



**ОБЪЕДИНЕННЫЙ ИНСТИТУТ ЯДЕРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ**

1-2002-81

На правах рукописи  
УДК 539.122.535.14

**ТЯПКИН**  
Игорь Алексеевич

**ИССЛЕДОВАНИЕ АДРОННОЙ СТРУКТУРНОЙ  
ФУНКЦИИ ФОТОНА**

**Специальность: 01.04.16 — физика атомного ядра  
и элементарных частиц**

**Автореферат диссертации на соискание ученой степени  
доктора физико-математических наук**

Дубна 2002

Работа выполнена в Лаборатории высоких энергий Объединенного института ядерных исследований по материалам, полученным автором в Европейском центре ядерных исследований (CERN).

Официальные оппоненты:

доктор физико-математических наук,  
профессор

Граменицкий Игорь Михайлович

доктор физико-математических наук

Григалашвили Нутзар Сергеевич

доктор физико-математических наук

Кураев Эдуард Алексеевич

Ведущая организация:

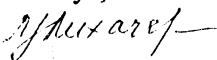
Институт физики высоких энергий (ИФВЭ)

Защита состоится "\_\_\_" \_\_\_\_\_ "2002 года в "\_\_\_" часов на заседании диссертационного совета Д-720.001.02 в Лаборатории высоких энергий Объединенного института ядерных исследований, г. Дубна Московской области.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ЛВЭ ОИЯИ.

Автореферат разослан "\_\_\_" \_\_\_\_\_ "2002 года

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



М.Ф.Лихачев

## Общая характеристика работы

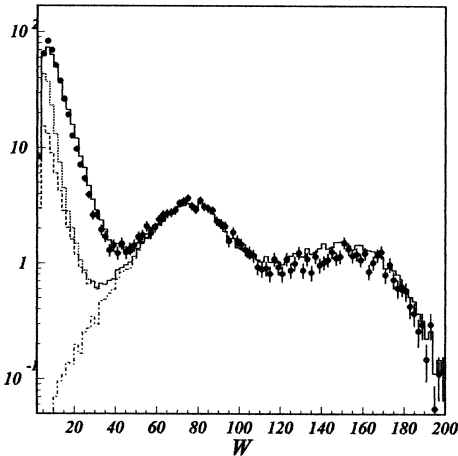
### Актуальность проблемы.

Глубоко неупругое рассеяние электрона на фотоне является классическим процессом для изучения адронной структуры фотона<sup>1-3</sup>, аналогичным, с точки зрения кинематики, лептон-нуклонному рассеянию. Заметный интерес к этому процессу проявляется с середины 70<sup>x</sup> годов. Тогда была выдвинута идея, что структурная функция фотона ( $F_2^{\gamma}$ ) может быть посчитана в рамках теории возмущений<sup>4-5</sup> при больших значениях Бьёркеновской переменной  $x$  и передаваемых электроном поперечных моментах  $Q^2$ . К сожалению, данный результат оказался не применим при энергиях, доступных в настоящее время или тех, которые будут достигнуты в обозримом будущем<sup>6</sup>. Трудности в описании процесса, при недостаточно высоких  $Q^2$ , состоят в необходимости применять методы, выходящие за рамки теории возмущений. В настоящее время стоит задача описать, если не качественно, то хотя бы количественно, ту часть взаимодействия, которая не может быть строго посчитана.

Экспериментально  $F_2^{\gamma}$  исследовалась, надо отметить, с довольно низкой точностью, через реакцию  $e^+e^- \rightarrow$  адроны на всех электрон-позитронных коллайдерах, начиная с PEP и PETRA<sup>7-13</sup>. Естественно, что с запуском нового ускорительно-накопительного комплекса - LEP были предприняты попытки более точного измерения структуры фотона. Однако работы, появившиеся на LEP<sup>A4,14</sup>, изобилуют вопросами по поводу методики проведения измерений, оценки систематики, интерпретации результатов. Основной причиной появления этих вопросов явилось явное несоответствие измеренных распределений предсказаниям моделей, хорошо себя зарекомендовавших в предыдущих исследованиях. Поставленные вопросы инициировали исследования в области теории двухфотонных взаимодействий. Наметился прогресс в описании свойств фотона. Таким образом, 90<sup>e</sup> годы привнесли в эту область физики высоких энергий множество интересных событий, наметили новые подходы.

Дальнейшее исследование структуры фотона имеет серьезные мотивации. Во-первых, фотон даёт нам уникальную возможность исследовать эффекты как описываемые, так и не описываемые в рамках теории возмущений квантовой хромодинамики (QCD)<sup>15</sup>. Особый интерес представляет изучение адронной структуры фотона определяющейся жесткой  $\gamma\text{q}$  вершиной. Во-вторых, углубление в понимании структуры фотона необходимо для оценки фона от двухфотонных взаимодействий в другие каналы на существующих ускорителях (особенно LEP2) и предсказания фона на тех ускорителях, которые обсуждаются в последнее время<sup>16</sup> и особенно это на ускорителях, разрабатываемых для осуществления  $\gamma\gamma$  столкновений. Иллюстрацией последнего утверждения может служить *Рис.1*, где изображено распределение событий по инвариантной массе. Данные получены на LEP2.

*DATA (E3) vs MC (E2)*



**Рис.1** *Распределение (относительные единицы) событий по инвариантной массе ( $W$ ). Точки-данные. Сплошной линией показана сумма предсказаний моделей для основных участвующих процессов. Штрих-пунктир – процессы с участием  $Z^0$  и  $W$  бозонов. Линия из точек-  $\gamma\gamma$  – взаимодействия.*

Уже при этих энергиях двухфотонные взаимодействия составляют подавляющую часть регистрируемых событий.

Как видно из рисунка 1, эти события легко могут быть отделены от более жестких реакций с участием  $Z^0$  и  $W$  - бозонов, однако создают большие проблемы для поисковой физики (поиск хигса, суперсимметричных партнеров...). Лист публикаций коллаборации DELPHI, содержащих результаты, связанные с описываемыми

исследованиями и, где двухфотонные процессы учитываются при определении фона, насчитывает сотни работ.

### Цель работы:

1. Получение экспериментальной информации о двухфотонных взаимодействиях на электрон - позитронном коллайдере LEP (CERN), с помощью установки DELPHI.
2. Разработка методики исследования структуры фотона.
3. Обработка экспериментальных данных для получения характеристик адронной структурной функции фотона.
4. Оценка фона от двухфотонных взаимодействий в другие, исследуемые на установке каналы.

