

УДК 539.12

А. А. БАБИЧ, А. А. ПАНКОВ

ДОПОЛНИТЕЛЬНЫЙ Z' -БОЗОН И ПОЛЯРИЗАЦИОННЫЕ АСИММЕТРИИ В ПРОЦЕССЕ АННИГИЛЯЦИОННОГО РОЖДЕНИЯ ПАРЫ СКАЛЯРНЫХ КВАРКОВ

Исследована перспектива использования поляризационных продольной и поперечной асимметрий в качестве основных наблюдаемых для выделения эффектов рождения скалярных кварковых состояний в процессе e^+e^- -аннигиляции с учетом вклада суперструнного Z' -бозона.

Общепринятой теорией для описания низкоэнергетической феноменологии сильных и электрослабых процессов в настоящее время считается Стандартная модель (СМ), в основе которой лежит калибровочная инвариантность относительно преобразований, принадлежащих группе $SU(3)_C \otimes SU(2)_L \otimes U(1)_Y$. В то же время с теоретической точки зрения СМ не является удовлетворительной. Действительно, наличие достаточно большого числа свободных параметров (в минимальной модели — 18), неясный смысл дублирования фермионных поколений и структуры их спектра масс, произвол в выборе хиггсовского сектора (можно указать еще на целый ряд других слабых мест СМ, см., например, [1]) указывают на то, что СМ является скорее всего низкоэнергетическим приближением некоторой более фундаментальной теории. В последнее время на эту роль претендуют различные суперструктурные схемы, среди которых наиболее реалистичной является десятимерная гетерострунная модель с калибровочной группой $E_6 \otimes E'_8$ [2, 3]. Компактификация на некотором шестимерном многообразии Калаби—Яо приводит, как известно, к $N=1$, $D=4$ суперсимметричной теории с калибровочной группой E_6 . Характерной особенностью проявления калибровочной инвариантности относительно преобразований из группы E_6 и суперсимметрии в низкоэнергетической физике является необходимость появления новых сравнительно легких (с массой меньше 1 ТэВ) экзотических фермионов, принадлежащих фундаментальному представлению группы E_6 , а также семейства суперсимметричных партнеров для каждого фермионного поколения [4, 5]. Так как ранг группы E_6 равен шести, а ранг калибровочной группы СМ равен четырем, то новых нейтральных калибровочных бозонов может быть один или два.

В настоящее время в литературе [4] интенсивно обсуждаются четыре популярные модели ψ , η , χ , I , отличающиеся друг от друга характером смешивания $U(1)$ - или $SU(2)$ -фактора с фактором $U(1)_Y$. Параметром такого смешивания является угол α , который для ψ , η , χ и I -моделей принимает значения 0; 37,8; 90 и 127,8° соответственно.

Проверка существования и установление свойств дополнительного Z' -бозона могут быть выполнены в экспериментах на e^+e^- -, ep -, $pp^{(-)}$ -коллайдерах, с нейтральными пучками, в опытах по исследованию нарушения четности в атомах и ядрах [6—9], а также в некоторых других процессах, в которых проявляются эффекты слабых нейтральных токов. Несомненный интерес представляет изучение различных проявлений Z' -бозона в процессах e^+e^- -аннигиляции и, в частности, с рождением пары скалярных частиц f^\pm [10]

$$e^+ + e^- \rightarrow \tilde{f}^+ + \tilde{f}^- \quad (1)$$

при энергиях, достижимых на установках SLC и LEP I, II. Здесь мы сосредоточим наше внимание на особенностях рождения пары скалярных кварков \tilde{u} - и \tilde{d} -типов и влиянии на эти процессы дополнительного Z' -бозона (случай рождения скалярных лептонов рассматривается в отдельной работе).

