

ГОСУДАРСТВЕННОЕ УНИТАРНОЕ ПРЕДПРИЯТИЕ  
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ НАУЧНЫЙ ЦЕНТР РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ  
ИНСТИТУТ ТЕОРЕТИЧЕСКОЙ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ ФИЗИКИ

На правах рукописи

ПЕРЕПЕЛИЦА  
Василий Федорович

**Аномальное рождение мягких фотонов  
в множественных адронных процессах**

Специальность 01.04.16—физика атомного ядра и элементарных частиц

АВТОРЕФЕРАТ  
диссертации на соискание ученой степени  
доктора физико-математических наук

Москва, 2010

Работа выполнена в Государственном научном центре РФ  
Институте Теоретической и Экспериментальной Физики, г. Москва

Официальные оппоненты: доктор физ.-мат. наук  
А.В. Кошелкин (МИФИ, г. Москва)  
доктор физ.-мат. наук  
П. Н. Пахлов (ИТЭФ, г. Москва)  
доктор физ.-мат. наук  
Л. Н. Смирнова (НИИЯФ МГУ, г. Москва)

Ведущая организация: Объединённый Институт Ядерных Исследований (ОИЯИ) (г. Дубна)

Защита состоится в 11 часов в конференц-зале ИТЭФ на  
заседании диссертационного совета Д.201.002.01 по защите докторских диссертаций  
в ГНЦ РФ ИТЭФ.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ИТЭФ.

Автореферат разослан

Ученый секретарь  
диссертационного совета  
кандидат физ.-мат. наук

В.В. Васильев

# 1 Общая характеристика работы.

Данная диссертация посвящена исследованию сравнительно мало изученного явления аномального рождения мягких фотонов в процессах множественного образования адронов при высоких энергиях (мягкими фотонами, по определению, считаются фотоны с поперечными импульсами,  $p_T$ , много меньшими по сравнению с характерными поперечными импульсами частиц в адронных реакциях, которые примерно равны 300-400 МэВ/с; при этом поперечный импульс измеряется по отношению к направлению пучковой частицы, если речь идёт об экспериментах с фиксированной мишенью, или по отношению к оси адронной струи, если речь идёт об экспериментах на встречных  $e^+e^-$  пучках). Был проведен анализ данных экспериментов WA83, WA91, WA102 (ускоритель CERN SPS) и DELPHI (ускоритель CERN LEP). Во всех исследуемых адронных реакциях наблюдается (впервые в мире) аномальное рождение мягких фотонов, интенсивность которого превышает уровень теоретических предсказаний от 4 до 7 раз. Изучены экспериментальные характеристики наблюдаемого эффекта.

## 1.1 Актуальность темы.

Считается общепринятым, что электромагнитное излучение мягких фотонов от взаимодействующих адронов хорошо понято теоретически. В основополагающих работах Лоу [15] и Грибова [16] было показано, что основным источником прямых мягких фотонов в реакциях сильного взаимодействия является процесс тормозного излучения, так называемый *внутренний адронный брэмштраглунг*, т.е. мягкие фотоны излучаются заряженными адронами в начальном и конечном состояниях адронной реакции.

Однако в эксперименте CERN WA27 был наблюден сигнал прямых мягких фотонов, значительно превышающий предсказанный уровень адронного брэмштраглунга [18]. Исследуемым процессом была реакция множественного рождения адронов во взаимодействиях  $K^+$  мезонов с импульсами 70 ГэВ/с с протонами.

В этой ситуации исследование, описанное в диссертации, было необходимо, на первоначальном этапе, для подтверждения результатов эксперимента WA27, а в дальнейшем — для расширения класса реакций, в которых наблюдается эффект аномального рождения мягких фотонов, и для изучения характеристик этого явления.

## 1.2 Цели и задачи исследования.

Целью диссертационной работы являлось исследование малоизученного эффекта аномального рождения мягких фотонов в процессах множественного образования частиц при высоких энергиях.

В этом исследовании были поставлены и решены следующие задачи:

1. Проверка положительных результатов эксперимента ЦЕРН WA27 по наблюдению аномального рождения мягких фотонов в адронных реакциях при высоких

энергиях. Она была реализована экспериментом WA83, в котором данный эффект был наблюден в реакции  $\pi^- p \rightarrow hadrons + \gamma's$  при 280 ГэВ/с при детектировании мягких фотонов калориметрическим методом, и экспериментом WA91, в котором мягкие фотоны из этой же реакции (и при том же импульсе пучка) детектировались методом конверсии в  $e^+e^-$  пары.

2. Расширение набора адронных реакций, в которых наблюдается эффект аномального рождения мягких фотонов. Результат: эффект был наблюден в реакции  $pp \rightarrow hadrons + \gamma's$  при 450 ГэВ/с (эксперимент WA102, при этом мягкие фотоны детектировались тоже методом конверсии).
3. Исследование характеристик процесса образования аномальных фотонов и их зависимостей от угловых, энергетических и других переменных в реакциях на адронных пучках. Оно было составной частью анализа экспериментальных данных экспериментов WA83, WA91 и WA102.
4. Дальнейшее расширение класса реакций, в которых наблюдается эффект аномального рождения мягких фотонов. Результат: эффект был наблюден в реакции аннигиляции  $e^+e^-$  на ускорителе LEP1, а именно, в реакции  $e^+e^- \rightarrow Z^0 \rightarrow hadrons + \gamma's$  в эксперименте DELPHI, с применением метода конверсии для детектирования фотонов.
5. Выполнение большого количества контрольных опытов и проверок правильности наблюдения аномального рождения мягких фотонов в адронных распадах  $Z^0$  (из предыдущего пункта).
6. Выполнение контрольного опыта с использованием событий из реакции  $e^+e^- \rightarrow Z^0 \rightarrow \mu^+\mu^- + \gamma's$  теми же методами детектирования фотонов и анализа, что и в адронных событиях распадов  $Z^0$ . Полученные результаты оказались в хорошем согласии с теоретическими предсказаниями для мюонного брэмштраглунга.
7. Изучение свойств внутреннего тормозного излучения от мюонов в реакции из предыдущего пункта; наблюдение (впервые в экспериментах по физике высоких энергий) мёртвого конуса мюонного брэмштраглунга.
8. Исследование поведения аномального сигнала мягких фотонов в зависимости от различных характеристик кварк-глюонных струй, содержащих эти фотоны; поиск переменных (характеристик струй), определяющих это поведение, и фиксация переменных, от которых это поведение зависит слабо; и то, и другое является чрезвычайно важным при выборе класса теоретических моделей, претендующих на описание эффекта аномального рождения мягких фотонов.
9. Расчёт величин радиационных поправок к формулам Лоу и Хайссинского, используемых для вычислений интенсивности внутреннего тормозного излучения и являющихся формулами 1-го порядка по константе электромагнитного взаимодействия  $\alpha$ .

### 1.3 Научная новизна и практическая ценность работы.

1. Впервые наблюдён эффект аномального рождения мягких фотонов в реакции  $\pi^- p \rightarrow hadrons + \gamma's$  (эксперименты WA83, WA91).
2. Впервые наблюдён эффект аномального рождения мягких фотонов в реакции  $pp \rightarrow hadrons + \gamma's$  (эксперимент WA102).
3. Впервые наблюдён эффект аномального рождения мягких фотонов в реакции  $e^+e^- \rightarrow Z^0 \rightarrow hadrons + \gamma's$  (эксперимент DELPHI).
4. Впервые наблюдён эффект рождения прямых мягких фотонов (внутреннее тормозное излучение от мюонов) в реакции  $e^+e^- \rightarrow Z^0 \rightarrow \mu^+\mu^- + \gamma's$  (эксперимент DELPHI).
5. Впервые в экспериментах физики высоких энергий наблюдён мёртвый конус тормозного мюонного излучения (эксперимент DELPHI).
6. Произведено изучение зависимости аномального рождения мягких фотонов в реакции  $e^+e^- \rightarrow Z^0 \rightarrow hadrons + \gamma's$  от характеристик кварк-глюонных струй (эксперимент DELPHI). Обнаружено нетривиальное поведение сигнала аномальных мягких фотонов в зависимости от некоторых исследуемых переменных (в частности, от множественности нейтральных частиц в струе и, как следствие, полной множественности частиц в струе).
7. Произведен расчёт величин радиационных поправок к формулам Лоу и Хайссинского, используемых для вычислений интенсивности внутреннего тормозного излучения, в ограниченных диапазонах по углу излучения мягких фотонов  $\theta_\gamma$  и по поперечному импульсу  $p_T$ , совпадающих с исследуемыми диапазонами этих переменных (т.е. с обрезаниями по  $\theta_\gamma$  и  $p_T$ ); заметим, что в литературных источниках расчёты радиационных поправок выполняются во всём угловом диапазоне и без ограничений по  $p_T$ .

Результаты исследования поведения аномального сигнала мягких фотонов, как в зависимости от фотонных переменных, так и от различных характеристик кварк-глюонных струй, содержащих эти фотоны, могут и должны быть использованы в дальнейшем при построении теоретических моделей, претендующих на описание эффекта аномального рождения мягких фотонов. В частности, уже сейчас можно сделать вывод о том, что источником аномального излучения мягких фотонов в адронных распадах  $Z^0$  бозонов являются, очевидно, кварк-антикварковые пары, появляющиеся из вакуума в процессе фрагментации; они производят прямые фотоны (дополнительно к брэмштраглунгу от заряженных адронов в конечном состоянии), причём излучение от отдельных кварк-антикварковых пар складывается некогерентно, хотя определённая когерентность внутри пар может иметь место.

## 1.4 Апробация работы и публикации.

Материалы, изложенные в диссертации, опубликованы в работах [1 - 14].

