

УДК 339.54.012

Валид Аль Шаэр

Университет Аль-Фарахиди (Багдад) – Факультет наук – Кафедра

медицинской физики

Преподаватель, доктор философии (PhD)

Доцент, кандидат наук

Почта : waledalshaer59@gmail.com

**АНАЛИЗ ЭФФЕКТОВ СЛАБОГО ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ В
НИЗКОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ PP-СТОЛКНОВЕНИЯХ В РАМКАХ
РАСШИРЕННОЙ СТАНДАРТНОЙ МОДЕЛИ**

Аннотация. В работе представлен теоретический анализ эффектов слабого взаимодействия в протон-протонных столкновениях при энергиях до 3 ГэВ в рамках расширенной Стандартной модели. Рассматриваются сечения рассеяния с учётом дополнительных членов лагранжиана, описывающих новые слабые токи и взаимодействия. Выполнено численное моделирование вклада слабых процессов в общую амплитуду pp-взаимодействия. Обсуждаются возможные экспериментальные подтверждения результатов на установках PANDA (FAIR), NICA (ОИЯИ) и других. Полученные данные могут быть использованы для уточнения параметров слабого изоспина и оценки эффектов, выходящих за рамки Стандартной модели.

Annotation. This paper presents a theoretical analysis of weak interaction effects in proton-proton collisions at energies up to 3 GeV within the framework of the extended Standard Model. Scattering cross-sections are considered with additional terms in the Lagrangian that describe new weak currents and interactions. Numerical modeling is performed to evaluate the contribution of weak processes to the total pp interaction amplitude. Potential experimental confirmations of the results are discussed for facilities such as

PANDA (FAIR), NICA (JINR), and others. The results can be used to refine weak isospin parameters and probe effects beyond the Standard Model.

Ключевые слова: слабое взаимодействие, протон-протонные столкновения, Стандартная модель, сечение рассеяния, расширенный лагранжиан, PANDA, NICA.

Keywords: weak interaction, proton-proton collisions, Standard Model, scattering cross-section, extended Lagrangian, PANDA, NICA

Стандартная модель (СМ) успешно описывает электрослабое и сильное взаимодействия, однако не является полной теорией: она не объясняет тёмную материю и не учитывает гравитацию [1]. Поэтому изучение отклонений от предсказаний СМ, особенно в энергетических режимах, где они слабо выражены, остаётся актуальным.

Протон-протонные столкновения при низких энергиях (до 3 ГэВ) позволяют исследовать слабое взаимодействие в условиях, где его вклад обычно подавлен сильным. Однако расширения СМ могут усилить влияние слабых процессов, делая их экспериментально заметными [2].

Цель работы – теоретически оценить влияние слабого взаимодействия в пр-столкновениях с учётом расширенного лагранжиана СМ, рассчитать сечения и амплитуды, а также определить перспективы их экспериментального наблюдения на установках типа PANDA, NICA и БАК.

Данное исследование ограничено областью кинетических энергий протонов до 3 ГэВ в системе центра масс, что соответствует нижнему интервалу энергий, применимому к установкам типа NICA, PANDA и ряду низкоэнергетических экспериментов на БАК. В этом диапазоне преобладает сильное взаимодействие, однако слабые эффекты могут проявляться в виде малых поправок к амплитуде рассеяния или нарушений симметрий, чувствительных к структуре лагранжиана.

Особый интерес представляет ситуация, в которой расширения Стандартной модели способны усиливать такие эффекты до уровня,

доступного наблюдению. Анализ поведения сечений и угловых распределений в этой области энергий позволяет не только протестировать фундаментальные параметры слабого изоспина, но и выявить возможные отклонения, указывающие на Новую физику.

