

На правах рукописи

КОНОПЛЯНИКОВ  
Виктор Федорович

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ КАНАЛА «ПРЯМОЙ ФОТОН + СТРУЯ»  
ДЛЯ УСТАНОВЛЕНИЯ АБСОЛЮТНОЙ ШКАЛЫ ЭНЕРГИИ СТРУИ  
НА УСТАНОВКЕ CMS

Специальности:

01.04.01 – приборы и методы экспериментальной физики  
01.04.16 – физика атомного ядра и элементарных частиц

Автореферат  
диссертации на соискание учёной степени  
кандидата физико-математических наук

Дубна 2008

Работа выполнена в Объединенном институте ядерных исследований

Научные руководители: доктор физико-математических наук  
профессор  
Скачков Николай Борисович,

кандидат физико-математических  
Зарубин Анатолий Вадимович

Официальные оппоненты: доктор физико-математических наук  
Гаврилов Владимир Борисович

доктор физико-математических наук  
Мелкумов Георгий Леонович

Ведущая организация: НИИЯФ МГУ, г. Москва

Защита состоится “\_\_\_” \_\_\_\_\_ в \_\_\_ ч. \_\_\_ мин на заседании диссертационного совета Д 720.001.02 при Объединенном институте ядерных исследований по адресу: г. Дубна, Лаборатория физики высоких энергий ОИЯИ, конференц-зал.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ЛФВЭ ОИЯИ.

Автореферат разослан “\_\_\_” \_\_\_\_\_ 2008.

Учёный секретарь Диссертационного совета  
кандидат физико-математических наук

Арефьев В.А.

## Общая характеристика работы

**Актуальность темы.** Многие физические процессы, которые предполагается исследовать на установке CMS Большого адронного коллайдера (ЛHC), содержат от одной до нескольких адронных струй в конечном состоянии.

Например, одним из наиболее перспективных каналов образования бозона Хиггса ( $H$ ) на ЛHC является их ассоциативное рождение с векторными бозонами  $W^\pm, Z$ :  $q\bar{q} \rightarrow W^\pm H, ZH$ . Доминирующей модой распада бозона Хиггса с массой  $m_H < 135 \text{ ГэВ}/c^2$  при этом является распад  $H \rightarrow b\bar{b}$ . В случае  $m_H \geq 135 \text{ ГэВ}/c^2$  доминирует распад  $H \rightarrow W^+W^-$ . Таким образом, в конечном состоянии данного процесса может наблюдаться до 6 адронных струй.

В экспериментах на ЛHC планируется поиск бозона Хиггса в широком массовом интервале (до  $m_H \sim 1 \text{ ТэВ}/c^2$ ). При этом каналы образования бозона Хиггса (такие как  $q\bar{q} \rightarrow HW, qq \rightarrow qqH$ ) с двумя и большим числом струй в конечном состоянии рассматриваются как наиболее перспективные.

Поиск суперсимметричных частиц, предсказываемых различными моделями суперсимметрии (SUSY), также входит в программу исследований на ЛHC. Поскольку среди каналов распада многих SUSY частиц преобладают двух-, четырех- и даже шести-струйные каналы, неопределенности в шкале энергии струи могут непосредственно влиять на погрешность установления масс этих частиц. Точное определение энергии струи также необходимо для правильной оценки вклада фоновых событий (процессы с рождением  $t\bar{t}$  пар,  $W^\pm/Z^0 + N$  струй). Так, в эксперименте D0 по поиску скварков и глюино в оценке фона к их рождению неопределенности в шкале энергии струи являлись доминирующими.

На точность восстановления энергии струи влияют как физические эффекты, так и характеристики детектора. Без введения поправок энергия восстановленной в калориметре струи оказывается меньше номинальной энергии партона, причем дефицит энергии зависит от энергии партона и может достигать 30%. Поправки на энергию струи могут быть введены, в частности, с помощью процессов, в которых наряду со струей рождается объект, хорошо измеряемый в установке и связанный со струей однозначными кинематическими соотношениями. Примером таких процессов являются одноструйные процессы с прямыми фотонами, использование которых позволяет установить абсолютную шкалу энергии струи, что составляет одну из приоритетных задач для любого  $pp$  или  $p\bar{p}$  коллайдерного эксперимента.

Идея использовать канал «прямой фотон + струя» для коррекции шкалы энергии струи основана на высокой точности и линейности восстановления фотонов в электромагнитном калориметре CMS. Для электронов и фотонов в широком диапазоне энергии  $E_{\text{измеренное}}/E_{\text{пучка}} = 1$ . А использование соотношения между поперечными энергиями фотона и начального партона (баланс) позволяет определить калибровочные коэффициенты, которые отражают влияние потерь энергии заряженных частиц, магнитного

поля, различия отклика калориметра на электроны, фотоны и адроны, неоднородность материала детектора и других эффектов, связанных с регистрацией событий в установке, а также ряда физических эффектов.

Реконструкция событий на установке CMS наряду с энергиями адронных струй требует также определения координат струй и частиц, рожденных в протон-протонных столкновениях. Измерение координаты центра тяжести ливня, создаваемого струей или отдельными частицами, может быть выполнено с использованием продольной и поперечной сегментации калориметра и энерговыделений в его ячейках. Точность такого измерения может быть определена экспериментальным путем: испытанием прототипа адронного калориметра со сканирование его пучком в пределах нескольких башен. Из-за невозможности получения в качестве пучка струй, рожденных при фрагментации кварков и глюонов, можно ограничиться использованием пучков пионов разной энергии. Результаты таких испытаний могут быть использованы для регистрации струй в действующей установке. Подобные исследования для адронного калориметра в окончательной конфигурации ранее не производились и таким образом представляют актуальность и новизну.

**Цель диссертационной работы.** Целью настоящей работы является разработка и анализ методик реконструкции адронных струй в установке CMS: определение абсолютной шкалы энергии струи и пространственного разрешения адронного калориметра. Работа включает:

- разработку метода определения абсолютной шкалы энергии струи с помощью событий «прямой фотон + струя», включающего правила расчета калибровочных коэффициентов для введения поправок на энергию струи и критерии отбора событий, приводящие к наименьшим систематическим погрешностям шкалы энергии струи;
- оценку количеств сигнальных и фоновых событий, которые могут быть использованы для калибровки струй, статистических и систематических погрешностей калибровки и границ ее применимости по энергиям и псевдобыстротам струй;
- исследование координатного разрешения торцевого адронного калориметра по результатам испытания его прототипа на пучках пионов с разными энергиями.

**Научная новизна и практическая ценность работы.** На момент выбора способов измерения и коррекции энергии адронных струй в установке CMS калибровка струй событиями с прямыми фотонами представлялась проблематичной, в частности, из-за нарушения баланса по поперечным импульсам между прямым фотом и основной струей вследствие фрагментации,

радиационных и других эффектов, а также из-за большого фона событий с высокоэнергетичными фотонами, излучёнными кварками или рожденными при распадах  $\pi^0$  и других нейтральных мезонов, которые в установке неотличимы от прямых фотонов. Этот вопрос и мотивировал исследования, представленные в диссертационной работе. В результате этих исследований дан ответ на вопрос о возможности данной калибровки. Сделана оценка уровня фона и связанных с ним и другими эффектами неопределённостей калибровки и выработана методика коррекции энергии струи с помощью событий «прямой фотон + струя», включающая критерии отбора событий и правила расчета калибровочных коэффициентов, в диапазоне поперечных энергий струй от 20 до 1000 ГэВ и интервале псевдобыстрот, включающем область цилиндрического, торцевых и передних калориметров. Данная методика будет использована в эксперименте.

Испытания модулей торцевого калориметра HE на пучках адронов различной энергии позволили измерить точность определения азимутальных углов адронов в зависимости от их координат и энергии и разработать методику для определения реконструированной координаты адронов по центру тяжести ливня. Измеренное координатное разрешение калориметра и разработанная методика позволяет корректировать кинематические параметры частиц и струй и, соответственно, более точно реконструировать события в установке CMS.

### **Положения, выносимые на защиту.**

1. Методика установления абсолютной шкалы энергии струи с помощью событий «прямой фотон + струя» на установке CMS, включающая критерии отбора событий, правила расчета калибровочных коэффициентов и ограничения на её применимость.

2. Результаты исследования баланса поперечных импульсов прямого фотона и струи и возможности его улучшения путем отбора событий с использованием ограничений на различные физические параметры событий.

4. Оценки вклада фона при отборе событий «прямой фотон + струя» и влияния на возможность его подавления отдельных эффектов, связанных с регистрацией событий установкой.

5. Результаты исследования систематических погрешностей калибровки струй, обусловленных наличием фоновых событий, излучением в начальном состоянии и другими эффектами.

6. Оценки количеств событий, которые могут быть отобраны для калибровки и статистических погрешностей шкалы энергии струи.