Основные результаты работ, вошедших в диссертацию, неоднократно обсуждались на рабочих совещаниях коллабораций WA83, WA91, WA102, DELPHI. Они докладывались на специализированных семинарах по физике высоких энергий и элементарных частиц в отечественных и зарубежных научных центрах: ИТЭФ, ФИАН, ОИЯИ, НИИЯФ МГУ, МИФИ, ЦЕРН, IFIC (Валенсийский Университет). Кроме того, эти результаты докладывались на международных конференциях и симпозиумах: на Симпозиуме по множественному рождению частиц (Cracow, Poland, 1993), на Симпозиуме по проблеме аномальных мягких фотонов (GSI, Darmstadt, Germany, 1997), на конференции ISMD1998 (Delphi, Greece, 1998), на Конференции по множественному рождению частиц (Creta, Greece, 2002), на 33-й Конференции по физике высоких энергий (ИЯИ'06, Москва, 2006), на конференции ISMD2009 (Гомель, Беларусь, 2009).

## 1.5 Структура и объём диссертации.

Диссертация состоит из 9 глав (включая Введение и Заключение), Приложения и библиографического списка, содержащего 147 наименований. Общий объём диссертации 170 страниц.

## 2 Краткое содержание диссертации.

### Глава 1 (Введение).

Во *Введении* сформулирована цель диссертации и дан краткий обзор рассматриваемой проблемы, включающий сводную таблицу экспериментальных результатов по исследованию рождения прямых мягких фотонов.

### Глава 2 ( $\pi^- p \rightarrow hadrons + \gamma's$ , эксперимент WA83).

В этой главе описан анализ рождения мягких фотонов в реакции  $\pi^- p \rightarrow hadrons + \gamma's$  при импульсе налетающего  $\pi^-$  280 ГэВ/с, с использованием данных эксперимента WA83 и с калориметрическим методом детектирования мягких фотонов. Исследуемый кинематический диапазон:  $0.2 < E_\gamma \leq 1$  ГэВ,  $p_T < 10$  MeV/c, где  $p_T$  — поперечный импульс  $\gamma$ -кванта по отношению к направлению налетающего  $\pi^-$ . Наблюден эффект аномального рождения мягких фотонов в исследуемой реакции. Уровень сигнала составил  $(143.7 \pm 0.4 \pm 23.8) \times 10^{-3}$  фотонов на одно событие, в то время как интенсивность тормозного излучения предсказана равной  $(18.2 \pm 0.4 \pm 2.0) \times 10^{-3}$ /событие. Их отношение равно  $7.9 \pm 0.2 \pm 1.6$ .

### Глава 3 ( $\pi^- p \rightarrow hadrons + \gamma's$ , эксперимент WA91).

В этой главе описан анализ рождения мягких фотонов в реакции  $\pi^- p \rightarrow hadrons + \gamma's$  при импульсе налетающего  $\pi^-$  280 ГэВ/с, с использованием данных эксперимента WA91 и с детектированием мягких фотоном методом конверсии в тонкой свинцовой пластине, расположенной перед трековыми камерами  $\Omega$  спектрометра. Исследуемый кинематический диапазон:  $0.2 < E_\gamma \leq 1$  ГэВ,  $\theta_\gamma < 20$  мрад, где  $\theta_\gamma$  - угол вылета  $\gamma$ -кванта по отношению к направлению налетающего  $\pi^-$ .

Получено экспериментальное подтверждение существования эффекта аномального рождения мягких фотонов в исследуемой реакции, наблюденного ранее в эксперименте WA83. Уровень сигнала составил  $(92 \pm 4 \pm 15) \times 10^{-3}$  фотонов на одно событие, в то время как интенсивность тормозного излучения предсказана равной  $(17.4 \pm 0.3 \pm 1.2) \times 10^{-3}$ /событие. Их отношение равно  $5.3 \pm 0.2 \pm 0.9$ . Эти результаты иллюстрированы Рис. 1, на котором представлены распределения фотонов по поперечному импульсу.

Изучены некоторые экспериментальные характеристики наблюденного сигнала, а именно энергетическая зависимость и угловые распределения фотонов (показаны на Рис. 2,3). Найдено, что они хорошо согласуются с аналогичными характеристиками, ожидаемыми для внутреннего тормозного излучения от адронов исследуемой реакции.

### Глава 4 ( $pp \rightarrow hadrons + \gamma's$ , эксперимент WA102).

В этой главе описан анализ рождения мягких фотонов в реакции  $pp \rightarrow hadrons + \gamma's$  при импульсе налетающего протона 450 ГэВ/с, с использованием данных эксперимента WA102 и с таким же методом детектирования мягких фотонов, как и в эксперименте WA91. Исследуемый кинематический диапазон:  $0.2 < E_\gamma \leq 1$  ГэВ,  $\theta_\gamma < 20$  мрад, где  $\theta_\gamma$  - угол вылета  $\gamma$ -кванта по отношению к направлению налетающего протона.

Установлено существование эффекта аномального рождения мягких фотонов на уровне  $(47.3 \pm 1.8 \pm 9.1) \times 10^{-3}$  фотонов на одно событие, в то время как интенсивность тормозного излучения предсказывается на уровне  $(11.6 \pm 0.2 \pm 0.7) \times 10^{-3}$ /событие. Их отношение равно  $4.1 \pm 0.2 \pm 0.8$ .

### Глава 5 ( $Z^0 \rightarrow hadrons + \gamma's$ , эксперимент DELPHI).

В этой главе описан анализ рождения мягких фотонов в реакции  $Z^0 \rightarrow hadrons + \gamma's$ , с использованием данных эксперимента DELPHI и с детектированием мягких фотоном методом конверсии в веществе детектора, расположенном перед основным трековым прибором DELPHI, камерой ТРС. Исследуемый кинематический диапазон:  $0.2 < E_\gamma \leq 1$  ГэВ,  $p_T < 80$  МэВ/с, где  $p_T$  - поперечный импульс  $\gamma$ -кванта по отношению к оси адронной струи.

Анализ показал наличие значительного избытка мягких фотонов внутри адронных струй по сравнению с предсказаниями моделей партонных ливней для скоростей счёта фотонов от распадающихся нестабильных адронов (см. Рис. 4, на котором представлены распределения фотонов по углу  $\theta_\gamma$ , поперечному импульсу  $p_T$  и по  $p_T^2$ ). После вычитания адронного фона сигнал составил  $(1.17 \pm 0.06 \pm 0.27) \times 10^{-3}$   $\gamma$ /струю (в

данных, не поправленных на эффективность детектирования фотонов), что необходимо сравнить с предсказанием для интенсивности внутреннего тормозного излучения от адронов из распадов  $Z^0$ ,  $(0.340 \pm 0.001 \pm 0.038) \times 10^{-3} \gamma/\text{струю}$ . Отнесённый к интенсивности тормозного излучения, наблюдаемый сигнал мягких фотонов составил  $3.4 \pm 0.2 \pm 0.8$ .

Аналогичный вывод может быть сделан и на основе результатов, поправленных на эффективность детектирования: наблюдаемый сигнал получен равным  $(69.1 \pm 4.5 \pm 15.7) \times 10^{-3} \gamma/\text{струю}$ , в то время как интенсивность тормозного излучения предсказывается на уровне  $(17.10 \pm 0.01 \pm 1.21) \times 10^{-3} \gamma/\text{струю}$ . Отсюда следует, что их отношение равно  $4.0 \pm 0.3 \pm 1.0$ .

Были изучены различные систематические эффекты, способные приводить к наблюдаемому избытку мягких фотонов. Было показано, что наблюдаемый сигнал не может быть объяснен такими тривиальными причинами, как недооценка внешнего тормозного излучения в Монте-Карловских данных, неправильное моделирование спектров фотонов использовавшимися генераторами событий, или различие в обработке экспериментальных и Монте-Карловских данных программой реконструкции событий. Важное значение, ввиду доминирующего вклада  $\gamma$ -квантов от распадов  $\pi^0$  в интенсивность фона, имеет хорошее согласие между экспериментальными и Монте-Карловскими результатами для сигналов этих частиц, извлекаемыми из распределений по массе двух фотонов, когда один из фотонов является низкоэнергичным, см. Рис. 5.

## Глава 6 ( $Z^0 \rightarrow \mu^+ \mu^- + \gamma$ 's, эксперимент DELPHI).

В этой главе описан анализ рождения мягких фотонов в реакции  $Z^0 \rightarrow \mu^+ \mu^- + \gamma$ 's, с использованием данных эксперимента DELPHI и с детектированием мягких фотоном методом конверсии в веществе детектора, как и в предыдущем случае. Кроме самостоятельного интереса, этот анализ представлял собой определённую проверку (контрольный эксперимент) методов и результатов исследования мягких фотонов в адронных событиях распадов  $Z^0$ , описанного в Главе 5. Изучалось рождение фотонов в двух кинематических диапазонах: в LE (низкоэнергичном) диапазоне,  $0.2 < E_\gamma \leq 1$  ГэВ,  $p_T < 40$  МэВ/с, где  $p_T$  - поперечный импульс  $\gamma$ -кванта по отношению к направлению излучающего мюона, и в HE (высокоэнергичном) диапазоне,  $1 < E_\gamma \leq 10$  ГэВ,  $p_T < 80$  МэВ/с.

На Рис. 6,7 представлены распределения фотонов по переменным  $\theta_\gamma$ ,  $p_T$  и  $p_T^2$  в обоих энергетических диапазонах (не поправленные на эффективность детектирования). Из этих (и аналогичных поправленных) распределений получены вероятности рождения фотонов, не поправленные (поправленные) на эффективность детектирования фотонов, равные (в единицах  $10^{-3} \gamma/\mu$ ): а) в LE диапазоне:  $0.412 \pm 0.048 \pm 0.007$  ( $25.9 \pm 4.0 \pm 1.4$ ), в то время как теоретические предсказания для внутреннего тормозного излучения составляли  $0.388 \pm 0.001 \pm 0.025$  ( $23.30 \pm 0.01 \pm 0.93$ ); б) в HE диапазоне:  $0.829 \pm 0.069 \pm 0.025$  ( $21.1 \pm 2.2 \pm 1.3$ ), в то время как теоретические предсказания для внутреннего тормозного излучения составляли  $0.794 \pm 0.001 \pm 0.089$  ( $20.00 \pm 0.01 \pm 2.00$ ).

