

ОБЪЕДИНЕННЫЙ ИНСТИТУТ ЯДЕРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

10-2012-88

На правах рукописи

УДК 004.93'1, 519.237, 51-72

АКИШИНА

Татьяна Павловна

РАЗВИТИЕ МЕТОДОВ ИДЕНТИФИКАЦИИ ЭЛЕКТРОНОВ
ДЛЯ ДЕТЕКТОРА ПЕРЕХОДНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ
ЭКСПЕРИМЕНТА СВМ

Специальность: 05.13.18 — математическое моделирование,
численные методы и комплексы программ

Автореферат диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Дубна 2012

Работа выполнена в Лаборатории информационных технологий Объединенного института ядерных исследований.

Научный руководитель: доктор физико-математических наук
Иванов Виктор Владимирович,
Лаборатория информационных технологий ОИЯИ

Официальные оппоненты: доктор физико-математических наук,
доцент
Бедняков Вадим Александрович,
Лаборатория ядерных проблем ОИЯИ,
заместитель директора Лаборатории

доктор физико-математических наук,
профессор
Крянев Александр Витальевич,
Национальный исследовательский
ядерный университет “МИФИ”,
профессор

Ведущая организация: Российский университет дружбы народов.

Защита состоится “ _____ ” _____ 2012 г. в “ _____ ” на заседании диссертационного совета Д 720.001.04 при Объединенном институте ядерных исследований (Лаборатория информационных технологий) по адресу: 141980, г. Дубна, Московская область, ул. Жолио-Кюри, 6.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ОИЯИ.

Автореферат разослан “ _____ ” _____ 2012 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета,
доктор физико-математических наук,
профессор

Иванченко И.М.

Общая характеристика диссертации

В настоящей работе развиты новые математические модели и методы, предназначенные для надежной идентификации электронов, регистрируемых детектором переходного излучения эксперимента CBM в условиях интенсивного фона от пионов.

Актуальность работы

Экспериментальная установка CBM (Compressed Baryonic Matter), создаваемая в GSI (Дармштад, Германия) на ускорительном комплексе антипротонов и тяжелых ионов FAIR (Facility for Antiproton and Ion Research), нацелена на изучение свойств сильносжатой барионной материи, образующейся в ядро-ядерных соударениях при энергии пучка $8\div 45$ ГэВ/нуклон [1, 2].

Измерения чармония (J/ψ , ψ') и короткоживущих векторных мезонов (ρ , ω , ϕ) относятся к ключевым задачам эксперимента CBM. Для их регистрации по диэлектронному каналу распада необходимо надежно идентифицировать электроны/позитроны, в условиях доминирующего фона от пионов. Наиболее подходящим детектором для решения указанной задачи является многослойный детектор переходного излучения TRD (Transition Radiation Detector).

Этот детектор должен обеспечить надежную идентификацию электронов, высокий уровень подавления пионов, восстановление траекторий проходящих через него заряженных частиц в условиях интенсивных потоков (10^7 соударений в секунду) и высокой множественности вторичных частиц (от 100 до 1000 частиц от одного ядро-ядерного соударения). Требуемое подавление пионов, используя только TRD, должно быть не менее $100\div 150$, пространственное разрешение около $200\div 300$ мкм. Чтобы решить указанные задачи, необходимы адекватные математические модели и методы для режекции интенсивного пионного фона и надежной идентификации электронов.

Цель работы

Целью настоящей работы является развитие новых математических моделей и методов для изучения характерных особенностей регистрации электронов и режекции пионов с помощью детектора переходного излучения и их применение в решении конкретных физических задач в рамках эксперимента CBM.

Научная новизна

1. На основе непараметрического критерия согласия ω_n^k развит новый метод для идентификации частиц с помощью детектора TRD.
2. Предложено преобразование потерь энергии заряженных частиц, регистрируемых TRD, к эффективной переменной, обеспечившей высокий уровень мощности критерия идентификации электронов и пионов на основе искусственной нейронной сети (ИНС).
3. Найдены эффективные и удобные аппроксимации статистических распределений полных потерь энергии пионов и электронов в модуле TRD.
4. Указанные аппроксимации потерь энергии частиц обеспечили высокий уровень мощности идентификации частиц с помощью метода отношения функций правдоподобия (МОФП).

5. Развита методика разбиения полных потерь энергии электронов в модуле TRD на ионизационные потери и потери на переходное излучение.

Практическая ценность

Развитые в работе математические модели и методы позволили исследовать характерные особенности регистрации электронов и пионов в детекторе TRD и оценить возможности по его оптимизации.

На основе ИНС, МОФП, критерия ω_n^k построены методы, обеспечивающие высокий уровень подавления пионов и надежную идентификацию электронов. Указанные методы реализованы в виде алгоритмов, которые включены в программное обеспечение эксперимента CBM.

Разработана методика выделения из полных потерь энергии электронов в модуле TRD потерь энергии на ионизацию и на переходное излучение.

Апробация диссертации

Основные положения и результаты работы докладывались и обсуждались на научных семинарах ЛИТ ОИЯИ, Российского университета дружбы народов, научной сессии национального исследовательского ядерного университета "МИФИ" и на различных международных конференциях и совещаниях:

- VIII CBM Collaboration Meeting, Sept. 19 - 22, 2006, IPHC Strasbourg, France.
- IX CBM Collaboration Meeting, February 28 - March 2, 2007, GSI, Darmstadt, Germany.
- XXI International Symposium on Nuclear Electronics & Computing (NEC'2007), Varna, Bulgaria, September 10-17, 2007.
- X CBM Collaboration Meeting, September 26 - 28, 2007, Dresden, Germany.
- XI CBM Collaboration Meeting, February 26 - 29, 2008, GSI, Darmstadt, Germany.
- XII CBM Collaboration Meeting, October 13 - 18, 2008, JINR, Dubna, Russia.
- XIII CBM Collaboration Meeting, March 10 - 13, 2009, GSI, Darmstadt, Germany.
- Int. Conference MMCP'2009, July 7 - 12, 2009, JINR, Dubna, Russia.
- XXII International Symposium on Nuclear Electronics & Computing (NEC'2009), Varna, Bulgaria, September 7-14, 2009.
- XIV CBM Collaboration Meeting, October 5 - 11, 2009, Split, Croatia.
- XVI CBM Collaboration Meeting, 27 September - 10 October, 2010, Mamaia, Romania.
- Int. Conference MMCP'2011, July 4 - 8, 2011, Stará Lesná, Slovakia.

