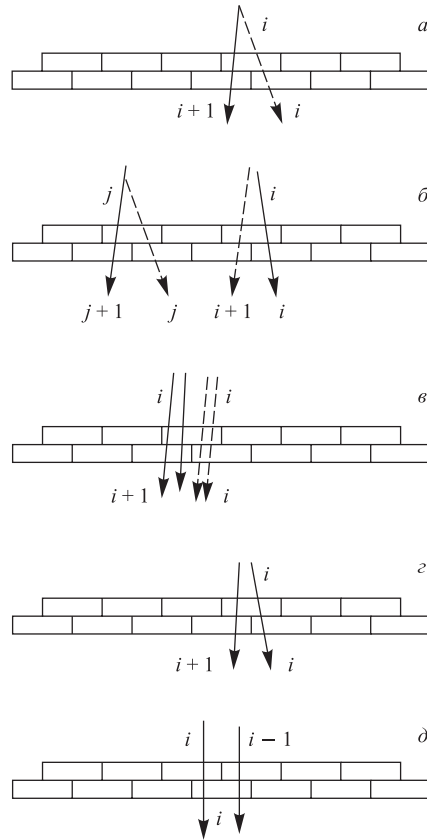


Рис. 15. Возможные варианты попадания частиц в счетчики переднего годоскопа ANKE, учтенные в триггерной логике: а) прохождение одиночной частицы; б–д) варианты попадания пар частиц. При пересечении двумя частицами одного и того же счетчика требуется амплитуда, превышающая порог для двойной ионизации

счетчика в пределах разрешающего времени совпадений, то выходной триггерный сигнал вырабатывается всегда. Если же в плоскости сработал только один счетчик, то его амплитуда должна превышать порог для двойной ионизации. В логике отбора предусмотрены все возможные комбинации попаданий частиц в один и тот же или в разные счетчики в обеих плоскостях (рис. 15, б–д).

Коэффициент подавления одиночных частиц триггером на парные частицы зависит от того, насколько хорошо различаются сигналы одиночных и двойных амплитуд, т. е. от амплитудного разрешения детектора, а также от установленных порогов дискриминации. Пороги для двойной ионизации выбираются из условия компромисса между высокой эффективностью регистрации пар (требующей не завышенного порога) и максимальным подавлением одиночных частиц (для чего порог должен быть как можно выше). При изменении энергии пучка меняется и импульсный спектр частиц в переднем детекторе. Поэтому для достижения оптимального подавления при сохранении высокой эффективности необходимо для каждой энергии использовать свои значения порогов, так как в энергетическом диапазоне ANKE ионизационные потери зависят от импульса.

При регистрации продуктов взаимодействия протонов с энергией 2 ГэВ с дейтронами счет одиночных частиц подавляется триггером на парные частицы в 10–11 раз при эффективности регистрации двух протонов, равной 95 %.

## 8. ЭКСПЕРИМЕНТ KLOE. ОТБОР ПО ЭНЕРГОВЫДЕЛЕНИЮ В СПЕКТРОМЕТРЕ И ПО МНОЖЕСТВЕННОСТИ В ДРЕЙФОВЫХ КАМЕРАХ

Основной целью эксперимента KLOE [27] является точное измерение параметров нарушения  $CP$ -симметрии в распадах нейтральных каонов. Эксперимент выполняется на  $\phi$ -фабрике DAΦNE во Фраскати,  $e^+e^-$ -коллайдере с энергией в системе центра масс  $W \approx m_\phi \approx 1,02$  ГэВ.

Экспериментальная установка (рис. 16) состоит из дрейфовых камер и герметичного электромагнитного калориметра, размещенных внутри обмотки сверхпроводящего магнита. Большие размеры детектора (внутренний радиус сверхпроводящей обмотки равен 2,5 м, длина 4,2 м) связаны с необходимостью регистрации  $K_L^0$ , которые имеют длину распада около 3,4 м.

