

ГОСУДАРСТВЕННЫЙ НАУЧНЫЙ ЦЕНТР РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

ИНСТИТУТ ФИЗИКИ ВЫСОКИХ ЭНЕРГИЙ

ИФВЭ 2011–7  
ОЭФ

А.А. Борисов, М.Ю. Боголюбский, Н.И. Божко, А.Н. Исаев,  
А.С. Кожин, А.В. Козелов, И.С. Плотников, В.А. Сенько,  
М.М. Солдатов, Р.М. Фахрутдинов, Н.А. Шаланда,  
О.П. Ющенко, В.И. Якимчук

**Установка «мюонный томограф»  
с площадью перекрытия  $3 \times 3 \text{ м}^2$**

Направлено в *ПТЭ*

Протвино 2011

**Аннотация**

Борисов А.А., Боголюбский М.Ю., Божко Н.И. и др. Установка «мюонный томограф» с площадью перекрытия  $3 \times 3 \text{ м}^2$ : Препринт ИФВЭ 2011–7. – Протвино, 2011. – 18 с., 14 рис., библиогр.: 23.

Представлены описание и основные технические характеристики установки «мюонный томограф» с площадью перекрытия  $3 \times 3 \text{ м}^2$ , созданной для изучения возможностей обнаружения скрытых объектов различной плотности с помощью космических лучей.

**Abstract**

Borisov A.A., Bogolyubsky M.Yu., Bozhko N.I. et al. Setup of the "Muon Tomography" with an area of overlapping  $3 \times 3 \text{ m}^2$ : IHEP Preprint 2011–7. – Protvino, 2011. – p. 18, figs. 14, refs.: 23.

The paper presents a description and basic characteristics of the setup "Muon Tomograph" with an area of overlapping  $3 \times 3 \text{ m}^2$  to explore possibilities to detect hidden objects of different density with cosmic rays.

## Введение

Каждую минуту квадратную площадку со стороной 1 см, горизонтально лежащую на поверхности Земли, пересекает 1 мюон космического происхождения. Поток этих мюонов практически равномерный, с незначительной зависимостью от географической широты и небольшими сезонными вариациями. Их средняя энергия составляет около 4 ГэВ, с максимумом спектра около 2 ГэВ. Угловое распределение пропорционально  $\cos^2(\theta)$ ,  $\theta$  — зенитный угол.

Большая проникающая способность (около 1.8 м стали при импульсе 3 ГэВ/с) делает космические мюоны привлекательным источником для радиографии<sup>1</sup> крупномасштабных объектов, а угловое распределение космических мюонов на поверхности Земли позволяет осуществлять и томографию<sup>2</sup>.

Одна из первых попыток [1] такой радиографии датируется 1955 г., когда при помощи счетчиков измерялось ослабление вертикального потока космических мюонов с целью проверки толщины пород над горной выработкой. В 1965 г. Л. Альварец предложил [2] исследовать внутреннюю структуру (поиск неизвестных погребальных

---

1 Радиография — неразрушающий метод контроля, основанный на «просвечивании» объекта ионизирующим (иногда и нейтронным) излучением и регистрации прошедшего через объект этого излучения.

2 Томография — метод радиографии, позволяющий реконструировать послойную структуру объекта посредством его многократного просвечивания в пересекающихся направлениях.

камер) пирамиды Хефрена в Гизе на основе измерения потока космических мюонов, проходящих под разными углами через пирамиду. В качестве детекторов использовались искровые камеры (4 м<sup>2</sup>, угловое разрешение около 3°). Скрытые полости в пирамиде не были обнаружены [3], но зато были получены экспериментальные подтверждения возможностей данного метода исследования крупномасштабных объектов.

За прошедшие десятилетия накоплен богатый опыт применения космических мюонов для радиографии археологических [4, 5, 6], геологических [7, 8, 9] (в частности, канал магмы действующего вулкана) объектов, отмечены перспективы контроля строительных сооружений [10, 11, 12]. Приведенный список работ ни в коей мере не претендует на полноту и представлен только для иллюстрации многообразия возможностей радиографии с помощью космических мюонов.

Следует отметить, что большинство упомянутых выше радиографических применений космических мюонов базировались в основном на измерении поглощения (ослаблении) потока. Заметный рост интереса к этой теме произошел после 2003 г., когда группа из Лос-Аламоса продемонстрировала [13] томографические изображения объектов из материалов с большим зарядом ядра, полученные на основе эффекта многократного кулоновского рассеяния космических мюонов, и отметила перспективность такого метода для контроля за несанкционированным перемещением ядерно-активных материалов. Метод базируется на том, что среднеквадратичный угол рассеяния мюонов после прохождения слоя материала зависит от радиационной длины этого материала (Рис. 1).

Послойное сканирование (томография) позволяет не только зарегистрировать присутствие в исследуемом объеме областей из материалов с большим  $Z$ , но и провести их классификацию по группам: 1 — C, Al, SiO<sub>2</sub>; 2 — Fe, Ni, Cu; 3 — Pb, W, U.

Принципиальная схема томографии с космическими мюонами приведена на Рис. 2. Есть два позиционно-чувствительных детектора, в пространстве между которыми (назовем его контролируемым объемом) может находиться испытуемый предмет. Координатные детекторы обеспечивают измерение треков мюонов до и после контролируемого объема. Проведя статистический анализ некоторого числа треков, можно выделить в нем области с аномальным рассеянием пересекающих их мюонов.

