

На правах рукописи

Соловьянов Олег Владимирович

**Система калибровки и мониторинга  
сцинтилляционного адронного калориметра установки  
ATLAS радиоактивными источниками**

01.04.23 — физика высоких энергий

Автореферат  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата физико-математических наук

Протвино 2015

УДК 539.1.07

Работа выполнена в ФГБУ ГНЦ ИФВЭ НИЦ «Курчатовский институт» (г. Протвино).

Научный руководитель – к. ф.-м. н, ФГБУ ГНЦ ИФВЭ НИЦ «Курчатовский институт», Е.А. Старченко.

Официальные оппоненты: д. ф.-м. н, профессор, ФИАН, Н.Г. Полушина, к. ф.-м. н, ОИЯИ, Ю.П. Петухов.

Ведущая организация – Научно-исследовательский институт ядерной физики имени Д. В. Скобельцына Московского государственного университета имени М. В. Ломоносова (НИИЯФ МГУ, г. Москва).

Защита диссертации состоится “\_\_\_\_\_” \_\_\_\_\_ 2015 г. в \_\_\_\_\_ часов на заседании диссертационного совета Д 201.004.01 при ФГБУ ГНЦ ИФВЭ НИЦ «Курчатовский институт» по адресу: 142281, Московская область, г. Протвино, площадь Науки, дом 1.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте [http://www.ihep.ru/files/solovyanov\\_thesis.pdf](http://www.ihep.ru/files/solovyanov_thesis.pdf)  
ФГБУ ГНЦ ИФВЭ НИЦ «Курчатовский институт» .

Автореферат разослан “\_\_\_\_\_” \_\_\_\_\_ 2015 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета Д 201.004.01

Ю.Г. Рябов

## Общая характеристика работы

**Актуальность темы.** Современные эксперименты в физике высоких энергий предъявляют высокие требования к надежности производимых измерений и точности получаемых данных. Увеличение масштабов проведения экспериментов вместе с повышением используемых энергий, времён экспозиции, и усложнением вовлечённого оборудования, естественным образом, усиливает значение соответствующих калибровок детекторов, а всестороннее наблюдение (мониторирование) за их состоянием в процессе набора статистики, становится особенно важным.

**В диссертации** представлена система калибровки и мониторинга сцинтилляционного адронного калориметра установки ATLAS с помощью радиоактивных источников (Cs MonSys). Описана её структура, создание, практика использования, основные свойства и достигнутые результаты.

**Научная новизна.** Впервые создана система калибровки и мониторинга калориметра с помощью миниатюрных капсул с радиоактивными источниками перемещаемыми потоком жидкости по трубкам проложенным внутри рабочего объема детектора, накоплены и анализируются данные об изменении отклика калориметра в зависимости от времени и загрузки, вызванной увеличением светимости столкновений.

**Практическая значимость.** Результаты, изложенные в диссертации, используются для точной энергетической калибровки, выравнивания откликов ячеек адронного калориметра TileCal, последующего наблюдения и оперативной корректировки калибровочных коэффициентов в процессе набора статистики. Принципы и технические решения выработанные при создании Cs MonSys использованы

в аналогичной системе калибровки адронного калориметра эксперимента LHCb. Произведённые дополнительные методические исследования позволили уточнить оптические свойства нестандартных ячеек адронного калориметра и вспомогательных сцинтилляционных счетчиков установки ATLAS, используемых для триггера на физическое взаимодействие.

**Положения, выносимые на защиту:** Разработка и создание системы калибровки и мониторинга сцинтилляционного адронного калориметра с помощью радиоактивных источников перемещаемых потоком жидкости внутри рабочего объема калориметра. Создание программного обеспечения контроля и управления системой, сбора и обработки данных. Результаты методических исследований оптических свойств сцинтилляционных пластин стандартной и нестандартной конфигурации.

**Апробация работы.** Основные результаты диссертации докладывались на рабочих совещаниях сотрудничества ATLAS, на международных конференциях, публиковались в периодической литературе. Апробация диссертации прошла на семинаре отдела экспериментальной физики ИФВЭ 23 сентября 2015 г.

**Публикации.** Материалы диссертации опубликованы в 8-ми печатных работах [1-8], из них 3 статьи в рецензируемых журналах [1, 2, 3], и 3 статьи в сборниках трудов конференций CHEP2007 [4], CALOR2008 [5], INSTR14 [6].

