

P1-2006-56

З. У. Усубов¹, И. А. Минашвили²

**ВЛИЯНИЕ ЧЕТЫРЕХФЕРМИОННЫХ КОНТАКТНЫХ
ВЗАИМОДЕЙСТВИЙ НА УГЛОВЫЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ
ЛЕПТОНОВ И КВАРКОВ В e^+e^- -ВЗАИМОДЕЙСТВИЯХ**

Направлено в журнал «Ядерная физика»

¹ Институт физики Национальной академии наук Азербайджана, Баку

² Институт физики высоких энергий и информации ТГУ, Тбилиси

Усубов З. У., Минашвили И. А.

P1-2006-56

Влияние четырехфермионных контактных взаимодействий на угловые распределения лептонов и кварков в e^+e^- -взаимодействиях

Показано, что четырехфермионное контактное взаимодействие лептонов и кварков приводит к наблюдаемым эффектам в угловых распределениях лептонов и струй в e^+e^- -взаимодействиях. Требования, аналогичные предъявляемым к пучкам и детектору на коллайдере TESLA, позволят обнаружить эти эффекты или достигнуть значения масштаба энергий таких взаимодействий $\Lambda \sim 25$ ТэВ уже при интегральной светимости ~ 100 фб $^{-1}$ при $\sqrt{s} = 500$ ГэВ.

Работа выполнена в Лаборатории ядерных проблем им. В.П.Джелепова ОИЯИ.

Препринт Объединенного института ядерных исследований. Дубна, 2006

Usubov Z. U., Minashvili I. A.

P1-2006-56

Impact of the Four-Fermion Contact Interactions on Lepton and Quark Angular Distributions in e^+e^- -Collisions

The effects on lepton and quark angular distributions in e^+e^- collisions due to the four-fermion contact interactions are considered. It is shown that, under the beam and detector conditions at TESLA these effects would be discovered or the energy scale $\Lambda \sim 25$ TeV for such interactions would be achieved at 100 fb $^{-1}$ of integrated luminosity and $\sqrt{s} = 500$ GeV.

The investigation has been performed at the Dzhelepov Laboratory of Nuclear Problems, JINR.

Preprint of the Joint Institute for Nuclear Research. Dubna, 2006

Возможное открытие бозона Хиггса на ЛНС окончательно утвердит статус стандартной модели (СМ) как эффективной теории электрослабых взаимодействий при энергиях ниже порога $SU(2) \otimes U(1)$ -симметрии. Проблемы, решение которых невозможно в рамках СМ (иерархия масштабов электрослабого и гравитационного взаимодействий, масса нейтрино, масштабы нарушения симметрии электрослабых взаимодействий и СР-инвариантности, невозможность объединения гравитационных взаимодействий с электрослабыми взаимодействиями и т. д. (см., например, [1])), говорят о существовании в Природе более общей теории.

Возможным обобщением СМ и квантовой хромодинамики может оказаться модель, учитывающая взаимодействия лептонов и кварков или их составляющих частиц посредством обмена новым, очень тяжелым бозоном. При $M_X \gg \sqrt{s}$ (M_X — масса бозона, \sqrt{s} — энергия взаимодействующих частиц в системе центра масс) такие процессы могут быть описаны как 4-фермионные контактные взаимодействия (4-ФКВ).

Принимая во внимание $SU(3) \otimes SU(2) \otimes U(1)$ калибровочную инвариантность взаимодействий, сохранение спиральности и аромата, вклад 4-ФКВ в рождение $f\bar{f}$ -пар в e^+e^- -взаимодействиях можно записать в виде

$$\mathcal{L}^{\text{contact}} = \frac{g^2}{(1+\delta)\Lambda^2} \sum_{i,j=L,R} \eta_{ij} [\bar{e}_i \gamma^\mu e_i] [\bar{f}_j \gamma_\mu f_j], \quad (1)$$

где символами e_i и f_j обозначены лево- и правополяризованные начальные лептонные и конечные фермионные состояния, η_{ij} отражают влияние спиральностей частиц на их взаимодействие, а g — константа связи [2]. Масштаб массы промежуточной частицы, обменом которой может быть заменено такое контактное взаимодействие, определяется величиной Λ . При рождении электрон-позитронной пары $\delta = 1$, в случае же рождения иной фермион-антифермионной пары $\delta = 0$. Не отступая от общепринятых обозначений $g^2/(4\pi) = 1$ и $\lambda = \eta_{ij} = \pm 1$, оставим Λ свободным параметром 4-ФКВ. Знак λ также должен быть определен из экспериментальных данных.

