

ГОСУДАРСТВЕННЫЙ НАУЧНЫЙ ЦЕНТР РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
ИНСТИТУТ ФИЗИКИ ВЫСОКИХ ЭНЕРГИЙ

2011–22
На правах рукописи

Битюков Сергей Иванович

**Методика статистического анализа данных
при планировании экспериментов по поиску
новых явлений в физике высоких энергий**

01.04.23 — физика высоких энергий

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
доктора физико–математических наук

Протвино 2011

УДК 539.1.05

Работа выполнена в Институте физики высоких энергий (г. Протвино).

Официальные оппоненты: доктор физико-математических наук В.В. Киселев (ИФВЭ, г. Протвино), доктор физико-математических наук, профессор Ю.Г. Куденко (ИЯИ РАН, г. Москва), доктор физико-математических наук П.Н. Пахлов (ИТЭФ, г. Москва).

Ведущая организация – Научно-исследовательский институт ядерной физики им. Д.В. Скобельцына Московского государственного университета им. М.В. Ломоносова, г. Москва.

Защита диссертации состоится “_____” _____ 2012 г. в _____ часов на заседании диссертационного совета Д 201.004.01 при Институте физики высоких энергий по адресу: 142281, Протвино Московской обл.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ИФВЭ.

Автореферат разослан “_____” _____ 2011 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета Д 201.004.01

Ю.Г. Рябов

© Государственный научный центр
Российской Федерации
Институт физики высоких энергий, 2011

Общая характеристика работы

Актуальность темы

Методика статистического анализа и планирования физических измерений, в частности, включающая выбор, разработку и исследование статистических процедур, которые должны применяться в эксперименте, является актуальной задачей. Современные коллаборации, образованные для проведения экспериментов на крупных физических установках в области физики высоких энергий, имеют в своей структуре специальные группы по выработке рекомендаций и стандартов в использовании статистических методов обработки данных. Так, например, были организованы Рабочая группа по статистике в Коллаборации BaBar, Комитет по статистике в CDF, Статистический комитет CMS, Объединенный статистический форум ATLAS-CMS. Регулярно проводятся специальные Совещания и Конференции с целью унификации методов анализа и представления конечных данных с экспериментов: Рабочие Совещания “On confidence limits” (CERN, Switzerland, January, 2000), “On confidence limits” (Fermilab, USA, March, 2000), Конференции “Advanced Statistical Techniques in Particle Physics” (Durham, UK, March, 2002), PhyStat’2003 (SLAC, USA, September, 2003), PhyStat’2005 (Oxford, UK, September, 2005), Рабочие Совещания PhyStat-LHC (CERN, June, 2007), ACAT’2008 “Are we ready for LHC era experiments?” (Erice, Italy, November,

2008), PhyStat'2011(CERN, January, 2011). Ситуация усугубляется отсутствием единого стандарта в статистических методах и идеологическими противоречиями частотного и Байесовского подходов к статистическим проблемам.

С другой стороны, поиск новых явлений это основная задача физических исследований. Поэтому использование разработанной методики статистического анализа данных при изучении возможности обнаружения таких явлений как рождение пар гайджино, рождение слептонов, поиск новой физики при измерении сечений 4-струйных событий также весьма актуально.

Цель диссертационной работы

Целью диссертационной работы является как разработка методики оценки качества результатов планируемых экспериментов, так и использование разработанной методики в задачах поиска новых физических явлений, в частности, в экспериментах на установке Компактный Мюонный Соленоид (КМС)¹ на ускорителе Большой Адронный Коллайдер (БАК).²

Научная новизна и практическая ценность работы

При выполнении диссертационной работы были получены следующие новые результаты:

- дана классификация подходов к определению понятия значимости превышения сигнала над фоном, в частности:
 - получены формулы для оценки значимости превышения сигнала над фоном в планируемом эксперименте (потенциал открытия);

¹CMS Collaboration. **The Compact Muon Solenoid Technical Proposal**. CERN/LHCC 1992-3 (1992). LHCC/P1.

²T.L.S.Group: **The Large Hadron Collider Conceptual Design**. CERN-AC-95-05 (1995); arXiv:hep-ph/061012.

- получены формулы для оценки комбинированной значимости при объединении независимых оценок или измерений значимости превышения сигнала над фоном;
- разработана концепция учета статистических и систематических неопределенностей при оценке значимости ожидаемого результата эксперимента;
- введена и обоснована оценка вероятности принятия правильного решения при проверке гипотезы о наблюдаемости нового явления, получена характеристика, позволяющая оценивать разделимость гипотез;
- разработана концепция доверительного оценивания параметров моделей, с учетом статистических и систематических неопределенностей, в рамках данной концепции разработаны и используются процедуры, которые позволяют строить доверительные плотности и доверительные интервалы для параметров.

На основе разработанной методики был исследован ряд сценариев поиска новых явлений в физике высоких энергий, в частности в экспериментах на установке КМС (БАК)³ В диссертацию вошли результаты по:

- *исследованию возможности измерения дифференциальных сечений 4-струйных событий по инвариантной массе двух струй с целью обнаружения новой физики;*
- *исследованию возможностей обнаружения суперсимметричных частиц на ускорителе БАК, в частности:*
 - *изучению возможности детектирования суперсимметрии в случае произвольных масс суперсимметричных частиц;*
 - *изучению возможности прямого детектирования слептонов в рамках Минимальной Суперсимметричной Стандартной Модели (МССМ).*

³CMS Collaboration. **CMS Physics, Technical Design Report Volume II: Physics Performance.** CERN/LHCC 2006-021, CMS TDR 8.2.

Результаты исследований и методические разработки, имеющие практическую ценность:

- Результаты по изучению рождения слептонов, а также по поиску новой физики при измерении сечений 4-струйных событий использовались при проектировании триггерной системы установки КМС⁴.
- Разработанные процедуры и программы для оценки значимости превышения сигнала над фоном и комбинирования значимостей широко используются в физических и астрофизических исследованиях, в частности, они использовались при разработке программы физических исследований на установке КМС³.
- Результаты изучения возможности обнаружения слептонов на БАК вошли в программу физических исследований на установке КМС³.
- В ряде исследований нашли применение процедуры, позволяющие оценить разделимость гипотез.
- Концепция доверительного оценивания используется при комбинировании различных измерений, имеющих как статистические, так и систематические неопределенности. В частности, разработанная процедура использована для объединения оценок различных фоновых процессов при определении вероятности обнаружения редких процессов.