7. Методика определения координат адронов по центру тяжести ливня в торцевом калориметре HE и результаты измерения точности определения азимутальных углов адронов в зависимости от их координат и энергии.

**Апробация работы.** Результаты диссертации докладывались на многочисленных семинарах RDMS CMS, международных совещаниях CMS, на рабочих собраниях группы адронного калориметра CMS, а также на следующих конференциях:

1. Second Annual RDMS CMS Collaboration Meeting. CERN, Dec. 16-17, 1996;
2. Fifth Annual RDMS CMS Collaboration Meeting. ITEP, Moscow, Nov. 22-24, 2000;
3. VI International school-seminar "Actual problems of particle physics". Gomel, Aug.7-16, 2001;
4. 6th Annual RDMS CMS Collaboration Meeting. MSU, Moscow, Dec. 19-21, 2001;
5. 7th Annual RDMS CMS Collaboration Meeting. Protvino, Dec. 13-15, 2002;
6. 9th Annual RDMS CMS Collaboration Meeting. Minsk, Nov. 28 - Dec. 2, 2004;
7. 10th Annual RDMS CMS Collaboration Meeting. St.Petersburg, Sep. 12-15, 2005;
8. 11th Annual RDMS CMS Collaboration Meeting. Varna, Sep. 12-16, 2006;
9. 12th Annual RDMS CMS Collaboration Meeting. Minsk, Sep. 14-19, 2008.

**Публикации.** По материалам диссертации опубликовано более 20 работ, в том числе в журналах Письма в ЭЧАЯ, The European Physical Journal C, препринтах ОИЯИ, Technical Design Report и других документах CMS, материалах международных конференций. Список работ, содержащих основные результаты диссертации приведен в конце автореферата.

**Структура и объем диссертации.** Диссертация объемом 137 страниц состоит из введения, четырех глав и заключения. Содержит 70 таблиц, 62 рисунка и список цитируемой литературы из 79 ссылок.

## Содержание диссертации

Диссертация начинается с **введения**, в котором на примере физических задач, которые предстоит решить в эксперименте CMS (поиск бозонов Хиггса промежуточных масс, частиц вне Стандартной Модели и т.д.), демонстрируется актуальность рассматриваемой в диссертации темы и формулируется цель работы. Делается краткий обзор задач и методов, описанных в диссертации. Кратко изложено содержание диссертации.

Первые две главы (1-2) диссертации описывают экспериментальную установку, основные характеристики адронных струй и процессов с прямыми фотонами.

**Глава 1** содержит описание Большого адронного коллайдера, назначение и общее устройство детектора CMS.

В **главе 2** дается краткое введение в квантовую хромодинамику и физику адронных струй и описание алгоритмов поиска струй. Анализируются эффекты, влияющие на точность измерения начальной энергии струи в детекторе. Рассматривается физика процесса рождения прямого фотона и струи. Дается общее описание особенностей этого процесса, определяемого на партонном уровне подпроцессами «комптоновского» рассеяния  $qg \rightarrow q + \gamma$  и аннигиляции  $q\bar{q} \rightarrow g + \gamma$ , а также задачи установления шкалы энергии струи. Рассматриваются основные эффекты, влияющие на баланс по поперечному импульсу между прямым фотоном и основной струей в событии – излучение в начальном и конечном состояниях процесса партонного рассеяния, адронизация и  $k_T$ -эффект.

**Глава 3** содержит результаты исследования процессов с прямыми фотонами методом моделирования физических событий (эффектов жесткого столкновения, фрагментации, излучений в начальном и конечном состояниях) с использованием программы PYTHIA 5.7 без учета эффектов, связанных с регистрацией событий установкой. В ней обсуждается выбор физических переменных, которые могут быть полезными для выделения событий «прямой фотон+струя», роль различных критериев отбора событий для подавления фоновых событий и улучшения баланса по поперечному импульсу между прямым фотоном и основной струей ( $P_T^\gamma - P_T^{jet}$ ) и делаются оценки, связанных с этими критериями количеств событий, пригодных для проведения калибровки.

В качестве таких переменных рассматриваются

- $P_T^{jet2}$  – наибольший поперечный импульс дополнительных адронных струй события, связанных, прежде всего, с излучением в начальном и конечном состояниях;
- $\Delta\phi$  – интервал по полярному углу  $\phi$  между прямым фотоном (« $\gamma$ ») и струей (« $jet$ »);
- $P_{T\gamma}^{isol}$  – суммарный поперечный импульс частиц в некотором конусе в окрестности прямого фотона;
- $P_{Tjet}^{isol}$  – суммарный поперечный импульс частиц в некотором кольце в окрестности струи;
- $P_T^{out}$  – векторная сумма поперечных импульсов частиц вне фотона и струи;
- $P_T^{miss}$  – дефицит вектора поперечного импульса события.

Исследована связь ограничений на эти переменные с основными кинематическими характеристиками процесса «прямой фотон + струя»: излучением в начальном и конечном состоянии,  $P_T$ -балансом прямого фотона и партона-родителя основной струи ( $P_T^\gamma - P_T^{parton}$ ) и другими. Оценена эффективность этих ограничений для улучшения баланса  $P_T^\gamma - P_T^{jet}$ .

В данной главе также анализируются фоновые события к процессу «прямой фотон + струя», содержащие фотоны с большими поперечными импульсами, рожденные в нейтральных каналах распада мезонов  $\pi^0, \eta, \omega$  и  $K_s^0$  и в результате тормозного излучения. Для анализа вместе с процессами с прямыми фотонами (ISUB=14, 29) генерировались все  $2 \rightarrow 2$  процессы КХД и стандартной модели с достаточно большими сечениями, представленные в таблице 1.

Исследована возможность подавления фона использованием ограничений на различные параметры события. Показано, что при поперечных энергиях фотонов, превышающих 40 ГэВ, используя критерии изоляции фотона и струи,

можно добиться более чем десятикратного преобладания сигнала над фоном. Тем самым показана принципиальная возможность подавления фона к событиям «прямой фотон + струя» при энергиях ЛНС.

В главе 4 разрабатывается конкретная методика установления шкалы энергии струи и исследуются ее погрешности с учётом условий детектирования событий. Результаты получены моделированием методом Монте-Карло физических событий и условий их регистрации установкой (магнитного поля, взаимодействия частиц с веществом детектора, шумов электроники, наложения дополнительных событий и других эффектов в установке при низкой светимости  $2 \cdot 10^{33} \text{см}^{-2} \text{с}^{-1}$ ). События моделировались с помощью генератора PYTHIA. Условия их регистрации – программами быстрого (CMSJET) и полного моделирования детектора (CMSIM, OSCAR) и реконструкции событий (ORCA). Предлагаются правила расчета калибровочных коэффициентов. Дается обоснование критериев отбора событий для калибровки и ограничений на применимость методики, обуславливаемых систематическими и статистическими погрешностями.

Разрабатываемая методика основана на следующих соображениях. Установка абсолютной шкалы энергии струи состоит в определении калибровочного коэффициента для перехода от измеренного поперечного импульса струи ( $P_T^{jet}$ ) к поперечному импульсу партона-родителя струи ( $P_T^{parton}$ ):

$$k_{jet}^{true} \equiv \frac{P_T^{jet}}{P_T^{parton}}, \quad (1)$$

Таблица 1. Процессы с прямыми фотонами и фоновые к ним, генерируемые с помощью PYTHIA.

ISUB	Процесс
14	$f + f \rightarrow g + \gamma$
29	$f + g \rightarrow f + \gamma$
11	$f + \bar{f}' \rightarrow f + \bar{f}'$ (QCD)
12	$f + \bar{f} \rightarrow f' + \bar{f}'$
13	$f + \bar{f} \rightarrow g + g$
15	$f + \bar{f} \rightarrow g + \gamma^*/Z^0$
16	$f + \bar{f}' \rightarrow g + W^\pm$
18	$f + \bar{f} \rightarrow \gamma + \gamma$
19	$f + \bar{f} \rightarrow \gamma + \gamma^*/Z^0$
20	$f + \bar{f}' \rightarrow \gamma + W^\pm$
28	$f + g \rightarrow f + g$
30	$f + g \rightarrow f + \gamma^*/Z^0$
31	$f + g \rightarrow f' + W^\pm$
53	$g + g \rightarrow f + \bar{f}$
68	$g + g \rightarrow g + g$