Следует отметить, что актуальность задачи изучения аннигиляционных процессов со скалярными кварками в качестве конечных состояний предопределяется как феноменологическими предсказаниями теории суперсимметрии, о которых упоминалось выше, так и возможностью практической реализации измерений рассматриваемых наблюдаемых. Последнее обстоятельство связано с возможностью надежной идентификации такого рода событий. В данном случае ситуация более сложная, чем в процессах с рождением скалярных лептонов, так как рождающиеся скалярные кварки имеют несколько мод распада, среди которых, в случае их кинематической разрешенности, доминирующими являются [11]

$$\tilde{q} \rightarrow q \tilde{\gamma} \quad (2)$$

и

$$\tilde{q} \rightarrow q \tilde{g}, \quad (3)$$

где $\tilde{\gamma}$ и \tilde{g} — фотино и глюино соответственно, а q — обычные кварки. Распад (3) обладает большей долей неопределенности при попытке выделения событий со скалярными кварками из фона, так как глюино

в свою очередь может также распадаться, например, по каналу $\tilde{g} \rightarrow q \tilde{q} \tilde{\gamma}$. Соотношение между ширинами распадов (2) и (3) зависит от соотношения масс $m_{\tilde{q}}$, $m_{\tilde{\gamma}}$ и $m_{\tilde{g}}$ [11], экспериментальная оценка которых сводится пока только к указанию их нижних границ [12]. Поэтому в данной работе эффекты, связанные с каскадными распадами типа (2) или (3), не рассматриваются. Однако следует отметить, что в случае, когда $m_{\tilde{g}} \gg m_{\tilde{\gamma}}$ (данное соотношение наиболее реалистично соответствует современной экспериментальной ситуации по суперсимметричной физике [12]), основным каналом является распад (2), для которого существуют достаточно надежные критерии идентификации событий типа (1) по продуктам последующего распада (2), связанные с характерными особенностями этого процесса (наличие двух струй, большой угол акомпланарности и т. п. [13]). Кроме того, наличие поляризации исходных e^+e^- -пучков может оказаться чрезвычайно полезным в решении упомянутой выше проблемы. А именно, благодаря различию в спинах между кварками и их скалярными партнерами, рождение кварковых пар в реакции (1) ($\tilde{f} \equiv \tilde{q}$) и в реакции

$$e^+ + e^- \rightarrow \tilde{q} + q \quad (4)$$

должно приводить к разным поляризационным асимметриям. Поляризация исходных пучков предоставит хорошую возможность для точного определения также и констант связи скалярных кварков с промежуточными нейтральными бозонами.

Отметим также, что уже начаты эксперименты на LEP I и SLC по поиску скалярных лептонов и кварков в распадах стандартного Z -бозона [14]. Пока нет прямых свидетельств в пользу существования этих частиц, получено лишь ограничение снизу на их массы. Запланирован также дальнейший поиск скалярных кварков и лептонов в следующей фазе работы LEP II при $\sqrt{s} \lesssim 200$ ГэВ [15].

Поляризационная асимметрия для процесса (1), как будет показано ниже, очень чувствительна к вкладу дополнительного Z' -бозона, поэтому эту наблюдаемую можно рассматривать как своего рода индикатор на его наличие. Целью данной работы является анализ возможных поляризационных эффектов дополнительных калибровочных Z' -бозонов в реакции (1), где в качестве конечных скалярных состояний рассмотрены скалярные \bar{u} - и \bar{d} -кварки. Для поляризованных исходных e^+ - и e^- -пучков продольная \tilde{A}_L и поперечная \tilde{A}_T асимметрии выражаются через полное сечение процесса (1) рождения пары скалярных кварков \bar{q} следующим образом:

$$\tilde{A}_L = \frac{\sigma(P_{\parallel}^- = -1, P_{\parallel}^+ = 0) - \sigma(P_{\parallel}^- = -1, P_{\parallel}^+ = 0)}{\sigma(P_{\parallel}^- = +1, P_{\parallel}^+ = 0) + \sigma(P_{\parallel}^- = -1, P_{\parallel}^+ = 0)} = -\frac{X_2}{X_1}; \quad (5)$$

$$\tilde{A}_T = \frac{\sigma^{\uparrow\downarrow} - \sigma^{\uparrow\uparrow}}{\sigma^{\uparrow\downarrow} + \sigma^{\uparrow\uparrow}} = \frac{X_3 \cos 2\varphi + X_4 \sin 2\varphi}{X_1}, \quad (6)$$

