

О ВОЗМОЖНОСТИ ОБНАРУЖЕНИЯ МАТЕРИАЛОВ С БОЛЬШИМ ЗАРЯДОМ ЯДРА Z С ПОМОЩЬЮ УСТАНОВКИ, ДЕТЕКТИРУЮЩЕЙ ЕСТЕСТВЕННЫЙ ПОТОК КОСМИЧЕСКИХ МЮОНОВ

Д. Е. Сыресин, Г. А. Шелков

Объединенный институт ядерных исследований, Дубна

Предложена схема и произведен расчет разрешающей способности установки для контроля за несанкционированным перемещением материалов с большим зарядом ядра (ядерных материалов с $Z > 90$) с использованием естественного потока космических мюонов. Идентификация ядерных материалов основана на сильной зависимости угла многократного рассеяния при прохождении космических мюонов через вещество от заряда ядра этого вещества. В качестве координатного детектора установки предлагается использовать камеры, собранные из дрейфовых алюминиевых трубок, аналогичные камерам, используемым в мюонной системе детектора ATLAS. Проведенные расчеты показывают, что предложенный вариант установки позволяет обнаружить присутствие в контролируемом объеме ядерных материалов с весом около 0,5–1 кг и выше при времени измерения несколько минут.

The setup of detection systems on the basis of natural cosmic-ray muon flows for control of unauthorized transportation of radioactive nuclear high Z materials ($Z > 90$) is proposed and parameters are estimated. Identification of nuclear materials is based on an underlying principle related to strong dependence of the multiscattering angle of charged particles crossing the layer of the material under investigation on the nuclear charge Z of this material. A muon detector with drift aluminum tubes used as detector cells is proposed. Such drift aluminium tubes are used as a basic element of the ATLAS muon system. The muon detector system allows nuclear high Z materials weighing 0.5–1 kg to be detected in the transport container within the measurement time about one minute.

PACS: 28.20.-v; 25.40.-h

ВВЕДЕНИЕ

Широкое развитие ядерной энергетики требует разработки новых методов контроля за несанкционированным перемещением материалов с большим зарядом ядра Z (ядерных материалов с $Z > 90$). Заряд ядер подавляющего большинства обычных веществ, встречающихся в повседневной практике, существенно меньше: для биологических объектов он равен $Z \sim 6-8$, для металлов изменяется от $Z = 13$ для алюминия до $Z = 82$ для свинца. Идея одного из вариантов детекторной системы, предназначенной для контроля за перемещением ядерных материалов с большим Z , состоит в использовании сильной зависимости величины угла многократного рассеяния заряженных частиц, пересекающих слой вещества, от величины заряда ядра этого вещества. Особую привлекательность этой

идеи, впервые описанной в работе группы из Лос-Аламоса [1], придает предложение использовать природный поток мюонов космических лучей, что позволяет избавиться от необходимости сооружения хотя и небольшого, но дорогостоящего ускорителя. Как известно, мюоны космических лучей падают непрерывно и практически равномерно на всю поверхность Земли со средней интенсивностью порядка $170 \text{ м}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$ [1]. Характерная энергия мюонов космических лучей составляет от нескольких сот МэВ до 10 ГэВ, что соответствует их проникающей способности в воде около 10 м.

Таким образом, естественно существующие в природе потоки мюонов могут быть эффективно использованы для поиска несанкционированных попыток транспортировки ядерных материалов, в том числе и в крупномасштабных контейнерах.

1. ДЕТЕКТОРНАЯ СИСТЕМА НА ОСНОВЕ МЮОННЫХ ПОТОКОВ

Приняв указанные выше принципы, нетрудно себе представить общую схему мюонной системы контроля, схематически изображенную на рис. 1. Область чувствительности системы ограничивается размерами двух координатных детекторов мюонов, один из которых располагается над, а другой под исследуемым контейнером. Задача каждого из детекторов — как можно точнее определить угол пересекшего детектор мюона, при этом верхний детектор определит угол мюона «до» пересечения им исследуемого объекта, а нижний — «после». Анализируя отличие этих двух измеренных углов, можно будет определить область аномально большого рассеяния мюонов внутри контейнера, которая будет соответствовать области расположения материалов с большим Z , рассеивающих мюоны, как уже указывалось выше, существенно интенсивнее, чем «обычное» вещество.