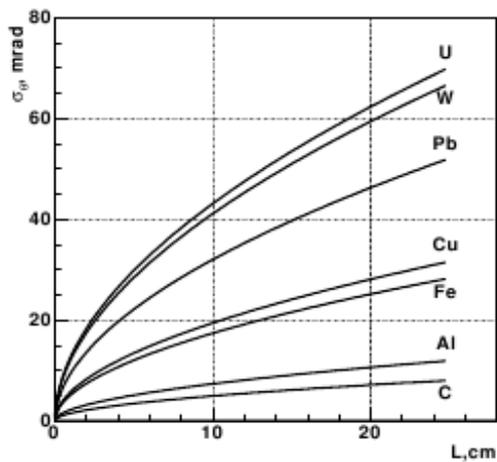


Рис. 1. Зависимость среднеквадратичного отклонения угла рассеяния мюона с импульсом 2 ГэВ/с от толщины материала.

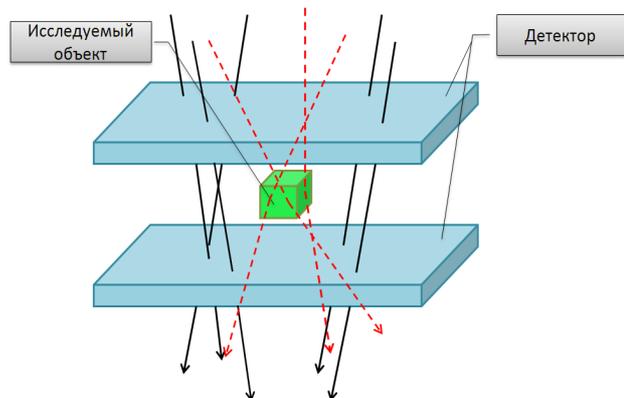


Рис. 2. Схема мюонного томографа.

После первых экспериментальных подтверждений [13] томографического изображения объектов с большим  $Z$ , базирующегося на основе измерения рассеяния космических мюонов, появились другие работы [14, 15, 16] с практическими наблюдениями. Самой масштабной из них является работа [16], выполненная в Италии (INFN) и представляющая результаты мюонного томографа с рабочим объемом  $11,5 \text{ м}^3$ , созданного на основе мюонных камер CMS (на LHC). Количество работ, посвященных моделированию этого метода применительно к разным координатным детекторам, разработке алгоритмов обработки изображений с таких установок и стратегии их применения, исчисляется уже десятками, и даже простое перечисление их заняло бы слишком много места, поэтому здесь полностью опускается.

Перспективность метода и определенный интерес к его практической реализации, а также накопленный в ИФВЭ опыт по созданию больших координатных детекторов (дрейфовых камер) подтолкнули нас к созданию крупномасштабной установки (с рабочим объемом  $3 \times 3 \times 3 \text{ м}^3$ ) для исследования возможностей томографии с помощью космических мюонов.

Цель настоящей работы — дать техническое описание этой установки.

## Экспериментальная установка

Созданный в ГНЦ ИФВЭ мюонный томограф (далее МТ-3, Рис. 3, 4) состоит из 16 идентичных, однопроекционных дрейфовых камер, каждая площадью  $3 \times 1.5 \text{ м}^2$ . Камеры попарно состыкованы (без зазора), образуя 8 плоскостей площадью  $3 \times 3 \text{ м}^2$ . Эти координатные плоскости разделены на 2 блока — верхний и нижний — по 4 плоскости в каждом блоке с чередующейся измеряемой проекцией трека (X,Y,X,Y, Рис. 3). Камеры смонтированы в каркасе из стального швеллера, где предусмотрена возможность их юстировки. В горизонтальной плоскости камеры выставлены по уровню с разрешением 50 мкм/м, относительное смещение одноименных проекций не более 100 мкм. Между двумя блоками камер имеется промежуток (около 2.2 м по высоте), предназначенный для размещения тестовых предметов, перемещение которых осуществляется при помощи платформы с электроприводом, установленной на специальные направляющие. Грузоподъемность платформы до 1000 кг.

Каждая камера состоит из 144 дрейфовых трубок, склеенных в 3 ряда, по 48 трубок в ряд. Средний ряд смещен (Рис. 4) на половину диаметра трубки. Расстояние между центрами любых двух соседних трубок в камере (а также и в плоскости) составляет 30.035 мм. Дрейфовая трубка представляет собой тонкостенный алюминиевый цилиндр длиной 3 м, диаметром 30 мм и толщиной стенки 0.4 мм. С двух сторон трубка закрыта пробками, между которыми натянута сигнальная проволока (97%W+3%Re, диаметр 0.05 мм, натяжение 350 г). Более подробно с конструкцией трубки можно ознакомиться в [17], а технология склейки дрейфовых камер описана в [18]. Дрейфовая трубка заполняется газовой смесью  $\text{Ar-CO}_2 = 93-7^3$  под избыточным давлением порядка 0.1 атм.

Применение дрейфовых камер в МТ-3 имеет две особенности, которые редко встречаются в практике экспериментальных установок физики высоких энергий. Во-первых, отсутствуют "быстрые" детекторы, определяющие момент прохождения частицы через дрейфовые камеры. Дрейфовые камеры и их электронная аппаратура работают в так называемой "бестриггерной" моде. Во-вторых, предусматривается работа дрейфовых камер без постоянного продува газовой смесью. Однажды заполненные

---

3 В принципе, камеры могут работать с любой газовой смесью при рабочем напряжении не более 3 кВ.

камеры работают без смены газа длительный (~1 год) период. Естественно, традиционная система постоянного продува газовой смесью также предусмотрена.



Рис. 3. "Мюонный томограф 3".

