

Рис. 3. Затухающий периодический режим (2): пространственно-временной портрет линии роста

Работа выполнена в рамках работы по заданию ГПНИ «Энергетические и ядерные процессы и технологии», подпрограмма – «Энергетические процессы и технологии». Руководитель задания – профессор О. Н. Шабловский.

Литература

1. Шабловский, О. Н. Морфологические свойства линии роста двухмерного дендрита в переохлажденном расплаве / О. Н. Шабловский // Прикладная физика. – 2012. – № 4. – С. 40–46.
2. Шабловский, О. Н. Динамика неустойчивости волновых возмущений и боковое ветвление дендрита в переохлажденном расплаве / О. Н. Шабловский, Д. Г. Кроль // Успехи прикладной физики. – 2022. – Т. 10, № 2. – С. 189–202.

РАЗРАБОТКА МЕТОДА ОБНАРУЖЕНИЯ ИНТЕРФЕРЕНЦИОННЫХ ЭФФЕКТОВ НОВЫХ НЕЙТРАЛЬНЫХ ПРОМЕЖУТОЧНЫХ БОЗОНОВ В ПРОЦЕССЕ ЭЛЕКТРОН-ПОЗИТРОННОЙ АННИГИЛЯЦИИ В ПАРУ КВАРКОВ

Д. В. Синегрибов¹, В. Р. Куриленко¹

¹Учреждение образования «Гомельский государственный технический университет имени П. О. Сухого», Республика Беларусь

²Учреждение образования «Гомельский государственный университет имени Ф. Скорины», Республика Беларусь

Научные руководители: И. А. Серенкова¹, В. В. Андреев²

Разработан метод обнаружения интерференционных эффектов новых нейтральных промежуточных бозонов в процессе $e^+ + e^- \rightarrow b + \bar{b}$ с помощью асимметрии вперед-назад A_{FB} на будущих электрон-позитронных коллайдерах CLIC и ILC; получены модельно-независимые ограничения констант связи Z' -бозонов для заданного процесса; сравнены полученные результаты с аналогичными расчетами для процесса $e^+ + e^- \rightarrow \mu^+ + \mu^-$.

Ключевые слова: асимметрия вперед-назад, Z' -бозон, Стандартная модель, модельно-независимые ограничения.

Международный линейный коллайдер ILC предназначен для исследования свойств таких фундаментальных частиц, как кварки и электроны, а также состояний взаимодействия частиц, которые нельзя наблюдать в других экспериментах. Первоначально планировалось завершить его строительство в 2019 г., но из-за значительных задержек (финансовых, технических, а также международных соглашений) окончание строительства планируется в 2026 г.

Компактный линейный коллайдер CLIC предназначен для изучения физики элементарных частиц на более высоких энергиях. CLIC – проект, разрабатываемый в CERN (Европейская организация ядерных исследований), предложенный в качестве следующего этапа после Большого адронного коллайдера LHC. Реализация проекта пока находится на этапе исследований и технического проектирования.

Интригующим вопросом современной физики элементарных частиц является наличие новых частиц за пределами Стандартной модели (СМ). Точные измерения на ILC и CLIC позволят оценить различные характеристики новых тяжелых частиц. Предполагаемая энергия столкновений: $\sqrt{S_{ILC}} = 1$ ТэВ, $\sqrt{S_{CLIC}} = 3$ ТэВ.

Информация о массе и константах связи Z' -бозонов была бы весьма существенной для проверки новых теорий. Косвенное проявление Z' -бозона состояло бы в обнаружении отклонений физических наблюдаемых величин от поведения, предсказываемого СМ.

В приближении Борна дифференциальное сечение реакции $e^+ + e^- \rightarrow b + \bar{b}$ для продольно поляризованных начальных пучков имеет вид [1]:

$$\frac{d\sigma}{d\cos\theta} = N_C \frac{\pi\alpha_{e,m}^2}{2S} \left[(1 + \cos^2\theta)F_1 + 2\cos\theta F_2 \right], \quad (1)$$

где θ – угол рассеяния между направлением движения начального электрона и вылетающего b -кварка; N_C – цветовой фактор (3 или 1 для конечных кварков или лептонов соответственно); $\alpha_{e,m}^2 = 1/129$ – константа электромагнитного взаимодействия.

