



ГОСУДАРСТВЕННЫЙ НАУЧНЫЙ ЦЕНТР РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

ИНСТИТУТ ФИЗИКИ ВЫСОКИХ ЭНЕРГИЙ

ИФВЭ 97-32  
ОНФ

В.Б. Аникеев, С.В. Беликов, Ю.В. Гилицкий, С.Н. Гуржиев,  
Ю.Е. Гутников, А.Г. Денисов, С.П. Денисов, А.Ю. Душкин,  
В.И. Корешев, В.И. Кочетков, В.В. Липаев, С.В. Лось, П.В. Мамаков,  
Е.А. Мельников, В.Н. Михайлин, В.С. Михайлов, С.А. Мухин,  
А.П. Солдатов, А.А. Спиридонов, А.Н. Сытин, Г.В. Тишин,  
И.В. Шеин

*(ИФВЭ, Протвино, Россия)*

Дж. Дженнаро, Ф. Серджиампиетри, Г. Спандре, К. Черри  
*(ИНФН, Пиза, Италия)*

Дж. Конфорто, А. Маркионни  
*(ИНФН, Флоренция, Италия)*

## БОЛЬШОЙ ЖИДКОАРГОНОВЫЙ СПЕКТРОМЕТР БАРС

Направлено в ПТЭ

Протвино 1997

### Аннотация

Аникеев В.Б. и др. Большой жидкоаргоновый спектрометр БАРС: Препринт ИФВЭ 97-32. – Протвино, 1997. – 25 с., 21 рис., 3 табл., библиогр.: 20.

Дается описание 433-тонного жидкоаргонового детектора, используемого как активная мишень для меченых  $\nu_\mu$ - и  $\nu_e$ -пучков на ускорителе У-70. Высокий процент активного вещества и высокиепродольная и поперечная сегментации обеспечивают хорошие энергетическое, пространственное и угловое разрешения, а также детальное восстановление нейтринных взаимодействий. Кроме того, быстрый триггер на нейтрино-подобные события позволяет посредством синхронного считывания информации с детекторов станции меченя идентифицировать тип провзаимодействовавшего нейтрино.

### Abstract

Anikeev V.B. et al. Big Liquid Argon Spectrometer BARS: IHEP Preprint 97-32. – Protvino, 1997. – p. 25, figs. 21, tables 3, refs.: 20.

The 433 tons liquid argon detector, used as an active target for tagged  $\nu_\mu$ - and  $\nu_e$ -beams at the 70 GeV PS of Serpukhov, is described. High percentage of active material, combined with fine transversal and longitudinal segmentation, ensures very good energy, space and angle resolutions and a detailed description of neutrino interactions. Furthermore fast trigger on neutrino-like events allows, through the synchronous read-out of the information from the tagging station detectors, the identification of the interacting neutrino.

## Введение

БАРС используется как детектор-мишень в Комплексе меченых нейтрино (КМН) [1]. Схема комплекса показана на рис. 1. Детектор облучается пучком мюонных и электронных нейтрино, образующихся при распадах  $K_{\mu 2}$  и  $K_{e 3}$  заряженного каонного пучка. Железная защита толщиной 28 метров предотвращает проникновение нераспавшихся адронов в БАРС. Таким образом, только нейтрино, космические частицы и часть мюонов от пучка, прошедшие (или обогнувшие) защиту, попадают в детектор.

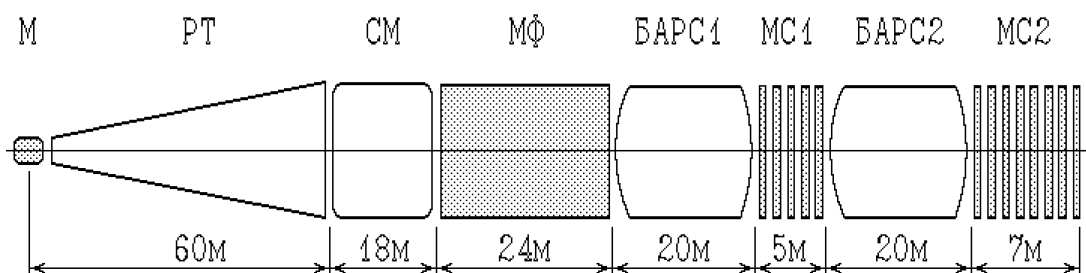


Рис. 1. Комплекс меченых нейтрино. М — фокусирующий магнит; РТ — распадная труба; СМ — станция мечения; МФ — мюонный фильтр; БАРС1, БАРС2 — нейтринный детектор; МС1, МС2 — магнитный спектрометр.

В случае нейтринного взаимодействия кроме измерения выделенной при взаимодействии энергии и восстановления детального пространственного распределения БАРС должен выработать триггер для станции мечения (рис. 2), в обязанность которой входит регистрация частиц, ассоциированных с нейтрино от того же каонного распада. Такая методика мечения позволяет восстановить энергию, траекторию и координаты образования нейтрино, а также определить его аромат. Для исключения запуска от космических и пучковых мюонов триггер должен вырабатываться с хорошим обрезанием по энергovyделению в детекторе.

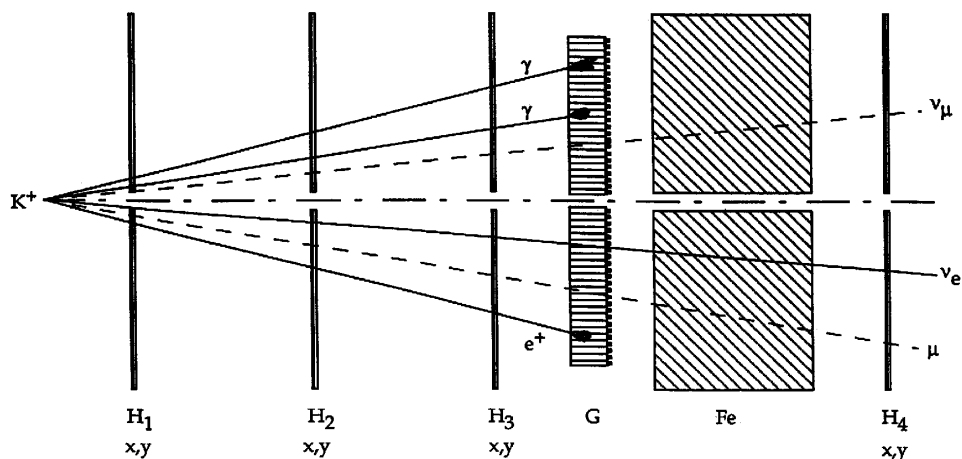


Рис. 2. Станция мечения. H<sub>1</sub>, H<sub>2</sub>, H<sub>3</sub>, H<sub>4</sub> — двухкоординатные сцинтилляционные годо­скопы (x, y); G — электромагнитный калориметр ГЕПАРД; Fe — 3-метровый железный поглотитель адронов.

## 1. Общее описание

Большой жидкоаргоновый спектрометр состоит из двух одинаковых криостатов БАРС-1 и БАРС-2, расположенных один за другим вдоль оси пучка и заполненных жидким аргоном (рис. 3).

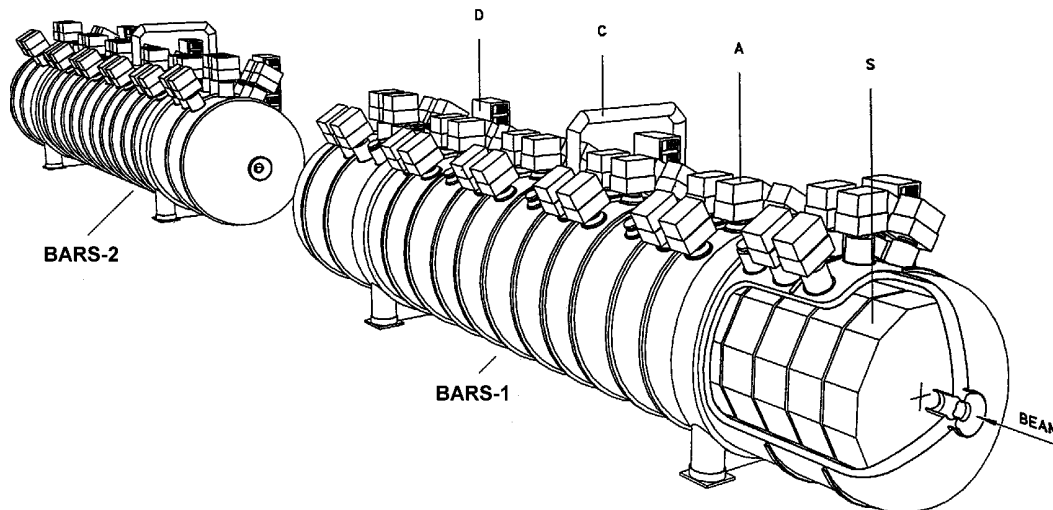


Рис. 3. Большой жидкоаргоновый спектрометр БАРС. S — секции ионизационных камер; A — боксы с РЭ электроникой; C — трубопровод для аварийного сброса газообразного аргона; D — стойки электроники ССД.

Внутри каждого криостата расположены 24 ионизационные камеры, перемежающиеся сцинтилляционными триггерными детекторами (рис. 4).

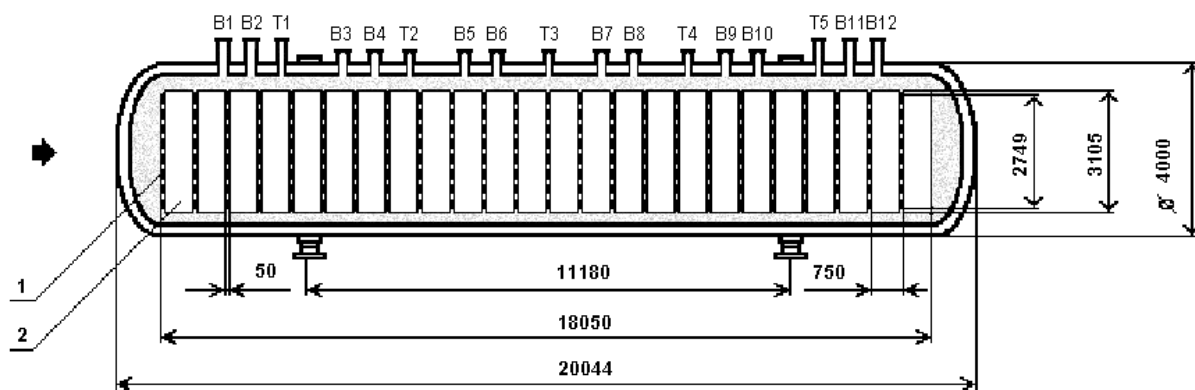


Рис. 4. Расположение детекторов внутри криостата. 1 — триггерная плоскость; 2 — секция ионизационных камер; B1, ..., B12 — выводные фланцы для ионизационных сигналов; T1, ..., T5 — выводные фланцы для сигналов триггерных счетчиков. Все размеры указаны в миллиметрах.