**Личный вклад автора.** Содержание диссертации и основные положения, выносимые на защиту, отражают персональный вклад автора в создание системы и опубликованные работы. Подготовка к публикации полученных результатов проводилась совместно с соавторами. Все представленные в диссертации результаты получены лично автором или в соавторстве с другими членами эксперимента ATLAS.

**Структура и объем диссертации.** Диссертация состоит из введения, обзора литературы, четырех глав, заключения и библиографии. Общий объем диссертации — 126 страниц, из них 117 страниц текста, включая 77 рисунков и 6 таблиц. Библиография включает в себя 58 наименований на 6 страницах.

## Краткое содержание работы

**Во Введении** обоснована актуальность диссертационной работы, сформулирована цель и аргументирована научная новизна исследований, показана практическая значимость полученных результатов, представлены выносимые на защиту научные положения. Приводятся сведения об апробации работы, публикации, отражён личный вклад автора.

**В Обзоре литературы** описываются широко используемые методы калибровки калориметров, обсуждаются преимущества калибровки с помощью радиоактивных источников. Дается краткое описание подобных систем калибровок в различных установках, их основные параметры и полученные результаты.

Сформулированы требования к системе калибровки адронного калориметра установки ATLAS, среди них основные:

- Возможность контроля всей оптической системы всех ячеек модулей калориметра с точностью и повторяемостью не хуже 1 %;
- Обеспечение возможности распространения энергетической калибровки отдельных модулей на реальных частицах на все модули калориметра;
- Поддержание энергетической калибровки в течение длительного времени (годы);

**В первой главе** приводится краткое описание ускорителя LHC, экспериментальной установки ATLAS и её сцинтилляционного адронного калориметра TileCal, созданного по слоистой схеме с использованием стальных пластин в качестве поглотителя и пластин (tiles) из органического сцинтиллятора в качестве активного материала (рис. 1, 2).

TileCal состоит из одной центральной и двух боковых цилиндрических секций. Внутри адронного калориметра расположен криостат электромагнитного калориметра, поддерживаемый механической структурой TileCal.

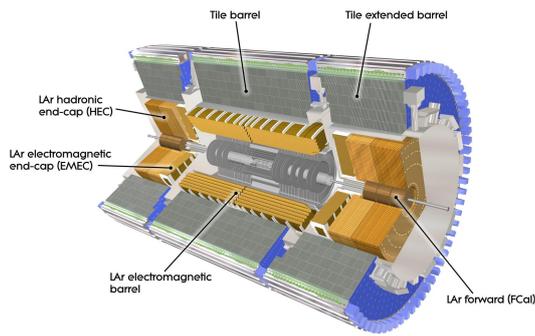


Рис. 1: Калориметры установки ATLAS

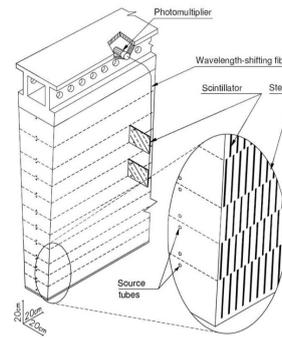


Рис. 2: Модуль калориметра TileCal

Рождённый в сцинтилляционных пластинах прохождением заряженных частиц свет собирается с обеих граней пучками спектро-сдвигающего (WLS) волокна, размещённого в непрозрачных пластиковых «профилях» на обеих сторонах каждого из 192-х модулей. Сгруппированные пучки волокна доставляют свет к фотоумножителям (ФЭУ), формируя ячеистую структуру каждого модуля калориметра как по радиусу, так и в продольном плане. Ячейки модуля просматривается двумя ФЭУ, что увеличивает надёжность и качество сбора света, улучшает физическую однородность калориметра. Общее число каналов адронного калориметра достигает 10 тысяч, а проектное энергетическое разрешение струй  $\Delta E/E = 50\%/\sqrt{E} \oplus 3\%$ .

Для калибровки адронного калориметра установки ATLAS используется ряд систем, позволяющих подавать тестовый сигнал на различных стадиях считывающей цепочки, такие как подача калибровочного заряда на АЦП, освещение лазером фотокатода ФЭУ. Однако, эти калибровочные системы, в силу своих особенностей, не могут контролировать сцинтиллятор и собирающее свет WLS волокно, тогда как система с перемещаемым в теле калориметра радиоактивным источником позволяет донести калибровочный сигнал ко всем тайлам калориметра и проследить весь путь прохождения света.