Главным требованием, предъявляемым к триггерной системе KLOE [28], является высокая (близкая к единице) и хорошо контролируемая эффективность к распадам  $K_L$  и  $K_S$  на  $\pi^+\pi^-$  и  $\pi^0\pi^0$ , поскольку требуется весьма точное измерение относительных вероятностей этих четырех каналов распада. Кроме того, необходимо выделять акты электрон-позитронного рассеяния (*Bhabha-scattering*) и события от космических частиц, а также подавлять

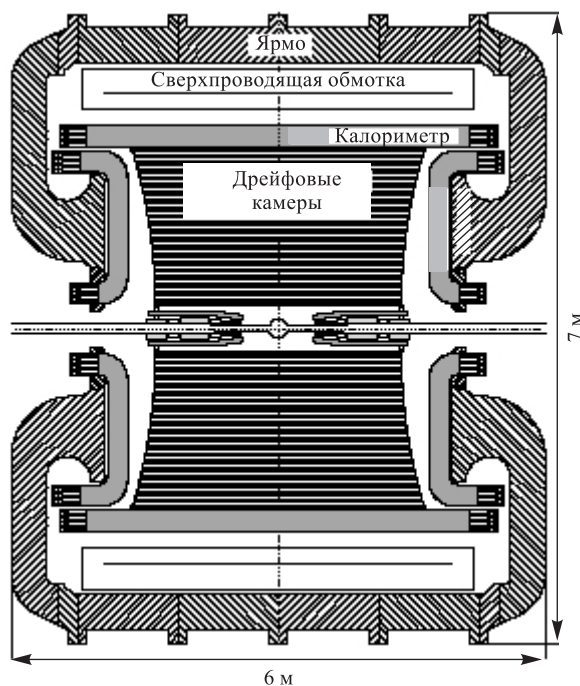


Рис. 16. Схема установки KLOE

фон от ускорителя, который в условиях DAΦNE оказался весьма значительным.

Особенностью данного эксперимента в отношении триггера является то, что набор детекторов, которые можно было бы использовать для отбора событий, крайне ограничен: помимо калориметра имеются только дрейфовые камеры. Это связано с необходимостью минимизировать количество вещества в распадном объеме для уменьшения многократного рассеяния, поглощения фотонов и возможной регенерации  $K_L$ -мезонов (имитирующей  $CP$ -нарушающие события). Обычно дрейфовые камеры редко используются в триггере первого уровня, но в KLOE реализован как раз такой вариант. Отбор событий основан на энерговыделении в электромагнитном калориметре EMC и его распределении по сегментам EMC, а также на числе сработавших каналов в дрейфовых камерах DC. На рис. 17 показаны примеры событий разных типов.

Применяется двухуровневая схема, показанная на рис. 18. Триггер первого уровня T1 вырабатывается с небольшой задержкой и синхронизируется

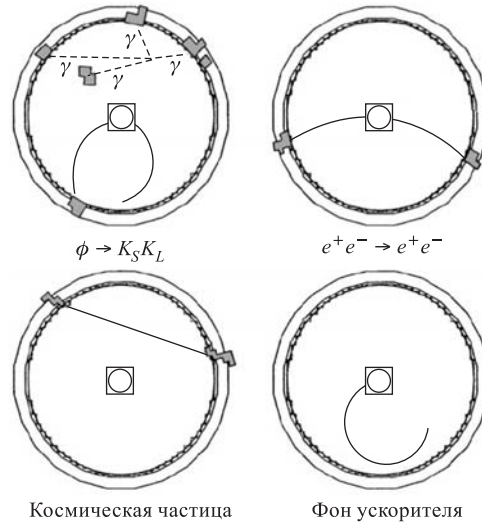


Рис. 17. Примеры событий в установке KLOE. Области, закрашенные серым цветом, указывают места энерговыделения в спектрометре

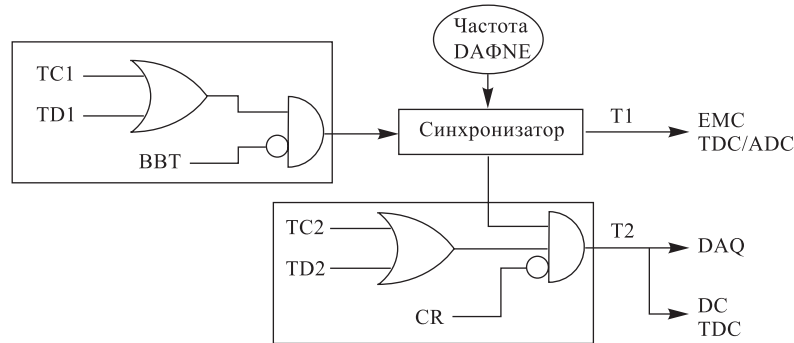


Рис. 18. Логика двухуровневого триггера в эксперименте KLOE

с управляющим сигналом от ускорителя (интервал между столкновениями пучков на DAΦNE составляет 2,7 нс). Триггер второго уровня T2, использующий больше информации и менее ограниченный по времени, в зависимости от оценки события либо инициализирует считывание информации, либо сбрасывает ее.