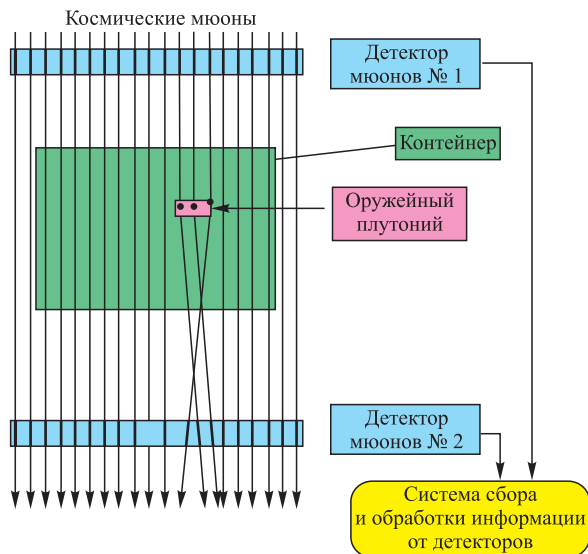


Рис. 1. Схема системы контроля для сканирования объектов с помощью космических мюонов

Угловое распределение рассеянных мюонов, прошедших через слой вещества толщиной L , в первом приближении соответствует распределению Гаусса

$$\frac{dN_\mu}{d\theta} = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\theta_{sc}} \exp\left(-\frac{\theta^2}{2\theta_{sc}^2}\right), \quad (1)$$

где θ_{sc} — среднеквадратичный угол рассеяния мюона в материале мишени,

$$\theta_{sc} = \frac{13,6}{pc\beta} \sqrt{\frac{L}{L_0}} [1 + 0,038 \ln(L/L_0)], \quad (2)$$

где p — импульс мюона в единицах МэВ/с; L_0 — радиационная длина исследуемого вещества, равная для Al $L_0 = 24,1$ г/см², Fe — $L_0 = 13,84$ г/см² и Pb — $L_0 = 6,37$ г/см². Зависимость среднеквадратичного угла рассеяния мюона с кинетической энергией 1 ГэВ от толщины и материала мишени приведена на рис. 2. Для мишени из ядерного материала толщиной 1 см характерный среднеквадратичный угол рассеяния мюона составляет около 25 мрад (рис. 2), детектирование и восстановление которого может быть легко осуществлено в установке. В течение трех минут через такую мишень с поперечными размерами 5×5 см пролетает в среднем 75 мюонов, что вполне достаточно для статистического анализа рассеяния в мишени на большие углы (статистическая ошибка около 10%). Таким образом, при времени измерения около 3 мин данная детекторная система позволяет обнаружить присутствие в контейнере ядерных материалов с размерами не менее $5 \times 5 \times 1$ см и весом от 0,5–1 кг и более.

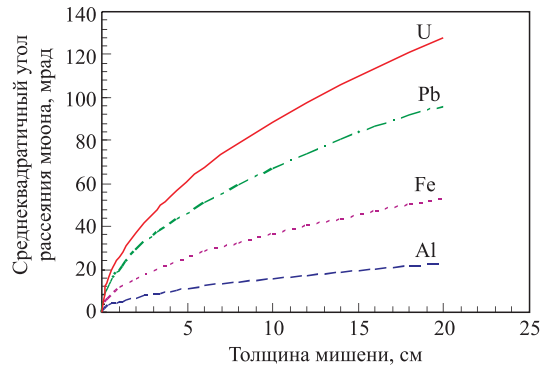


Рис. 2. Зависимость среднеквадратичного угла рассеяния мюона с импульсом 1 ГэВ/с при прохождении через мишень

Отметим, что аналогичное рассеяние мюонов вызывают, например, железная плита толщиной 6 см или алюминиевая плита толщиной 30 см, однако при реконструкции положения рассеивающих центров детектор легко определяет столь большую разницу в толщинах мишеней из ядерных и «обычных» материалов. Из вышеизложенного понятно, что основными элементами стенда являются два детектора мюонов с системами обеспечения их работоспособности, а также система сбора и обработки информации с этих детекторов. Рассмотрим основные требования, предъявляемые к этим элементам, что, в свою очередь, определит выбор конкретного технического решения.