Во второй главе описывается система калибровки сцинтилляционного адронного калориметра установки ATLAS с помощью миниатюрных источников  $^{137}\text{Cs}$  перемещаемых по трубкам в теле калориметра потоком жидкости. Схематически принцип работы системы показан на рисунке 3. Поток гамма квантов с энергией 0,662 МэВ от  $^{137}\text{Cs}$  источника рождает в сцинтиляторе и окружающем поглотителе электроны производящие свет, доставляемый через спектросмещающие (WLS) волокна к ФЭУ. Картина взаимодействия источника и калориметра позволяет разрешить как отклик отдельной пластины, так и восстановить усреднённые характеристики всей ячейки по среднему току ФЭУ. Период полураспада изотопа  $^{137}\text{Cs}$  в 30,2 лет достаточно большой для обеспечения работы системы в течении всего планируемого времени работы установки ATLAS.

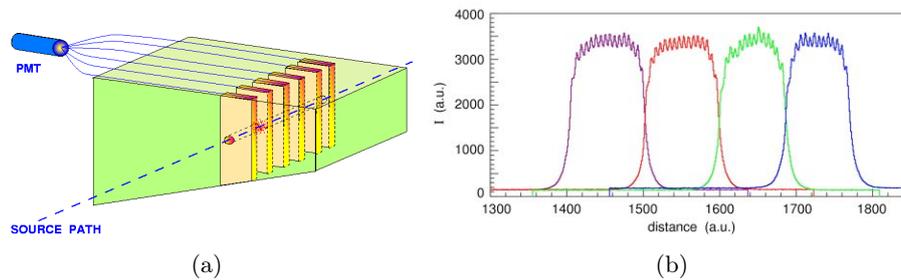


Рис. 3: Принцип работы калибровочной системы  $^{137}\text{Cs}$  (а); пример отклика ФЭУ четырёх соседних ячеек на  $^{137}\text{Cs}$  источник в зависимости от его положения (б)

Системы калибровки для трёх секций калориметра являются функционально независимыми и обладают идентичной архитектурой. На рисунке 4 представлена схема работы гидравлической части системы одной из секций, состоящей в основном из следующих объектов:

- Последовательности калибровочных трубок для прохождения источника сквозь все ячейки секции вместе с устройствами хранения источника в нерабочем состоянии («гаражи»);

- Эта последовательность разбита тройниками на несколько сегментов (контуров) разделяющих её на подсекции в 4–8 модулей. Тройники соединяют общий объём калибровочных трубок с подводящими трубками, в то же время, отделяя ту его часть, где происходит перемещение источника от внешнего объёма;
- Подводящие трубки служат для подачи потока жидкости в тройники, создавая тем самым движущую силу перемещающую капсулу с источником внутри текущего контура;
- Насосное и распределительное устройства (гидропривод), создающие необходимое давление в тройниках и поток жидкости в текущем контуре в желательном направлении;
- Ёмкости для хранения жидкости между заполнениями системного объёма;

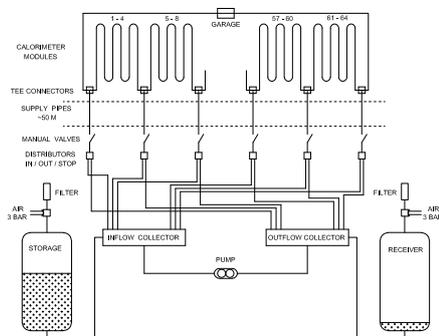


Рис. 4: Схема гидравлической части системы

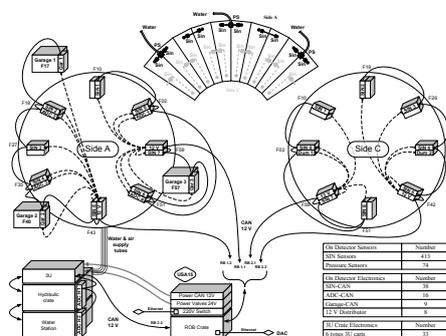


Рис. 5: Схема управляющего и контрольного оборудования

Основными принципами организации контроля и управления мониторирующей системой калориметра являются:

- Полная независимость всех трёх подсистем калибровки в сочетании с функциональной идентичностью и максимальной унификацией, как используемого оборудования, так и математического обеспечения;
- Широко разветвлённая сеть датчиков и сенсоров, отражающая

всю полноту картины состояния каждой подсистемы, как в активном, так и в пассивном состоянии;

- Возможность контроля и управления при адекватном информационном сопровождении, как в ручном, так и автоматическом режиме, при прямом доступе и внешнем управлении;
- Автоматизация подготовки, проведения и завершения калибровки с соблюдением всех технических требований, прежде всего безопасности и обработкой возможных «нештатных» ситуаций;
- Экспресс проверка качества получаемых данных, дающая возможность повторить калибровку проблемных модулей или сегментов;

Датчики процесса перемещения источников, контроля давления и их управляющие модули расположены как на детекторе, так и в стойках оборудования, модули связаны с компьютером по шине CANbus (см. рис. 5).