Отношения наблюдаемой и предсказанной интенсивностей излучения составили

$1.06 \pm 0.12 \pm 0.07$  в LE диапазоне, и  $1.04 \pm 0.09 \pm 0.12$  в HE диапазоне (при получении этих отношений использовались результаты, не поправленные на эффективность детектирования фотонов, т.к. они обладают лучшей статистической точностью). Таким образом, анализ мюонных данных показал хорошее согласие между наблюдаемыми и предсказанными уровнями излучения фотонов, в отличие от анализа адронных данных, описанного в предыдущей главе диссертации

Впервые в прямом рождении фотонов в распадах  $Z^0$  бозонов в частности, и в исследованиях мюонного брэмштраглунга при высоких энергиях вообще, наблюдён мёртвый конус брэмштраглунга, также в хорошем согласии с теоретическими предсказаниями для мюонного тормозного излучения (см. Рис. 8).

## **Глава 7 ( $Z^0 \rightarrow hadrons + \gamma$ 's, зависимость интенсивности излучения прямых мягких фотонов от свойств струй, эксперимент DELPHI).**

В этой главе, являющейся продолжением исследования аномального рождения мягких фотонов в адронных распадах  $Z^0$  бозонов, описанного в главе 5, приведен анализ зависимостей рождения мягких фотонов в этих распадах от характеристик адронных струй, с использованием данных эксперимента DELPHI и экспериментального метода, изложенного в главе 5, и в том же кинематическом диапазоне. Исследовалось поведение вероятности рождения мягких фотонов в зависимости от кинематических характеристик кварк-глюонных струй (импульса струи, ее массы и т.д.), от топологических характеристик струй (заряженной, нейтральной и полной множественности), а также от некоторых характеристик кора струи. За исключением нейтральной и полной множественности, указанные зависимости были найдены похожими на аналогичные зависимости для внутреннего адронного брэмштраглунга (опуская общий для всех зависимостей фактор превышения над предсказаниями для брэмштраглунга около четырех). Что касается нейтральной и полной множественности, наблюдается сильное отличие поведения сигнала прямых фотонов по сравнению с аналогичным поведением адронного брэмштраглунга (см. Рис. 9,10).

## **Глава 8 (Обсуждение результатов по рождению прямых мягких фотонов в адронных распадах $Z$ -бозонов и краткий обзор теоретических моделей, предложенных для описания эффекта аномального рождения этих фотонов в адронных реакциях).**

В этой главе дан краткий обзор теоретических моделей, предложенных для описания эффекта аномального рождения мягких фотонов в адронных реакциях, и проведено сравнение экспериментально наблюдаемых характеристик эффекта с предсказаниями теоремоделей. Исходя из результатов этого сравнения получены выводы о свойствах предполагаемого механизма образования аномальных мягких фотонов в процессах множественного рождения адронов. Так, на основании линейного роста вероятности

рождения мягких фотонов с полной множественностью струи сделан вывод о пропорциональной зависимости этой вероятности от числа кварк-антикварковых пар, рожденных в процессе фрагментации, и очерчен круг моделей, которые могут претендовать на объяснение наблюдаемого явления.

## Глава 9 (Заключение).

В *Заключении* сформулированы основные результаты, полученные в диссертации.

## Приложение.

В *Приложении* произведены расчёты величин радиационных поправок к формулам Лоу и Хайссинского, которые использовались для вычислений интенсивности внутреннего тормозного излучения, в исследуемых (ограниченных) диапазонах по углу испускания мягких фотонов  $\theta_\gamma$  и по поперечному импульсу  $p_T$ .

## 3 Основные результаты работы.

На защиту выносятся следующие основные результаты, полученные соискателем:

1. В эксперименте **WA83**: **а)** параллельный (независимый) анализ результатов этого эксперимента, подтвердивший предварительный вывод коллаборации WA83 о наблюдении аномального рождения мягких фотонов в реакции  $\pi^- p \rightarrow hadrons + \gamma$ 's при импульсе пучка 280 ГэВ/с с использованием калориметрического метода детектирования фотонов; **б)** исследование характеристик процесса образования аномальных фотонов и их зависимостей от угловых, энергетических и других переменных в исследуемой реакции.
2. В эксперименте **WA91**, использовавшем метод конверсии фотонов для их детектирования в аналогичной реакции: **а)** создание программы реконструкции мягких фотонов из треков конверсии, позволяющей восстанавливать треки с импульсами начиная от 40 МэВ/с, т.е. на порядок ниже порога стандартной программы реконструкции TRIDENT; **б)** обработка и восстановление массива событий, набранных в этом эксперименте для анализа рождения прямых мягких фотонов в вышеупомянутой реакции ( $1.6 \times 10^6$  событий); **в)** создание Монте-Карловской программы, предназначенной для имитации условий эксперимента WA91 и транспортировки частиц через экспериментальную установку, позволившее произвести аккуратную оценку фонов в этом эксперименте; **г)** анализ результатов эксперимента, подтвердивший существование эффекта аномального рождения мягких фотонов в исследуемой реакции; **д)** подготовка публикаций коллаборации WA91, посвящённых данному исследованию.
3. В эксперименте **WA102**, использовавшем метод конверсии фотонов для их детектирования в реакции  $pp \rightarrow hadrons + \gamma$ 's при импульсе пучка 450 ГэВ/с:

- а) модификация программы реконструкции мягких фотонов из треков конверсии, созданной первоначально для эксперимента WA91 для применения в эксперименте WA102; б) обработка и восстановление массива событий, набранных в эксперименте WA102 для анализа рождения прямых мягких фотонов в вышеупомянутой реакции ( $4 \times 10^6$  событий); в) модификация Монте-Карловской программы, созданной первоначально для эксперимента WA91, для применения в эксперименте WA102; г) анализ результатов этого эксперимента, впервые обнаруживший существование эффекта аномального рождения мягких фотонов в  $pp$  взаимодействиях, после того как в двух предшествующих экспериментах, посвящённых аналогичному исследованию и выполненным в БНЛ и ЦЕРНе (хотя и в несколько другой кинематической области), были получены лишь верхние пределы на существование этого эффекта; д) подготовка публикаций коллаборации WA102 по наблюдению аномального рождения мягких фотонов в исследуемой реакции.
4. **В эксперименте DELPHI:** а) предложение анализа реакции  $e^+e^- \rightarrow Z^0 \rightarrow hadrons + \gamma's$ , на ускорителе LEP1 с использованием данных эксперимента DELPHI с целью поиска эффекта аномального рождения мягких фотонов в этой реакции; б) разработка методов этого анализа по аналогии с методом адронных экспериментов WA91 и WA102, т.е. путём детектирования мягких фотоном по их конверсии в веществе детектора; в) проведение этого анализа и обнаружение эффекта аномального рождения мягких фотонов в исследуемой реакции, т.е. впервые в реакциях  $e^+e^-$  взаимодействий; г) выполнение большого количества контрольных опытов и проверок правильности наблюдения аномального рождения мягких фотонов в исследуемой реакции; д) подготовка результатов анализа к публикации в регулярной печати.
5. **В эксперименте DELPHI:** а) предложение исследования событий реакции  $e^+e^- \rightarrow Z^0 \rightarrow \mu^+\mu^- + \gamma's$ , набранных коллаборацией DELPHI, в качестве контрольного эксперимента к анализу адронных событий, упомянутому в предыдущем пункте; б) проведение этого анализа и обнаружение величины эффекта рождения прямых мягких фотонов, хорошо согласующейся с предсказаниями для внутреннего тормозного излучения от мюонов данной реакции; в) наблюдение мёртвого конуса мюонного брэмштраглунга, в согласии с теоретическими предсказаниями, впервые на ускорителе LEP и вообще в экспериментах по физике высоких энергий; г) подготовка публикаций коллаборации DELPHI по наблюдению внутреннего тормозного излучения в исследуемой реакции.
6. **В эксперименте DELPHI:** а) дополнительный анализ событий реакции  $e^+e^- \rightarrow Z^0 \rightarrow hadrons + \gamma's$  с целью изучения зависимостей рождения прямых мягких фотонов от характеристик кварк-глюонных струй, образующихся в процессе фрагментации; б) обнаружение нетривиального поведения сигнала аномальных мягких фотонов в зависимости от некоторых переменных данного анализа (в частности, от множественности нейтральных частиц в струе и, как следствие, полной множественности частиц в струе); результаты этого наблюдения могут

оказаться чрезвычайно важными при построении теории исследуемого эффекта (до сих пор отсутствующей); в) подготовка результатов анализа к публикации в регулярной печати.

7. **В экспериментах WA83, WA91, WA102 и DELPHI:** расчёт величин радиационных поправок к формулам Лоу и Хайссинского, используемых в экспериментах по исследованию рождения прямых мягких фотонов для вычислений интенсивности внутреннего тормозного излучения в 1-м порядке по константе электромагнитного взаимодействия  $\alpha$ , в ограниченных диапазонах по углу излучения мягких фотонов  $\theta_\gamma$  и по поперечному импульсу  $p_T$ , совпадающих с исследуемыми диапазонами этих переменных (т.е. с обрезаниями по  $\theta_\gamma$  и  $p_T$ ).