Ионизационные камеры используются для сбора ионизационного заряда, образующегося при прохождении заряженных частиц через жидкий аргон. Анализ амплитуд сигналов от всех элементов камер позволяет реконструировать энергетические и геометрические параметры произошедшего взаимодействия.

Триггерная система должна обеспечить высокоэффективную регистрацию нейтринных взаимодействий в детекторе БАРС и вырабатывать быстрый триггерный сигнал для всех детекторов КМН. Точное согласование по времени регистрации нейтринного взаимодействия с регистрацией частиц, образованных в результате распада родительского мезона, требует также и высокого ( $< 5$  нс) временного разрешения триггерных детекторов.

Спектрометр БАРС представляет собой самостоятельную систему, включающую в себя выработку триггера и полный цикл преобразования и накопления данных. С остальными элементами комплекса БАРС связан лишь несколькими коаксиальными кабелями.

Криогенная система детектора основана на замкнутом цикле хранения аргона, который постоянно поддерживается в жидкой фазе либо в 6 емкостях хранилища, расположенного за пределами экспериментального зала, либо в криостатах БАРС. Последние охлаждаются жидким азотом, при этом давление паров аргона поддерживается в пределах  $1,4 \div 1,7$  атм. Для тепловой изоляции криостатов используется вакуумная рубашка с внутренним майларовым отражателем, предохраняющим от проникновения инфракрасного излучения. Криогенная система изготовлена на НПО «Криогенмаш» (г. Балашиха). Основные параметры детектора представлены в табл. 1.

Таблица 1. Общие параметры БАРС.

Общий вес жидкого аргона	432,6 тонны
Масса жидкого аргона в полезном объеме	308 тонн
Масса системы электродов	118 т
Масса пластического сцинтиллятора	6,6 т
Средняя плотность	1,6 г/см <sup>3</sup>
Средняя радиационная длина	13,1 см
Средняя ядерная длина	72,7 см
Средний мольеровский радиус	8,25 см
Изменение чистоты аргона за 5 лет эксплуатации	3÷5 ppm O <sub>2</sub>
Расход жидкого азота для стабилизации Ar в БАРС	2 т/день
Расход жидкого азота для стабилизации Ar в хранилище	0,1 т/день
Скорость захлаживания	5° К/час
Скорость заполнения БАРС	10 т/час
Скорость аварийного слива	50 т/час

## 2. Система ионизационных камер

Ионизационные камеры внутри БАРС-1 и БАРС-2 состоят из расположенного вдоль оси пучка ряда идентичных элементарных двухзорных структур (бигэп). Бигэп представляет собой три параллельные алюминиевые пластины, толщиной 3 мм каждая, разнесенные на 24 мм друг от друга. Первая и третья пластины заземлены, а на вторую, являющуюся сигнальным электродом, подается высокое напряжение (рис. 5).

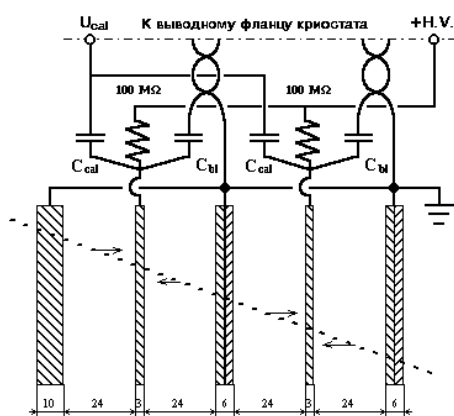


Рис. 5. Схема подключения сигнальных электродов ионизационных камер.  $C_{bl}$  — блокировочный конденсатор;  $C_{cal}$  — калибровочный конденсатор.

Каждый сигнальный электрод сегментирован в поперечном направлении на 48 стрипов шириной 61 мм каждый; зазор между стрипами 2 мм. Ориентация стрипов такова, что в каждом последующем бигэпе они повернуты на 120° по отношению к предыдущему. Так, в первом бигэпе стрипы расположены под углом 0° по отношению к вертикали, во втором — под углом 120°, в третьем — 240° и т.д. (рис. 6).

Таким образом, формируется система трех координат  $X, U, V$ . Внутри каждого из криостатов электроды сгруппированы в 24 секции. Секция включает в себя 12 бигэпов (по четыре для каждой координаты), образуя, таким образом,  $12 \times 48 = 576$  сигнальных стрипа. Сигналы с электродов снимаются через высоковольтные блокировочные конденсаторы, выполненные в виде печатных плат из стеклотекстолита. На

каждой плате расположены 4 блокировочных и 4 калибровочных конденсатора, используемые для инжектирования калибровочного заряда. Платы монтируются на торцах сигнальных электродов по периметру секции с помощью пружинных контактов. Из детектора сигналы выводятся витыми парами через герметизированные многоконтактные разъемы, установленные на выводных фланцах криостата. Секции смонтированы попарно на 12 алюминиевых подвижных платформах. Такая конструкция получила название “вагон”. Вагоны могут перемещаться по двум рельсам внутри криостата. Геометрические и физические параметры системы электродов приведены в табл. 2.

Таблица 2. Параметры ионизационного калориметра.

Число секций в криостате	24
Число сигнальных плоскостей в секции	12, по 4 для X,U,V
Число сигнальных стрипов в плоскости	48
Ширина зазора в жидком аргоне	24 мм
Суммарное число сигнальных стрипов в детекторе	27648
Продольный размер секции	698 мм
Зазор между секциями	52 мм
Толщина сигнальной плоскости	3 мм, алюминий
Толщина земельных плоскостей:	
11-ти внутренних	6 мм, алюминий
двух внешних	10 мм, алюминий
Ширина сигнального стрипа	61 мм
Зазор между стрипами	2 мм
Средняя электрическая емкость стрипа	280 пФ
Средняя электрическая емкость сигнальных кабелей	300 пФ
Средняя емкость HV блокировочных конденсаторов	900 пФ
Средняя калибровочная емкость	8 пФ
Прикладываемое высокое напряжение	+6 кВ
Число общих фланцев для HV и сигнальных разъемов	72
Число HV разъемов	48
Число фланцев для сигнальных разъемов	144
Число сигнальных контактов	59904
Число боксов front-end электроники	72
Число Еврокорзин в каждом боксе	2
Число Еврокарт в каждой Еврокорзине:	
Карты заряд-цифра преобразователей (QDC)	24
Карта ввода/вывода (I/O)	1
Карта селективной аналоговой суммы (SAS)	1
Карта-распределитель калибровочных сигналов (CD)	1
Число каналов в одной QDC-карте	8
Суммарное число каналов электроники	27648

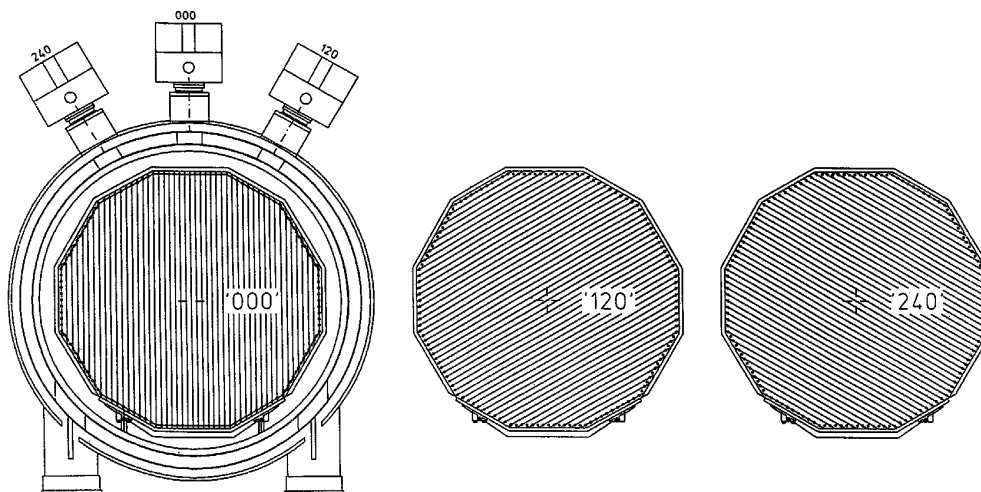


Рис. 6. Ориентация стрипов в X-, U-, V-проекциях.

### 3. Сцинтилляционный триггерный детектор

Триггерная логика первого уровня основана на сигналах от 48 сцинтилляционных плоскостей [2,3,4,5,6,7], расположенных перед каждой секцией системы электродов (рис. 4). Каждая плоскость состоит из 8 горизонтальных сцинтилляционных пластин шириной 334 мм и толщиной 22 мм. Формы пластин подобраны так, что плоскость представляет собой шестнадцатиугольник с общей площадью  $5,7 \text{ м}^2$ , перекрывающий 80% площади электродов (рис. 7).

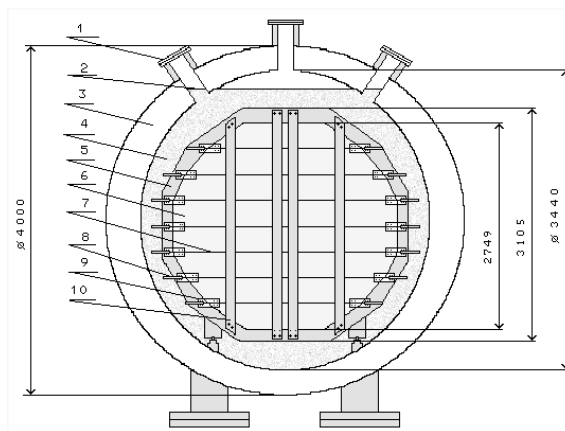


Рис. 7. Вид плоскости сцинтилляционной триггерной системы, закрепленной на внешней стороне ионизационной камеры, внутри криостата БАРС. 1 — фланцы для вывода высоковольтных и сигнальных кабелей триггерных счетчиков; 2 — уровень заполнения криостата аргоном; 3 — вакуумная полость криостата; 4 — внутренняя полость криостата; 5 — ионизационная камера; 6 — полоса сцинтиллятора; 7 — переизлучатель света; 8 — ФЭУ в кожухе из нержавеющей стали; 9 — накладки из оргстекла для крепления кожуха ФЭУ к полосам сцинтилляторов; 10 — полосы из дюралюминия для крепления плоскости сцинтилляционного триггера к ионизационной камере.