2. КООРДИНАТНЫЙ ДЕТЕКТОР МЮОНОВ

Главная задача предлагаемой системы контроля — обеспечение быстрого просвечивания больших объемов (грузовики, морские контейнеры и прочее) за минимально возможное время (целью является достижение времени сканирования порядка минуты). Это основное требование определяет размеры детекторов, которые должны обеспечить единовременное перекрытие всего исследуемого объема. Таким образом, размеры детекторов должны быть порядка от нескольких квадратных метров (для сканирования багажа, мелких контейнеров и автотранспорта) до нескольких десятков квадратных метров для больших грузовиков и морских контейнеров. В арсенале физиков существует достаточно много типов координатных детекторов. Выбор конкретного решения в данном случае будет определяться, с одной стороны, компромиссом между точностью детектора и размером одного канала регистрации и, с другой — требованием высокой надежности и максимальной простоты в обращении. Говоря о компромиссе между пространственным разрешением и размером единичного канала, имеем в виду, что число детектирующих каналов должно быть допустимо минимальным, так как оно определяет не только стоимость системы, но и долговременную надежность ее работы. Это приводит к заключению о нецелесообразности использования в столь крупной системе ряда типов детекторов с уникально высоким пространственным разрешением, но с малыми размерами единичного канала. Так полупроводниковые детекторы или детекторы на базе скинтилирующих волокон могут обеспечить точность в пределах нескольких десятков микрон, но приведут также к неоправданно большому в данном случае числу каналов на 1 м^2 (до нескольких миллионов).

Исходя из этих соображений предлагается вариант, основанный на использовании в качестве ячейки детектора дрейфовой алюминиевой трубки. Такой элемент обладает необычной для научных приборов надежностью и стойкостью к внешним воздействиям и позволяет достигать координатной точности порядка 100 мкм в единичном канале размером 3–5 см. Кроме того, технология массового производства таких детекторов была хорошо отработана в ходе сооружения мюонной системы площадью несколько тысяч квадратных метров для крупнейшей в мире экспериментальной установки ATLAS (ЦЕРН, Женева) [2–4].

3. МЮОННАЯ КАМЕРА

Основными детекторами, из которых собираются мониторируемые дрейфовые камеры (МДТ-камеры) ATLAS, являются дрейфовые трубки (ДТ) с повышенным давлением рабочего газа. Дрейфовая трубка представляет собой алюминиевую трубу диаметром 30 мм, толщиной 0,4 мм и длиной 3 м, вдоль оси которой с высокой точностью (10 мкм) натянута 50-мкм позолоченная вольфрамовая нить (2,7 % Re). Конструкция ДТ приведена на рис. 3.

Мюонная камера (рис. 4) собирается из отдельных дрейфовых трубок. Дрейфовые трубки склеиваются между собой в два «суперслоя», каждый из которых, в свою очередь, склеен из трех слоев ДТ. Суперслои соединяются между собой с помощью несущей рамы.

Согласно спецификации, основные геометрические параметры камеры должны быть выдержаны с точностью 20 мкм. Очевидно, что обеспечить постоянство этих размеров для

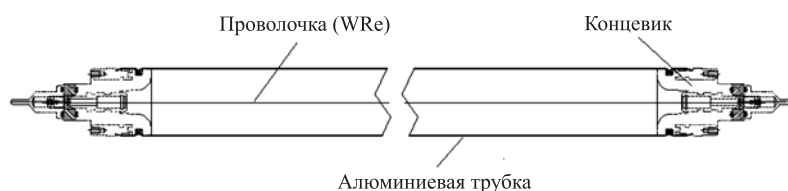


Рис. 3. Конструкция дрейфовой трубки

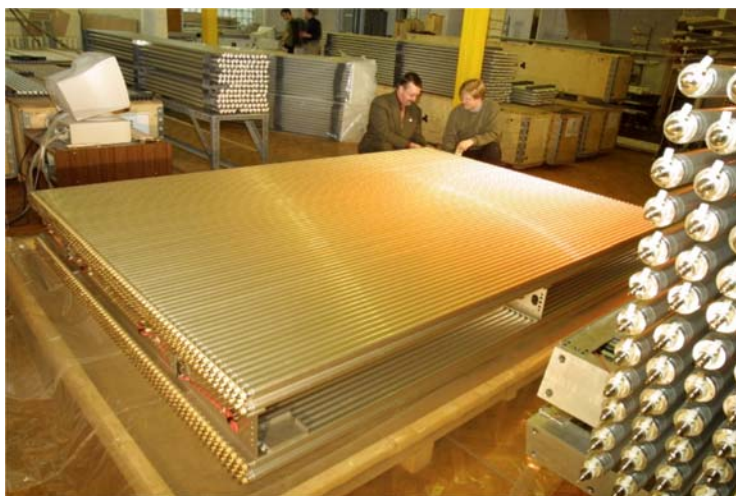


Рис. 4. Собранная в ОИЯИ МДТ-камера размером 2×3 м

камеры размером в несколько квадратных метров, состоящей из алюминиевых деталей, невозможно, в первую очередь, из-за эффекта температурного расширения: алюминиевая деталь длиной 4 м при изменении температуры на 1°C изменяет свою длину на 100 мкм.