Для того, чтобы справиться с размером системы, многообразием и сложностью ее компонентов, был разработан набор тестов электроники цезиевой калибровочной системы с помощью программной платформы диагностики и верификации ATLAS DVS.

Архитектура всего on-line математического обеспечения калибровочной системы схематично представлена на рисунке 6 и состоит из многоуровневого набора распределенных контрольных процессов [4] использующих информационный сервис (IS) ATLAS как средство коммуникации.

Для задания логики поведения программы в стандартных и нестандартных ситуациях написан набор команд-инструкций («скриптов»), а для оперативного управления используется графический интерфейс. Все процедуры скана выполняются автоматически в соответствии с заранее составленным планом движения источника. Подготовка к цезиевому скану занимает несколько часов, сам скан проводится во всех трёх системах независимо и занимает от 6 до 8 часов.

Данные, полученные в результате проведения калибровочного сеанса, представляют собой параллельную развёртку во времени откликов всех ФЭУ модуля, синхронизированную с положением источ-

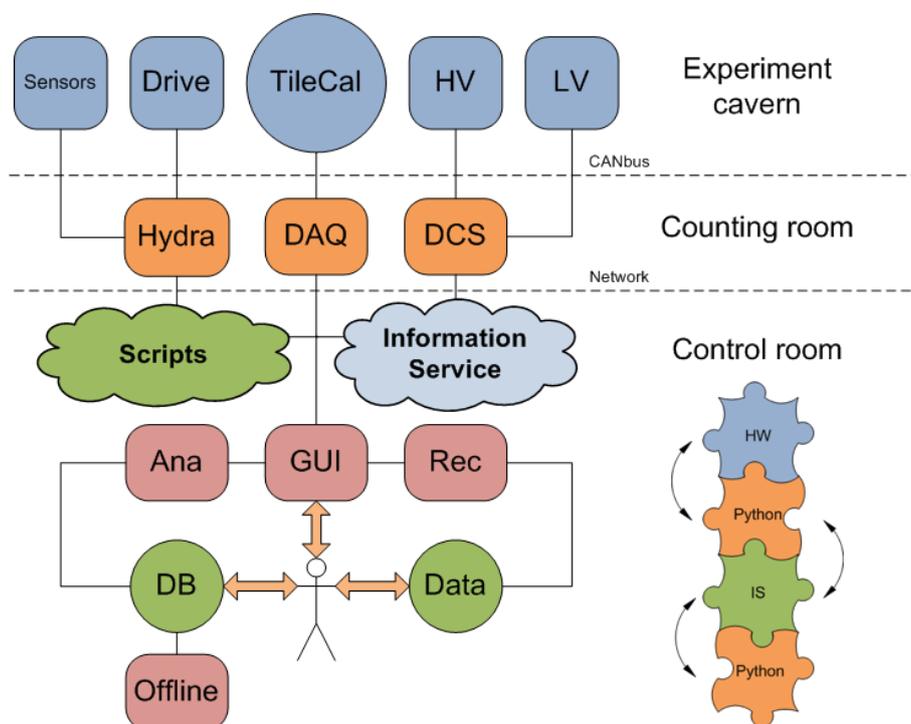


Рис. 6: Организация и взаимодействие распределенных многоуровневых on-line процессов [4]. На первом уровне находятся детектор, система перемещения и датчики. На втором уровне — процессы чтения данных и управления. На третьем — обработка и визуализация. Для обмена информацией используется связка из оборудования, объектов языка Python и их представления в распределенной информационной системе IS. В процессах используется встроенный интерпретатор языка Python для описания конфигурации и логики поведения

ника в ячейках калориметра. При обработке калибровочных данных используются два дополняющих подхода к определению «истинного» отклика ряда пластин: «интегральный» и «амплитудный». «Интегральный» метод использует первичную временную шкалу перемещения источника, и средняя амплитуда отклика по ряду пластин определяется как частное от деления суммы всех амплитуд на временную разность. «Амплитудный» метод применим в физической системе координат модуля и основан на подгонке результирующего распределения к сумме пиков откликов индивидуальных пластин. Оба подхода дают сравнимые в пределах статистических погрешностей результаты и служат в качестве дополняющих друг друга методов оценки отклика ячеек.