Защищаемые положения

При выполнении данной работы были получены следующие результаты, которые выносятся на защиту:

- Методика оценки значимости превышения ожидаемого сигнала над ожидаемым фоном.
- Методика оценки ожидаемого суммарного фона в эксперименте через объединение оценок отдельных фонов с различными статистическими и систематическими неопределенностями.

⁴CMS Collaboration. **The Trigger and Data Acquisition project, Technical Design Report Volume I: The Trigger Systems**. CERN/LHCC 2000-38, CMS TDR 6.1.

- Результаты оценки потенциала открытия новой физики при измерении сечений 4-струйных событий.
- Результаты исследования возможности обнаружения рождения суперсимметричных частиц в случае их произвольных масс.
- Результаты исследования возможности обнаружения слептонов на БАК.

Основные публикации и апробация работы

Апробация диссертации прошла в ГНЦ ИФВЭ 23 сентября 2011 г. Результаты, приведенные в диссертации, опубликованы в работах [1]-[32] в журналах “Ядерная Физика”, Physics Letters B, II Nuovo Cimento A, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A, Modern Physics Letters A, Proceedings of Science, AIP Conference Proceedings, трудах международных конференций, препринтах ГНЦ ИФВЭ, ИЯИ РАН и КМС(ЦЕРН), а также в книге “Trends in Experimental High Energy Physics” (Nova Science Publishers, 2005).

Результаты докладывались на международных конференциях и совещаниях PhyStat’2011, MaxEnt’2010, 14-й Ломоносовской конференции по физике элементарных частиц, ACAT’2008, PhyStat-LHC (2007), ACAT’2007, PhyStat’2005, MaxEnt’2005, Кварки-2004, ACAT’2003, ACAT’2002, Advanced Statistical Techniques in Particle Physics, CHER’2001, Кварки-1998, Ежегодных конференциях CMS RDMS (ЦЕРН 1999, Москва 2000, Протвино 2002, Минск 2004), сессии отделения физики РАН, семинарах коллаборации КМС в ЦЕРНе, семинарах ИФВЭ и ИЯИ РАН.

Структура диссертации

Диссертация состоит из введения, пяти глав и заключения. Объем диссертации — 145 страниц печатного текста, в том числе 31 рисунок и 30 таблиц; библиография включает в себя 131 наименование.

Содержание работы

Во **Введении** раскрывается актуальность научных проблем, изучению которых посвящена диссертация. Сформулирована цель работы, показаны научная новизна и практическая ценность полученных результатов. Представлены положения выносимые на защиту, а также кратко описана структура диссертации и апробация работы.

В **Главе 1** рассматриваются существующие подходы к методике оценки результатов экспериментов в физике высоких энергий и предлагается методика, позволяющая во многих случаях дать более содержательное представление результатов эксперимента. Чтобы выбрать, например, одну из двух моделей поискового эксперимента, которые дают разные значения ожидаемого количества сигнальных и фоновых событий, определяют значимость превышения сигнала над фоном. Наиболее распространенными являлись значимости S_1 и S_2 :

$$(a) \text{ “значимость” } S_1 = \frac{n_s}{\sqrt{n_b}},$$
$$(b) \text{ “значимость” } S_2 = \frac{n_s}{\sqrt{n_s + n_b}},$$

где n_b это ожидаемое число фоновых событий, а n_s – ожидаемое или оцененное число сигнальных событий. Чем больше значение значимости, тем лучше модель эксперимента подходит для поиска нового явления. Возникал вопрос: Какой тип значимости использовать при представлении данных? В диссертации дается анализ различий при оценке ожидаемых результатов планируемых экспериментов и результатов, полученных в реальном эксперименте [1,2,3]. На основании анализа строится классификация оценок значимости превышения сигнала над фоном и исследуются их свойства [4,5,6,7]. Проведен статистический анализ неопределенностей, которые возникают при использовании значимостей S_1 и S_2 , и предложена значимость

$$S_{12} = (\sqrt{n_s + n_b} - \sqrt{n_b}) [1]. \quad (1)$$

Данная значимость и ее модификация [7] $S_{c12} = 2 \cdot S_{12}$ характеризуют неопределенность, которая будет иметь место при выборе решения о наличии или отсутствии в полученном результате ожидаемого сигнала. Значимости получили широкое распространение при обработке данных экспериментов в физике высоких энергий как характеристика потенциала открытия планируемого эксперимента. Значимость S_{c12} использовалась при подготовке Physics TDR³ установки КМС как характеристика ожидаемых результатов. Значимость используется для прикладных целей, например, для оптимизации при выборе обрезаний с помощью методов многофакторного анализа или для обнаружения неоднородностей в скальных породах с помощью мюонной томографии, а также в астрофизике.

Если рассматривать статистическую гипотезу H_0 : *новая физика существует в Природе* при альтернативной гипотезе H_1 : *новой физики в Природе нет*, то величина неопределенности при принятии решения определяется вероятностью отвергнуть гипотезу H_0 в случае ее правильности (ошибка I рода) $\alpha = P(\text{отвергнуть } H_0 | H_0 \text{ верна})$ и вероятностью принять гипотезу H_0 в случае, если верна гипотеза H_1 (ошибка II рода) $\beta = P(\text{принять } H_0 | H_0 \text{ неверна})$.

В простейшем случае, если неопределенность представить в виде суммы ошибок первого и второго рода $\kappa = \alpha + \beta$, то значимости можно сравнить. На Рис. 1 показано поведение неопределенности для значимостей S_1 , S_2 и $S_{12} = 0.5 S_{c12}$ в зависимости от ожидаемого числа сигнальных событий, если выполнено условие открытия нового явления (значимость ≥ 5).

Как это видно из Рис. 2 (слева), обычно значимость определяется вероятностью ошибки II рода β , а в случае ожидаемого числа и сигнальных событий требуется условие 50% вероятности $(1 - \alpha)$ того, что, при наличии сигнала, будет зарегистрировано число событий большее или равное их ожидаемому числу $n_s + n_b$. Для значимостей S_1 и S_{c12} были получены формулы [2], позволяющие находить значимость при произвольной вероятности ошибки I рода α

$$S_1(\alpha) = \frac{n_s}{\sqrt{n_b}} - k(\alpha) \sqrt{1 + \frac{n_s}{n_b}} = S_1 - k(\alpha) \sqrt{1 + \frac{n_s}{n_b}}, \quad (2)$$

$$S_{c12}(\alpha) = 2 \cdot (\sqrt{n_s + n_b} - \sqrt{n_b}) - k(\alpha) = S_{c12} - k(\alpha), \quad (3)$$

где $k(\alpha)$: $k(0.5) = 0$; $k(0.25) = 0.66$; $k(0.1) = 1.28$; $k(0.05) = 1.64$. Так, на Рис. 2 (справа) показана ситуация, соответствующая 75% вероятности того, что, при наличии сигнала, будет зарегистрировано число событий большее или равное их ожидаемому числу $n_s + n_b$.