Для решения этой проблемы каждая мюонная камера снабжается развернутой опто-электронной системой измерения деформаций (RASNIK), которая также устанавливается на несущей раме [3].

4. РАСЧЕТЫ МОНТЕ-КАРЛО

Для прогнозирования параметров мюонной детекторной системы, предназначенной для обнаружения ядерных материалов с $Z > 90$, было выполнено численное моделирование характеристик прибора с использованием пакета программ MTGEANT-4 [5]. Также нами был разработан компьютерный код по восстановлению траекторий мюонов во входных и выходных мюонных камерах детекторной системы, а также по определению координат рассеивающих центров мишени, расположенной внутри рабочего объема детектора. Пакет MTGEANT-4 создан специально для моделирования процессов прохождения мюонов через дрейфовую камеру детектора ATLAS. При моделировании с помощью пакета программ MTGEANT-4 учитывались все основные процессы, происходящие

в реальных условиях, а именно, многократное рассеяние мюонов при взаимодействии с мишенью, их ионизационные и радиационные потери энергии, распад мюонов и другие. Проникающая способность мюонов с энергией 3 ГэВ составляет около 1000 г/см^2 (около 6 м для контейнера, заполненного биологическими объектами с $Z \sim 6$, и 3,5 м для контейнера, загруженного алюминием). В ходе работы было проведено моделирование установки, повторяющей экспериментальный стенд, где между двумя дрейфовыми камерами помещается мишень из материала с большим Z . Роль триггера выполняют два сцинтиллятора, расположенные на расстоянии 1 м от каждой из камер. На высоте 18 м от верхней камеры находится вершина пучка, в которой генерируется космический мюон с кинетической энергией от 300 МэВ до 10 ГэВ. Спектр по кинетической энергии мюонов распределен как $1/E^2$, их средняя кинетическая энергия составляет около 1 ГэВ. При этом распределение числа частиц по углу вылета θ из вершины мюонного пучка пропорционально $\cos^2 \theta$, а угловой акцептанс детектора составляет 5° .

После моделирования факта пролета мюона через детектирующие камеры в программе MTGEANT-4 проводится измерение времени между срабатыванием триггерной системы и приходом сигнала на конкретную трубку детектора, через которую и прошел мюон. Причем на данном этапе моделирования удобнее использовать обратную временную шкалу начиная от 3000 нс. Время дрейфа сложным образом зависит от расстояния между треком мюона и центральной проволокой. Была проведена калибровка трубок камеры, которая позволила сопоставить полученное время и расстояние, на котором прошел мюон от центральной проволоки. Для этого была создана модель, в которой мюоны генерировались таким образом, чтобы на каждый радиус пролета приходилось равное число мюонов. Если известно, что определенное количество мюонов прошло на расстоянии, меньшем r , то этому же количеству мюонов будет соответствовать время дрейфа меньше, чем некоторое t . Таким образом, определяется взаимно-однозначное $r-t$ -соответствие. Зависимость расстояния между треком мюона и проволокой от времени дрейфа изображена на рис. 5. Эта калибровка впоследствии использовалась для определения искомого расстояния для полученных в моделировании значений времен дрейфа в трубке.