Пластический сцинтиллятор СОФГ-120 изготовлен из полиметилакрилата с добавлениями 14% нафталина, 0,8% РРО, 0,08% РОРОР [4]. Свет от сцинтиллятора транспортируется к 14 ФЭУ семью пластиковыми переизлучателями СОФЗ-105 [5] сечением  $20 \times 10 \text{ мм}^2$ , расположенными между сцинтилляционными пластинами. Каждый переизлучатель просматривается с обоих концов двумя ФЭУ 84-3. Все триггерные плоскости вместе с ФЭУ и их высоковольтными делителями находятся непосредственно в жидком аргоне. Высоковольтные и сигнальные кабели счетчиков выведены на фланцы триггерной системы детектора БАРС через герметичные разъемы.

#### 4. Электроника

Электроника БАРС состоит из четырех связанных между собой систем:

- 1) электроника быстрого сцинтилляционного триггера [6], используемая для выработки триггера первого уровня и контроля работы системы быстрого триггера;
  - 2) регистрирующая электроника (РЭ) [9], предназначенная для сбора и обработки ионизационной информации;
  - 3) электроника системы сбора данных (ССД), выполненная в стандарте КАМАК [10], выполняющая анализ поступающих триггерных сигналов, выработку команд для РЭ, считывание и накопление цифровой информации;
  - 4) электроника ССД второго уровня, обеспечивающая прием данных от всей цифровой электроники обоих детекторов БАРС и передачу этой информации в главный компьютер, а также управление режимами работы системы сбора данных.
- Организация электроники БАРС показана на рис. 8.

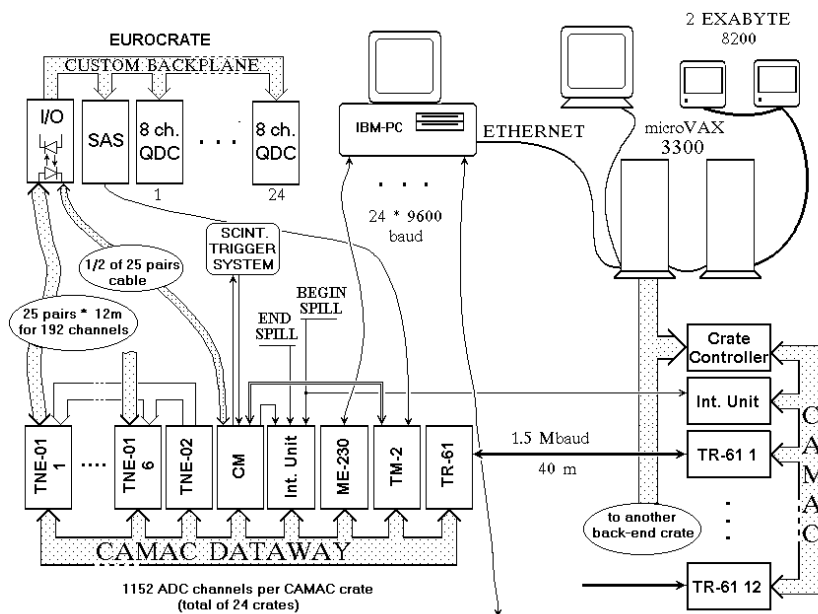


Рис. 8. Организация электроники БАРС.

#### 4.1. Триггерная электроника

Светосбор от каждой пластины триггерной плоскости (за исключением крайних) осуществляется с помощью 2 сместителей спектра, передающих свет в 4 ФЭУ. Для повышения эффективности регистрации частиц сигналы от двух соседних ФЭУ складываются. После усиления сигналы с двух противоположных концов каждого счетчика поступают на схему “mean-timer” (МТ) [8]. МТ вырабатывает сигнал, не зависящий по времени от места прохождения частицы через счетчик. Сигналы МТ всех восьми счетчиков плоскости суммируются в логической схеме ИЛИ, образуя единый сформированный сигнал с плоскости (рис. 9).

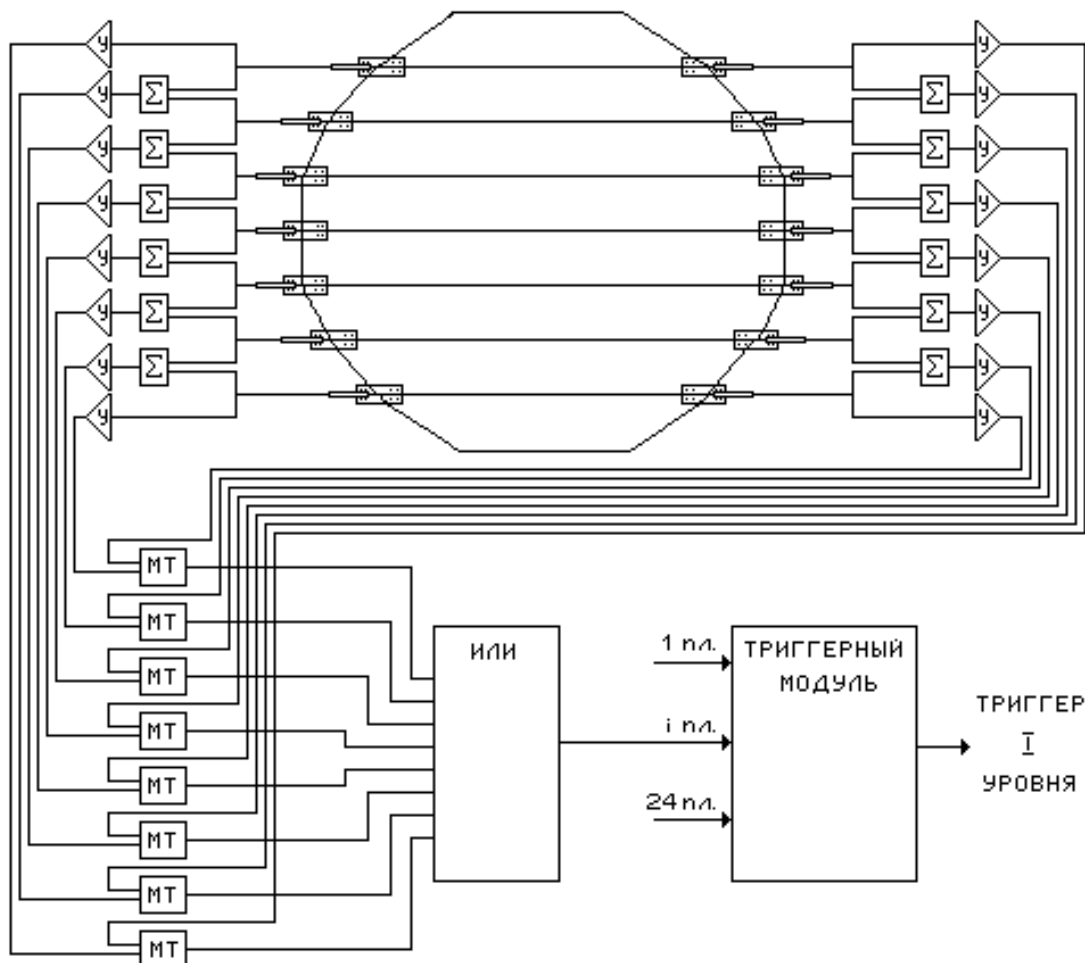


Рис. 9. Схема формирования сцинтилляционного триггера первого уровня. S — сумматор, У — усилитель, МТ — mean-timer, ТМ — триггерный модуль.

Сигналы со всех 24 плоскостей в каждом БАРС поступают в триггерный модуль, вырабатывающий сигнал запуска при совпадении сигналов от любых трех соседних плоскостей. Кроме того, для подавления сигналов от ускорительных и космических мюонов создана система мюонной режекции (СМР). Аналоговые сигналы

от всех ФЭУ триггерной плоскости суммируются, и сумма поступает на пороговый дискриминатор. Далее сигналы от всех 24 дискриминаторов складываются в логической схеме ИЛИ, выход которой включен на совпадение с триггером первого уровня (рис. 10).

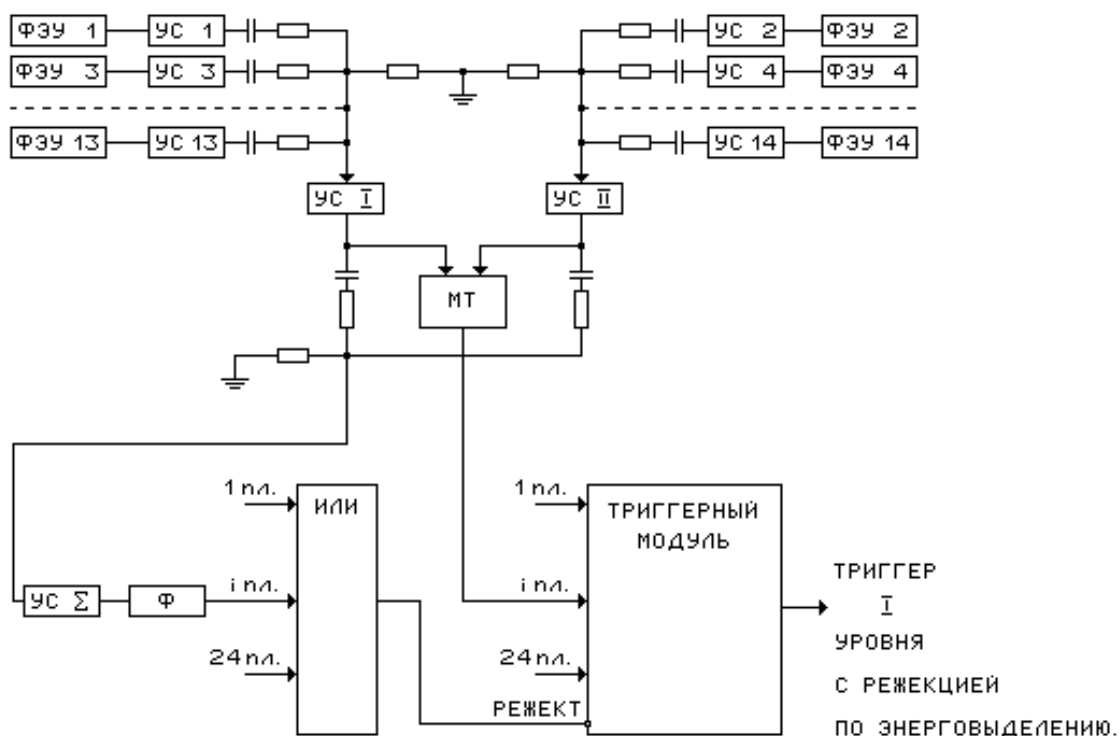


Рис. 10. Схема формирования сцинтиляционного триггера с режекцией по амплитуде сигналов. УС1, ... УС4 — предусилители; УС-Σ, УСI, УСII — усилители-сумматоры; МТ — mean-timer; Ф — формирователь с регулируемым порогом.

