

Московский Государственный Университет
имени М.В. Ломоносова

Научно-исследовательский институт ядерной физики
имени Д.В.Скобельцина

**Испытания прототипа переднего конического
электромагнитного калориметра (NCC) эксперимента
PHENIX (BNL)**

Волков В.Ю., Воронин А.Г., Ежов В.Б., Карманов Д.Е., Королев М.Г.,
Меркин М.М., Феденко А.Ю.

Препринт НИИЯФ МГУ - 2007-9/830

Москва 2007.

Волков В.Ю., Воронин А.Г., Ежов В.Б., Карманов Д.Е., Королев М.Г., Меркин М.М., Феденко А.Ю.

«Испытания прототипа переднего конического электромагнитного калориметра (NCC) эксперимента PHENIX (BNL).»

Аннотация:

В работе приведено описание прототипа переднего конического калориметра (NCC) установки PHENIX (BNL). Рассмотрена возможность гальванического объединения нескольких каналов кремниевых детекторов. Испытания проводились на ускорителе У-70 ИФВЭ г. Протвино. В ходе данного теста проводился набор данных по позитронам 10 ГэВ и протонам 50 ГэВ. Приведены данные пучкового теста и данные моделирования (GEANT3.21).

V.Volkov, A.Voronin, V.Ejov, D.Karmanov, M.Korolev, Merkin.M, A.Fedenko

«The test of the prototype of the Nose Cone Calorimeter (NCC) of the experiment PHENIX (BNL).»

E-mail address:

afedenko@silab.sinp.msu.ru (A.Fedenko);

Preprint MSU SINP 2007–9/830

Abstract:

The construction of the prototype of the Nose Cone Calorimeter (NCC) of the experiment PHENIX (BNL) is presented. The possibility of the silicon detectors channels galvanic interconnection is discussed. The beam test was carried out at the U-70 accelerator of the Institute for High Energy Physics, Protvino, Russia. The data was acquired during the 50 GeV proton run and 10 GeV positron run. The experimental results of the beam test and Monte-Carlo (GEANT3.21) data are presented.

© НИИ Ядерной Физики имени Д.В.Скобельцына
Московского Государственного Университета
имени М.В.Ломоносова 2007.

Физические требования к конструкции калориметра.

Электромагнитный калориметр НСС должен удовлетворять следующим требованиям [1]:

1. Энергетическое разрешение отдельных электромагнитных ливней не хуже:

$$\frac{\sigma}{E} = \frac{25\%}{\sqrt{E}}.$$

2. Разделение двух каскадов от двух гамма-квантов при распаде $\pi^0 \rightarrow \gamma\gamma$.
3. Разделение электромагнитного и адронного каскадов.
4. Электроника считывания должна иметь большой динамический диапазон >1000 минимальных ионизирующих частиц (МИЧ).

Каждый детектор должен устойчиво выделять сигнал, соответствующий 1 МИЧ. Такое требование предполагает, что детекторы НСС и их считывающая электроника позволяют измерять амплитуды сигналов от однозарядных релятивистских частиц (1 МИЧ), а также от электромагнитного каскада, содержащего до нескольких тысяч частиц (>1000 МИЧ).

Также калориметр должен сохранять работоспособность при радиационных нагрузках до 100 кРад.

Описание конструкции НСС.

Как было сказано выше, электромагнитный калориметр должен измерять энергию гамма-квантов, а также пространственно выделять отдельные ливни. Для этого был предложен калориметр, состоящий из 22 чередующихся слоев поглотителя и рабочего вещества - кремния. Для сепарирования гамма-квантов и адронов слои поглотителя имеют разную толщину. В передней части (16 слоев) толщина поглотителя равна $0.7 L_{\text{rad}}$, в задней части (6 слоев) - $5 L_{\text{rad}}$. В качестве поглотителя был выбран вольфрам. Это было сделано по нескольким причинам:

1. Вольфрам имеет небольшую радиационную длину — $L_{\text{rad}} = 3.5$ мм. Поэтому весь ливень в продольном направлении будет укладываться на длине около 10 см. Расположение максимума энерговыделения будет описываться следующей эмпирической формулой [2]:

$$t_{\text{max}} = 1.0 \times \ln \left(\frac{E}{E_c} + C_j \right), \quad j = \gamma, e$$

, где t_{max} выражено в радиационных длинах, E_c - критическая энергия вещества, при которой потери энергии электрона на ионизацию сравниваются с потерями на образование пары электрон-позитрон), а $C_j = +0.5$ для γ -индуцированного каскада и $C_j = -0.5$ для каскада, индуцированного $e^-(e^+)$. Критическая энергия вольфрама может быть вычислена по формуле: $E_c = \frac{610}{Z+1.24}$ МэВ, что для 10 ГэВ позитрона (типичная энергия позитронного пучка ускорителя У-70, на котором проводились испытания) дает: $t_{max} = 6.6 L_{rad} \simeq 23.1$ мм (без учета воздушных зазоров и рабочего вещества - кремния). Оставшаяся часть энергии будет поглощена на интервале до $\approx 20 L_{rad} = 70$ мм (без учета зазоров).

2. Чтобы пространственно разрешить два электромагнитных каскада вещество поглотителя должно иметь как можно меньший радиус Мольера (в цилиндре с радиусом, равным мольеровскому, выделяется около 95% энергии первичной частицы). Для вольфрама радиус Мольера может быть рассчитан по формуле [2]:

$$R_M = X_0 \frac{E_s}{E_c}$$

, где X_0 - радиационная длина, $E_s = const = 21$ МэВ. и для вольфрама $R_M = 9.1$ мм. Это означает, что при одновременном пролете двух частиц, можно надеяться разделить каскады в том случае, если частицы влетят в калориметр на расстоянии сравнимом с радиусом Мольера.

Для определения параметров ливня: числа частиц, их пространственного расположения - был выбран кремниевый детектор. Его преимущества по сравнению с другими детекторами следующие:

1. Кремниевые детекторы отличаются высоким уровнем сигнала при минимальной толщине детектора (несколько сотен микрон);
2. Практически неограниченный динамический диапазон;
3. Высокое быстродействие ~ 10 нсек.