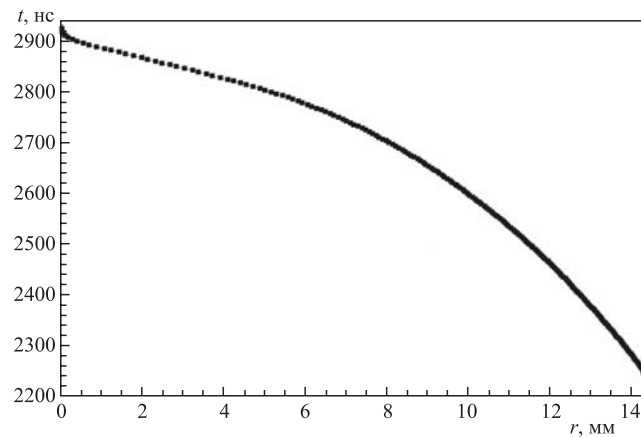


Рис. 5. Зависимость времени дрейфа в трубке от расстояния между треком мюона и центральной проволокой

Для реконструкции треков мюонов был создан простой алгоритм, способный распознавать одновременно несколько треков в разных трубках, при этом исключая трубки, сработавшие от тепловых шумов. Для всех сработавших трубок определялся радиус, на котором пролетел мюон от их оси. Далее выбирались одна трубка в верхнем слое и две трубки в нижнем. Для них аналитически вычислялись касательные к каждой паре окружностей и выбиралась касательная, наиболее близко проходящая относительно всех треков. Аналогичные прямые были получены для всех комбинаций трубок. Затем эти прямые сортировались и объединялись наиболее схожие. Далее в каждой группе прямых выбиралась та, которая наиболее точно отвечает решаемой задаче для всех задействованных окружностей. В результате в качестве реконструированных треков выбирались прямые, проходящие по касательной минимум к четырем окружностям, где хотя бы одна из них лежит в другом суперслое. Такой алгоритм позволил с хорошей точностью отделять друг от друга треки от различных мюонов и отсеивать единичные трубки, сработавшие от тепловых шумов.

После проведения реконструкции для входных и выходных камер были получены треки мюонов до и после прохождения рабочего объема детектора, содержащего материал с большим Z . На рис. 6 приведена зависимость изменения направления (угла) движения мюона внутри чувствительного объема прибора (разница углов, измеренных в верхнем и нижнем слоях мюонных камер) от толщины слоя железа, помещенного внутри прибора. Эти данные позволяют оценить предел чувствительности метода. В данной геометрии прибора возможна надежная идентификация железного образца (рис. 6), начиная с его толщины ~ 1 см, при среднеквадратичном угле рассеяния около 10 мрад. Результаты расчетов Монте-Карло по рассеянию мюонов находятся в хорошем согласии с аналитическими расчетами среднеквадратичного угла рассеяния (2), усредненного по спектру энергий мюонов космических лучей и соответствующего эффективному импульсу мюонов в (2) около 715 МэВ. При малых толщинах мишени различие между аналитическими и монте-карло-расчетами связано с точностью восстановления траектории мюонов в детекторе, при больших толщинах — с влиянием потерь энергии мюонами в мишени. Анализ расчетов Монте-Карло и их сравнение с аналитическими расчетами

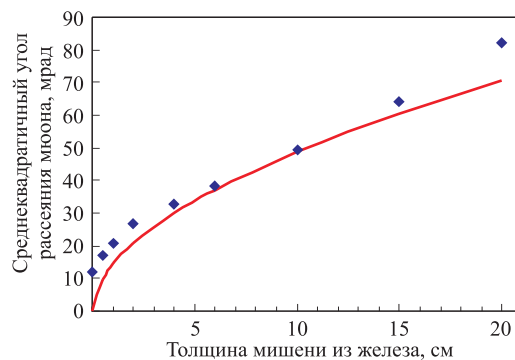


Рис. 6. Зависимость угла рассеяния мюона от толщины железного поглотителя, перекрывающего внутреннее сечение рабочего объема прибора. Сплошная линия — аналитический расчет (2) при импульсе мюонов 715 МэВ/с, точки — расчет Монте-Карло для мюонов космических лучей

указывает на точность восстановления траекторий мюонов во входных и выходных камерах и позволяет определить минимальное угловое разрешение детектора. Минимальное угловое разрешение детектора (рис. 6) при использовании разработанного кода по восстановлению траекторий мюонов составляет около 5 мрад. Это разрешение находится в разумном согласии с экспериментально достигнутой координатной точностью порядка $\Delta r \sim 100$ мкм в дрейфовой трубке диаметром $d = 3$ см [3], соответствующей предельному угловому разрешению порядка $2\Delta r/d \sim 6$ мрад.