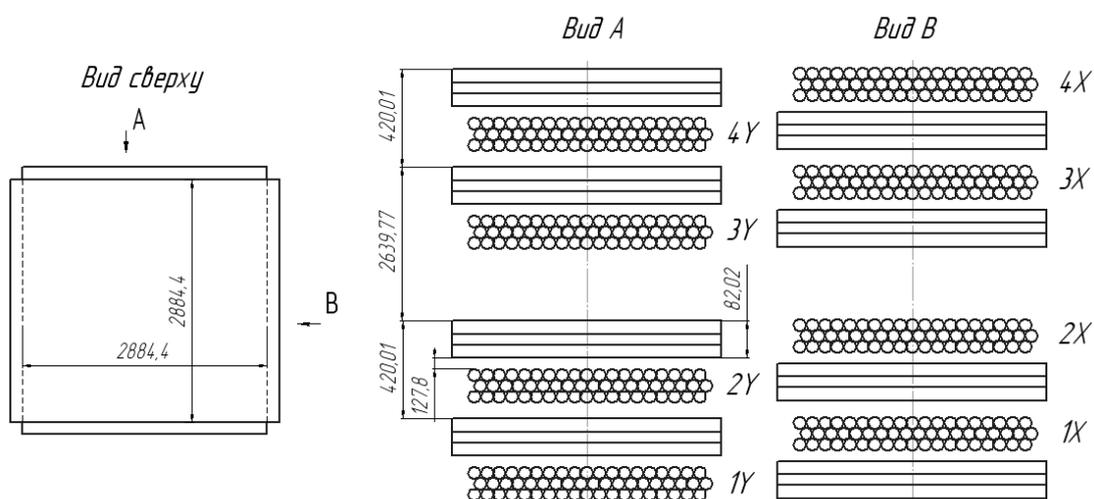


Рис. 4. Схема расположения камер в томографе.

## Усилитель UDTR-8

Для усиления сигналов с дрейфовых трубок используется 8-канальный усилитель (Рис. 5), изготовленный на базе интегральной схемы «ОКА-1М» [19, 20]. Микросхема разработана с использованием сверхвысокочастотной малошумящей  $\text{Bi-jFET}$ -технологии. Эта технология позволяет производить  $\text{p-p-p}$ -транзисторы с граничной частотой  $F_t > 3\text{GHz}$  и  $\beta > 150$ . Интегральные схемы были изготовлены в 2 типах корпусов: пластмассовом QFP48 и керамическом H16.48-1в.

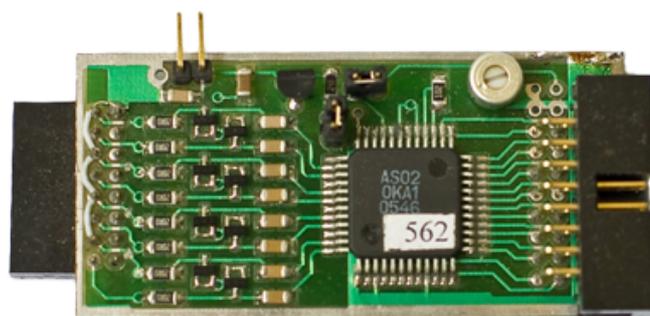


Рис. 5. Плата с усилителем на 8 каналов.

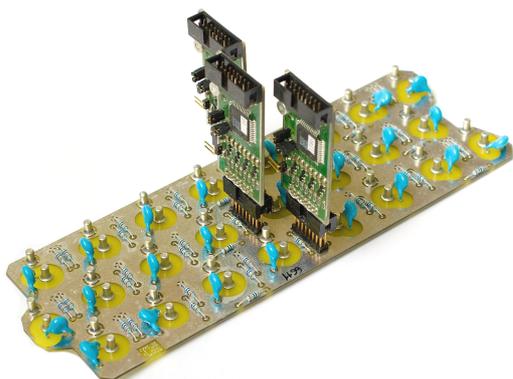
БИС «ОКА-1М» включает в себя 8 каналов зарядочувствительных усилителей-формирователей-дискриминаторов. Обработка сигнала заключается в преобразовании короткого токового импульса в напряжение и регистрации превышения сигналом заданного порога.

Регулировка порога чувствительности каналов по входному сигналу осуществляется многооборотным переменным резистором сразу у всех 8 каналов. Напряжение порога подается на 30-й вывод микросхемы (на 12-й вывод в керамическом корпусе) в пределах 100–800 мВ. Чувствительность усилителя регулируется от 0,2 до 1,3 мкА. При пороговом напряжении 400–450 мВ устанавливается чувствительность усилителя около 1 мкА.

Выходные сигналы соответствуют стандарту LVDS. Каждая выходная пара терминируется резистором 110 Ом на входе приемника. Питание усилителя осуществляется от источника 6 В (50 мА).

Для подсоединения усилителей к детектору была разработана печатная плата Signal board 3x8, представленная на Рис. 6. Эта плата позволяет подключать к детектору 3 усилителя, т.е. снимать информацию с 24 сигнальных проволочек. Для уменьшения помех на входы усилителей плата изготовлена 4-слойная со сплошными внешними земляными слоями.

Для подачи высокого напряжения на дрейфовые трубки разработана печатная плата HV board 3x8, представленная на Рис. 7. Обе платы покрыты защитным покрытием «Пластик 70».



*Рис. 6. Переходная плата в сборке с тремя платами 8-канальных усилителей.*



*Рис. 7. Печатная плата HV board 3x8.*

## **Электроника системы сбора данных мюонного томографа**

Электроника системы сбора данных экспериментальной установки «мюонный томограф 3» реализована в стандарте VME-9U[21] с использованием:

- одноплатного VME-компьютера;
- восемнадцати 128-канальных модулей регистрации V-12;
- модуля V13, используемого для выработки управляющих сигналов по команде от ЭВМ.

В системе сбора данных также используются вспомогательные модули разветвителей логических сигналов и преобразователей уровня.

### ***Одноплатный компьютер***

Основные характеристики ЭВМ:

- Процессор Intel Pentium M 1.4 ГГц
- ОЗУ 1 Гбайт
- Сетевые интерфейсы 2\*Gigabit Ethernet
- Жёсткий диск 80 Гбайт
- VME-интерфейс Tundra Universe II

### ***Модуль V-12***

Модуль V-12 (Рис. 8) имеет 128 каналов ВЦП, работающих с общим стартом. Все измеряемые сигналы поступают через входные разъёмы, располагающиеся на передней панели, в уровнях LVDS. Время прихода входного сигнала измеряется с дискретностью 1 нс в диапазоне до 16 мс. Возможен приём до 1023 хитов на 32 канала каждого разъёма. Приём второго сигнала в том же канале разрешен не ранее чем через 750 - 1000 нс. Возможен непрерывный приём данных без остановки на вычитывание.