## Список литературы

- [1] S. Banerjee, ..., V. Perepelitsa et al., *Observation of direct soft photon production in  $\pi^-p$  interactions at 280 GeV/c.*, Phys. Lett. B **305**, 182 (1993)
- [2] T.J. Brodbeck, ..., V. Perepelitsa et al., *Some aspects of anomalous soft photon production in  $\pi^-p$  interactions at 280 GeV/c*, in *Proceedings of Cracow Workshop on Multiparticle Production, 1993*, edited by A. Bialas, K. Fialkowski, K. Zalewski and R.C. Hwa (World Sci., Singapore, New Jersey, London, Hong Kong 1993), p. 63
- [3] V. Perepelitsa (for WA83 Collaboration), *Experimental characteristics of anomalous soft photons in pion-proton interactions*, in *Proceedings of International Workshop on Soft Photon Production, Darmstadt, 1997, SP'97*, edited by J. Knoll, p.16; <http://theory.gsi.de/SP97.html>
- [4] A. Belogianni, ..., V. Perepelitsa et al., *Confirmation of a soft photon signal in excess of QED expectations in  $\pi^-p$  interactions at 280 GeV/c*, Phys. Lett. B **408**, 487 (1997)
- [5] V. Perepelitsa (for WA91 Collaboration), *Experimental characteristics of anomalous soft photon radiation in  $\pi^-p$  interactions at 280 GeV/c*, in *Proceedings of XXVIII International Symposium on Multiparticle Dynamics, Delphi, Greece, 1998*, edited by N.G. Antoniou, A.P. Contogouris, F.K. Diakonos, C.N. Ktorides, M. Stassinaki and M. Vassiliou (World Sci., Singapore, New Jersey, London, Hong Kong 2000), p. 375
- [6] A. Belogianni, ..., V. Perepelitsa et al., *Further analysis of a direct soft photon excess in  $\pi^-p$  interactions at 280 GeV/c*, Phys. Lett. B **548**, 122 (2002)

- [7] A. Belogianni, ..., V. Perepelitsa et al., *Observation of a soft photon signal in excess of QED expectations in pp interactions*, Phys. Lett. B **548**, 129 (2002)
- [8] P. Ganoti, ..., V. Perepelitsa et al., *A study of soft photon production in pp collisions at 450 GeV/c at CERN-SPS*. in *Proceedings of 10th International Workshop on Multiparticle Production: Correlations and Fluctuations in QCD*, Creta, Greece, 2002, edited by N. Antoniou, F. Diakonos, C. Ktorides, M. Spiropoulou-Stassinaki (World Sci., Singapore, New York, London 2003) p.143
- [9] DELPHI Collaboration, J. Abdallah, ..., V. Perepelitsa et al., *Evidence for an excess of soft photons in hadronic decays of  $Z^0$* , Eur. Phys. J. C **47**, 273 (2006)
- [10] DELPHI Collaboration, J. Abdallah, ..., V. Perepelitsa et al., *Observation of the muon inner bremsstrahlung at LEP1*, Eur. Phys. J. C **57**, 499 (2008)
- [11] F. Mandl (for DELPHI Collaboration), *Leading system, colour reconnection and anomalous soft photons*, in *Proceedings of the 33rd International Conference on High Energy Physics (IHEP'06, Moscow 2006*, edited by A. Sissakian, G. Kozlov, E. Kolganova (World Sci., London, New Jersey, Singapore, Beijing, Shanghai, Hong Kong, Taipei, Chennai, 2007), p. 571
- [12] В.Ф. Перепелица, *Оценка вклада радиационных поправок в тормозное излучение мягких фотонов в произвольных процессах при высоких энергиях*. Препринт ИТЭФ 01-09, Москва (2009)
- [13] V.F. Perepelitsa (for DELPHI Collaboration), *Anomalous soft photons in hadronic decays of  $Z^0$* , in *Proceedings of XXXIX International Symposium on Multiparticle Dynamics (ISMD2009)*, Gomel, Belarus, 2009, Nonlinear Phenomena in Complex Systems, **12**, 343 (2009)
- [14] DELPHI Collaboration, J. Abdallah, ..., V. Perepelitsa et al., *Study of the Dependence of Direct Soft Photon Production on the Jet Characteristics in Hadronic  $Z^0$  Decays*, Eur. Phys. J. C, **67**, 343 (2010)
- [15] F. Low, Phys. Rev. **110** , 974 (1958)
- [16] В.Н. Грибов, ЯФ. **5**, 399 (1967)
- [17] A.T. Goshaw et al., Phys.Rev.Lett. **43** 1065 (1979)
- [18] P.V. Chliapnikov et al., Phys. Lett. B **141**, 276 (1984)
- [19] F. Botterweck et al., Z. Phys. C **51**, 541 (1991)

- [20] M.L. Tincknell et al., Phys. Rev. C **54**, 1918 (1996)
- [21] J. Antos et al., Z. Phys. C **59**, 547 (1993)
- [22] OPAL Collaboration, M.Z. Akrawy et al., Phys. Lett. B **246**, 285 (1990)
- [23] OPAL Collaboration, P.D. Acton et al., Z. Phys C **54**, 193 (1992)
- [24] OPAL Collaboration, R. Akers et al., Z. Phys. C **67**, 15 (1995)
- [25] OPAL Collaboration, G. Alexander et al., Phys. Lett. B **264**, 219 (1991)
- [26] OPAL Collaboration, P.D. Acton et al., Z. Phys. C **58**, 405 (1993)
- [27] OPAL Collaboration, K.W. Bell et al., Nucl. Phys. (Proc. Suppl.) B **64**, 32 (1998)
- [28] L3 Collaboration, O. Adriani et al., Phys. Lett. B **262**, 155 (1991)
- [29] L3 Collaboration, O. Adriani et al., Phys. Lett. B **292**, 472 (1992)
- [30] L3 Collaboration, M. Acciarri et al., Phys. Lett. B **353**, 136 (1995)
- [31] L3 Collaboration, O. Adriani et al., Phys. Lett. B **301**, 136 (1993)
- [32] DELPHI Collaboration, P. Abreu et al., Z. Phys. C **53**, 555 (1992)
- [33] DELPHI Collaboration, P. Abreu et al., Z. Phys. C **69**, 1 (1995)
- [34] ALEPH Collaboration, D. Decamp et al., Phys. Lett. B **264**, 476 (1991)
- [35] ALEPH Collaboration, D. Buskulic et al., Z. Phys. C **57**, 17 (1993)
- [36] DELPHI Collaboration, P. Abreu et al., Eur. Phys. J. C **16**, 371 (2000)
- [37] DELPHI Collaboration, J. Abdallah et al., Eur. Phys. J. C **45**, 589 (2006)
- [38] DELPHI Collaboration, J. Abdallah et al., Eur. Phys. J. C **46**, 295 (2006)
- [39] DELPHI Collaboration, P. Abreu et al., Z. Physik C **65**, 603 (1995)
- [40] OPAL Collaboration, P.D. Acton et al., Phys. Lett. B **273**, 338 (1991)
- [41] DELPHI Collaboration, P. Abreu et al., Phys. Lett. B **380**, 480 (1996)

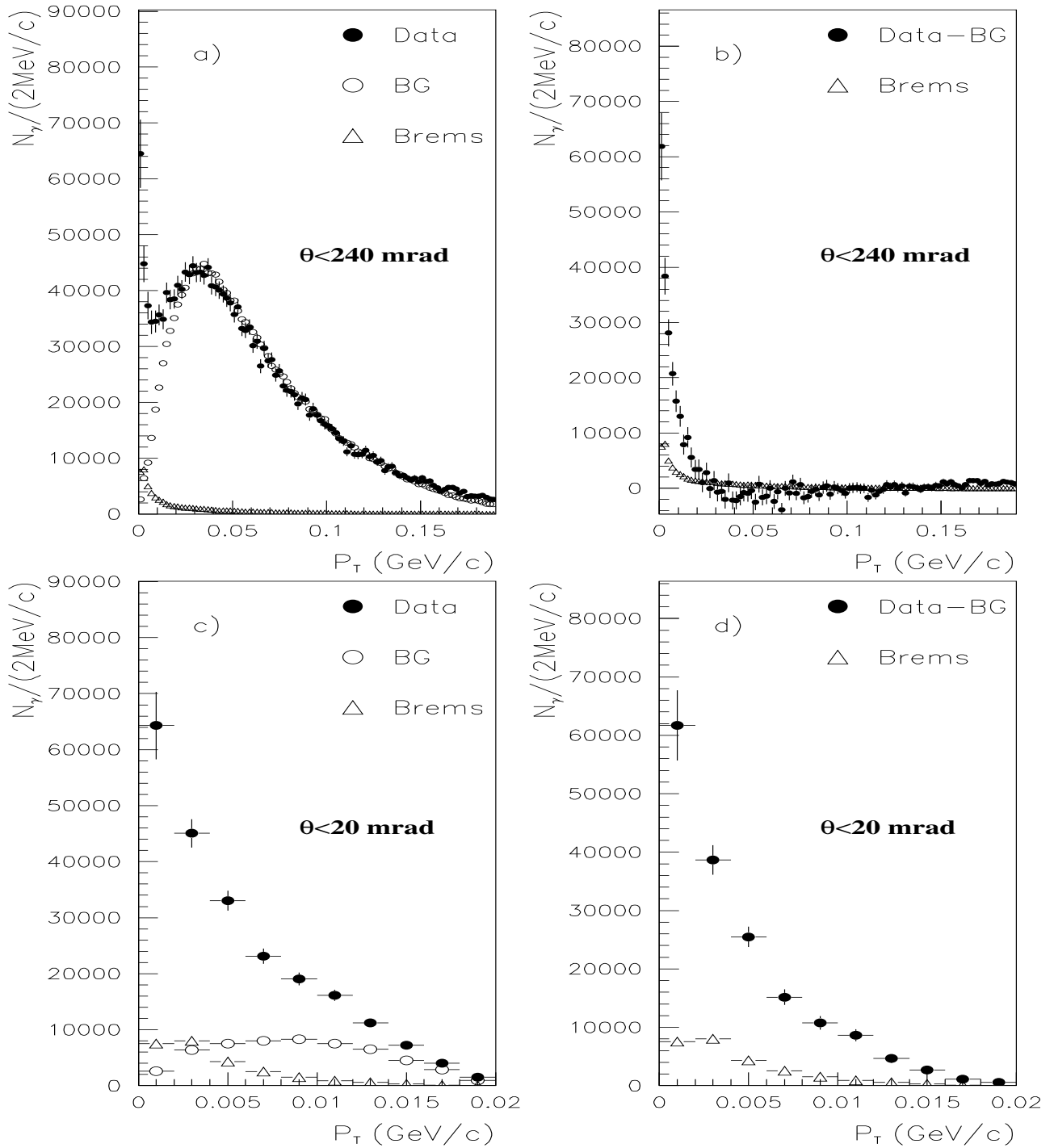


Рис. 1. Реакция (1), эксперимент WA91. Распределение фотонов с энергией  $0.2 < E_\gamma \leq 1$  ГэВ, по поперечному импульсу  $p_T$ , поправленное на эффективность детектирования; а)  $\theta_\gamma < 240$  мрад. “Data” означает экспериментальные данные, “BG” есть суммарный фон не прямых фотонов, и “Brems” соответствует предсказаниям для внутреннего адронного брэмштрагунга; б) то же самое после вычитания фона; с, д) то же, что а, б), но внутри интервала  $\theta_\gamma < 20$  мрад. Ошибки статистические.