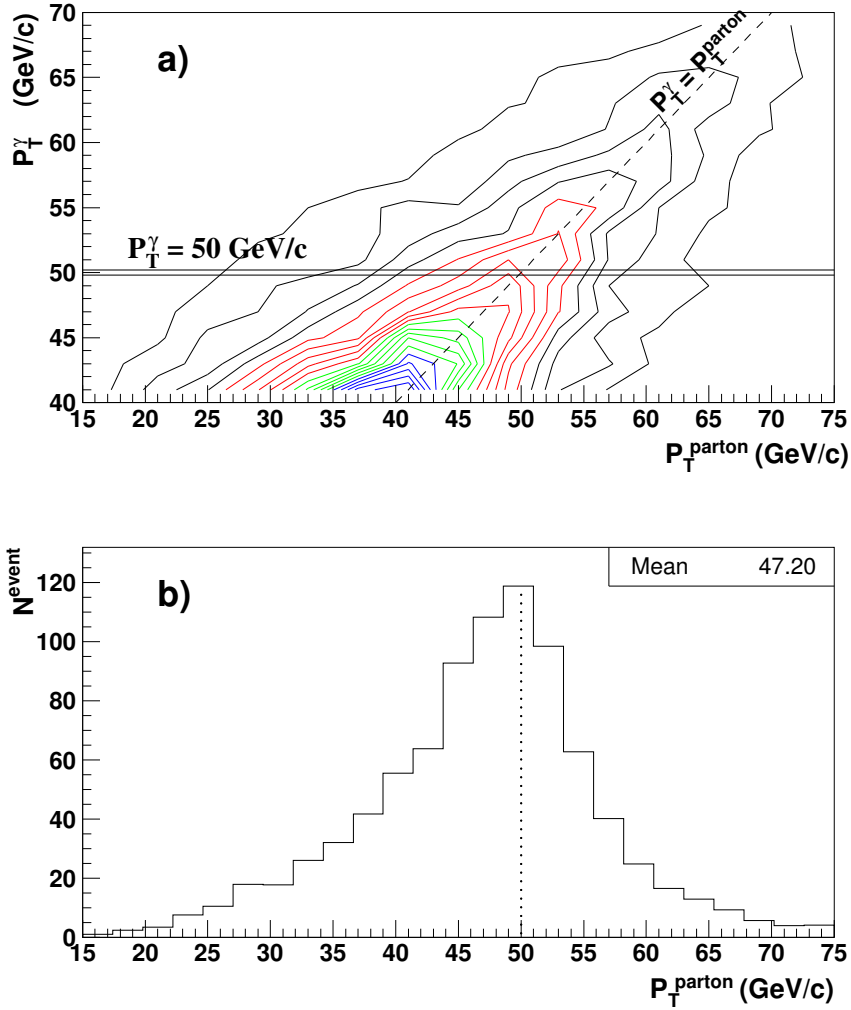


Рис. 1. Плотность функции двумерного распределения поперечных импульсов фотона и партона  $f(P_T^{par}, P_T^\gamma)$  (a) и спектр поперечного импульса партона  $P_T^{par}$  при  $P_T^\gamma \approx 50$  ГэВ/с (b) в событиях с прямыми фотонами.

Ее можно осуществить с помощью событий с прямыми фотонами  $qg \rightarrow q + \gamma$  и  $q\bar{q} \rightarrow g + \gamma$ . Действительно, согласно соотношению баланса события по поперечным импульсам

$$\vec{P}_T^\gamma + \vec{P}_T^{parton} + \vec{P}_T^{ISR} = 0, \quad (2)$$

в случае отсутствия излучения в начальном состоянии (ISR) в формуле (1) можно сделать замену  $P_T^\gamma = P_T^{parton}$  и получить величину

$$k_{jet} \equiv k_{jet}^{meas} \equiv \frac{P_T^{jet}}{P_T^\gamma} = \frac{E_T^{jet}}{E_T^\gamma}, \quad [E_T \equiv cP_T], \quad (3)$$

которая может быть измерена на эксперименте и использована в качестве калибровочного коэффициента.

Излучение в начальном состоянии нарушает баланс фотона и партона по поперечным импульсам и приводит к некоторому 2-мерному распределению  $P_T^{parton}$  и  $P_T^\gamma$  (см. Рис. 1a).

При этом баланс нарушен не только в отдельных событиях, но, как видно из Рис. 1b, и в среднем для поперечных импульсов фотона и партона

в интервалах по  $P_T^\gamma$ . Согласно уравнению (2) задача улучшения  $P_T$ -баланса фотона и партонa, рождённых в конечном состоянии жесткого процесса рассеяния, состоит в том, чтобы подавить путем отбора событий излучение в начальном состоянии ( $P_T^{ISR}$ ). При решении этой задачи возникает вопрос: не будут ли применяемые отборы приводить к преимущественному подавлению ISR в направлении фотона или партонa, что может привести не к улучшению, а к ухудшению  $P_T$ -баланса? Ответ на этот вопрос дан в **разделе 4.1**. Здесь вводится понятие «некорректный отбор» – отбор событий, который связан с ограничением на некоторый вектор  $\vec{P}_T$  (одну из составляющих поперечного импульса события), преимущественно направленный в сторону прямого фотона или основной струи. В силу сохранения  $P_T$ -баланса события такой отбор приведет к смещению спектра разности  $P_T^\gamma - P_T^{parton}$ . Некорректный отбор может улучшить изначально нарушенный баланс в выборке событий, но если его делать всё более жестким, он может привести к обратному эффекту. Поэтому некорректные отборы должны быть достаточно мягкими, чтобы не вносить существенных погрешностей в калибровку.

В результате проведенных исследований с использованием программ PYTHIA 6.156, CMSJET 4.703, CMSIM 121 и ORCA 4.5.4 установлено, что требование изолированности фотона или основной струи, ограничения на суммарный поперечный импульс частиц вне прямого фотона и основной струи, дефицит измеренной поперечной энергии и другие физические параметры события могут вносить систематические погрешности в шкалу энергии струи от 2% до 10%, которые зависят как от физических эффектов, так и от эффектов, связанных с регистрацией событий установкой. Также установлено, что ограничение на поперечные энергии дополнительных струй и ряд других параметров, подавляя дисбаланс между прямым фотоном и партонem в 2 и более раз в отобранных выборках событий, не вносят в калибровку существенных погрешностей, что допускает наложение на них жестких ограничений.

**Раздел 4.2** посвящен исследованию эффективности различных критериев изолированности фотона и струи при подавлении фоновых событий к процессу «прямой фотон + струя», в условиях регистрации событий установкой. Для анализа генерировался широкий набор процессов представленных в таблице 1, которые после предварительных отборов моделировались в условиях установки. Чтобы выяснить, в какой мере различные эффекты влияют на возможность подавления фона, исследование проводилось на 5 уровнях детализации моделирования процессов в установке с последовательным наложением дополнительных эффектов:

- «*PARTICLE*» – моделирование физических эффектов (PYTHIA 6.156);
- «*FIELD*» – «*PARTICLE*» + моделирование эффектов магнитного поля (CMSJET 4.703);
- «*SMEAR*» – «*FIELD*» + моделирование ливней частиц в материале детектора (CMSJET 4.703);

- «*NO PILEUP*» – полное моделирование процессов в установке без наложения дополнительных событий (ORCA 4.5.4);
- «*LOW LUMI*» – моделирование наложения дополнительных событий, соответствующего низкой светимости пучка ускорителя (ORCA 4.5.4).

Исследования проводились в интервале поперечных энергий фотонов 20-150 ГэВ. Показано, что эффекты, связанные с магнитным полем и ливнем практически не затрудняют идентификацию сигнала и фона. Отношение же сигнала к фону на уровне «*NO PILEUP*» уменьшается по сравнению с уровнем «*PARTICLE*» в 2-4 раза (в зависимости от поперечных энергий фотонов и жесткости отборов), а на уровне «*LOW LUMI*» в 3-7 раз при фиксированной кратности подавления сигнала. Таким образом, шумы электроники и наложение сигналов от разных событий существенно ухудшают возможность подавления фона к событиям с прямыми фотонами.

**Раздел 4.3** содержит общее описание процедуры калибровки энергии струи, обоснование ограничений на параметры отбираемых для калибровки событий, и анализ погрешностей калибровки при низкой светимости пучка ускорителя.

С целью уменьшения погрешности калибровки, обусловленной асимметрией спектра поперечных импульсов партона (Рис. 1а) предлагается рассчитывать калибровочные коэффициенты по среднему значению распределения Гаусса, аппроксимирующего окрестность максимума спектра отношения измеренных поперечных энергий основной струи и прямого фотона. Тем не менее, для этого метода остаются ограничения по применимости, обусловленные нарушением баланса по поперечным импульсам между фотоном и струей.