где символами P_{\parallel}^{\pm} и $\uparrow\downarrow, \uparrow\uparrow$ обозначены продольные и поперечные, соответственно, поляризации начальных e^{\pm} -пучков, φ — азимутальный угол вылета \bar{q} . Величины $X_{1,2,3,4}$ определяются выражениями

$$\begin{aligned} X_1 &= \kappa \cdot (|Q_l Q_q + v_{1l} g_{1q} \chi_1 + v_{2l} g_{2q} \chi_2|^2 + |a_{1l} g_{1q} \chi_1 + a_{2l} g_{2q} \chi_2|^2); \\ X_2 &= \kappa \cdot 2 \operatorname{Re} [(Q_l Q_q + v_{1l} g_{1q} \chi_1 + v_{2l} g_{2q} \chi_2) (a_{1l} g_{1q} \chi_1^* + a_{2l} g_{2q} \chi_2^*)]; \\ X_3 &= -\kappa \cdot (|Q_l Q_q + v_{1l} g_{1q} \chi_1 + v_{2l} g_{2q} \chi_2|^2 - |a_{1l} g_{1q} \chi_1 + a_{2l} g_{2q} \chi_2|^2); \end{aligned} \quad (7)$$

$$X_4 = \kappa \cdot 2 \operatorname{Im} [Q_l Q_q (a_{1l} g_{1q} \chi_1^* + a_{2l} g_{2q} \chi_2^*)],$$

где

$$\kappa = \alpha_{em}^2 p^3 \sin \Theta / s^{5/2}; \quad \chi_j = s (s - M_j^2 + i\Gamma_j M_j), \quad j = 1, 2;$$

Q_f — электрический заряд фермиона (или их скалярного партнера); $\alpha_{em} = e^2/4\pi$, e — заряд электрона; a_{jl}, v_{jl}, g_{jq} — константы связи лептонов и кварков с промежуточными калибровочными бозонами, значения которых можно найти в работе [8]; импульс скалярного кварка q с массой m_q есть

$$p \equiv p_q = \beta \sqrt{s} / 2, \quad \beta = (1 - 4m_q^2/s)^{1/2}.$$

Парциальная ширина распада Z_j -бозона в пару фермионов определяется выражением

$$\begin{aligned} \Gamma_j(Z_j \rightarrow f\bar{f}) &= \frac{N_f \alpha_{em} M_j}{3} (1 - 4 \cdot (m_e/M_j)^2)^{1/2} \times \\ &\times \{(v_j^2 + a_j^2)_f + 2 \cdot (m_e/M_j)^2 (v_j^2 - 2a_j^2)_f\}, \end{aligned} \quad (8)$$

а в пару скалярных кварков $\bar{q}q$

$$\Gamma_j(Z_j \rightarrow \bar{q}_R^{\pm} q_R^{\pm}) = \frac{N_q \alpha_{em} M_j}{12} \left(1 - 4 \left(\frac{m_q}{M_j}\right)^2\right)^{3/2} \cdot (v_q^j \pm a_q^j)^2, \quad (9)$$

где $M_j, j=1, 2$ — массы физических состояний Z_1 и Z_2 , являющихся смесью полей Z и Z' ; s — квадрат энергии сталкивающихся e^{\pm} -пучков в СЦМ. При вычислении полной ширины распада Z_2 -бозона учтен вклад от трех поколений безмассовых фермионов (за исключением t -кварка),

а также от одного из тяжелых лептонов. Это соответствует тому, что $\Gamma_2/M_2 \sim 0,01$.