Роль тяжелых промежуточных бозонов в $2 \rightarrow 2$ -рассеянии могут играть и возбужденные состояния уже известных частиц. В самом деле, если масштаб гравитационного взаимодействия близок к масштабу электрослабых взаимодействий (~ 100 ГэВ), что может иметь место в случае больших дополнительных измерений пространства [3], сечение взаимодействия гравитона с частицами СМ становится сравнимым с сечением электрослабых взаимодей-

ствий. Два класса событий с участием гравитона становятся наблюдаемыми в опыте: свободное излучение гравитона и $2 \rightarrow 2$ -рассеяние частиц СМ с массивными гравитонами в роли промежуточных частиц. Возможны и взаимодействия с участием возбужденных состояний промежуточных бозонов СМ. Второй класс событий может быть рассмотрен как 4-ФКВ. Расчет сечений таких процессов зависит от выбора конкретной модели, а необходимость исключения расходимостей при суммировании по промежуточным состояниям требует введения параметра ограничения. Самосогласованной моделью, описывающей взаимодействие частиц со спином, равным двум, является модель струн (см., например, [4] и ссылки там), в рамках которой не только гравитон, но и частицы СМ являются объектами одномерно-протяженными.

С использованием упрощенного включения («toy model») квантовой электродинамики в модель струн ПВ в пространстве с большими дополнительными измерениями в [5] были модифицированы выражения, полученные в рамках СМ для сечений

$$e^+e^- \rightarrow \gamma\gamma, e^+e^-.$$

В случае баба-рассеяния, $e^+e^- \rightarrow e^+e^-$, как было показано в [5],

$$\frac{d\sigma}{d\cos\theta} = \left(\frac{d\sigma}{d\cos\theta} \right)_{\text{SM}} \left| \frac{\Gamma(1 - \frac{s}{M_S^2})\Gamma(1 - \frac{t}{M_S^2})}{\Gamma(1 - \frac{s}{M_S^2} - \frac{t}{M_S^2})} \right|^2, \quad (2)$$

где $()_{\text{SM}}$ — сечение процесса в СМ; s, t, u — переменные Мандельштама; M_S — эффективная константа, определяющая интенсивность гравитационного взаимодействия в пространстве с дополнительными измерениями, аналогичная $M_{\text{Pl}} \sim 10^{19}$ ГэВ в пространстве Минковского, а Γ — гамма-функция. В используемом подходе [5] сечения процессов с промежуточным гравитоном не зависят от количества дополнительных измерений пространства.

Изменения сечений рождения и угловых распределений фермион-антифермионных пар, обусловленные вкладом 4-ФКВ, могут быть обнаружены в экспериментах следующего поколения.

Возможности детектора ATLAS на LHC для анализа 4-ФКВ были исследованы в [6, 7], эффекты в e^+e^- -взаимодействиях, обусловленные дополнительными измерениями пространства, рассмотрены в [8]. В данной работе проведен анализ особенностей угловых распределений лептонов и кварков, обусловленных 4-ФКВ и, возможно, струнной природой частиц в пространстве с большими дополнительными измерениями в e^+e^- -взаимодействиях*.

*Необходимость сооружения линейного e^+e^- -коллайдера при $\sqrt{s} = 500\text{--}1000$ ГэВ обоснована в литературе довольно обширно (см., например, [9] и ссылки там).