Публикации

В основу диссертации положены 23 работы, опубликованные в течение 2006-2012 гг., включая 5 в журналах из перечня ВАК:

- Particles & Nuclear, Letters [PNL-2008], [PNL-2009], [PNL-2012],
- Вестник РУДН, серия "Математика. Информатика. Физика" [RUDN-2010-1], [RUDN-2010-2],

материалах международных конференций ([NEC-2007], [NEC-2007-1], [CM11-26Feb-2008-2], [CM13-10Mar-2009-2], [MMCP-7Jul-2009-1], [NEC-2009-2], [MMCP-2011]), а также в виде препринтов и сообщений ОИЯИ ([JINR-2007-1], [JINR-2007-2], [LIT-SR-2007-1], [LIT-SR-2007-2], [LIT-SR-2007-4], [JINR-2009], [LIT-SR-2009-1], [JINR-E10-2010-73]) и ГСИ ([CBM-PR-2006-1], [CBM-PR-2007-2], [CBM-PR-2008-2]).

Структура и объем диссертации

Диссертация содержит введение, 5 глав, заключение, список литературы (127 ссылок) и имеет объем 111 страниц.

Содержание работы

Во **Введении** обсуждаются основные принципы работы детекторов переходного излучения, приводится краткий обзор экспериментов, в которых они уже используются, либо планируется их использование, формулируется исследуемая научная проблема, дается обзор имеющихся к настоящему времени методов, которые могут быть применены для ее решения. Приводится краткое изложение содержания диссертации по главам, а также список решений и полученных результатов, выносимых на защиту.

В **Главе 1** рассмотрена экспериментальная установка CBM, ее основные элементы и обсуждаются задачи, на решение которых нацелена ее физическая программа.

Набор детекторов и элементов установки CBM должен обеспечить: идентификацию электронов, при условии подавления пионов на уровне 10^5 (используя RICH и TRD), идентификацию адронов в большом акцептансе, восстановление импульсов частиц с точностью $\sim 1\%$, реконструкцию первичных и вторичных вершин с точностью ~ 30 мкм, высокое пространственное разрешение координатных детекторов, малое мертвое время, быстрый ответ и высокую скорость считывания информации с детекторов, высокую скорость триггера и системы сбора данных, устойчивость детекторов и электроники к радиационным условиям, устойчивость к дельта-электронам и т.д.

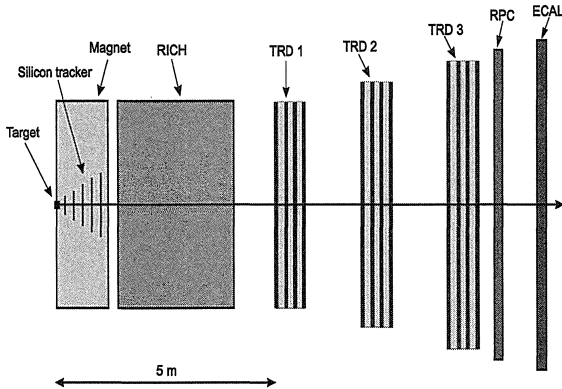


Рис. 1: Схема эксперимента CBM

На рис. 1 представлена схема экспериментальной установки CBM. Внутри дипольного магнита расположена мишень и координатная трековая система STS

(Silicon Tracking System), содержащая 7 плоскостей из пиксельных и стриповых детекторов. STS совместно с дипольным магнитом используется для восстановления траекторий заряженных частиц и определения их импульсов. Черенковский детектор RICH (Ring Imaging Cherenkov) и детектор переходного излучения TRD должны обеспечить надежную регистрацию электронов с импульсом выше 1 ГэВ/с. Детектор измерения времени пролета TOF (Time-of-flight), построенный на основе резистивных плоских камер RPC (Resistive Plate Chambers), предназначен для идентификации адронов высокой энергии. Электромагнитный калориметр ECAL (Electromagnetic Calorimeter) используется для идентификации электронов и фотонов.

Глава 2 посвящена изучению распределения потерь энергии электронов в детекторе TRD. Использовалась выбранная в качестве стандартной версия TRD, состоящая из трех станций (TRD1, TRD2 и TRD3), расположенных на расстоянии 5 м, 7.25 м, 9.5 м от мишени по направлению пучка, соответственно (см. рис. 1). Каждая станция содержит четыре идентичных модуля. На рис. 2 представлена схема прототипа модуля TRD, разработанного совместно группами из ГСИ (Дармштадт) и ИЯИ (Бухарест).

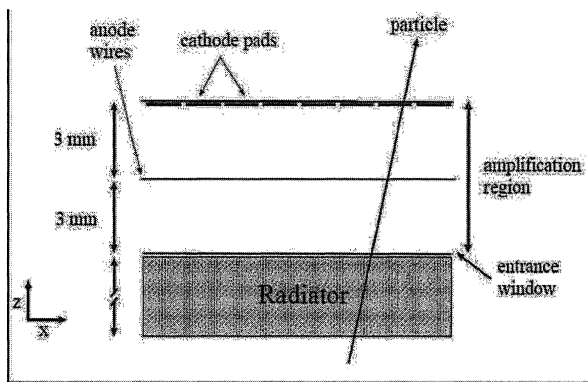


Рис. 2: Структура модуля детектора переходного излучения

Модуль включает в себя:

- слоистый радиатор, состоящий из $N=220$ чередующихся слоев полипропиленовой пленки толщиной $D_f=25$ мкм и воздушных промежутков $D_g=250$ мкм, для генерации переходного излучения от высокоэнергичных электронов/позитронов;
- многопроволочную пропорциональную камеру (МПК), используемую для регистрации потерь энергии заряженных частиц (ионизация и переходное излучение) и для фиксации координат места их пересечения плоскости МПК.

На рис. 3 приведены распределения потерь энергии на ионизацию (слева) и на переходное излучение (справа) в одном модуле TRD, полученные с помощью Монте-Карло (МК) моделирования в среде CBM ROOT для электронов с $p=1,5$ ГэВ/с. Распределение ионизационных потерь электронов достаточно хорошо ап-

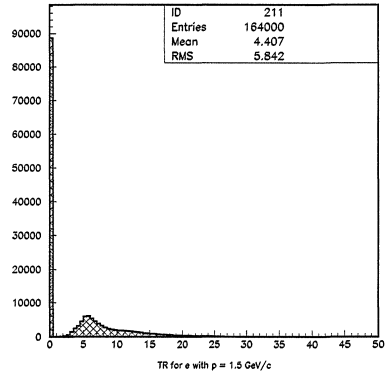
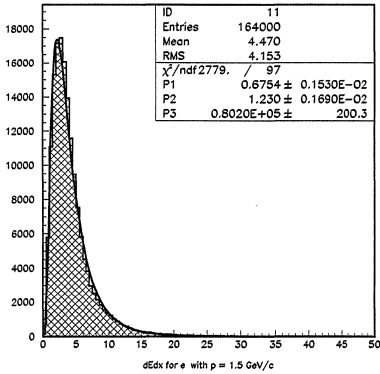


Рис. 3: Распределение потерь энергии электронов: на ионизацию и его аппроксимация логнормальной функцией (1) (слева), на переходное излучение (справа)

проксимируется логнормальной функцией:

$$f_1(x) = \frac{A}{\sqrt{2\pi\sigma x}} \exp^{-\frac{1}{2\sigma^2}(\ln x - \mu)^2}, \quad (1)$$

где σ – это дисперсия, μ – среднее значение, а A – коэффициент нормировки.