Стандартная модель электро-слабого взаимодействия описывается калибровочной группой $SU(2)$ с левыми фермионами и $U(1)$ слабого гиперзаряда, объединяющей слабое и электромагнитное взаимодействия. Генераторы группы $SU(2)$ называются слабым изоспином T , а группа $U(1)$ соответствует слабому гиперзаряду Y . Левые фермионы образуют двойки $SU(2)$ с изоспином $T=1/2T$ (то есть с проекцией $T_3=\pm 1/2T$) — например, левое электронное нейтрино и электрон записываются как $(\nu_e, e^-)_L$, в то время как правые фермионы являются синглетами с $T=0$ и не участвуют в заряженных слабых взаимодействиях.

В слабом взаимодействии различают два типа токов:

- Заряженный ток переносится заряженными бозонами W^\pm , которые меняют заряд частиц и превращают один член изоспиновой двойки в другой (например, $d \rightarrow u$, $e \rightarrow \nu_e$).
- Нейтральный ток переносится нейтральным бозоном Z^0 , который взаимодействует с фермионами без изменения их электрического заряда.

Взаимодействие заряженного слабого тока лептонов описывается лагранжианом следующего вида:

$$L_{cc} = \frac{g}{2\sqrt{2}} (\underline{\nu}_e \gamma^u (1 - \gamma^5) e W_u^+ + \underline{e} \gamma^u (1 - \gamma^5) \nu_e W_u^-) \quad (1)$$

Где:

g — константа слабого взаимодействия,

ν_e и e поля электронного нейтрино и электрона (левая компонента фермионов),

γ^u матрицы Дирака,

γ^5 матрица, выделяющая хиральные компоненты фермионных полей,

$(1 - \gamma^5)$ — оператор проекции на левую хиральную компоненту, так как слабое взаимодействие затрагивает только левые компоненты фермионов,

$W_{\pm u}$ — векторные поля заряженных W -бозонов, переносчиков заряженного слабого тока.

Эта формула наглядно показывает, что слабое взаимодействие происходит через обмен заряженными W^{\pm} бозонами между левыми фермионными полями, а проекция с $\frac{1-\gamma^5}{2}$ обеспечивает хиральность взаимодействия. Коэффициент g задаёт интенсивность слабого взаимодействия. Аналогичные принципы лежат в основе всех слабых переходов, включая нейтральный ток с бозоном Z^0 , что отражает калибровочную структуру группы $SU(2) \times U(1)$ Стандартной модели

Для учёта возможных эффектов новой физики за пределами Стандартной модели используется подход эффективной теории поля (SMEFT). В рамках SMEFT лагранжиан дополняется операторами размерности выше 4, наиболее часто — размерности 6, подавленными масштабом новой физики Λ . Эти члены сохраняют симметрию $SU(3)_c \times SU(2)_L \times U(1)_Y$, но приводят к дополнительным слабым взаимодействиям.

Пример типичного оператора:

$$L_{eff} = \frac{c}{\Lambda^2} (\underline{L} \gamma^u \tau^a L) (\underline{L} \gamma_u \tau^a L) \quad (2)$$

Где:

L — лептонные дублеты,

τ^a — матрицы Паули (генераторы $SU(2)$),

c — безразмерный коэффициент.

Такие операторы могут влиять на процессы с участием нейтрино и электронов.

Кроме того, в расширениях СМ возможны правые слабые токи, возникающие, например, при наличии тяжёлых бозонов W_R , связанных с

правыми фермионами. Также часто рассматривается дополнительная $U(1)'$ -симметрия, ведущая к появлению нового нейтрального бозона Z' , взаимодействующего с фермионами:

$$L \supset g' Z'_\mu \bar{\psi} \gamma^\mu \psi \quad (3)$$

Где:

g' — константа связи нового калибровочного взаимодействия (аналог g для SM, но для новой симметрии $U(1)'$,

Z'_μ — поле нового тяжёлого нейтрального бозона Z' (индекс μ — компонент 4-вектора),

ψ — фермионное поле (например, кварк или лептон), с которым взаимодействует Z' .