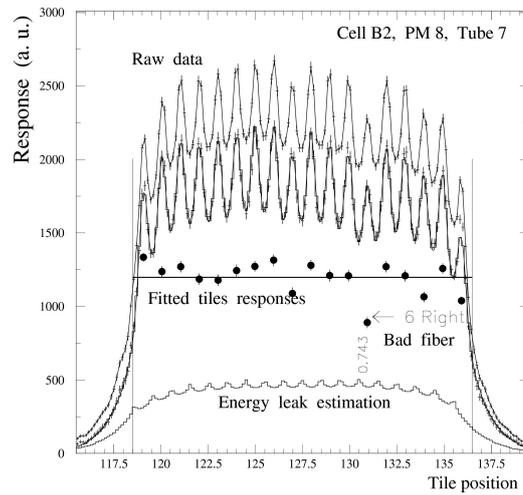
**В третьей главе** приводятся основные результаты, полученные с помощью калибровочной системы, представленной во второй главе.

В процессе производства модули калориметра оснащались оптической системой [1], что включало в себя установку тайлов, спектросмещающих волокон, сегментацию ячеек через сборку волокон в пучки, а также обеспечение соответствующего оптического контакта с фотоумножителем. Затем все модули сертифицировались с помощью прототипа цезиевой калибровочной системы. Основной целью такого контроля было установление надлежащего качества всего оптического тракта тайл→волокно→фотоумножитель и проверка правильной сегментации ячеек калориметра. Это помогло заметно улучшить качество работ и достичь приемлемой (менее чем 10 %) однородности модулей калориметра. Рисунок 7 показывает пример тестируемого модуля центральной секции калориметра и картину анализа ряда тайлов ячейки, на которой хорошо виден дефектный участок, по причине плохого контакта спектросмещающего волокна с тайлом.

Примерно каждый восьмой из всех модулей калориметра проходил через калибровку пучками реальных частиц [2], с одновременной межмодульной калибровкой одним и тем же цезиевым источником. Был получен калибровочный коэффициент электромагнитной шкалы калориметра, соединяющий собранный свет (заряд) с поглощенной энергией, равный  $1,050 \pm 0,003$  пКл/ГэВ [7]. По данным мониторинга модулей, было обнаружено кратковременное ухудшение чув-



(a)



(b)

Рис. 7: Только что оснащенный модуль центральной секции калориметра в тестовой зоне CERN, проверяемый цезиевым источником (а). Хорошо видны калибровочные трубки и датчики прохода капсулы. Пример плохого контакта тайла со спектросмещающим волокном в виде провала в отклике (б). Все отклонения, отличающиеся от среднего более чем на 25 % подлежали исправлению

ствительности фотокатода ФЭУ, вызванное накопленным зарядом (поглощённым светом). Это позволило скорректировать конструкцию и улучшить характеристики ФЭУ.

Ещё одним из важных применений системы калибровки является выравнивание (эквализация) отклика калориметра путем настройки высокого напряжения фотоумножителей для достижения однородного отклика ячеек. За 2–3 итерации процесса расчёта и внесения поправок на значения высокого напряжения фотоумножителей по откликам на цезиевый источник достигается хорошая однородность всего калориметра [3].

Анализ отклика калориметра показывает общую зависимость от времени, при этом в начале периода работы ускорителя, в отсутствие пучков высокой интенсивности, отклик снижается в соответствии с кривой распада цезиевого изотопа, тогда как далее возникают флуктуации и увеличивается разброс величин откликов. Эти флуктуации, будучи относительно небольшими вначале, становятся существенно больше со временем и с увеличением интенсивности столкновений. Это диктует необходимость регулярного (раз в месяц) сканирования калориметра источниками и его калибровки другими системами, во время набора статистики, для учёта всех возможным изменений чувствительности калориметра к реальным событиям. Так вместе с изменением отклика сцинтиллятора, могут изменяться и характеристики фотоумножителей, регистрируемые лазерной системой. Совместный анализ результатов цезиевой и лазерной калибровок позволяет «отделить» одно от другого и связать результаты во времени и в энергетической шкале (рис. 8).

Кроме того, для изучения естественного старения модулей калориметра без воздействия пучка, для проведения методических работ по тематике цезиевой системы, для испытания новых компонентов и электроники, в CERN была создана тестовая лаборатория, где раз в неделю проводятся цезиевые сканы «запасных» модулей.

**В четвёртой главе** дается описание и результаты дополнительных методических исследований проведённых в процессе создания и эксплуатации системы.