Левый пик на рис. 3 (справа) отвечает событиям с переходным излучением TR (Transition Radiation), равным нулю; можно видеть, что доля таких событий составляет примерно половину всей статистики.

На рис. 4 (слева) приведено распределение полных потерь энергии электронов для МК моделирования ($p=1,5$ ГэВ/с). Оно с хорошей точностью аппроксимиру-

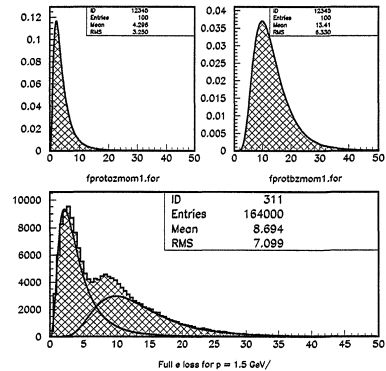
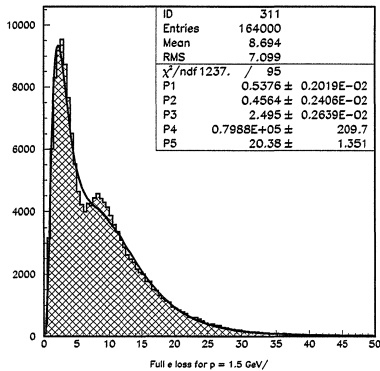


Рис. 4: Слева: распределение полных потерь энергии электронов и его аппроксимация формулой (2) с фиксированными параметрами σ_1 и μ_1 (слева). Справа: вклады ионизационных потерь (верхний график, слева) и переходного излучения (верхний график, справа); суммарное распределение

ется взвешенной суммой двух логнормальных распределений:

$$f_2(x) = B \left(\frac{a}{\sqrt{2\pi}\sigma_1 x} \exp^{-\frac{1}{2\sigma_1^2}(\ln x - \mu_1)^2} + \frac{b}{\sqrt{2\pi}\sigma_2 x} \exp^{-\frac{1}{2\sigma_2^2}(\ln x - \mu_2)^2} \right) + c, \quad (2)$$

где σ_1 и σ_2 – дисперсии, μ_1 и μ_2 – средние значения, a и $b = 1 - a$ – вклады первого и второго логнормальных распределений, соответственно, c – параметр сдвига, а B – коэффициент нормировки.

Экспериментально хорошо изучены ионизационные потери заряженных частиц в веществе. Потери на переходное излучение имеют более сложный характер. Чтобы извлечь вклад переходного излучения из полных потерь энергии электронов, была выполнена следующая процедура. Параметры σ и μ , отвечающие за ионизационные потери, определялись из фитирования распределения dE/dx (см. рис. 3, слева) функцией (1) и подставлялись в формулу (2): $\sigma_1 = \sigma$, $\mu_1 = \mu$.

На рис. 4 (слева) приведено распределение полных потерь энергии электронов для МК моделирования ($p = 1,5$ ГэВ/с) и его аппроксимация взвешенной суммой двух логнормальных распределений с фиксированными параметрами σ_1 и μ_1 . Такая аппроксимация полных потерь энергии электронов позволяет выделить индивидуальные вклады потерь энергии электронов на ионизацию и на переходное излучение (рис. 4, справа).

Аналогичная процедура была применена к реальным измерениям, полученным при облучении однослойного прототипа TRD электронами и пионами с импульсом $p = 1,5$ ГэВ/с: ГСИ, февраль 2006 г. Параметры σ_1 и μ_1 брались из аппроксимации ионизационных потерь электронов с импульсом $p = 1,5$ ГэВ/с для МК моделирования. Было установлено, что в области $p = 1,5$ ГэВ/с статистические характеристики TR распределения (среднее и дисперсия), а также его вклад в полные потери энергии электронов для реальных измерений и МК моделирования различаются. Для того, чтобы привести модельные данные в соответствие с реальными измерениями, в процедуру моделирования потерь энергии электронов была внесена соответствующая корректировка.

В **Главе 3** рассмотрены традиционные статистические методы, используемые для идентификации электронов и пионов, регистрируемых n -слойным TRD (в стандартной версии TRD число модулей $n=12$): а) метод усреднения и б) метод отношения функций правдоподобия. Задача идентификации заряженных частиц (в рассматриваемом нами случае – электронов и пионов) с помощью детектора TRD состоит в следующем: имея в своем распоряжении набор из n измерений потерь энергии частицы, зарегистрированной TRD, нужно определить, к какому из распределений потерь энергии (электронов или пионов) они относятся.

Для разработки и исследования рассматриваемых в диссертации математических методов и оценки их эффективности (мощности) использовались два набора данных:

1. модельные данные, сгенерированные с помощью пакета GEANT3 в среде CBM ROOT,
2. реальные измерения, полученные с помощью однослойного прототипа TRD на пучках заряженных частиц в ГСИ в 2006 году.

В первом случае с помощью пакета GEANT3 [3] в среде CBM ROOT [4, 5] моделировалось прохождение через n -слойный TRD пионов и электронов с импульсами от 1 ГэВ/с до 13 ГэВ/с.

В втором случае мы имеем измерения потерь энергии электронов и пионов только с одного модуля прототипа TRD. Для того, чтобы подготовить выборку из n “измерений”, отвечающих прохождению частиц через n -слойный TRD, использовалась подпрограмма HISRAN [6] из библиотеки CERNLIB для генерирования случайных величин в соответствии с распределениями потерь энергии пионов и электронов в одном модуле TRD.

В методе усреднения (МУ) процедура идентификации частиц основана на величине средней потери энергии анализируемой частицы

$$\overline{\Delta E} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \Delta E_i,$$

где ΔE_i – потеря энергии частицы в i -ом слое TRD, а n – число слоев в детекторе TRD.