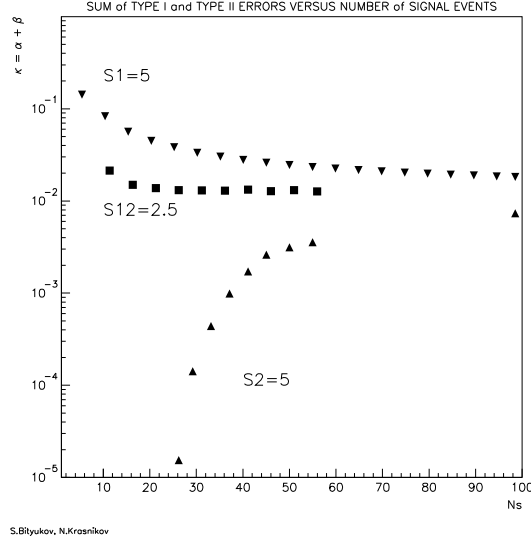


Рис. 1. Зависимость κ от n_s для значимостей $S_1 = 5$, $S_2 = 5$ и $S_{c12} = 5$.

В диссертации описываются реализованные в эксперименте КМС (БАК) процедуры оценки значимости превышения сигнала над фоном. Созданная программа ScP [8], основанная на использовании значимости S_{cP} , являлась базовой программой для оценки значимости ожидаемого результата при подготовке программы физических исследований на установке КМС³. Значимость определяется через ошибку II-го рода β при проверке гипотезы о наличии новой физики:

$$\beta = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{S_{cP}} e^{-\frac{x^2}{2}} dx, \quad \text{где } \beta = \sum_{i=n_s+n_b}^{\infty} \frac{n_b^i e^{-n_b}}{i!}.$$
 В отличие от значимости S_{c12} данная значимость учитывает только флуктуации числа фоновых событий. Программа ScP позволяет учитывать статистические и систематические неопределенности как для значимости S_{cP} , так и для значимости S_{c12} .

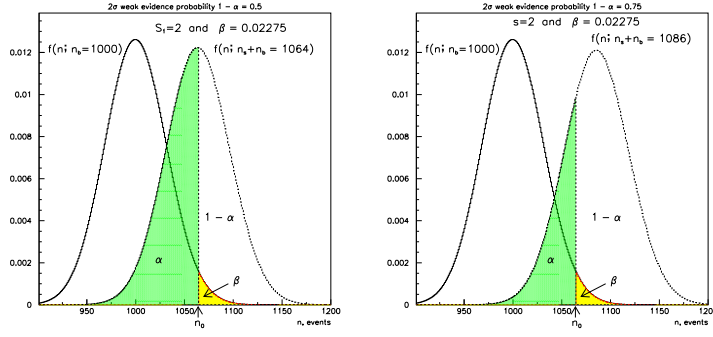


Рис. 2. Случай $n_b \gg 1$. Распределения Пуассона (рисунок слева) с параметрами $n_b = 1000$ и $n_b + n_s = 1064$. Здесь $1 - \alpha = \alpha = 0.5$ и $\beta = 0.02275$ (то есть $S_1 = 2$). Распределения Пуассона (рисунок справа) с параметрами $n_b = 1000$ и $n_b + n_s = 1086$. Здесь $1 - \alpha = 0.75$ и $\beta = 0.02275$ (то есть эффективная значимость $S_1(\alpha) = 2$ при $\alpha=0.25$).

Важное место в эксперименте занимают процедуры принятия решений при наличии неопределенностей, в частности, если статистикой для проверки гипотезы является значимость превышения сигнала над фоном. Введено понятие вероятности правильного решения при проверке гипотез [9]. Предложен оптимальный с точки зрения максимизации вероятности принятия правильного решения тест равных вероятностей [10]. Дан анализ различий между известным тестом равных хвостов и тестом равной вероятности и показано преимущество теста равных вероятностей при оценке разделимости

гипотез. Следующее определение [6] неопределенности позволяет находить вероятность неправильного решения при любом выборе критической величины для теста

$$\tilde{\kappa} = \frac{\alpha + \beta}{2 - (\alpha + \beta)}. \quad (4)$$

Соответственно, можно определить универсальную значимость S_U [10]

$$\tilde{\kappa} = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{S_U}^{\infty} e^{-\frac{x^2}{2}} dx, \quad (5)$$

которая описывает неопределенность при проверке гипотез на языке стандартных отклонений. Эти формулы использовались, например, в работах для оценки разделимости двух гипотез о наличии или отсутствии вклада от обмена заряженным бозоном Хиггса в расщепление масс при смешивании нейтральных K - и B -мезонов.

В диссертации обсуждаются пути объединения оценок значимостей превышения сигнала над фоном из различных измерений и возможности учета статистических и систематических неопределенностей [11,12]. Предложенная процедура объединения значимостей получила признание и используется, в частности, в астрофизике.

Глава 2 содержит описание методики учета статистических и систематических неопределенностей для представления результатов поисковых экспериментов. Рассматриваются различные источники статистических и систематических неопределенностей в эксперименте [13]. Демонстрируется взаимосвязь Гамма-распределения и распределения Пуассона. Пусть вероятность наблюдения n событий в эксперименте описывается распределением Пуассона с параметром μ , то есть $f(n; \mu) = \frac{\mu^n}{n!} e^{-\mu}$. Известно, что выражение для плотности распределения Гамма-распределения $\Gamma_{1,n+1}$ совпадает в точности с выражением для распределения вероятностей распределения Пуассона: $g_n(\mu) = \frac{\mu^n}{n!} e^{-\mu}$, $\mu > 0$, $n > -1$. Это позволило построить тождество

$$\sum_{k=n+1}^{\infty} f(k; \mu_1) + \int_{\mu_1}^{\mu_2} g_n(\mu) d\mu + \sum_{k=0}^n f(k; \mu_2) = 1, \quad (6)$$