Средние значения дисбаланса  $(P_T^\gamma - P_T^{parton})/P_T^\gamma$  в интервалах по поперечным импульсам фотона могут достигать в установке CMS более 50%. Наложение ограничений на параметры отбираемых событий подавляет дисбаланс лишь частично, оставляя его для струй в области передних калориметров ( $|\eta^{jet}| > 3$ ) на уровне нескольких десятков процентов (Рис. 2). Это приводит к ограничениям на применимость калибровки при больших абсолютных значениях псевдобыстрот струй. С ростом поперечных импульсов фотонов это ограничение становится все более жестким и при  $P_T^\gamma \approx 300-1000$  ГэВ/с распространяется на область торцевых калориметров ( $1,5 < |\eta^{jet}| < 3$ ).

С использованием PYTHIA 6.214 и ORCA 8.7.1 исследована возможность калибровки как различных типов струй (кварковых, глюонных и произвольных КХД-струй, рождаемых в pp-столкновениях), так и струй, найденных различными алгоритмами поиска струй (итерационным конусным алгоритмом при разных размерах конусов и кластерным  $K_T$ -алгоритмом) при разных ограничениях на энерговыделение в ячейках калориметра. Сделаны соответствующие оценки систематических погрешностей калибровки для струй цилиндрической части калориметра в интервале поперечных

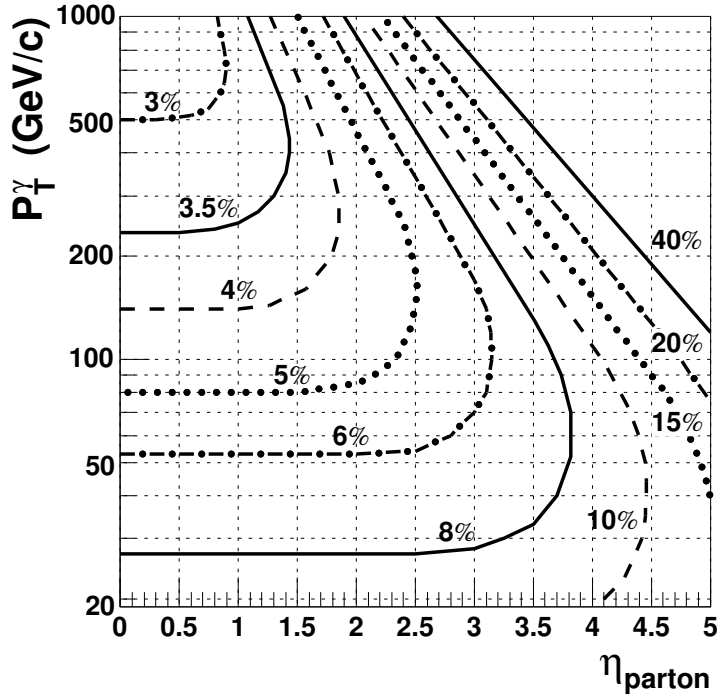


Рис. 2. Выраженные в процентах значения дисбаланса  $(P_T^\gamma - P_T^{parton})/P_T^\gamma$ , рассчитанные с помощью РУТНИА 6.214 при различных значениях поперечного импульса прямого фотона и псевдобыстроты струи при ограничении на угол между фотоном и партоном  $\phi_{\gamma,parton} > 172^\circ$ .

энергий от 20 до 200 ГэВ (Рис. 3). Согласно Рис. 3 для рассмотренных параметров алгоритмов поиска струй погрешности калибровки КХД-струй возрастают с уменьшением области, в которой собирается струя и увеличением ограничений на энерговыведения в ячейках калориметров. При этом погрешности калибровки кварковых струй являются малочувствительными к алгоритму поиска струй и к наименьшим погрешностям приводит  $K_T$ -алгоритм при мягких ограничениях на энерговыведения в ячейках. Представленные погрешности обусловлены разностью калибровочных коэффициентов в калибровочных выборках  $k_{jet}^{meas}$  и истинных значений калибровочных коэффициентов  $k_{jet}^{true}$  (1) для кварковых и глюонных струй, что приводит к погрешностям  $\approx 10-2\%$  при  $E_T^{parton} = 30-200$  ГэВ.

Возможности калибровки изучались при мягких и жестких ограничениях на параметры событий, которые подбирались из условия минимизация систематических погрешностей калибровки при фиксированных эффективностях отбора сигнала. Исследования проводились на основе полного моделирования детектора с помощью ORCA 8.9.4.

В частности, при выработке критериев отбора событий для калибровки ограничено применялись «некорректные отборы» и исключались ограничения на отношения параметров отбираемых событий к поперечной энергии фотона или струи ( $E_T^{isol}/E_T^\gamma$ ,  $E_T^{jet2}/E_T^{jet}$  ...), чтобы устранить зависимость значений калибровочных коэффициентов от критериев отбора событий.

Показано также, что оптимальной мерой изолированности фотона,

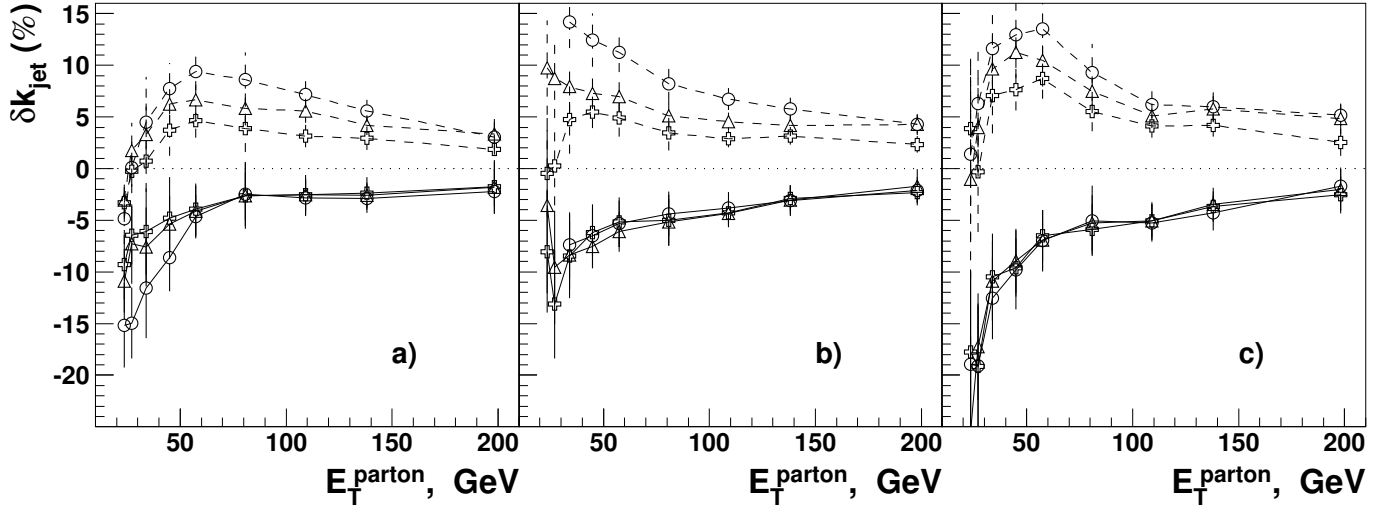


Рис. 3. Относительные систематические погрешности калибровки кварковых (непрерывные линии) и КХД струй (штриховые линии) для итерационного конусного алгоритма поиска струй с радиусами конусов 0,5 (кружки) и 0,7 (треугольники) и кластерного  $K_T$ -алгоритма с  $E_T$ -схемой (крестики) при различных ограничениях на ячейки: а)  $E_T^{tower} > 0,5$  ГэВ; б)  $E_T^{tower} > 1$  ГэВ и в)  $E_T^{tower} > 1,5$  ГэВ. (ORCA 8.7.1)

ограничение на которую приводит к наибольшему подавлению фона при наибольшем сохранении сигнала, является скалярная сумма ( $E_T^{isol}$ ) поперечных энергий, выделенных в ячейках калориметров, лежащих в пределах круга радиуса 0,7, очерченного в  $\eta$ - $\phi$ -пространстве вокруг фотона, за исключением 7x7 кристаллов в окрестности фотона. (Суммирование проводится при нижнем пороге на энергии ячеек: 0,18 и 0,9 ГэВ соответственно для цилиндрической и торцевых частей электромагнитного калориметра и 1 ГэВ для адронного калориметра.) Предлагаемые ограничения на эту величину для поперечных энергий фотона 20÷500 ГэВ составляют соответственно 1,5÷20 ГэВ при средних значениях  $\langle E_T^{isol} \rangle = 4 \div 10$  ГэВ. Таким образом, степень жесткости этого ограничения устанавливается в зависимости от уровня фона при разных поперечных энергиях фотона.

