

ГОСУДАРСТВЕННЫЙ НАУЧНЫЙ ЦЕНТР РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

ИНСТИТУТ ФИЗИКИ ВЫСОКИХ ЭНЕРГИЙ

Сергей Иванович Битюков

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

01.04.23 — физика высоких энергий

Д и с с е р т а ц и я
на соискание ученой степени
доктора физико–математических наук

Протвино 2011

Диссертация соответствует в паспорте специальности 01.04.23 области исследований “Создание математических методов и систем обработки и анализа экспериментальных ускорительных данных”.

План диссертации

- **Основные подходы к оценке результатов поисковых экспериментов в физике высоких энергий**
- **Учет систематических и статистических неопределенностей**
- **Метод комбинированного оценивания нескольких фоновых процессов**
- **Большой адронный коллайдер и поиск новой физики при измерении 4-х струйных событий**
- **Исследование потенциала открытия суперсимметричной физики**
- **Выводы**

Введение

Методика статистического анализа и планирования физических измерений является актуальной задачей.

С другой стороны, поиск новых явлений это основная задача физических исследований. Поэтому использование разработанной методики статистического анализа данных при изучении возможности обнаружения суперсимметрии или при поиске новой физики через измерение сечений 4-х струйных событий также весьма актуальны.

Целью диссертационной работы является как разработка методики оценки качества планируемых результатов экспериментов, так и использование разработанной методики в задачах поиска новых физических явлений, в частности в экспериментах на установке Компактный мюонный соленоид (КМС) на ускорителе Большой адронный коллайдер (БАК).

Постановка задачи

Одна из основных целей поисковых экспериментов – обнаружение проявлений новой физики, которое выражается в виде избытка или недостатка зарегистрированных событий от ожидаемого количества событий, прогнозируемого в рамках Стандартной модели. Есть причины, по которым поток событий предполагается Пуассоновским, то есть вероятность увидеть в эксперименте r событий при ожидаемом их количестве μ равна

$$P(r|\mu) = \frac{\mu^r e^{-\mu}}{r!}, \quad (1)$$

На Рис. 1 показаны распределения вероятностей для распределения Пуассона с разными значениями параметров: слева $\mu = 10$, справа $\mu = 20$.

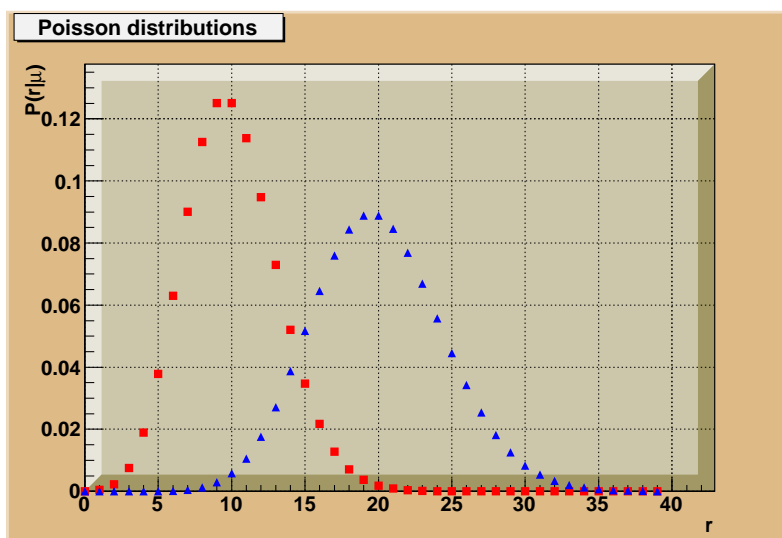


Рис. 1: Распределения вероятностей для распределения Пуассона с разными значениями параметров: слева $\mu = 10$, справа $\mu = 20$.

Значимость превышения сигнала над фоном

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 :

(а) “значимость” $S_1 = \frac{n_s}{\sqrt{n_b}}$,

(б) “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 для поиска нового явления. Возникает вопрос: Какой тип значимости использовать при представлении данных ?

При статистическом анализе неопределенностей, которые возникают при использовании этих значимостей, диссертантом была получена формула

$$S_{c12} = 2 \cdot S_{12} = 2(\sqrt{n_s + n_b} - \sqrt{n_b}).$$

Данная формула соответствует условию, когда известны только ожидаемые значения числа фоновых n_b и сигнальных n_s событий.

Формула получила признание и широко используется в экспериментальных исследованиях.

Рассмотрим статистическую гипотезу

H_0 : новая физика существует в Природе

при альтернативной гипотезе

H_1 : новой физики в Природе нет.

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)

$$\beta = P(\text{принять } H_0 | H_0 \text{ неверна}).$$

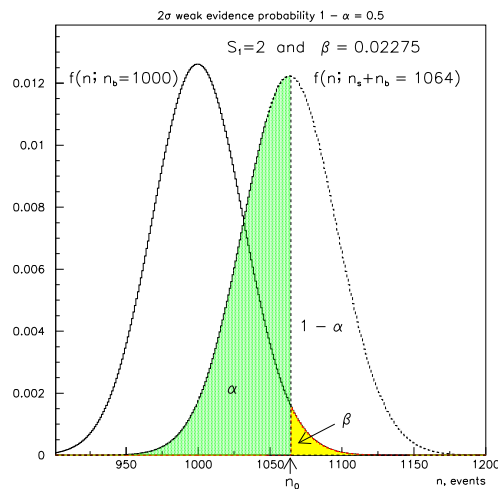


Рис. 2: Случай $n_b \gg 1$. Распределение Пуассона с параметрами $\mu = n_b = 1000$ (слева) и $\mu = n_b + n_s = 1064$ (справа). Здесь $1 - \alpha = \alpha = 0.5$ и $\beta = 0.02275$ (то есть $S_1 = 2$).

Сравнение значимостей

Неопределенность в принятии решения можно выразить через комбинацию ошибок первого и второго рода. Пусть это будет их сумма $\kappa = \alpha + \beta$.

На следующем рисунке 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 обнаружения нового явления (значимость ≥ 5).

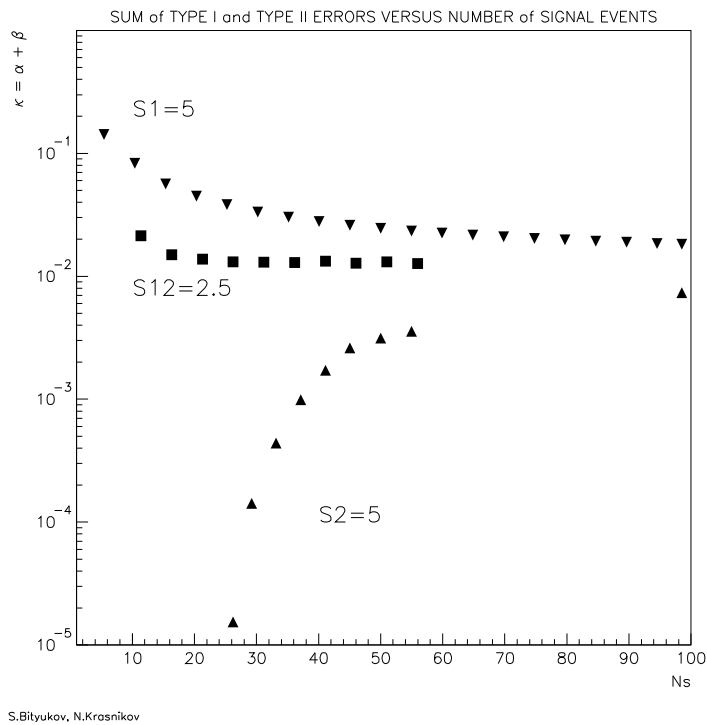


Рис. 3: Зависимость κ от n_s для значимостей $S_1 = 5$, $S_2 = 5$ и $S_{c12} = 5$.

Значимости при произвольном значении α

Как это видно из Рис.2, значимость определяется (в случае ожидаемого числа как сигнальных, так и фоновых событий) при условии 50% вероятности ($\alpha=50\%$) того, что, при наличии сигнала, будет зарегистрировано число событий больше или равно их ожидаемому числу $n_s + n_b$. Для значимостей S_1 и S_{c12} были получены формулы, позволяющие находить значимость при заранее заданной вероятности ошибке 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.4 показана ситуация, соответствующая $1-\alpha=75\%$.