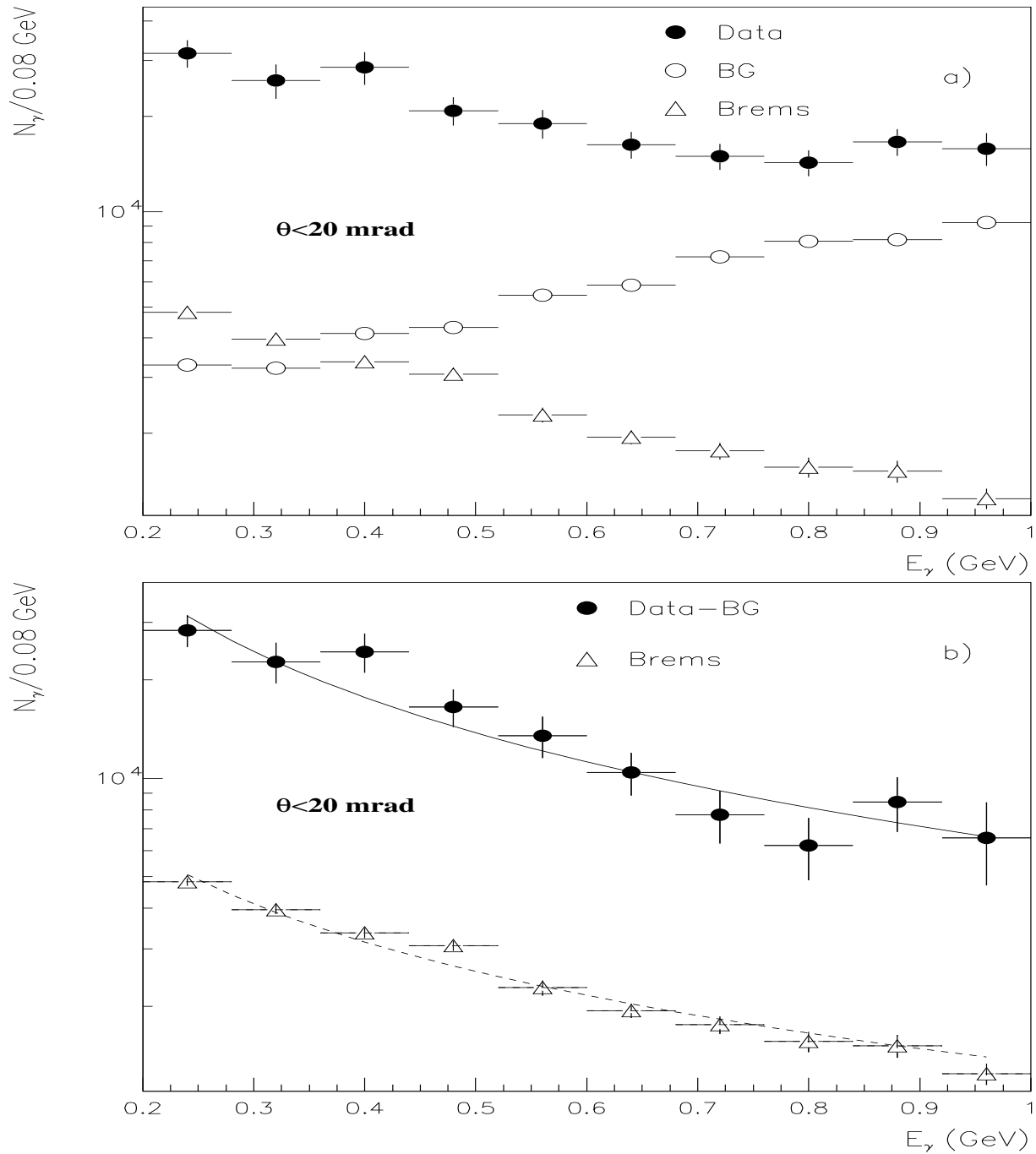


Рис. 2. Реакция (1), эксперимент WA91. Распределения фотонов по энергии в угловом диапазоне  $\theta_\gamma < 20$  мрад; а) экспериментальные данные, фон и брэмсштраггунг; б) то же самое после вычитания фона и с наложенными фитирующими кривыми. Ошибки статистические.

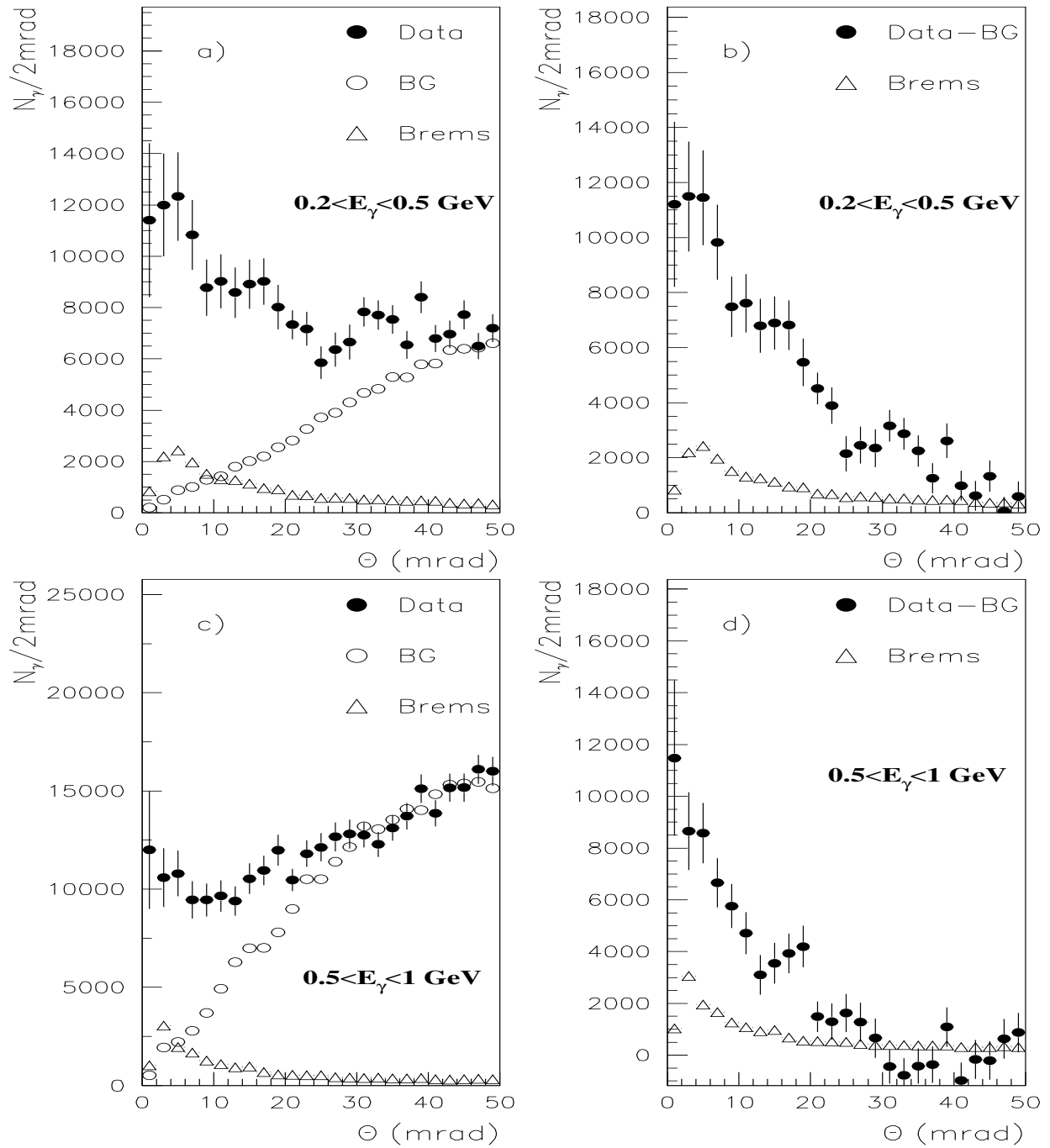


Рис. 3. Реакция (1), эксперимент WA91. Угловые распределения мягких фотонов: а) экспериментальные данные и предсказания для фона и брэмштраггунга в интервале энергий  $0.2 < E_\gamma \leq 0.5 \text{ ГэВ}$ ; б) то же самое после вычитания фона; с,д) то же, что а,б), но в интервале энергий  $0.5 < E_\gamma \leq 1 \text{ ГэВ}$ . Ошибки статистические.