### Научная новизна работы.

- Произведены измерения структурной функции<sup>A4-A14</sup> фотона в широком диапазоне  $Q^2$  (5-2600 GeV<sup>2</sup>) и  $x$  (0.001-0.8).
- Было экспериментально подтверждено существование механизма разрешившихся фотонов (RPC), предложенного R.Drees и M.Godbol<sup>17</sup> для описания взаимодействия реальных фотонов<sup>A1</sup>.
- Выдвинуто предположение о необходимости учета данного механизма в  $\gamma\gamma^*$  взаимодействии. Получено экспериментальное подтверждение данной гипотезы<sup>A4</sup>. В настоящее время все популярные модели используют данный механизм (RPC).
- Было показано, что использование предложенной модели описания таггированных двухфотонных взаимодействий значительно улучшает уровень согласия предсказаний модели с экспериментальными данными<sup>A4-A5</sup>.
- Впервые была показана<sup>A4</sup> важность учета топологии событий в процедуре извлечения информации о структурной функции из экспериментальных данных. Следствием явилось то, что результаты исследований оказываются намного более зависимы от модели, используемой для извлечения  $F_2^{\gamma}$  из экспериментальных данных, чем это предполагалось ранее.

- Дана оценка точности измерения  $\Lambda_{QCD}$  на LEP2 при ожидаемой статистике<sup>A5</sup>.
- Доказано, что широко используемый метод регуляризованного анфолдинга не адекватен задаче измерения структурной функции<sup>A6</sup>.
- Предложен новый метод обработки экспериментальных данных, заключающийся в фитировании предсказаний модели к экспериментальным распределениям с последующим использованием результатов фита для коррекции модели, заложенной в генератор. Показано, что данный метод учитывает такие особенности решаемой задачи, как наличие в модели нескольких компонент, имеющих различные корреляции между реальным значением  $x$  и его измеренным значением, а так же различие в эффективности регистрации событий для разных компонент модели<sup>A10,11</sup>.

### **Научная и практическая значимость**

Результаты, отображенные в настоящей диссертации, являются проверенными научными фактами, которые уже широко используются в моделях, описывающих двухфотонные взаимодействия с адронным конечным состоянием. В настоящее время все генераторы событий, используемые для описания обсуждаемого в диссертации физического процесса, содержат компоненту, предложенную автором.

Полученные результаты использовались для оценки фона от двухфотонных взаимодействий на LEP и на разрабатываемых электрон-позитронных коллайдерах.

Из проведенных расчетов следует, что в рамках одного эксперимента на LEP2 невозможно получить разумную точность оценки  $\Lambda_{QCD}$  даже в рамках отдельной модели.

Идея о влиянии топологии событий на экспериментальные результаты нашла широкое подтверждение в развернувшихся дискуссиях. В результате, во всех работах, выполненных на LEP, производится тщательный анализ кинематических распределений зарегистрированных взаимодействий, наилучшим образом

отражающих топологию событий. Данная проблема неоднократно обсуждалась на рабочей группе, созданной в CERN по данной тематике. В итоговом документе рабочей группы<sup>6</sup> содержатся результаты данных дискуссий.

Показана неадекватность анфолдинга - широко используемого метода извлечения информации о структурной функции фотона из экспериментальных данных, поставленной задаче.

Предложенный в диссертации метод оценки структурной функции фотона не только избавлен от важнейших недостатков широко используемого метода анфолдинга, но и имеет ряд новых возможностей. Развитие этого направления позволит производить намного более достоверные оценки в обсуждаемой области физики. Этот метод может найти применение там, где встают задачи восстановления неизвестной зависимости по результатам неэффективных измерений в условиях, когда физическое явление описывается моделью с несколькими различными вкладками.

Произведенные измерения вошли в мировой банк данных об адронной структуре фотона. Эти данные совместно с другими измерениями, произведенными на LEP, будут использованы в новейших расчетах функций партонной плотности в фотоне. Впервые, в 2001 году результаты исследования структурной функции фотона были включены в список наивысших достижений CERN для доклада на крупнейших конференциях по физике высоких энергий. В частности, результаты, полученные DELPHI - коллаборацией, вошли весомым вкладом в анализ, приводящий к выводу о нарушении скейлинга в  $Q^2$  зависимости структурной функции.

#### **На защиту выдвигаются следующие результаты:**

1. Результаты измерения структурной функции фотона и анализ полученных результатов.
2. Экспериментальное подтверждение существования механизма разрешившихся фотонов (RPC), предложенного R. Drees и M. Gorbol для описания взаимодействия реальных фотонов.

3. Предложение расширить область применимости данного механизма на взаимодействия реального и виртуального фотонов.
4. Экспериментальное доказательство существования и значительности эффекта разрешившихся фотонов во взаимодействии реального и виртуального фотонов.
5. Доказательство большей зависимости результатов извлечения  $F^{\gamma}_2$  из экспериментальных данных от модели, используемой в анализе, чем это предполагалось ранее.
6. Доказательство неадекватности широко используемого метода регуляризованного анфолдинга задаче измерения структурной функции фотона.
7. Создание метода оценки  $F^{\gamma}_2$ , основанного на фитировании предсказания модели к экспериментальным данным с последующим использованием результатов фита для коррекции модели, заложенной в генератор.
8. Оценка точности измерения  $\Lambda_{QCD}$  в разных областях  $Q^2$ .

#### Апробация работы

Основные материалы, изложенные в диссертации, были опубликованы в работах (A1-A14). Эти материалы докладывались автором на Рочестерских конференциях в Глазго (1994 г) и Варшаве (1996 г). Работы представлены на конференциях ФОТОН 1997, ФОТОН 2001 и на рабочих совещаниях по двухфотонной физике в Лунде в 1994 и 1998 годах. Работы многократно докладывались и обсуждались на совещаниях рабочей группы по двухфотонной физике в CERN и на совещаниях коллаборации DELPHI. Результаты совместных расчетов автора диссертации и G. Schuler вошли в опубликованный в виде CERN Yellow report отчет рабочей группы CERN по  $\gamma\gamma$  физике.

#### Публикации

Работы опубликованы в научных журналах и в материалах конференций (14 работ).