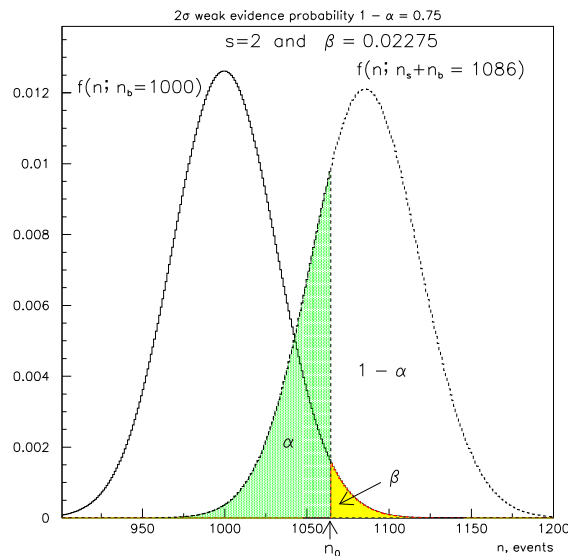


Рис. 4: Случай $n_b \gg 1$ и $S_1 = 2.72$. Распределения Пуассона с параметрами $\mu = 1000$ (слева) и $\mu = 1086$ (справа). Здесь $1 - \alpha = 0.75$ и $\beta = 0.02275$ (то есть эффективная значимость $S_1(\alpha) = 2$ при $\alpha=0.25$).

Значимость S_{cP}

Фактически это значимость S_1 , но в применении к распределению Пуассона. Это есть вероятность в распределении Пуассона со средним n_b того, что случайная величина примет значение больше или равно величине n_{obs} , преобразованная в эквивалентное число стандартных отклонений для стандартного нормального распределения. При подготовке физической программы для установки КМС (БАК), было принято решение использовать ее как одну из основных опций при планировании измерений. Значимость определяется через ошибку II-го рода β при проверке гипотезы о наличии новой физики:

$$\beta = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{S_{cP}}^{\infty} e^{-\frac{x^2}{2}} dx, \quad (4)$$

где $\beta = \sum_{i=n_s+n_b}^{\infty} \frac{n_b^i e^{-n_b}}{i!}$.

В отличии от значимости S_{c12} данная значимость учитывает только флуктуации числа фоновых событий. S_1 фактически тоже вычисляется из подобного равенства

$$\beta = \frac{1}{\sqrt{2\pi n_b}} \int_{S_1 \sqrt{n_b}}^{\infty} e^{-\frac{(x-n_b)^2}{2n_b}} dx.$$

Диссертантом была написан код ScP и велось его сопровождение при массом использовании во время подготовки программы физических исследований на установке КМС. Программа позволяет учитывать статистические и систематические ошибки как для значимости S_{cP} , так и для значимости S_{c12} .

Вероятность неправильного решения и разделимость гипотез

В диссертации рассмотрен ряд возможностей для определения оценки неопределенности при проверке гипотез.

Так, если определить неопределенность $\hat{\kappa}$ как полусумму ошибок первого и второго рода, то, в случае теста равных хвостов (критическая величина теста выбирается из условия $\alpha = \beta$), эта величина $\hat{\kappa}$ дает точное значение вероятности неправильного решения. Для распределения Пуассона это же справедливо и для теста равной вероятности (критические величины выбираются из равенства функций плотности вероятности в точках их пересечений). В отличие от теста равных хвостов, тест равной вероятности позволяет однозначно определять неопределенность для произвольных распределений.

Следующее определение неопределенности позволяет находить вероятность неправильного решения при любой критической величине

$$\tilde{\kappa} = \frac{\alpha + \beta}{2 - (\alpha + \beta)}. \quad (5)$$

В этом случае оценкой делимости гипотез можно назвать вероятность правильного решения, которая равна

$$1 - \tilde{\kappa}$$

Универсальная значимость

Соответственно, через вероятность неправильного решения $\tilde{\kappa}$ можно определить универсальную значимость S_U

$$\tilde{\kappa} = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{S_U}^{\infty} e^{-\frac{x^2}{2}} dx \quad (6)$$

которая позволяет оценить неопределенность в принятии решений при проверке гипотез на языке стандартных отклонений.

Комбинирование оценок значимостей превышения сигнала над фоном I

Уместно привести следующую цитату: “Пусть один эксперимент видит эффект на уровне 3-х сигм, а другой эксперимент видит тот же эффект на уровне 4-х сигм. Что такое комбинированная значимость? Так как этот вопрос некорректно поставлен, то статистическая литература содержит огромное число статей по этой теме.” (R. Cousins). Соответственно много методов: метод минимума “п”-величины, метод Уилкинсона, метод Фишера, метод Стоуфера, логит-метод Джорджи и др.

Наиболее распространены метод Фишера, в котором, например в случае двух измерений, две ошибки II рода β_1 и β_2 комбинируются таким образом, что ошибка второго рода в комбинированной оценке равна $\beta_{comb} = \beta_1\beta_2[1 - \ln(\beta_1\beta_2)]$, и метод Стоуфера комбинирования значимостей одного вида (например для двух наблюдений значимости \hat{S}_1 и \hat{S}_2 комбинированная значимость $\hat{S}_{comb} = \frac{\hat{S}_1 + \hat{S}_2}{\sqrt{2}}$).

При планировании эксперимента ожидаемую значимость можно рассматривать как случайную величину, которая является функцией двух Пуассоновских случайных величин с параметрами, соответственно, n_s и n_b . В силу построения, значимости S_{c12} и S_{cP} в широком диапазоне параметров n_s и n_b можно рассматривать как нормально распределенные случайные величины с дисперсиями близкими к единице. Это позволяет определить комбинированную значимость.

Комбинирование оценок значимостей превышения сигнала над фоном II

Пусть дано n наблюдаемых (в Монте Карло или в реальном эксперименте) значимостей \hat{S}_i , $i = 1, \dots, k$.

Определим наблюдаемую суммарную значимость \hat{S}_{sum} , наблюдаемую комбинированную значимость \hat{S}_{comb} и наблюдаемую среднюю значимость \hat{S}_{mean} для k частных наблюдаемых значимостей \hat{S}_i со стандартными отклонениями $\sigma(S_i) \sim 1$:

$$\hat{S}_{sum} = \sum_{i=1}^k \hat{S}_i, \quad \sigma^2(\hat{S}_{sum}) = \sum_{i=1}^k \sigma^2(S_i), \quad (7)$$

$$\hat{S}_{comb} = \frac{\hat{S}_{sum}}{\sqrt{\sigma^2(\hat{S}_{sum})}}, \quad (8)$$

$$\hat{S}_{mean} = \frac{\hat{S}_{sum}}{k}. \quad (9)$$

Формула в методе Стоуфера является частным случаем формулы (8), так как, если $\sigma(S_i) \sim 1$, то $\sqrt{\sigma^2(\hat{S}_{sum})} \sim \sqrt{k}$.

Если использовать свойство распределений Пуассона: сумма распределений Пуассона с параметрами $\lambda_1, \dots, \lambda_k$ совпадает с распределением Пуассона с параметром $\lambda_1 + \dots + \lambda_k$, то можно определить комбинированную значимость измерений с однозначно определяемыми весами.

Классификация неопределенностей

Статистические неопределенности являются результатом стохастических флуктуаций. Такие неопределенности при оценке параметров уменьшаются с увеличением объема выборки.

Систематические неопределенности возникают из неопределенностей, ассоциированных с природой измерительной аппаратуры, предположений сделанных экспериментатором или из свойств используемой модели для вывода искомой величины из наблюдаемых данных. Систематические неопределенности можно классифицировать следующим образом:

– Неопределенности типа 1 это неопределенности, которые можно оценить с помощью дополнительных измерений. Хотя их можно обрабатывать как статистические, их нельзя сделать незначительными из-за, например, ограничений по времени для дополнительных измерений.

– Неопределенности типа 2 возникают из модельных предположений при измерениях или из плохо установленных свойств данных и/или процедур обработки, которые могут внести систематическое смещение в результаты.

– Неопределенности типа 3 являются неопределенностями в основах теоретической парадигмы, используемой при анализе данных. Их сложно учесть без дополнительных предположений.

Обработка статистических неопределенностей I

Рассмотрим статистические неопределенности, возникающие при планировании эксперимента из-за неточного знания сечений фоновых и сигнальных процессов.

Пусть величины $n_s = \hat{n}_s$ и $n_b = \hat{n}_b$ известны из Монте Карло вычислений. В этом случае их можно рассмотреть как случайные величины. Они также являются оценками неизвестных параметров. Следовательно, величины n_c (критическая величина при проверке гипотез), α и β также случайные величины, а величина $1 - \tilde{\kappa}$ является оценкой разделимости гипотез. Рассмотрим как неопределенность в знании величин n_s и n_b влияет на меру разделимости гипотез $1 - \tilde{\kappa}$.