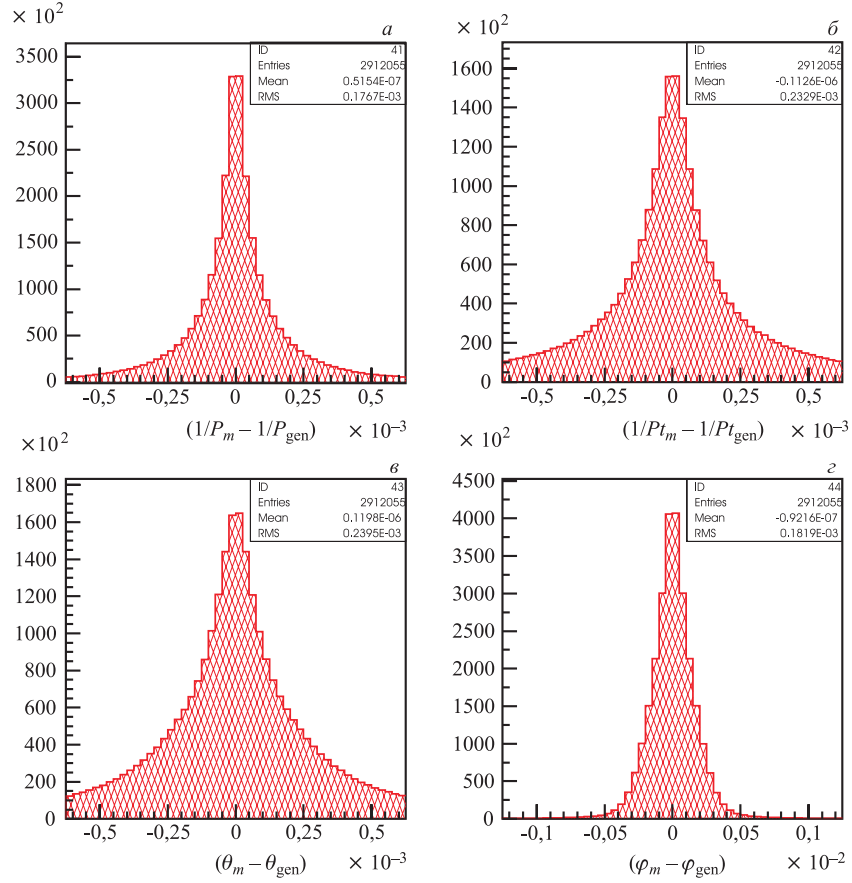


Рис. 1. Распределения по отклонениям между «истинными» и «измеренными» параметрами частиц в $e^+e^- \rightarrow q\bar{q}$ -событиях при $\sqrt{s} = 500$ ГэВ: обратные величины полных (а) и поперечных (б) импульсов; полярных (в) и азимутальных (г) углов

Для моделирования e^+e^- -рассеяния нами был выбран генератор RYTHIA [11], в котором 4-ФКВ частиц реализовано в вышеупомянутом приближении. Сечение баба-рассеяния в RYTHIA было модернизировано нами согласно (2) для учета струнного представления частиц.

Функции детектора моделировались пакетом программ SIMDET [12], созданным на основе требований, предъявленных детектору для TESLA [10]*.

*Эти требования близки требованиям к детекторам, рассматриваемым для международного линейного коллайдера [13].

Основными из этих требований являются очень высокое разрешение по импульсу частиц ($\delta(1/p_T) \sim 4 \cdot 10^{-5} \text{ ГэВ}^{-1}$), хорошее разрешение по энергии адронных струй ($\Delta E/E \simeq 35\%/\sqrt{E}$, где энергия в ГэВ), высокая эффективность для метки адронов, содержащих b - и c -кварки, хорошая герметичность установки при измерении событий с большой недостающей энергией, возможность проведения измерений в близкой к пучку области.

Качество, с которым должны быть измерены параметры частиц на детекторе TESLA, показано на рис. 1. Приведенные распределения показывают отклонения между «истинными» и «измеренными» на установке обратными величинами полных (а) и поперечных (б) импульсов; полярных (в) и азимутальных (г) углов заряженных частиц в процессе $e^+e^- \rightarrow q\bar{q}$ при $\sqrt{s} = 500 \text{ ГэВ}$.

На рис. 2 приведено относительное отклонение предсказаний модели с 4-ФКВ от предсказаний СМ, $(dN_{\text{com}}/d \cos \theta - dN_{\text{SM}}/d \cos \theta)/dN_{\text{SM}}/d \cos \theta$, в зависимости от угла θ для взаимодействий $e^+e^- \rightarrow \mu^+\mu^-, c\bar{c}, b\bar{b}, t\bar{t}$ при $\sqrt{s} = 500 \text{ ГэВ}$. Здесь θ — полярный угол рассеянного фермиона относительно направления e^- -пучка. В случае $q\bar{q}$ -пары угол определялся направле-

