

УДК 539.12.01

ВЛИЯНИЕ ДОПОЛНИТЕЛЬНЫХ ИЗМЕРЕНИЙ ПРОСТРАНСТВА НА УГЛОВЫЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ $\mu^+\mu^-$ - И W^+W^- -ПАР В e^+e^- -ВЗАИМОДЕЙСТВИЯХ

З. У. Усубов^{а, б}, И. А. Минашвили^{а, в}

^а Объединенный институт ядерных исследований, Дубна

^б Институт физики АН, Баку

^в Институт физики высоких энергий и информации ТГУ, Тбилиси

В работе показано, что взаимодействия массивных гравитонов с частицами стандартной модели в пространстве с большими дополнительными измерениями приводят к наблюдаемым эффектам в угловых распределениях мюонов и W -бозонов в e^+e^- -взаимодействиях. Требования, аналогичные предъявляемым к пучкам и детектору на коллайдере TESLA, позволят обнаружить эти эффекты или ограничить значение масштаба энергий таких взаимодействий снизу $\sim 4,5$ ТэВ уже при интегральной светимости $\sim 20 \text{ фб}^{-1}$ при $\sqrt{s} = 500$ ГэВ.

The effects on $\mu^+\mu^-$ and W^+W^- angular distributions in e^+e^- collisions due to the exchanges of massive gravitons in the spacetime beyond the usual 3 + 1-dimensions are considered. It is shown that, under the beam and detector conditions at TESLA these effects would be discovered or the constraints ~ 4.5 TeV on string scale would be achieved at 20 fb^{-1} of integrated luminosity and $\sqrt{s} = 500$ GeV.

Дополнительные измерения большого размера в описании пространства-времени были предложены [1, 2] для объяснения проблемы иерархий [3] — катастрофического отличия масштаба сильного (~ 1 ГэВ) и электрослабого (~ 100 ГэВ) взаимодействий от гравитационного ($M_{\text{Pl}} \sim 10^{19}$ ГэВ). С тех пор все больше явлений вне стандартной модели — механизм CP -нарушения [4], масса нейтрино [5], нарушение калибровочной симметрии без бозонов Хиггса [6] и др. (см., например, [7]) — находят свое объяснение в пространстве-времени с количеством измерений больше 4.

Дополнительные измерения впервые были введены в работах [8], где были сделаны попытки объединения электромагнетизма и гравитации. Развитие моделей суперструн, которые естественным образом включают гравитацию, сделало многомерное описание пространства-времени необходимым. В рамках М-теории, являющейся обобщением моделей суперструн, сделаны успешные попытки объединить все известные взаимодействия. Модели суперструн сформулированы в 10-мерном, а М-теория в 11-мерном пространстве-времени. Дополнительные измерения пространства в этих моделях характеризуются планковской длиной $l \sim 10^{-33}$ см.

Ввиду ее привлекательности с физической точки зрения идея больших дополнительных измерений пространства-времени лежит в основе ряда предсказаний, которые могут быть проверены в недалеком будущем на pp - и e^+e^- -коллайдерах¹.

¹Необходимость сооружения линейного e^+e^- -коллайдера при $\sqrt{s} = 500\text{--}1000$ ГэВ обоснована в литературе довольно обширно (см., например, [9] и ссылки там).

В модели, предложенной в [1], четырехмерное пространство-время, в котором локализованы все известные частицы, вложено в $(4 + N_D)$ -мерное пространство с плоской метрикой, дополнительные измерения которого доступны только для гравитона. В этом случае планковская масса в четырехмерном мире перестает быть фундаментальным параметром и гравитационный масштаб энергий характеризуется величиной M_{eff} :

$$M_{\text{Pl}}^2 \sim M_{\text{eff}}^{N_D+2} R^{N_D}, \quad (1)$$

где N_D дополнительных измерений пространства компактны и характеризуются размером R . Таким образом, в этой модели гравитационный масштаб энергий определяется количеством дополнительных измерений и радиусом компактификации этих измерений R . Если гравитационный масштаб энергий близок к масштабу электрослабых взаимодействий, то количеству дополнительных измерений пространства-времени в интервале от двух до семи соответствуют радиусы дополнительных измерений в интервале от долей мм до нескольких фм. При этом в ТэВ-ной области энергий два класса событий должны быть чувствительны к взаимодействиям массивных гравитонов с частицами стандартной модели: события с прямым излучением гравитонов и $2 \rightarrow 2$ -процессы с обменом массивными промежуточными гравитонами (МПГ). Правила Фейнмана для таких взаимодействий были разработаны в [10, 11] и показано, что вклад диаграмм с обменом МПГ в сечения процессов $2 \rightarrow 2$ пропорционален $\left(\frac{\mathcal{F}}{M_s^4}\right)^2$, а вклад интерференции — $\frac{\mathcal{F}}{M_s^4}$, где выбор \mathcal{F} различен в подходах:

$$\mathcal{F} = 1 \quad [10], \quad (2)$$

$$\mathcal{F} = \begin{cases} \log\left(\frac{M_s^2}{s}\right), & N_D = 2, \\ \frac{2}{N_D - 2}, & N_D > 2, \end{cases} \quad [11], \quad (3)$$

$$\mathcal{F} = \frac{2\lambda}{\pi} = \pm \frac{2}{\pi} \quad [12]; \quad (4)$$

здесь M_s — параметр теории, исключающий расходимости в сечениях процессов при суммировании по МПГ, $M_s \sim \mathcal{O}(M_{\text{eff}})$. В отличие от $2 \rightarrow 2$ -процессов, сечения процессов с излучением гравитона сильно зависят от N_D .

Угловые распределения частиц, образованных после распада гравитона, спин которого равен 2, представляют интерес как для обнаружения дополнительных измерений, так и для идентификации модели, описывающей такое пространство.

В работе исследовано влияние дополнительных измерений пространства-времени на распределения по углам разлета $\mu^+\mu^-$ - и W^+W^- -пар в системе центра масс в e^+e^- -взаимодействиях при энергиях коллайдера TESLA (TeV–Energy Superconducting Linear Accelerator) [13].

Для анализа e^+e^- -взаимодействий нами был выбран генератор PANDORA [14] — пакет программ, созданный для исследования на партонном уровне физических процессов, изучаемых на линейных коллайдерах. Партонные ливни и адронизация моделировались программой PYTHIA [15]. В PANDORA реализована возможность выбора параметров

поляризованных и неполяризованных пучков существующих проектов e^+e^- -коллайдеров. Влияние вклада дополнительных измерений пространства на сечения $2 \rightarrow 2$ -процессов, знак которых в этом случае должен быть определен из экспериментальных данных, учтено в подходе [12].

Функции детектора моделировались пакетом программ SIMDET [16], созданным на основе требований, предъявленных к детектору для TESLA. Основными из этих требований являются очень высокое разрешение по импульсу ($\delta(1/p_T) \sim 4 \cdot 10^{-5} \text{ ГэВ}^{-1}$), хорошее разрешение по энергии адронных струй ($\Delta E/E \simeq 30\%/\sqrt{E}$, где E измерен 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, очевидно из рис. 1, где показаны распределения отклонений между «истинными» и «измеренными» на установке обратными величинами полных и поперечных импульсов, полярных и азимутальных углов заряженных частиц в процессе $e^+e^- \rightarrow W^+W^-$.

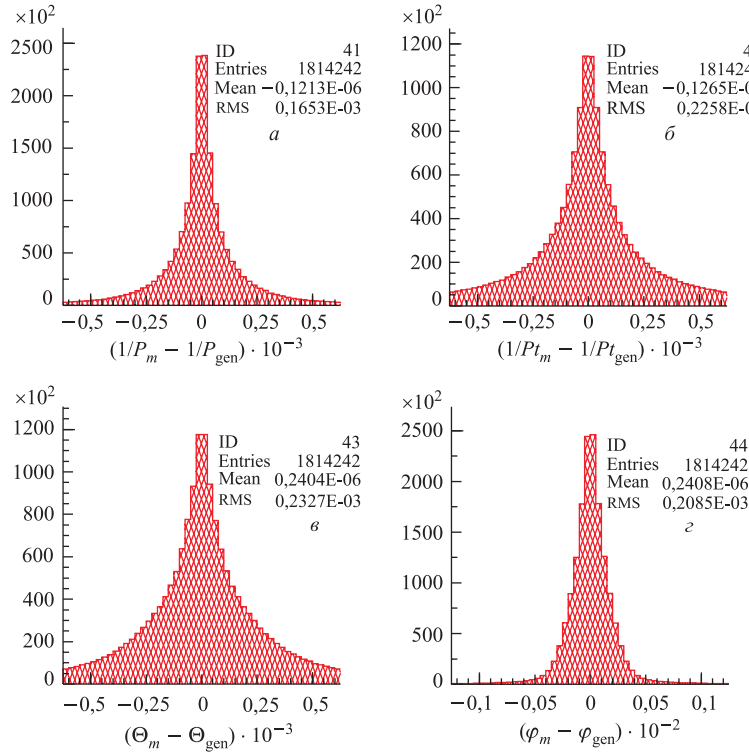


Рис. 1. Распределения по отклонениям между моделированными и «измеренными» параметрами частиц в $e^+e^- \rightarrow W^+W^-$ -событиях при $\sqrt{s} = 500 \text{ ГэВ}$: обратных величин полных (а) и поперечных (б) импульсов; полярных (в) и азимутальных (г) углов