Пусть потоки сигнальных и фоновых событий пуассоновские и независимые. 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:

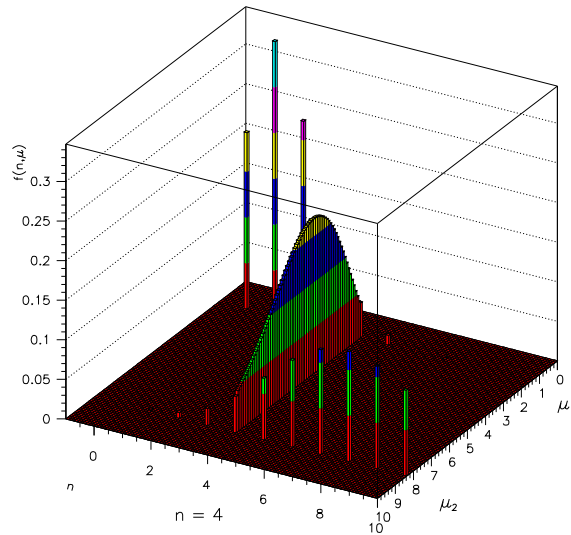
$$g_n(\mu) = \frac{\mu^n}{n!} e^{-\mu}, \quad \mu > 0, \quad n > -1. \quad (10)$$

Обработка статистических неопределенностей II

Диссертантом было получено важное тождество

$$\sum_{k=n+1}^{\infty} f(k; \mu_1) + \int_{\mu_1}^{\mu_2} g_n(\mu) d\mu + \sum_{k=0}^n f(k; \mu_2) = 1, \quad (11)$$

для любых $\mu_1 \geq 0$ и $\mu_2 \geq 0$. Оно позволяет производить интервальную оценку параметра μ даже по одному измерению числа событий n в пуассоновском потоке событий (в нашем случае это число случайных событий появившихся в некоторой системе в определенный промежуток времени). Значение параметра распределения Пуассона (доверительная плотность) в случае одного измерения подчиняется Гамма-распределению $\Gamma_{1,1+n}$ со средним, модой и дисперсией равными $n+1$, n и $n+1$, соответственно.



Обработка статистических неопределенностей III

Тождество (11) показывает, что условное распределение вероятности истинного значения параметра распределения Пуассона подчиняется Гамма-распределению $\Gamma_{1,1+n}$ при условии, что измеренная величина числа событий есть n . Как результат мы можем объединить Байесовские и частотные вероятности в рамках частотного подхода при решении конкретных задач.

Например, в предположении, что интегральная светимость Монте Карло эксперимента точно такая же как и интегральная светимость в реальном эксперименте, можно вычислить вероятность принять правильное решение с учетом статистической неопределенности в Монте Карло результатах

$$\left\{ \begin{array}{l} \hat{\alpha} = \int_0^\infty g_{n_s+n_b}(\mu) \sum_{i=0}^{n_c} f(i; \mu) d\mu = \sum_{i=0}^{n_c} \frac{C_{n_s+n_b+i}^i}{2^{n_s+n_b+i+1}}, \\ \hat{\beta} = 1 - \int_0^\infty g_{n_b}(\mu) \sum_{i=0}^{n_c} f(i; \mu) d\mu = 1 - \sum_{i=0}^{n_c} \frac{C_{n_b+i}^i}{2^{n_b+i+1}}, \\ 1 - \tilde{\kappa} = 1 - \frac{\hat{\alpha} + \hat{\beta}}{2 - (\hat{\alpha} + \hat{\beta})}, \end{array} \right. \quad (12)$$

где $C_N^i = \frac{N!}{i!(N-i)!}$. В диссертации получены формулы для произвольной интегральной светимости Монте Карло эксперимента (см. формулу 13 чуть позже).

Влияние статистической неопределенности на вероятность открытия

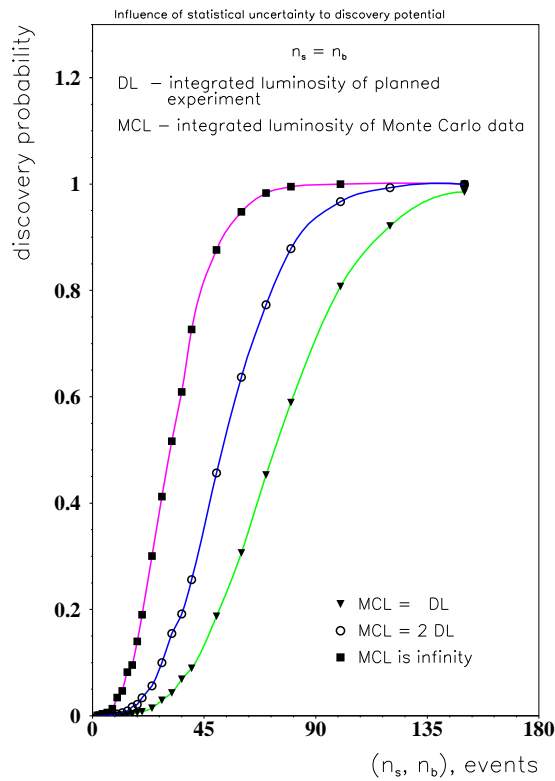


Рис. 5: Зависимость вероятности открытия от n_s с и без учета статистической неопределенности в определении n_s и n_b . Случай $n_s = n_b$. Кривые построены в предположении, что $\beta = 2.85 \cdot 10^{-7}$.

Под вероятностью открытия понимается вероятность того, что значимость, полученная при проведении эксперимента, будет больше 5.

Метод комбинированного оценивания нескольких фоновых процессов

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 ожидаемой (или уже наблюдаемой) суммы числа фоновых и сигнальных событий над ожидаемым числом фоновых событий.

Основные этапы I

Для каждого фона i , $i = t\bar{t}$, tW , $W + jets$, Wc , QCD , и т.д. определяется величина систематической неопределенности расчетами Монте Карло. Эти неопределенности отражают неточность в знании ожидаемого числа фоновых событий N_{b_i} от источника фона i . Результатом этих Монте Карло экспериментов является набор вероятностей того, что данное значение N_{b_i} могло возникнуть благодаря систематической неопределенности из других значений $\dots, N_{b_i}-1, N_{b_i}, N_{b_i}+1, \dots$ и именно их надо рассматривать как истинное значение параметра – “ожидаемое число фоновых событий из источника i ”. На Рис. 6 показано распределение вероятностей, что значение параметра Пуассоновского распределения для числа фоновых событий от процесса рождения $t\bar{t}$ пары при заданной светимости эксперимента будет принимать указанные в гистограмме значения.

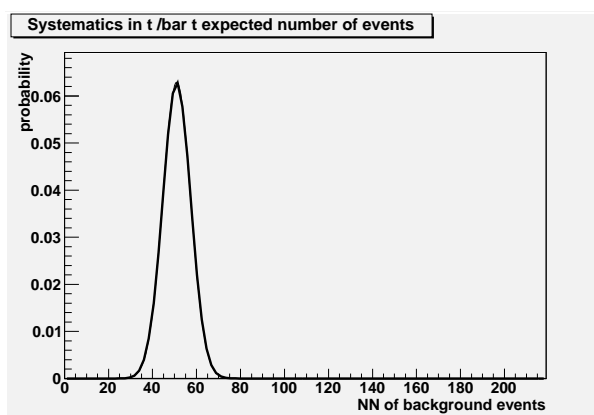


Рис. 6: Распределение вероятностей для ожидаемого числа фоновых событий в процессе $t\bar{t}$.

Основные этапы II

На втором этапе учитывается статистическая неопределенность, которая связана с заданной интегральной светимостью Монте Карло эксперимента при расчетах конкретного фона, и предсказываются вероятности увидеть в эксперименте k фоновых событий из i -го источника фонов. Эти вероятности вычисляются для каждого возможного значения параметра “ожидаемое число фоновых событий из источника i ” по формуле:

$$p(\text{background in experiment} = k | M_b, m) = C_{M_b+k}^k \frac{m^{1+M_b}}{(m+1)^{1+M_b+k}}, \quad (13)$$

где $k = 0, 1, \dots$ есть возможное число фоновых событий в реальном эксперименте, N_b - возможное ожидаемое число фоновых событий ($\dots, N_{b_i}-1, N_{b_i}, N_{b_i}+1, \dots$), $M_b = m \cdot N_b$ - ожидаемое число фоновых событий в Монте Карло эксперименте с интегральной светимостью, которая равна m интегральным светимостям реального эксперимента и $C_{M_b+k}^k = \frac{(M_b+k)!}{M_b!k!}$.

Основные этапы II

Все распределения (полученные для i -го фона) по каждому k суммируются с соответствующими весами, определенными на первом этапе как вероятности.

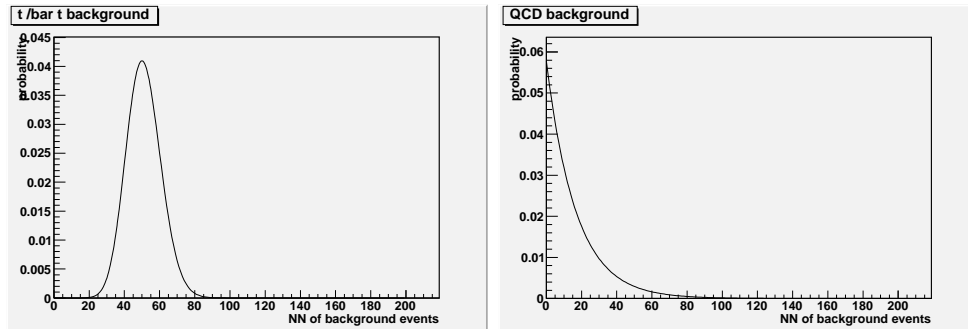


Рис. 7: Ожидаемые вероятности числа фоновых событий от различных источников фонов: $t\bar{t}$ (слева) и QCD (справа).