## Объём и структура диссертации

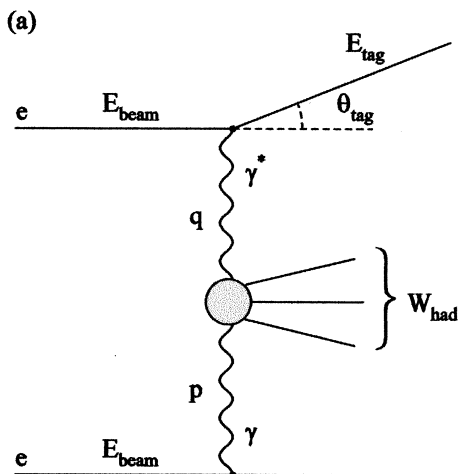
Диссертация состоит из введения, трёх глав и заключения. Список цитируемой литературы содержит 77 ссылок. Общий объём диссертации 144 страницы, включая 56 рисунков, 5 таблиц.

## СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ

Во **введении** показано, что с появлением первых работ на новом электрон-позитронном коллайдере LEP выявлены неожиданные проблемы в исследовании структурной функции фотона. Как результат активизировались экспериментальные и теоретические работы в этой области физики. Здесь обосновывается актуальность работ по исследованию адронных характеристик фотона. Отдельно подчеркивается важность работы для описания двухфотонных взаимодействий как фона к другим процессам, исследуемым на LEP и планируемым к исследованию на новых  $e^+e^-$  коллайдерах.

В **первой главе** приводятся основные теоретические положения, связанные с определением структурной функции фотона ( $F_2^\gamma$ ).

Приводится кинематическая схема изучаемого процесса и вводятся основные переменные (*Рис.2*).



*Рис.2* Кинематика тагированного  $\gamma\gamma^*$  события.

Описывается постановка эксперимента. В частности, в эксперименте отбираются события с зарегистрированным рассеянным лептоном и адронной системой. Таким образом, основными измеряемыми величинами являются энергия ( $E_{tag}$ ) и полярный угол рассеянного лептона ( $\theta_{tag}$ ), а также инвариантная масса адронной системы ( $W$ ). Исследуемый процесс сводится к глубоко неупругому  $e\gamma$  рассеянию, сечение которого определяется как:

$$\frac{d\sigma(x, Q^2)}{E_{tag} d\cos \theta_{tag}} = \frac{4\pi E_{tag}}{Q^4 y} \left[ \{1 + (1-y)^2\} F_2^{\gamma}(x, Q^2) - y^2 F_L^{\gamma}(x, Q^2) \right],$$

где  $Q^2$  – переданный виртуальным фотоном поперечный импульс или мера виртуальности фотона определена как:

$$Q^2 = 4 \cdot E_{beam} \cdot E_{tag} \cdot \cos^2(\theta_{tag}/4).$$

Бьёркеновская переменная  $x$  определяется через  $Q^2$  и инвариантную массу образовавшейся адронной системы  $W$ :

$$x = Q^2 / (Q^2 + W^2).$$

Переменная  $y$  определена как:

$$y = 1 - \left( \frac{E_{tag}}{E_{beam}} \right) \cdot \cos^2(\theta_{tag}/2)$$

Как видно из последнего выражения,  $y$  - малая величина и сечение процесса в некотором приближении можно считать зависящим только от  $F_2^{\gamma}$ .

Приводятся диаграммы процессов, дающих вклад в  $\gamma\gamma^*$  взаимодействие (*Рис.3*).

Приводятся современные положения теории расчетов  $F_2^{\gamma}$ . Подчеркивается, что даже в асимптотическом пределе ( $Q^2 \rightarrow \infty$ ) невозможна точная оценка структурной функции. Основная сложность расчетов заключается в учете вклада от мягких адронных взаимодействий, описываемых VDM моделью (*Рис.3д*).

Описан наиболее современный подход к вычислению структурной функции, основанный на введении функции плотности партонов в фотоне и расчёте  $F_2^{\gamma}$  на основе диаграмм типа *Рис.3е*. Приведены идеи, использованные при вычислении наиболее

распространенных функций плотности партонов в фотоне (таких как GS, GRV, SaS и LAC).

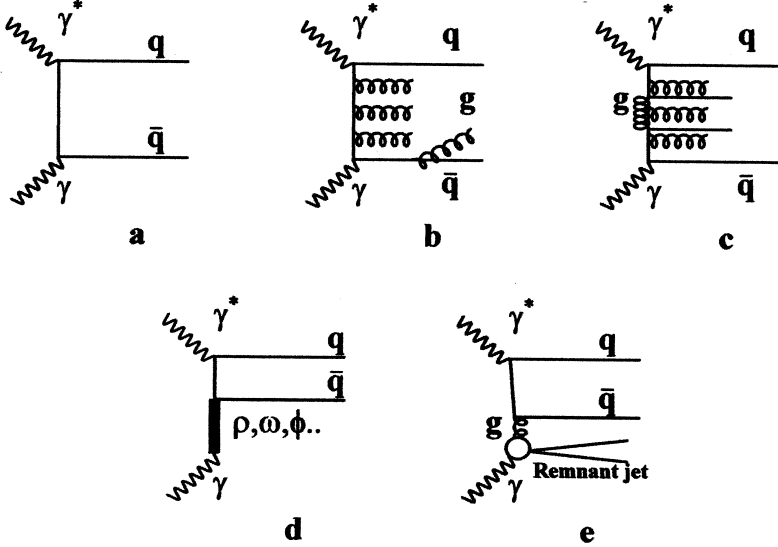


Рис.3 Процессы, дающие вклад в  $\gamma\gamma^*$  взаимодействие.

Обосновывается важность правильного моделирования событий, используемых при извлечении информации о структурной функции из экспериментальных данных. Приводится обзор наиболее распространенных в настоящее время Монте Карло генераторов с описанием основных физических идей, положенных в их основу. Первый генератор, достаточно хорошо описывающий LEP – данные, это созданный коллаборацией DELPHI генератор TWOGAM. В него впервые, по предложению автора диссертации, были включен вклад от разрешившегося на свои конститuenty фотона -процесс (типа Рис.3е), еще не наблюдавшийся в DIS, но предсказанный R.Drees и M.Godbole<sup>17</sup> для описания взаимодействия реальных фотонов. Это процессы, в которых фотон превращается в  $q\bar{q}$  или  $gg$  пару ("разрешается" на  $q\bar{q}$  или  $gg$ ) и один из  $q(g)$  взаимодействует с реальным фотоном. При этом оставшийся  $q(g)$  образует характерную струю в направлении, близком к направлению пучка ("ремнантная" струя). Мы назвали данный тип взаимодействия вкладом от разрешившегося фотона (**Resolved Photon Contribution RPC**). В