Регистр является модулем VME типа A32/A24/D32, т.е. использует 32- или 24-разрядное адресное поле и 32-разрядную шину данных. Блок регистрации состоит из пяти частей (Рис. 9): четырёх одинаковых 32-канальных узлов регистрации (УР) поступающей от детектора информации и узла управления (УУ). Узлы регистрации обеспечивают прием, обработку, временное хранение и передачу данных в узел управления, а узел управления — взаимодействие блока с магистралью VME при выполнении операций чтения/записи.

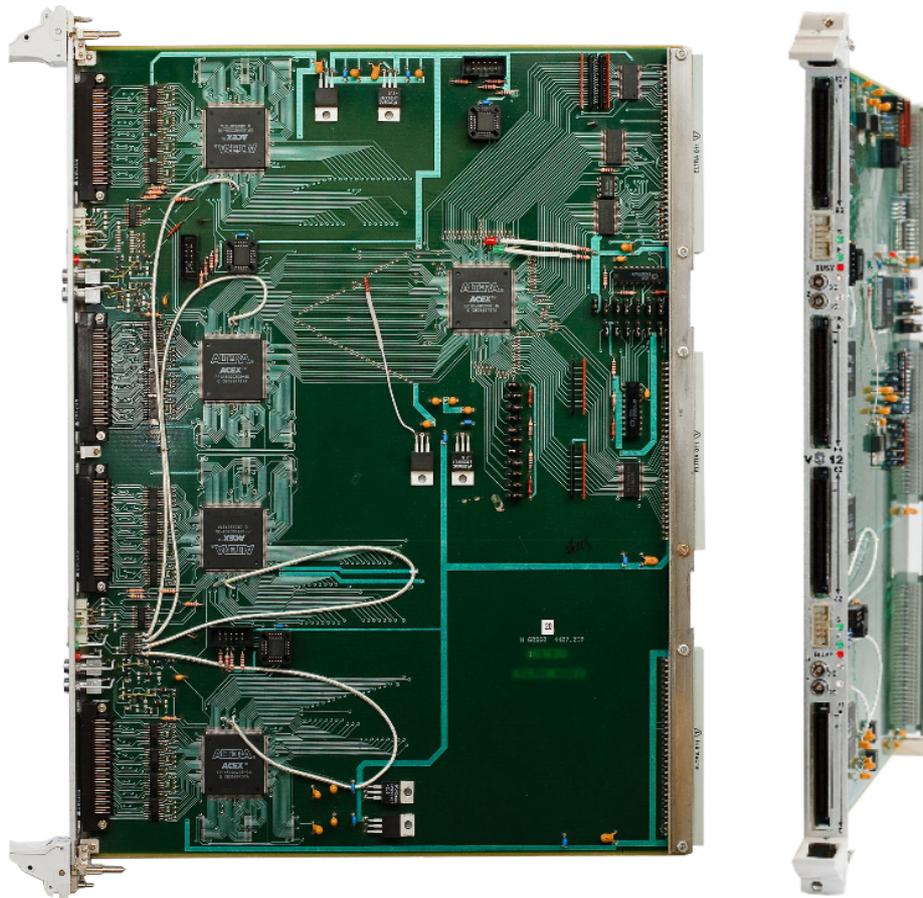


Рис. 8. Фотография модуля V-12 и его передней панели.

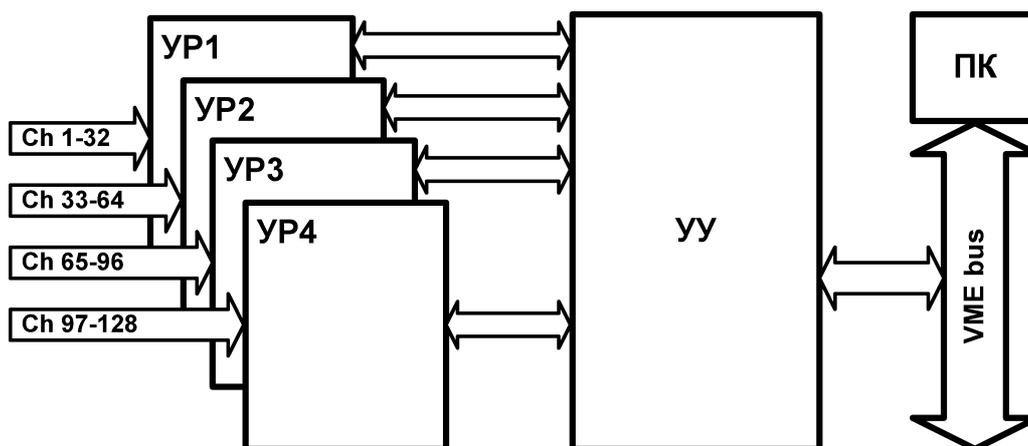


Рис. 9. Структурная схема модуля V-12.

Узел регистрации (Рис. 10) осуществляет прием входной информации, ее оцифровку и занесение в буфер памяти типа FIFO. Регистрация входных сигналов разрешается внешним сигналом ENABLE.

Время приёма данных (временное окно) определяется внешним сигналом FIX, который приходит от управляющей программы с интервалом  $\sim 10$  мс, но не более  $\sim 16$  мс, чтобы счётчик Time Counter не переполнился. По сигналу FIX цифровой код этого времени переписывается в специальный FIX-регистр и одновременно с этим происходит обнуление «счётчика времени» без остановки счёта, так что возможна сшивка данных за любой промежуток времени. Одновременно с этим происходит фиксация части уже записанного объема данных в FIFO, которая вычитывается для дальнейшей обработки. При работе с MT-3 FIFO заполняется на 10%. Время обработки одного канала составляет 232 нс.