Основные этапы III

Третий этап это объединение всех фонов. Каждый фон рассматривается как независимый от других. Например, объединение двух распределений вероятностей для фона 1 и для фона 2 записывается следующим образом

$$p(\text{background in experiment} = k | N_{b_1} + N_{b_2}) = \sum_{j=0}^k p(\text{background in experiment} = j | N_{b_1}) \cdot p(\text{background in experiment} = k-j | N_{b_2}). \quad (14)$$

На Рис.8 показаны результаты объединения вероятностей для фонов без учета QCD процессов (слева) и с учетом QCD процессов (справа). Данные распределения показывают вероятности увидеть k фоновых событий в эксперименте с заданной интегральной светимостью и с учетом систематических и статистических неопределенностей в знании фонов.

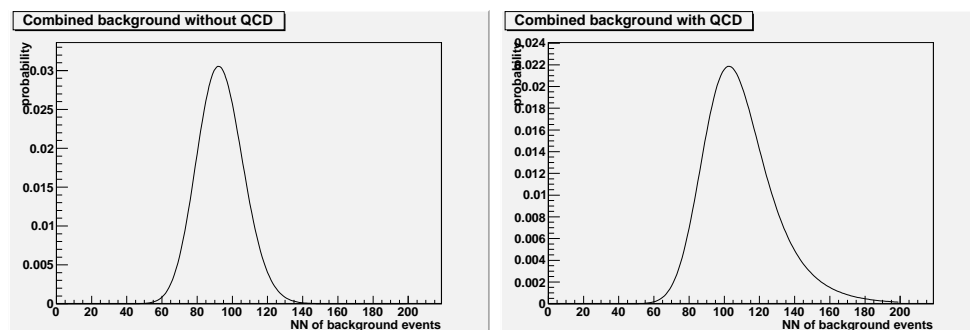


Рис. 8: Распределения вероятностей для числа фоновых событий в эксперименте. Слева без учета QCD процессов, справа с учетом.

Основные этапы IV

На заключительном этапе определяется величина значимости превышения ожидаемого (или наблюдаемого) суммарного числа фоновых и сигнальных событий над ожидаемым распределением вероятностей возможного числа фоновых событий. Вычисляется вероятность ϵ того, что реализованное в эксперименте число фоновых событий будет больше или равно ожидаемой (или наблюдаемой) сумме чисел фоновых и сигнальных событий. Эта вероятность преобразуется в значимость S_{cP} по формуле

$$\int_{S_{cP}}^{\infty} \varphi(x) dx = \epsilon \quad (15)$$

где

$$\epsilon = \sum_{k=\text{expected signal}+\text{expected background}}^{\infty} p(\text{background in experiment} = k),$$

$\varphi(x)$ это плотность вероятности стандартного нормального распределения.

В диссертации приводится численный пример такого расчета.

Метод имеет ясную вероятностную интерпретацию и рассматривается как частотная альтернатива Байесовским процедурам оценки фона. В частности, метод использовался при анализе оценок вклада фоновых процессов, полученных методами многофакторного анализа, при измерениях t -канального сечения рождения одиночного топ-кварка на установке Компактный Мюонный Соленоид на ускорителе Большой Адронный Коллайдер.

Большой Адронный Коллайдер (БАК)

Большой Адронный Коллайдер вступил в строй в сентябре 2008 г. После ремонта он продолжил работу в 2009 г. На начальной стадии запуска в 2009-2010 годах полная энергия pp -столкновений была 0.9 ТэВ и 2.36 ТэВ. В настоящее время полная энергия 7 ТэВ в системе центра масс (1400 банчей в цикле, $1.25 \cdot 10^{33} \text{см}^{-2} \text{сек}^{-1}$).

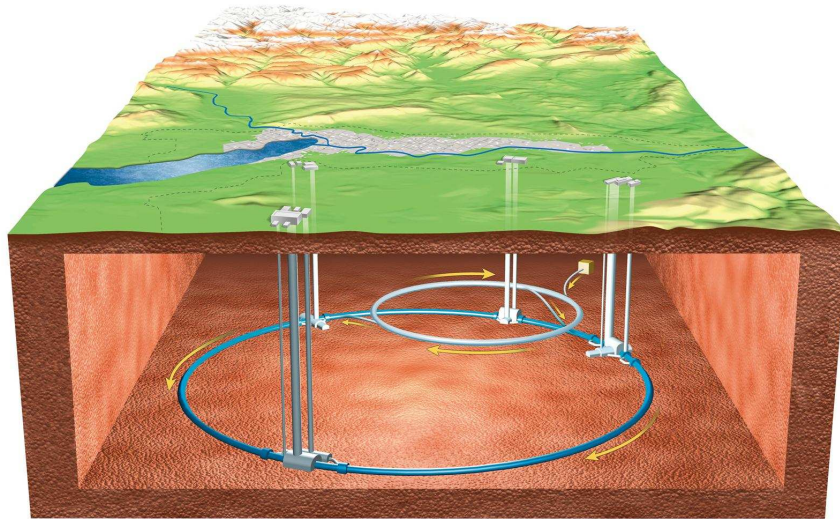


Рис. 9: Географическое расположение ЛНС (фотограф: Philippe Mouche).

Компактный Мюонный Соленоид (КМС)

КМС детектор состоит из внутреннего детектора(трэкера), электромагнитного калориметра, адронного калориметра и мюонного спектрометра. Схематический вид КМС детектора представлен на рисунке 10

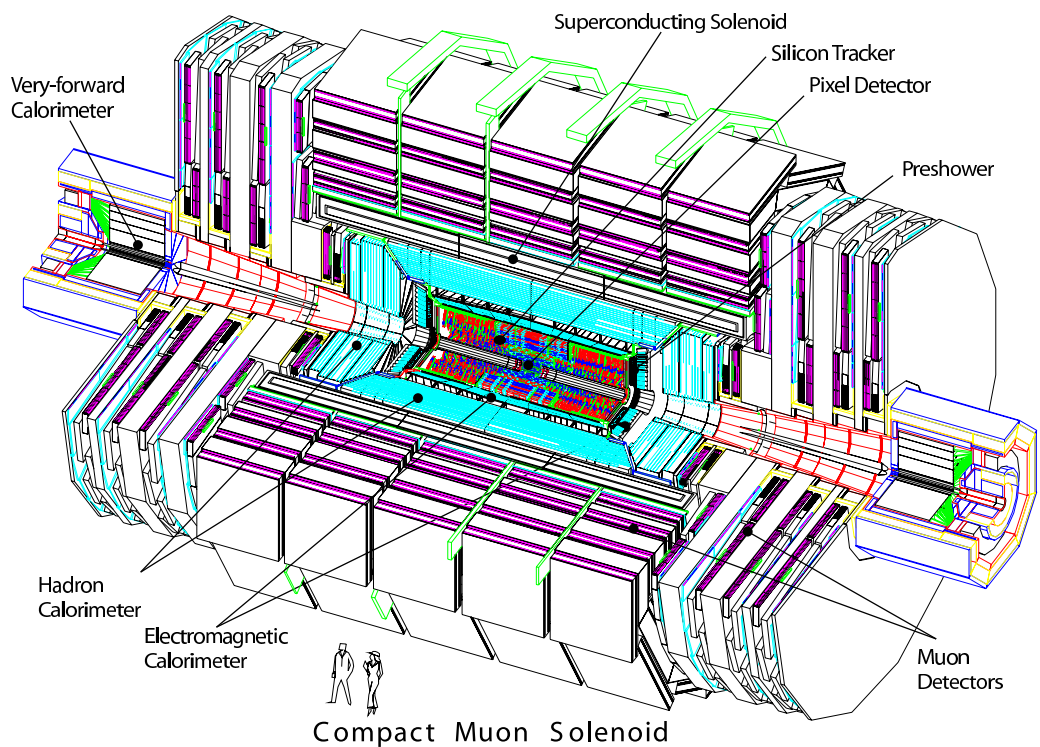


Рис. 10: CMS: общий вид.

Возможности измерения сечения рождения четырехструйных событий на Теватроне и на БАК

Рассмотрены модель со скалярным цветным октетом и суперсимметричная модель с нарушением R-четности. В обеих моделях рождение пары новых частиц, распадающихся на две струи приводит к появлению 4-х струйных событий. Поэтому измерение 4-струйного дифференциального сечения по инвариантной массе двухструй позволяет обнаружить проявление новой физики. Основной фон возникает от обычных 4-х струйных QCD событий.

Модель со скалярным цветным октетом

Относительно легкие ($M \leq O(1)TeV$) скалярные цветные октеты предсказаны в некоторых несуперсимметричных и суперсимметричных моделях в Теории великого объединения (GUT). Такие частицы описываются самосопряженным скалярным полем.