Каждый сигнал EMC сравнивается с двумя различными порогами. Низкий порог ( $\sim 50$  МэВ) применяется для идентификации  $\phi$ -распадов (*low energy*

*trigger* — LET), а высокий ( $\sim 350$  МэВ) служит для выделения событий  $e^+e^-$ -рассеяния (*Bhabha trigger* — ВВТ). Триггерные решения калориметра на первом и втором уровнях (ТС1 и ТС2\*) базируются на числе и геометрическом расположении сигналов LET. Эти критерии отбора вводятся при загрузке параметров. В системе дрейфовых камер на первом уровне TD1 требуется срабатывание некоторого небольшого числа проволок ( $\sim 15$ ) во временном окне, равном 250 нс. В таком достаточно узком интервале учтенными оказываются только сигналы с малым временем дрейфа зарядов до проволоки. При выработке триггерного сигнала второго уровня TD2 проверяется число отсчетов с проволок уже в интервале времени 1,2 мкс, близком к максимальному времени дрейфа.

Триггер первого уровня, определяемый логической формулой  $T1 = (ТС1 + TD1) \cdot \overline{ВВТ}$ , запускает процесс конверсии данных в ADC и TDC. Генерация последующих сигналов T1 блокируется на 2,6 мкс, перекрывая время конверсии. Триггер второго уровня,  $T2 = (ТС2 + TD2) \cdot T1 \cdot \overline{CR}$ , помимо учета посредством сигналов ТС2 и TD2 дополнительных данных с EMC и DC, подавляет запуски от космических частиц, используя сигнал CR («*cosmic ray*»-триггер). Если триггер T2 не появляется до окончания интервала мертвого времени (2,6 мкс), считывание не производится и событие сбрасывается.

**Триггер от калориметра.** Электромагнитный калориметр [29] представляет собой слоистый детектор из свинца и сцинтилляционных фибров, просматриваемых фотоумножителями. Калориметр состоит по глубине из пяти слоев, каждый слой разделен в поперечном направлении на сегменты. Форма и расположение сегментов в плоскостях выбраны таким образом, чтобы пять сегментов образовывали проективные «башни», ориентированные на точку встречи пучков в центре установки (рис. 19). Наружный слой калориметра используется как детектор космических лучей.

Для триггерных целей 2440 элементов калориметра скомбинированы в 88 групп (секторов), для обеспечения полного перекрытия организовано, кроме того, еще 80 дополнительных групп. Аналоговые сигналы пяти соседних фотоумножителей, соответствующих одной башне, линейно суммируются. Сигналы шести соседних башен, образующих триггерный сектор, складываются отдельно на каждой из сторон собирания света с фибров. Эти два аналоговых сигнала триггерного сектора сравниваются с высоким и низким порогами. При превышении соответствующего порога генерируются сигналы  $T_A^L$ ,  $T_A^H$ ,  $T_B^L$  и  $T_B^H$ , где индексы *L* и *H* обозначают низкий и высокий пороги дискриминации, *A* и *B* указывают на сторону считывания сектора. Триггерный сигнал *T* с сектора возникает при выполнении условия  $T = (T_A^L \cdot T_B^L) \cdot (T_A^H + T_B^H)$ . Та-

---

\*Ко времени подготовки настоящего обзора нет опубликованных данных о свойствах и применении триггера второго уровня с калориметра.

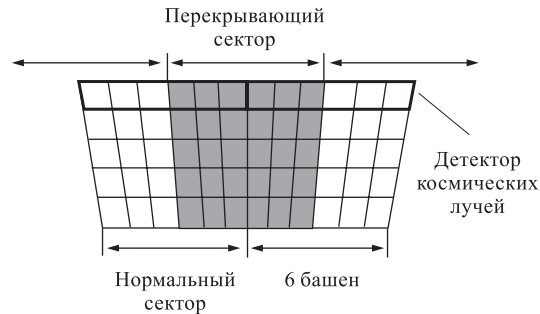


Рис. 19. Строение триггерных секторов в центральной области калориметра установки KLOE

кая логика позволяет улучшить однородность отклика в условиях поглощения света вдоль длины фибера.

Окончательно триггерный сигнал калориметра формируется в схеме, в которую поступают логические сигналы  $T$  с нормальных и перекрывающих секторов и которая методом их аналогового суммирования находит, с исключением двойного счета, число (множественность) локальных выделений энергии LET и ВВТ.