Функции $F_{1,2}$ могут быть выражены в терминах амплитуд спиральности:

$$F_{1,2} = \frac{1}{4} \left[(1 + P_e)(1 - P_{\bar{e}}) \left(|A_{RR}|^2 \pm |A_{RL}|^2 \right) + (1 - P_e)(1 + P_{\bar{e}}) \left(|A_{LL}|^2 \pm |A_{LR}|^2 \right) \right], \quad (2)$$

где P_e и $P_{\bar{e}}$ – степени продольной электронной и позитронной поляризаций. Амплитуды спиральности $A_{\alpha\beta}(\alpha, \beta = L, R)$ могут быть представлены в виде диаграмм Фейнмана, изображенных на рис. 1.

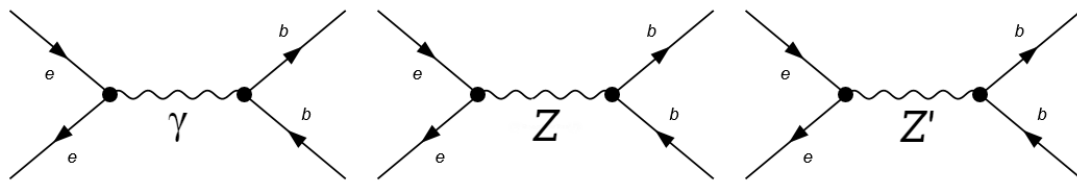


Рис. 1. Диаграммы Фейнмана для процесса $e^+ + e^- \rightarrow b + \bar{b}$

Полное сечение рассеяния σ :

$$\sigma = \int_{-1}^1 \frac{d\sigma}{d\cos\theta} d\cos\theta = N_C \sigma_{pt} F_1 = \frac{1}{4} \left[(1 + P_e)(1 - P_{\bar{e}}) (\sigma_{RR} + \sigma_{RL}) + (1 - P_e)(1 + P_{\bar{e}}) (\sigma_{LL} + \sigma_{LR}) \right], \quad (3)$$

Асимметрия вперед-назад A_{FB} :

$$A_{FB} = \frac{\sigma_{FB}}{\sigma} = \frac{3F_2}{4F_1}. \quad (4)$$

Для количественного представления интерференционной картины рассмотрим три случая, отличающиеся друг от друга разным выбором фермионных констант связи v'_f и a'_f , но с одной и той же массой $M_{Z'}$:

- 1) векторный Z'_V -бозон ($v'_f=1, a'_f=0$);
- 2) аксиальный Z'_A -бозон ($v'_f=0, a'_f=1$);
- 3) аксиально-векторный Z'_{AV} -бозон ($v'_f=1, a'_f=1$).

На рис. 2 представлена энергетическая зависимость асимметрии вперед-назад (4) при различном выборе фермионных констант связи.