Распадается скалярной октет в основном в два глюона через одно-петлевые диаграммы подобные соответствующим одно-петлевым диаграммам, описывающим распад Хиггс-бозона на два фотона. Сечение одиночного рождения скалярного октета крайне мало. Однако парное рождение скалярных октетов имеет большое сечение. Оно проявляется в виде четырехструйных событий.

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

Скварки в моделях с нарушением R-четности

Минимальная суперсимметричная стандартная модель (МССМ) рассматривается как основной кандидат при суперсимметричном обобщении Стандартной модели. В МССМ дополнительная симметрия, называемая R-четностью, накладывается для того, чтобы избежать перенормируемости взаимодействий, нарушающих лептонное и барионные числа. Однако, сохранение R-четности постулируется без глубокого теоретического обоснования.

Существование взаимодействия нарушающего R-четность приводит к распаду правых скварков в два антикварка. Таким образом каждая пара правых скварков порождает 4 струи.

Для вычислений использовалась программа ISASUSY. Результаты вычислений представлены в Таблицах 3, 4.

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

Оценки КХД фона

Основным фоном являются КХД струи. Для оценки КХД фонов использовалась программа RUTHIA 5.7. Использовалось стандартное для эксперимента UA1 определение струи. Радиус (R) конуса струи выбирался равным 0.4 или 1. Обрезания по поперечному импульсу струи (p_{T_0}) брались для БАК 100 ГэВ/с, 150 ГэВ/с, 200 ГэВ/с, 300 ГэВ/с, для Теватрона 50 ГэВ/с и 100 ГэВ/с. События с 4 струями отбирались таким образом, чтобы инвариантные массы для двух струй удовлетворяли условиям

$$|M_{ij,jet} - M| \leq \delta, \quad (16)$$

$$|M_{kl,jet} - M| \leq \delta \quad (17)$$

и, при этом, выполнялось

а. $p_{Tjet} \geq p_{T0}$,

б. $|\eta_{jet}| \leq \eta_0$.

Здесь $i, j, k, l = 1, 2, 3, 4$ ($i \neq j, i \neq k, i \neq l, j \neq k, j \neq l, k \neq i, k \neq j, k \neq l$) метки номера струи, $\eta_0 = 2.5$ для БАКа, $\eta_0 = 0.5$ для Теватрона. Параметр δ задавал точность определения инвариантной массы (для БАК $\delta = 50$ ГэВ - оптимистический вариант и $\delta = 100$ ГэВ – реалистичный вариант, для Теватрона использовалось значение $\delta = 25$ ГэВ). Эти величины соответствуют приблизительно 10% или 5% разрешения по массе. Было сгенерено по 10^6 событий для каждого значения p_{T_0} и R как для БАК, так и для Теватрон.

Потенциал открытия Большого адронного коллайдера и Теватрона

Для определения потенциала открытия в данном исследовании использовалась значимость $S_1 = \frac{N_{signal}}{\sqrt{N_{background}}}$. Значимость определялась для интегральной светимости БАК $L_t = 10^4 pb^{-1}$ и Теватрона $L_t = 100 pb^{-1}$. Число сигнальных и фоновых событий определялось следующим образом $N_{signal} = \sigma_{signal} L_t$ and $N_{background} = \sigma_{background} L_t$. Результаты вычислений приведены в Таблицах 5, 6, 7. В таблицах приведено значения сечений для фоновых и сигнальных (как для скалярного октета, так для парного рождения скварков) событий, а также пороговое сечение открытия (значение сечения сигнального процесса при котором $S_1 \geq 5$).

Следует заметить, что значимость S_1 не совсем правильно отражает потенциал открытия на малой статистике и для случая, когда число фоновых событий много больше числа сигнальных событий.

В рассмотренном исследовании было найдено, что скалярные октеты и/или скварки могут быть обнаружены при изучении распределений дифференциальных сечений для 4-х струйных событий по инвариантным массам двухструйных событий с массами до 900-1100 ГэВ на БАК и с массами 150 ГэВ на Теватроне.

Потенциал открытия Большого адронного коллайдера и Теватрона

Таблица 5: Сечения (пикобарны) фоновых и сигнальных событий на БАК ($p_T \geq p_{T0} = 100 \text{ GeV}$, $R = 0.4$, $L_t = 10^4 \text{ pb}^{-1}$).

M(TeV)	0.3	0.5	0.7	0.9	1.1
$\sigma(4jets, back.)$	1200	430	84	19	3.8
$\sigma(sig.disc.)$	1.7	1.1	0.46	0.22	0.1
$\sigma^{ac}(\Phi\Phi)$	25	3.7	0.61	0.12	0.040
$\sigma^{ac}(squarks)$	17	2.3	0.44	0.13	0.053

Таблица 6: Сечения (пикобарны) фоновых и сигнальных событий на БАК ($p_T \geq p_{T0} = 300 \text{ GeV}$, $R = 1$, $L_t = 10^4 \text{ pb}^{-1}$).

M(TeV)	0.3	0.5	0.7	0.9	1.1
$\sigma(4jets, back.)$	0.043	0.26	0.60	1.1	0.43
$\sigma(sig.disc.)$	0.011	0.026	0.040	0.052	0.033
$\sigma^{ac}(\Phi\Phi)$	6.7	1.2	0.33	0.068	0.024
$\sigma^{ac}(squarks)$	4.5	0.74	0.24	0.092	0.033

Таблица 7: Сечения (пикобарны) фоновых и сигнальных событий на Теватрон ($p_T \geq p_{T0} = 50 \text{ GeV}$, $R = 0.4$, $L_t = 10^2 \text{ pb}^{-1}$).

M(GeV)	125	175	225	275
$\sigma(4jetsback.)$	0.34	0.51	0.17	0.17
$\sigma^{ac}(sig.disc.)$	0.29	0.36	0.21	≤ 0.21
$\sigma^{ac}(\Phi\Phi)$	2.2	0.22	0.042	0.0061
$\sigma^{ac}(squarks)$	1.6	0.36	0.078	0.017

Суперсимметрия

Суперсимметрия (СУСИ) это новый тип симметрии, которая связывает бозоны и фермионы. Локально суперсимметричные теории с неизбежностью включают в себя гравитацию. СУСИ также является существенным ингредиентом суперструнных теорий. Суперсимметричные электрослабые модели дают простейшее решение проблемы калибровочных иерархий. В реальной жизни суперсимметрия нарушена и для решения проблемы калибровочных иерархий массы суперчастиц должны быть легче, чем $O(1) TeV$.

Супергравитация обеспечивает естественное объяснение нарушения суперсимметрии, а именно, учет нарушения супергравитации в скрытом секторе приводит к мягкому нарушению суперсимметрии в наблюдаемом секторе.

МССМ

Простейшее обобщение СМ - минимальная суперсимметричная 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 $Y = \pm 1$, что вытекает из требования отсутствия γ_5 аномалий. Два изодублета хиггсовских полей также необходимы для придания масс “верхним” и “нижним” фермионам. 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}

Суперсимметрия: произвольные массы

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 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 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.

Суперсимметрия: Особенности

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 $\tilde{\chi}_1^0$

$$\tilde{g} \rightarrow q\bar{q}\tilde{\chi}_1^\pm, q\bar{q}\tilde{\chi}_2^0, \quad (18)$$

$$\tilde{q} \rightarrow q\tilde{\chi}_2^0, q'\tilde{\chi}_1^\pm \quad (19)$$

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 (18), (19) 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

$$\text{no leptons} + \text{jets} + E_T^{miss} \quad (20)$$

Расчеты подтверждают этот качественный вывод.

Моделирование отклика детектора

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

- Предполагалось 90% эффективность регистрации треков заряженных частиц с $p_T > 1$ ГэВ для $|\eta| < 2.5$ в магнитном поле (4 Тесла).
- Геометрический аксептанс для μ и e равен, соответственно $|\eta| < 2.4$ и $|\eta| < 2.5$. Для 10 ГэВных лептонов импульсное разрешение меньше 1% и предполагалось однородным по η , для лептонов больших энергий разрешение было лучше, но зависило от η . Эффективность триггера вместе с реконструкцией бралось равным 90%.
- Электромагнитный калориметр учитывался до $|\eta| < 2.6$. Также принимался во внимание переход от барреля к торцевой части установки ($1.478 < |\eta| < 1.566$). Адронный калориметр покрывал область $\eta < 3$. Передний калориметр использовался в области $3 < |\eta| < 5$. Шумы электроники моделировались с помощью нормального распределения с нулевым средним и применялось обрезание для подавления нулевых отчетов.
- Развитие электромагнитных и адронных ливней параметризовалось как для поперечного, так и для продольного профилей ливня. Начало развития ливня флуктуировало в соответствии с экспоненциальным законом.
- Для реконструкции струй использовался несколько модифицированный алгоритм поиска струй UA1, с размером конуса $\Delta R = 0.8$ и порогом на поперечную энергию струи 25 ГэВ.