Гранулярность детекторов выбирается исходя из того, чтобы весь ливень попадал в один канал детектора (пада). В нашем случае были выбраны пады со стороной 15 мм, что соответствует тому, что все энерговыделение укладывается в один пад. Для увеличения координатного разрешения и нахождения вершины (распада $\pi^0 \rightarrow \gamma\gamma$) на НСС планируется также поставить два слоя координатных пиксельных детекторов - один в передней части калориметра, другой - в предположительном

максимуме энерговыделения. Все слои детекторов и поглотителей располагаются таким образом, чтобы ось пучка была им перпендикулярна. Все пады детекторов выстраиваются в так называемые «башни». Особенностью данного калориметра является то, что пады гальваническим образом объединены в группы до 6 вдоль оси пучка. Таким образом, мы видим сигнал не с одного канала детектора, а с нескольких - причем эти сигналы просуммированы вдоль башни (т.е. по оси пучка). При этом значительно уменьшается число каналов считывающей электроники.

Конструкция прототипа электромагнитного калориметра.

Детектор.

Для регистрации сигналов от одиночных заряженных частиц и электромагнитных каскадов в НСС предполагается использовать кремниевые падовые детекторы с гальваническим съемом сигнала (DC-структура). Основные параметры кремниевых детекторов PHENIX (см. рис. 1):

- толщина - 300 мкм (планируется 525 мкм);
- удельное сопротивление >5 кОм·см;
- количество падов в одном детекторе - 16 шт, размер пада - 15x15 мм;
- размер детектора 62×62 мм² (активная область 60×60 мм²);
- емкость одного пада при полном обеднении - 70 пФ;
- напряжение полного обеднения - 25 - 35 В (при толщине детектора 300 мкм).

По своему строению детектор является матрицей $p^+ - n - p^+$ структур (падов), в каждом паде которого между p^+ и n областями создается резкий $p - n$ переход [3]. Также в DC-структуре p^+ области играют роль омических контактов для съема сигнала и подачи запирающего напряжения на каждый пад. Имплантация n^+ на задней стороне детектора является общей для всех падов и выполняет функций:

- омического контакта;
- блокирующей области для инжекции неосновных носителей в ОПЗ (область пространственного заряда), возникающих за счет дефектов обработки задней стороны.

Функцией р-п-перехода является создание области, в которой практически отсутствует ток утечки, а неравновесные носители, создаваемые ионизирующей частицей, могут быть собраны и зарегистрированы. Релятивистская частица за счет ионизационных потерь создает в 300 мкм кремния в среднем 22000 электронно-дырочных пар. При этом дробовой шум тока утечки, вызванного тепловой генерацией носителей, составляет примерно 500 пар.

Важной характеристикой кремниевого детектора является время жизни неосновных носителей. Для используемого материала это время составляет >1 мсек, что на 5 порядков больше, чем время сбора заряда на контактах детектора.

Большое удельное сопротивление >5 кОм·см позволяет обеднять детектор по всей толщине при небольших значениях напряжения смещения. Это позволяет исключить вероятность развития лавинного пробоя в р-п переходе и, как следствие, снизить шум детектора.

Толщина детектора - в нашем случае 300 мкм - является в некотором смысле компромиссом, который можно объяснить следующими рассуждениями. С одной стороны при заданной площади падов, размер которых определяется в частности из требований координатного разрешения, шум системы «пад детектора-зарядочувствительный усилитель» пропорционален ёмкости пада, а следовательно, тем меньше, чем толще детектор [4]. Кроме того, сигнал от ионизирующих частиц пропорционален толщине детектора. С другой стороны для задач калориметрии и координатного разрешения ливня необходимо создать условия, при которых радиус Мольера был бы как можно меньше. Поскольку ливень практически не развивается в рабочем объеме детектора ($L_{rad}(Si) = 9.36$ см, более чем на порядок больше чем у вольфрама), то помещение в калориметрическую башню достаточно толстого слоя активного вещества (детектора) с низкой критической энергией резко увеличивает ширину ливня. Кроме того, объемный генерационный ток, от которого также зависит шум системы «пад детектора - ЗЧУ (зарядо-чувствительный усилитель)», при выбранном размере пада прямо пропорционален толщине пластины, поэтому толщина должна быть не очень большой. Кроме того, напряжение обеднения растет $\sim d^2$ [2], где d - толщина пластины, поэтому увеличение толщины детектора приведет к большому росту напряжения обеднения, что неприемлемо.

На рис. 2 и 3 показаны основные характеристики детекторов - $C(V)$ -характеристика, позволяющая судить об удельном сопротивлении кремния, и $I(V)$ -характеристика, показывающая ток утечки всех падов детектора.

Считывающая электроника.

Сигналы с 16-ти падов детектора усиливаются 16-ти канальным зарядочувствительным усилителем (ЗЧУ), фильтруются от помех, запоминаются на конденсаторах аналоговой памяти и последовательно выводятся мультиплексором для дальнейшей оцифровки. Все эти функции в прототипе NCC выполняет микросхема CR-1.4p [5].

Эта микросхема разрабатывалась для эксперимента АТЭС [6], который исследовал ливни высокоэнергетических частиц, образующихся в атмосфере, на установке, находящейся на воздушном шаре в стратосфере. Одной из задач этого эксперимента была регистрация ливней с большим числом частиц. Соответственно, этот усилитель имеет большой динамический диапазон - ~ 2500 МИЧ, приемлемый для калориметрических целей шум - $2200 e^- + 10 e^-/\text{пФ}$. Количество каналов - 16. Поскольку в задачу теста входило измерение энергии позитрона по образующемуся каскаду, то именно эта микросхема и использовалась в качестве ЗЧУ сигнала с детекторов PHENIX.