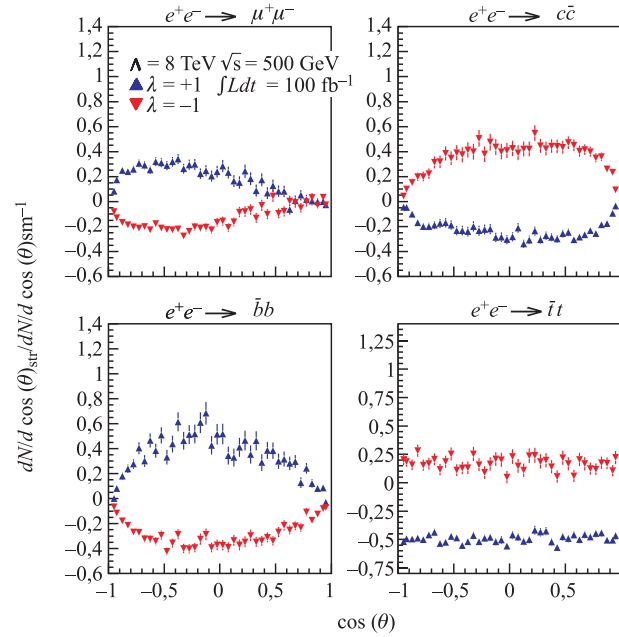


Рис. 2. Относительное отклонение угловых распределений от предсказаний стандартной модели, обусловленное вкладом четырехфермионных контактных взаимодействий, в зависимости от угла в процессах $e^+e^- \rightarrow \mu^+\mu^-, c\bar{c}, b\bar{b}, t\bar{t}$ при $\sqrt{s} = 500 \text{ ГэВ}$

нием электрона и направлением струи с максимальной энергией и соответствующим кварку знаком заряда. Струи формировались методом образования пар кластеров по критерию соседства в пространстве импульсов, описанном в РУТНІА. Радиационное излучение пучковых частиц и фермионов в конечном состоянии было включено в моделирование. Данные представляют конструктивную ($\lambda = -1$) и деструктивную ($\lambda = +1$) интерференции вклада 4-ФКВ. Количество событий соответствует интегральным светимостям, указанным на рисунках. Поведение распределений для рождения $t\bar{t}$ -пары обусловлено ограниченностью кинематической области рождения пары при $\sqrt{s} = 500$ ГэВ. Приведенные распределения указывают на значительную модификацию предсказаний СМ, обусловленную 4-ФКВ. При этом влияние конструктивной и деструктивной интерференций вклада 4-ФКВ различно на «верхние» (c и t) и «нижние» (μ и b) члены лептонных и кварковых изодублетов.

В СМ отношение сечения рождения $b\bar{b}$ -пары к сечению рождения $\mu^+\mu^-$ -пары вычисляется с высокой точностью и, следовательно, может быть использовано для выявления эффектов новой физики. На рис. 3 показано влияние вклада 4-ФКВ на отношение сечения рождения $b\bar{b}$ - и $\mu^+\mu^-$ -пар, $(dN/d \cos \theta_{bb}) / (dN/d \cos \theta_{\mu\mu})$, при $\Lambda = 8$ ТэВ и конструктивной интерференции вклада 4-ФКВ.

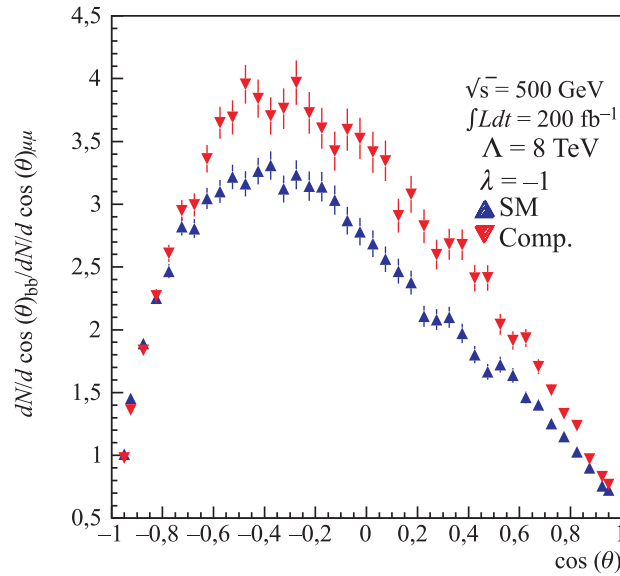


Рис. 3. Влияние вклада четырехфермионных контактных взаимодействий на отношение распределений по углу θ в $e^+e^- \rightarrow b\bar{b}$ - и $e^+e^- \rightarrow \mu\bar{\mu}$ -взаимодействиях при $\sqrt{s} = 500$ ГэВ

Эффективность мечения струй b -кварков на установке TESLA, по оценкам, составит 80 %, струй c -кварков — 30 %. Ошибки процедуры мечения в обоих случаях не превысят 10 %. Мюоны будут идентифицированы с эффективностью 98 %. Эти оценки позволили нам привести на рисунке и далее использовать в табл. 1 сечения рождения $b\bar{b}$ -пар.

