

Рецензія

провідного наукового співробітника відділу електродинаміки
високих енергій у речовині ННЦ «Харківський фізико-технічний інститут»

НАН України, доктора фізико-математичних наук,

старшого наукового співробітника

Бондаренка Миколи Вікторовича

на дисертаційну роботу **Трутня Івана Валентиновича**

«Поляризаційні ефекти в утворенні важких кварків при високих енергіях»,

подану на здобуття ступеня доктора філософії за

спеціальністю 104 – «Фізика та астрономія»

з галузі знань 10 – «Природничі науки»

Розвиток фізики елементарних частинок на початку ХХІ сторіччя значною мірою визначається відкриттям бозона Хіггса та експериментальним виміром його маси, вимагаючи істотного перегляду попереднього теоретичного аналізу процесів за його участю. Пошуки проявів фізики поза Стандартною моделлю (т.зв. «нової фізики») теж активно тривають, але зустрічаються з чималими експериментальними труднощами за умов досягнутої високої енергії та великої кількості народжуваних частинок в одному жорсткому зіткненні.

Найменш дослідженими експериментально та найбільш перспективними для виявлення ознак нової фізики є найважчі елементарні частинки – бозон Хіггса та топ-кварк. Оскільки ці частинки дуже швидко розпадаються, з одного боку, їх властивості не затьмарюються ефектами адронізації, точного опису котрих донині не існує. З іншого боку, експериментально непросто розпізнавати первинні розпади в подіях, коли в кінцевих станах утворюється не лише багато частинок, а й багато їх струменів.

В дисертації представлено аналіз сигнатур нової фізики в розпадах пар t -кварків, утворених в електрон-позитронній анігіляції. Зокрема, ці сигнатури досліджуються в односпінових асиметріях кінцевих станів t -кварків. Цей процес теоретично досліджувався ще з 1980-х років (до відкриття топ-кварка), тож для нього існує вельми солідна література. Представлена дисертація зосереджується на чисельних передбаченнях,

зроблених для енергії майбутнього електрон-позитронного колайдера CLIC. Розрахунки в дисертації також враховують обмін бозоном Хіггса між народженими t -кварками, або між одним з t -кварків та віртуальним Z -бозоном.

Дисертація складається зі Вступу та чотирьох розділів основної частини.

В **Розділі 1** наведено огляд властивостей топ-кварка і його народження на LHC. Після цього сформульовано лагранжіан розширеної Стандартної Моделі, який містить додаткові оператори вищої розмірності. Для класифікації останніх приймається «варшавський» базис. В результаті проведеного розширення, після додавання в лагранжіан (1.4) членів з розмірною константою зв'язку $1/\Lambda^2$ теорія поля стає неперенормованою, але розглядається як ефективна.

На завершення розділу, приводиться огляд параметрів колайдера CLIC. Щоб перехід від адронародження до лептонародження не був раптовим, і з огляду на те, що нова фізика очікується саме в розпадах, а не у вершинах eeV чи qqV , де $V=\gamma, Z$, було б доречним пояснити, чи можна здійснювати пошуки тієї ж «нової фізики» вже на HL LHC, де статистика може бути більшою, ніж на CLIC? Тоді, вочевидь, в початковому стані потрібно згортати переріз з партонними функціями розподілу, але у поляризаційних характеристиках вони можуть значною мірою скоротитися. В адронародженні також можна утворювати одиночні t -кварки (у парі із b), розпади яких може бути простіше досліджувати експериментально.

В **Розділі 2** формально розглядається народження пари t і анти- t кварків як реальних частинок в анігіляції неполяризованих електрона та позитрона. Хоча топ-кварки не спостерігаються безпосередньо, навіть як окремі струмені, цей розрахований відносно простий переріз знадобиться в Розд. 4, де буде пов'язаний з перерізом народження $b\bar{b}W^+W^-$, ближчим до експериментального спостереження.

Важливим технічним аспектом в даній задачі є вибір способу опису поляризації. В низці піонерських робіт використовувався базис спіральностей. Але поблизу порогу народження пари топ-кварків, коли ці кварки є нерелятивістськими, спіральності не є фізично виділеними. В дисертації автор дотримується опису за допомогою 3-вектора, що характеризує напрямок та середню величину поляризації кварка в його

системі спокою, і також зазвичай простим чином пов'язаний з експериментальними асиметріями у його розпадах.

Для наочного графічного аналізу залежностей від κ та κ_z запропоновано усереднювати компоненти поляризації за кутом розсіяння.