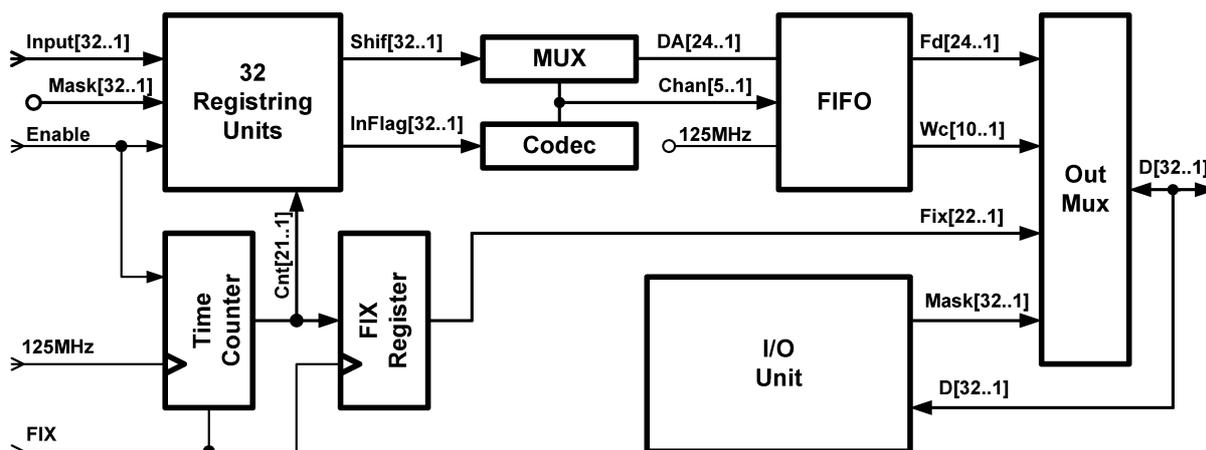


Рис. 10. Структурная схема одного узла регистрации модуля V-12.

## Программное обеспечение

Программное обеспечение мюонного томографа можно разделить на две составные части:

1. Систему сбора данных (ССД).
2. Систему обработки данных.

## **Система сбора данных**

Программное обеспечение ССД написано на языке C++ и выполняется под управлением операционной системы Linux. Для работы с VME используется библиотека VMELinux [22], для визуализации данных — графическая библиотека ROOT.

Программа выполняет следующие функции:

- Конфигурирование системы (задание номеров модулей ВЦП и, тем самым, соответствие адресов VME каналам детектора, длительности и количеству временных окон).
- Инициализацию ССД с последующей проверкой состояния модулей.
- Чтение данных из модулей ВЦП в оперативную память ЭВМ и проверку на наличие ошибок чтения.
- Преобразование данных в формат более удобный для последующей обработки.
- Запись информации на локальный жёсткий диск.
- Управление источником высокого напряжения типа БПВ-5.
- Визуализацию данных для оперативного контроля за работой установки.
- Выдачу списков "мёртвых" и "горячих" (часто срабатывающих) каналов по команде оператора.
- При подключении управляемой задержки и тестового сигнала — автоматизированное сканирование по задержке этого сигнала.

"Мёртвое" время ССД при длительности временного окна 10 мсек, средней частоте срабатывания одной трубки 40 Гц, записи информации на локальный жёсткий диск и частичной её визуализации (обрабатывается 2% данных) составляет 13.6%.

В дальнейшем предусматривается отказаться от записи данных на локальный жёсткий диск и перейти к передаче информации по сети Ethernet для обработки в режиме реального времени на другом компьютере.

## **Система обработки данных**

Программное обеспечение составляют следующие основные компоненты:

- Система реконструкции треков и вершин.

- Система автокалибровки детектора.
- Система визуализации и анализа изображений.

Программное обеспечение системы обработки данных создано в объектно-ориентированной архитектуре на языке C++.

Существенной особенностью мюонного томографа является его работа в бестриггерном режиме, что накладывает специальные требования на функции автокалибровки и реконструкции.

Детальному описанию алгоритмов реконструкции и анализа будет посвящен отдельный препринт, поэтому здесь мы приведем лишь весьма общую схему используемых процедур.

### ***Реконструкция треков и вершин***

Событие в бестриггерном режиме представляет собой набор сигналов с детектора, зарегистрированных в течение временного интервала (10 мс), намного превышающего типичное время дрейфа в трубках ( $\sim 500$  нс), что предполагает возможность наличия нескольких мюонных треков в одном событии.

Процедура реконструкции начинается с кластеризации события. Кластеры строятся из хитов, разделенных временными интервалами, не превышающими времени дрейфа. Такие группы хитов образуют временные окна, которые могут соответствовать физическому треку.

Кластеры строятся по иерархическому алгоритму с использованием анализа на непротиворечивость (геометрическое расположение хитов в кластере должно соответствовать прямым отрезкам трека в верхней и нижней частях томографа, как изображено в примере на Рис. 11 — реконструкция реального трека) и конкурентного разрешения возможных неоднозначностей с ассоциацией хитов. Кластеры, прошедшие процедуру отбора, формируют набор заготовок треков.

Каждый трек представляет собой 4 сегмента, по два (XY- и ZY-проекции) в верхней и нижней частях томографа. Используется линейная модель проекций трека, реализованная в параметрической форме:  $sX + cY = D$ , где  $s^2 + c^2 = 1$ . Данное представление позволяет линейным образом вычислять расстояние от прямой до произвольной

точки (в нашем случае — расстояние от прямой до проволоки, которое должно сравниваться в процедуре минимизации с расстоянием, полученным из  $R_t$ -зависимости). Таким образом, трек полностью характеризуется заданием 8 параметров ( $s_i, D_i, i=1-4$ ) и единого параметра  $T_0$  — времени прохождения мюона через детектор.