Тремя основными составляющими являются предусилитель, формирователь, система устройств выборки-хранения (УВХ, или, TrackHold) и 16-канальный мультиплексор (MUX). Для того, чтобы минимизировать шум системы «детектор-усилитель» сигнал с выхода ЗЧУ фильтруется в формирователе, который вырезает и усиливает из полосы частот ЗЧУ ту часть, которая соответствует полосе частот сигнала детектора. В данном случае оптимальное время формирования составляет 1.2 мксек. За формирователем находится система аналоговых ключей и конденсаторов, выполняющих роль аналоговой памяти (время удержания сигнала на конденсаторах составляет порядка 1 мс). Когда приходит сигнал о начале считывания (TR/N), аналоговые ключи захлопываются и на конденсаторах TrackHold запоминаются амплитуды сигналов с 16-ти падов детектора, соответствующие выходам формирователя в момент прихода этого сигнала. Затем аналоговый сигнал начинает считываться из УВХ, начиная с 16 канала, по тактовому импульсу (clock), приходящему с микросхемы управления. Последовательность 16-ти мультиплексированных каналов без сигнала называется пьедесталом. После выхода CR-1 сигнал проходит через усилительный каскад, согласующий уровень выходного сигнала с динамическим диапазоном АЦП.

Сигнал TR/N задерживается относительно времени прихода триггера, чтобы совпадать с максимумом сигнала на выходе формирователя.

Конструктивно CR-1.4p расположен на многослойной печатной плате, где также находится программируемая микросхема фирмы Altera обеспечивающая выработку сигналов управления для чипа CR-1.

Общий вид платы считывания и детекторной платы представлен на рис. 4.

Поскольку аналоговая часть (CR-1 и усилительный каскад) и Altera (цифровая часть) находятся на одной многослойной печатной плате, это может приводить к возникновению наводок от цифровой части на аналоговую. Также через всю плату на детекторный разъем приходило высокое напряжение. Напряжение питания на каждую плату управления подавалось индивидуально через стабилизаторы напряжения, что позволяло исключить наводки по питанию между платами.

Организация системы считывания в прототипе PHENIX.

На временной диаграмме (рис. 5) представлены следующие сигналы:

- MODE - сигнал (потенциал) для выбора типа калибровки: либо от внешнего триггера, либо от генератора
- RESET - сигнал перезапуска (потенциал) Alter'ы
- FLT_ALT - сигнал начала выработки временной диаграммы
- ЗАПУСК - запуск схемы задержки сигнала Т/Н для CR-1
- Т/Н_ALT - сигнал, поступающий на схему задержки
- GEN_ON - сигнал включения генератора
- CLK - тактовая частота
- Т/Н, -Т/Н - сигналы, определяющие работу УВХ
- ADC_CLK - сигналы, определяющие момент оцифровки аналоговых данных АЦП. Они приходят с задержкой тносительно сигналов CLK_01, для того, чтобы оцифровывать полку сигнала, где нет наводок от цифровых сигналов CLK_01
- RESET_01 - сигнал сброса сдвигающих регистров мультиплексора CR-1
- CLK_01 - сигналы управления сдвигающим регистром

В данном тесте была реализована передача сигналов управления, выработанных одной Alter'ой, на другие 6 плат считывания. Для этого на печатной плате располагается система передающих буферов сигналов и разъемы для соединения плат плоским кабелем. Это позволило сократить количество микросхем управления до одной, что снизило общее потребление электроники.

Благодаря встроенному в CR-1.4 мультиплексированию каналов, общее число мультиплексированных каналов считывания получается равным числу микросхем CR-1 (в данном тесте общее число каналов считывания 102, число чипов CR-1 - 7). В тесте использовалось 8-канальный 12-ти разрядный АЦП с частотой оцифровки 1.25 MSample/8 каналов National Instruments. АЦП соединяется с компьютером при помощи интерфейса IEEE 1394(FireWire). В АЦП встроен генератор, который использовался в качестве калибровочного. Также АЦП вырабатывал сигналы MODE и RESET.

Оцифровка происходит параллельно по всем 8 каналам (один канал не использовался), синхронно с приходом сигнала ADC_CLK.

Программное обеспечение разработано с помощью LabView 6.1. Общий вид окна программы представлен на рисунке 6.

В верхней части окна схематически изображены пады детекторов. Когда частица попадает в определенный пад, он подсвечивается на картинке, что позволяет в режиме on-line оценить место попадания частиц в детектор. Также есть режим выставления порога, по которому можно оценить число частиц в том или ином слое калориметра. Большое окно показывает распределение индикатором амплитуд во всех детекторах. Амплитуды можно смотреть как за вычетом пьедесталов, так и без вычета. При этом данные, конечно, записываются на жесткий диск без вычета пьедесталов.

В программе существует два режима: режим калибровки и режим сбора данных. В режиме калибровки пьедесталы набираются от генератора АЦП (MODE=1), в режиме сбора амплитуд от пучка(MODE=0), данные собираются по внешнему триггеру.

Механическая конструкция.

Калориметр состоит из чередующихся слоев поглотителя и падовых кремниевых детекторов(рис. 7). В передней части калориметра ставилось 15 слоев поглотителя толщиной в 2.5 мм ($\approx 0.7 L_{rad}$). В задней части, где электромагнитного каскада уже практически нет, а присутствует только адронная компонента, устанавливается 6 слоев поглотителя толщиной 16 мм.

Как уже говорилось выше, в НСС предполагается гальванически объединить детекторы в «башнях» калориметра. Эта идея была реализована в прототипе. Пады детекторов одной «башни» соединялись неэкранированным коротким проводом по три вдоль оси пучка. Объединение каналов в группы по 3 приводит к тому, что емкость на входе ЗЧУ увеличивается в 3 раза, что приводит к ухудшению соотношения сигнал-шум даже при том, что сигнал становится также в 3 раза больше, так как емкость на входе равная 3×70 pF соответствует утроенной емкости па-

дов и монтажа является предельной входной емкостью для усилителя, использовавшегося в эксперименте - CR-1.4p. Вследствие особенностей конструкции соединение падов приводило к росту внешних наводок, что также негативно сказывалось на соотношении «сигнал-шум».