В табл. 1 приведены оценки значений Λ , до которых возможны наблюдения эффектов в угловых распределениях мюонов и b -кварковых струй, обусловленных 4-ФКВ, в e^+e^- -взаимодействиях при $\sqrt{s} = 500$ (800) ГэВ. Для интегральных светимостей, указанных в скобках, уровень достоверности полученных значений составляет 95 %. Эффективность мечения струй b -кварков была при оценках учтена.

Таблица 1. Значения Λ , доступные для измерения на TESLA, в $e^+e^- \rightarrow \mu^+\mu^-$, $b\bar{b}$ -взаимодействиях с уровнем достоверности 95 %. Необходимые интегральные светимости указаны в скобках

	Λ , ТэВ	
	$\sqrt{s} = 500$ ГэВ	$\sqrt{s} = 800$ ГэВ
$e^+e^- \rightarrow \mu^+\mu^-$	15,00 (100 фб ⁻¹)	27,00 (200 фб ⁻¹)
$e^+e^- \rightarrow b\bar{b}$	25,00 (100 фб ⁻¹)	28,00 (100 фб ⁻¹)

Оценки Λ слабо зависят от выбора вида интерференции вклада 4-ФКВ ($\delta\Lambda < 100$ ГэВ).

На рис. 4 показано относительное отклонение предсказаний модели с 4-ФКВ от предсказаний СМ в зависимости от угла θ в сравнении с аналогичным отклонением, обусловленным струнным представлением частиц для процесса $e^+e^- \rightarrow e^+e^-$ при $\sqrt{s} = 500$ ГэВ. Расчеты приведены для $\Lambda = 8$ ТэВ, $\lambda = -1$ и двух значений M_S — 800 и 1000 ГэВ. В случае конструктивной интерференции вклада 4-ФКВ интерпретация полученных в эксперименте распределений будет затруднена неоднозначностью определения источника эффектов. Например, при интегральной светимости 100 фб⁻¹ данные для $\Lambda = 8$ ТэВ и $M_S = 920$ ГэВ неразличимы. Эта неоднозначность может быть разрешена совместным анализом лептонных и кварковых конечных состояний в e^+e^- -взаимодействиях.

В табл. 2 приведены значения M_S , доступные для измерения по угловым распределениям лептонов в баба-рассеянии при $\sqrt{s} = 500$ (800) ГэВ. Количество взаимодействий соответствует интегральным светимостям, указанным в скобках, а уровень достоверности приведенных значений равен 95 %.

В заключение отметим, что четырехфермионные контактные взаимодействия, обусловленные обменом очень тяжелым бозоном ($M_X \gg \sqrt{s}$), в e^+e^- -взаимодействиях при $\sqrt{s} = 500$ (800) ГэВ приводят к наблюдаемым эффектам

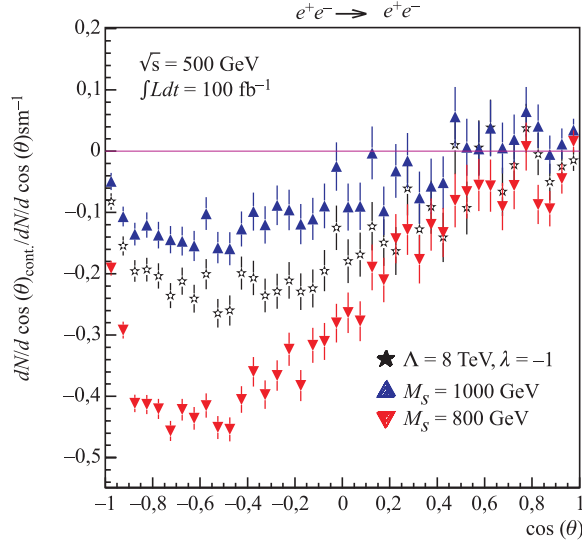


Рис. 4. Влияние вклада четырехфермионных контактных взаимодействий и представления частиц в виде струн на угловые распределения $e^+e^- \rightarrow e^+e^-$ -взаимодействий в зависимости от угла при $\sqrt{s} = 500$ ГэВ

Таблица 2. Значения M_S , доступные для измерения на TESLA, в $e^+e^- \rightarrow e^+e^-$ -взаимодействиях с уровнем достоверности 95%. Необходимые интегральные светимости указаны в скобках

	M_S , ГэВ	
	$\sqrt{s} = 500$ ГэВ	$\sqrt{s} = 800$ ГэВ
$e^+e^- \rightarrow e^+e^-$	1250 (100 fb^{-1})	27,00 (1820 fb^{-1})