**Триггер от дрейфовых камер.** Система дрейфовых камер [30] включает более 12,5 тысяч сигнальных проволок. Триггер TD вырабатывается, если количество сработавших проволок превышает установленный порог. В триггерных целях все камеры разделены на 9 концентрических слоев, содержащих 4, 6 или 8 соседних плоскостей. В каждом из слоев производится аналоговое суммирование предварительно сформированных логических сигналов, причем множественность в слое подвержена «насыщению», т. е. принудительно ограничена сверху на программируемом уровне. Подсчет множественности отдельно по слоям и ограничение ее максимального значения в каждом из них позволяют существенно подавить ускорительный фон низкоэнергичных электронов, которые движутся внутри камер по спирали и дают сигнал на множестве проволок в ограниченной области детектора. Эффективность регистрации физического сигнала при этом не ухудшается.

Сигналы со слоев линейно суммируются и используются для выработки триггеров первого и второго уровней TD1 и TD2. Сигнал TD1 возникает при превышении уровня дискриминации, соответствующего срабатыванию  $\sim 15$  проволок во временном окне, равном 250 нс. Для выработки TD2 требуется срабатывание уже  $\sim 120$  проволок за больший интервал времени — 1,2 мкс, в котором, с учетом времени дрейфа, собирается около 85 % всех сигналов. Определение множественности для TD2 производится путем тестирования суммарного сигнала слоев с помощью «flash»-ADC.

Общий триггер, схема которого показана на рис. 18, формируется в электронном логическом устройстве, на которое поступают все указанные выше триггерные сигналы с калориметра, дрейфовых камер и синхронизирующий сигнал от ускорителя.

Таблица 2. Эффективность триггера KLOE к различным процессам, полученная из экспериментальных данных

Канал распада	Эффективность, %
$K_S \rightarrow \pi^+\pi^-, K_L \rightarrow \pi^+\pi^-\pi^0$	$99,4 \pm 0,1$
$K_S \rightarrow \pi^+\pi^-, K_L \rightarrow \pi^\pm e^\mp \nu_e$	$98,9 \pm 0,1$
$K_S \rightarrow \pi^+\pi^-, K_L \rightarrow \pi^\pm \mu^\mp \nu_\mu$	$98,7 \pm 0,1$
$K_S \rightarrow \pi^+\pi^-, K_L \rightarrow \pi^0\pi^0\pi^0$	$99,9 \pm 0,1$
$K_S \rightarrow \pi^0\pi^0, K_L \text{ crash}$	$99,86 \pm 0,04$
$K_S \rightarrow \pi^+\pi^-, K_L \text{ crash}$	$99,8 \pm 0,1$

*Примечание.* « $K_L \text{ crash}$ » [28] обозначают такие события, когда  $K_L$ -мезон достигает калориметра и взаимодействует в нем.

Ввиду крайней важности в данном эксперименте высокой эффективности триггера, этот вопрос тщательно изучался, помимо моделирования, с использованием экспериментальных данных. Эффективность регистрации разных процессов приведена в табл. 2. Для некоторых типов распадов эффективности калориметрического триггера и триггера дрейфовых камер, взятые отдельно, падают до 83–90 %, однако суммарный триггер во всех случаях вырабатывается с эффективностью выше или близкой к 99 %.

### 9. ЭКСПЕРИМЕНТ NA48: ТРИГГЕРНАЯ СИСТЕМА БЕЗ МЕРТВОГО ВРЕМЕНИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ КОНВЕЙЕРНОГО РЕЖИМА (PIPELINE)

Эксперимент NA48 на ускорителе SPS в CERN по своему масштабу приближается уже к более крупным экспериментам. Подробное описание его весьма развитой триггерной системы вышло бы за рамки настоящего обзора, поэтому ограничимся кратким рассмотрением ее принципиальных особенностей.

Эксперимент проводился на пучке нейтральных каонов со средней энергией 110 ГэВ и был нацелен на изучение нарушения  $CP$ -симметрии в распадах нейтральных  $K$ -мезонов с точностью  $10^{-4}$ . Установка состоит из двух основных частей: электромагнитного жидкокриптонового калориметра для регистрации распадов на нейтральные частицы и магнитного спектрометра с дрейфовыми камерами для детектирования заряженных мод распада.

Кроме того, установка дополнена адронным калориметром, мюонным вето-детектором, а также сцинтилляционными годоскопами.