В системе используется пять радиоактивных источников, кото-

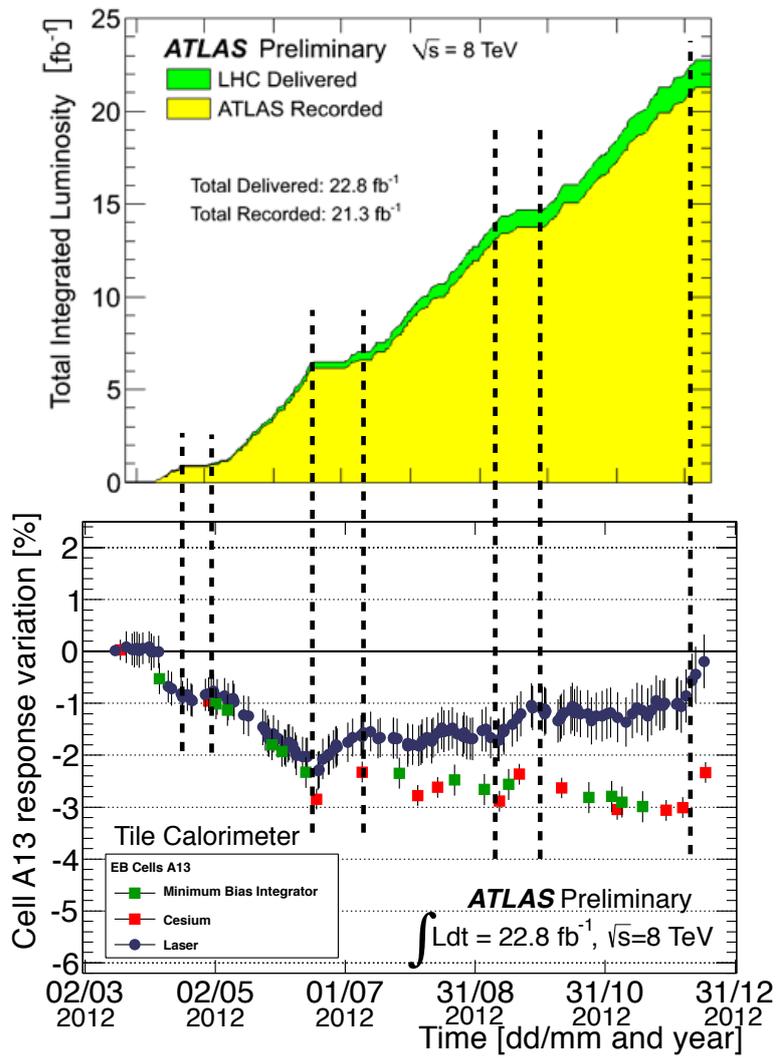


Рис. 8: Зависимость отклика внутренних ячеек A13 адронного калориметра TileCal на калибровочные системы во времени [6]

рые были изготовлены в разное время двумя производителями. Для подтверждения и уточнения информации о качестве источников, полученной от производителей, был произведён сравнительный спектрометрический анализ. Энергетические спектры всех источников были измерены на специальном стенде (рис. 9).

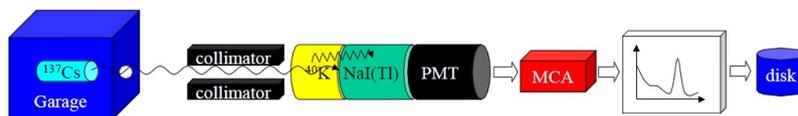


Рис. 9: Схема спектрометрического стенда

Фотоэлектронные пики от  $^{137}\text{Cs}$  на 0,662 МэВ и от  $^{40}\text{K}$  на 1,460 МэВ аппроксимировались функцией Гаусса, а положения пиков использовались для вычисления коэффициента перехода от номера канала АЦП к энергетической шкале. Нормализованный спектр для источника 3712RP и фоновый спектр показаны вместе на рисунке 10а, а на рисунке 10б показан спектр от этого же источника за вычетом фона. Из этого рисунка видно, что кроме  $^{137}\text{Cs}$  и  $^{40}\text{K}$ , в диапазоне 0,5-1,8 МэВ на уровне  $10^{-3}$  отсутствуют указания на присутствие других изотопов.

Другое методическое исследование ставило своей целью изучение оптических характеристик нестандартных модулей калориметра. Обладая внешне симметричной цилиндрической формой, TileCal имеет вырезы для размещения поддержки криостатов электромагнитного калориметра. В обеих боковых секциях калориметра имеется по шесть специальных модулей. Эти 12 модулей содержат 22 нестандартных ячейки с нестандартными («обрезанными») тайлами.