1994 году было экспериментально доказано существование таких процессов<sup>A1-A5</sup>. Было показано, что полное сечение  $\gamma\gamma$  взаимодействия может быть описано с привлечением процессов с разрешившимися фотонами. Из анализа кинематики таких взаимодействий был сделан вывод о невозможности описания таких событий с помощью изменения сечения других компонент модели. Сразу был поставлен вопрос: почему никто не пытается включить процессы с разрешившимися фотонами в описание  $\gamma\gamma^*$  взаимодействия? Перед авторами генератора TWOGAM была поставлена задача расширения кинематики таких процессов в область взаимодействия реального и виртуального фотонов. Сложность этой задачи заключалась в разработке механизма подавления процесса флуктуации фотонов в  $q\bar{q}$  или  $g\bar{g}$  пару при увеличении виртуальности фотонов и в учете виртуальности при расчете сечений. Мерой виртуальности был принят квадрат поперечного импульса конstituентов фотона в их системе центра масс. Было предложено ввести логарифмическую функцию подавления вероятности разрешения фотона на пару партонов. Таким образом, TWOGAM стал первым генератором, в котором применили RPC. Было экспериментально показано, что учет данного типа взаимодействия необходим при исследовании структурной функции фотона<sup>A2</sup>. Подчеркивается, что все используемые в настоящее время генераторы привлекают данный механизм, отличаясь, в основном, способами расчетов. Важной частью первой главы является анализ общепринятого метода извлечения информации о структурной функции из экспериментальных данных – анфолдинга. Для оценки структурной функции фотона производится измерение сечения  $\gamma\gamma^*$  рассеяния как функции переменной  $x$ . В реальном эксперименте  $Q^2$  измеряется с достаточно хорошей точностью (~ 5%) посредством измерения угла рассеяния лептона и его энергии после рассеяния. Однако инвариантная масса адронной системы не может быть измерена с достаточной точностью из-за ограниченности акцептанса детектора. Следовательно, использование для вычисления  $x$  наблюдаемого значения

инвариантной массы  $W_{vis}$ , искажает её величину до  $x_{vis}$  и встает задача восстановления  $x_{true}$ . Следующей задачей является восстановление  $F_2^Y$  из наблюдаемого сечения.  $\sigma(x_{true})$ . Общепринятый метод решения этих задач - анфолдинг, т.е. коррекция измеренного распределения с помощью обратной трансформации функции отклика детектора. Доказывается, что данная процедура не учитывает различий в поведении данных, сгенерированных каждой из компонент модели. В диссертации показано, что корреляции между  $x_{true}$  и  $x_{vis}$  индивидуальны для каждого процесса, представленного на *Рис.3*. Кроме того, и эффективность перехода от  $\sigma(x_{true})$  к  $F_2^Y(x)$  различны. Таким образом, доказывается, что процедура анфолдинга неадекватна решаемой задаче.

В качестве альтернативы предлагается производить фитирование моделированных данных к реальным распределениям. Описывается предложенная процедура, использующая хорошо известного пакета фитирующих программ MINUIT. Процедура основана на взвешивании  $x_{true}$  распределения в сгенерированных событиях таким образом, чтобы  $x_{vis}$  распределения для экспериментальных данных и Монте Карло имели наименьший  $\chi^2$ . Процедура сводится к тому, что интервал изменения  $x_{true}$  делится на отрезки (бины) таким образом, чтобы каждый бин имел достаточную и одинаковую статистику. Каждому бину приписывается коэффициент трансформации  $A_i$  (где  $i$  обозначает номер бина). Существенным является то, что коэффициенты трансформации вводятся отдельно для каждой из компонент модели. Это приводит к появлению матрицы трансформации  $A$  с элементами  $A_i^j$ , где  $j$  обозначает модель и меняется от 1 до 3 (RPC, QPM, VDM). Элементы матрицы  $A$  являются свободными параметрами фита. Появляется возможность использовать любую достаточную (для достижения приемлемого  $\chi^2$ ) комбинацию элементов из  $A$ . Данный алгоритм не только свободен от недостатков, присущих анфолдингу, но и дает дополнительные возможности. Приводятся результаты тестирования двух процедур.

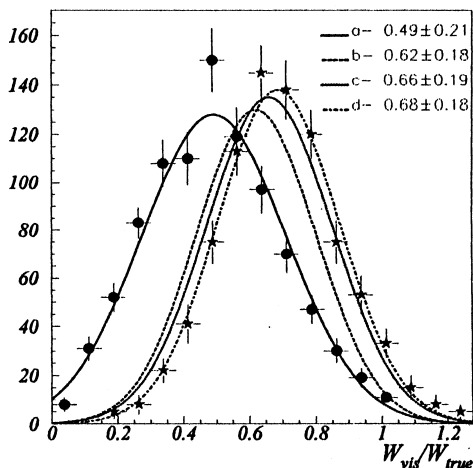
Во второй главе описывается постановка эксперимента.

Все результаты, включенные в данную диссертацию, получены на большом электрон - позитронном коллайдере в CERN (LEP), самом большом коллайдере в мире. Кольцо длиной 27 км находится на глубине около 100 м. Сгустки электронов и позитронов (банчи) ускоряются в противоположных направлениях. В четырех симметрично расположенных по кругу точках, банчи фокусируются до размеров порядка 100 мкм и сталкиваются в центре экспериментальных установок, расположенных в этих точках. Каждый банч содержит более  $10^{11}$  частиц. В среднем 1/40000 столкновений банчей приводит к центральному  $e^+e^-$  взаимодействию. Столкновения банчей происходят с частотой около 10000 в секунду. LEP начал работу на эксперимент в 1989 году, и в течение 6 лет происходил набор статистики при энергии пучков, близкой к резонансному рождению  $Z^0$  бозонов (45.6 GeV на пучок). С осени 1995 г. началось увеличение энергии пучков и в 1996 г. был достигнут порог парного рождения переносчика слабых взаимодействий W бозона. В 2000 г ускоритель работал на максимальной энергии (до 104 GeV) на пучок. Около  $1000 \text{pb}^{-1}$  интегральной светимости обеспечено за годы работы ускорителя. Данная оценка не учитывает различия светимости в каждой из 4 точек пересечения и эффективности работы установок.

Все результаты получены автором с помощью детектора DELPHI, в создании которого он принимал непосредственное участие. В диссертации описываются основные узлы детектора, существенные для двухфотонной физики. Наиболее важным для описываемых исследований детектором установки является "таггер" – прибор для регистрации рассеянных на малые углы лептонов (STIC в области  $2-10^\circ$  и FEMC в области  $10-45^\circ$ ). Основной вклад в регистрацию адронной системы вносят трековые детекторы (TPC, ID, OD и  $\mu$ VERTEX).