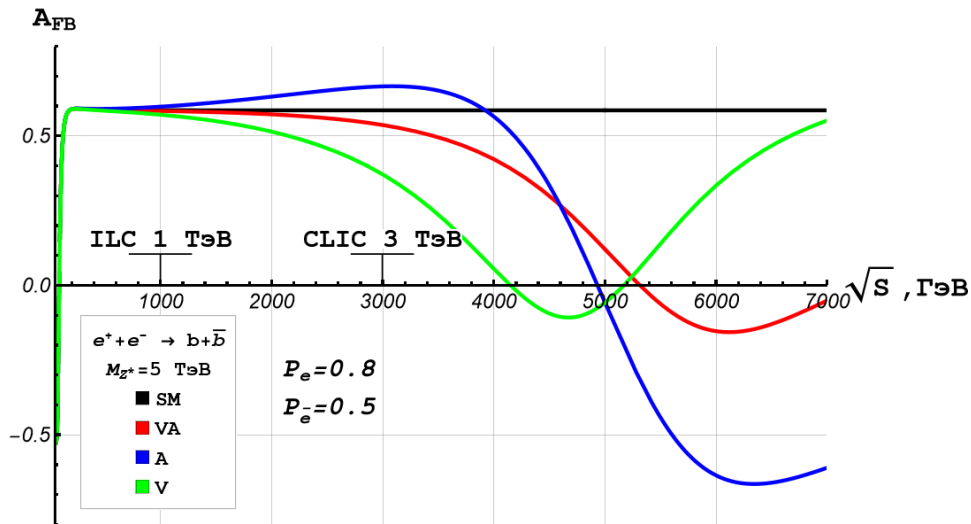


Рис. 2. Энергетическая зависимость асимметрии для Стандартной модели и для модели, предсказывающей существование Z' -бозона с продольно поляризованными начальными пучками и массой $M_{Z'} = 5$ ТэВ

Если не удастся обнаружить отклонения от СМ на уровне достигнутой или ожидаемой экспериментальной точности, то в этом случае можно провести модельно-независимый анализ и получить ограничения на параметры Z' .

Для выполнения анализа удобно использовать модельно-независимую параметризацию лептонных констант связи Z' -бозона:

$$V_f = V_{Z'}^f \sqrt{\frac{g_{Z'}^2}{4\pi} \frac{M_{Z'}^2}{M_{Z'}^2 - s}}, \quad A_f = A_{Z'}^f \sqrt{\frac{g_{Z'}^2}{4\pi} \frac{M_{Z'}^2}{M_{Z'}^2 - s}}. \quad (5)$$

Чувствительность наблюдаемых σ можно оценить с помощью функции χ^2 с двумя степенями свободы, определяемой соотношением:

$$\chi^2 = \left(\frac{\Delta\sigma}{\delta\sigma} \right)^2 + \left(\frac{\Delta A_{FB}}{\delta A_{FB}} \right)^2. \quad (6)$$

Экспериментальная погрешность $\delta\sigma$ учитывает как статистическую, так и систематическую ошибку. Критерием для ограничений модельно-независимых лептонных констант связи v'_i и a'_i служит условие, согласно которому $\chi^2 < \chi^2_{crit}$. Величина χ^2_{crit} определяется требуемым уровнем статистической достоверности. Уровень статистической достоверности соответствует двум стандартным отклонениям. На рис. 3 представлены ограничения на константы связи Z' -бозона для b -кварков, полученные с помощью выполненного модельно-независимого анализа.

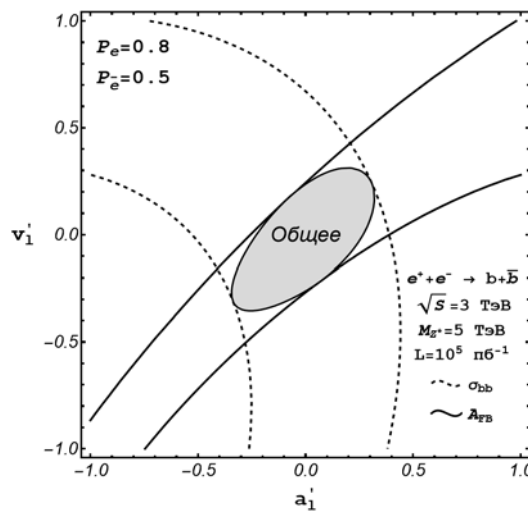


Рис. 3. Модельно-независимые ограничения на константы Z' -бозонов (a' , v'), полученные из комбинированного анализа полного сечения и асимметрии вперед-назад при энергии $\sqrt{S_{слс}} = 3$ ТэВ и массе $M_{Z'} = 5$ ТэВ