Для подавления эффектов, связанных с радиационными поправками к процессу «прямой фотон+струя» вводится ограничение на угол между фотоном и струей:  $\delta\phi_{\gamma,jet} > 172^\circ$ . В области  $E_T^\gamma < 200$  ГэВ, для подавления фона предлагается использовать ограничение на разность псевдобыстрот струи и фотона:  $|\eta^\gamma - \eta^{jet}| < \Delta\eta = 1 \div 3$  при  $|\eta^{jet}| = 0 \div 4, 5$ ; а также ограничение на поперечную энергию дополнительных струй в событии, которое привязывается к ее среднему значению ( $\langle E_T^{jet2} \rangle$ ) в каждом интервале по поперечной энергии фотона и псевдобыстроте струи:  $E_T^{jet2} < E_{Tmax}^{jet2} \approx 1,3\% \langle E_T^{jet2} \rangle \approx 10 \div 20$  ГэВ, при  $E_T^\gamma = 20 \div 150$  ГэВ. Последнее ограничение эффективно подавляет в отобранных событиях как излучение в начальном состоянии, так и фон двухструйных событий.

Перечисленные ограничения условно именуется «жесткими».

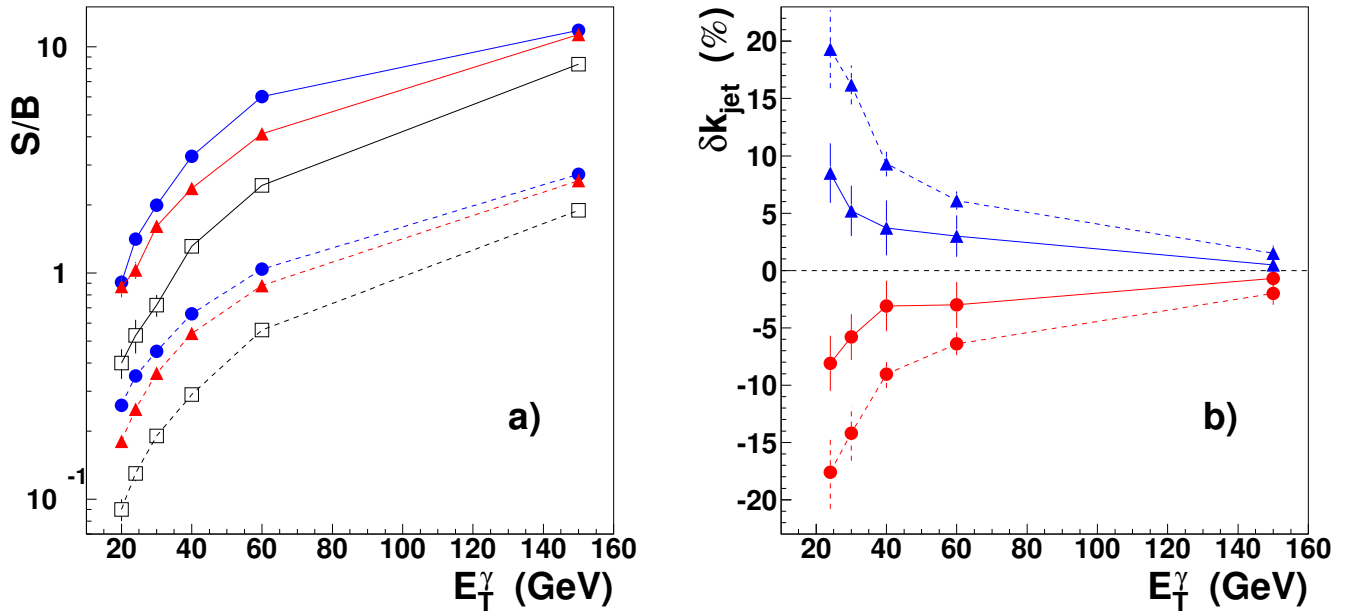


Рис. 4. Для «мягких» (сплошные линии) и «жестких» (пунктирные линии) представлены а) отношения количеств сигнальных и фоновых событий при в трех областях по псевдобыстротам основной струи:  $|\eta^{jet}| < 1.5$  (кружки),  $1.5 < |\eta^{jet}| < 3$  (треугольники) и  $3 < |\eta^{jet}| < 4.5$  (квадратики); б) систематические погрешности, которые вносит фон в калибровку, обусловленные тем, что фоновый «фотон» несёт лишь часть энергии породившего его партон жёсткого процесса (треугольники) и разностью истинных значений калибровочных коэффициентов в отобранных и сигнальных событиях (кружки) при  $|\eta_{jet}| < 1,5$ . (ORCA 8.9.4)

Рассматривается также вариант «мягких» отборов, включающих указанное ограничение на угол и ослабленные ограничения на изолированность фотона:  $E_T^{isol} < E_{Tmax}^{isol} = 4 \div 20$  ГэВ для  $E_T^\gamma = 20 \div 500$  ГэВ. «Мягким» отборам соответствуют эффективности отбора сигнальных событий  $20 \div 50\%$ , «жестким» –  $2 \div 20\%$  при  $E_T^\gamma = 20 \div 200$  ГэВ. «Мягкие» отборы могут быть использованы в начальный период набора данных на установке CMS с целью увеличения размера калибровочных выборок.

Сделана оценка фона для предлагаемых критериев отбора событий. Показано, что при поперечных энергиях фотонов  $E_T^\gamma = 20 \div 150$  ГэВ отношение сигнала к фону в отбираемых для калибровки событиях достигает при жестких отборах значений  $S/B = 1 \div 10$  (Рис. 4а).

Установлены источники систематических погрешностей калибровки, обусловленных наличием фоновых событий. В фоновых событиях  $P_T$ -баланс, аналогичный балансу по поперечным импульсам между фотоном и партоном в событиях с прямым фотоном, соблюдается между конечными партонами жесткого процесса: партоном, породившим основную струю, и партоном, породившим дополнительные струи и высокоэнергичный фотон. Этот фотон несёт лишь часть энергии партон-родителя и потому баланс  $P_T^\gamma - P_T^{parton}$  будет в фоновых событиях дополнительно нарушен на величину разности поперечных импульсов фотона и партон-родителя. Это нарушение вносит в калибровку

погрешность, которая может быть оценена как разность калибровочных коэффициентов  $k_{jet}$  (3), рассчитанных с использованием наблюдаемых значений  $E_T^\gamma$  и калибровочных коэффициентов  $k_{jet}^{\gamma \rightarrow parton}$  полученных при замене  $E_T^\gamma$  на  $E_T^{parton\gamma}$  – поперечный импульс партонa, породившего фотон:

$$\delta k_{jet}^{\gamma \in jet} = \frac{k_{jet} - k_{jet}^{\gamma \rightarrow parton}}{k_{jet}^{\gamma \rightarrow parton}}. \quad (4)$$

(Значения  $k_{jet}$  и  $k_{jet}^{\gamma \rightarrow parton}$  рассчитываются с использованием всех отобранных событий, включающих сигнал и фон.) Эта погрешность, как видно из Рис. 4b, достигает при  $E_T^\gamma < 40$  ГэВ более 5% в случае «жестких» и более 10% в случае «мягких» отборов. Однако, фон частично компенсирует эту погрешность тем, что в нём, в отличие от сигнальных событий, преобладают глюонные струи, которым соответствуют меньшие значения калибровочных коэффициентов, чем кварковым. Это вносит систематический сдвиг в шкалу энергии струи, который может быть оценен по разности истинных значений калибровочных коэффициентов (1) в отобранных ( $k_{jet}^{true}$ ) и сигнальных ( $k_{jet}^{true,S}$ ) событиях:

$$\delta k_{jet}^{q/g-jet} = \frac{k_{jet}^{true} - k_{jet}^{true,S}}{k_{jet}^{true,S}}. \quad (5)$$

В результате частичной компенсации сдвигов шкалы энергии струи, вызванных указанными эффектами, суммарная погрешность, вносимая фоном в калибровку, не превышает 2%, что позволяет надеяться на удовлетворительную точность калибровки в области малых поперечных энергий фотона, где уровень фона близок к сигналу.

Предлагаемая процедура калибровки струй для эксперимента CMS, использованная в программе ORCA и затем в программе моделирования детектора и реконструкции событий CMSSW включает расчет в соответствии с формулой (3) коэффициентов  $k_{jet}$  как средних значений распределения Гаусса, аппроксимирующего окрестность максимума спектра отношения  $E_T^{jet}/E_T^\gamma$  в интервалах  $E_T^\gamma(1 \pm 0,1)$  и 24 интервалах по  $\eta^{jet}$ , шириной 1-2 башни адронного калориметра. С помощью найденных значений  $k_{jet}$ , осуществляется переход от интервалов по  $E_T^\gamma$  к интервалам по  $E_T^{jet}$ . Далее, в каждом интервале по  $\eta^{jet}$  зависимость  $k_{jet}$  от  $E_T^{jet}$  аппроксимируется пятипараметрической функцией:

$$k_{jet}(E_T^{jet}) = A_1 + A_2 \ln(E_T^{jet} + A_3) - \frac{A_4}{E_T^{jet} + A_5}. \quad (6)$$

Значения параметров  $A_i$  ( $i = 1, \dots, 5$ ) определяются для каждого из используемых в CMS алгоритмов поиска струй. В результате получаются калибровочные кривые  $k_{jet}(E_T^{jet}, \eta^{jet})$ , пример которых представлен на Рис. 5.