Ранее считалось, что калориметрия установки не имеет решающего значения для исследования двухфотонных процессов. Однако, как было показано коллаборацией DELPHI (Рис.4),

привлечение калориметрических измерений позволяет несколько улучшить полноту измерения инвариантной массы адронной системы, образованной в результате взаимодействия.



**Рис.4** Распределения (число событий), характеризующие качество восстановления инвариантной массы адронной системы для различных комбинаций детекторов, использованных в реконструкции события. Распределения получены с использованием моделированных событий; *a* - только заряженные треки, *b* - *a* + информация с электромагнитных калориметров; *c* - *b* + информация с адронного калориметра; *d* - *c* + информация с тагирующего детектора. Числами показаны результаты фита данных распределением Гаусса. (Среднее значение  $\pm$  стандартное отклонение).

Кроме того, информация с калориметров позволяет уменьшить фон от жестких процессов типа  $Z^0 \rightarrow$  адроны.

Важнейшим вопросом для регистрации двухфотонных взаимодействий является качество системы триггирования установки. В связи с мягкостью исследуемых процессов

калориметрическая компонента практически не участвует в триггерировании данных событий. Таким образом, заряженные треки являются основным источником триггера для  $\gamma\gamma$  взаимодействий.

В установке DELPHI базовым источником триггерных сигналов является ТРС. Эффективность триггера измерена на основе реальных событий как функция поперечной составляющей импульса частицы. Данные измерения использовались при обработке экспериментальных данных для расчета эффективности регистрации каждого события. Суммарная эффективность для отбираемых событий составила  $98\pm 1\%$ . Естественно, эта величина зависит от критериев отбора событий.

Далее в этой главе описываются критерии отбора событий. Оптимизация критериев сводится к подавлению фона и сохранению высокой эффективности регистрации исследуемого процесса. К основным источникам фона относятся: процесс типа  $Z^0 \rightarrow$  адроны, а также лептонные каналы  $\gamma\gamma^*$  взаимодействий. На LEP2 появился новый серьезный источник фона - взаимодействия  $\gamma\gamma \rightarrow$  адроны, в которых фрагменты адронной системы, попадая в тагирующий детектор, имитируют тагирующую частицу. Данные события могут быть подавлены с помощью анализа кинематики события (Рис.5). Переменная  $D_{pl}$  характеризует баланс продольной составляющей импульса и определена как:

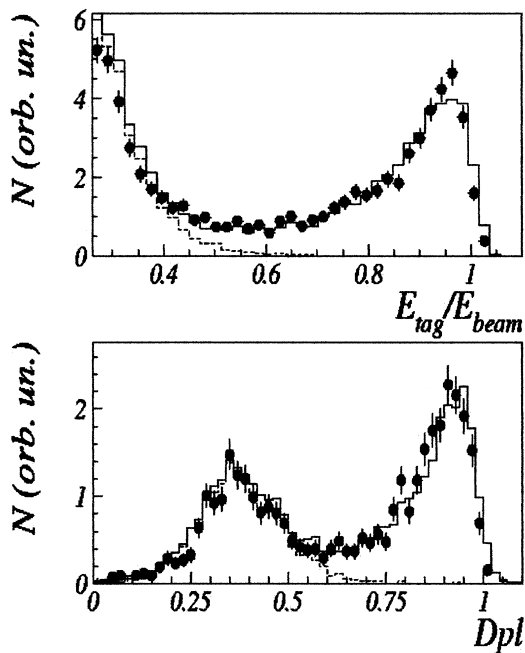
$$D_{pl} = (\sum P_l + P_l^{tag})/E_{beam},$$

где первое слагаемое это - суммарный продольный импульс частиц адронной системы, тогда как второе слагаемое - это продольная составляющая импульса тагирующей частицы.

Из Рис.5 видно, что данный источник фона не позволяет увеличить эффективность отбора событий за счет понижения порога на энергию тагированной частицы ( $E_{tag}/E_{beam}$ ). С другой стороны, Рис.5 является еще одной иллюстрацией работы генератора TWO GAM – данные хорошо описываются моделью даже в расширенной кинематической области.

Приводится минимальный набор необходимых критериев для отбора  $\gamma\gamma^*$  событий.



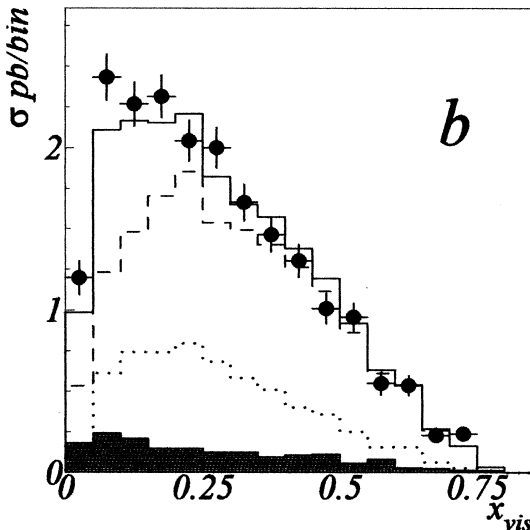


**Рис.5** Распределения по энергии тагирующей частицы и продольному балансу энергии в событиях, отобранных без применения критериев отбора по обеим исследуемым переменным. Сплошная линия – сумма событий сгенерированных как  $\gamma\gamma$  и  $\gamma\gamma^*$  взаимодействия. Пунктир – только  $\gamma\gamma$  взаимодействия.

В третьей главе диссертации описываются результаты исследования структурной функции фотона, полученные автором за период 1994-2001 годов. Эти результаты докладывались на крупнейших конференциях по физике высоких энергий и на всех конференциях, относящихся к тематике двухфотонных взаимодействий<sup>A1-A14</sup>. Результаты, отражающие наиболее современное понимание проблемы, обобщающие информацию, полученную в течение всех лет работы автора по этой тематике, суммирующие ранее высказанные идеи и полученные на базе всей накопленной на установке статистики, содержатся в последних публикациях<sup>A9-A14</sup>.

Как было показано в первой главе диссертации, результат извлечения  $F_2^{\gamma}$  из данных зависит от того, на сколько хорошо физические процессы  $\gamma\gamma^*$  взаимодействия описываются моделью, используемой в анализе. Единственным способом проверки адекватности генератора является сравнение измеренных характеристик событий с предсказанием модели для этих характеристик. Поэтому, значительная часть каждого из исследований структурной функции фотона посвящена сравнению экспериментальных и моделированных данных.