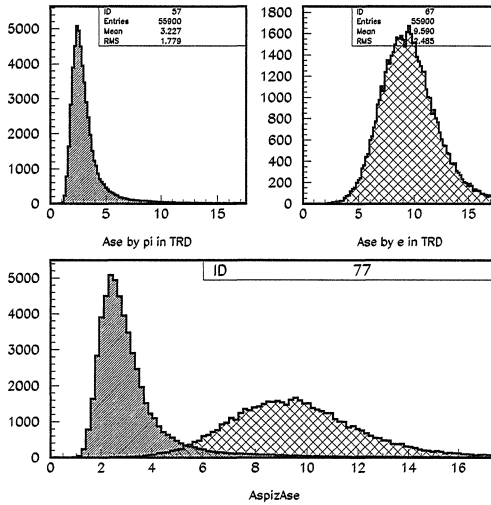


Рис. 5: Распределения переменной $\overline{\Delta E}$ для электронов и пионов с $p = 1,5$ ГэВ/с

На рис. 5 представлены распределения переменной $\overline{\Delta E}$ для пионов (верхнее распределение, слева) и электронов (верхнее распределение, справа) с импульсом $p = 1,5$ ГэВ/с, а также суммарное распределение для электронов и пионов (нижнее распределение).

При применении к указанной задаче метода отношения функций правдоподобия (МОФП) [7] для каждой анализируемой частицы вычисляется величина

$$L = \frac{P_e}{P_\pi + P_e}, \quad P_e = \prod_{i=1}^n p_e(\Delta E_i), \quad P_\pi = \prod_{i=1}^n p_\pi(\Delta E_i), \quad (3)$$

где $p_\pi(\Delta E_i)$ – это величина функции плотности p_π для случая, когда потеря энергии пионом в i -ом поглотителе равняется ΔE_i , а $p_e(\Delta E_i)$ – это аналогичная величина для электрона.

В интересующей нас области энергий основные потери заряженных пионов в модуле TRD – это потери на ионизацию. Распределение ионизационных потерь пионов также, как и ионизационные потери электронов, достаточно хорошо аппроксимируется функцией плотности логнормального распределения (1), а распределение полных потерь энергии электронов – взвешенной суммой двух логнормальных распределений (2). Эти функции использовались нами в качестве функций плотности для пионов (p_π) и электронов (p_e).

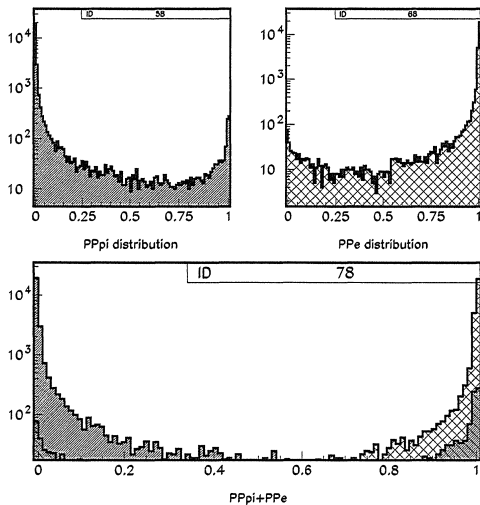


Рис. 6: Распределения переменной L для электронов и пионов с $p=1,5$ ГэВ/с

На рис. 6 представлены распределения переменной L для пионов (левая гистограмма, сверху) и электронов (правая гистограмма, сверху) с импульсом $p = 1,5$ ГэВ/с, а также суммарное распределение для электронов и пионов (нижняя гистограмма).

В таблице 1 приведены результаты обработки данных, отвечающих МК моделированию для n -слойного TRD и для прототипа TRD. Несмотря на удовлетвори-

Таблица 1: Фактор режекции пионов при 90% эффективности регистрации электронов для методов МУ и МОФП

Статистический метод	МУ	МОФП
GEANT3 – n -слойный TRD	17	1443
Прототип TRD	169	9316
GEANT3 – один модуль TRD	181	6987

тельное соответствие реальных измерений данным МК моделирования, факторы режекции пионов для n -слойного TRD и для прототипа TRD существенно различаются для обоих статистических методов.

Чтобы воспроизвести процедуру подготовки выборок для реальных данных с помощью МК моделирования, выборки потерь энергии электронов и пионов для

n -слойного TRD генерировались используя распределения (гистограммы), полученные с помощью GEANT3 в одном из модулей TRD. Эти результаты удовлетворительно согласуются с тем, что было получено для прототипа TRD.

В Главе 4 рассмотрен метод идентификации частиц на основе непараметрического критерия согласия ω_n^k . Этот критерий основан на сравнении функции распределения $F(x)$, отвечающей наперед заданной гипотезе (гипотеза H_0) с эмпирической функцией распределения $S_n(x)$:

$$S_n(x) = \begin{cases} 0, & \text{если } x < x_1; \\ i/n, & \text{если } x_i \leq x \leq x_{i+1}, \quad i = 1, \dots, n-1. \\ 1, & \text{если } x_n \leq x, \end{cases} \quad (4)$$

Здесь $x_1 \leq x_2 \leq \dots \leq x_n$ – упорядоченная выборка (*вариационный ряд*) объема n , построенная на основе наблюдаемых величин переменной x .

Статистика ω_n^k измеряет “расстояние” между $F(x)$ и $S_n(x)$. Такие статистики известны, как *непараметрические*. В работах [8]–[10] был развит класс новых непараметрических статистик (с $k \geq 3$):

$$\omega_n^k = -\frac{n^{\frac{k}{2}}}{k+1} \sum_{i=1}^n \left\{ \left[\frac{i-1}{n} - F(x_i) \right]^{k+1} - \left[\frac{i}{n} - F(x_i) \right]^{k+1} \right\}. \quad (5)$$

Критерии согласия, построенные на основе таких статистик, обычно используются для проверки соответствия отдельных эмпирических выборок распределениям, известным *априори*.

Потери энергии для пионов имеют характер распределения Ландау [11]. Мы использовали это распределение в качестве нулевой гипотезы H_0 для преобразования набора исходных измерений, отвечающего прохождению через TRD отдельной частицы, к набору новой переменной λ [9]:

$$\lambda_i = \frac{\Delta E_i - \Delta E_{mp}^i}{\xi_i} - 0.225, \quad i = 1, 2, \dots, n, \quad (6)$$

ΔE_i – потеря энергии в i -м поглотителе, ΔE_{mp}^i – величина наиболее вероятной потери энергии, $\xi_i = \frac{1}{4.02}$ FWHM (Full-Width at Half-Maximum) распределения потерь энергии пионами. Для определения величин ΔE_{mp}^i и FWHM распределение потерь энергии пионов в i -м TRD модуле аппроксимировалось функцией (1).