Таким образом, триггер не вырабатывается, если все сигналы от плоскостей не превысили заданного порога [6]. СМР позволяет снизить число триггеров от проходящих мюонов в 6 раз, в то время как вероятность режекции адронного или электромагнитного ливня с энергосвободением  $>1$  ГэВ составляет  $\approx 6\%$ . Зависимость коэффициента подавления для мюонов и адронов от установленных порогов приведена в табл. 3.

Таблица 3. Эффективность выработки триггера для частиц различного сорта.

Порог сцинтиляционного режекта (МР)	1	2	3	4
Пропускание пучковых мюонов (%)	59	36	17	-
Пропускание космических мюонов (%)	74	53	29	17
Эффективность регистрации космических адронов с $E > 1$ ГэВ (%)	98,6	96,6	94	90

Временное разрешение триггера первого уровня составляет  $\approx 4$  нс. Триггер первого уровня запускает преобразование в цифровую форму сигналов от калориметра БАРС и детекторов станции мечения.

Помимо формирования триггера первого уровня система обеспечивает контроль работы сцинтилляционных плоскостей. В схему контроля входят выполненные в стандарте КАМАК шесть 16-разрядных восьмивходовых счетчиков КС-019 [11], два 16-входовых регистра КР-011 [12], блок связи с центральной ЭВМ TR-61 [13], микроЭВМ АКК-19 [14], объединенная с контроллером каркаса и регистр прерываний.

Работа системы контроля происходит следующим образом. После загрузки и запуска программы в микроЭВМ АКК-19 производится инициализация каркаса и начинается ожидание прихода сигнала “Начало вывода пучка”. Затем по приходу каждого сигнала запуска считывается информация с входных регистров КР-011, в которые заведены сформированные сигналы от сцинтилляционных плоскостей. После этого в течение  $\approx 40$  мкс ожидается возможное получение от системы сбора данных сигнала запрета обработки данного события. Если таковой не приходит, то событие считается принятым и заносится в память микроЭВМ. Информация с регистров КР-011 говорит о том, какие плоскости сформировали триггер для каждого принятого события. По приходу сигнала “Конец вывода пучка” считывается информация с шести счетчиков КС-019, которые разделены на две группы. В три модуля первой группы заведены сигналы от двойных совпадений соседних плоскостей, а в три модуля второй группы — от тройных совпадений соседних плоскостей. Для любой из плоскостей, кроме первой и последней, по отношению числа тройных совпадений к двойным оценивается эффективность регистрации событий. Затем вся полученная информация через модуль связи TR-61 передается в центральную ЭВМ для записи на ленту и выводится в наглядном виде на графический монитор управляющего компьютера для оперативного контроля работоспособности триггерной системы.

## 4.2. Регистрирующая электроника

При прохождении минимально ионизирующей частицы через бигэп ионизационной камеры БАРС на сигнальном электроде собирается электрический заряд, величина которого составляет лишь несколько фемто-кулон. Это накладывает жесткие ограничения на шумовые параметры системы регистрации.

Чтобы избежать появления земляных петель и внешних наводок, которые могут возникнуть в детекторе подобного размера (4 м в диаметре и 40 м в длину), были приняты следующие меры:

1. Используется единая земля, в качестве которой выбраны корпуса криостатов, имеющие хорошее заземление через криогенную систему.
2. Все секции электродов с обслуживающей их электроникой заземлены независимо друг от друга толстым проводником на выходных фланцах криостатов.

3. В детектор вводятся только кабели высоковольтного питания, подключенные к сигнальным электродам через 100 МОм сопротивления (рис. 5), и калибровочные кабели, намотанные на ферритовые сердечники.
4. Сигнал от каждого электрода выводится из детектора по скрученной паре, которая подключается ко входу малошумящего предусилителя через изолирующий согласующий трансформатор с электростатическим экраном между обмотками.
5. Каркасы с регистрирующей электроникой закреплены непосредственно на выходных фланцах криостатов и запитаны от источников питания с изолированным “нулем” и электростатическим экраном между обмотками силового трансформатора.
6. Каждый каркас принимает и передает цифровые сигналы с использованием оптронной развязки, а аналоговые — через изолирующие трансформаторы.

Для размещения РЭ используются каркасы, установленные попарно непосредственно на выводных фланцах детектора. Такая конструкция из пары каркасов и общего для них источника питания получила название “QDC-бокс”. Каркасы выполнены в стандарте Евромеханика и имеют специально изготовленные кросс-платы с упрощенным протоколом обмена данными. В каждом из них размещено 24 модуля регистрирующей электроники (QDC-карты), модуль селективной аналоговой суммы (*SAS – Selective Analog Sum*), адаптер связи с системой сбора данных (I/O-карта) и распределитель калибровочного сигнала.

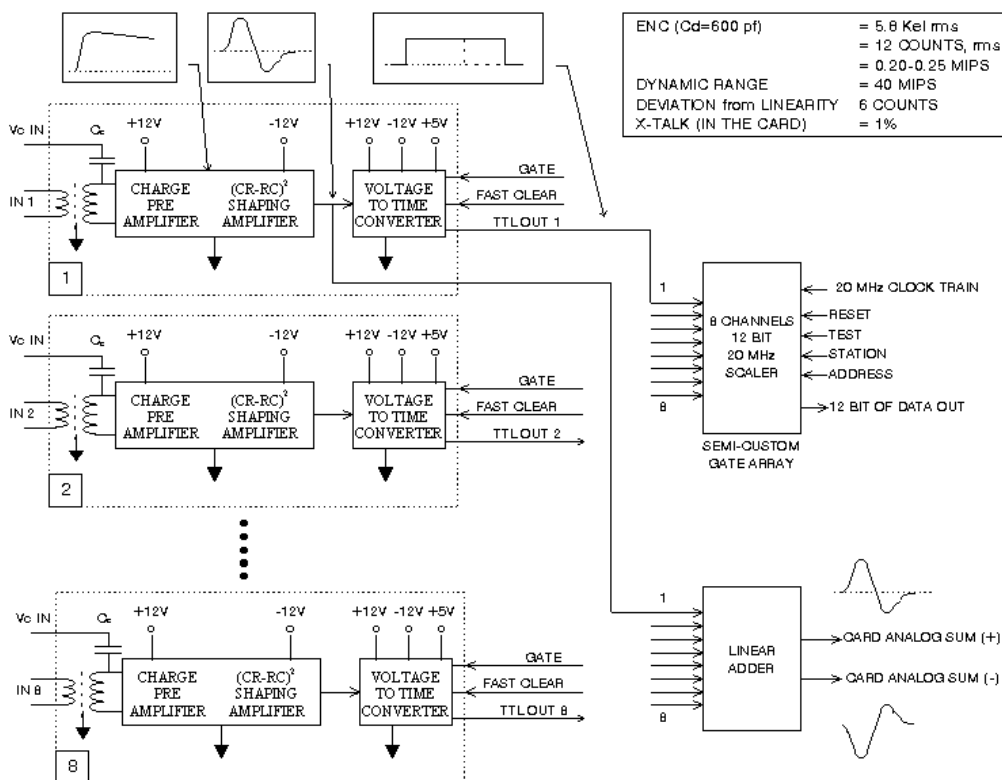


Рис. 11. Блок-схема QDC-карты.

QDC-карта включает в себя полную цепь обработки ионизационных сигналов: усиление, формировку и оцифровку (рис. 11). Таким образом удается избежать использования промежуточного драйвера и цепи электрической развязки, сохраняя при этом малую чувствительность схемы к внешним шумам и наводкам. Кроме того, такое решение позволяет существенно уменьшить число кабелей, связывающих детектор с электроникой системы сбора данных.

Одна QDC-карта содержит 8 каналов регистрации. Каждый канал последовательно включает в себя:

- интегрирующий малошумящий предусилитель с входным согласующим трансформатором;
- $(CR-RC)^2$  биполярный усилитель-формирователь с временем формирования сигнала (в точке максимума) 2 мкс и временем восстановления базовой линии 15 мкс;
- амплитудо-чувствительный преобразователь амплитуда-время, длительность выходного сигнала которого пропорциональна амплитуде входного сигнала;
- 12-разрядный счетчик (scaler), стробируемый выходом преобразователя амплитуда-время; во время преобразования на счетчик подается последовательность счетных импульсов с частотой 20 МГц.

Используемый в схеме предусилитель имеет эквивалентный шумовой заряд (ENC) около  $5800 e^-$  при емкости детектора 600 пФ. Короткое время формирования сигнала в усилителе-формирователе (по сравнению с полным временем дрейфа  $>10$  мкс) в комбинации с затуханием сигнала, обусловленным наличием электроотрицательных примесей в аргоне, используется для уменьшения зависимости отклика детектора от места образования заряда в зазоре.

Предусилитель с усилителем-формирователем и преобразователь амплитуда-время изготовлены в виде гибридных микросхем на керамической подложке. Восемь 12-разрядных счетчиков объединены в одной заказной микросхеме, включающей, кроме того, интерфейс к 12-разрядной шине данных.

Кроме 8 каналов регистрации QDC-карта содержит схему, суммирующую аналоговым образом сформированные сигналы всех каналов карты. Выходной суммарный сигнал передается в модуль селективной аналоговой суммы, где он сравнивается с регулируемым порогом. В SAS суммируются только те сигналы, которые превысили этот порог.

Таким образом, только карты со значительным ионизационным сигналом вносят вклад в формирование выходного суммарного сигнала. Блок-схема SAS и прохождение сигналов через нее показаны на рис. 12.

Восемь каналов каждой QDC-карты подключены к набору двух соседних продольных колонн по 4 электрода в каждой (рис. 13). Благодаря такой топологии ионизационный сигнал от пучковой частицы, прошедшей через секцию электродов, оказывается сосредоточенным почти полностью в одной QDC-карте. Это приводит к улучшению соотношения сигнал/шум в выходном сигнале SAS. Этот сигнал используется для выработки триггера второго уровня.