На Рочестерской конференции в Варшаве автором от имени коллаборации DELPHI были доложены результаты, показывающие, что использовавшееся во всех предыдущих работах двухкомпонентное (QPM+VDM) описание  $\gamma\gamma^*$  взаимодействия недостаточно для получения неискаженного значения структурной функции. Представленные результаты получены на LEP1. Так, было показано (Рис.6), что распределение по переменной  $x_{vis}$  имеет явное превышение над предсказанием, основанном на двухкомпонентной модели (QPM+VDM) в области малых  $x_{vis}$ - (пунктирная линия), подтверждая таким образом выдвинутую нами гипотезу о важности RPC для описания  $\gamma\gamma^*$  взаимодействия.



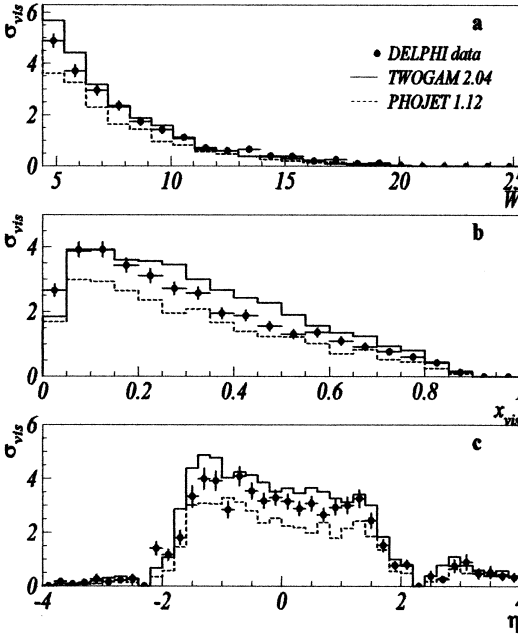
**Рис.6** Распределение измеренного значения  $x$  для событий, полученных на LEP1 при  $\langle Q^2 \rangle = 13 \text{ GeV}^2$ . Точки - экспериментальные данные. Линия из точек - VDM, пунктирная линия - VDM+QPM и сплошная линия - VDM+QPM+RPC, составляющие предсказания модели.

На *Рис.6* сплошной линией приведено распределение, включающее в себя все три компонента модели. Очевидно, что физические идеи, заложенные в данный генератор, получили блестящее подтверждение экспериментом. Из исследования множественности струй, восстановленных в событии, были получены дополнительные подтверждения выдвинутой гипотезе. В частности о том, что ни QPM, ни VDM, ни фоновые процессы не дают заметного вклада в трехструйные события. Т.е. никакая коррекция на уровне структурной функции не сможет скомпенсировать недостаток трехструйных событий. В тоже время, RPC достаточно хорошо описывает эти события.

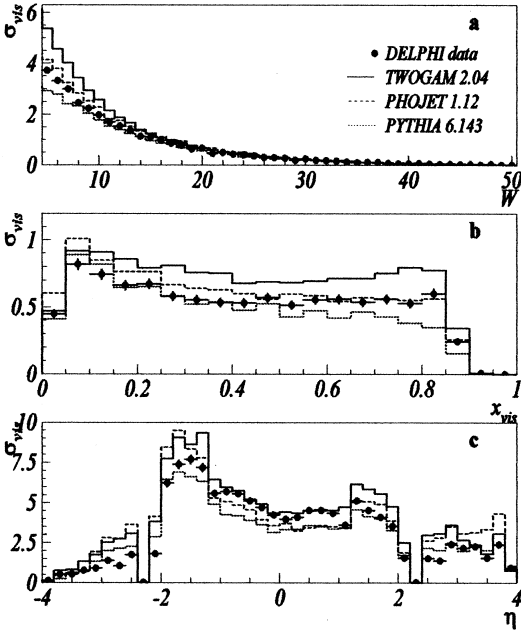
Трехструйные события были отобраны и произведено сравнение некоторых распределений для таких событий с предсказанием модели. Результат этого сравнения дал дополнительные аргументы в пользу используемой модели.

В последнее время появились модификации генераторов RYTHIA (версия 6.143) и PHOJET (версия 1.12), дающие довольно хорошие предсказания для  $\gamma\gamma^*$  взаимодействия. Генератор TWOGAM за последние годы также претерпел некоторые изменения. Так, были введены современные значения для сечения участвующих подпроцессов. Начиная с версии 2.1, генератор учитывает излучение из начального и конечного состояний. В результате, если уровень согласия TWOGAM с LEP1 данными остался достаточно высоким, то для LEP2 в условиях намного более высокой энергии пучка уровень согласия с данными не такой высокий.

На *Рис.7,8* приведены некоторые распределения, иллюстрирующие работу генераторов TWOGAM, PHOJET и RYTHIA.



**Рис.7** Распределения инвариантной массы (а), измеренного значения  $x$  (b) и потока энергии (с) в событиях, полученных на LEP1 при  $\langle Q^2 \rangle = 13 \text{ GeV}^2$ . Точки - экспериментальные данные. Линия из точек - VDM, пунктирная линия - VDM+QPM и сплошная линия - VDM+QPM+RPC, составляющие предсказания модели.

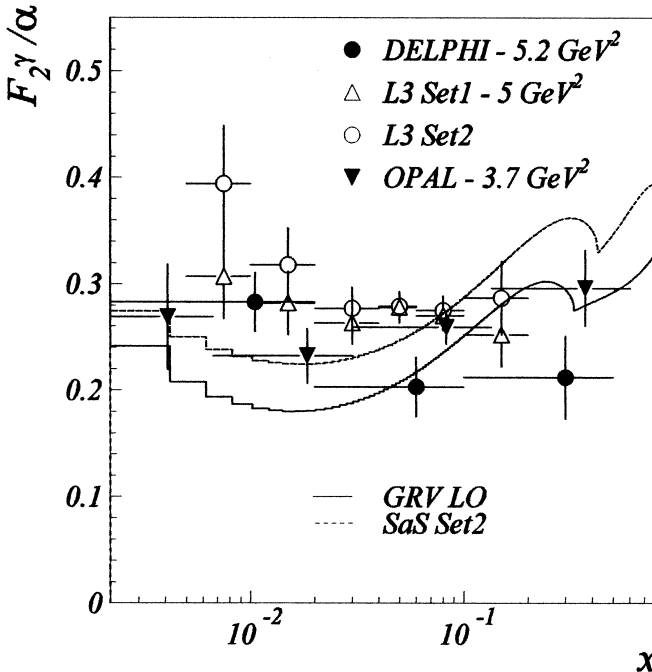


**Рис.8** Распределения инвариантной массы (а), измеренного значения  $x$  (b) и потока энергии (с) в событиях, полученных на LEP2 при  $\langle Q^2 \rangle = 41 \text{ GeV}^2$ . Точки - экспериментальные данные. Линия из точек - VDM, пунктирная линия - VDM+QPM и сплошная линия - VDM+QPM+RPC, составляющие предсказания модели.