Основные фоны и кинематика

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 QCD ($2 \rightarrow 2$). Рассмотрены три основные кинематические области:

А. $m_{\tilde{g}} \gg m_{\tilde{q}}$,

В. $m_{\tilde{q}} \gg m_{\tilde{g}}$,

С. $m_{\tilde{q}} \sim m_{\tilde{g}}$, $m_{\tilde{q}} > m_{\tilde{g}}$.

Также предполагалось, что все суперчастицы относительно тяжелы (~ 1 ТэВ), за исключением LSP 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 интресного 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 интресного события: 3 и больше струй плюс потерянная поперечная энергия E_T^{miss} . Для кинематической области С примерно в одинаковой пропорции рождаются $\tilde{q}\tilde{q}$, $\tilde{g}\tilde{g}$, $\tilde{q}\tilde{g}$.

При исследовании для кинематических областей А и В, соответственно, применялось два разных типа наборов обрезаний.

Результаты

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. 11 показаны области при различных соотношениях между массами суперчастиц 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 Тев сигнал становится ненаблюдаемым.

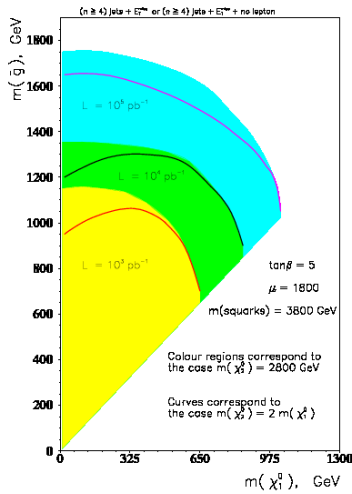


Figure 1: Discovery potential of CMS for different values of $m_{\tilde{\chi}_2^0}$ and $m_{\tilde{\chi}_1^0}$ in the case of $m_{\tilde{\chi}_2^0} > m_{\tilde{\chi}_1^0}$.

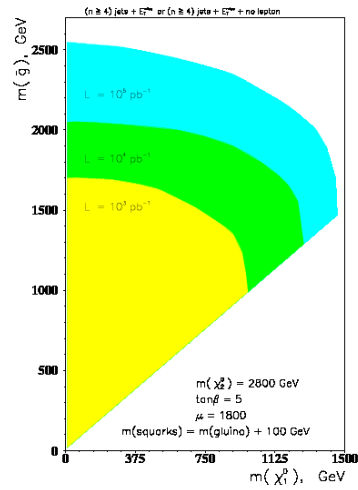


Figure 1: Discovery potential of CMS for different values of $m_{\tilde{\chi}_2^0}$ and $m_{\tilde{\chi}_1^0}$ in the case of $m_{\tilde{\chi}_2^0} > m_{\tilde{\chi}_1^0}$.

Рис. 11: Потенциал открытия КМС для различных значений масс LSP и глюино для кинематической области А (слева) и В (справа).

Слептоны

Хотя рождение скварков и глюино на БАКе более интересно с точки зрения открытия СУСИ, открытие суперсимметрии с помощью нескольких сигнатур чрезвычайно важно с точки зрения надежности открытия. Используя различные сигнатуры можно получить дополнительную информацию о параметрах МССМ модели. При поиске суперсимметрии мы ищем не резонансную структуру в распределении сечений по инвариантной массе, а превышение сечений (количество наблюдаемых событий) над сечениями (событиями), предсказанными в рамках СМ.

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

$$q\bar{q} \rightarrow \tilde{l}_L\tilde{l}_L, \tilde{l}_R\tilde{l}_R, \tilde{\nu}\tilde{\nu}, \tilde{\nu}\tilde{l}, \tilde{l}_L\tilde{l}_R. \quad (21)$$

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

$$two\ leptons + E_T^{miss} + no\ jets. \quad (22)$$

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.

Прямое детектирование слептонов

Требование отсутствия адронных струй (jet veto) приводит к подавлению суперсимметричного фона с ненулевым количеством адронных струй. Изучалась возможность прямого детектирования слептонов с помощью сигнатуры (22). Рассматривались следующие СМ фоны: $t\bar{t}$, WW , WZ , ZZ , Wt , $Zb\bar{b}$, $W + jet$, DY . 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 $(m_0, m_{1/2})$ представлен на Рис. 12.

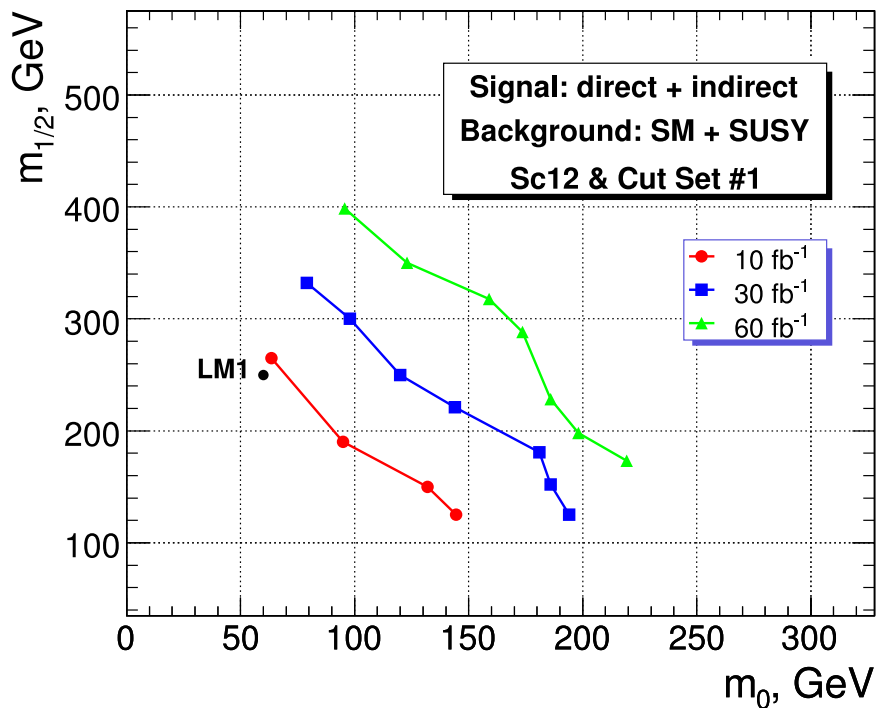


Рис. 12: Линии уровня достижимости открытия ($\tan\beta = 10$, $sign(\mu) = +$, $A = 0$) для конечных состояний с l^+l^- , потерянной поперечной энергией и запретом на струи.

Основные результаты

1. Разработана методика оценки качества экспериментов. 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 оценок отдельных фонов с различными статистическими и систематическими неопределенностями.
3. Проведено исследование возможности измерения 4-струйного дифференциального сечения по инвариантной массе двухструй с целью обнаружения проявления новой физики.
4. Проведено исследование возможностей обнаружения суперсимметричных частиц на ускорителе БАК, в частности,
 - изучена возможность детектирования суперсимметрии на БАКе в случае произвольных масс суперсимметричных частиц.
 - изучена возможность прямого детектирования слептонов в рамках модели МССМ,

Научная новизна I

- дана классификация подходов к определению понятия значимость превышения сигнала над фоном, в частности,
 - выведена приближенная формула для оценки ожидаемой значимости превышения сигнала над фоном в планируемом эксперименте (потенциал открытия эксперимента),
 - получены формулы для оценки комбинированной значимости при объединении независимых измерений,
 - разработана концепция учета статистических и систематических неопределенностей при комбинированной оценке фонов в эксперименте и при оценке значимости результата эксперимента;
- введена и обоснована оценка вероятности принятия правильного решения при проверке гипотезы о наблюдаемости нового явления, получена характеристика, позволяющая оценивать разделимость гипотез;

Научная новизна II

- 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). В диссертацию вошли результаты по:

- изучению возможности обнаружения новой физики при измерении сечений 4-х струйных событий на коллайдерах БАК и Теватрон;
- исследованию потенциала открытия суперсимметрии на БАК;

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 оценок отдельных фонов с различными статистическими и систематическими неопределенностями.
- Результаты исследования возможности обнаружения рождения суперсимметричных частиц в случае их произвольных масс.
- Результаты исследования возможности обнаружения слептонов.
- Результаты оценки потенциала открытия новой физики при измерении сечений 4-х струйных событий.

Основные публикации и апробация работы

Результаты, приведенные в диссертации, опубликованы в 32 работах, в журналах “Ядерная Физика”, Physics Letters B, Il 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 CMS(CERN), 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-ой 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.