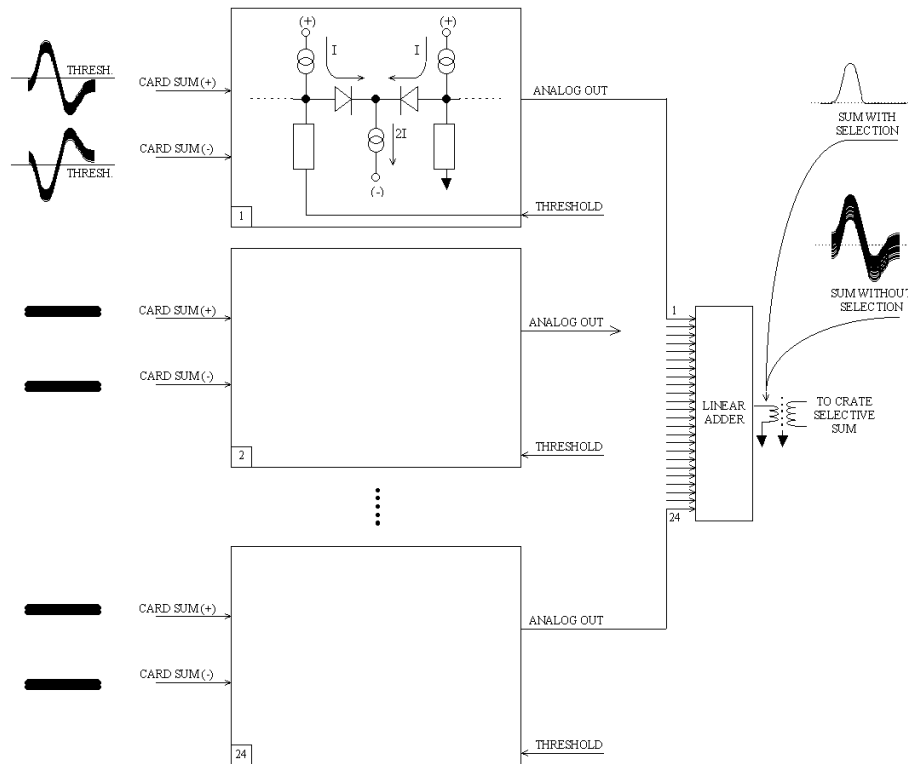


Рис. 12. Модуль селективной аналоговой суммы SAS.

I/O карта является интерфейсом между каркасом РЭ и системой сбора данных. Через эту карту в каркас РЭ поступают сигналы управления оцифровкой ионизационных сигналов детектора, через нее же осуществляется чтение результатов преобразования. Применение оптрона и высокочастотного трансформатора обеспечивает гальваническую развязку всех входных и выходных сигналов. Электроника двух каркасов QDC-боксов подключена к сигнальным электродам одной из координат двух секций одного вагона. На каждом криостате БАРС размещено по 36 QDC-боксов. С системой сбора данных QDC-боксы соединены тремя 25-парными плоскими кабелями. Два из них используются для чтения данных, а по третьему передаются сигналы управления преобразованием и выходной сигнал модуля SAS.

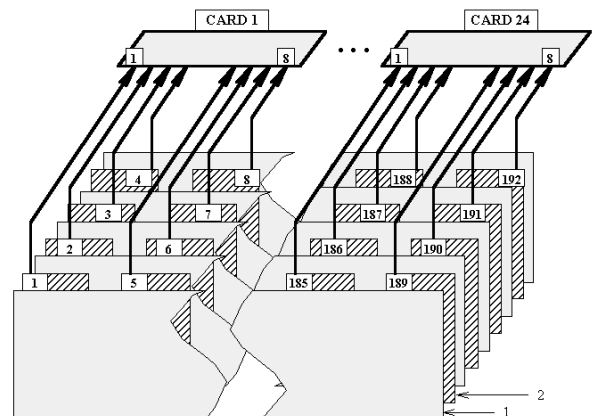


Рис. 13. Схема подключения сигнальных электродов к входам QDC-карты.

### 4.3. Электроника системы сбора данных

Электроника ССД выполнена в стандарте КАМАК и размещена в 24 крейтах, сгруппированных по четыре в 6 стойках. Один крейт обслуживает три QDC-бокса, подключенные к одному вагону системы электродов. Электроника всех крейтов однотипна и состоит из:

- шести модулей чтения и предварительной буферизации данных TNE-01;
- контроллера управления чтением данных TNE-02;
- Command Module (CM), управляющего кодировкой данных в QDC-картах;
- модуля триггера второго уровня ТМ-2;
- модуля запросов (МЗ);
- модуля связи TR-61;
- микрокомпьютера ME-230;
- каркасного контроллера ССМ-1.

Модуль TNE-01 предназначен для приема и хранения данных, поступающих от 24 QDC-карт одного каркаса РЭ. Он соединен с I/O картой этого каркаса 25-парным плоским кабелем. TNE-01 может работать в двух режимах: с вычитанием пьедесталов или без него. В первом случае из поступающих данных вычитаются величины, записанные в пьедестальную память (P-RAM) модуля. Результаты сравниваются с порогами, хранящимися в той же P-RAM. Если значение выше порога, то результат и адрес соответствующего канала заносятся в буферную память модуля, в противном случае данные отбрасываются. Такой подход обеспечивает уменьшение объема поступающих данных и облегчает их последующую обработку. Этот режим TNE-01 используется при рабочем чтении данных. В случае работы без вычитания пьедесталов все данные и соответствующие им адреса записываются в буферную память без изменения. Такой режим используется при калибровке РЭ и тестировании цифровой электроники.

Контроллер TNE-02 управляет параллельной работой всех шести модулей TNE-01, подключенных к нему спецмагистралью. Через TNE-02 осуществляется выбор режима работы, диапазона адресов опрашиваемых каналов РЭ, скорости их сканирования, а также запускается чтение данных. Контроллер TNE-02 выставляет LAM-запрос на магистраль крейта по окончании передачи данных в буферные памяти модулей TNE-01. Параллельная передача данных позволяет снизить в 6 раз время сбора информации.

Командный модуль CM вырабатывает последовательность сигналов, управляющих кодировкой данных в QDC-картах, и принимает выходные сигналы от 6 модулей SAS, расположенных в QDC-блоках одного вагона. С каждым QDC-блоком CM соединен 25-парным плоским кабелем. По приходу триггера первого уровня CM сначала устанавливает сигнал “Занят” и посылает в РЭ сигнал очистки скейлеров, а затем строб-импульс длительностью 5 мкс, во время которого запоминаются пиковые значения сигналов. Одновременно строб-импульс и сигналы от SAS передаются в триггерный модуль ТМ-2. Если от системы триггера второго уровня в течение 6 мкс не пришел сигнал быстрого сброса, то CM вырабатывает последо-



вательность счетных импульсов, используемых при кодировке амплитуд сигналов, после чего посылает сигнал в модуль запросов. В случае же прихода сигнала быстрого сброса СМ передает его в QDC-боксы и снимает сигнал “Занят”. При этом последовательность счетных импульсов и сигнал в модуль запросов не посылаются.

Модуль триггера второго уровня ТМ-2 используется для быстрой оценки энерговыделения в одном вагоне БАРС. Для этого 6 сигналов от модулей SAS складываются попарно, формируя суммы сигналов трех проекций вагона. Эти сигналы оцифровываются в трех АЦП параллельного типа, выходы которых поступают на схему таблицы решений. Таблица запрограммирована так, что положительное решение вырабатывается при наличии во всех проекциях сигналов, амплитуды которых лежат в заданном диапазоне. Если ни в одном из 12 вагонов одного детектора БАРС не было выработано положительное решение, то для всей электроники этого детектора вырабатывается сигнал быстрого сброса.

Модуль запросов [20] используется для синхронизации работы микрокомпьютера ME-230 с прочей электроникой системы. На входы МЗ приходят 4 сигнала: “Начало вывода пучка”, “Конец вывода пучка”, запрос от СМ и запрос от TR-61. Модуль запросов запоминает входные импульсы в виде бит регистра, который доступен микрокомпьютеру для чтения. Общий запрос выставляется на шину КАМАК в виде сигнала LAM.

Модуль приема-передачи TR-61 [13] используется для обмена информацией между системой сбора данных и главной ЭВМ. Передача между двумя модулями TR-61 идет по двум коаксиальным кабелям. Данные посылаются пакетами по 2 Кбайта, время передачи одного пакета составляет 10 мс. Для формирования и приема пакетов в модулях имеется буфер на 1К 16-разрядных слов. По получении очередного пакета TR-61 посылает сигнал готовности в МЗ.

В состав микрокомпьютера входят процессорная плата ME-230 [15] и дополнительный контроллер КАМАК [16], обеспечивающий доступ процессора к магистрали крейта. Основу платы ME-230 составляет совместимый с I8086 микропроцессор КР1810 ВМ86 со 128 Кбайт ОЗУ. Загрузка программ в память ME-230 осуществляется по последовательной линии со скоростью 9600 бод. Микрокомпьютер управляет всем процессом чтения, накопления и передачи данных, а также осуществляет калибровку и тестирование электроники детектора. На передней панели ME-230 имеются два разъема, в один из которых поступают сигналы от триггерной системы первого уровня, а во второй сигналы от ТМ-2. Первый разъем подсоединен к 12-разрядному счетчику, а сигнал от второго формирует 13-ый бит.

Минимальный контроллер ССМ-1 обеспечивает работу дополнительных контроллеров КАМАК в крейте в соответствии со стандартом EUR-6500 [17].

#### 4.4. Электроника ССД второго уровня

Электроника ССД второго уровня размещена в двух крейтах КАМАК неподалеку от главной ЭВМ детектора. В задачу этой электроники входит прием данных из всех крейтов ССД и триггерной системы, а также передача служебной и управляющей информации в обратном направлении. В каждом крейте расположены:

- 13 модулей TR-61, 12 из которых обеспечивают связь с электроникой ССД одного из детекторов БАРС, а последний предназначен для приема информации от триггерной электроники этого же детектора.
- Модуль запросов, в который заведены сигналы готовности от всех 13 TR-61, используется для организации асинхронного обмена между TR-61 и главной ЭВМ.
- Контроллер крейта Kinetic Systems 3922, подключенный к интерфейсной карте в главном компьютере, обеспечивает доступ последнего к магистрали крейта.

В качестве главной ЭВМ в настоящее время используется microVAX-3300. Каждый крейт обслуживает один из детекторов (БАРС-1 и БАРС-2), образуя таким образом две независимые ветви системы сбора данных.

## 5. Процедура сбора данных и контроль электроники

Поскольку спектрометр БАРС был создан для работы на ускорителе ИФВЭ У-70, то процедура сбора данных была ориентирована на цикличность работы ускорителя:

- быстрое чтение данных из РЭ и их накопление в оперативной памяти ME-230 во время вывода пучка из ускорителя ( $\approx 1$  с);
- форматирование данных и их пересылка в главную ЭВМ во время нового цикла ускорения протонов ( $\approx 8$  с), и одновременно тестирование электроники.

Работа системы сбора данных происходит следующим образом.

Сначала производится загрузка рабочих программ в те микрокомпьютеры, которые будут использоваться в работе. Передача загружаемых кодов от инструментальной ИВМ-РС происходит по последовательным линиям через 32-канальный коммутатор, позволяющий загружать идентичные программы одновременно в несколько ME-230. Кроме загрузки эти линии используются для системного контроля за состоянием программ в микроЭВМ.