которое справедливо для любых $\mu_1 \geq 0$ и $\mu_2 \geq 0$. Данная взаимосвязь использовалась для вывода формул, позволяющих учитывать статистическую неопределенность при оценке качества планируемых результатов эксперимента [14,15]. Например, если n_s и n_b известны из Монте Карло эксперимента, имеющего такую же интегральную светимость, что и планируемый эксперимент, можно определить универсальную значимость ожидаемого результата эксперимента с помощью системы уравнений:

$$\begin{cases} \hat{\alpha} = \int_0^\infty g_{n_s+n_b}(\mu) \sum_{i=0}^{n_c} f(i; \mu) d\mu = \sum_{i=0}^{n_c} \frac{C_{n_s+n_b+i}^i}{2^{n_s+n_b+i+1}}, \\ \hat{\beta} = 1 - \int_0^\infty g_{n_b}(\mu) \sum_{i=0}^{n_c} f(i; \mu) d\mu = 1 - \sum_{i=0}^{n_c} \frac{C_{n_b+i}^i}{2^{n_b+i+1}}, \\ 1 - \tilde{\kappa} = 1 - \frac{\hat{\alpha} + \hat{\beta}}{2 - (\hat{\alpha} + \hat{\beta})}. \end{cases} \quad (7)$$

Здесь критическая величина n_c при будущей проверке гипотезы о наблюдаемости явления выбирается в соответствии с тестом равной вероятности и C_N^i есть $\frac{N!}{i!(N-i)!}$. Влияние статистической неопределенности в значениях n_s и n_b на вероятность открытия в планируемом эксперименте, то есть вероятность того, что значимость результата относительно ожидаемого фона, будет превышать число 5, показано на Рис. 3. На рисунке приведены кривые для трех значений интегральной светимости Монте Карло экспериментов, на основании которых получены оценки для n_s и n_b .

Также рассмотрена возможность учета систематической неопределенности, обусловленной теоретическими предположениями в рамках исследуемой модели [16].

В диссертации строится процедура нахождения плотности доверительного распределения $g_n(\mu)$ с помощью тождества (6) и, затем, доверительного интервала для параметра распределения Пуассона [17], позволяющая совместить Байесовский и частотный подходы. Показано, что это построение можно применять и при нахождении доверительных интервалов для параметров других распределений [18]. Такое доверительное оценивание параметров через постро-

ение плотности доверительных распределений параметров является естественным обобщением интервального оценивания. Вывод формул в работах [14,15], использующий принцип сохранения вероятности, основывается на понятии плотности доверительного распределения.

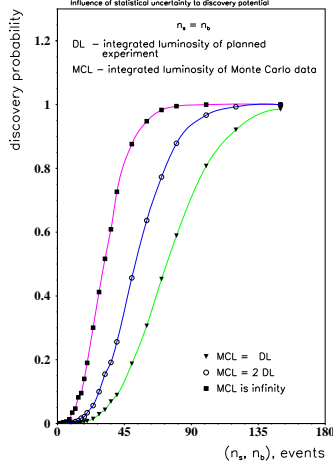


Рис. 3. Зависимость вероятности открытия от n_s с и без учета статистической неопределенности в определении n_s и n_b . Случай $n_s = n_b$. Кривые построены в предположении, что $\beta = 2.85 \cdot 10^{-7}$.

В Главе 3 дано описание процедуры, позволяющей оценивать распределение вероятностей суммарного числа фоновых событий в эксперименте на основании оценок отдельных фонов, полученных при разной интегральной светимости эксперимента и с различными систематическими неопределенностями [14,15]. В качестве примера представлен алгоритм для комбинированного оценивания вероятности появления фоновых событий при использовании данных, полученных из Монте Карло экспериментов с различными интегральными светимостями и различными систематическими неопределенно-

стями [19]. В алгоритме используются разработанные в диссертационной работе методы статистического анализа, изложенные в первых двух главах.

Предположим, ожидаемое число фоновых событий, неотличимых по своим характеристикам от сигнальных событий в эксперименте, получено путем расчетов (например из Монте Карло вычислений) или путем некоторых дополнительных измерений. Пусть в эксперименте присутствует несколько источников фоновых событий. При этом расчеты или дополнительные измерения проведены для фоновых процессов с различными светимостями и каждый фоновый процесс имеет различные систематические неопределенности в характеристиках, которые необходимо учесть при планировании или при проведении эксперимента. Метод позволяет с помощью вероятностных вычислений оценить неопределенность в оценке числа ожидаемых фоновых событий. Результатом применения данного метода является распределение вероятностей реализации k фоновых событий $p(\text{background in experiment} = k)$, $k = 0, 1, \dots$ в эксперименте.

Полученное распределение позволяет оценить значимость превышения наблюдаемой (или ожидаемой) суммы числа фоновых и сигнальных событий над ожидаемым числом фоновых событий. В качестве меры наблюдаемости сигнала применялась значимость S_{cP} [8]. Метод [19] имеет четкую вероятностную интерпретацию и рассматривается как частотная альтернатива Байесовским процедурам оценки фона.

Методика, представленная в предыдущих главах, разрабатывалась в рамках решения задач, связанных с планированием экспериментов на многопрофильной экспериментальной установке Компактный Мюонный Соленоид, работающей на ускорителе Большой Адронный коллайдер. В **Главе 4** кратко описываются Большой Адронный Коллайдер, основные характеристики эксперимента КМС, а также возможные направления поиска новой физики на БАК. Затем дается феноменологическое обоснование для поиска новой физики при измерении 4-х струйных событий на Большом Адронном Коллайдере и Теватроне [20,21]. Рассмотрены модель со ска-

лярным цветным октетом и суперсимметричная модель с нарушением R-четности. В обеих моделях рождение пары новых частиц, распадающихся на две струи приводит к появлению 4-струйных событий. Поэтому измерение 4-струйного дифференциального сечения по инвариантной массе двух струй позволяет обнаружить проявление новой физики. Основной фон возникает от обычных 4-струйных КХД (КвантовоХромоДинамических) событий. Описана процедура Монте Карло генерации событий и их обработки. Приводятся результаты исследования для многоцелевой экспериментальной установки, работающей при энергиях БАКа или Теватрона. В Табл. 1-2 и в Табл. 3-4 приведены данные по сечениям рождения скалярного октета и сечениям рождения правых скварков соответственно для энергий Теватрона и БАКа.