γ^μ — матрицы Дирака, обеспечивающие правильную лоренц-ковариантную структуру взаимодействия.

Такие расширения могут проявляться в низкоэнергетических столкновениях через отклонения сечений и аномальные токи, и являются предметом интенсивных теоретических и экспериментальных исследований.

При описании протон-протонных столкновений на низких энергиях применяется партонная модель и теорема факторизации, позволяющие разделить процесс на элементарное рассеяние кварков и глюонов и структуру протонов, описываемую функциями распределения партонов. Квантово-полевая теория, основанная на лагранжиане Стандартной модели, используется для расчёта амплитуд взаимодействий с учётом обменов глюонами, фотонами и бозонами W^\pm, Z^0 . Основной вклад, как правило, вносит сильное взаимодействие, однако слабые эффекты, особенно связанные с нарушением четности, также учитываются.

Для моделирования возможных проявлений новой физики применяется эффективный лагранжиан, включающий калибровочно-инвариантные операторы высокой размерности. Такие поправки позволяют параметризовать отклонения от Стандартной модели и вносят дополнительные вклады в амплитуды рассеяния. Расчёты ведутся в приближении теории возмущений с

учётом диаграмм начального порядка и возможных поправок, при этом соблюдаются требования калибровочной инвариантности и унитарности, обеспечивающие корректное поведение теории на всех энергиях.

В расширенной теории слабого взаимодействия исходят из Лагранжиана, содержащего стандартные калибровочные взаимодействия (W/Z -бозоны) и возможные дополнительные операторы или поля (BSM). Из этого Лагранжиана выводят правила Фейнмана, по которым строят диаграммы рассеяния. Амплитуда процесса получается суммированием вкладов всех релевантных диаграмм. В ней участвуют как типичные слабые диаграммы (обмен W/Z -бозонами), так и диаграммы с глюонными вкладами (QCD) – эти вклады могут интерферировать друг с другом. В стандартной модели на уровне кварков предсказано взаимное наложение амплитуд глюонного и электрослабого обменов, что даёт малые асимметрии в распределениях. Для оценки основных эффектов обычно вычисляют амплитуду в приближении Бора (нулевой порядок по константам связи), а затем при необходимости включают радиационные и высшие поправки.

Полученное значение амплитуды M используется для вычисления дифференциального сечения: сечение пропорционально квадрату модуля амплитуды, усреднённого по состояниям возбуждения, и интегрируется по фазовому объёму финальных частиц. В случае pp -столкновения это дополняется свёрткой по функциям распределения кварков и глюонов в протоне [5]. Так, например, полное сечение производства W -бозона в pp -столкновениях записывается как свёртка элементарных (партонических) сечений с PDF-протонов. При этом на уровне Бора ненулевыми являются лишь специфические кварк-антикварковые каналы (например, $u + d^- \rightarrow W^+$). На более высоких порядках по α_s появляются новые каналы (с участием глюонов) и дополнительные вклады интерференции. В расширенной модели новые операторы или частицы модифицируют правила Фейнмана (добавляют вершины или меняют константы связи), что приводит к дополнительным

диаграммам или изменённым амплитудам. Отклонения сечения от стандартного [7].

Для численного моделирования процессов широко используются пакеты MadGraph и FeynCalc. MadGraph – это генератор событий Монте-Карло, автоматически строящий диаграммы и матричные элементы для заданных частиц начального и конечного состояний. Пользователь задаёт процесс (например, $pp \rightarrow W+j$), и MadGraph генерирует все соответствующие диаграммы Фейнмана на дереве и выдаёт код для вычисления амплитуды на заданных точках фазового пространства. Полученный код затем используется для расчёта сечения и генерации событий (с помощью модуля MadEvent). MadGraph поддерживает произвольные ренормируемые и эффективные модели (через интерфейс FeynRules), что позволяет изучать как стандартные слабые процессы (W/Z-продукция, передача заряда), так и сценарии за пределами Стандартной модели.