Для сравнения оптических свойств обрезанных тайлов или других специальных случаев со стандартными, с помощью  $\beta$ -источника  $^{90}\text{Sr}$  имитировался процесс взаимодействия реальных событий и цезиевого источника с тайлами. Анализ различий в детальной картине отклика от нескольких образцов, позволяет расширить калибровку стандартных ячеек на пучках частиц на нестандартные, используя

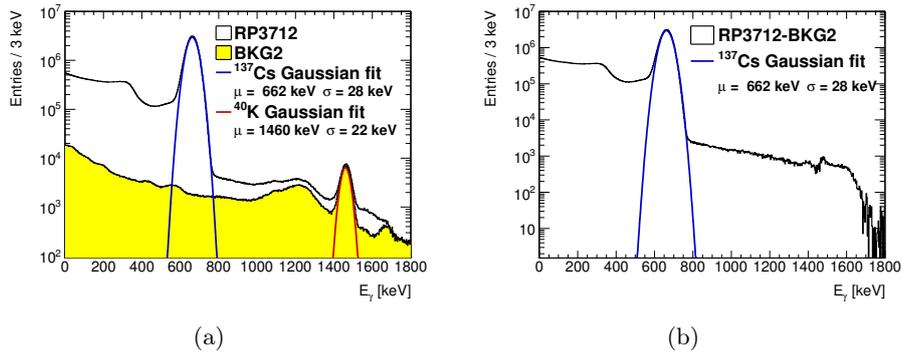


Рис. 10: Суммарный и фоновый спектры для  $^{137}\text{Cs}$  источника 3712RP нормализованные на амплитуду пика  $^{40}\text{K}$  (а) и суммарный спектр за вычетом фона (б)

данные от цезиевого источника в качестве опорной точки.

Сканирующий стенд состоит из светонепроницаемого бокса, в котором смонтированы стронциевый источник, позиционирующая механика, оптическая система, регистрирующая и контрольная электроника. Двух-координатная позиционирующая система, перемещает контейнер с коллимированным  $^{90}\text{Sr}$  источником. Свет, вызванный излучением источника, передаётся в ФЭУ. Все образцы испытываемых тайлов были отсканированы по всей своей поверхности  $^{90}\text{Sr}$  источником по X-Y координатной сетке с шагом 1x1 мм.

На рисунке 11 в качестве примера результатов скана приведен нормализованный отклик как функция положения источника по оси X, так называемая U-форма. Сбор света с обеих сторон тайла дает лучшую однородность, чем односторонний съём, а трапецевидная форма тайла приводит к систематическому превышению отклика у большого основания трапеции [8]. В центральной части тайла заметно также локальное увеличение отклика из-за дополнительного отражения света от двух отверстий в тайле.

Набор из трёх стандартных типоразмеров (1, 2, 3) тайлов по 4 образца каждого был просканирован  $^{90}\text{Sr}$  источником до и после об-

резания. Первые 3 образца каждого типоразмера подвергались обрезке, 4-й образец оставался контрольным. Сравнение полученных откликов использовалось для оценки эффекта обрезания на отклик и однородность. На рисунке 12 показаны неоднородности обрезанных тайлов для случая чтения с двух граней. Полученные отношения могут быть использованы для вычисления цезиевых калибровочных коэффициентов обрезанных ячеек во время эквализации калориметра.

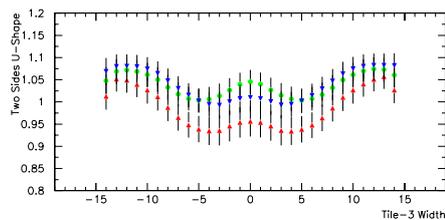


Рис. 11: Нормализованная зависимость световыхода тайла по оси X (U-форма) в случае сбора света с обеих граней. Разные маркеры соответствуют разным положениям по оси Y

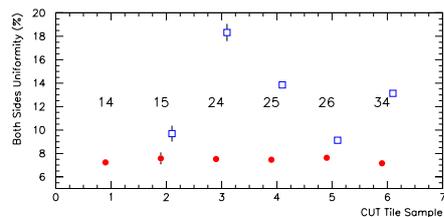


Рис. 12: Неоднородность для 6-ти типов обрезанных тайлов при чтении с обеих граней: квадратики — весь тайл, кружки — центральная область диаметром 5 см

Кроме ячеек сцинтиляционного адронного калориметра, фотомножители TileCal считывают сцинтиляционные счётчики, расположенные у криостата электромагнитного калориметра, а также триггерные сцинтиляционные счётчики (MBTS). Для второго сеанса набора статистики были установлены несколько новых счётчиков с сцинтилятором с улучшенными свойствами. Для предварительной относительной калибровки они были просканированы с помощью тестовой цезиевой системы, путем закрепления тестируемого счётчика сбоку от тестового модуля калориметра и сканирования модуля цезиевым источником, что позволило осуществить надлежащий контроль их качества.