После запуска в каждой ME-230 программы сбора данных (ПСД) происходит инициализация электроники в крейте, после чего программа переходит в режим ожидания прихода управляющих команд от главной ЭВМ. Перед тем как послать в ME-230 команду перехода в режим набора статистики, microVAX пересылает ей величины пьедесталов и порогов для каждого канала РЭ (эти значения вычисляются по результатам предварительно проведенной калибровки QDC-карт). Полученные числа микроЭВМ записывает в пьедестальные памяти TNE-01. Далее, при приходе команды “Набор статистики” программа переходит в ожидание сигнала “Начало вывода пучка” (НП). По получении этого сигнала снимается сигнал “Занят” — система готова к приему событий. Если выработанный триггерной электроникой сигнал запуска не был забракован триггерной системой второго уровня (ТС-2), то производится полная оцифровка сигналов во всех каналах РЭ (полное время преобразования  $\approx 130$  мкс), по окончании которой СМ посылает сигнал в модуль запросов. Получив запрос на обработку события, микрокомпьютер посылает в

TNE-02 команду на считывание данных из РЭ в режиме вычитания пьедесталов, а затем читает номер события из счетчика, расположенного в ME-230 и считающего число триггеров первого уровня. Процедура передачи данных из РЭ в памяти модулей TNE-01 занимает  $\approx 200$  мкс. По ее окончании ME-230 снимает сигнал “Занят” и начинает переписывать данные из буферных памяти TNE-01 в оперативную память микроЭВМ. В это время триггерная система уже принимает и обрабатывает новые события, и если какое-нибудь из них не отбраковано ТС-2, то происходит его оцифровка в РЭ. Закончив перенос данных в свою память, ME-230 ждет прихода нового запроса или, если за это время новое событие уже было оцифровано в РЭ, начинает новый цикл чтения данных. Временная диаграмма этой процедуры изображена на рис. 14.

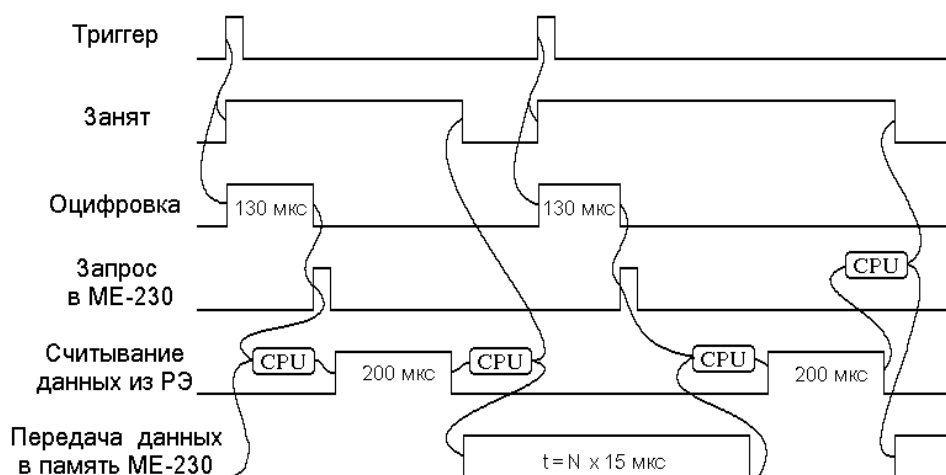


Рис. 14. Временная диаграмма работы электроники ССД первого уровня.

Таким образом, мертвое время системы сбора данных составляет  $\approx 15$  мкс в случае, если событие было забраковано триггерной системой второго уровня, и  $\approx 370$  мкс в случае, если событие было принято. В эксперименте за время вывода пучка сцинтилляционная триггерная система вырабатывает  $\approx 200$  сигналов, обусловленных прохождением через детектор космических частиц, и (в зависимости от энергии и интенсивности пучка) от 100 до 1000 сигналов, обусловленных прохождением мюонов от пучка. Из этих сигналов в среднем лишь 2 события не бракуются системой триггера второго уровня и оцифровываются в регистрирующей электронике. В результате мертвое время установки составляет  $0,5 \div 1,5\%$  от времени вывода пучка.

Если в модуль запросов приходит сигнал “Конец вывода пучка”, то микрокомпьютер прекращает ожидание новых событий, выставляет сигнал “Занят”, форматирует принятые данные и начинает их передачу в связанный с данным крейтом модуль TR-61 электроники ССД второго уровня. В интервалах между посылкой пакета данных и приходом от главной ЭВМ сигнала запроса новой порции данных или подтверждения окончания приема всех данных ME-230 производит тестирование буферных памяти модулей TNE-01.

По завершении передачи данных до момента прихода нового сигнала “Начало вывода” микрокомпьютер производит калибровку всех каналов регистрирующей электроники. Процедура калибровки заключается в следующем. На калибровочные конденсаторы всех электродов ионизационных камер подаются сигналы от генератора импульсов ВНС-РВ4. Форма сигналов, вырабатываемых генератором, подобрана так, чтобы отклик ионизационных камер при подаче этих сигналов был аналогичен отклику на прохождение заряженной частицы через бигэп. Амплитуда калибровочного сигнала определяется величиной напряжения, устанавливаемого цифро-амплитудным преобразователем С.А.Е.Н. ДАС-С221, дополнительно расположенным в одном из крейтов ССД. МикроЭВМ, установленная в этом крейте, выставляет на ДАС напряжение, величину которого задает главная ЭВМ, и вырабатывает сигналы запуска генератора. Синхронизованные с ними сигналы поступают в ССД по тракту триггерного сигнала первого уровня, а триггерная система второго уровня в интервалах между выводами пучка отключается. В результате все сигналы принимаются и оцифровываются регистрирующей электроникой всех участвующих в эксперименте вагонов. Полученные данные передаются из РЭ в память МЕ-230 трижды:

- 1) в режиме без вычитания пьедесталов со скоростью рабочего чтения ( $\approx 1$  мкс/канал);
- 2) в том же режиме при медленном чтении ( $\approx 10$  мкс/канал);
- 3) в режиме с вычитанием пьедесталов при рабочей скорости чтения.

Сравнение результатов чтения используется для контроля правильности передачи информации. В случае обнаружения несоответствия друг другу значений в трех прочитанных массивах данных МЕ-230 формирует код ошибки и посылает его в ССД второго уровня.

Средние значения амплитуд сигналов отклика РЭ при различных значениях амплитуды калибровочного сигнала используются при определении коэффициента усиления и линейности каждого канала, а значения при нулевом калибровочном сигнале используются, кроме того, для вычисления пьедесталов, которые периодически заносятся в пьедестальную память ТНЕ-01. Переопределение пьедесталов позволяет компенсировать дрейф базовой линии усилителей, обусловленный суточным изменением температуры. Калибровка каналов РЭ продолжается до прихода сигнала “Начало вывода пучка”, после чего вся процедура приема и обработки событий повторяется вновь.

В ССД второго уровня при поступлении данных в любой из TR-61 модуль запросов выставляет сигнал LAM на шину крейта, что приводит к вызову системного прерывания главной ЭВМ. При обработке этого прерывания главный компьютер, прочитав регистр требований МЗ и определив таким образом, от каких модулей TR-61 пришли запросы, начинает чтение пришедших данных. Вычитав данные из памяти одного модуля, ЭВМ посылает в обратном направлении либо запрос на следующую порцию данных (если вся информация не уместилась в одном пакете), либо подтверждение приема всей информации, и переходит к чтению следующего запрашивающего модуля, не дожидаясь ответа от первого. Так как время передачи

из одного модуля TR-61 в другой и обратно составляет  $\approx 20$  мс, а время чтения всей памяти модуля  $\approx 1$  мс, то такой сканирующий метод сбора информации позволяет существенно уменьшить время приема всех данных от детектора.

Завершив прием данных со всей установки, главная ЭВМ сортирует по номерам событий данные, полученные от разных вагонов, и формирует единые для всего детектора события. Полученные данные записываются на ленту, а оперативная информация о них (общее число принятых событий, объем информации и т.п.) отображается на мониторе. Кроме того, эти данные передаются в РС-IBM, где по ним восстанавливаются и отображаются в графическом виде геометрические и энергетические параметры произошедших в детекторе событий, а также отбираются кандидаты на искомые взаимодействия.

В случае приходов от ME-230 кодов ошибок при тестировании электроники главная ЭВМ декодирует их и помещает в таблицу, позволяющую обслуживающему персоналу определить источник неполадок в работе детектора.

## 6. Калибровка детектора

Для мониторинга параметров работы установки используются несколько калибровочных процедур.

1. Производится регулярное измерение степени загрязнения аргона электроотрицательными примесями как внутри криостатов, так и в емкостях хранилища. За семь лет работы доля кислорода в аргоне увеличилась с 3 до 5 ppm.
2. Перед началом работы детектора, а также во время набора статистики производится описанная выше процедура калибровки каналов регистрирующей электроники сигналами от генератора импульсов. Величины откликов каналов на различные значения калибровочного сигнала записываются вместе с данными на ленту и используются в дальнейшем при анализе полученной в эксперименте информации. Величина дисперсии откликов каждого канала на калибровочный сигнал используется для оценки уровня шума электроники.
3. Сопоставление калибровочных кривых каналов РЭ и сигналов детектора, полученных при прохождении космических или ускорительных мюонов, позволяет определить коэффициент перевода отсчетов АЦП в единицы энергии для каждого канала РЭ. В эксперименте эта величина составляла от 4,5 до 6,8 отсчетов/МэВ, в зависимости от чистоты аргона и величины приложенного высокого напряжения.
4. В начальной фазе эксперимента часть железной защиты перед БАРС была удалена, что позволяло заряженным частицам различных типов попадать в детектор. При такой постановке исследовались каскадные ливни, образующиеся в БАРС при прохождении адронов различной энергии в диапазоне от 10 до 40 ГэВ. Зависимость энергетического разрешения детектора от энергии частиц (рис. 15) хорошо описывается формулой

$$\sigma(E)/E(\%) = 3,4 \oplus 65,2/\sqrt{E}.$$

Энергетическое разрешение БАРС для электромагнитных ливней было исследовано ранее на прототипе детектора МАРС-2 с использованием электронного пучка [18]. В этом случае зависимость разрешения от энергии имеет вид  $\sigma(E)/E \approx 4\%\sqrt{E}$ .

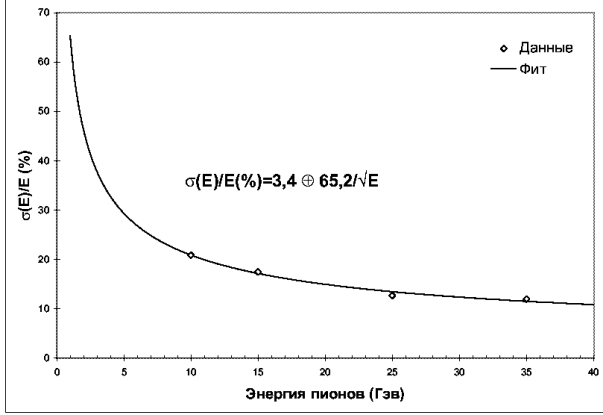


Рис. 15. Энергетическое разрешение для пионов в детекторе БАРС.