Таблица 1. Сечение $\sigma(\bar{p}p \rightarrow \Phi\Phi + \dots)$ в пикобарнах для различных величин масс скалярного октета на Теватроне

M(ТэВ)	125	150	175	200	225	250	275	300	325
σ	11	3.6	1.1	0.42	0.21	0.074	0.030	0.014	0.0067

Таблица 2. Сечение $\sigma(pp \rightarrow \Phi\Phi + \dots)$ в пикобарнах для различных величин масс скалярного октета на БАКе

M(ТэВ)	0.2	0.3	0.4	0.5	0.7	0.9	1.1
σ	701	84	20	7.4	1.1	0.18	0.055

Таблица 3. Сечение рождения 6 вырожденных по массе правых скварков (в пикобарнах) для БАКа для случая тяжелых глюино

M(ТэВ)	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1.1
σ	300	56	14	4.7	2.1	0.81	0.47	0.24	0.074

Таблица 4. Сечение рождения 6 вырожденных по массе правых скварков (в пикобарнах) для Теватрона для случая тяжелых глюино

M(ТэВ)	125	150	175	200	225	250	275	300	325
σ	8.2	3.8	1.7	0.72	0.37	0.17	0.083	0.036	0.017

Показано, что при энергиях БАК возможно обнаружить частицы из скалярного цветового октета с массой до 900 ГэВ. Для Теватрона соответствующая граница составляет 175 ГэВ.

Глава 5 посвящена изучению возможностей обнаружения суперсимметричных частиц.

Суперсимметрия (СУСИ) это новый тип симметрии, которая связывает бозоны и фермионы. Интерес к СУСИ также связан с наблюдением того факта, что измерения калибровочных констант на ускорителе LEP свидетельствуют в пользу суперсимметричной теории великого объединения с массами суперчастиц легче чем $O(1)$ ТэВ. Простейшее обобщение Стандартной модели (СМ) — Минимальная Суперсимметричная Стандартная Модель (МССМ). МССМ основана на использовании стандартной калибровочной группы $SU_c(3) \otimes SU_L(2) \otimes U(1)$ с нарушением электрослабой симметрии путем ненулевых вакуумных средних двух хиггсовских изодублетов. МССМ состоит из СМ плюс соответствующие взаимодействия с участием суперчастиц. Следует отметить, что в МССМ содержится 2 изодублета полей Хиггса с гиперзарядами $Y = \pm 1$. Два изодублета хиггсовских полей необходимы для придания масс “верхним” и “нижним” фермионам. В МССМ модели спектр бозонов Хиггса состоит из трех нейтральных бозонов Хиггса h, H, A и одного заряженного бозона Хиггса H^\pm . Суперсимметричные частицы в МССМ удобно разбить на следующие группы:

- нейтралино (спин $\frac{1}{2}$): $\chi_1^0, \chi_2^0, \chi_3^0, \chi_4^0$,
- чарджино (спин $\frac{1}{2}$): χ_1^\pm, χ_2^\pm ,
- слептоны (спин 0): $\tilde{e}_{L,R}, \tilde{\mu}_{L,R}, \tilde{\tau}_{L,R}, \tilde{\nu}_e, \tilde{\nu}_\mu, \tilde{\nu}_\tau$,
- скварки (спин 0): $\tilde{d}_{L,R}, \tilde{u}_{L,R}, \tilde{s}_{L,R}, \tilde{c}_{L,R}, \tilde{b}_{L,R}, \tilde{t}_{L,R}$,
- глюино (спин 1): \tilde{g} .

В реальной жизни суперсимметрия должна быть нарушена. В настоящее время наиболее популярным механизмом нарушения суперсимметрии является сценарий, основанный на использовании скрытого сектора. Согласно этому сценарию существует 2 сектора: обычная материя входит в видимый сектор. Второй скрытый сектор

теории содержит поля, которые приводят к нарушению суперсимметрии. Эти 2 сектора взаимодействуют друг с другом посредством некоторых полей, которые переносят СУСИ нарушение из скрытого сектора в видимый сектор. В модели СУГРА видимый и скрытый секторы взаимодействуют посредством гравитации.

В МССМ суперсимметрия мягко нарушена на некотором большом масштабе M мягкими членами. В общем случае все мягкие СУСИ нарушающие члены являются произвольными, что затрудняет феноменологический анализ и приводит к потере предсказательной силы теории. В модели мСУГРА (минимальная СУГРА) постулируется универсальность параметров мягкого нарушения СУСИ на масштабе великого объединения. А именно, все частицы спина 0 (скварки, слептоны, хиггсы) имеют одинаковую массу m_0 . Все гайджино в этой модели также имеют одну и ту же массу $m_{1/2}$ на масштабе великого объединения.

Однако существуют феноменологические модели, основанные на теории суперструн, в которых нарушаются постулаты мСУГРА модели. Поэтому необходимо изучать потенциал открытия суперсимметрии БАКа для общего случая МССМ модели с произвольными массами суперчастиц. Основная проблема здесь – наличие большого числа свободных параметров, что сильно затрудняет исследование.

Следует подчеркнуть, что при поиске суперсимметрии, в отличие от поиска бозона Хиггса, мы ищем не резонансную структуру в распределении сечений по инвариантной массе, а превышение сечений (количество наблюдаемых событий) над сечениями (событиями), предсказанными в рамках СМ. Это предполагает определенные ограничения на методы исследования возможности обнаружения суперсимметрии.

Основными источниками изолированных лептонов для сигнатур

$$n \geq 1 \text{ leptons} + \text{jets} + E_T^{miss}$$

являются каскадные распады скварков и глюино на чарджино $\tilde{\chi}_1^\pm$ и нейтралино $\tilde{\chi}_1^0$

$$\tilde{g} \rightarrow q\bar{q}\tilde{\chi}_1^\pm, q\bar{q}\tilde{\chi}_2^0, \quad (8)$$

$$\tilde{q} \rightarrow q\tilde{\chi}_2^0, q'\tilde{\chi}_1^\pm \quad (9)$$

вместе с лептонными распадами чарджино и нейтралино

$$\tilde{\chi}_1^\pm \rightarrow \tilde{\chi}_1^0 + l^\pm + \nu,$$

$$\tilde{\chi}_2^0 \rightarrow \tilde{\chi}_1^0 + l^\pm + l^\mp.$$

С ростом масс $\tilde{\chi}_2^0$, $\tilde{\chi}_1^\pm$ доля распадов (8), (9) падает, а, следовательно, падает и доля лептонов после распадов $\tilde{\chi}_1^\pm$, $\tilde{\chi}_2^0$, и основными модами распадов скварков и глюино становятся распады на легчайшую суперчастицу $\tilde{\chi}_1^0$ в конечном состоянии типа

$$\tilde{q} \rightarrow q\tilde{\chi}_1^0,$$

$$\tilde{g} \rightarrow q\bar{q}\tilde{\chi}_1^0.$$

Следовательно, можно ожидать, что с ростом масс $\tilde{\chi}_1^\pm$, $\tilde{\chi}_2^0$ лептонные сигнатуры не позволяют открыть суперсимметрию, а единственной пригодной для открытия суперсимметрии на БАКе остается сигнатура

$$no\ leptons + jets + E_T^{miss}.$$

Расчеты подтверждают этот качественный вывод.