Электроника триггерной системы занимает несколько десятков крейтов FASTBUS и VME. В качестве элементной базы широко используются микросхемы типа ASIC, FPGA, RAM, некоторые из них разработаны специально для данного эксперимента.

Ядром триггера является управляющая система TS [31] (Trigger Supervisor), которая получает и перерабатывает информацию от локальных решений, приходящих от ветвей триггеров на нейтральные,  $K^0 \rightarrow 2\pi^0$ , и заряженные,  $K^0 \rightarrow \pi^+\pi^-$ , частицы. Данные со всех детекторов постоянно оцифровываются и сохраняются в циркулярных буферах глубиной 200 мкс. За это время полезные события должны быть отобраны и помечены для последующего считывания системой сбора данных. На выходе TS формируется 64-битный триггерный пакет, состоящий из номера события (16 бит), триггерного слова (16 бит) и временной отметки события (32 бита). Этот пакет рассылается по ключевым узлам системы сбора данных и служит для контроля за процессом передачи данных и для построения событий.

Нейтральный триггер [32] NT (Neutral Trigger) представляет собой свободную от мертвого времени конвейерную цепь, которая выдает триггерную информацию, полученную при оцифровке сигналов с 13340 ячеек жидкокриптонового электромагнитного калориметра. Триггер NT реконструирует число ливней в каждой из проекций калориметра, полную энергию, центр тяжести выделения энергии и время жизни каона до распада.

Ветвь триггера на заряженные частицы [33] СТ (Charged Trigger) включает аппаратную и программную составляющие и реализована с частичным использованием конвейерного режима. Она состоит из быстрого триггера первого уровня и триггера второго уровня с применением вычислительных мощностей.

**Нейтральный триггер.** Нейтральный триггер организован как полностью синхронная конвейерная система. Требование высокой ( $> 99\%$ ) эффективности и малого мертвого времени при большой, порядка 0,5–1,0 МГц, загрузке детекторов привело к отказу от «классического» триггера с несколькими уровнями отбора. Вместо этого реализована конвейерная цепь глубиной 128 шагов, работающая с тактовой частотой 40 МГц. Задача выполнения в реальном времени операций сложения, умножения, линейных интерполяций при реализации алгоритма нахождения кластеров решается с помощью специально разработанных электронных схем, и данные по мере продвижения по конвейеру преобразуются в триггерное решение. Решение выдается синхронно с сигналами детекторов, через  $25 \text{ нс} \times 128 = 3,2 \text{ мкс}$  после первого шага цепи. При таком подходе отсутствует мертвое время (так как в конвейерном режиме не производится ожидание завершения обработки предыдущего события) и нет ограничений, связанных со сложной топологией события.



На рис. 20 показана схема преобразования данных с электромагнитного калориметра по мере их продвижения по конвейерной цепи нейтрального триггера.

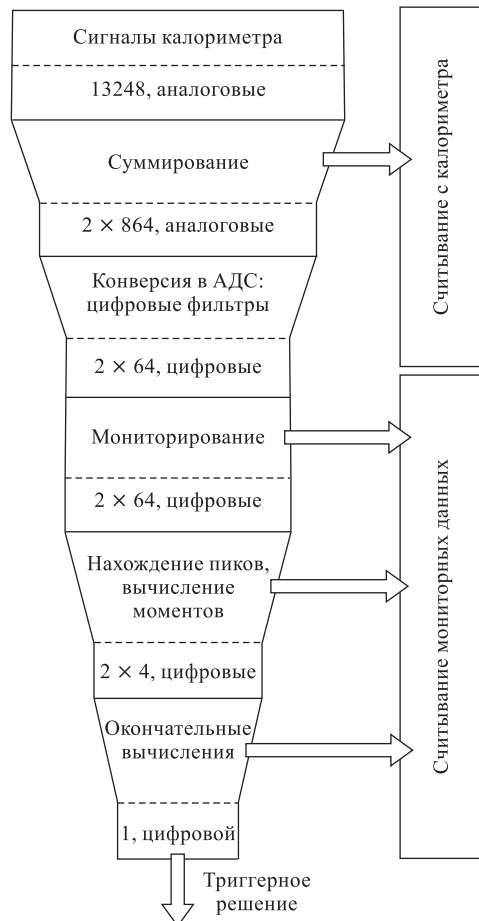


Рис. 20. Последовательность преобразования данных с калориметра в ветви нейтрального триггера установки NA48. Обработка происходит по мере продвижения по конвейерной цепи с верхней к нижней части рисунка. Числа указывают количество аналоговых сигналов или цифровых кодов (каждый по 12–15 бит) на каждой ступени