Возможности данной методики иллюстрирует Рис. 6 и Таблица 2.

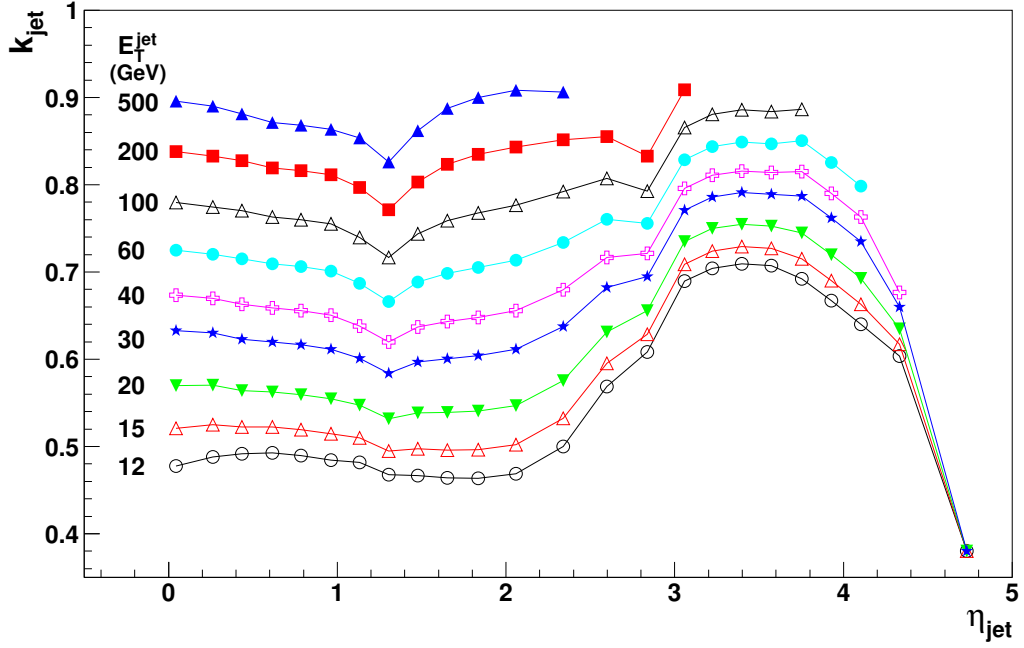


Рис. 5.  $\eta$ -зависимости калибровочных коэффициентов для различных значений поперечных энергий струи для итерационного конусного алгоритма поиска струй с радиусом конуса 0,5 при ограничении на поперечные энергии, выделенные в ячейках калориметра:  $E_T^{tower} > 0,8$  ГэВ,  $E_T^{tower} > 0,5$  ГэВ. (ORCA 8.9.4)

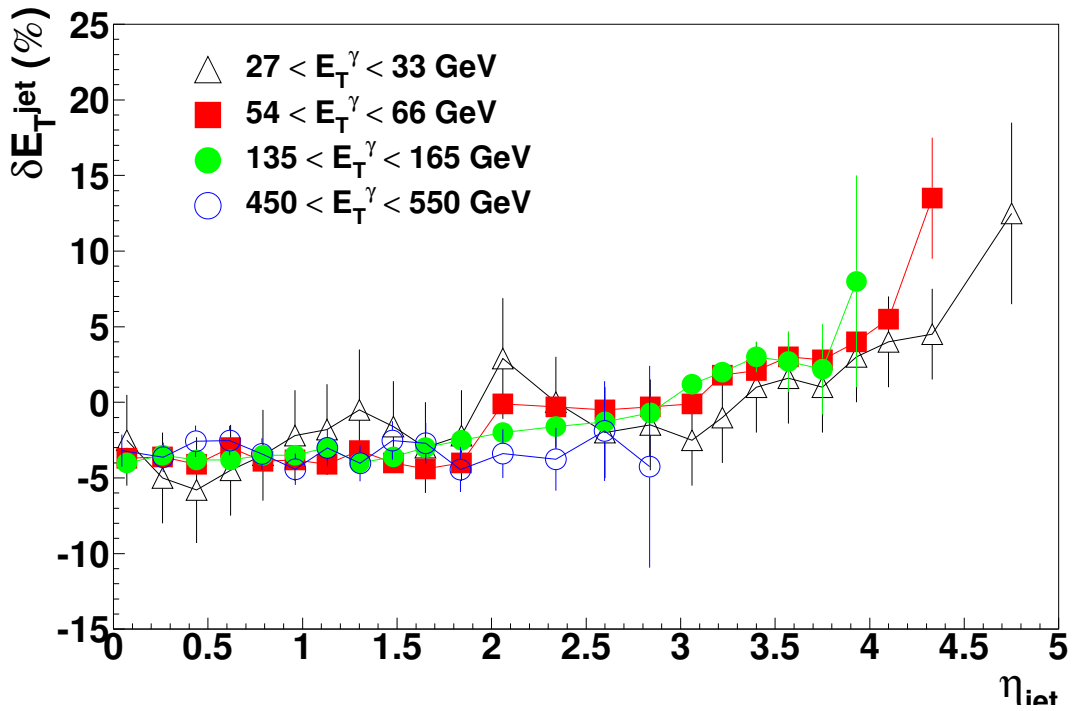


Рис. 6. Результирующие погрешности шкалы энергии струи для КХД-струй в зависимости от модуля псевдобыстроты струи в различных интервалах по поперечной энергии фотона. (ORCA 8.9.4)



Таблица 2. Оценки статистических (для интегральных светимостей 2 и 20  $fb^{-1}$ ), а также результирующей систематической погрешности шкалы энергии струи  $\delta k_{JES} = (k_{jet}^{meas} - k_{jet}^{true})/k_{jet}^{true}$  для КХД-струй и составляющих этой погрешности: а)  $B_1$ , связанной с наличием фоновых событий и обусловленной тем, что фоновый «фотон» несёт лишь часть энергии породившего его партона жёсткого процесса; б)  $B_2$ , обусловленной разным соотношением кварковых и глюонных струй в сигнальных и фоновых событиях; в) «ISR», обусловленной излучением в начальном состоянии; г) «QCD», определяемой разностью калибровочных коэффициентов КХД-струй и струй в событиях, отбираемых для калибровки в разных интервалах по  $E_T^\gamma$ .

$$|\eta^{jet}| < 1.5$$

$E_T^\gamma$ (ГэВ)	Систематические погрешности (%)					Статист. (%)	
	$B_1$	$B_2$	ISR	QCD	$\delta k_{JES}$	2 $fb^{-1}$	20 $fb^{-1}$
27- 33	$7 \pm 2$	$-7 \pm 2$	$0 \pm 2$	$5 \pm 3$	$5 \pm 3$	0,4	0,1
54- 66	$3 \pm 2$	$-3 \pm 2$	$0 \pm 1$	$4 \pm 2$	$4 \pm 2$	0,3	0,1
135-165	$1 \pm 1$	$-1 \pm 1$	$0 \pm 1$	$3 \pm 1$	$3 \pm 1$	0,3	0,1

$$|\eta^{jet}| = 4$$

$E_T^\gamma$ (ГэВ)	Систематические погрешности (%)					Статист. (%)	
	$B_1$	$B_2$	ISR	QCD	$\delta k_{JES}$	2 $fb^{-1}$	20 $fb^{-1}$
27- 33	$10 \pm 3$	$-11 \pm 3$	$-8 \pm 3$	$5 \pm 3$	$-3 \pm 3$	1,2	0,3
54- 66	$4 \pm 2$	$-4 \pm 2$	$-8 \pm 2$	$4 \pm 2$	$-4 \pm 2$	0,9	0,2
135-165	$2 \pm 2$	$-2 \pm 2$	$-11 \pm 4$	$3 \pm 1$	$-8 \pm 4$	1,0	0,2

Поскольку истинные значения калибровочных коэффициентов различны для глюонных струй, струй легких кварков, b-кварков и других типов струй, то результирующая погрешность, к которой будет приводить данная калибровка будет разной для струй разных каналов, используемых в той или иной физической задаче. Ряд физических задач, которые предстоит решать на эксперименте CMS (например, измерение  $\alpha_S$ , структурных функций) используют процессы инклюзивного рождения КХД-струй в  $pp$ -столкновениях. На Рис. 6 представлены результирующие систематические сдвиги шкалы энергии струи для данных КХД-струй в зависимости от модуля псевдобыстроты струи в различных интервалах по поперечной энергии фотона, определяемые разностью

$$\delta E_T^{jet} = \frac{E_T^{jet,corr} - E_T^{parton}}{E_T^{parton}} \equiv \frac{1}{k_{jet}} \frac{E_T^{jet}}{E_T^{parton}} - 1. \quad (7)$$

При этом в качестве откорректированных значений поперечных энергий струй принимались значения  $E_T^{jet,corr} = E_T^{jet}/k_{jet}$ , рассчитываемые с использованием параметризаций калибровочных коэффициентов  $k_{jet}$ , найденных путем моделирования сигнальных и фоновых событий с помощью ORCA 8.9.4.