В работах [22,23,24,25,26,27,28] изучалась возможность детектирования суперсимметрии на БАКе в случае произвольных масс суперсимметричных частиц.

Проводилось детальное моделирование прохождения частиц в установке КМС с параметризацией отклика детектора с помощью программы CMSJET.

Все суперсимметричные процессы и фоны СМ моделировались с помощью программы ISAJET 7.32, ISASUSY. Основной фоновый вклад в изучаемую сигнатуру давали следующие процессы: WZ , ZZ , $t\bar{t}$, Wtb , $Zb\bar{b}$, $b\bar{b}$ и КХД ($2 \rightarrow 2$). Рассмотрены три основные кинематические области:

- A. $m_{\tilde{g}} \gg m_{\tilde{q}}$,
- B. $m_{\tilde{q}} \gg m_{\tilde{g}}$,
- C. $m_{\tilde{q}} \sim m_{\tilde{g}}$, $m_{\tilde{q}} > m_{\tilde{g}}$.

Также предполагалось, что все суперчастицы относительно тяжелы (~ 1 ТэВ), за исключением LSP (легчайшая суперсимметричная частица) и сфермионов третьего поколения.

Для кинематической области А на БАК доминирует рождение скварков $pp \rightarrow \tilde{q}\tilde{q}$. Скварки распадаются на кварк и LSP $\tilde{q} \rightarrow q\tilde{\chi}_1^0$, что ведет к сигнатуре для регистрации интересного события: 2 струи и потерянная поперечная энергия E_T^{miss} . Для кинематической области В на БАК доминирует рождение пары глюино $pp \rightarrow \tilde{g}\tilde{g}$. Глюино распадаются на кварк-антикварк и LSP $\tilde{g} \rightarrow q\bar{q}\tilde{\chi}_1^0$, что ведет к сигнатуре для регистрации интересного события: 3 и больше струй плюс потерянная поперечная энергия E_T^{miss} . Для кинематической области С примерно в одинаковой пропорции рождаются $\tilde{q}\tilde{q}, \tilde{g}\tilde{g}, \tilde{q}\tilde{g}$.

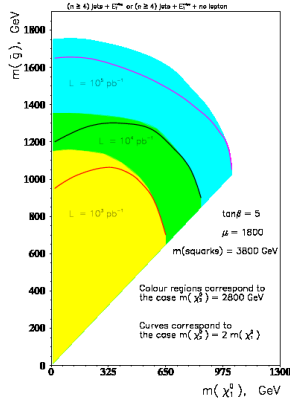


Figure 1: Discovery potential of CMS for different values of m_g and m_q in the case of $m_q > m_g$.

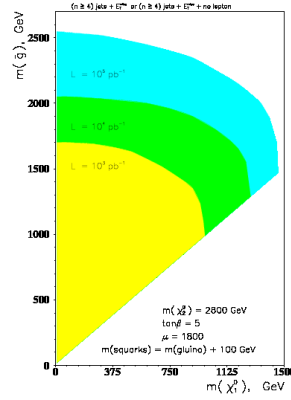


Figure 1: Discovery potential of CMS for different values of m_g and m_q in the case of $m_g > m_q$.

Рис. 4. Потенциал открытия КМС для различных значений масс LSP и глюино для кинематической области А (слева) и В (справа).

Рассмотрен случай, когда все скварки имеют ту же самую массу и $m_{\tilde{\chi}_2^0}, m_{\tilde{\chi}_1^0} > \min(m_{\tilde{g}}, m_{\tilde{q}})$. В качестве оценки потенциала открытия использовалась значимость $S_{12} = \sqrt{n_s + n_b} - \sqrt{n_b}$. На Рис. 4 показаны области соотношений между массами суперчастиц при трех значениях интегральной светимости для которых значимость S_{12} превышает значение 5. Найдено, что детектируемость сигнала зависит весьма сильно от соотношения между массами легчайшего суперпартнера, глюино и скварков и она уменьшается с ростом массы легчайшего суперпартнера. Для относительно тяжелого легчайшего суперпартнера с массой близкой к массе скварков и глюино при массе скварков и глюино тяжелее 1.5 ТэВ сигнал становится ненаблюдаемым.

Хотя сечения рождения глюино и скварков на БАКе являются наибольшими по сравнению с сечениями рождения слептонов или гайджино и, следовательно, рождение скварков и глюино на БАКе более интересно с точки зрения открытия СУСИ. Тем не менее открытие суперсимметрии с помощью нескольких сигнатур чрезвычайно важно с точки зрения надежности открытия. Используя различные сигнатуры можно получить дополнительную информацию о параметрах МССМ модели.

В работах [29,30,31,32] подробно рассмотрены процедуры поиска слептонов.

Если слептоны тяжелее, чем гайджино $\tilde{\chi}_1^\pm, \tilde{\chi}_1^0$, то они рождаются в основном через $q\bar{q}$ -аннигиляцию

$$q\bar{q} \rightarrow \tilde{l}_L\tilde{l}_L, \tilde{l}_R\tilde{l}_R, \tilde{\nu}\tilde{\nu}, \tilde{\nu}\tilde{l}, \tilde{l}_L\tilde{l}_R.$$

В случае, если слептоны легче, чем гайджино $\tilde{\chi}_1^\pm, \tilde{\chi}_1^0$, то они, кроме того, рождаются в распадах чарджино и нейтралино.

Рождение слептонов с их последующими распадами приводит к сигнатуре

$$two\ leptons + E_T^{miss} + no\ jets. \quad (10)$$

Эта сигнатура возникает как результат прямого и непрямого рождения слептонов. В случае непрямого рождения слептонов возможны также сигнатуры с одним, тремя и четырьмя заряженными лептонами в конечном состоянии.

Изучалась возможность прямого детектирования слептонов с помощью сигнатуры (10). Рассматривались следующие СМ фоны: $t\bar{t}$, WW , WZ , ZZ , Wt , $Zb\bar{b}$, $W + jet$, DY (Drell-Yan процесс). Основной вклад дают СМ фоны от $t\bar{t}$ и WW . Также существуют ненулевые суперсимметричные фоны, связанные с $\tilde{q}\tilde{q}$, $\tilde{g}\tilde{g}$ и $\tilde{g}\tilde{q}$ рождениями с последующими каскадными распадами на струи и лептоны. Для мСУГРА точки с $\tan\beta = 10$, $sign(\mu) = +$, $A = 0$ потенциал открытия слептонов в плоскости $(m_0, m_{1/2})$ для трех значений интегральной светимости представлен на Рис. 5.