Як впливає з Рис. 2.3, залежність поляризації народжених топ-кварків від значень аномальних магнітних моментів κ , κ_z є доволі сильною, коли вони мають величини порядку одиниці.

В дисертації також відзначається, що завдяки γ - Z інтерференції виникає компонента поляризації, перпендикулярна до площини реакції. Це узгоджується з передбаченнями

J. H. Kuhn, A. Reiter, and P. M. Zerwas, Nucl. Phys. B**272** (1986) 560,

[80] T. Arens and L. M. Seghal, Nucl. Phys. B**393** (1993) 46.

Але перпендикулярна компонента доволі мала і для пошуку відхилень від СМ здається придатною менше за інші.

Технічне питання: Чи не можна при енергії CLIC, в межах очікуваної точності вимірювання поляризаційних характеристик $\sim 10\%$, знехтувати квадратом маси Z бозона $(91 \text{ Гев})^2$, а тим більше шириною його розпаду, порівняно з квадратом його енергії $s=(380 \text{ Гев})^2$? Тоді амплітуда залежала б від меншого числа параметрів кварк-бозонної взаємодії, а розрахунок перерізу спростився б.

В **Розділі 3** розраховано кутові та енергетичні розподіли боттом-кварків у процесі $e^+e^- \rightarrow bW^+\bar{t}$ і досліджено їх чутливість до поляризаційних станів топ-кварка. Знайдено, що при енергії $\sqrt{s} = 380 \text{ Гев}$ кутові розподіли є чутливішими до поляризації, ніж енергетичні. Останній результат видається достатньо природнім: оскільки при енергії CLIC обидва народжені t -кварки з енергіями 190 Гев (при масі 173 Гев) є нерелятивістськими, кутова асиметрія в лабораторній системі схожа на ту, що була б в системі спокою кожного з кварків.

В **Розділі 4** досліджується ще детальніший процес $e^+e^- \rightarrow t\bar{t} \rightarrow b\bar{b}W^+W^-$, де вважається, що боттом-кварк і антиботтом-кварк утворюються з розпадів топ-кварка і антикварка на масовій оболонці. Потім b -кварки та кварки, на які розпадаються W -бозони (за умов адронних розпадів, у яких немає нейтрино) утворюють окремі струмені, тож всього струменів може бути 6.

Окрім цього, демонструється механізм генерації електричного дипольного моменту та слабкого електричного дипольного моменту на за рахунок внесків однопетльових діаграм з обміном бозоном Хіггса. Тут враховується можливе порушення CP-парності у вершині Htt , попередньо розглянуте у роботі

[110] A. Y. Korchin and V. A. Kovalchuk, Phys. Rev. D **88** (2013) 036009.

Таке порушення має означати, що у бозона Хіггса немає певної парності, хоча є доволі певна маса.

Дане цікаве питання було б варто детальніше освітити в дисертації. Після введення явного порушення CP-парності у вершині Htt , і заміни поля H його вакуумним середнім, як виглядає рівняння руху вільного топ-кварка? Чи залишається його маса дійсною і рівною експериментально виміряній, чи ж у неї з'являється уявна частина, можливо, пов'язана із шириною розпаду t -кварка? І чи не потрібно тоді вводити ширину бозона Хіггса в рівнянні його руху? Питання опису нестабільних елементарних частинок в літературі обговорювалися давно, замість групи Пуанкаре пропонувалося використовувати напівгрупу, але топ-кварк та бозон Хіггса можуть дати найбільш яскраві фізичні приклади.

Внески трикутних діаграм Фейнмана з віртуальним бозоном Хіггса обчислюються за методом унітарності. Відповідні інтеграли можна було б взяти у замкненому вигляді й виразити через логарифми, але це не було метою в даній роботі, орієнтованій на експеримент, і результати в ній отримувалися чисельно й відразу представлялися графічно.

Щоб виділити й підсилити ефекти «нової фізики», запропоновано вимірювати спільний енергетичний розподіл двох народжених боттом-кварків $d^2\sigma/dE_b dE_{\bar{b}}$. Він описується на основі підходу, розвинутому в

[84] T. Arens and L. M. Seghal, Phys. Rev. D **50** (1994) 4372.

Незважаючи на те, що утворені топ-кварки є нерелятивістськими, розкид енергій боттом-кварків, на які вони розпадаються, виявляється значним. Проілюстровано енергетичні асиметрії b та $\bar{b}$ -кварків для різних значень скалярного та псевдоскалярного параметрів зв'язку Htt .