Полученные таким образом λ_i , $i = 1, \dots, n$ упорядочивались в порядке возрастания их величин (λ_j , $j = 1, \dots, n$) и использовались для вычисления ω_n^k :

$$\omega_n^k = -\frac{n^{\frac{k}{2}}}{k+1} \sum_{j=1}^n \left\{ \left[\frac{j-1}{n} - \phi(\lambda_j) \right]^{k+1} - \left[\frac{j}{n} - \phi(\lambda_j) \right]^{k+1} \right\}. \quad (7)$$

Здесь значения функции распределения Ландау $\phi(\lambda)$ вычислялись с помощью функции DSTLAN [12] из библиотеки CERNLIB.

На рис. 7 представлены распределения величин ω_{12}^6 для пионов (верхняя гистограмма, слева) и электронов (верхняя гистограмма, справа) с импульсом $p = 1, 5$ ГэВ/с, а также суммарное распределение для электронов и пионов (нижняя гистограмма).

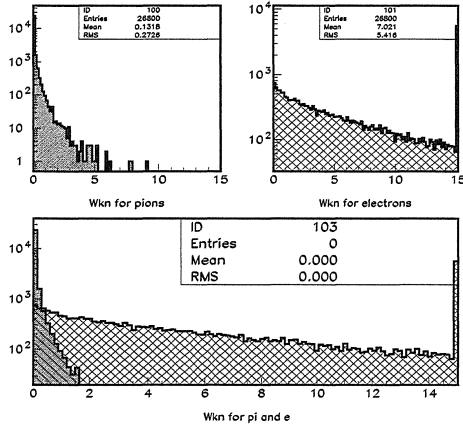


Рис. 7: Распределения величин ω_{12}^6 для пионов и электронов с $p = 1, 5$ ГэВ/с

Комбинированный метод

Эта схема основана на последовательном применении двух статистических критериев: 1) метода усреднения и 2) критерия ω_n^k .

Основная ее идея состоит в следующем:

- используя метод усреднения, в допустимую область отбирается основная часть электронов, включая небольшую примесь пионов;
- к событиям, отобранным в допустимой области, применяется критерий ω_n^k ; при этом, с потерей небольшой части электронов, из допустимой области удаляются попавшие туда пионы.

Модифицированный критерий ω_m^k

На рис. 8 показана вероятность реализации событий с разным числом модулей, в которых зарегистрировано переходное излучение, в 12-слойном TRD. Из этого распределения видно, что наиболее вероятная величина числа TR-отсчетов составляет 6, и то, что мы практически не имеем событий с не равными нулю TR-отсчетами во всех 12 модулях.

Заметим, что когда электрон пересекает i -й модуль с $TR=0$, то его энергетические потери следуют распределению ионизационных потерь dE/dx (рис. 3, слева). В этом случае, практически невозможно отличить электроны от пионов на основе их потерь энергии. В противном случае, когда $TR \neq 0$, потери электрона в i -м модуле равны сумме потерь $dE/dx + TR$. И только в таком случае можно по потерям энергии отличить электроны от пионов.

Когда подсчитывается величина ω_n^k с помощью формулы (7), используется выборка величин λ_i (см. равенство (6)), которые упорядочены в зависимости от величины. Величина λ_i прямо пропорциональна потере энергии частицей, зарегистрированной в i -м модуле TRD. В этой связи, и, принимая во внимание тот факт, что наиболее вероятная величина отсчетов TR в 12-слойном TRD равняется 6 (рис. 8), мы можем использовать при вычислении статистики ω_n^k только ту

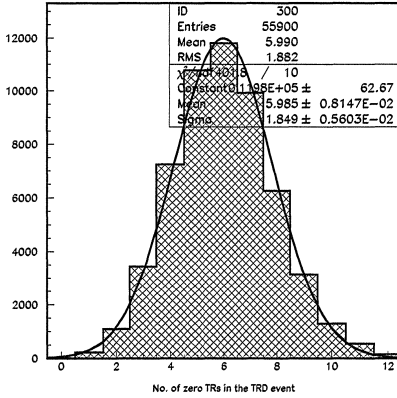


Рис. 8: Распределение событий в зависимости от числа TR-отчетов в 12-слойном TRD и его аппроксимация распределением Гаусса

часть выборки $\{\lambda_i\}$, которая отвечает индексам $i > 6$, т.е. только большим потерям энергии.

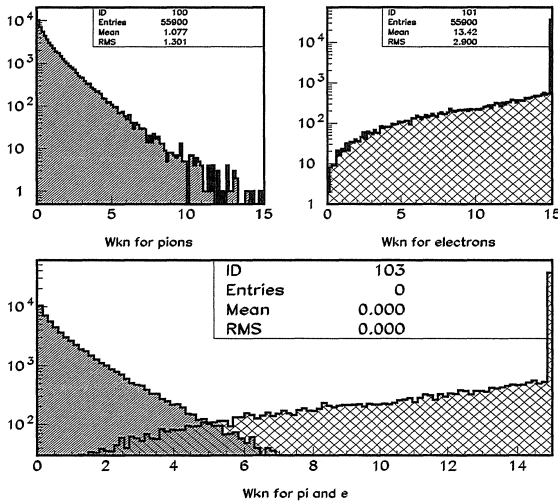


Рис. 9: Распределения величин ω_m^k для пионов (верхняя гистограмма, слева) и электронов (верхняя гистограмма, справа); суммарное распределение для пионов и электронов (нижняя гистограмма)

На рис. 9 представлены распределения величин ω_m^k для пионов (верхняя гистограмма, слева) и электронов (верхняя гистограмма, справа) с импульсом $p = 1, 5$ ГэВ/с, а также суммарное распределение для электронов и пионов (нижняя гистограмма): $i = 7, m = n - i + 1, n = 12, k = 6$.

В Главе 5 рассмотрен метод идентификации частиц на основе искусственной нейронной сети – многослойного перцептрона (МСП). МСП – удобный инструмент

для построения многомерных классификаторов, хотя процедура его обучения и эффективность распознавания критически зависят от выбора входных данных. В работе использовались МСП из двух пакетов: JETNET [13] и ROOT [14, 15].

Если в качестве входных данных для сети использовать выборки, составленные из потерь энергии электронов и пионов в модулях TRD, то обучение МСП проходит очень медленно, имеют место большие колебания (относительно тренда) в эффективности распознавания частиц сетью: смотри поведение нижней кривой на рисунках 10.