Детекторы монтировались задней стороной на текстолитовую подложку с разъемом с помощью токопроводящего клея. Гальванический контакт с падами на лицевой стороне обеспечивался ультразвуковой разваркой на специальную тонкую текстолитовую плату с «окнами» для разварки. Далее пайкой проводами сигналы уходят на разъем. Общий вид детекторной платы представлен на рис. 8.

Проведение теста.

Тест проводился на ускорителе У-70 ИФВЭ в канале эксперимента СВД. Весь тест делился на две части - регистрация электромагнитного каскада от 10 ГэВ позитронов (конвертированных из протонов) и регистрация 70 ГэВ протонов. В качестве триггера использовались два сцинтиллятора перед калориметром, поставленные в режим совпадений. Требуемое время для выработки триггера составило 1 мксек, и на такую задержку была настроена система УВХ. Для контроля над потреблением электроники и токами утечки детекторов была создана система мониторинга. С помощью мультиметров можно было оценивать все напряжения питания, токи потребления аналоговых и цифровых частей электроники, уровень высокого напряжения, подаваемого на детектор, токи утечки детектора.

Экспериментальные данные и моделирование.

Моделирование.

Моделирование проводилось с помощью программы GEANT3.21 [7].

Калориметр, заложенный в геометрию GEANT'a, представляет собой 25 слоев вольфрама толщиной 2.5 мм с промежутком 1 мм. Между слоями вольфрама находятся пластины кремния толщиной 300 мкм. Размеры пластины 64×64 мм. Каждый детектор поделен на 16 считывающих элементов (падов) размером 16×16 мм. Окружающее калориметр пространство представляет собой вакуум. На калориметр налетает электрон 10 ГэВ. Факт попадания частицы в калориметр считается событием и записывается.

Выходные данные события представляют собой массив «попаданий» частиц в детектор (хитов) с указанием для каждого хита энерговыделения электрона (позитрона) на ионизацию. Каждому хиту приписывается уникальный номер пада. Такой подход лишает возможности проследить

«историю» каждого индивидуального трека (энергию на каждом шаге, координаты и т.д.), но, при этом, значительно сокращает объем получаемой информации и упрощает дальнейшую обработку.

Затем эти данные поступают в программу обработки. В ней в каждый хит детектора дописываются разыгранные случайным образом по гауссу амплитуды, имитирующие электронные шумы. Параметры гауссианы: среднее значение — 0 кэВ, сигма — 20 кэВ — при среднем энерговыделении в 300 мкм кремния 120 кэВ. Такой розыгрыш соответствует отношению сигнал-шум около 5-6. Это отношение приблизительно соответствует шумовым характеристикам зарядо-чувствительного усилителя, использовавшегося в прототипе — CR-1.4.

Чтобы симитировать запись реального события, был поставлен порог, равный трем сигмам, т.е., если амплитуда в паде превышает этот порог, то такой пад считается сработавшим, и информация с него используется в дальнейшем анализе, если нет — то считается, что в паде выделилась энергия, равная нулю.

Энергетический спектр детектора представлен на рис. 9 — суммарная амплитуда всех сработавших падов. На рис. 10 приведен спектр энергетических потерь в первом по пучку слое детектора. Разрешение калориметра составляет $\frac{\sigma}{E} = 9\%$. Распределение флуктуаций ионизации правдоподобно характеризует прохождение заряженной частицы через кремний.

Продольное и пространственное развитие ливня приведено на рис. 11 и 12.

Данные по набору статистики на одиночных протонах 70 ГэВ.

На первом этапе обработки вычислялись пьедесталы для всех каналов усилителей. Пьедестал в каждом канале равен наиболее вероятному значению в амплитудном спектре этого канала. Обработка проводилась по статистике набранной на протонах.

Далее для каждого события, из величин сигналов с каждого канала вычитался пьедестал этого канала. Полученный амплитудный спектр представлен на рисунке 13. Видно что, однозарядные релятивистские частицы уверенно выделяются и отношение сигнал-шум составляет 4-5.

Данные по набору статистики от позитронов 10 ГэВ.

При обработке данных по позитронам наблюдался сдвиг базовой линии выхода усилителя. Это связано с эффектом кросс-тока. Сущность этого эффекта в следующем. Когда в одном из каналов усилителя имеется

большой сигнал, он снижает амплитуду сигнала в соседних с ним каналах. Поэтому информация о сигнале с детектора искажается. Чтобы исправить эту ситуацию была выбрана следующая процедура обработки. В каждом событии выделялись каналы, в которых не было сигнала от частиц. Амплитуды в этих каналах (т.е. текущие значения пьедесталов), вычитались из средних значений пьедесталов для этих каналов. Полученные разности усреднялись и на эту среднюю величину делалась поправка амплитуд сигналов всех остальных каналов, где был сигнал.

Небольшое отличие коэффициентов усиления каждого канала нормировалось по сигналу от протонов.

Продольный профиль ливня фитирован функцией $kt(a - 1)\exp(-bt)$, где a и b - параметры фита. Как видно из рис. 14 такая функция описывает экспериментальные данные с хорошей точностью.

Амплитудное распределение сумм сигналов со всех плоскостей представлено на рис. 15. Распределение показывает разрешение - $\frac{\sigma}{E} = 11\%$ на 90% уровне достоверности. Результат соответствует требованиям к энергетическому разрешению калориметра НСС (см. «Физические требования к конструкции калориметра»).

Заключение.

Разрешение, которое было получено ($\frac{\sigma}{E} = 11\%$), в целом, соответствует требованию к прототипу. Оно несколько хуже, чем результат, полученный при симуляции. Этот результат можно объяснить несколькими причинами:

- Точка входа в калориметр в пучковом тесте не определялась, однако есть основания полагать, что пучок 10 ГэВ позитронов был недостаточно сколлимирован. Это могло приводить к тому, что ливень вылетал из области детектора, что конечно, сказывалось на энергетическом разрешении.
- Немонохроматичность пучка конвертированных позитронов на ускорителе У-70.
- Эффект кросс-тока.
- Геометрия, заложенная при моделировании, не совсем точно описывает реальную ситуацию.