FeynCalc – это пакет для Mathematica, предназначенный для аналитических вычислений в квантовой теории поля. Он позволяет символьным образом обрабатывать диаграммы Фейнмана и выражения амплитуд: сокращать алгебру Дирака, упрощать тензорные структуры, выполнять редукцию интегралов и т.д. В контексте слабых взаимодействий в pp-столкновениях FeynCalc используют для получения или проверки аналитических выражений амплитуд и рассеяний, особенно при вычислении петельных поправок и эффективных операторов (что дополняет численные симуляции MadGraph).

В протон-протонных столкновениях амплитуда процессов задаётся главным образом сильным взаимодействием. Тем не менее, слабые токи — бозоны W, Z, а также виртуальные фотоны — дают дополнительные вклады. Так, наряду с типичными QCD-диаграммами с обменом глюонами, возникают слабые процессы: например, в канале Даррелла–Яна $qq \rightarrow Z/\gamma^* \rightarrow \ell^+ \ell^-$

или в процессах рождения W - и Z - бозонов с последующим лептонным или адронным распадом, амплитуда полностью определяется электрослабым взаимодействием [9].

Даже при чисто адронных конечных состояниях слабые поправки могут вносить вклад через петлевые диаграммы и интерференцию с сильными процессами. Эти вклады учитываются в моделировании путём добавления соответствующих диаграмм и включения NLO-электрослабых поправок к базовому QCD-расчёту.

При больших передаваемых импульсах такие поправки усиливаются за счёт Судаковских логарифмов:

$$\sim \log^2\left(\frac{Q^2}{M_W^2}\right) \quad (4)$$

Где:

\log^2 — квадрат натурального логарифма

Q^2 — переданный импульс в процессе (характерная энергия рассеяния в квадрате).

M_W — масса W -бозона

В результате чего поправки порядка α становятся сравнимыми по величине с поправками порядка α^2 ,

Интерференция сильных и слабых амплитуд может приводить к наблюдаемым эффектам нарушения чётности в распределении конечных частиц — например, к однопучковым асимметриям или поляризациям.

При расширении Стандартной модели за счёт новых взаимодействий изменяется структура амплитуд и сечений в протон-протонных столкновениях. В рамках эффективной теории поля (SMEFT) это реализуется через добавление операторов размерности 6, масштабированных на $1/\Lambda^2$. Такие операторы вносят контактные взаимодействия, модифицируя стандартные вершины и усиливаясь при больших Q^2 , аналогично электрослабым логарифмическим поправкам. Их вклад может быть как

интерференционным (линейным), так и независимым (квадратичным), влияя на форму дифференциальных сечений и угловые распределения [8].

Другим типом BSM-вкладов являются тяжёлые нейтральные бозоны Z' , которые вводят новые s-канальные амплитуды. При достижимой массе они дают резонанс в спектре инвариантной массы, при недостижимой — влияют через интерференцию с Z/γ^* , изменяя хвосты распределений и асимметрии.

Дополнительные слабые токи, такие как W_R в лево-правых моделях, взаимодействуют с правыми фермионами и вносят новые каналы, а также асимметрии в распадах. Их вклад, как и других BSM-эффектов, усиливается при высоких энергиях, влияя на форму и структуру сечения даже в адронных финальных состояниях.

Вклады слабых и нестандартных взаимодействий могут проявляться через асимметрии, отклонения в распределениях и появление новых каналов. Низкоэнергетические эксперименты, такие как PANDA и NICA, не имеют доступа к прямому рождению тяжёлых бозонов, однако чувствительны к П-нарушающим и спин-зависимым эффектам. PANDA позволяет исследовать поляризацию гиперонов и точные спектры распадов, а поляризованные столкновения в NICA могут выявлять изоспиновые и правотоковые вклады.