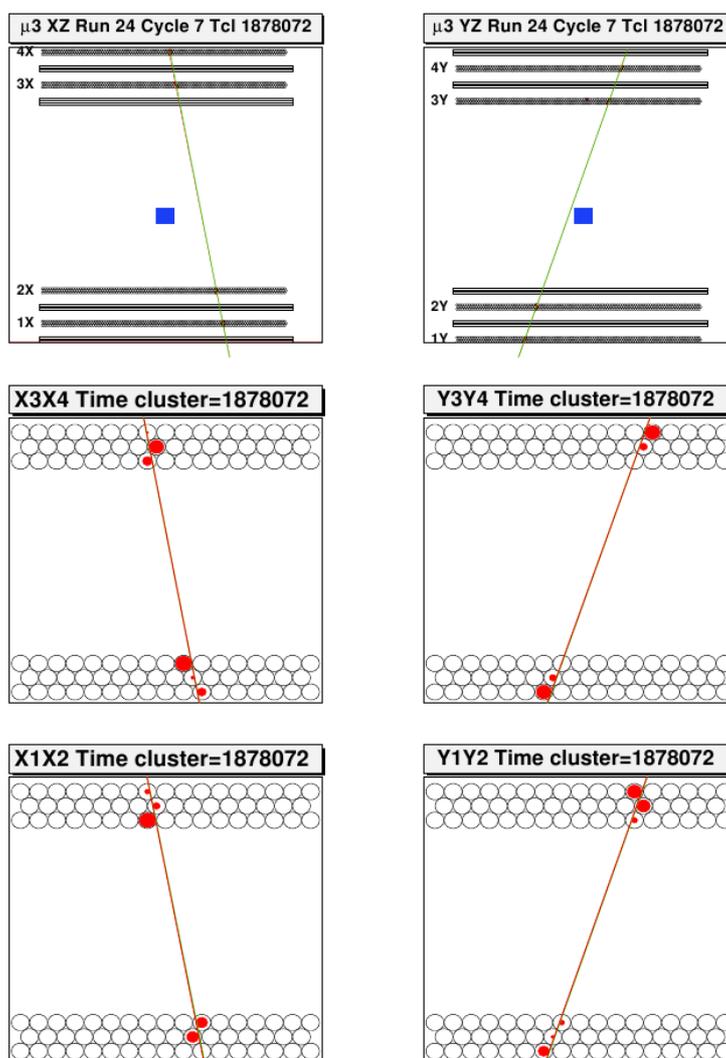


Рис. 11. Реконструкция трека.

Итерационная, квазианалитическая (вычисление вектора первых и матрицы вторых производных) процедура фита дополнена алгоритмом конкурентной выбраковки хитов. Каждый хит учитывает время прохождения сигнала по проволоке, время пролета мюона, собственное разрешение трубок и вклад многократного рассеяния на материале детектора.

Реконструированные проекции образуют два 3D-сегмента (верхний и нижний), и вероятная вершина рассеяния определяется как точка, сумма расстояний от которой до сегментов минимальна.

Критичным параметром, определяющим работоспособность установки, является разрешение разности углов сегментов трека, реконструированных в верхней и нижней частях установки. Пример углового разрешения приведен на Рис. 12 и составляет  $\sim 1.2$  мрад.

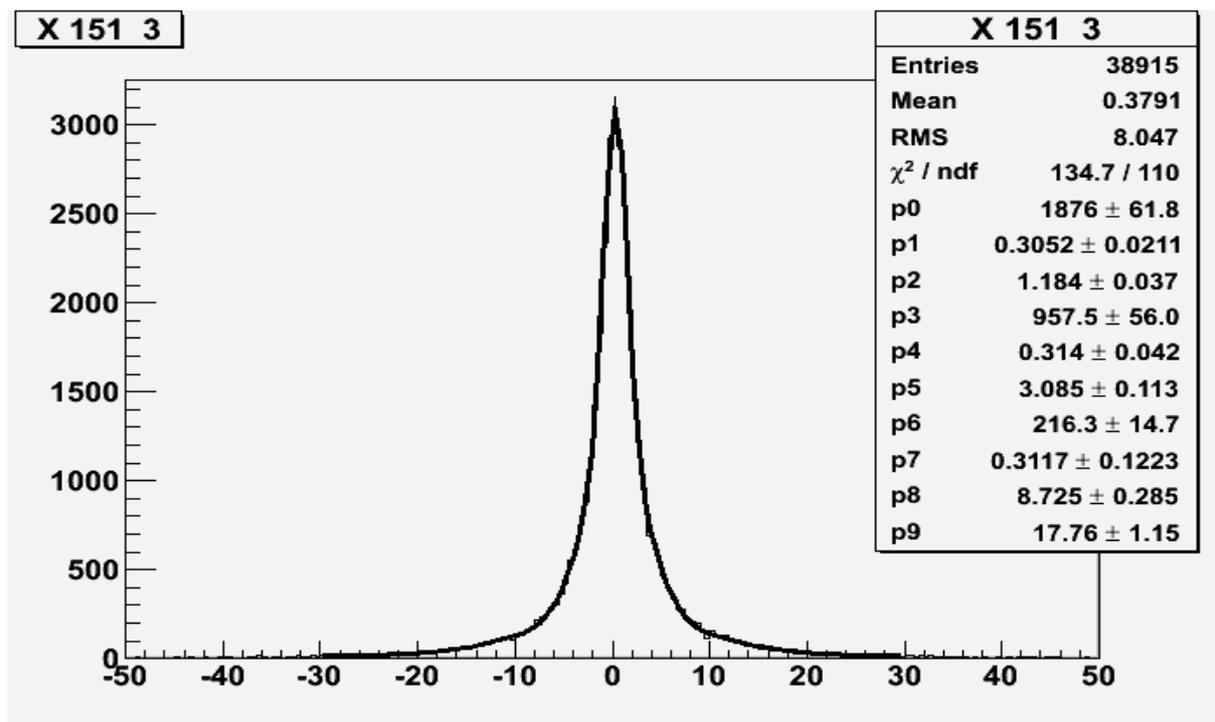


Рис. 12. Разность углов сегментов трека (в мрад).