Методические разработки, получившие практическое применение

Значимость S_{c12} . Значимость S_{c12} предложена в работе [1]. Она характеризует различие между ожидаемым числом событий “сигнал плюс фон” и ожидаемым числом событий “фон”. Как показано в работах [2, 3] значимость S_{c12} предпочтительнее для использования при планировании эксперимента, чем часто применяемые значимости S_1 и S_2 . Значимость S_{c12} обладает свойствами нормального распределения с дисперсией равной 1. Свойства данной значимости анализировались в работах [4]. Значимость S_{c12} получила широкое распространение и ее применяют в физике высоких энергий [5], астрофизике [6] и в физических приложениях [7]. Она встроена в пакет GARCON [8] (генетический алгоритм по оптимизации прямоугольных образцов). Можно также отметить исследования в рамках эксперимента КМС (Компактный Мюонный Спектрометр), использующие значимость S_{c12} [9].

Значимость S_{cP} . Значимость S_{cP} характеризует различие между заданным числом событий и ожидаемым в эксперименте числом событий “фон”. Данная значимость также обладает свойствами нормального распределения с дисперсией равной 1. Была разработана процедура для вычисления значимости S_{cP} с учетом статистических и систематических ошибок и написана программа ScP [10]. Данная программа тестировалась несколькими группами исследователей, ее характеристики рассмотрены в работе [11]. В списке [12] приведены публикации КМС, в которых при получении результатов использовалась программа ScP.

Методические разработки, получившие практическое применение

Комбинирование значимостей. В работах [13, 14] предложен и обоснован метод для нахождения комбинированной значимости нескольких экспериментов. Метод используется в астрофизических исследованиях [15].

Мера делимости гипотез. Понятие меры делимости гипотез предложено и обосновано в работе [16]. Данный подход был применен в работах [17] для оценки делимости двух гипотез, в частности, о наличии или отсутствии вклада от обмена заряженным бозоном Хиггса в расщепление масс при смешивании нейтральных К- и В-мезонов.

Доверительные интервалы и пределы доверия. В работах [18, 19] сформирован подход к определению доверительных интервалов и пределов доверия на параметры распределений посредством доверительных распределений [20]. Данный подход обсуждается в работах [21] и используется в работах [22].

Метод комбинированного оценивания фоновых процессов. Метод [23] имеет ясную вероятностную интерпретацию и рассматривается как частотная альтернатива Байесовским процедурам оценки фона [24]. В частности, метод использовался [25] при верификации оценок вклада фоновых процессов, полученных методами многофакторного анализа, при измерениях t -канального сечения рождения одиночного топ-кварка [26].

Результаты исследований, получившие практическое применение

- Результаты по исследованию возможности наблюдения рождения слептонов и нарушения лептонного числа в распадах слептонов, изложенные в работе [27], и результаты изучения возможности обнаружения новой физики при измерении сечений 4-х струйных событий, изложенные в работе [28], использовались при проектировании триггерной системы установки КМС [29].
- Результаты исследования возможности наблюдения рождения слептонов, изложенные в работах [30, 31], а также разработанные процедуры и программы статистического анализа данных [1, 2, 18, 32, 10], нашли применение при подготовке физической программы исследований на установке КМС [33].

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. (ссылки: ADS - 25, SPIRES - 30)
- [2] S.I. Bityukov, N.V. Krasnikov. **On observability of signal above background**. Nucl.Inst.&Meth.A452 (2000) 518. (ссылки: ADS - 23, SPIRES - 31)
- [3] 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. (ссылки: SPIRES - 1)
- [4] V.Bartsch and G.Quast, "Expected signal observability at future experiments", CMS Note 2005/004. CERN, Geneva, 2005.
R. Cousins, J. Mumford, V. Valuev. *Detection of Z' gauge bosons in the dimuon decay mode in CMS*. CMS Note 2005/002, 2005.
- [5] F. Gianotti, M.L. Mangano, T. Virdee, et al. *Physics potential and experimental challenges of the LHC luminosity upgrade*. Eur.Phys.J. C39 (2005) 293-333; CERN-TH/2002-078; arXiv:hep-ph/0204087, 2002.
Physics at BES-III, Eds. Kuang-Ta Chao, Yifang Wang, IHEP-Physics-Report-BES-III-2008-001; e-Print: arXiv:0809/1869 [hep-ex], 2008.
D.R. Tovey. *Inclusive SUSY searches and measurements at ATLAS*. EPJ direct, C4 (2002) 1-24.
F Ledroit, J Morel, G Moreau. *Probing RS scenarios of flavour at the LHC via leptonic channels*. JHEP 09 (2007) 071
V. Buescher, M. Carena, B. Dobrescu, S. Mrenna, D. Rainwater, M. Schmitt (convenors) ; S. Abdullin, D. Acosta, S. Asai, O. Atramentov, H. Baer, C. Balazs, P. Bartalini, A. Belyaev, R. Bernhard, A. Birkedal, R. Cavanaugh, M.-C. Chen, C. Clement, A. Datta, Y. de Boer, A. DeRoeck, A. Drozdetskiy, Y. Gershtein, D. Glenzinski, C. Group, S. Heinemeyer, M. Heldmann, J. Hubisz, M. Karlsson, K. Kong, A. Korytov, S. Kraml, T. Krupovnickas, R. Lafaye, K. Lane, F. Ledroit, F. Lehner, C.-J. Lin, C. Macesanu, K. Matchev, A. Menon,

- D. Milstead, G. Mitselmakher, J. Morel, D. Morrissey, J. O’Farrill, Y. Pakhotin, M. Perelstein, T. Plehn, A. Raklev, B. Scurlock, A. Sherstnev, P. Skands, Z. Sullivan, T. Tait, X. Tata, I. Torchiani, B. Trocme, C. Wagner, G. Weiglein, D. Zerwas. *Tevatron-for-LHC Report: Preparations for Discoveries*. FERMILAB-CONF-06-284-T; arXiv:hep-ph/0608322, 2006.
- M.I. Adamovich, Yu.A. Alexandrov, S.P. Baranov et al. (WA89 Collaboration) *Search for the exotic $\Xi^{--}(1860)$ Resonance in $340\text{GeV}/c$ Σ^- -Nucleus Interactions*, Phys.Rev. **C70** (2004) 022201; e-Print Archive: hep-ex/0405042.
- L. Basso, A. Belyaev, S. Moretti, G.M. Pruna, C. H. Shepherd-Themistocleous, *Z' discovery potential at the LHC in the minimal $B - L$ extension of the Standard Model*, Eur. Phys. J. C (2011) 71: 1613.
- C. Collard, M.-Cl. Lemaire, *Search with the CMS Detector for Randall-Sundrum Excitations of Gravitons Decaying Into Electron Pairs*, Eur.Phys.J. **C40**, 5 (2005) 15-21.
- P. Arias, J. Jaeckel, J. Redondo, A. Ringwald, *Optimizing Light-Shining-through-a-Wall Experiments for Axion and other WISP Searches*, Phys.Rev.D82:115018, 2010.
- E. Accomando, S. de Curtis, D. Dominici, L. Fedeli, *Z' production at the LHC in the four-site Higgsless model*, Phys.Rev.D.83:015012, 2011.
- [6] Kwang-Il Seon, et al. *Detectability Test of $H2$ Lyman-Werner Band Emission for a Far-Ultraviolet Imaging Spectrograph FIMS*, Journal of the Korean Physical Society, 43 (2003) 565-573.
- Seon, Kwang-Il. *Prediction of the Detection Limit in a New Counting Experiment*. Journal of The Korean Astronomical Society, 41 (2008) 99-107.
- [7] V. Grabski, R. Reche, R. Alfaro, E. Belmont-Moreno, A. Martinez-Davalos, A. Sandoval and A. Menchaca-Rocha. *The use of cosmic muons in detecting heterogeneities in large volumes*. Nucl.Instr.&Meth. A585 (2008) 128-135.
- [8] S. Abdullin, D. Acosta, P. Bartalini, R. Cavanaugh, A. Drozdetskiy, G. Karapostoli, G. Mitselmakher, Yu. Pakhotin, B. Scurlock, M. Spiropulu. *GARCON: Genetic Algorithm for Rectangular Cuts*

- Optimization. User's manual for version 2.0.* arXiv:hep-ph/0605143, 2006.
- [9] D. Acosta, A. Drozdetski, G. Mitselmakher. *The CMS Discovery Potential of Supersymmetry within mSugra with Two Same Sign Muons.* CMS CR-2004/041, 2004.
- L. Benucci *BSM measurements with Top at LHC :CMS sensitivity to Flavour Changing Neutral Currents.* CMS CR-2008/075, 2008.
- S.N. Gninenko, M.M. Kirsanov, N.V. Krasnikov, V.A. Matveev, CMS NOTE-2006/098, 2006.
- V. Zhukov, W. de Boer, I. Gebauer, M. Niegel, C. Sander, M. Weber, K. Mazumdar, CMS NOTE-2006/113, 2006.
- S. Baffioni, C. Charlot, F. Ferri, N. Godinovic, P. Meridiani, I. Puljak, R. Salerno, Y. Sirois, CMS NOTE-2006/115, 2006.
- S. Kyriazopoulou, C. Markou, CMS NOTE-2006/116, 2006.
- M. Chiorboli, M. Galanti, A. Tricomi, CMS NOTE-2006/133, 2006.
- [10] 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. (ссылки: ADS - 1).
<http://cmsdoc.cern.ch/~bityukov>
- [11] R.D. Cousins, J.T. Linnemann, and J. Tucker. *Evaluation of three methods for calculating statistical significance when incorporating a systematic uncertainty into a test of the background-only hypothesis for a Poisson process* Nucl.Inst.&Meth.A595 (2008) 480.
- [12] S. Heinemeyer, V.A. Khoze, M.G. Ryskin, W.J. Stirling, M. Tasevsky, G. Weiglein. *Studying the MSSM Higgs sector by forward proton tagging at the LHC.* Eur.Phys.J.C53:231-256, 2008; arXiv:0708.3052 [hep-ph].
- M. Chiorboli, M. Galanti, A. Tricomi. *SUSY searches with opposite sign dileptons at CMS.* Acta Physica Polonica B, 38 (2007) 559-565.
- E. Yazgan, J. Damgov, N. Akchurin, V. Genchev, D. Green, S. Kunori, M. Schmitt, W. Wu and M.T. Zeyrek *Search for a standard model Higgs boson in CMS via vector boson fusion in the $H \rightarrow WW \rightarrow l\nu l\nu$ channel.* Eur.Phys.J. C53, 329-347 (2008).