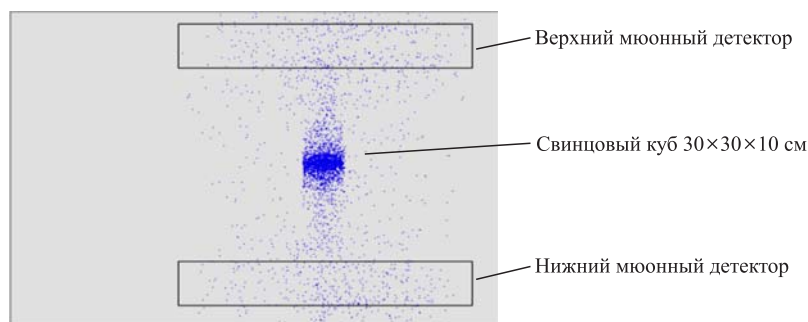


Рис. 7. Двумерная диаграмма распределения положения реконструированных точек изменения траектории движения мюона (рассеивающих центров) по результатам измерений в мюонных детекторах

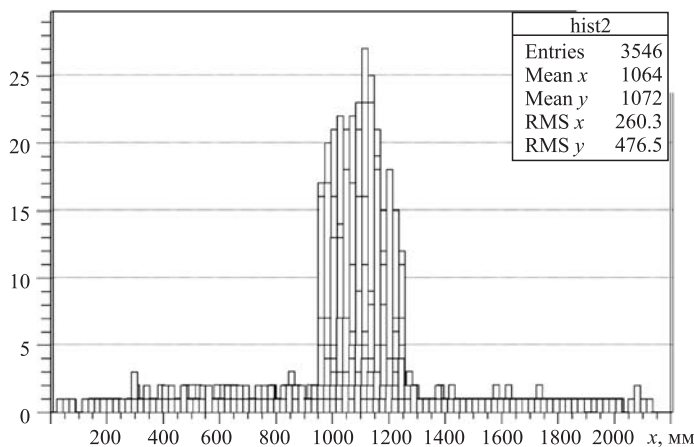


Рис. 8. Гистограмма количества рассеиваний в зависимости от реконструированного положения рассеивающих центров свинцового куба со стороной 300 мм по x -координате

Для оценки разрешающей способности прибора было проведено моделирование свинцового куба размером $30 \times 30 \times 10$ см (рис. 7), помещенного в рабочий объем детектора. Всего было промоделировано 20 000 событий, из них через свинцовый куб прошло около 500 мюонов, что соответствует 29 с измерения на реальном детекторе. Каждая точка на рисунке отображает реконструированный центр рассеяния мюона, полученный при пересечении продолжений его траектории во входной и выходной мюонных камерах.

Свинцовый куб отчетливо выделяется на фоне рассеяния мюонов в материале детектора и в воздухе, заполняющем рабочий объем прибора. Гистограмма количества рассеиваний в зависимости от реконструированного положения рассеивающих центров свинцового куба со стороной 300 мм по x -координате приведена на рис. 8. Сигнал (число правильно реконструированных событий с большим углом отклонения мюона в свинцовом кубе) превышает фон (события с неточно реконструированным центром рассеяния) примерно в 10 раз, а размер стороны реконструированного куба по x -координате составляет около 300 мм. По рассеянию мюонов космических лучей детекторная система надежно регистрирует положение и границы вещества с большим зарядом Z .

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Предлагаемый вариант детектирующей установки обладает следующими достоинствами:

- использует естественный поток мюонов космических лучей;
- позволяет проводить поиск в больших объемах — вагонах и контейнерах, высота которых зависит от проникающей способности мюонов и составляет до 6 м при заполнении веществом с $Z \sim 6$ (в количестве вещества около 1000 г/см^2);
- имеет высокую разрешающую способность — от 500 г ядерных материалов;
- требует малого времени сканирования для определения наличия вещества с высоким Z — несколько минут;
- позволяет обойтись небольшим количеством каналов электроники, равным 864 каналам на 6 м^2 .

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Borozdin K. et al. // Nature. 2003. V.422. P. 277.*
2. *Барашков А. В. и др. Сообщение ОИЯИ Р13-2005-29. Дубна, 2005.*
3. *ATLAS Muon Spectrometer. TDR, 1997, CERN/LHCC 97-22. P. 117; 244.*
4. *Bauer F. et al. Large Scale Production of the Precision Drift Tube Chambers for the ATLAS Muon Spectrometer. 2001.*
5. *Kortner O. MTGEANT-4. The Munich Test-Stand Simulation Programme. Manual for Version 1.0. Ludwig-Maximilians-Universität, München. Garching, 2000.*

Получено 13 мая 2009 г.