Согласно Таблице 2, основной вклад в результирующую погрешность абсолютной шкалы энергии струи, устанавливаемой с помощью событий

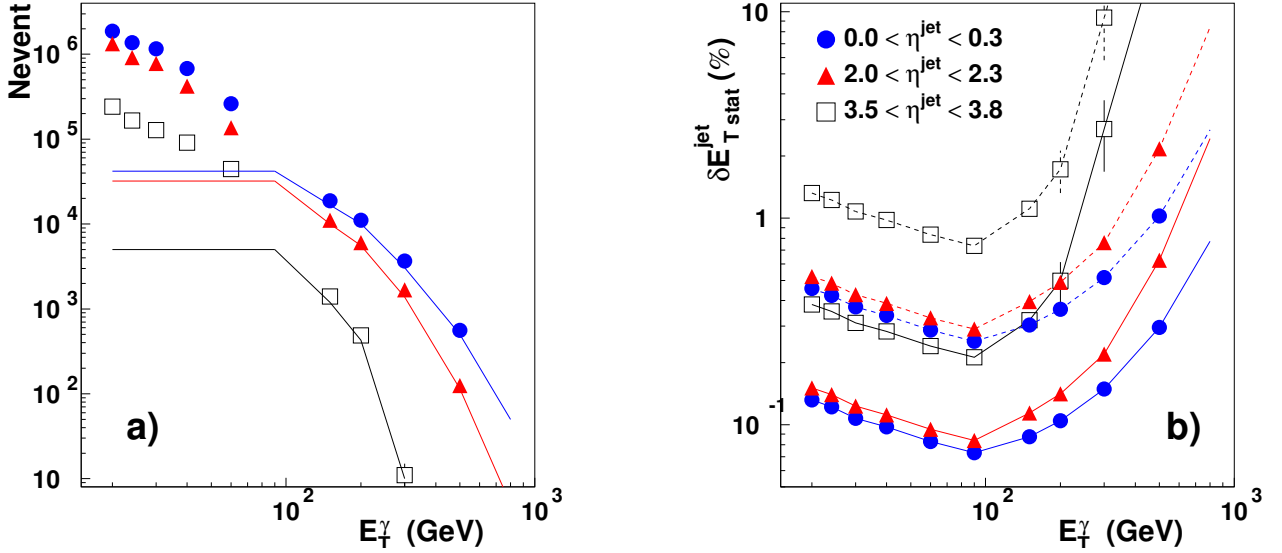


Рис. 7. В интервалах по поперечной энергии фотона  $E_T^\gamma(1 \pm 0,05)$  для трёх областей по псевдобыстроте основной струи представлены а) количества событий с прямыми фотонами, которые будут наблюдаться в течении года работы установки при низкой светимости (интегральная светимость  $L_{int} = 20 \text{ фб}^{-1}$ ) после жестких отборов (значки) и отборов триггерами (сплошные линии); б) статистические погрешности калибровки через месяц (пунктирные линии) и год (сплошные линии) работы установки.

«прямой фотон + струя», вносят два эффекта: нарушение  $P_T$ -баланса между фотоном и струей, вызванное излучением в начальном состоянии (Рис. 2), и разная доля потерянной энергии при регистрации кварковых и глюонных струй, которые могут содержаться в разных соотношениях в калибровочной и калибруемой выборках (Рис. 3). В случае струй, регистрируемых в цилиндрической и торцевых частях калориметра согласно Рис. 6 оба эффекта частично компенсируются, приводя к результирующей систематической погрешности от  $-4\% \div 0$  при  $|\eta^{jet}| = 0 \div 3$ . Однако, в области передних калориметров нарушение  $P_T$ -баланса между фотоном и струей приводит к росту результирующей погрешности, которая для струй в области передних калориметров достигает более 10%.

Оценки количеств событий, которые могут быть отобраны с использованием предлагаемых критериев представлены на Рис. 7а. Отбор событий предполагается производить с помощью стандартного триггера для изолированных фотонов с  $E_T^\gamma > 80 \text{ ГэВ}$ , а также с помощью специального триггера для отбора событий для данной калибровки в области  $20 < E_T^\gamma < 80 \text{ ГэВ}$ . Последний будет отбирать с частотой примерно 1 Гц события с изолированными фотонами, предварительно отобранные триггером первого уровня для одиночных  $e/\gamma$ . Это ограничение по частоте приводит к существенному обрезанию количества событий при малых  $E_T^\gamma$ .

Согласно Рис. 7б статистическая погрешность на уровне 1% может быть достигнута в течении месяца работы установки для струй в цилиндрической и

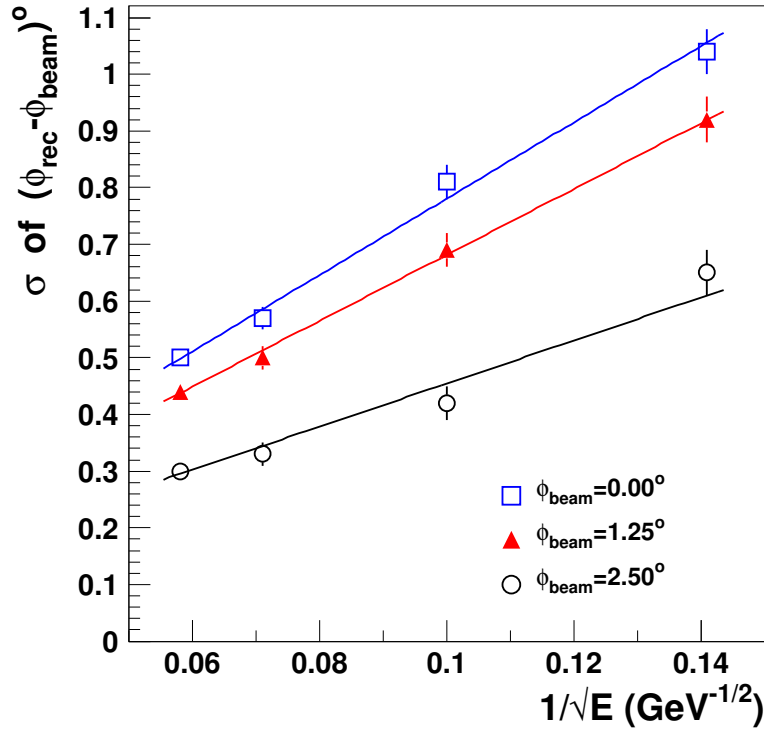


Рис. 8. Энергетические зависимости координатного разрешения калориметра HE для различных координат пионов:  $\phi_{beam} = 0, 00^\circ$ ,  $\phi_{beam} = 1, 24^\circ$ ,  $\phi_{beam} = 2, 50^\circ$ .

торцевых частях (НВ+НЕ) калориметра с поперечными энергиями до 500 ГэВ, а также для струй в передних калориметрах (НФ) с поперечными энергиями до 200 ГэВ. Через год эта погрешность будет достигнута для поперечных энергий струй 1000 и 300 ГэВ соответственно в областях НВ+НЕ и НФ.

**Раздел 4.4** посвящен измерению пространственного разрешения адронного калориметра установки CMS, которое непосредственно определяет точность шкалы энергии струи: коэффициентов  $k_{jet}$ , зависящих как от поперечных энергий, так и координат (псевдобыстрот) струй.

Исследования проводились на основе данных, полученных в сентябре 2003 года на пучке Н4 Суперпротонного синхротрона (SPS) в ЦЕРН при сканировании торцевой части адронного калориметра по азимутальному углу пучком пионов разной энергии. В результате проведенных исследований разработана методика для определения реконструированной координаты адронов по центру тяжести ливня в торцевом калориметре и измерена точность определения азимутальных углов адронов в зависимости от их координат и энергии. Установлено, что при попадании адронов с энергиями 50÷300 ГэВ в середину башни среднее квадратичное отклонение измеренного угла составляет  $1^\circ \div 0,5^\circ$ . При попадании адрона на границу башен, его угловые координаты определяются с примерно вдвое большей точностью (Рис. 8).

Эти значения можно использовать в качестве оценки точности координатной зависимости шкалы энергии струи, полагая, что ожидаемое

среднее квадратичное отклонение координат адронов по псевдобыстроте будет аналогичной:  $\approx 0,1$  размера башни.