G. Davatz, M. Dittmar and A.-S. Giolo-Nicollerat. *Standard Model Higgs discovery potential of CMS in the $H \rightarrow WW \rightarrow l\nu l\nu$ channel.* J.Phys.G: Nucl.Part.Phys. 34 (2007) N85-N104; CMS NOTE-2006/047, 2006.

V. Drollinger, U. Gasparini, E. Torassa, M. Zanetti, CMS NOTE-2006/055, 2006.

M. Kazana. *Discovery Potential for Universal Extra Dimensions Signals with Four Leptons in the Final State.* CMS CR-2006/062, 2006.

G. Daskalakis, G. Anagnostou. *Search for the MSSM $A \rightarrow Zh$ decay with $Z \rightarrow l^+l^-$, $h \rightarrow b\bar{b}$* CMS NOTE-2006/063, 2006.

R. Kinnunen and S. Lehti, CMS NOTE-2006/075, 2006.

I. Belotelov, I. Golutvin, A. Lanyov, E. Rogalev, M. Savina, S. Shmatov, D. Bourilkov. *Search for ADD Extra Dimensional Gravity in Dimuon Channel with the CMS Detector.* CMS NOTE-2006/076, 2006.

K.Karafasoulis, A. Kyriakis, H. Petrakou, K. Mazumdar, CMS NOTE-2006/079, 2006.

C. Foudas, A. Nikitenko, M. Takahashi, CMS NOTE-2006/088, 2006.

C. Karafasoulis, A. Kyriakis, G. Vermisoglou, L. Benucci, A. Giammanco, F. Palla, CMS NOTE-2006/093, 2006.

R. Kinnunen. *Search for the Heavy Charged MSSM Higgs bosons with the $H^\pm \rightarrow \tau^\pm \nu_\tau$ Decay Mode in Fully Hadronic Final State.* CMS NOTE-2006/100, 2006.

S. Lehti, CMS NOTE-2006/101, 2006.

S. Paktinat Mehdiabadi, L. Pape, M. Spiropulu, CMS NOTE-2006/102, 2006.

Yu.Andreev, S.Bitjukov, N.Krasnikov and A.Toropin, CMS NOTE-2006/103, 2006.

I. Belotelov, I. Golutvin, A. Lanyov, V. Palichik, E. Rogalev, M. Savina, S. Shmatov, P. Traczyk, G. Wrochna. *Search for Randall-Sundrum Graviton Decay into Muon Pairs.* CMS NOTE-2006/104, 2006.

S. Lowette, J. D'Hondt and P. Vanlaer, CMS NOTE-2006/109, 2006.

F. Beaudette, C. Charlot, E. Delmeire, C. Rovelli, Y. Sirois, CMS NOTE-2006/114, 2006.

S. Gennai, A. Nikitenko, L. Wendland, CMS NOTE-2006/126, 2006.

- Yu. Andreev, S. Bityukov, N. Krasnikov and A. Toropin, CMS NOTE-2006/132, 2006.
- [13] S.I. Bityukov, N.V. Krasnikov. **On the Combining Significances**. arXiv:physics/0612178, 2006. (ссылки: ADS - 4)
- [14] S.I. Bityukov, N.V. Krasnikov, A.N. Nikitenko, V.V. Smirnova. **Two approaches to Combining Significances**. Proceedings of Science, PoS (ACAT08) 118.
- [15] J. Albert, E. Aliu, H. Anderhub, et al., *Very High Energy Gamma-Ray Observations of Strong Flaring Activity in M87 in 2008 February*, The Astrophysical Journal Letters, **685** (2008) L23;
J. Albert, E. Aliu, H. Anderhub, et al., *Variable Very High Energy Emission from Markarian 501*, The Astrophysical Journal Letters, **669** (2007) 862-883;
D. Tescaro, D. Mazin, R.M. Wagner, K. Berger, N. Galante, *The strong flaring activity of M87 in early 2008 as observed by the MAGIC telescope*, arXiv:0907.0460, 2009.
- [16] S.I. Bityukov, N.V. Krasnikov. **Distinguishability of Hypotheses**. Nucl.Inst.&Meth. A534 (2004) 152; arXiv: hep-ph/0207130. (ссылки: ADS - 2, SPIRES - 4)
- [17] M. Dubinin, A. Sukachev, $K^0 - \bar{K}^0$, $B^0 - \bar{B}^0$ mixings in the MSSM with explicit CP violation in the Higgs sector, Phys.Atom.Nucl.71:374-387,2008; arXiv:0711.5023 [hep-ph].
M. Dubinin, A. Sukachev, *Neutral mesons' mixings and rare decays in the framework of MSSM*, Proceedings of Science, PoS (QFTHEP2010) 034.
- [18] S.I. Bityukov, N.V. Krasnikov, V.A. Taperechkina. **Confidence intervals for Poisson distribution parameter**. Препринт ИФВЭ 2000-61, Protvino, 2000; arXiv: hep-ex/0108020. (ссылки: ADS - 7, SPIRES - 4)
- [19] 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. (ссылки: ADS - 2, SPIRES - 9)

- [20] С.И.Битюков, Н.В.Красников. *Оценка параметров распределений через доверительные распределения*. Препринт ИФВЭ 2008 - 10, 2010.
- [21] P. Bock, *Computation of Confidence Levels for Exclusion or Discovery of a Signal with the Method of Fractional Event Counting*, JHEP 0701:080, 2007.
J.L. Alvarez, *Poisson-Based Detection Limit and Signal Confidence Intervals for few Total Counts*, Health Physics. The Radiation Safety Journal. 93(2):120-126, August 2007
- [22] M. Ablikim, J.Z. Bai, Y. Ban et al (BES Collaboration) *Evidence for $f_0(980)f_0(980)$ production in χ_c^0 decays*, Phys.Rev. **D70** (2004) 092002.
C.-Z. Yuan, *Hadronic decays of charmonia from BESII*, Int.J.Mod.Phys. A20 (2005) 399-406.
- [23] 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;
- [24] D. Casadei, *Signal + background model in counting experiments*, e-Print: arXiv:1108.4270 [physics.data-an].
- [25] S. Bityukov, *On combined estimation of expected backgrounds with statistical and systematic uncertainties in planned experiment*, report in Single top meeting, CMS, 28 June 2010, CERN;
S. Bityukov, *Observation potential of single top quark with Neural Network*, report in Single top meeting, CMS, 10 November 2009, CERN.
- [26] CMS Collaboration (S. Chatrchyan et al.), *Measurement of the t -Channel Single Top Quark Production Cross Section in pp Collisions at $\sqrt{s} = 7$ TeV*. Phys.Rev.Lett. **107** (2011) 091802.
- [27] S.I. Bityukov, N.V. Krasnikov. **The search for charged sleptons and flavor lepton number violation at LHC (CMS)**, CMS NOTE-1998/040; Труды 10-го Международного семинара “Кварки-98”, Суздаль, Россия, Май 17-24, 1998, т.2 стр. 408, ИЯИ РАН,

- Москва, 1999; 1998; arXiv:hep-ph/9806504. (ссылки: ADS - 5, SPIRES - 11)
- [28] 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.
- [29] CMS Collaboration. *The Trigger and Data Acquisition project, Technical Design Report Volume I: The Trigger Systems*. CERN/LHCC 2000-38, CMS TDR 6.1.
- [30] 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. (ссылки: ADS - 12, SPIRES - 19)
- [31] 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. (ссылки: ADS - 19)
- [32] 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. (ссылки: ADS - 8, SPIRES - 11)
- [33] CMS Collaboration. *CMS Physics, Technical Design Report Volume II: Physics Performance*. CERN/LHCC 2006-021, CMS TDR 8.2.