На LHC, благодаря высокой энергии, возможно прямое рождение W/Z и потенциальных BSM-резонансов. Измерения, такие как вперед-назад асимметрия в канале Даррел-Яна, уже используются для установления ограничений на массу гипотетического Z' . Сравнение распределений по инвариантной массе и углу с предсказаниями SM позволяет выявлять даже малые отклонения.

Полученные результаты моделирования подтверждают, что слабое взаимодействие, несмотря на подавленность по сравнению с сильным, вносит измеримый вклад в амплитуды и сечения pp-процессов, особенно в специфических кинематических областях. Интерференционные эффекты, возникающие между электрослабыми и сильными диаграммами, приводят к

чётким наблюдаемым асимметриям, особенно в поляризованных и дифференциальных распределениях.

Добавление обобщённых членов лагранжиана — таких как операторы SMEFT, правые токи и Z' -обмен — приводит к характерным модификациям спектров, угловым сдвигам и нарушениям стандартных симметрий. Эти эффекты усиливаются в хвостах распределений, что позволяет использовать их как чувствительные индикаторы отклонений от Стандартной модели.

Проверка предсказаний расширенной модели возможна на ряде современных и перспективных установок, охватывающих широкий диапазон энергий. На Большом адронном коллайдере (БАК) реализуются условия для прямого рождения W/Z -бозонов и потенциальных новых частиц, с возможностью точного измерения дифференциальных сечений и асимметрий. Особенно чувствительны каналы Даррел-Яна, в которых фиксируются отклонения от Стандартной модели при высоких инвариантных массах и больших Q^2 .

Установка NICA ориентирована на спиновые и изоспиновые эффекты в столкновениях поляризованных протонов и лёгких ядер при промежуточных энергиях. Здесь возможно выявление слабых и BSM-вкладов через нарушения зеркальной и CP-симметрий, асимметрии в распределениях, а также спин-зависимые поправки к структурам нуклонов.

Комплекс PANDA, действующий на более низких энергиях в антипр-р-режиме, позволяет исследовать тонкие эффекты слабого взаимодействия в адронных системах — например, поляризацию гиперонов и редкие распады. Хотя прямое рождение W/Z невозможно, такие данные могут косвенно ограничивать расширенные параметры за счёт высокой точности.

Параметры слабого изоспина — в частности, левая и правая компоненты фермионных токов, — играют ключевую роль в описании структуры слабого взаимодействия. Их уточнение имеет как фундаментальное, так и прикладное значение: от проверки точности Стандартной модели до поиска новых взаимодействий [6].

Современные эксперименты уже обеспечили высокоточную калибровку левых изоспиновых компонент, например, через параметры Вайнберга и слабое смешивание, однако правые токи и возможные отклонения в лептонных и кварковых секторах остаются менее исследованными. Особенно перспективны измерения асимметрий (вперёд–назад, зарядовых, спиновых) в процессах типа Даррел-Яна или поляризованных pp -столкновений.

Ожидается, что эксперименты на LHC, NICA и будущих установках типа FCC или ILC смогут уточнить параметры слабого изоспина с точностью, превышающей текущие пределы, а также выявить возможные BSM-искажения (например, через сдвиги в угловых распределениях или нарушения универсальности по поколениям).

Дополнительные теоретические исследования, в том числе с использованием SMEFT или моделей с правыми токами, позволят более точно связать наблюдаемые эффекты с фундаментальными параметрами. Таким образом, дальнейшее уточнение структуры слабого изоспина представляет собой важную и достижимую цель в рамках развития экспериментальной и феноменологической физики элементарных частиц.

В данной работе был проведён качественный анализ вклада слабого взаимодействия и его расширений за пределами Стандартной модели в низкоэнергетические протон-протонные столкновения. Несмотря на доминирование сильного взаимодействия в рассматриваемом энергетическом диапазоне, слабые токи вносят значимые поправки в амплитуды и сечения реакций, особенно при учёте электрослабых петлевых эффектов и интерференции. Эти вклады становятся особенно важными при высоких переданных импульсах, где они усиливаются логарифмически и могут достигать уровня сильных поправок.