Как уже указывалось, спектр масс скалярных кварков пока неизвестен. Экспериментально определены только их нижние границы. Недавние экспериментальные результаты группы L3 на LEP и MARK II на SLC дают $m_{\tilde{q}} > 45$ ГэВ [14]. Для численных оценок рассматриваемых наблюдаемых используется несколько меньшая величина $m_{\tilde{q}} = 40$ ГэВ. Однако отметим, что данные асимметрии \bar{A}_L и \bar{A}_T , в отличие от сечения рассеяния, не зависят от $m_{\tilde{q}}$, так как эта величина входит в множитель χ , который при подстановке выражений $X_{1,2,3,4}$ (7) в формулы (5) и (6) сокращается. Поэтому приведенные ниже на рис. 1, 2 энергетические поведения асимметрий будут справедливы для скалярных кварковых состояний с любой массой, однако при этом рассматриваемая область энергий ограничивается снизу величиной $\sqrt{s} > 2m_{\tilde{q}}$. На рис. 1 представлена энергетическая зависимость продольной поляризационной асимметрии A_L в процессах рождения $u_{L,R}$ - и $d_{L,R}$ -кварков, соответственно, для η -модели с нарушенной E_6 -симметрией. При этом масса Z' -бозона принимается равной $M_2 = 200$ ГэВ, а угол смешивания $\Phi = 0$, что находится в согласии с имеющимися экспериментальными

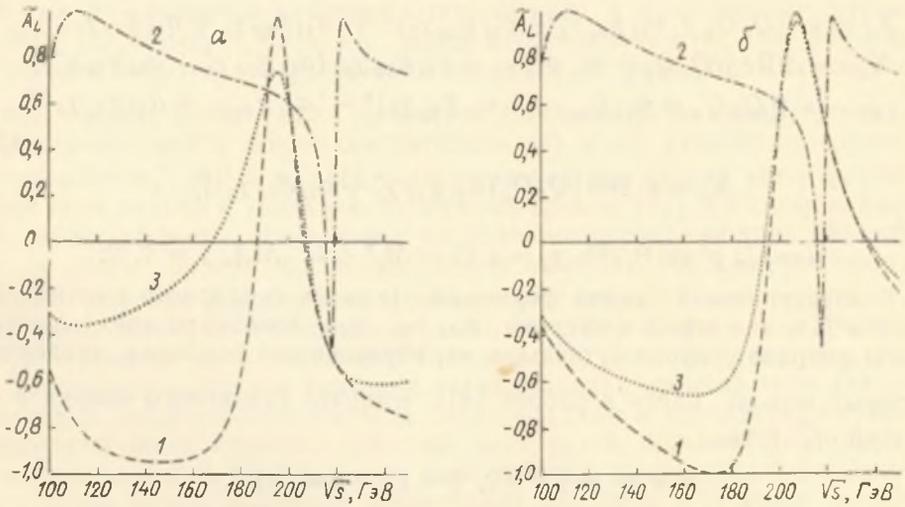


Рис. 1. Энергетическая зависимость продольной поляризационной асимметрии A_L вылета скалярных u -кварков при $m_{\tilde{u}} = 40$ ГэВ, $M_2 = 200$ ГэВ, $\Phi = 0$ для η -модели: а — в процессах $e^+e^- \rightarrow u_L u_L$ (кр. 1), $e^+e^- \rightarrow u_R u_R$ (кр. 2) и $e^+e^- \rightarrow u \bar{u}$ (кр. 3); б — в процессах $e^+e^- \rightarrow d_L \bar{d}_L$, $d d$ (кр. 3); $d_R \bar{d}_R$