в угловых распределениях мюонов и кварковых струй. Параметры пучков и детектора позволят достигнуть на установке TESLA величину масштаба энергий четырехфермионных контактных взаимодействий Λ , существенно превышающую полученную на лептон-лептонных (3–15 ТэВ [14, 15]), лептон-нуклонных (1–8 ТэВ [16, 17]), протон-антипротонных (3,6–9,1 ТэВ [16]) взаимодействиях и сравнимую с ожидаемой на LHC (25 ТэВ), при интегральной светимости 30 fb^{-1} [6]. На e^+e^- -взаимодействиях возможно получить первое указание на струнную природу частиц. Одномерно-протяженная природа частиц будет наблюдаема, если масштаб энергий, при которых взаимодействуют такие частицы, $M_S \leq 1,2$ ТэВ.

Авторы благодарны А. Ольшевскому за инициирование этой работы, В. Ломану и С. Рейман за полезные обсуждения, Ю. Будагову и Д. Хубуа за поддержку этой работы.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Feruglio F.* // Eur. Phys. J. C. 2004. V. 33. P. S114–S128;
Lykken J.D. Phenomenology Beyond the Standard Model. Preprint FERMILAB-CONF-05-038-I. hep-ph/0503148.
2. *Eichten E., Lane K., Peskin M.* // Phys. Rev. Lett. 1983. V. 50. P. 811.
3. *Arkani-Hamed N., Dimopoulos S., Dvali G.* // Phys. Lett. B. 1998. V. 429. P. 263;
Antoniadis I. et al. // Phys. Lett. B. 1998. V. 436. P. 257;
Arkani-Hamed N., Dimopoulos S., Dvali G. // Phys. Rev. D. 1999. V. 59. P. 086004.
4. *Marshakov A.* // Usp. Fiz. Nauk. 2002. V. 45. P. 977–1020.
5. *Cullen S., Perelstein M., Peskin M.E.* // Phys. Rev. D. 2000. V. 62. P. 055012, hep-ph/0001166.
6. ATLAS Detector And Physics Performance TDR. 1991. V. II. P. 932–938;
Gianotti F. et al. // Eur. Phys. J. C. 2005. V. 39. P. 293–333;
Azuelos G. et al. // J. Phys. G. 2002. V. 28. P. 2453–2474.
7. *Usubov Z.U., Abdinov O.B.* // Phys. Atom. Nucl. 2001. V. 64. P. 1288–1291; *Yad. Fiz.* 2001. V. 64. P. 1364–1367;
Usubov Z.U. // Phys. Atom. Nucl. 2001. V. 64. P. 332–335; *Yad. Fiz.* 2001. V. 64. P. 382–385.
8. *Усубов З.У., Минашвили И.А.* // Письма в ЭЧАЯ. 2006. Т. 3, № 3(132). С. 24–29.
9. *Miller D.J.* // Int. J. Mod. Phys. A. 2005. V. 20. P. 5287–5296.
10. TESLA TDR, part IV. A Detector for TESLA / Eds.: T. Behnke et al. DESY-2001-011D. 2001.
11. *Sjöstrand T.* // Comput. Phys. Commun. 1994. V. 82. P. 74;
Sjöstrand T. et al. // Comput. Phys. Commun. 2001. V. 135. P. 238.
12. *Pohl M., Schreiber H.J.* SIMDET - Version 4: A Parametric Monte Carlo for a TESLA Detector, hep-ex/0206009.
13. *Raubenheimer T.* // AIP Conf. Proc. 2005. V. 737. P. 86–94.
14. *Abbiendi G. et al. (OPAL Collab.)* // Eur. Phys. J. C. 2004. V. 33. P. 173–212. hep-ex/0309053.

15. Acciarri *M. et al.* (*L3 Collab.*) // Phys. Lett. B. 2000. V.489. P.81–92. hep-ex/0005028.
16. Green *J. A.* Preprint FERMILAB-CONF-00-088-E, hep-ex/0004035.
17. Adloff *C. et al.* (*H1 Collab.*) // Phys. Lett. B. 2000. V.479. P.358–370. hep-ex/0003002.

Получено 24 апреля 2006 г.

Редактор *Е. В. Сабеева*

Подписано в печать 28.06.2006.

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

Усл. печ. л. 0,69. Уч.-изд. л. 0,84. Тираж 365 экз. Заказ № 55386.

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

E-mail: publish@pds.jinr.ru

www.jinr.ru/publish/