**Триггер на заряженные частицы.** Триггер на распады с образованием заряженных частиц состоит, как показано на рис. 21, из двух подсистем: триггера 1-го уровня (L1C), который снижает начальную скорость счета до 100 кГц, и триггера 2-го уровня (L2C), понижающего ее далее до 2 кГц. Бы-

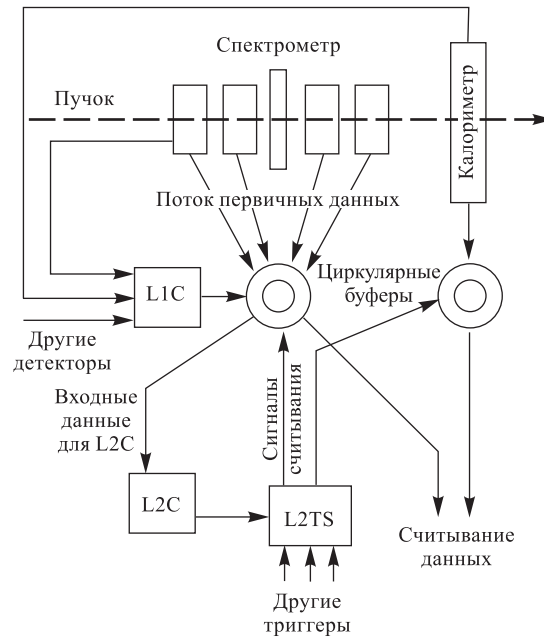


Рис. 21. Схема триггера NA48 для регистрации заряженных продуктов распада каонов

стрый логический триггер L1C, основанный на нескольких простых критериях, производит первичный отбор данных и инжектирует их в систему L2C. Триггер L2C — это система параллельной обработки с аппаратными и программными элементами. На стадии L2C вычисляются координаты частиц в дрейфовых камерах, реконструируются треки, вычисляется инвариантная масса распавшейся частицы и в результате выставляется флаг, классифицирующий событие как физический сигнал или фон.

В триггере L2C обрабатывается информация с трех дрейфовых камер (каждая из них имеет 8 сигнальных плоскостей, измеряющих по две координаты  $X, Y, U$  и  $V$  и попарно сдвинутых на полшага) (рис. 22). Координата пересечения плоскости вычисляется с использованием номеров пары сработавших проволок и временной разности между двумя сигналами. Этот алгоритм, как и в случае нейтрального триггера NT, реализуется на базе конвейерной линии с частотой 40 МГц. Типичное время, затрачиваемое на получение координат в событии, составляет 1,2 мкс. В следующей подсистеме за время не более 100 мкс производится построение события, реконструкция треков и вычисление инвариантной массы в предположении, что событие является распадом  $K \rightarrow \pi^+ \pi^-$ . Если обработка требует более 100 мкс, то событие отбрасывается.

Триггер L2C является асинхронной системой, в которой события обрабатываются в порядке очереди. Поскольку распределение запусков во времени подвержено статистическим вариациям по Пуассону, число событий в очереди на обработку флуктуирует вокруг некоторого среднего значения. Фактическое время решения для данного события зависит от его внутренней сложности и от времени ожидания в очереди. В триггере L2C очередь контролируется: когда число событий в очереди достигает критического уровня, поступление новых сигналов L1C блокируется. Активность L1C возобновляется, когда очередь «рассасывается». Такой механизм привносит некоторое мертвое время, однако в конкретных условиях эксперимента оно было мало.

**Качество триггера.** Полностью программируемая система отбора событий в NA48 позволяет легко создавать различные конфигурации триггера для контроля эффективности и применять их, с регулируемой скоростью поступления, параллельно с основными физическими триггерами.

Несмотря на использование конвейерного режима в основной части триггерной логики, небольшое мертвое время все же имеется и контролируется. Его источники подробно обсуждаются в [31]. Для моды триггера на заряженные частицы мертвое время составляет менее 2 % при эффективности выше, чем 97,5 %. В нейтральной моде мертвое время отсутствует, а эффективность превышает 99,7 %. Полное мертвое время, измеренное управляющей триггерной системой TS, составляет менее 1 % для 95 % сбросов пучка.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Триггерные системы в экспериментах среднего масштаба заметно варьируются по сложности. Выше были рассмотрены лишь характерные примеры систем отбора событий, при этом мы старались избегать повторов при описании похожих логических алгоритмов. В табл. 3 приведен перечень методов отбора, используемых триггерными системами различных экспериментов в последние пять лет (в том числе и некоторых, не упоминавшихся в тексте).