# DELPHI

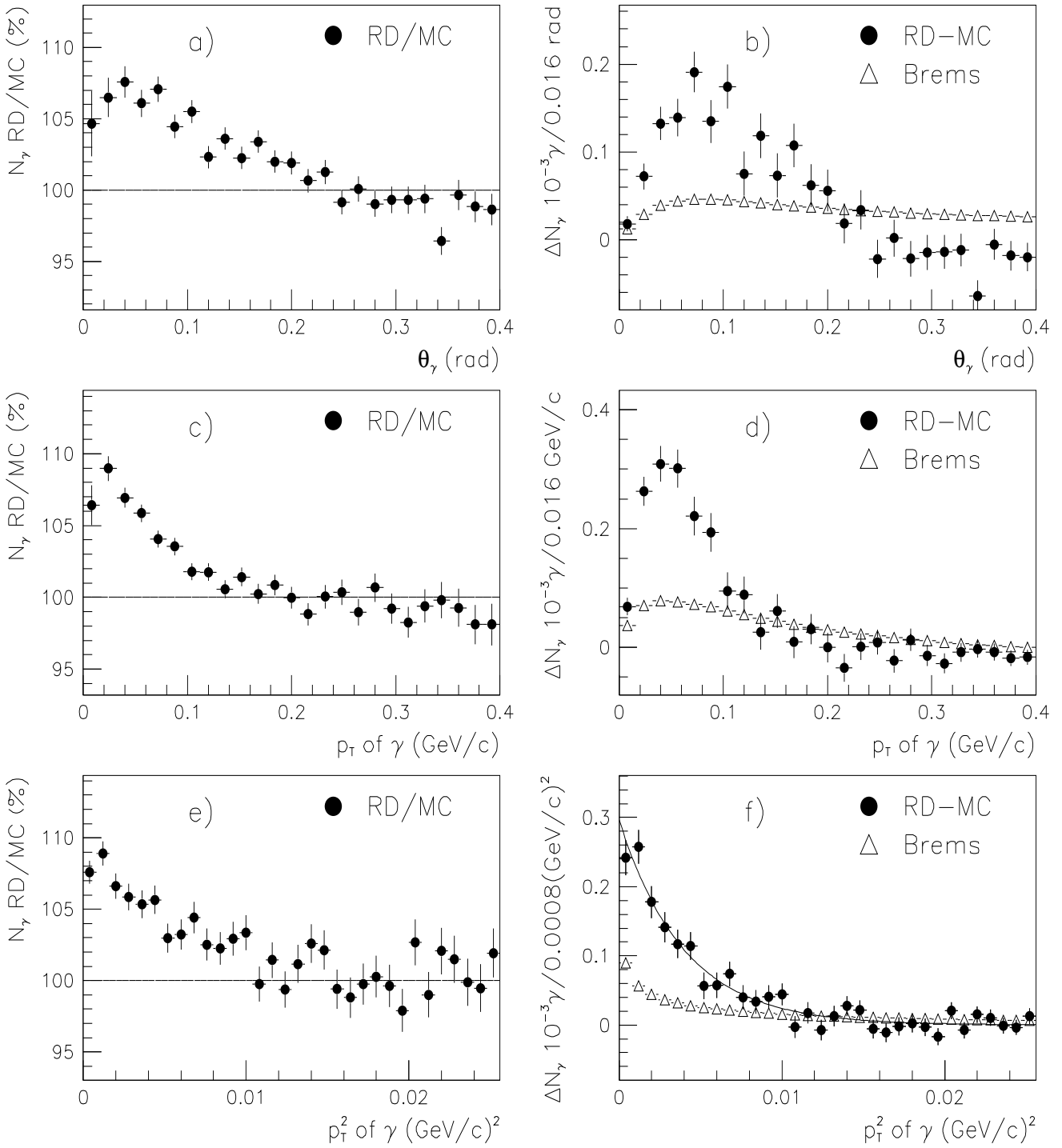


Рис. 4. Распределения фотонов, полученные при анализе реакции (3). *Левые панели:* отношения экспериментальных и Монте-Карловских распределений по а)  $\theta_\gamma$ ; с)  $p_T$ ; d)  $p_T^2$ . *Правые панели:* разница соответствующих экспериментальных и Монте-Карловских распределений. Кривая на Рис. 4 f) есть результат фита экспоненты. Ошибки статистические.

# DELPHI

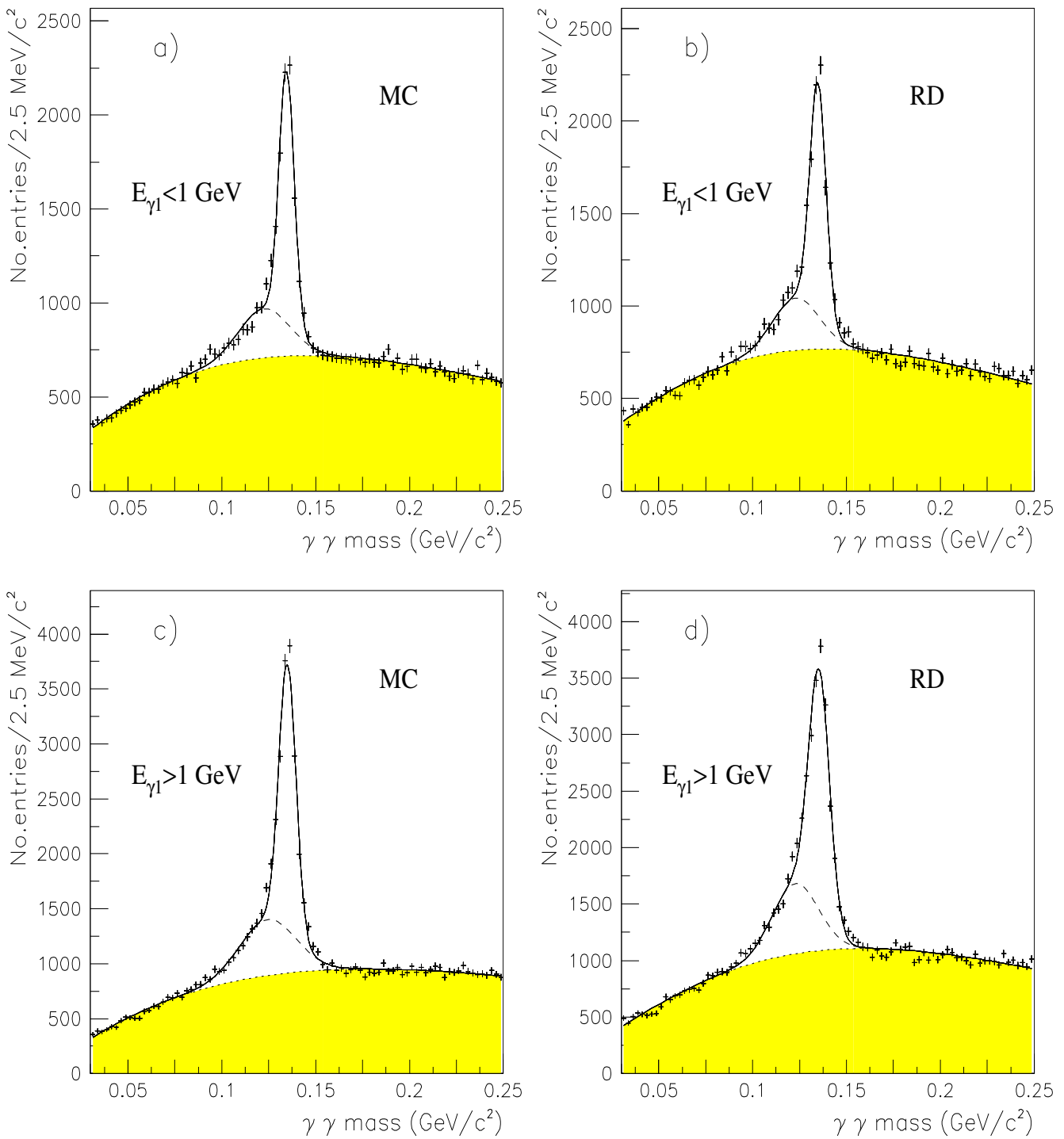


Рис. 5. Сравнение экспериментальных и Монте-Карловских распределений по  $\gamma\gamma$  массе конвертированных фотонов. а), б) LE x HE комбинации; с), д) HE x HE комбинации. Штриховые линии представляют гауссиан, введённый для описания искажений пиков (см. текст диссертации). Ошибки статистические.