Стосовно тексту дисертації можна зробити декілька зауважень:

- В Розд. 1 з фізичного погляду відзначається, що параметр «нової фізики» $\tilde{\kappa}$ пов'язаний з електричним дипольним моментом топ-кварка. Доречно було б також явно продемонструвати, як саме.
- Не пояснено, з яких фізичних міркувань фотонний та Z -бозонний формфактори топ-кварка виражаються формулою (2.23).
- В Розд. 3 зроблено нетривіальний висновок, що при збільшенні енергії, асиметрії можуть проходити через максимум. Чи можна простим чином пояснити, що саме призводить до такого ефекту, і чи залежить він від знаків параметрів аномальних взаємодій?
- В Рівн. нижче (4.6) у лівій частині диференціал, а у правій – ні. Для позначення диференціальних (парціальних) ширин розпадів замість диференціалу $d\Gamma$ могло б бути зрозуміліше використати $\Delta\Gamma$ або додатковий індекс біля Γ .
- В Рівн. (4.10) замість κ має бути κ_z .

Для завершення даних досліджень і підвищення чутливості до параметрів «нової фізики» та порушення СР-інваріантності, на мою думку, було б також варто дослідити аналогічні процеси з поляризованими електронами і позитронами. Також заслуговує на увагу той аспект, що у процесах жорсткого народження кварків можуть додатково виникати глюонні струмені. Чи не зможе їх наявність імітувати асиметрії кваркових струменів, і таким чином ефектів «нової фізики»?

Проте, зроблені зауваження жодним чином не знижують значення здобутих результатів.

В цілому, дисертація є послідовною, містить пристойний список посилань. Результати дисертації опубліковані у трьох статтях в фахових міжнародних журналах квартілів Q1, Q2, багаторазово доповідалися на конференціях. Публікації здобувача повністю відповідають вимогам до присудження наукового ступеня доктора філософії.

Аналіз дисертаційної роботи та публікацій автора не виявив порушень академічної доброчесності, плагіату. Фабрикації чи фальсифікації відсутні. Самостійність автора у виконанні дослідження та написанні дисертації не викликає сумнівів. Дисертант проявив професіоналізм у фізиці елементарних частинок, обізнаність щодо літератури, працездатність.

Відтак, на мою думку, дисертація «Поляризаційні ефекти в утворенні важких кварків при високих енергіях» є завершеною науковою працею, яка містить нові теоретичні результати. Робота Трутня Івана Валентиновича відповідає вимогам «Порядку присудження ступеня доктора філософії та скасування рішення разової спеціалізованої вченої ради закладу вищої освіти, наукової установи про присудження ступеня доктора філософії», затвердженого Постановою Кабінету Міністрів України від 12 січня 2022 року №44, а її автор беззаперечно заслуговує на присудження йому ступеня доктора філософії за спеціальністю 104 – «Фізика та астрономія» з галузі знань 10 – «Природничі науки».

Офіційний рецензент:
провідний науковий співробітник
відділу електродинаміки
високих енергій у речовині
ІНЦ ХФТІ НАН України,
доктор фізико-математичних наук,
старший науковий співробітник

Бондаренко М.В.

ПРОТОКОЛ
створення та перевірки кваліфікованого та удосконаленого електронного підпису

Дата та час: 19:55:34 09.11.2024

Назва файлу з підписом: Рецензія_Бондаренко_MB.pdf.asice
Розмір файлу з підписом: 131.2 КБ

Перевірені файли:

Назва файлу без підпису: Рецензія_Бондаренко_MB.pdf
Розмір файлу без підпису: 130.6 КБ

Результат перевірки підпису: Підпис створено та перевірено успішно. Цілісність даних підтверджено

Підписувач: БОНДАРЕНКО МИКОЛА ВІКТОРОВИЧ

П.І.Б.: БОНДАРЕНКО МИКОЛА ВІКТОРОВИЧ

Країна: Україна

РНОКПП: 2784307354

Організація (установа): ФІЗИЧНА ОСОБА

Час підпису (підтверджено кваліфікованою позначкою часу для підпису від Надавача): 19:55:34 09.11.2024

Сертифікат виданий: КНЕДП АЦСК АТ КБ "ПРИВАТБАНК"

Серійний номер: 5E984D526F82F38F04000000E69D2001F1DB7F05

Алгоритм підпису: ДСТУ 4145

Тип підпису: Удосконалений

Тип контейнера: Підпис та дані в архіві (розширений) (ASiC-E)

Формат підпису: З повними даними для перевірки (XAdES-B-LT)

Сертифікат: Кваліфікований

Версія від: 2024.10.24 15:00