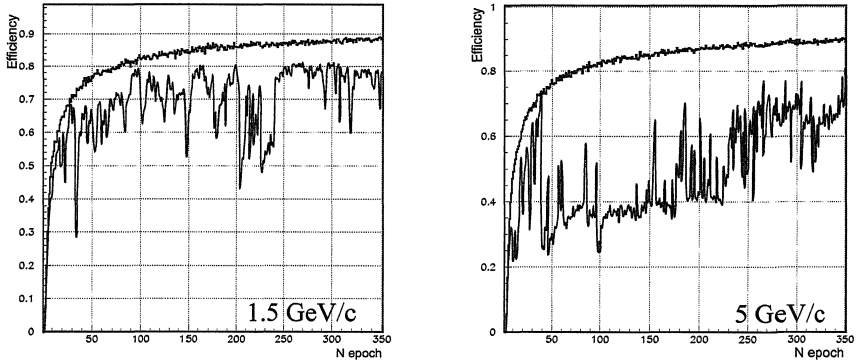


Рис. 10: Эффективность идентификации электронов/пионов при обучении МСП для исходных (нижняя кривая) и преобразованных (верхняя кривая) данных для $p = 1,5$ ГэВ/с (слева) и $p = 5$ ГэВ/с (справа)

В этой связи, к исходным данным была применена процедура преобразования к новой переменной $\phi(\lambda)$, используемой для вычисления статистики ω_n^k : см. равенство (7).

Переход к новой переменной позволил получить надежный уровень идентификации электронов/пионов сетью уже после минимального количества эпох обучения. При этом практически отсутствуют колебания относительно тренда. Более того, быстро достигается высокий уровень подавления пионов при минимальной потере электронов: смотри верхние кривые на рисунках 10.

На рис. 11 показаны распределения значений сигнала на выходе нейронной сети, полученные на стадии обучения (верхняя гистограмма, слева) и тестирования (нижняя гистограмма, слева); правые гистограммы показывают распределения ошибок на стадии обучения (верхняя гистограмма) и тестирования (нижняя гистограмма) для $p = 1,5$ ГэВ/с.

Следует отметить, что в случае использования исходных данных, несмотря на большое количество эпох обучения, так не удастся достичь приемлемого уровня распознавания частиц: смотри нижние кривые на рисунках 10.

В **Заключении** приводится анализ полученных результатов и формулируются выводы.

В таблице 2 приведены уровни режекции пионов для данных, полученных путем МК моделирования помощью GEANT3 для $p=1,5$ ГэВ/с: α – доля терямых электронов (взята равной 10%), β – доля пионов, идентифицированных как электроны (в %); фактор режекции пионов равен $100/\beta$.

В таблице 3 приведены уровни режекции для рассмотренных методов в случае, когда подготовка анализируемых выборок базируется на распределении по-

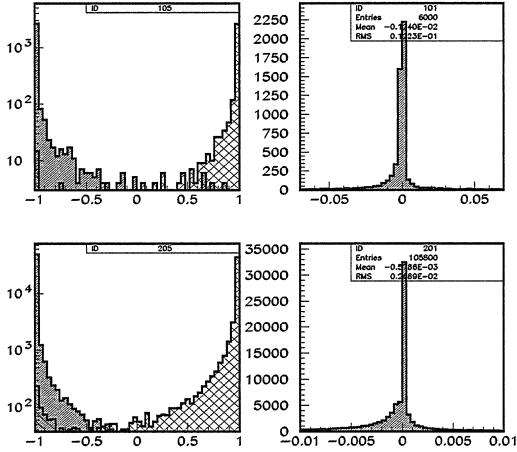


Рис. 11: Распределения значений сигнала на выходе нейронной сети, полученные на стадии обучения (верхняя гистограмма, слева) и тестирования (нижняя гистограмма, слева); правые гистограммы показывают распределения ошибок на стадии обучения (верхняя гистограмма) и тестирования (нижняя гистограмма) МСП для $p = 1,5$ ГэВ/с

Таблица 2: Уровни режекции пионов для рассмотренных методов: GEANT3 моделирование n -слоеного TRD

Метод	β , %	режекция π
МУ	5.9088	17
ω_n^k	0.9016	111
МУ + ω_n^k	0.3005	332
модиф. ω_n^k	0.2272	440
МОФП	0.0698	1443
ROOT	0.1115	896
JETNET	0.0718	1392

терь энергии в одном модуле TRD, и их сопоставление с результатами таблицы 2.

Из сравнения таблиц 2 и 3 можно сделать вывод о том, что искусственный прием генерирования n -мерных выборок, отвечающих регистрации частиц с помощью n -слоеного TRD, на основе измерений с одного модуля TRD (в нашем случае, это измерения, полученные с помощью прототипа), приводит к значительному завышению (от 2 до 10 раз) фактора режекции пионов.

В таблице 4 приведены факторы режекции пионов (для 10 % уровня потери электронов) для рассмотренных методов в зависимости от импульса.

Результаты, приведенные в таблице 4, можно просуммировать следующим образом:

1. Метод усреднения и критерий согласия ω_n^k не обеспечивают необходимого уровня режекции пионов ($\sim 100 \div 150$). Для критерия ω_n^k основная причина, вероятно, обусловлена тем, что потери энергии электронов не отвечают простой гипотезе, а имеют сложный характер.

Таблица 3: Сравнение рассмотренных методов: моделирование выборок на основе одного модуля TRD

Метод	β , %	режекция π	коэфф. превышения
МУ	0.5903	169	9.9
ω_n^k	0.4651	215	3.7
МУ + ω_n^k	0.0805	1242	1.9
модиф. ω_n^k	0.0644	1552	3.5
МОФП	0.0107	9316	6.5
ROOT	0.0179	5290	5.9
JETNET	0.0215	4408	3.1

Таблица 4: Сравнение рассмотренных методов: факторы режекции пионов в зависимости от импульса

p , ГэВ/с	1	2	3	4	5	7	9	11
МУ	15	17	17	16	16	16	16	16
ω_n^k	104	96	73	55	44	35	29	25
МУ + ω_n^k	284	271	249	242	203	198	157	159
мод. ω_n^k	296	621	628	776	650	745	588	537
МОФП	1273	1315	1581	1480	936	861	800	749
ROOT	1219	1400	1112	1446	730	456	610	882
JETNET	1857	1837	1378	1713	1446	1317	1045	1089

2. Простые с практической точки зрения критерии (составной критерий МУ + ω_n^k и модифицированный критерий ω_m^k) позволяют получить достаточно высокий уровень режекции пионов.
3. Максимального уровня подавления пионов можно добиться используя: а) метод отношения функций правдоподобия и б) искусственную нейронную сеть.

При этом, в случае МОФП, потери энергии пионов и электронов аппроксимируются, соответственно, логнормальным распределением и взвешенной суммой двух логнормальных распределений, а для МСП потери энергии частиц предварительно необходимо преобразовать к предложенной нами новой переменной, типичной для критерия ω_n^k .