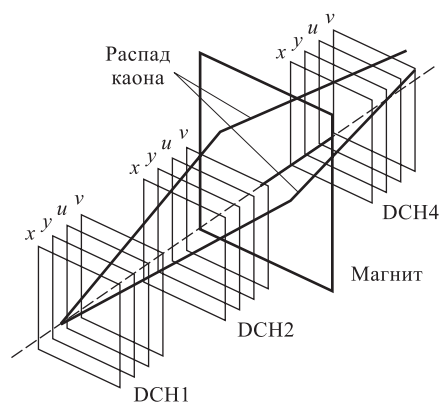


Рис. 22. Элементы спектрометра, используемые триггером 2-го уровня L2C при распаде  $K \rightarrow \pi^+\pi^-$ . DCH — дрейфовые камеры

Таблица 3. Информация и методы, используемые для отбора событий триггерными системами различных экспериментов

Информация и методы	DIRAC [4]	PIBETA [16]	ANKE [18]	KLOE [28]	NA48 [31]	DISTO [34]	HADES [35]
Черенковские детекторы	•						•
Время пролета			•				•
Ионизационные потери	•	•	•				
Энерговыделение		•		•	•		
Топология события (в т. ч. множественность)	•	•	•	•	•	•	•
Информация с трековых детекторов	•			•	•		•
Кинематические соотношения	•				•		
Многоуровневый триггер	•			•	•		•
Конвейерный режим					•		

Целью данного обзора было показать разнообразие методов, используемых в триггерных системах экспериментов среднего масштаба. В каждом конкретном случае выбор архитектуры и логики триггера определяется отношением сигнал/фон в исходном потоке данных, доступными ресурсами и изобретательностью экспериментаторов. Несмотря на огромные усилия и средства, вкладываемые в создание крупномасштабных установок для ускорителей на сверхвысокие энергии, эксперименты среднего масштаба в физике частиц будут и далее развиваться, занимая свою нишу в исследовании свойств материи.

Автор благодарен В. В. Карпухину за полезные замечания по содержанию обзора.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Smith Wesley H.* Triggering at LHC experiments // Nucl. Instr. Meth. A. 2002. V. 478. P. 62–67.
2. *Adeva B. et al.* Lifetime measurement of  $\pi^+\pi^-$  atoms to test low energy QCD predictions. Proposal to the SPSLC. CERN/SPSLC 95-1, SPSLC/P 284. 1994.
3. *Adeva B. et al.* DIRAC: A high resolution spectrometer for pionium detection // Nucl. Instr. Meth. A. 2003. V. 515. P. 467–496.
4. *Afanasyev L. et al.* The multilevel trigger system of the DIRAC experiment // Nucl. Instr. Meth. A. 2002. V. 491. P. 376–389.
5. *Afanasyev L. et al.* First level trigger of the DIRAC experiment // Ibid. V. 479. P. 407–411.
6. *Kokkas P. et al.* The neural network first level trigger for the DIRAC experiment // Nucl. Instr. Meth. A. 2001. V. 471. P. 358–367.