данными по нейтральным точкам и определению характеристик Z - и W^\pm -бозонов [5, 16]. Для сравнения на всех рисунках приводится также асимметрия вылета кварков в процессе $e^+e^- \rightarrow u \bar{u}$, $d \bar{d}$. Из рис. 1, а, в частности, видно, что при $\sqrt{s} < 200$ ГэВ поляризационная продольная асимметрия A_L для процессов рождения пары u_L и u_R имеет различные знаки и по абсолютной величине значительно превосходит соответствующую наблюдаемую для реакции (4). В Z_2 -пике при $\sqrt{s} = M_2 =$

Детектирование и идентификация суперсимметричных частиц наталкивается на значительные трудности из-за сложности отделения их от фона в процессах с нескомпенсированными энергией и импульсом. В работе исследована перспектива использования поляризационных продольной и поперечной асимметрий в качестве основных наблюдаемых для выделения эффектов рождения скалярных кварковых состояний в процессе e^+e^- -аннигиляции с учетом вклада суперструнного Z' -бозона. Отмечено, что поведение продольной и поперечной поляризационных асимметрий существенно отличается знаком и величиной от соответствующих наблюдаемых в процессах рождения обычных кварков. Причем для продольной асимметрии различие существенно только для невырожденных по массе состояний скалярных кварков с противоположными киральностями. А для поперечной асимметрии это условие несущественно. Кроме того, подчеркивается, что \bar{A}_L и \bar{A}_T чувствительны к выбору конкретной модели с нарушенной E_6 -симметрией. Таким образом, исследование продольной и поперечной асимметрий даст ценную информацию о процессе рождения скалярных кварков и их экспериментальное определение предоставит четкую информацию о константах связи скалярных частиц с нейтральными калибровочными бозонами.

Авторы выражают благодарность А. А. Иогансену и И. С. Сацункевичу за стимулирующие обсуждения и интерес к работе.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Altarelli G./Preprint CERN—TH 3896. — 1984.
2. Green M. B., Schwarz J. H.//Phys. Lett. — 1984. — V. 149B. — P. 117.
3. Candelas P., Horowitz G., Strominger A., Witten E.//Nucl. Phys. — 1985. — V. B258. — P. 46.
4. London D., Rosner J. L.//Phys. Rev. — 1986. — V. D34. — P. 1530.
5. Ellis J., Franzini P., Zwirner F.//Phys. Lett. — 1988. — V. 202B. — P. 417.
6. Belanger G., Godfrey S.//Phys. Rev. — 1986. — V. D34. — P. 1309.
7. Del Agila F., Quiros M., Zwirner F.//Nucl. Phys. — 1987. — V. B287. — P. 419.
8. Бабиц А. А., Панков А. А., Сацункевич И. С.//ЯФ. — 1989. — Т. 50. — С. 1646.
9. Алтайский М. В., Бедняков В. А.//ЯФ. — 1989. — Т. 50. — С. 1398.
10. Абдуллаев С. К., Алиев Л. П.//Изв. вузов. Физика. — 1989. — № 5. — С. 78; Chiappetta et al.//Nucl. Phys. — 1985. — V. B259. — P. 365; Schiller D. H., Warner D.//Nucl. Phys. — 1985. — V. B255. — P. 505.
11. Haber H. E., Kane G. L.//Phys. Rep. — 1985. — V. 117. — P. 75.
12. Particle Data//Phys. Lett. B. — 1988. — V. 204. — P. 1—486.
13. TOPAZ Coll.//KEK Preprint 89—31. — 1989.
14. Adela B. et al./L3—Preprint—002. — 1989. Barklow T. et al./SLAC—PUB—5196. — 1990.
15. Baer H. et al./In Physics at LEP, CERN 86-02. — 1986. — V. 1. — P. 297.
16. Nodulman L.//Proceeding of the EPS Conference on High Energy and Particle Physics. — Madrid, 1989.

Гомельский политехнический институт

Поступила в редакцию 28.06.90.