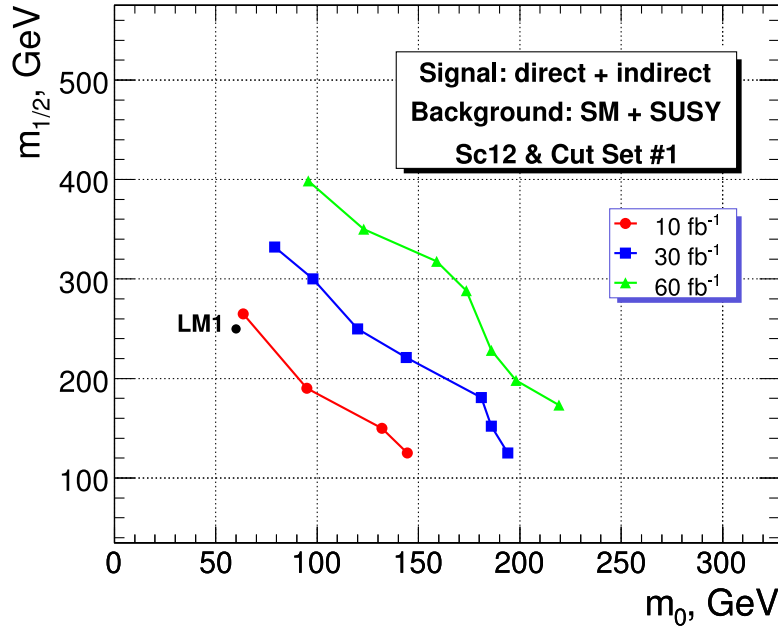


Рис. 5. Линии уровня достижимости открытия ($\tan\beta = 10$, $sign(\mu) = +$, $A = 0$) для конечных состояний с l^+l^- , потерянной поперечной энергией и запретом на струи.

В Заключении сформулированы основные результаты и выводы диссертационной работы:

1. Разработана методика оценки качества результатов планируемого эксперимента. Методика нашла широкое применение во многих экспериментах в физике высоких энергий и в астрофизике.
2. Разработана методика оценки ожидаемого суммарного фона в эксперименте через объединение оценок отдельных фонов с различными статистическими и систематическими неопределенностями.
3. Проведено исследование возможности измерения дифференциальных сечений 4-струйных событий по инвариантной массе двух струй с целью обнаружения проявления новой физики.
4. Проведено исследование возможностей обнаружения суперсимметричных частиц на ускорителе БАК, в частности:
 - изучена возможность детектирования суперсимметрии в случае произвольных масс суперсимметричных частиц;
 - изучена возможность прямого детектирования слептонов в рамках модели МССМ.

Список литературы

- [1] S.I. Bityukov, N.V. Krasnikov. **New physics discovery potential in future experiments**. Modern Physics Letters A13, (1998) 3235; arXiv:physics/9811025.
- [2] S.I. Bityukov, N.V. Krasnikov. **Uncertainties and Discovery Potential in Planned Experiments**. Proceedings of International Conference “Advanced Statistical Techniques in Particle Physics”, March 18-22, 2002, Durham, UK, p.78; CMS CR-2002/005; arXiv: hep-ph/0204326.
- [3] S.I. Bityukov, N.V. Krasnikov. **Uncertainties in Estimation of Quality of Planned Experiments**. In “Trends in Experimental High Energy Physics”, ed. Jacob R. Stevens (Nova Science Publishers, 2005).
- [4] S.I. Bityukov, N.V. Krasnikov. **On observability of signal above background**. Nucl.Inst.&Meth.A452 (2000) 518.
- [5] S.I. Bityukov, N.V. Krasnikov. **Towards the observation of signal over background in future experiments**. Труды 10-го Международного семинара “Кварки-98”, Суздаль, Россия, Май 17-24, 1998, т.2 стр. 408, ИЯИ РАН, Москва, 1999; Preprint INR 0945a/98, Moscow, 1998; arXiv:physics/9808016.

- [6] S.I. Bityukov, N.V. Krasnikov. **On observability of signal over background.** Proc. of Workshop on "Confidence Limits 17-18 Jan. 2000, Geneva, Switzerland, Yellow report CERN 2000-005, p.219; CMS CR-2000/004; Препринт ИФВЭ 1998-48, 1998; arXiv:physics/9809037.
- [7] S.I. Bityukov, N.V. Krasnikov. **Some problems of statistical analysis in experiment proposals.** Proc. of CHEP'01 International Conference on Computing in High Energy and Nuclear Physics, September 3-7, 2001, Beijing, P.R. China, Ed. H.S. Chen, Science Press, Beijing New York, p.134.
- [8] S.I. Bityukov, S.E. Erofeeva, N.V. Krasnikov, A.N. Nikitenko. **Program for evaluation of the significance, confidence intervals and limits by direct probabilities calculations.** In Proc. of PhyStat'05, September 2005, Oxford, UK, Imperial College Press, 2006, pp.106-107.
- [9] S.I. Bityukov, N.V. Krasnikov. **The probability of making a correct decision in hypotheses testing as estimator of quality of planned experiments.** "Bayesian Inference and Maximum Entropy Methods in Science and Engineering", 23-th International Workshop on Bayesian Inference and Maximum Entropy Methods in Science and Engineering, Jackson Hole, Wyoming, 3-8 August 2003, AIP Conference Proceedings, vol.707:455-464, Melville, NY, 2004; e-Print: physics/0309031.
- [10] S.I. Bityukov, N.V. Krasnikov. **Distinguishability of Hypotheses.** Nucl.Inst.&Meth. A534 (2004) 152; arXiv: hep-ph/0207130.
- [11] S.I. Bityukov, N.V. Krasnikov. **On the Combining Significances.** arXiv:physics/0612178, 2006.
- [12] S.I. Bityukov, N.V. Krasnikov, A.N. Nikitenko, V.V. Smirnova. **Two approaches to Combining Significances.** Proceedings of Science, PoS (ACAT08) 118.
- [13] S.I. Bityukov, N.V. Krasnikov. **Systematic uncertainties in experiments at LHC.** Proc. of 14th Lomonosov Conference on Elementary Particle Physics, Moscow, MSU, 19 - 25 August, 2009, Particle Physics in the Year of Astronomy, ed. Alexander I. Studenikin, p. 69, World Scientific, 2010.
- [14] S.I. Bityukov. **On the Signal Significance in the Presence of Systematic and Statistical Uncertainties.** Journal of High Energy Physics 09 (2002) 060; arXiv: hep-ph/0207130.
- [15] S.I. Bityukov, N.V. Krasnikov. **Signal Significance in the Presence of Systematic and Statistical Uncertainties.** Nucl.Inst.&Meth. A502 (2003) 795.
- [16] S.I. Bityukov, N.V. Krasnikov. **Incorporating systematics and statistical uncertainties into exclusion limits.** Proceedings of the Conference Statistical Problems in Particle Physics, Astrophysics, and Cosmology (PhyStat'2003), Menlo Park, California, 8-11 Sep 2003, eds L. Lyons, R. Mount, R. Reitmeyer, p.318; eConf C030908:THNT002,2003.