### *Автокалибровка детектора*

Процедура автокалибровки состоит в определении индивидуальных для каждого канала параметров  $t_0$  и  $t_{\text{max}}$  ( $t_0$  соответствует прохождению трека через сигнальную проволоку;  $t_{\text{max}}$  — максимальное время дрейфа), а также в реконструкции индивидуальных  $Rt$ -зависимостей. Параметры  $t_0$  для каждого канала определяются с помощью специальных тестовых сигналов, подаваемых на анодные проволоки, и являются входными параметрами для процедуры автокалибровки.

Реконструкция  $Rt$ -зависимостей осуществляется с помощью итерационного фита экспериментальных данных.

$Rt$ -зависимости параметризуются как разложение по полиномам Чебышева до 6-й степени включительно. Свойство ортогональности полиномов позволяет устранить корреляцию между весами полиномов и обеспечивает высокую устойчивость и сходимость алгоритма. Пример реконструированной  $Rt$ -зависимости приведен на Рис. 13.

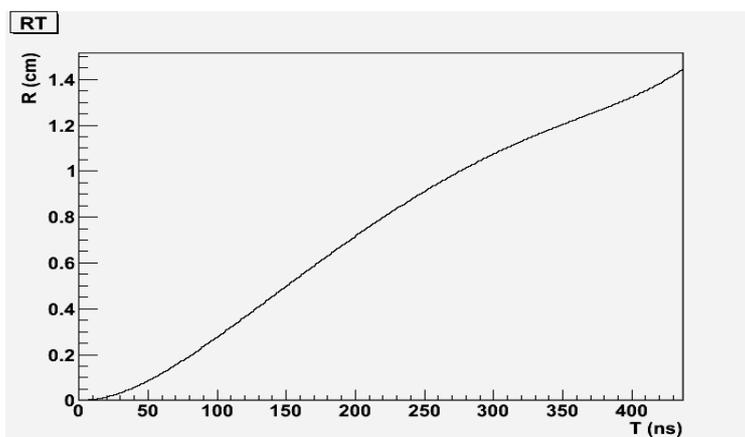


Рис. 13. Пример  $Rt$ -зависимости.

### **Визуализация и анализ изображений**

Реконструированные вершины вероятного рассеяния (возможно использование вершин с весом, пропорциональным первой либо второй степени угла рассеяния) образуют изображение (в общем случае — 3D), из которого можно получить произвольные срезы 2D. При этом каждый срез имеет свои индивидуальные параметры настройки: размеры, положение и толщину среза, параметры отбора треков и вершин, методы представления и ассоциированные процедуры цифровой обработки. В настоящее время реализованы различные алгоритмы преобразования гистограмм изображений, устранения шума и выделения границ. Реализована поддержка произвольного количества изображений - срезов (ограничено только размером оперативной памяти компьютера).

Система визуализации построена на базе пакета Qt-4 [23] и позволяет осуществлять анализ данных как в режиме on-line, так и с использованием информации из ранее записанных файлов.

Некоторые возможности программного обеспечения изображены на Рис. 14. На рабочую поверхность тележки, размещенную примерно в центре, были уложены свинцовые блоки общей толщиной ~20 см. В программе, в качестве примера, созданы три окна и приблизительно через пять минут экспозиции видно: правое верхнее окно — исходное изображение среза объема реконструированных точек без обработки, на котором уже различимы рельсы (полосы вертикального сгущения), располагающие на себе рабочую платформу, и сгущение в районе левого рельса, соответствующее блокам свинца; левое верхнее — цифровая обработка исходного изображения; нижнее — необработанное изображение среза в области, в которой не располагаются объекты.

Все поддерживаемые параметры любого изображения могут быть изменены в процессе анализа с использованием простой системы меню. При этом происходит быстрое реконструирование нового изображения с учетом всей накопленной к данному моменту статистики. В настоящее время развиваются методы динамического создания, представления и анализа 3D-изображений.