Гальваническое объединение каналов кремниевых детекторов доказало свою работоспособность.

Список литературы

- [1] Phenix collaboration. «Proposal for a Nosecone Calorimeter (NCC) for the Phenix experiment». 2005.
- [2] W.-M. Yao et al, J. Phys. G 33, 1 (2006)
- [3] Ародзеро А.А. и др. «Кремниевые ионно-имплантированные падочные детекторы площадью 25 см^2 для физики высоких энергий». Препринт НИИЯФ МГУ, 1990 г.
- [4] H.Spieler, Semiconductor detector systems, Oxford Univ. Press, Oxford (2005), ISBN 0-19-852784-5.
- [5] J.H. Adams et al. «The CR-1 Chip: Custom VLSI Circuitry for cosmic rays», 26th ICRC Contributed Papers, Salt Lake City, Utah. 1999, OG 4.1.18.
- [6] J.H. Adams et al. «The Advanced Thin Ionization Calorimeter (ATIC) for Studies of High Energy Cosmic Rays», 26th ICRC, Contributed Papers, Salt Lake City, Utah. 1999 OG 4.1.03.
- [7] S.Giani et al, GEANT Detector Description and Simulation Tool, CERN Program Library Long Writeup, W5013.

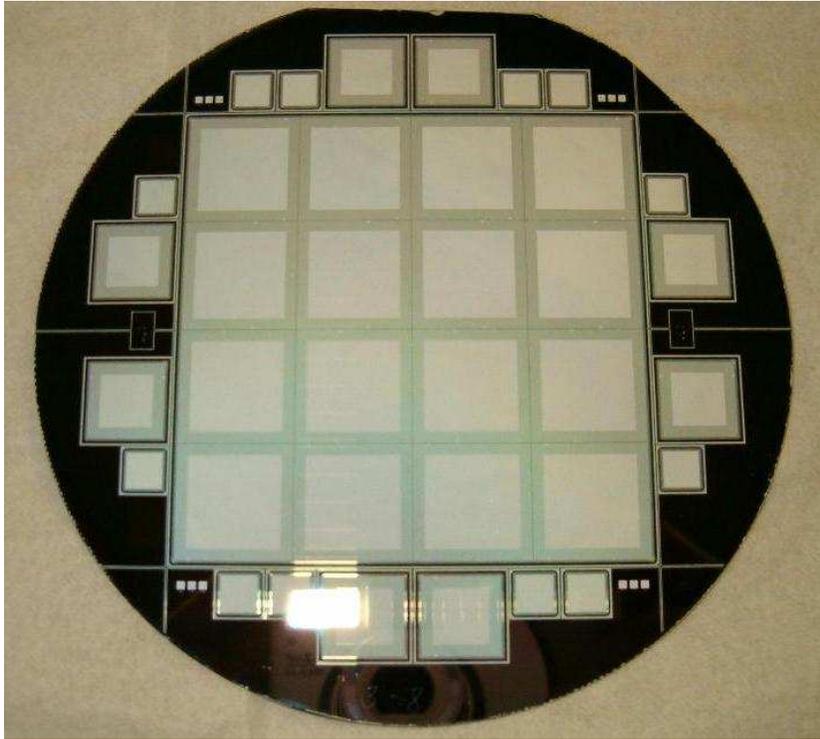


Рис. 1. Падовый детектор прототипа NCC.

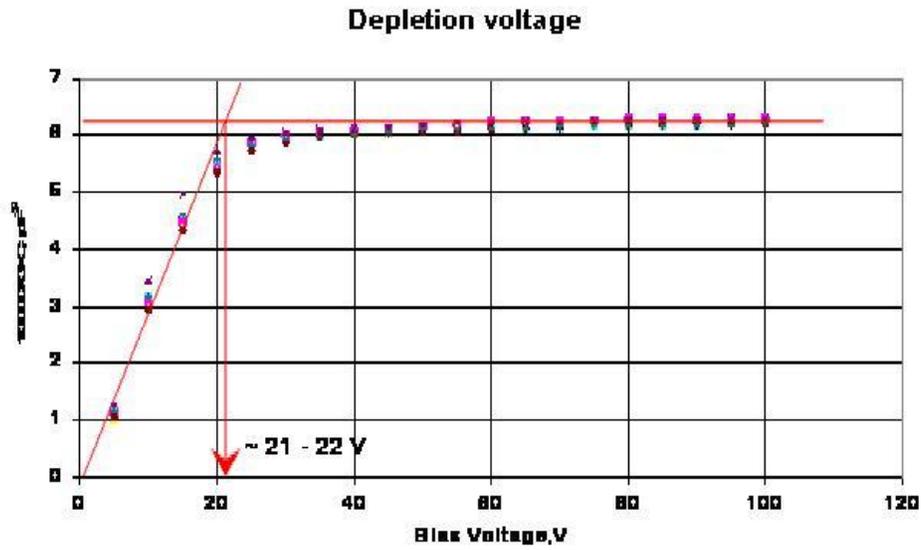


Рис. 2. Зависимость емкости обедненной области от напряжения.

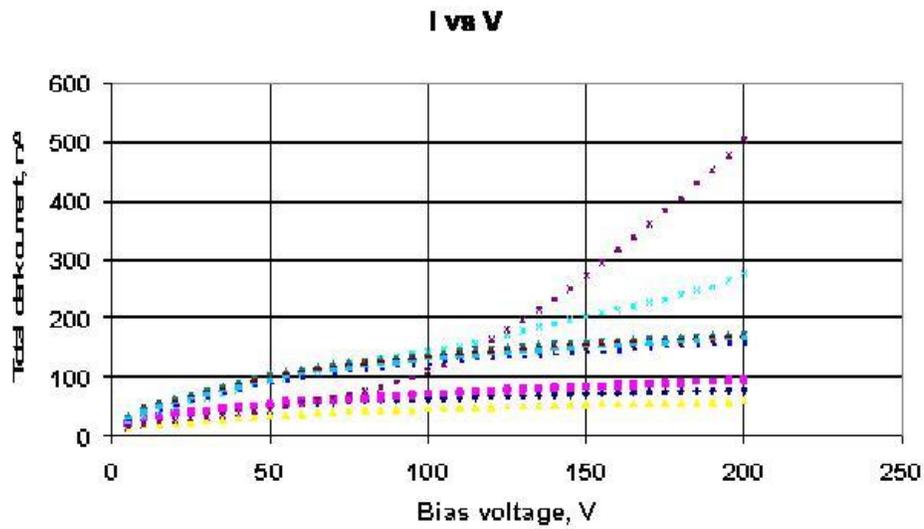


Рис. 3. Зависимость тока утечки от напряжения.