- [17] S.I. Bityukov, N.V. Krasnikov, V.A. Tarerechkina. **Confidence intervals for Poisson distribution parameter**. Препринт ИФВЭ 2000-61, Protvino, 2000; arXiv: hep-ex/0108020.
- [18] S.I. Bityukov, N.V. Krasnikov. **Statistically dual distributions and conjugate families**. Proc. of 25th International Workshop on Bayesian Inference and Maximum Entropy Methods in Science and Engineering (MaxEnt'05), San Jose State University, San Jose CA USA, Aug 7-12,2005, AIP Conference Proceedings, vol.**803**:398-402, Melville, NY, 2005;
- [19] S.I. Bityukov, N.V. Krasnikov, V.V. Smirnova. **On uncertainties associated with expected backgrounds in planned experiments**. Proc. of 30th International Workshop on Bayesian Inference and Maximum Entropy Methods in Science and Engineering, Chamonix, France, July 4-9, 2010, AIP Conference Proceedings, vol.**1305**:235-241, Melville, NY, 2010.
- [20] S.I. Bityukov, N.V. Krasnikov. **The search for new physics by the measurement of the 4-jet cross section at LHC and FNAL**. Modern Physics Letter A12 (1997) 2011; Preprint INR 0945/97, Moscow, May 1997; arXiv: hep-ph/9705338.
- [21] S.I. Bityukov, N.V. Krasnikov. **The Measurement of the 4-jet Cross Section at LHC as a Probe of New Physics**. CMS NOTE-1997/067, 1997.
- [22] S.I. Bityukov, N.V. Krasnikov. **Gaugino pair production at LHC (CMS)**. Proc. of the XI-th International Conference on “Problems of Quantum Field Theory (PQFT'98)”, Dubna, Russia, July 13-19, 1998; arXiv: hep-ph/9810294.
- [23] S.I. Bityukov, N.V. Krasnikov. **The Reach of LHC (CMS) for Models with Effective Supersymmetry and Nonuniversal Gaugino Masses**. Труды 11-го Международного семинара “Кварки-2000”, Пушкин, Россия, Май 13-21, 2000, ИЯИ РАН, Москва, 2001; arXiv: hep-ph/0005246.
- [24] S.I. Bityukov, N.V. Krasnikov. **LHC(CMS) SUSY discovery potential for the case of nonuniversal gaugino masses**. The 9th International Conference on Supersymmetry and Unification of Fundamental Interactions (SUSY'01), June 11-17, Dubna, Russia; arXiv: hep-ph/0110015.
- [25] S.I. Bityukov, N.V. Krasnikov. **LHC(CMS) SUSY discovery potential for nonuniversal gaugino and squark masses and the determination of the effective SUSY scale**. Труды 12-го Международного семинара “Кварки-2002”, Новгород, Россия, 1-7 июня 2002, ИЯИ РАН, Москва, 2004, стр. 478; arXiv:hep-ph/0210269.
- [26] S.I. Bityukov, N.V. Krasnikov. **Gaugino pair production at LHC for the case of nonuniversal gaugino masses**. Nuovo Cim. 112A (1999) 91; arXiv: hep-ph/9903519.
- [27] S.I. Bityukov, N.V. Krasnikov. **Search for SUSY at LHC in Jets + E_T^{miss} final states for the case of nonuniversal gaugino masses**. Phys.Lett. B469 (1999) 149; Phys.Atom.Nucl. 64 (2001) 1315; arXiv:hep-ph/9907257.

- [28] S.I. Bityukov, N.V. Krasnikov. **The LHC (CMS) Discovery Potential for Models with Effective Supersymmetry and Nonuniversal Gaugino Masses**. Ядерная физика 65 (2002) 1374; Phys. of Atomic Nucl. 65 (2002) 1341; CMS NOTE-2001/029; arXiv: hep-ph/0102179.
- [29] S.I. Bityukov, N.V. Krasnikov. **The search for sleptons and flavor lepton number violation at LHC (CMS)**. Ядерная физика 62 (1999) 1288; Phys.Atom.Nucl. 62 (1999) 1213; Препринт ИФВЭ 1997-67; arXiv: hep-ph/9712358.
- [30] S.I. Bityukov, N.V. Krasnikov. **The search for charged sleptons and flavor lepton number violation at LHC (CMS)**. Труды 10-го Международного семинара “Кварки-98”, Суздаль, Россия, Май 17-24, 1998, т.2 стр. 408, ИЯИ РАН, Москва, 1999; CMS NOTE-1998/040, 1998; arXiv:hep-ph/9806504.
- [31] Yu.M. Andreev, S.I. Bityukov, N.V. Krasnikov. **Sleptons at LHC(CMS)**. Труды 13-го Международного семинара “Кварки-2004”, Пушкинские горы, Россия, Май 24-30, 2004, ИЯИ РАН, Москва, 2004.
- [32] Yu.M. Andreev, S.I. Bityukov, N.V. Krasnikov. **Sleptons at post-WMAP benchmark points at LHC(CMS)**. Ядерная Физика, 68 (2005); Phys.Atom.Nucl. 68 (2005) 340; arXiv:hep-ph/0402229.

Рукопись поступила 18 октября 2011 г.

Автореферат отпечатан с оригинала-макета, подготовленного автором.

С.И. Битюков

Методика статистического анализа данных при планировании экспериментов по поиску новых явлений в физике высоких энергий.

Оригинал-макет подготовлен с помощью системы **L^AT_EX**.

Подписано к печати 26.10.2011. Формат 60 × 84/16.
Офсетная печать. Печ.л. 1,62. Уч.-изд.л. 2,45. Тираж 100. Заказ 58.
Индекс 3649.

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

Индекс 3649

А В Т О Р Е Ф Е Р А Т 2011–22, И Ф В Э, 2011