# DELPHI

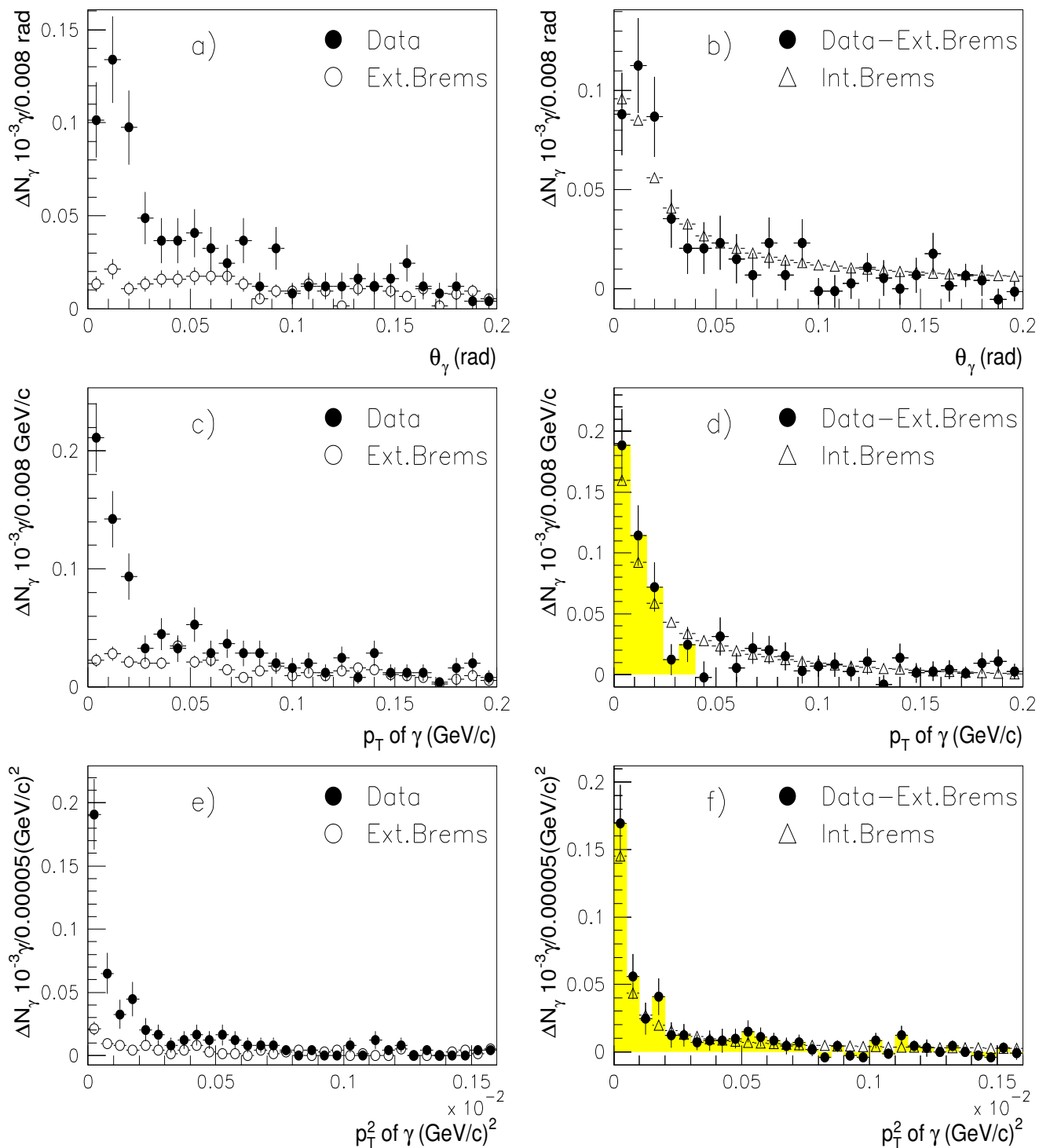


Рис. 6. Реакция (4). Распределения фотонов в интервале энергий  $0.2 < E_\gamma \leq 1$  ГэВ, не поправленные на эффективность детектирования. *Левые панели:* экспериментальные и фоновые распределения по а)  $\theta_\gamma$ ; с)  $p_T$ ; д)  $p_T^2$ . *Правые панели:* разница соответствующих экспериментальных и Монте-Карловских распределений. “Ext.Brems” соответствует суммарному фону, “Int.Brems” - предсказаниям для мюонного брэмштрагунга. Ошибки статистические.

# DELPHI

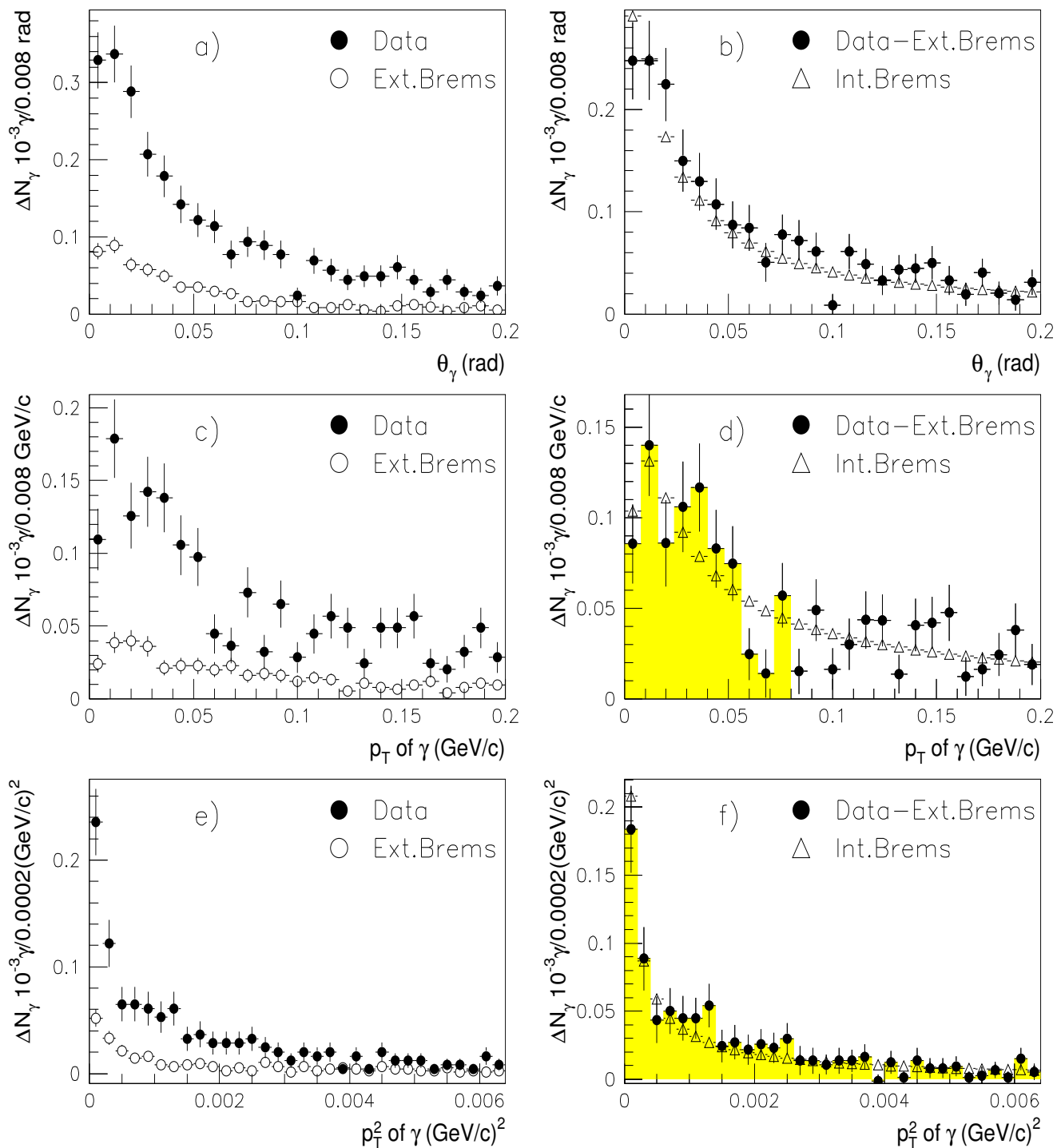


Рис. 7. Реакция (4). Распределения фотонов в интервале энергий  $1 < E_\gamma \leq 10$  ГэВ, не поправленные на эффективность детектирования. *Левые панели:* экспериментальные и фоновые распределения по а)  $\theta_\gamma$ ; с)  $p_T$ ; д)  $p_T^2$ . *Правые панели:* разница соответствующих экспериментальных и Монте-Карловских распределений. “Ext.Brems” соответствует суммарному фону, “Int.Brems” - предсказаниям для мюонного брэмштрагунга. Ошибки статистические.

# DELPHI

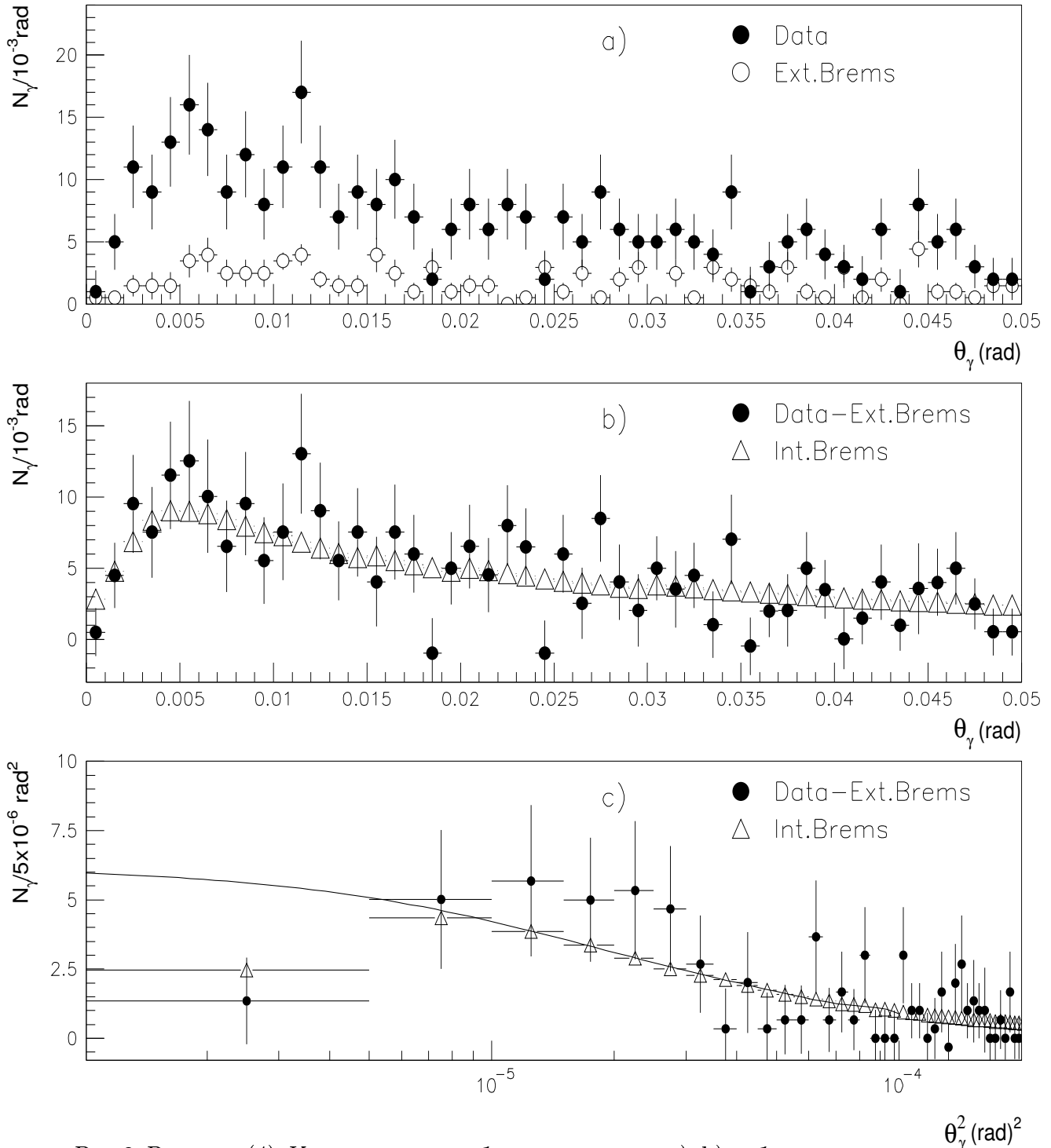


Рис.8. Реакция (4). Конус мюонного брэмштрагунга а), б) наблюдаемый в распределении фотонов по углу  $\theta_\gamma$ : а) экспериментальные и фоновые распределения; б) разница экспериментальных и фоновых распределений; в) распределение фотонов по  $\theta_\gamma^2$ , полученное при ужесточении отборов, улучшающем угловое разрешение. Сплошная кривая на Рис. 8 в) представляет гипотетическую ситуацию отсутствия конуса брэмштрагунга. Ошибки статистические.