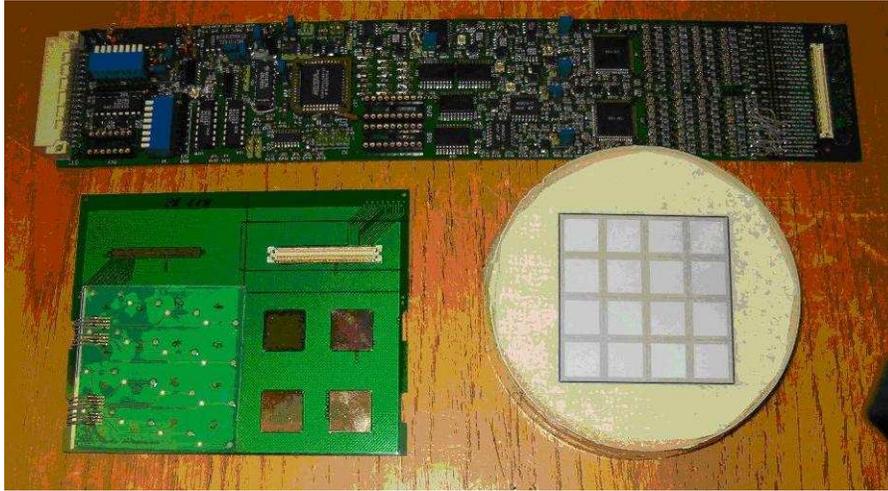


Рис. 4. Общий вид платы считывания, детекторной платы и детектора.

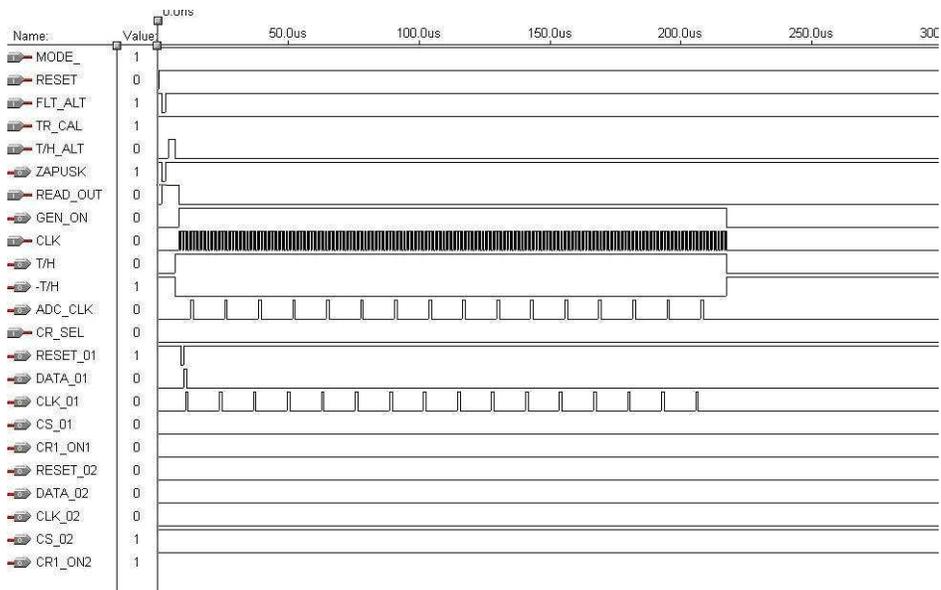


Рис. 5. Временная диаграмма режима работы CR—1.

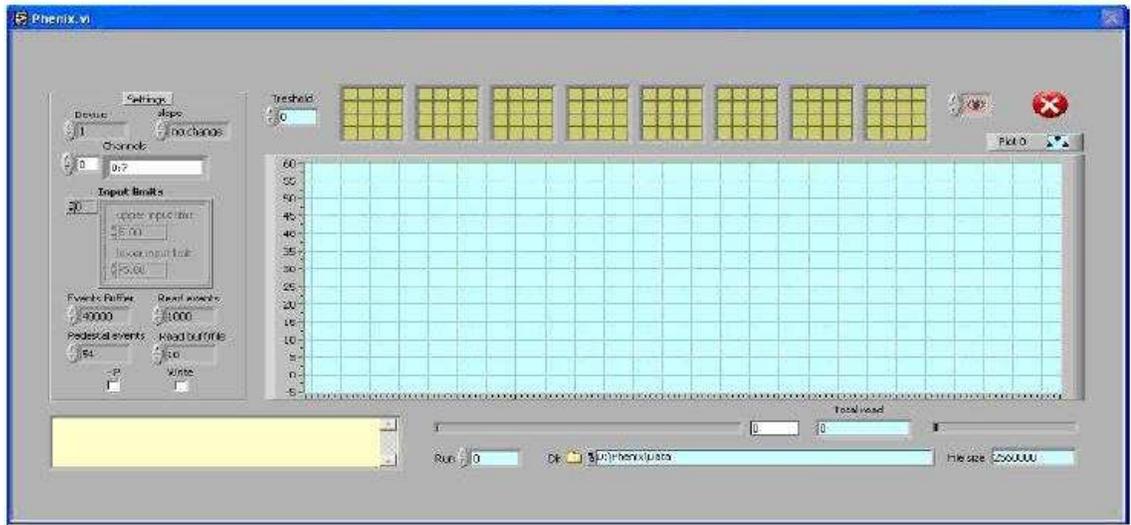


Рис. 6. Общий вид программы сбора данных для тестирования прототипа.