В заключении сформулированы

### основные результаты и выводы диссертационной работы:

**1.** На основе Монте-Карло моделирования как физических событий с помощью генератора PYTHIA, так и их регистрации детектором с использованием программ быстрого (CMSJET) и полного моделирования детектора (CMSIM, OSCAR) и реконструкции событий (ORCA) впервые разработана методика установления абсолютной шкалы энергии струи с помощью событий «прямой фотон + струя» на установке CMS.

**2.** Выработаны критерии отбора событий «прямой фотон + струя», сделана оценка систематических погрешностей калибровки струй и определены ограничения на применимость разрабатываемой методики.

**2.1.** Впервые исследован при различных ограничениях на физические параметры событий дисбаланс поперечных импульсов прямого фотона и основной струи, вызванный излучением в начальном состоянии (ISR) фундаментального партонного процесса рассеяния, во всей области псевдобыстрот и поперечных энергий фотона и струи, достижимой в установке CMS. Определена область поперечных импульсов и псевдобыстрот фотонов и струй, в которой ISR ограничивает применимость данной калибровки.

**2.2.** Впервые сделаны оценки систематических сдвигов шкалы энергии струи, которые возникают при наложении ограничений на различные физические параметры событий для выделения канала «прямой фотон + струя» в установке CMS. Показано влияние на эти сдвиги как физических эффектов (жесткого столкновения, фрагментации, излучений в начальном и конечном состояниях), так и эффектов, связанных с регистрацией событий установкой. Предложены рекомендации для уменьшения погрешностей шкалы энергии струи, связанных с наложением ограничений на параметры событий.

**2.3.** Впервые определен уровень фона к событиям «прямой фотон + струя» в установке CMS и определены степени влияния на возможность его подавления отдельно физических эффектов, магнитного поля, ливней частиц, шумов электроники и наложения дополнительных событий. Показано, что ожидаемое в условиях установки отношение сигнала к фону составит в калибровочных выборках  $\approx 1 \div 10$  для поперечных энергий фотонов соответственно  $20 \div 150$  ГэВ.

**2.4.** Впервые рассчитан вклад различных обусловленных фоном эффектов в погрешность шкалы энергии струи на установке CMS. Показано, что при выработанных критериях отбора событий они приводят к систематическим сдвигам шкалы  $\approx 10 \div 2\%$  при  $E_T^\gamma = 20 \div 150$  ГэВ. Однако, вследствие частичной скомпенсированности этих сдвигов, результирующая систематическая погрешность, вносимая фоном в калибровку при данных отборах, не превышает  $2\%$ .

**2.5.** Рассчитаны систематические погрешности предложенной методики для струй разных типов и различных алгоритмов поиска струй. Показано, что результирующая систематическая погрешность калибровки струй обусловлена, прежде всего, двумя факторами: нарушением  $P_T$ -баланса между фотоном и струей, вызванным ISR и типами калибруемых струй. В случае КХД-струй оба фактора частично компенсируются, приводя к результирующей систематической погрешности  $4 \div 0\%$  при  $|\eta^{jet}| = 0 \div 3$ . При  $|\eta^{jet}| > 3$  эта погрешность вследствие ISR возрастает с увеличением модулей псевдобыстрот и поперечных энергий струй, достигая значений более  $10\%$ .

**3.** Рассчитаны статистические погрешности методики на основе оценки количеств событий «прямой фотон + струя» с учетом критериев запуска установки и предлагаемых критериев отбора событий. Показано, что в широком интервале псевдобыстрот, включающем область цилиндрического, торцевых и передних калориметров статистическая погрешность калибровки струй не будет превышать  $1\%$  для поперечных энергий до  $500$  ГэВ через месяц и до  $1000$  ГэВ через год набора данных при светимости  $2 \cdot 10^{33} \text{ см}^{-2} \text{ с}^{-1}$ .

**4.** На основе данных, полученных в сентябре 2003 года на пучке Н4 Суперпротонного синхротрона (SPS) в ЦЕРН, разработана методика определения координаты адронов по центру тяжести ливня и измерена точность определения азимутальных углов адронов в зависимости от их энергии в торцевом калориметре HE. Установлено, что среднее квадратичное отклонение измеренного угла для адронов с энергиями  $50 \div 300$  ГэВ составляет  $1^\circ \div 0,5^\circ$  при их попадании в середину башни и  $0,3^\circ \div 0,6^\circ$  при их попадании на границу башен.

**Основные результаты диссертации опубликованы в работах:**

1. *Bandourin D.V., Konoplyanikov V.F., Skachkov N.B.* Jet energy scale setting with “ $\gamma$ +jet” events at LHC energies. Generalites, selection rules. JINR Preprint E2-2000-251. Dubna, 2000, hep-ex/0011012. 19 pp.
2. *Bandourin D.V., Konoplyanikov V.F., Skachkov N.B.* Jet energy scale setting with “ $\gamma$ +jet” events at LHC energies. Event rates  $P_T$  structure of jet. JINR Preprint E2-2000-252. Dubna, 2000, hep-ex/0011013. 20 pp.
3. *Bandourin D.V., Konoplyanikov V.F., Skachkov N.B.* Jet energy scale setting with “ $\gamma$ +jet” events at LHC energies. Minijets and cluster suppression and  $P_T^\gamma - P_T^{Jet}$  disbalance. JINR Preprint E2-2000-253. Dubna, 2000, hep-ex/0011084. 20 pp.
4. *Bandourin D.V., Konoplyanikov V.F., Skachkov N.B.* Jet energy scale setting with “ $\gamma$ +jet” events at LHC energies. Selection of events with a clean “ $\gamma$ +jet” topology and  $P_T^\gamma - P_T^{Jet}$  disbalance. JINR Preprint E2-2000-254. Dubna, 2000, hep-ex/0011014. 7 pp.

5. *Bandourin D.V., Konoplyanikov V.F., Skachkov N.B.* Jet energy scale setting with “ $\gamma$ +jet” events at LHC energies. Detailed study of the background suppression. JINR Preprint E2-2000-255. Dubna, 2000, hep-ex/0011013. 23 pp.
6. *Konoplyanikov V., Urkinbaev A., Kodolova O.* Calibration of HCAL with “ $\gamma$  + jet” channel. 6th Annual RDMS CMS Collaboration Meeting. CMS Document 2001-047. MSU, Moscow, December 19-21, 2001. pp. 422-431.
7. *D.V. Bandourin, V.F. Konoplyanikov, N.B. Skachkov,* “ $\gamma$  + jet” process application for setting the absolute scale of jet energy and determining the gluon distribution at the LHC”, Proc. of VI International school-seminar "Actual problems of particle physics", Gomel, Belarus, August 7–16 2001. Eds. A. Bogush *et al*, Dubna, 2002, E1-2002-166, v.I, pp.167–184.
8. *Konoplyanikov V., Urkinbaev A., Kodolova O.* Study of the Isolation Criteria used in the Selection of “ $\gamma$  + jet” Events for the Jet Energy Scale Calibration. CMS Note IN-2003/013, 2003. 19 pp.
9. *Konoplyanikov V., Urkinbaev A., Kodolova O.* Systematic Errors on the Jet Energy Scale in “ $\gamma$  + jet” Events CMS Note IN-2003/036, 2003. 15 pp.
10. *Konoplyanikov V., Urkinbaev A., Kodolova O.* Study of the background for the “ $\gamma$  + jet” process in the CMS detector at low luminosity. Phys.Part.Nucl.Lett.2:45-53,2005; Письма в ЭЧАЯ. 2005, N 1 (124), с.73-83.
11. *Konoplyanikov V., Ulyanov A., Kodolova O.* Jet Calibration using “ $\gamma$  + jet” Events in the CMS Detector. Eur.Phys.J. C 46, s01, pp. 37-43 (2006).
12. *V.Konoplyanikov* “Jet Energy Scale at CMS”. Proceedings of 11th Annual RDMS CMS Collaboration Conference, 12 - 16 September, 2006, Varna, Bulgaria, CMS Document, RDMS-2006. 12 pp.
13. *И.А. Голутвин, А.В. Зарубин, О.Л. Кодолова, В.Ф. Конопляников, А.Л. Ульянов, С.В. Шматов.* Установка шкалы энергии струи на калориметре CMS с помощью событий с прямыми фотонами. Письма в ЭЧАЯ. 2008, N 5 (147) с.752-765.
14. *I.A. Golutvin, A.V. Zarubin, V.F. Konoplyanikov, P.V. Moisenz, S.V. Shmatov.* Measurement of space resolution of endcap hadronic calorimeter CMS using beam testing of CMS HCAL prototipe in 2003. Phys. Part. Nucl. Lett., 2008, Vol.5, No.4, pp. 383-386; Письма в ЭЧАЯ. 2008, N 4 (146) с.648-653.