7. *Gallas M.* Third level trigger of the DIRAC experiment // Nucl. Instr. Meth. A. 2002. V. 481. P. 222–228.
8. FERA — Fast Encoding and Readout ADC System Possibilities. Application Note AN-4004A. LeCroy Corporation.
9. *Karpukhin V. et al.* Readout logic and its hardware implementation in the DIRAC experiment // Nucl. Instr. Meth. A. 2003. V. 512. P. 578–584.
10. *Agoritsas V. et al.* Development of a scintillating-fibre detector for fast topological triggers in high-luminosity particle physics experiments // Nucl. Instr. Meth. A. 2000. V. 452. P. 17–30.
11. *Bishop C.* Neural networks for pattern recognition. Oxford: Clarendon Press, 1995. 256 p.;  
*Никитюк Н.М.* Нейронные, нейрокомпьютеры и их применение в экспериментальной физике высоких и сверхвысоких энергий // ЭЧАЯ. 2001. Т. 32, вып. 2. С. 431–480;  
*Осовский С.* Нейронные сети для обработки информации. М.: Финансы и статистика, 2002. 343 с.
12. *Leimgruber F. et al.* Hardware realization of a fast neural network algorithm for real-time tracking in HEP experiments // Nucl. Instr. Meth. A. 1995. V. 365. P. 198–202.
13. *Tauscher L., Vlachos S., Wadhwa M.* A charge particle trigger based on neural networks for the L3 experiment using the inner-TEC detector // Nucl. Instr. Meth. A. 1997. V. 389. P. 138–140.
14. *Kulikov A., Zhabitsky M.* Dead time losses and their measurement in DIRAC // Nucl. Instr. Meth. A. 2004. V. 527. P. 591–597.
15. *Počanić D. et al.* Proposal for an experiment at PSI. R 89-01.1. PSI. Villigen, 1991.
16. *Frlēz E. et al.* Design, commissioning and performance of the PIBETA detector at PSI. hep-ex/0312017 v1. 2003.
17. *Počanić D. et al.* Precise measurement of the  $\pi^+ \rightarrow \pi^0 e^+ \nu_e$  branching ratio. hep-ex/0312030 v1. 2003.
18. *Barsov S. et al.* ANKE, a new facility for medium energy hadron physics at COSY-Jülich // Nucl. Instr. Meth. A. 2001. V. 462. P. 364–381.
19. *Koptev V. et al.* Forward  $K^+$  production in subthreshold  $pA$  collisions at 1.0 GeV // Phys. Rev. Lett. 2001. V. 87, No. 2. P. 022301-1–022301-4.
20. *Koptev V. et al.* Observation of  $K^+d$  correlations from  $pA$  collisions // Eur. Phys. J. A. 2003. V. 17. P. 235–240.
21. *Schleichert R.* Entwicklung eines schnellen Triggersystems für das ANKE-Spektrometer am COSY-Speicherring in Jülich. PhD Thesis. Technische Hochschule. Aachen, 1996.
22. *Schleichert R. et al.* The fast trigger for the  $0^\circ$  facility Side Detector. IKP Annual Report 1994. Jülich, 1995. P. 66–67.
23. *Büscher M. et al.* Identification of  $K^+$ -mesons from subthreshold  $pA$  collisions with ANKE at COSY-Jülich // Nucl. Instr. Meth. A. 2002. V. 481. P. 378–396.
24. *Chiladze B. et al.* The forward detector of the ANKE spectrometer. Scintillation and Cherenkov hodoscopes // Part. Nucl. Lett. 2002. No. 4[113]. P. 95–100.
25. *Komarov V. et al.* Proton-induced deuteron breakup at GeV energies with forward emission of a fast proton pair // Phys. Lett. B. 2003. V. 553. P. 179–185.
26. *Dymov S.N. et al.* Trigger electronics for the forward and backward hodoscopes of ANKE. JINR Commun. E10-2002-19. Dubna, 2002. 15 p.
27. *KLOE collab.* KLOE: a general purpose detector for DAΦNE. Technical Proposal LNF-92/019(IR). Fraskati, 1992.

- 
28. *Adinolfi M. et al.* The KLOE trigger system // Nucl. Instr. Meth. A. 2001. V. 461. P. 465–469;  
*Adinolfi M. et al.* The trigger system of the KLOE experiment // Nucl. Instr. Meth. A. 2002. V. 492. P. 134–146.
  29. *Adinolfi M. et al.* The KLOE electromagnetic calorimeter // Ibid. V. 482. P. 364–386.
  30. *Adinolfi M. et al.* The tracking detector of the KLOE experiment // Ibid. V. 488. P. 51–73.
  31. *Arcidiacono R. et al.* The trigger supervisor of the NA48 experiment at CERN SPS // Nucl. Instr. Meth. A. 2000. V. 443. P. 20–26.
  32. *Barr G. et al.* The trigger for  $K^0 \rightarrow \pi^0 \pi^0$  decays of the NA48 experiment at CERN // Nucl. Instr. Meth. A. 2002. V. 485. P. 676–697.
  33. *Anvar S. et al.* The charged trigger system of NA48 at CERN // Nucl. Instr. Meth. A. 1998. V. 419. P. 686–694.
  34. *Balestra F. et al.* DISTO: a large acceptance multiparticle spectrometer for 1–3 GeV proton beams // Nucl. Instr. Meth. A. 1999. V. 426. P. 385–404.
  35. *Garabatos C. et al.* The HADES dilepton spectrometer // Nucl. Phys. B (Proc. Suppl.). 1998. V. 61. P. 607–612.