Разработан теоретический метод обнаружения интерференционных эффектов новых нейтральных промежуточных с помощью асимметрии вперед-назад A_{FB} . В результате проведенного анализа можно сделать следующие выводы: предсказать Z' можно при энергиях $\sqrt{S} < M_{Z'}$, по наличию отклонения от поведения СМ; энергия, при которой асимметрия становится отрицательной, будет свидетельствовать о приближении к реальной массе Z' ; по сравнению результатов с аналогичными для процесса $e^+ + e^- \rightarrow \mu^+ + \mu^-$ [2] можно заключить, что обнаружить Z' более вероятно для распада в пару мюонов, без начальной поляризации пучков и при выборе фермионных констант связи, соответствующих векторному Z'_V -бозону ($v'_f = 1$, $a'_f = 0$); получены модельно-независимые ограничения на константы Z' -бозона для процесса $e^+ + e^- \rightarrow b + \bar{b}$.

Таким образом, исследование асимметрии является очень важной задачей для дальнейших экспериментов на будущих электрон-позитронных коллайдерах.

Литература

1. Osland, P. Model-independent limits on four-fermion contact interactions at LC with polarization / P. Osland, A. A. Pankov // Phys. Lett. B. – 1998. – Vol. 432. – P. 159–166.
2. Model-independent analysis of the effects of new heavy gauge bosons at high energy electron–positron colliders / D. V. Sinigribov [et al.] // XXVIII International seminar in memory of Prof V. I. Kuvshinov “Nonlinear Phenomena in Complex Systems”. – 2021. – Vol. 27. – P. 440–447.

ВОЗМУЩЕННОЕ СОСТОЯНИЕ ЛИНИИ РОСТА ДЕНДРИТА В ПЕРЕОХЛАЖДЕННОМ РАСПЛАВЕ

Н. С. Селиверстов

Учреждение образования «Гомельский государственный технический университет имени П. О. Сухого», Республика Беларусь

Научный руководитель Д. Г. Кроль

Объект исследования – линия роста свободного дендрита в переохлажденном расплаве чистого серебра. Выполнен анализ возмущенных состояний линии роста. Получены аналитические зависимости влияния ширины зоны неоднородности и угла заострения линии роста на параметр затухания. Проанализировано влияние ширины зоны неоднородности на скорость волны. Представлена графическая информация о свойствах дендритного роста для переохлажденного расплава чистого серебра.

Ключевые слова: дендритный рост, высокоскоростная кристаллизация, линия роста дендрита, переохлажденный расплав.

Важной проблемой современного материаловедения является получение новых высокоэффективных материалов. Одно из перспективных направлений – использование сверхвысоких скоростей кристаллизации глубоко переохлажденного расплава. В ходе экспериментальных исследований были достигнуты скорости роста 50 м/с при переохлаждениях до 300 К [1]. Цель данной работы – изучить свойства возмущенного состояния линии роста дендрита при высокоскоростной кристаллизации серебра.

Дифференциальное уравнение, описывающее малое возмущение $f = f(y, t)$ исходной фазовой границы кристаллизации (ФГК), имеет вид [2, 3]:

$$\partial^2 f / \partial y^2 = B_1(\partial f / \partial y) + B_2(\partial f / \partial t), \quad (1)$$

$$A_1 = N / \sin \theta_1, \quad A_2 = 1 / \operatorname{tg} \theta_1, \quad B_1 = 2\varphi A_1 A_2 < 0, \quad B_2 = (1 + A_2^2)\varphi > 0,$$

$$\alpha = L / (UT_c), \quad \varphi = \alpha / \mu, \quad A_1, A_2, B \equiv \text{const},$$

где L – теплота фазового перехода единицы объема вещества; μ – кинетический коэффициент роста; T_e – температура равновесия между твердой и жидкой фазами; T_c – равновесная температура кристаллизации; U – поверхностная энергия границы раздела фаз; B – переохлаждение на вершине дендрита; ΔT – переохлаждение расплава; c – объемная теплоемкость; λ – коэффициент теплопроводности; координата x направлена вдоль оси симметрии дендрита в сторону твердой фазы; y – поперечная декартова координата; θ_1 – угол заострения линии роста; N – скорость перемещения ФГК; $N_m = -N > 0$.