Рассмотрены расширения лагранжиана, включая операторы SMEFT, Z' -модели и правые слабые токи, которые могут изменять форму распределений, нарушать симметрии и вводить новые каналы взаимодействия. Были

обобщены подходы к моделированию и численной оценке этих эффектов, с использованием современных инструментов, таких как MadGraph и FeynRules.

Сравнительный анализ потенциала установок PANDA, NICA и LHC позволил выделить экспериментальные направления, в которых проявление слабых и BSM-вкладов наиболее вероятно. В частности, PANDA и NICA чувствительны к тонким асимметриям и нарушениям CP-инвариантности, в то время как LHC способен напрямую регистрировать тяжелые бозоны и высокоэнергетические аномалии.

Полученные результаты демонстрируют важность учёта слабых и сверхновых эффектов при моделировании pp-процессов даже в низкоэнергетической области. Они также подчёркивают перспективы дальнейшего уточнения параметров слабого изоспина и фундаментальных констант электрослабого взаимодействия.

Список литературы

1. Weinberg S. Baryon- and lepton-nonconserving processes // Physical Review D. — 1979. — Vol. 19, No. 5. — P. 1277–1280.
2. Ellis J., Gaillard M. K., Nanopoulos D. V. A phenomenological profile of the Higgs boson // Nuclear Physics B. — 1976. — Vol. 106. — P. 292–340.
3. Коваленко В. Н. Моделирование эксклюзивных партонных распределений и дальних быструх корреляций в pp-столкновениях при энергиях БАК // Ядерн. физика. 2013. Т. 76, № 10. С. 1251–1257.
4. Gunion J. F., Haber H. E., Kane G. L., Dawson S. The Higgs Hunter's Guide. — Redwood City: Addison-Wesley, 1989. — 425 p.
5. Weinberg S. A model of leptons // Physical Review Letters. — 1967. — Vol. 19, No. 21. — P. 1264–1266.
6. 't Hooft G., Veltman M. Regularization and renormalization of gauge fields // Nuclear Physics B. — 1972. — Vol. 44, No. 1. — P. 189–213.

7. Kobayashi M., Maskawa T. CP-Violation in the Renormalizable Theory of Weak Interaction // Progress of Theoretical Physics. — 1973. — Vol. 49, No. 2. — P. 652–657.
8. Hasert F. J. et al. Observation of neutrino-like interactions without muon or electron in the Gargamelle neutrino experiment // Physics Letters B. — 1973. — Vol. 46, No. 2. — P. 121–124, 138–140.
9. Abe F. et al. (CDF Collaboration). Observation of top quark production in $\bar{p}p$ collisions with the Collider Detector at Fermilab // Physical Review D. — 1994. — Vol. 50, No. 5. — P. 2966–3026.
10. Aubert B. et al. (BaBar Collaboration). Measurement of CP-violating asymmetries in B^0 decays to CP eigenstates // arXiv preprint hep-ex/0207042. — 2002. — 34 p. URL: <https://arxiv.org/abs/hep-ex/0207042>
11. Barate R. et al. (ALEPH Collaboration). Search for the standard model Higgs boson at LEP // Physics Letters B. — 2003. — Vol. 565, No. 1–4. — P. 61–75.
12. Brivio I., Trott M. The Standard Model as an Effective Field Theory // Physics Reports. — 2019. — Vol. 793. — P. 1–98. DOI: 10.1016/j.physrep.2018.11.002
13. Cirigliano V., Dekens W., de Vries J., Mereghetti E. New physics searches in nuclear and neutron β decay // Progress in Particle and Nuclear Physics. — 2020. — Vol. 112. — P. 103771. DOI: 10.1016/j.pnpnp.2020.103771