На рис. 2 и 3 приведены распределения событий $e^+e^- \rightarrow \mu^+\mu^-, W^+W^-$ при $\sqrt{s} = 500 \text{ ГэВ}$ по углу разлета в системе центра масс электрон-позитронных пучков. Угол

разлета определялся направлением пучка электронов и направлением мюона с отрицательным зарядом, а в случае W^+W^- -пары, лептона или струи — с отрицательным полным зарядом и максимальной энергией. Струи формировались методом образования пар кластеров по критерию соседства в пространстве импульсов, описанному в РУТНИА.

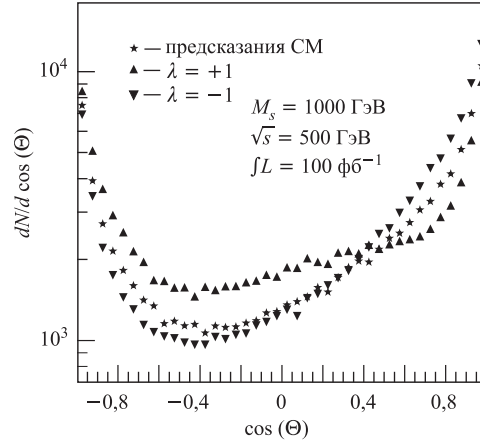


Рис. 2. Распределение $e^+e^- \rightarrow \mu^+\mu^-$ -событий по углу разлета в системе центра масс e^+e^- -пучков. Предсказания стандартной модели (★) сравниваются с влиянием вклада дополнительных измерений пространства (▲, ▼) (пояснения см. в тексте)

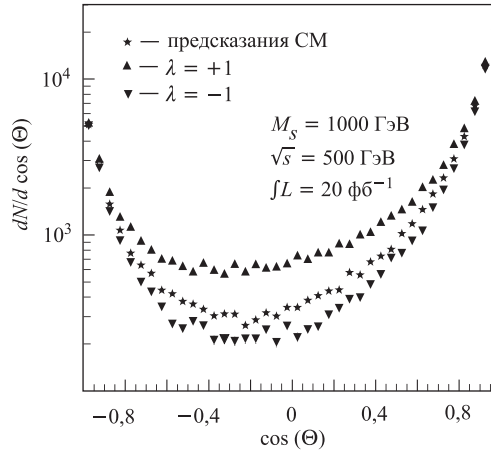


Рис. 3. То же, что и на рис. 2, для $e^+e^- \rightarrow W^+W^-$

На рисунках также отражены предсказания стандартной модели в сравнении с данными, учитывающими вклад процессов с обменом МПГ при $M_s = 1000$ GeV и $\lambda = \pm 1$ (см. (4)). Угол разлета в системе центра масс на уровне подпроцессов моделировался в

области $|\cos(\Theta)| < 0,95$, было учтено радиационное излучение пучковых частиц. Количество событий соответствует интегральным светимостям, приведенным на рисунках, где указано на значительную модификацию предсказаний стандартной модели, обусловленную процессами с обменом МПГ. Сравнительный анализ влияния процессов с обменом МПГ в $\mu^+\mu^-$ - и W^+W^- -конечные состояния в e^+e^- -взаимодействиях позволит выделить эти эффекты из аналогичных, обусловленных другими явлениями вне стандартной модели.

В таблице приведены оценки M_s с уровнем достоверности 98 %, достижимые при $\sqrt{s} = 500$ и 800 ГэВ и указанных интегральных светимостях.

Значения M_s , доступные для измерения на TESLA в $e^+e^- \rightarrow \mu^+\mu^-$, W^+W^- -взаимодействиях с уровнем достоверности 98 %. Необходимые интегральные светимости указаны в скобках

Взаимодействия	M_s , ГэВ	
	$\sqrt{s} = 500$ ГэВ	$\sqrt{s} = 800$ ГэВ
$e^+e^- \rightarrow \mu^+\mu^-$	1900,0 (100 фб ⁻¹)	2700,0 (200 фб ⁻¹)
$e^+e^- \rightarrow W^+W^-$	4600,0 (20 фб ⁻¹)	5200,0 (40 фб ⁻¹)

Оценка M_s слабо зависит от выбора знака вклада процессов с обменом МПГ, $\delta M_s \sim \mathcal{O}(10 \text{ ГэВ})$.