В последнем разделе третьей главы приводятся результаты измерения структурной функции фотона. Описаны способы коррекций, связанных с ненулевой виртуальностью реального фотона, учетом радиационных поправок и вклада от  $F_L$ .

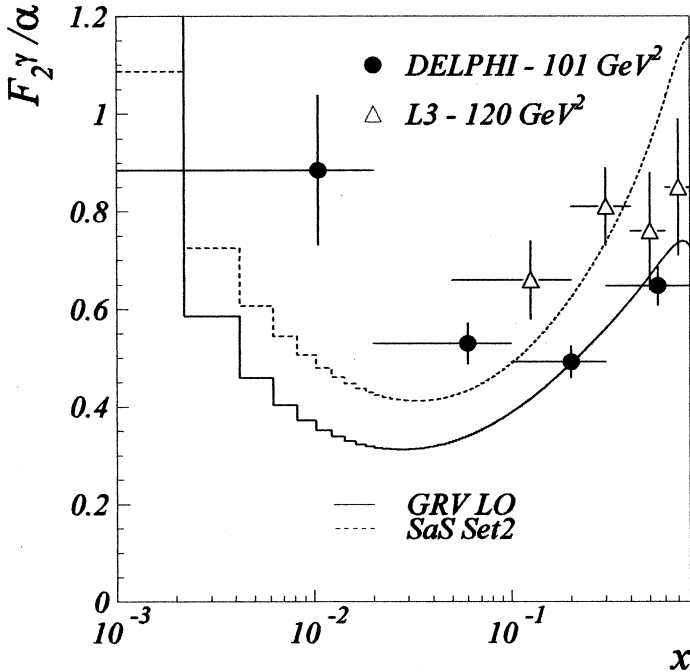
Первая часть этого раздела третьей главы посвящена оценке  $x$ -зависимости структурной функции фотона. Приводятся результаты измерений, производится сравнение результатов, полученных коллаборацией DELPHI и других коллабораций LEP. Проводится анализ полученных результатов, анализируются причины расхождения в измерениях выполненных различными коллаборациями, в оценках ошибок измерения. Результаты, полученные при наименьшем доступном  $Q^2$  и при достаточно большом  $Q^2$ , приведены на *Рис.9* и *Рис.10*, соответственно.

### DELPHI, L3, OPAL



*Рис.9* Результаты измерения структурной функции фотона, полученные различными LEP коллаборациями в области низких  $Q^2$ . Приведены также теоретические значения  $F_2^\gamma$ , предсказываемые наиболее популярными моделями.

# DELPHI, OPAL



**Рис.10** Результаты вычисления структурной функции фотона, полученные различными LEP коллаборациями в области высоких  $Q^2$ . Приведены также теоретические значения  $F_2^\gamma$ , предсказываемые наиболее популярными моделями.

В последней части этой главы даны результаты исследований  $Q^2$  зависимости структурной функции в разных её  $x$ -областях. Приводятся результаты измерений  $Q^2$  - зависимости структурной функции, усредненной в четырех  $x$  - интервалах (0.001-0.02, 0.001-0.1, 0.1-0.3 и 0.3-0.8). Обсуждаются аргументы в пользу выбора данного набора интервалов усреднения  $F_2^\gamma$  по  $x$ . Проведено фитирование полученных  $Q^2$  - зависимостей структурной функции полиномами первого и второго порядка.

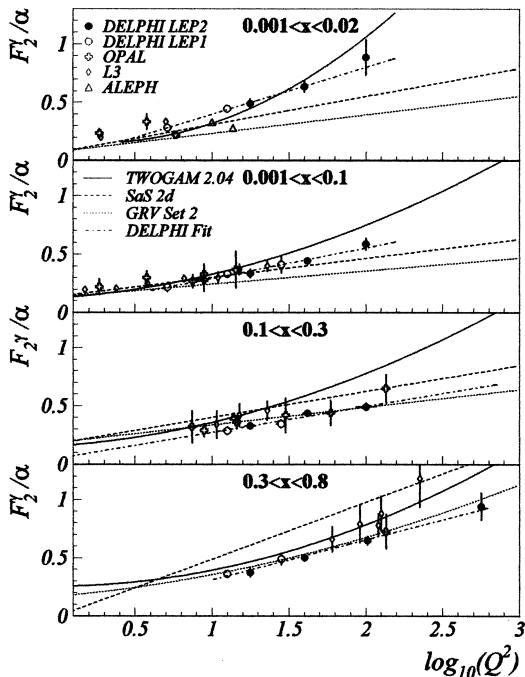


Рис.11 Результаты измерений  $Q^2$  зависимости структурной функции, усредненной в четырех  $x$  интервалах.

В заключении сформулированы основные результаты и выводы.

1. Исследована  $Q^2$  - зависимость структурной функции фотона, усредненной в различных  $x$  - интервалах. Получены аналитические выражения измеренных зависимостей.
2. Анализ результатов приводит к выводу о том, что в рамках GRV модели делаются предсказания, наиболее близкие к экспериментальным данным (за исключением области предельно малых  $x$ ). С другой стороны, ни одна из моделей не описывает  $F_2^{\gamma}$  во всем диапазоне  $x$ .
3. Экспериментально подтверждено существование механизма разрешившихся фотонов во взаимодействии реальных фотонов и впервые предложено расширение этого механизма на взаимодействие реального и виртуального фотонов.

4. Было показано, что использование предложенной трехкомпонентной модели значительно улучшает уровень согласия предсказаний модели с экспериментальными данными. Этим была подтверждена выдвинутая автором идея. В настоящее время все популярные модели используют данный механизм
5. Показано, что результаты исследований  $F^{\gamma}_2$  намного более зависимы от модели, используемой для ее извлечения из экспериментальных данных, чем это предполагалось ранее.
6. Доказано, что широко используемый метод регуляризованного анфолдинга не адекватен задаче извлечения структурной функции фотона из данных.
7. Предложена процедура фитирования, учитывающая такие особенности решаемой задачи, как наличие в модели нескольких компонент, имеющих различные корреляции между реальными значениями  $x$  и их измеренными значениями и различие в эффективности регистрации событий для разных компонент модели.
8. Из результатов работы следует, что для извлечения дополнительной информации из LEP данных необходимо улучшение и унификация процедуры анфолдинга и на этой базе объединение статистики всех LEP экспериментов.