## 7. Результаты

При использовании детектора БАРС в качестве активной нейтринной мишени в эксперименте на Комплексе меченых нейтрино были зарегистрированы взаимодействия нейтрино по каналам заряженного (рис. 16) и нейтрального (рис. 17) токов. Существующие проблемы формирования вторичного пучка не позволили пока набрать статистику, достаточную для проведения физического анализа записанных событий.

В последнее время кроме исследований нейтринных взаимодействий спектрометр БАРС используется для изучения горизонтальных высокоэнергичных космических мюонов. При  $E_\mu > 1$  ТэВ потери энергии мюона при прохождении через вещество обусловлены в основном образованием тормозных гамма квантов и рождением электрон-позитронных пар, энергии которых пропорциональны энергии родительского мюона. Поэтому при прохождении через толстый слой вещества высокоэнергичный мюон будет образовывать серию электромагнитных ливней, обусловленных в основном рождением  $e^+e^-$  пар (рис. 18, 19). Считая число таких ливней и определяя их энергию, можно оценить энергию мюона. Энергетическое разрешение при таком методе составляет

$$\frac{\sigma}{E} = \sqrt{\frac{9\pi}{28\alpha T}} \approx \sqrt{\frac{1}{\alpha T}},$$

где  $T$  — толщина детектора в радиационных длинах, а  $\alpha=1/137$  — постоянная тонкой структуры. Таким образом, детектор должен иметь достаточно большую длину ( $T > 137$  рад. дл.), высокую степень гранулярности, позволяющую измерять энергию низкоэнергичных электромагнитных ливней ( $\varepsilon < 10^{-3}E$ ), и большой аксептанс, чтобы регистрировать малые потоки горизонтальных космических мюонов. Спектрометр БАРС вполне удовлетворяет всем этим требованиям.

Предварительные результаты исследования горизонтальных космических мюонов показали возможность измерения их спектра до энергии 10 ТэВ [19]. В последнее время обсуждается возможность использования БАРС в изучении вертикальных космических ливней (рис. 20, 21). Обычно для регистрации таких ливней используются сцинтилляционные счетчики, покрывающие большую площадь. Такая методика не позволяет определить состав ливней — доли электромагнитных, адронных и мюонных компонент. Одновременная регистрация космических ливней детектором БАРС и сцинтилляционными счетчиками позволит решить эту проблему.

## Заключение

БАРС — в настоящее время самый большой среди действующих жидкоаргоновых детекторов, является в то же время относительно “легким” спектрометром (его средняя плотность составляет  $1,6 \text{ г/см}^3$ ), в котором большая часть ( $\approx 67\%$ ) оставляемой ионизирующими частицами энергии выделяется в активном веществе. При этом ЭМ и адронные ливни, развивающиеся в детекторе, имеют достаточно большие размеры. Все это приводит к хорошему энергетическому разрешению детектора и позволяет при высокой сегментации, которой обладает БАРС, детально восстановить (реконструировать) произошедшее событие.

Структура БАРС очень проста, ее легко создать и собрать. Стоимость основных компонентов невысока, их достаточно просто изготовить. Детектор может быть использован в различных экспериментах, где частота событий относительно невелика ( $< 50 \text{ кГц}$ ).

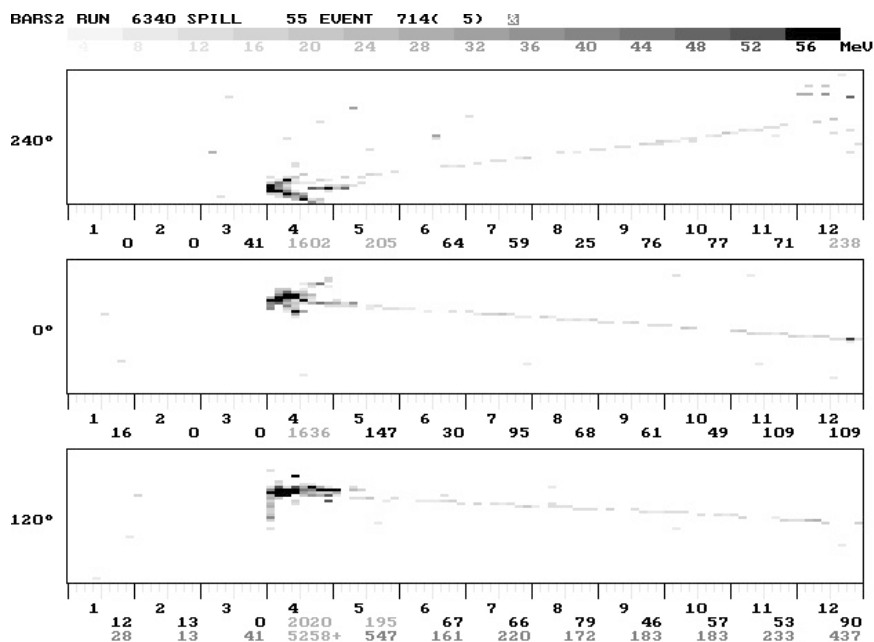


Рис. 16. Взаимодействие мюонного нейтрино в детекторе БАРС по каналу заряженного тока.

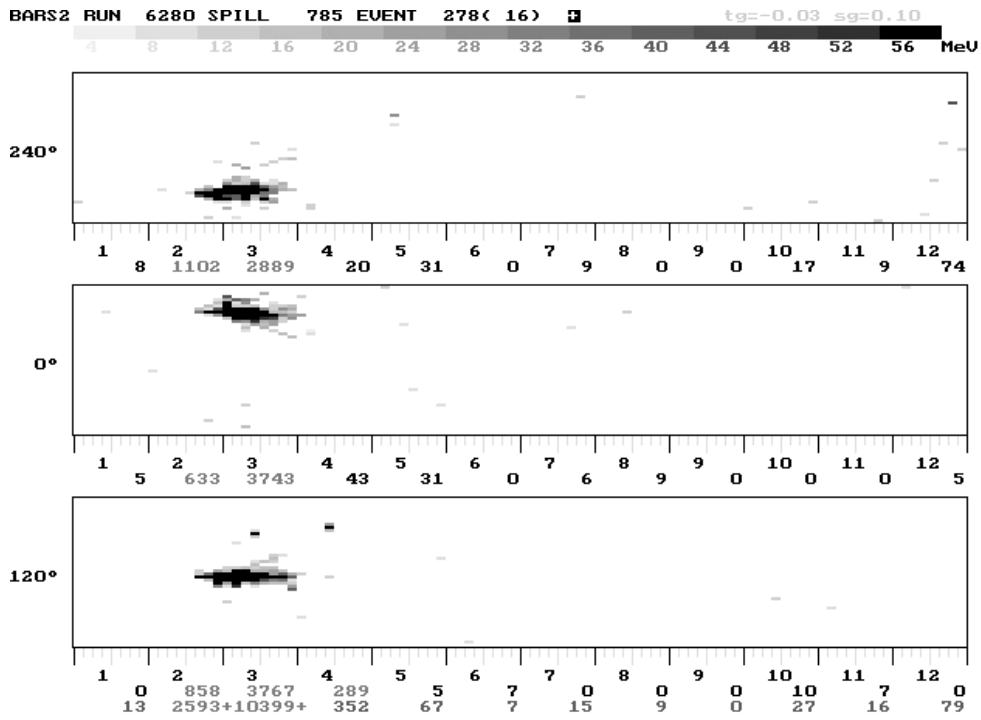


Рис. 17. Взаимодействие нейтрино в детекторе БАРС по каналу нейтрального тока.

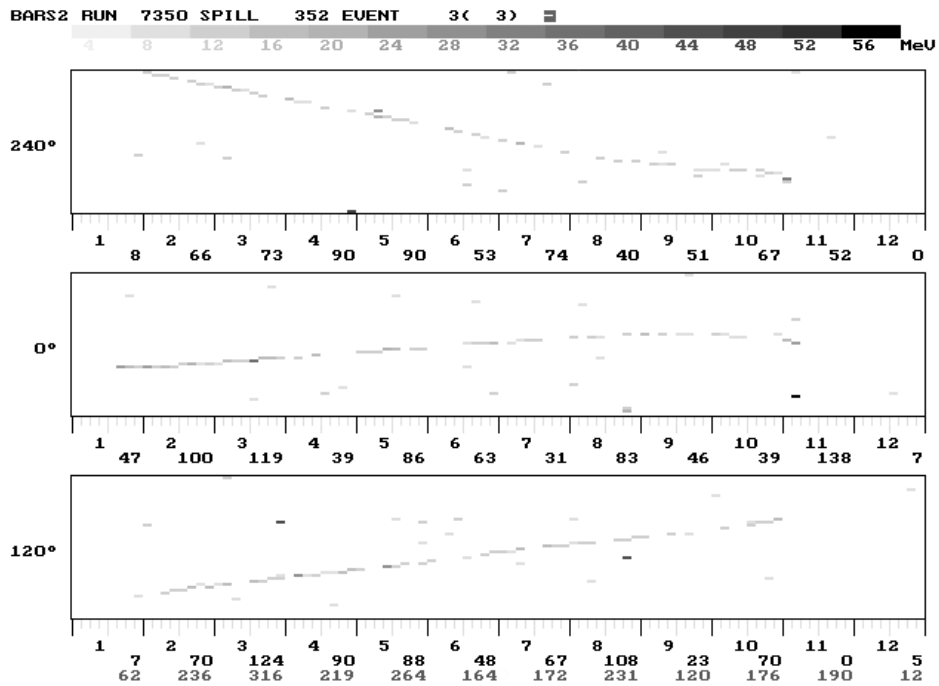


Рис. 18. Космический мюон низкой энергии, остановившийся в детекторе.