Рис. 7. Структура прототипа электромагнитного калориметра PHENIX.



Рис. 8. Общий вид детекторной платы (в правом верхнем углу показан разъем для тестирования).

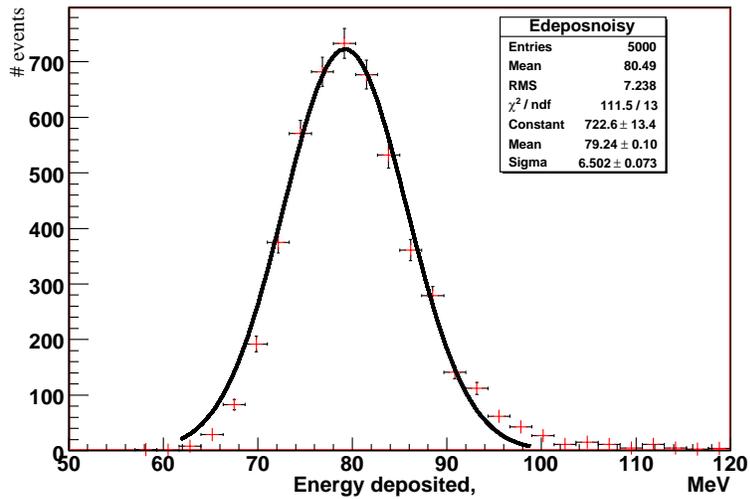


Рис. 9. Моделирование энергетического разрешения калориметра при энергии электронов 10 ГэВ.

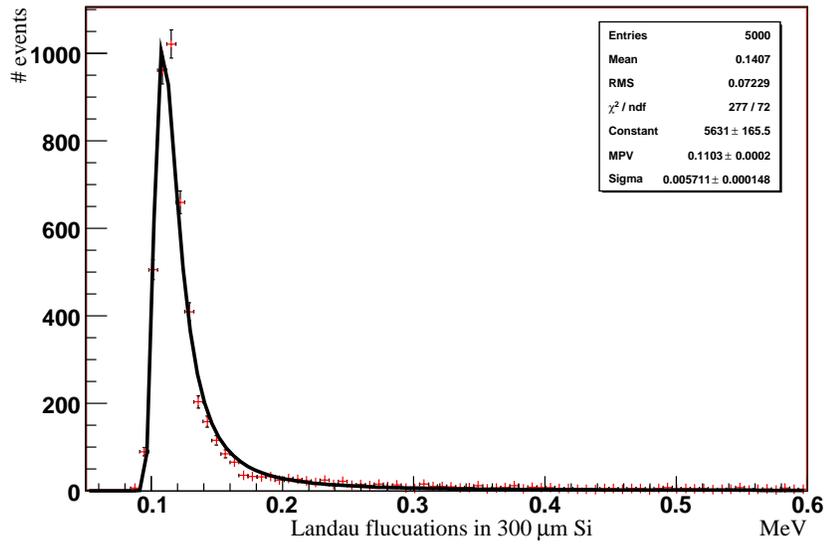


Рис. 10. Распределение ионизации слоя детектора 10 ГэВ электроном (моделирование).

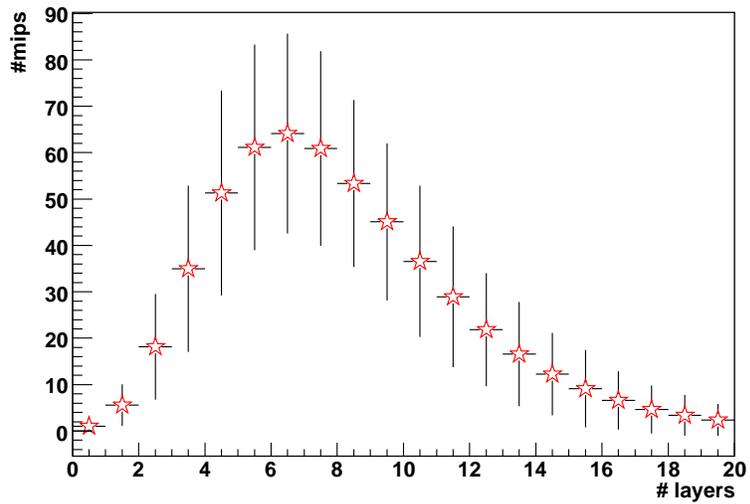


Рис. 11. Продольное развитие ливня (моделирование).

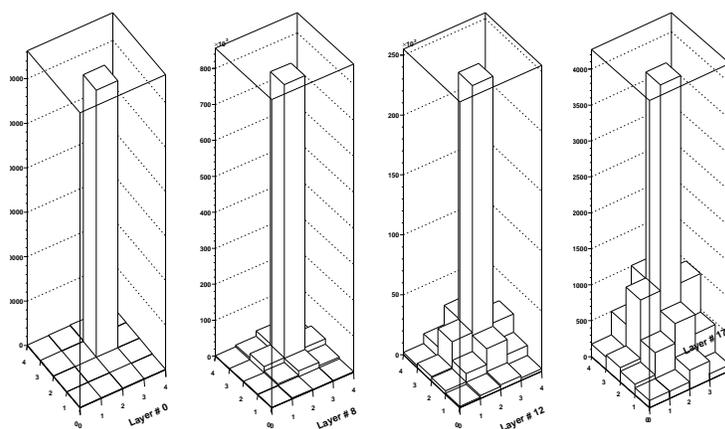


Рис. 12. Поперечное развитие ливня (моделирование).