Для корректного применения методов, позволяющих достичь максимального уровня режекции пионов (МОФП и метод на основе МСП) необходимо иметь в своем распоряжении адекватную информацию о распределениях потерь энергии как пионов, так и электронов. Распределение ионизационных потерь пионов в веществе хорошо изучено, им отвечает простая гипотеза, которая с хорошей точностью аппроксимируется распределением Ландау и логнормальным законом. Потери энергии электронов в модуле TRD носят сложный характер, им отвечает сложная гипотеза, что не позволяет гарантировать корректность результатов, получаемых с помощью указанных методов.

Метод, основанный на модификации критерия согласия ω_n^k , приближаясь по мощности к МОФП и методу на основе МСП, не имеет отмеченного недостатка, т.к. для его применения необходимо знание только параметров распределения ионизационных потерь пионов. При этом мощность данного критерия значительно превосходит требования эксперимента СВМ [2]. Учитывая очень простую программную реализацию соответствующего алгоритма, его можно будет, в частности,

использовать для отбора J/ψ мезонов в реальном времени эксперимента СВМ.

На защиту выносятся следующие результаты:

1. Комплекс математических методов и моделей для детектора переходного излучения эксперимента СВМ, обеспечивших высокий уровень подавления пионов и надежную идентификацию электронов на основе: а) искусственной нейронной сети, б) метода отношения функций правдоподобия, в) непараметрического критерия согласия ω_n^k .
2. Новый подход для идентификации электронов на основе непараметрического критерия согласия ω_n^k . Для его применения требуется информация только о распределении ионизационных потерь энергии пионов в модулях детектора TRD.
3. Алгоритм преобразования анализируемых данных (потерь энергии электронов и пионов в модулях TRD) к эффективной переменной, позволившей добиться высокого уровня режекции пионов и надежной идентификации электронов с помощью искусственной нейронной сети.
4. Эффективные и удобные аппроксимации ионизационных потерь энергии пионов (логнормальным распределением) и полных потерь энергии электронов (взвешенной суммой двух логнормальных распределений) в одном модуле TRD, обеспечившие высокий уровень мощности критерия выделения электронов на основе метода отношения функций правдоподобия.
5. Методика выделения из полных потерь энергии электронов потерь на ионизацию и на переходное излучение, которая используется для сравнения реальных измерений с модельными данными.

По теме диссертации опубликованы следующие работы:

- [CBM-PR-2006-1] E.P. Akishina, T.P. Akishina et al: *Application of the ω_n^k test for J/ψ detection in the CBM experiment* // CBM Progress Report 2006, GSI Report 2007-4 (ISSN:0171-4546), GSI Darmstadt, 2007, p. 11.
- [JINR-2007-1] E.P. Akishina, T.P. Akishina et al: *Electron/pion identification in the CBM TRD applying a multilayer perceptron* // JINR Communication, E10-2007-17, JINR, Dubna, 2007, 15 pages.
- [JINR-2007-2] E.P. Akishina, T.P. Akishina et al: *Distributions of energy losses for electrons and pions in the CBM TRD* // JINR Communication, E10-2007-158, JINR, Dubna, 2007, 15 pages.
- [LIT-SR-2007-1] E.P. Akishina, T.P. Akishina et al: *Two approaches for e/π identification applying the CBM TRD* // Scientific report 2006-2007 years. Laboratory of Information Technologies. Ed. by Gh. Adam, V.V. Ivanov, V.V. Korenkov, T.A. Strizh and P.V. Zrelov, ISBN 5-9530-0167-3, JINR, Dubna, 2007, pp. 94-98.
- [LIT-SR-2007-2] E.P. Akishina, T.P. Akishina et al: *On distribution of e/π energy losses in the CBM TRD* // Scientific report 2006-2007 years. Laboratory of Information Technologies. Ed. by Gh. Adam, V.V. Ivanov, V.V. Korenkov, T.A. Strizh and P.V. Zrelov, ISBN 5-9530-0167-3, JINR, Dubna, 2007, pp. 99-104.
- [LIT-SR-2007-4] E.P. Akishina, T.P. Akishina et al: *Application of the ω_n^k test for J/ψ detection in the CBM experiment* // Scientific report 2006-2007 years. Laboratory of Information Technologies. Ed. by Gh. Adam, V.V. Ivanov, V.V. Korenkov, T.A. Strizh and P.V. Zrelov, ISBN 5-9530-0167-3, JINR, Dubna, 2007, pp. 92-93.
- [NEC-2007-1] E.P. Akishina, T.P. Akishina et al: *Particle (e/π) identification in the CBM TRD using $W(k,n)$ test and multilayer perceptron* // XXI International Symposium on Nuclear Electronics & Computing (NEC'2007), Varna, Bulgaria, September 10-17, 2007: Book of abstracts, Dubna, JINR, 2007, p.15.
- [NEC-2007] E.P. Akishina, T.P. Akishina et al: *Comparative analysis of statistical criteria for e/π identification applying the CBM TRD* // Proc. of the XXI International Symposium on Nuclear Electronics & Computing (NEC'2007) (Varna, Bulgaria, September 10-17, 2007), E10,11-2008-37, JINR, Dubna, 2008, pp. 30-39.
- [CBM-PR-2007-2] E.P. Akishina, T.P. Akishina et al: *Comparative study of statistical criteria for e/π separation in the TRD* // CBM Progress Report 2007, GSI Report 2007-4 (ISSN:0171-4546), GSI Darmstadt, 2007, p. 21.
- [PNL-2008] E.P. Akishina, T.P. Akishina et al: *Electron/pion identification in the CBM TRD applying a ω_n^k goodness-of-fit criterion* // "Particles & Nuclei, Letters", Vol. 5, No. 2(144), 2008, pp. 202-218.
- [CM11-26Feb-2008-2] T.P. Akishina et al: *How to increase the ω_n^k criterion power in the e/π identification problem* // 11-th CBM Collaboration Meeting (February 26 - 29, 2008, GSI, Darmstadt);
<https://www.gsi.de/documents/DOC-2008-Mar-32-1.pdf>