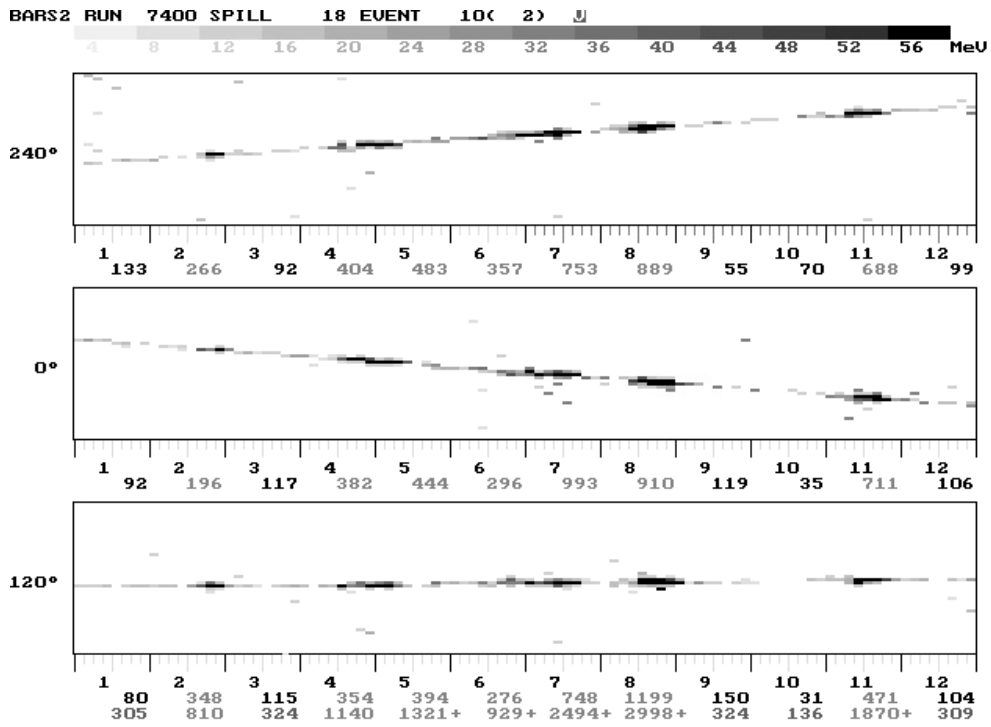


Рис. 19. Образование электрон-позитронных пар космическим мюоном высокой энергии.

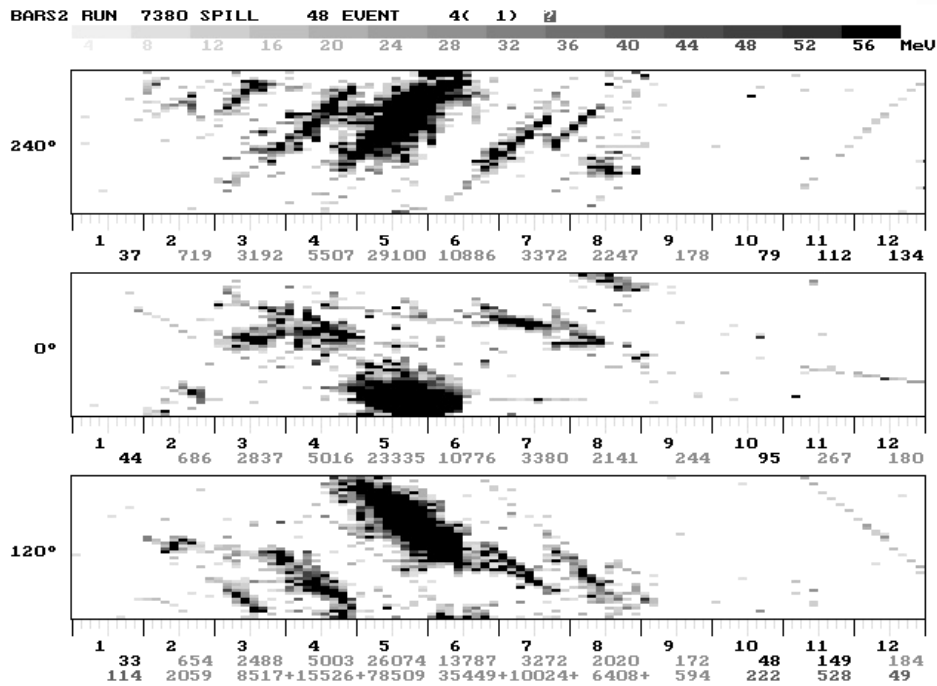


Рис. 20. Атмосферный ливень в детекторе БАРС.

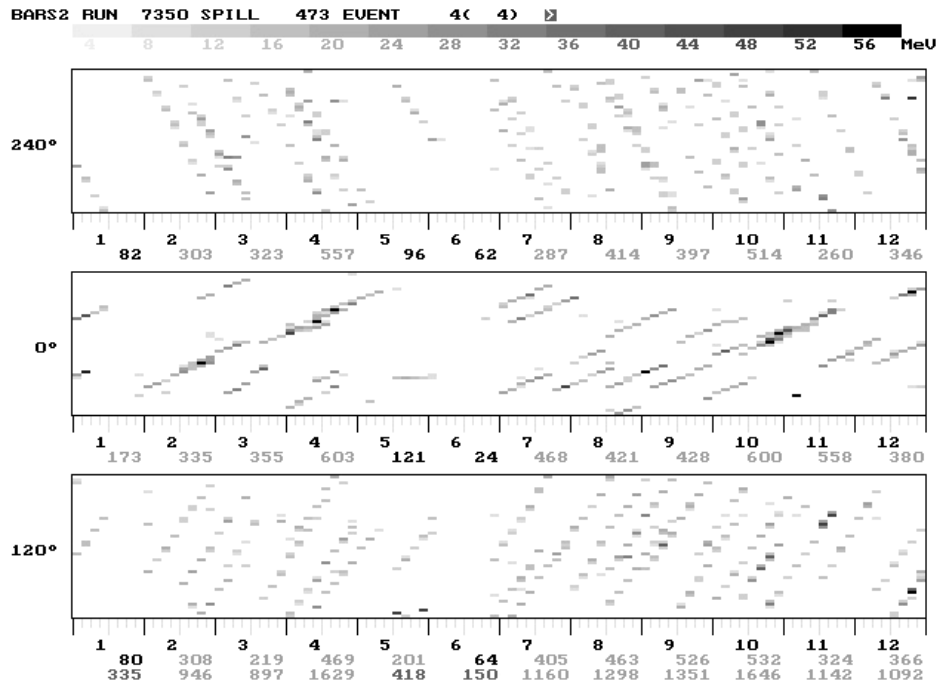


Рис. 21. “Мюонный дождь”.

## Список литературы

- [1] ИИЭП(Serpukhov) - INFN(Pisa) - ИИЭП(Zeuthen) - JINR(Dubna) Collaboration, Experiments with Tagged Neutrino Beams at ИИЭП Accelerator, Proposal SERP-E-152, Serpukhov, 1984.
- [2] Беликов С.В., Гуржиев С.Н., Кочетков В.И., Старцев В.С. – Препринт ИФВЭ 92-24. Протвино, 1992.
- [3] Беликов С.В., Гуржиев С.Н., Кочетков В.И., Старцев В.С. – Препринт ИФВЭ 92-160. Протвино, 1992. // ПТЭ, 1993, т.6, с. 56.
- [4] Беликов С.В., Гуржиев С.Н., Дьячков А.П. и др. – Препринт ИФВЭ 92-47. Протвино, 1992. // ПТЭ, 1993, т.3, с. 79.
- [5] Беликов С.В., Гуржиев С.Н., Дьячков А. П. и др. – Препринт ИФВЭ 92-55, Протвино, 1992. // ПТЭ, 1993, т.3, с. 85.
- [6] Беликов С.В., Гуржиев С.Н., Гутников Ю.Е. и др. – Препринт ИФВЭ 94-68. Протвино, 1994. // ПТЭ, 1995, т.2, с. 43.
- [7] Беликов С.В., Гуржиев С.Н., Гутников Ю.Е. и др. – Препринт ИФВЭ 95-72. Протвино, 1995; направлено в ПТЭ.
- [8] Аммосов В.В., Гапиенко В.А., Денисов А.Г., Мельников Е.А. – Препринт ИФВЭ 89-210, Серпухов, 1989. // ПТЭ, 1990, т.6, с. 54.
- [9] ”BARS, the liquid argon detector-target for tagged neutrino beams at the ИИЭП of Serpukhov”, presented by F. Sergiampietri, Proceedings of the Fourth International Conference of Calorimetry in High Energy Physics, La Biodola, Isola d’Elba, Italy 19-25, September 1993, ed . A. Mezione and A. Scribano (World Scientific, 1994), p. 357.

- [10] Ermolin Yu.V., Los S.V., Sytin A.N. "Big Liquid Argon Spectrometer Data Acquisition Electronics for the Tagged Neutrino Experiment", Proceedings of the Fourth International Conference of Calorimetry in High Energy Physics, La Biodola, Isola d'Elba, Italy 19-25, September 1993, ed . A. Meziane and A. Scribano (World Scientific, 1994), p. 286.
- [11] Вьонг Дао Ви, Журавлев Н.И., Ле Зон Пхир и др. – Препринт ОИЯИ 10-81-455, Дубна, 1981.
- [12] Антюхов В.А., Вьонг Дао Ви, Динель З. и др. – Препринт ОИЯИ 10-80-650, Дубна, 1980.
- [13] Vasiliev A.V., Mikhailov Yu.V. – Preprint ИИЕР 92-26. Protvino, 1992.
- [14] Буянов Э.Г., Матвеев М.Ю., Суходольский С.А. – Препринт ИФВЭ 90-100. Протвино, 1990.
- [15] Говорун В.Н., Горбунов Н.В., Ермолин Ю.В. и др. – Препринт ИФВЭ 86-16. Серпухов, 1986.
- [16] Говорун В.Н., Давиденко А.М., Ермолин Ю.В. и др. В кн.: Сборник трудов АН СССР "VIII международный симпозиум по проблемам модульных информационно-вычислительных систем и сетей ICS-NET, САМАС-91", Дубна, 9-14 сентября 1991 г., – М.: Инновационно-коммерческое агентство, 1992, с. 336.
- [17] Multiple Controllers in a SAMAC Crate. EUR 6500e. ESONE Committee, 1978.
- [18] Cherri C. et al. // NIM, A227 (1984) p. 227.
- [19] Belikov S.V. et al. – Preprint ИИЕР 96-65. Protvino, 1996.
- [20] Паспорт П53.056.069 ПС, АН СССР, Научно-техническое объединение "Экспериментальный завод научного приборостроения". Черноголовка, 1985.

*Рукопись поступила 3 июня 1997 г.*

В.Б.Аникеев и др.  
Большой жидкоаргоновый спектрометр БАРС.

Оригинал-макет подготовлен с помощью системы  $\text{\LaTeX}$ .  
Редактор Н.В.Ежела. Технический редактор Н.В.Орлова.

---

Подписано к печати 06.06.97. Формат  $60 \times 84/8$ .      Офсетная печать.  
Печ.л. 3,1.    Уч.-изд.л. 2,4.    Тираж 240.    Заказ 1079.    Индекс 3649.  
ЛР №020498 17.04.97.

---

ГНЦ РФ Институт физики высоких энергий  
142284, Протвино Московской обл.