В заключение отметим, что взаимодействия частиц стандартной модели с массивными гравитонами приводят к наблюдаемым эффектам в угловых распределениях мюонов и W -бозонов в e^+e^- -взаимодействиях при $\sqrt{s} = 500$ (800) ГэВ. Дополнительные измерения пространства-времени могут быть обнаружены на e^+e^- -коллайдерах или может быть достигнуто ограничение снизу на M_s , существенно превышающее значения, полученные к настоящему времени: LEP — 0,5–1,7 ТэВ, тэватрон — 1,3–3,5 ТэВ¹ (см., например, [17]). Параметры пучков и детектора позволят достигнуть на TESLA величину M_s , сравнимую с ожидаемым значением на LHC, ~ 6 –14 ТэВ. Анализ процессов $e^+e^- \rightarrow W^+W^-$ является наиболее благоприятным для оценки M_s .

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

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Arkani-Hamed N., Dimopoulos S., Dvali G.* // Phys. Lett. B. 1998. V. 429. P. 263; *Antoniadis I. et al.* // Ibid. V. 436. P. 257; *Arkani-Hamed N., Dimopoulos S., Dvali G.* // Phys. Rev. D. 1999. V. 59. P. 086004.
2. *Randall L., Sundrum R.* // Phys. Rev. Lett. 1999. V. 83. P. 3370; 4690.

¹Пределы указаны для значений $N_D = 2$ –7 и соответствуют уровню достоверности 95 %.

3. *Gildener E., Weinberg S.* // Phys. Rev. D. 1976. V. 13. P. 3333.
4. *Chang D. et al.* // Phys. Rev. D. 2004. V. 70. P. 096010.
5. *Ng J. N.* Invited talk at 2nd Intern. Conf. of Flavor Physics (ICFP2003), Seoul, Korea // J. Korean Phys. Soc. 2004. V. 45. P. S341–S346. hep-ph/0311352;
Huber S. J. // AIP Conf. Proc. 2003. V. 655. P. 163–176.
6. *Schwinn C.* // Phys. Rev. D. 2004. V. 69. P. 116005.
7. *Feruglio F.* // Eur. Phys. J. C. 2004. V. 33. P. S114;
Rizzo T. G. Pedagogical Introduction to Extra Dimensions. eConf C040802: L013. 2004. hep-ph/0409309.
8. Работы *Норстрема Г., Калуцы Т. и Кляйна О.* в переводе на английский язык можно прочитать в книге *Appelquist T., Chodos A., Freund P. G. O.* Modern Kaluza–Klein Theories. Menlo Park: Addison-Wisley, 1987.
9. *Miller D. J.* Linear Collider Physics. Plenary talk at ICHEP 2004, Beijing, Aug. 22, 2004 // Intern. J. Mod. Phys. A. 2005. V. 20. P. 5287–5296.
10. *Giudice G., Rattazzi R., Wells J.* // Nucl. Phys. B. 1999. V. 544. P. 3; revised version: hep-ph/9811291.
11. *Han T., Lykken J. D., Zhang R.-J.* // Phys. Rev. D. 1999. V. 59. P. 105006; revised version: hep-ph/9811350.
12. *Hewett J. L.* // Phys. Rev. Lett. 1999. V. 82. P. 4765.
13. TESLA TDR part IV. A Detector for TESLA / Ed. T. Behnke et al. DESY-2001-011D. 2001.
14. *Peskin M. E.* PANDORA: An Object Oriented Event Generator for Linear Collider Physics. SLAC-PUB-8290; hep-ph/9910519;
http://www-sldnt.slac.stanford.edu/nld/new/Docs/Generators/PANDORA_PYTHIA.htm
15. *Sjöstrand T.* // Comp. Phys. Commun. 1994. V. 82. P. 74;
Sjöstrand T. et al. // Comp. Phys. Commun. 2001. V. 135. P. 238.
16. *Pohl M., Schreiber H. J.* SIMDET — Version 4: A Parametric Monte Carlo for a TESLA Detector. hep-ex/0206009.
17. *Cheung K.* Collider Phenomenology for a Few Models of Extra Dimensions. hep-ph/0409028.