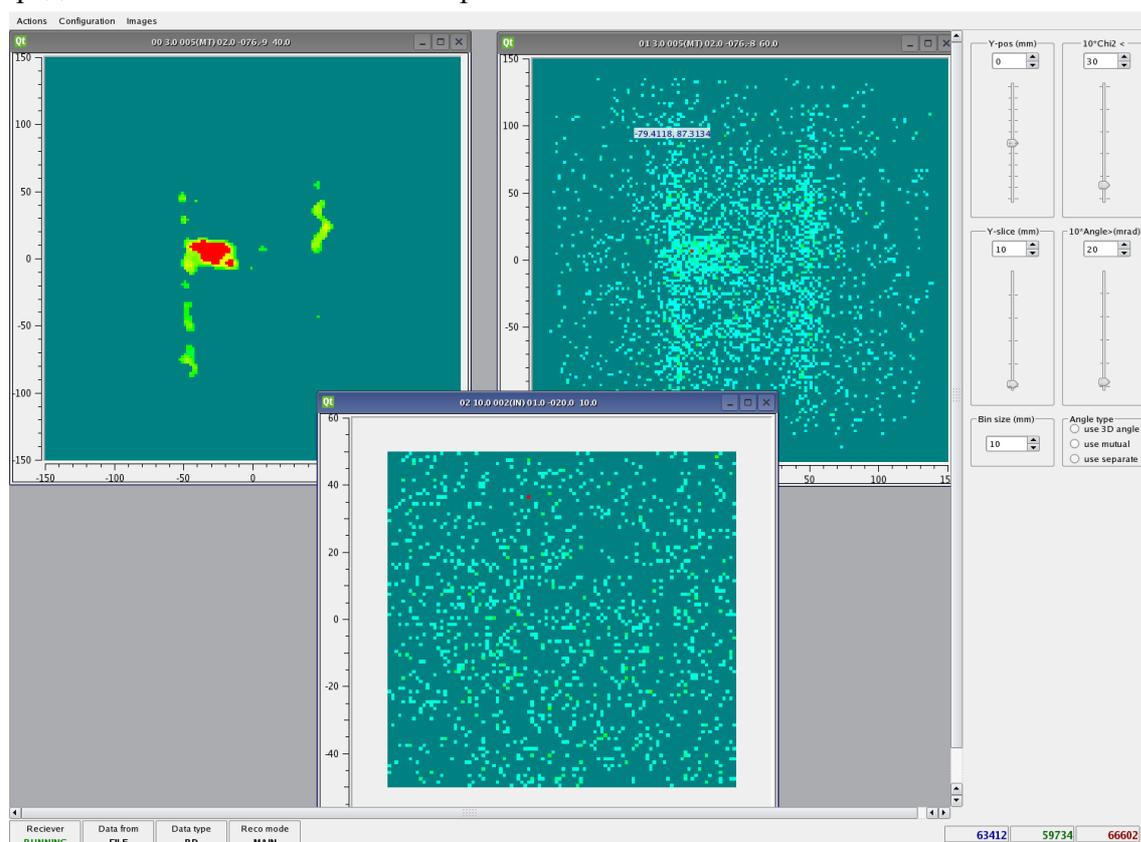


Рис. 14. Интерфейс программного обеспечения.

## Заклучение

На данный момент экспериментальная установка «мюонный томограф» выполняет свои подзадачи, но не автоматизирована в полной степени. То есть на сегодняшний день возможно произвести сбор данных, их анализ, автокалибровку установки. Реализована функция восстановления треков и 2D-визуализация. Ведутся тестовые и отладочные работы, доработка программного обеспечения и получение новых результатов.

## Список литературы

- [1] E.P. Georges, Commonwealth Engineer (July 1955), 455.
- [2] L.W.Alvarez, Lawrence Radiation Laboratory Physics Note 544 (1 March 1965).
- [3] L.W.Alvarez et al, Science, V167, Issue 3919 (Feb.6,1970), p. 832-839.
- [4] A detector for muon tomography - technical report. UT Maya Muon Group.
- [5] M.Basset et al, Nucl. Inst. Meth. A567 (2006), 298-301.
- [6] M.Menichelli et al, Nucl. Inst. Meth. A572 (2007), 262-265.
- [7] K.Nagamine et al, Nucl. Inst. Meth. A, 356 (1995), 585.
- [8] N.K.M.Tanaka et al, Nucl. Inst. Meth. A, 555 (2005), 164-172.
- [9] N.K.M.Tanaka and Iz. Yokoyama, Proc.Jpn.Acad., Ser.B , 84 (2008).
- [10] W.B.Gilboy et al, Nucl. Inst. Meth. B, 263 (2007), 317-319.
- [11] P.M.Jenneson, Nucl. Inst. Meth. A, 525 (2004), 346-351.
- [12] W.B.Gilboy, P.M.Jenneson, N.G.Nayak, Radiat. Phys. Chem., 74 (2005), 454-458.
- [13] K.Borozdin et al, Nature, Vol. 422, p. 277 519, Mar. 2003;  
W.Priedhorsky et al, Rev. Sci. Instr. vol.74, no.10, pp. 4294-4297, Oct. 2003;  
L.J.Shultz et al, NIM A519 (2004), 683-694.
- [14] M. Osterlund et al, Proceedings of Int. Workshop on Fast Neutron Detectors and Applications, April, 3-6, 2006, Univ. of Cape Town, South Africa.
- [15] M. Bogollyubski et al., Proceedings of 2008 IEEE NSS and MIC conference, 19-25 October, 2008, Dresden, Germany.
- [16] S.Pesente et al., NIM A604 (2009), 738-746.

- [17] A. Borisov et al, ATLAS monitored drift tube assembly and test at IHEP. Nucl. Inst. Meth. A, 494 (2002), 214-217.
- [18] J. Bensinger et al. Construction of monitored drift tube chambers for ATLAS end-cap muon spectrometer at IHEP (Protvino). Nucl. Inst. Meth. A, 494 (2002), 480-486.
- [19] Дворников О.В. и др. Комплект аналоговых БИС для работы с емкостными источниками сигналов. Chip News, 1997, 11-12.
- [20] Дворников О.В. И др. Интегральные маломощные зарядочувствительные усилители для источников сигнала с малой емкостью. НЦФЧВЭ, Мн, 1997, Деп. в БЕЛИСА, 11 с.
- [21] Стандарт VME - <http://en.wikipedia.org/wiki/VMEbus>
- [22] Библиотека VMELinux - <http://www.vmelinux.org>
- [23] Библиотека Qt - <http://qt.nokia.com/>

*Рукопись поступила 19 апреля 2011 г.*

А.А. Борисов, М.Ю. Боголюбский, Н.И. Божко и др.

Установка «мюонный томограф» с площадью перекрытия  $3 \times 3$  м<sup>2</sup>.

Редактор Л.Ф. Васильева.

---

Подписано к печати 27.04.2011.                      Формат 60 × 84/16.      Офсетная печать.  
Печ.л. 1,25.      Уч.–изд.л. 1,92.                      Тираж 80.      Заказ 42.                      Индекс 3649.

---

ГНЦ РФ Институт физики высоких энергий,  
142281, Протвино Московской обл.

Индекс 3649

---

ПРЕПРИНТ 2011-7, ИФВЭ, 2011

---