- [CBM-PR-2008-2] Т.П. Akishina, O.Yu. Denisova, and V.V. Ivanov: *Systematic study of e/π identification with the TRD applying a multilayer perceptron* // CBM Progress Report 2008, GSI Report 2009-3 (ISSN:0171-4546, ISSN:978-3-9811298-6-1), GSI Darmstadt, 2009, p. 83.
- [CM13-10Mar-2009-2] Т.П. Akishina, O.Yu. Denisova, and V.V. Ivanov: *Comparison of powers of statistical criteria with ANN in the e/π identification problem using TRD* // 13-th CBM Collaboration Meeting (March 9 - 13, 2009, GSI, Darmstadt); <https://www.gsi.de/documents/DOC-2009-Mar-119-1.pdf>
- [JINR-2009] Т.П. АКИШИНА, О.Ю. ДЕНИСОВА, В.В. ИВАНОВ: *Об идентификации электронов и пионов с помощью многослойного перцептрона в детекторе переходного излучения эксперимента CBM* // Сообщение ОИЯИ, P10-2009-61, Дубна, 2009, 12 страниц.
- [LIT-SR-2009-1] Е.П. Akishina, Т.П. Akishina et al: *Methods for e/π identification with TRD in the CBM experiment* // Scientific report 2008-2009 years. Laboratory of Information Technologies. Ed. by Gh. Adam, V.V. Ivanov, V.V. Korenkov, T.A. Strizh and P.V. Zrelov, ISBN 978-5-9530-0237-0, JINR 2009-196, Dubna, 2009, p. 49.
- [PNL-2009] Т.П. Akishina et al: *On the e/π identification applying the CBM TRD: comparison of measurements with the TRD prototype and GEANT3 simulation at $p=1.5$ GeV/c* // "Particles & Nuclei, Letters", 2009, Vol. 6, No. 2(151)245-259.
- [MMCP-7Jul-2009-1] Т.П. Akishina, O.Yu. Denisova, and V.V. Ivanov: *Electron/pion Identification with the TRD Applying a Multilayer Perceptron* // Int. Conference on Mathematical Modeling and Computational Physics (MMCP 09), Dubna, July 7-11, 2009: Book of abstracts, Dubna, JINR, 2009, p.104.
- [NEC-2009-2] Е.П. Akishina, Т.П. Akishina et al: *Electron/Pion Identification with the Transition Radiation Detector in the CBM Experiment* // XXII Int. Symposium on Nuclear Electronics & Computing (NEC 09), Bulgaria, Varna, September 7-14, 2009: Book of abstracts, Dubna, JINR, 2009, p.17.
- [JINR-E10-2010-73] Т.П. Akishina, O.Yu. Derenovskaya and V.V. Ivanov: *Study of the electron energy losses in the CBM TRD* // JINR Communication, E10-2010-73, JINR, Dubna, 2010, 9 pages.
- [RUDN-2010-1] Т.П. АКИШИНА, О.Ю. ДЕНИСОВА, В.В. ИВАНОВ: *Об идентификации электронов и пионов с помощью многослойного перцептрона в детекторе переходного излучения эксперимента CBM* // Вестник РУДН, серия "Математика. Информатика. Физика", No. 1, 2010, стр. 100-109.
- [RUDN-2010-2] Е.П. Akishina, Т.П. Akishina et al: *Methods for e/π Identification with the Transition Radiation Detector in the CBM Experiment* // Вестник РУДН, серия "Математика. Информатика. Физика", No. 2, выпуск 2, 2010, стр. 76-84.
- [MMCP-2011] Т.П. Akishina: *Application of the $W(k,n)$ Criterion for Particle Identification in the CBM Experiment* // Int. Conf. on Mathematical Modeling and Computational Physics (MMCP 2011), July 4-8, 2011, Stará Lesná, Slovakia, Book of Abstracts, p. 27.

[PNL-2012] Т.П. Акишина: Особенности применения критерия ω_n^k к задаче идентификации электронов с помощью детектора переходного излучения в эксперименте CBM // "Письма в ЭЧАЯ", 2012, № 3(173)440-462.

Список литературы

- [1] Letter of Intent for the Compressed Baryonic Matter experiment, <http://www.gsi.de/documents/DOC-2004-Jan-116-2.pdf>
- [2] Compressed Baryonic Matter Experiment. Technical Status Report, GSI, Darmstadt, 2005 (http://www.gsi.de/onTEAM/dokumente/public/DOC-2005-Feb-447_e.html).
- [3] GEANT - Detector Description and Simulation Tool, CERN Program Library, Long Write-up, W5013 (1995).
- [4] <http://www.gsi.de/fair/experiments/CBM>
- [5] D. Bertini, M. Al-Turany, I. Koenig, F. Uhlig: *The FAIR simulation and analysis framework*, Proc. of CHEP'07, Inter. Conference on Computing in High Energy and Nuclear Physics, 2-5 September 2007, Victoria, BC Canada, Journal of Physics: Conference Series, in press.
- [6] F. James: CERN Computer Centre Program Library, **V150**.
- [7] W.T. Eadie, D. Dryard, F.E. James, M. Roos and B. Sadoulet: *Statistical Methods in Experimental Physics*, North-Holland Pub.Comp., Amsterdam-London, 1971.
- [8] P.V. Zrelov and V.V. Ivanov: *The Small Probability Events Separation Method Based on the Smirnov-Gramer-Mises Goodness-of-Fit Criterion*. In: "Algorithms and Programs for Solution of Some Problems in Physics". Sixth Volume. Preprint KFKI-1989-62/M, Budapest, Hungary. 1989, p.127-142.
- [9] P.V. Zrelov and V.V. Ivanov: *The Relativistic Charged Particles Identification Method Based on the Goodness-of-Fit ω_n^3 -Criterion*. Nucl. Instr. and Meth. in Phys. Res., **A310** (1991) 623-630.
- [10] P.V. Zrelov, V.V. Ivanov, V.I. Komarov, A.I. Puzynin, A.S. Khrykin: "Simulation of Experiment on the Investigation of the Processes of the Subthreshold K^+ Production". JINR Preprint, P10-92-369, Dubna, 1992; "Mathematical Modeling", v.4, No.11, 1993, с.56-74 (in Russian).
- [11] K.S. Kolbig and B. Schorr, Comp. Phys. Comm. 31(1984)97.
- [12] K.S. Koelberg: CERN Computer Centre Program Library, **G110**.
- [13] C. Peterson, Th. Rögnvaldsson and L. Lönnblad: *JETNET 3.0 - A versatile artificial neural network package*. Comput. Phys. Commun. 81(1994)185.
- [14] ROOT - An Object-Oriented Data Analysis Framework, User's Guide v5.08, December 2005.
- [15] <http://root.cern.ch/root/html/TMultiLayerPerceptron.html>

Получено 31 июля 2012 г.

Отпечатано методом прямого репродуцирования
с оригинала, предоставленного автором.

Подписано в печать 09.08.2012.

Формат 60 × 90/16. Бумага офсетная. Печать офсетная.

Усл. печ. л. 1,31. Уч.-изд. л. 1,92. Тираж 100 экз. Заказ № 57729.

Издательский отдел Объединенного института ядерных исследований
141980, г. Дубна, Московская обл., ул. Жолио-Кюри, 6.

E-mail: publish@jinr.ru

www.jinr.ru/publish/