**Основные результаты** диссертации изложены в работах:

- A1 Abreu,... I.Tyapkin, et al., Study of hard scattering processes in multihadron production from  $\gamma\gamma$  collisions at LEP. Delphi Internal Number: 0070, PPE Number: 94-004, Zeit. Phys. C62 (1994) 357.
- A2 I.Tyapkin. New results concerning hard scattering processes in  $\gamma\gamma$  collisions at LEP. Proc. of Workshop on Two-Photon Physics at LEP and HERA. Lund, May 26-28, 1994. Phys Department, Lund University, p 44.
- A3 I.Tyapkin. Study of hard scattering processes in multihadron production from  $\gamma\gamma$  collisions with DELPHI detector. Proc. of the 29<sup>th</sup> Int. Conf. on High Energy Physics, World Scientific Publishing Co. Pte. Ltd., (1994) 729



- A4 I.Tyapkin. Study of the photon structure function  $F_2^{\gamma}$  in the reaction  $e^+e^- \rightarrow e^+ e^- + \text{hadrons}$ . Proc. of the 28<sup>th</sup> Int. Conf. on High Energy Physics, World Scientific Publishing Co. Pte. Ltd., (1996) 729.
- A5 E.Boudinov,...I.Tyapkin, et al. Workshop on LEP2 physics.  $\gamma\gamma$  interactions. Yellow Report, LEP2 – CERN 96-01 v1, Theoretical Physics and Particle Physics Experiments Division 19 February 1996 p 300.
- A6 I.Tyapkin. The first results of the photon structure function study at LEP2. Proc. of PHOTON 97, Egmond aan Zee, The Netherlands, World Scientific Publishing Co. Pte. Ltd. 1997, p26.
- A7 I.Tyapkin. Photon structure function study at LEP with DELPHI detector. Workshop on Photon Interactions and the Photon Structure. Lund, Sweden, September 10 13, 1998. Editor G.Jarlskog and T.Sjostrand, published by Fysiska Institutionen, Lund University, p 59.
- A8 И.Тяпкин, Н.Зимин. Study of the photon structure function  $F_2^{\gamma}$  in the reaction  $e^+e^- \rightarrow e^+e^- + \text{hadrons}$  at LEP2. Краткие сообщения ОИЯИ №1 (93)-99, p56.
- A9 А.Ольшевский,...И.Тяпкин и др. Физика на LEP. Письма в ЭЧАЯ 1(98) 2000.
- A10 I.Tyapkin. Proc. of PHOTON 2001, Photon hadronic structure function study at LEP. Switzerland, World Scientific Publishing Co. Pte. Ltd. 2001, p.
- A11 P.Abreu,...I.Tyapkin, et al. Study of the hadronic photon structure function with the DELPHI detector at LEP1. DELPHI Internal Number 2002-0298, Направлена в EPJC.
- A12 I.Tyapkin. Study of the hadronic photon structure function with the DELPHI detector at LEP1. DELPHI Internal Number 2001-142 Phys 913; Направлена в Письма в ЭЧАЯ.
- A13 I.Tyapkin. Study of the hadronic photon structure function with the DELPHI detector at LEP2. DELPHI Internal Number 2001-143 Phys 914; Направлена в Письма в ЭЧАЯ.
- A14 I.Tyapkin. Study of the hadronic photon structure function at very high  $Q^2$ . DELPHI Internal Number 2001-144 Phys 915; Направлена в Письма в ЭЧАЯ.

## Литература

1. Ch. Berger and W. Wagner Phys. Rep. **146**, 1 (1987).
2. H. Abramowicz et al., Int. J. Mod. Phys. **A8**, 1005 (1993).
3. M. Drees and R. Godbole J. Phys. **G21**, 1559 (1995).
4. E. Witten Nucl. Phys. **B120**, 189 (1977).
5. W.A. Bardeen and A.J. Buras Phys. Rev. D20, 166 (1979), E: D21, 2041 (1980).
6. LEP2 – CERN 96-01, Theoretical Physics and Particle Physics Experiments Division 19 February 1996 Vol.1, 291.
7. PLUTO Collaboration, C.Berger et al., Phys. Lett. **107B** (1981) 168  
C.Berger et.al., Nucl.Phys. **B 281** (1987) 365; C.Berger et.al., Phys.Lett. **B142** (1984) 111; C.Berger et.al., Z. Phys. **C26**, (1984) 353.
8. CELLO Collaboration, J.-H.Behrend et al., Phys. Lett. **118B** (1982) 211; H.-J.Behrend et al., Phys. Lett. **B126** (1983) 391.
9. JADE Collaboration, W.Bartel et al., Phys. Lett. **121B** (1983) 216; W.Bartel et al., Z.Phys. **C24** (1984) 231.
10. TASSO Collaboration, M.Altholf et al., Z.Phys. **C31** (1986) 527.
11. TOPAZ Collaboration, K.Muramatsu et al., Phys. Lett. **B 332**, (1994) 447.
12. TPC/Two-Gamma Collaboration, H.Aihara et al., Phys.Rev. **D 41** (1990) 2667; H.Aibara et al., Z.Phys. **C34** (1987) 1; H.Aihara et al., Phys.Rev.Lett., **58** (1987) 97.
13. AMY Collaboration, S.K. Sahu et al., Phys. Lett. **B346**, 208; T.Kijima et al., Phys. Lett. **B400** (1997) 395.
14. Jan A. Lauber, OPAL Collaboration, Proc. Of the 28<sup>th</sup> Int. Conf. on High Energy Physics, World Scientific Publishing Co. Pte. Ltd., (1996) 725.
15. M. Godbole, CTS-TH-1/96 February 1996, hep-ph/9602428.
16. TESLA RDR – TESLA TECHNICAL DESIGN REPORT, DESY 2001-5.
17. R.Drees and M.Godbole Nucl. Phys. **B333** (1990) 355.
18. LEP2 – CERN 96-01, Theoretical Physics and Particle Physics Experiments Division 19 February 1996 Vol.2

*Макет Н. А. Киселевой*

ЛР № 020579 от 23.06.97.

Подписано в печать 18.04.2002.

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

Усл. печ. л. 1,68. Уч.-изд. л. 1,65. Тираж 100 экз. Заказ № 53242.

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