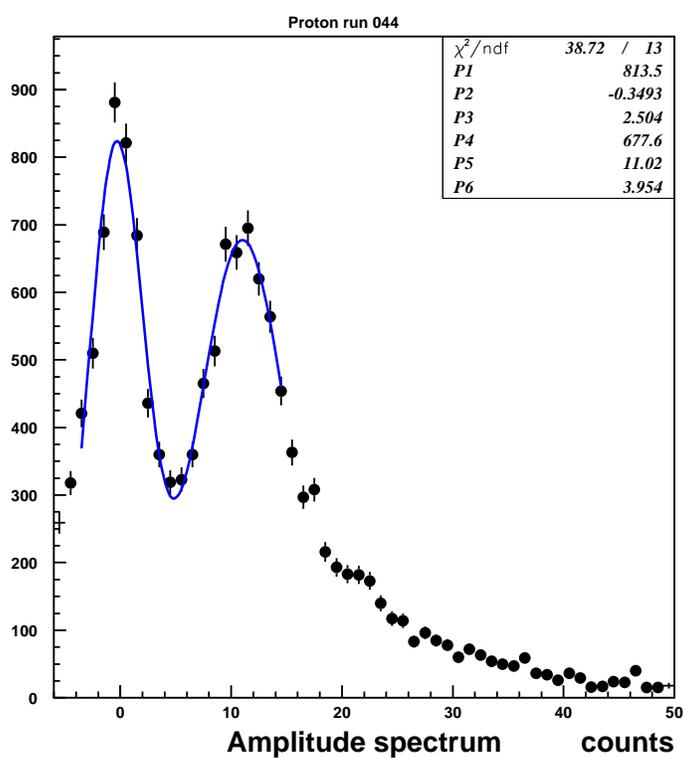


Рис. 13. Амплитудное распределение сигналов с пада. Левый пик соответствует шумам, правый - сигналу от минимально ионизирующей частицы - протона.

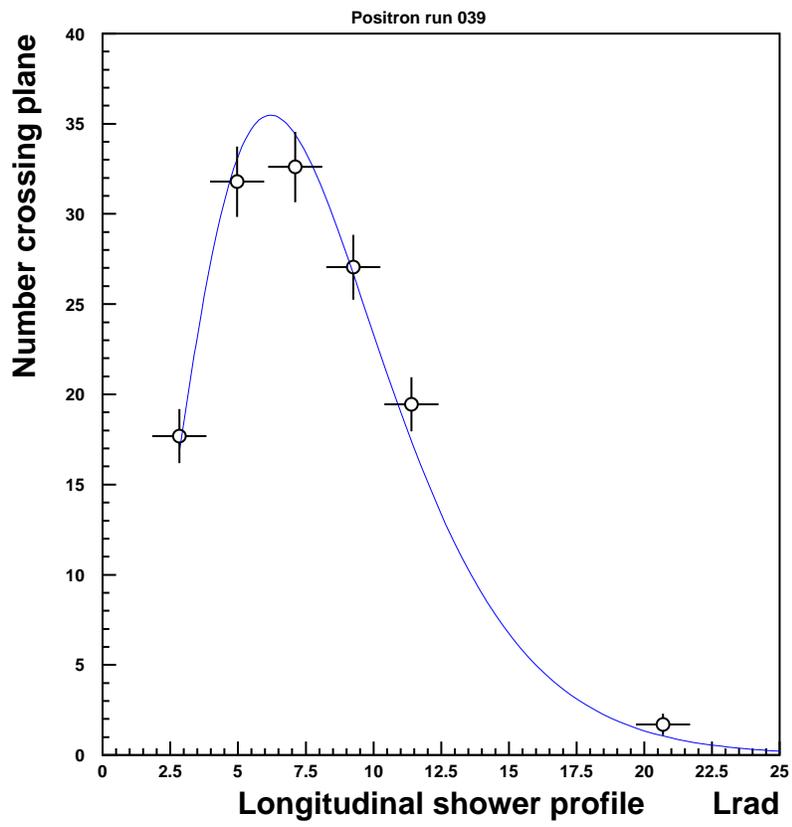


Рис. 14. Продольный профиль ливня.

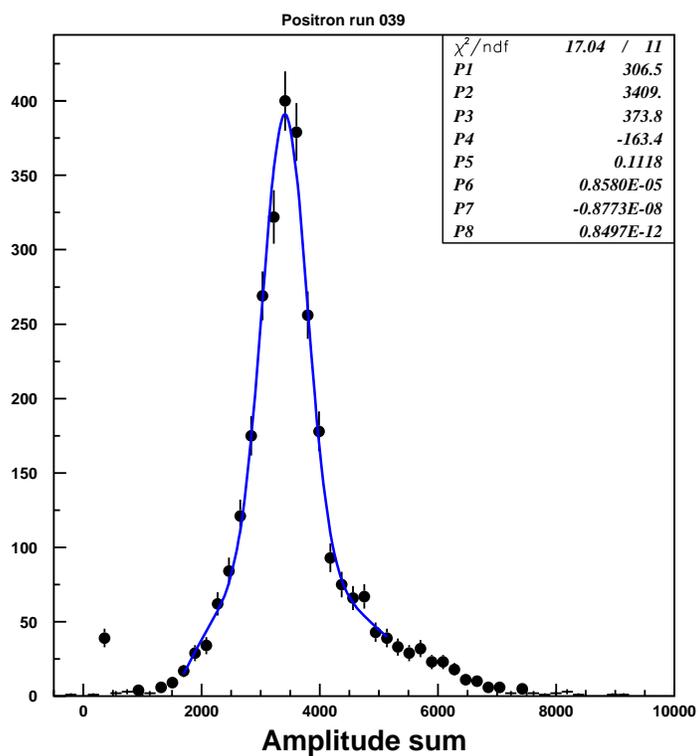


Рис. 15. Сумма амплитуд сигналов со всех плоскостей. Экспериментальные точки и фит G+P4.

Волков Владимир Юрьевич
Воронин Александр Геннадьевич
Ежов Виктор Бениаминович
Карманов Дмитрий Евгеньевич
Королев Михаил Григорьевич
Меркин Михаил Моисеевич
Феденко Андрей Юрьевич

**Испытания прототипа переднего конического
калориметра (NCC) эксперимента PHENIX (BNL)**

Препринт НИИЯФ МГУ 2007–9/830

Работа поступила в ОНТИ 01.10.2007