В **Заключении** перечислены основные результаты диссертационной работы.

## Список литературы

- [1] Abdallah J.,..., **Solovyanov O.** et al. (ATLAS Tile Calorimeter) *The optical instrumentation of the ATLAS tile calorimeter* // JINST. 2013. Vol. 8. P. P01005.
- [2] Adragna P.,..., **Solovyanov O.** et al. (ATLAS Tile Calorimeter) *Testbeam studies of production modules of the ATLAS tile calorimeter* // Nucl.Instrum.Meth. 2009. Vol. A606. P. 362–394.
- [3] Aad G.,..., **Solovyanov O.** et al. (ATLAS Collaboration) *Readiness of the ATLAS Tile Calorimeter for LHC collisions* // Eur.Phys.J. 2010. Vol. C70. P. 1193–1236
- [4] **Solovyanov O.**, Solodkov A., Starchenko E., Karyukhin A., Isaev A. *ATLAS tile calorimeter cesium calibration control and analysis software* // J.Phys.Conf.Ser. 2008. Vol. 119. P. 022012.
- [5] **Solovyanov O.** *The ATLAS tile calorimeter: Commissioning and preparation for collisions* // J.Phys.Conf.Ser. 2009. Vol. 160. P. 012053.
- [6] **Solovyanov O.** *Performance of the ATLAS Tile Hadronic Calorimeter at LHC in Run 1 and planned upgrades* // JINST. 2014. Vol. 9, no. 10. P. C10006.
- [7] Anderson K., Batkova L., Cavalli-Sforza M., Carli T., Cascella M., Davidek T., Del Prete T., Djobava T., Dotti A., Febbraro R., Gollub N., Hakobyan H., Henriques A., Hurwitz M., Isaev A., Jen-La Plante I., Karyukhin A., Khandanyan H., Khramov J., Kulchitsky Y., Makouski M., Mosidze M., Myagkov A., Pilcher J., Pribyl L., Rullgard M., Santoni C., Shalanda N., Solodkov A., **Solovyanov O.**, Starchenko J., Stavina P., Simonyan M., Teuscher R., Tsiareshka P., Vichou E., Vinogradov V., Vivarelli I., Volpi M.,

Zenis T. *Calibration of ATLAS Tile Calorimeter at Electromagnetic Scale*: Tech. Rep. ATL-TILECAL-PUB-2009-001. Geneva: CERN, 2008.—Nov.

- [8] Errede S., Henriques A., Isaev A., Karyukhin A., Khandanyan H., Makouski M., Myagkov A., Shalanda N., Solodkov A., **Solovyanov O.**, Starchenko E., Vichou I. *The Effect of Tile Light Collection Reduction along Radius on the ATLAS Tile Calorimeter Uniformity*: Tech. Rep. ATL-TILECAL-PUB-2009-005. Geneva: CERN, 2008.—Nov.

*Рукопись поступила 20 октября 2015 года.*

Автореферат отпечатан с оригинала-макета, подготовленного автором.

О.В. Соловьянов

Система калибровки и мониторинга сцинтиляционного адронного калориметра установки ATLAS радиоактивными источниками.

Оригинал-макет подготовлен с помощью системы **Л<sup>A</sup>T<sub>E</sub>X**.

---

Подписано к печати 17.11.2015. Формат 60 × 84/16. Цифровая печать.  
Печ.л. 1,25. Уч.-изд.л. 1,8. Тираж 100. Заказ 19. Индекс 3649.

---

ФГБУ ГНЦ ИФВЭ НИЦ «Курчатовский институт»  
142281, Московская область, город Протвино, площадь Науки, дом 1

[www.ihep.ru](http://www.ihep.ru); библиотека <http://web.ihep.su/library/pubs/all-w.htm>

Индекс 3649

---

А В Т О Р Е Ф Е Р А Т  
ФГБУ ГНЦ ИФВЭ НИЦ "Курчатовский институт", 2015

---