# DELPHI

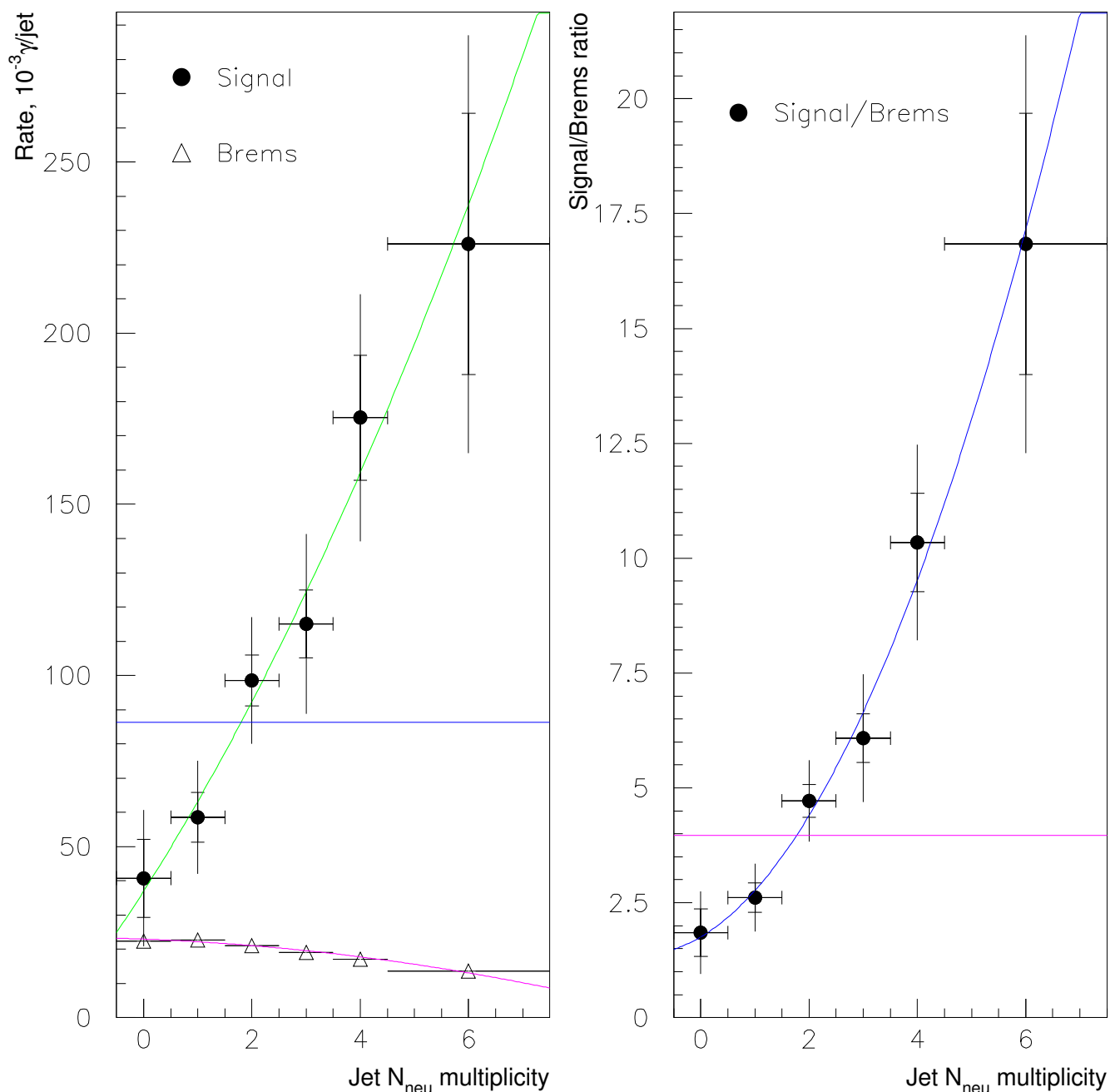


Рис. 9. Реакция (3). Интенсивность излучения прямых мягких фотонов в зависимости от множественности нейтральных частиц в адронной струе. *Левая панель:* сигнал прямых фотонов и предсказания для адронного брэмштраглунга. *Правая панель:* отношение сигнала к брэмштраглунгу. Кривые представляют результаты независимого фитирования распределений полиномом 2-го порядка. Горизонтальные прямые линии представляют статистическое усреднение точек сигнала (левая панель) и отношений сигнал/брэмштраглунг (правая панель). Внутренние ошибки статистические, полные ошибки представляют квадратичную сумму статистических и систематических ошибок.

# DELPHI

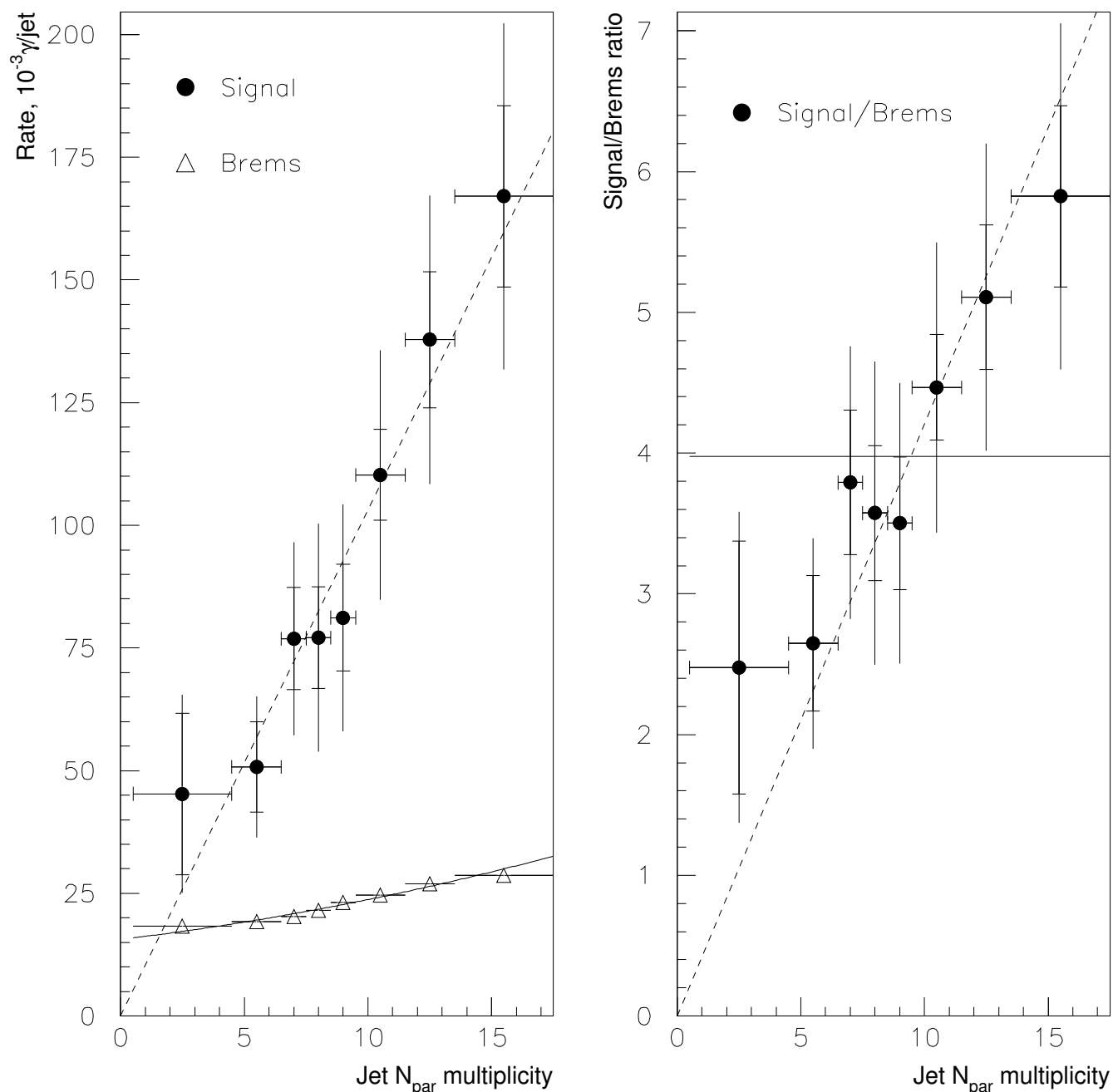


Рис. 10. Реакция (3). Интенсивность излучения прямых мягких фотонов в зависимости от полной множественности частиц в адронной струе. *Левая панель:* сигнал прямых фотонов и предсказания для адронного брэмштраглунга. *Правая панель:* отношение сигнала к брэмштраглунгу. Прямые, проходящие через ноль, представляют результаты фитирования распределений линейной функцией без постоянного члена. Горизонтальная прямая линия на правой панели представляет статистическое усреднение отношений сигнал/брэмштраглунг. Внутренние ошибки статистические, полные ошибки представляют квадратичную сумму статистических и систематических ошибок.