

офіційного опонента на дисертаційну роботу **Гоготи Ольги Петрівни «Народження с та b кварків в  $p\bar{p}$  зіткненнях на колайдері Tevatron при  $E_{\text{цм}}=1.96$  TeV»**, що подана на здобуття наукового ступеня кандидата фізико-математичних наук за спеціальністю 01.04.16 – фізика ядра, елементарних частинок і високих енергій.

Дисертаційна робота присвячена вивченню механізмів утворення дослідженню процесів за участю с та b кварків у зіткненнях протонів із антипротонами на прискорювачі Теватрон у Лабораторії імені Фермі (м. Баталія, США). Це дослідження включало в себе спостереження утворення W-бозонів одночасно зі струменями кварків, та спостереження одночасного народження відповідних двох кварк-антикваркових систем. Такі експерименти дозволяють краще розуміти структуру протона, партонний склад протона, механізми утворення кварк-антикваркових систем, та перевірити сучасні теоретичні підходи у фізиці частинок – квантову хромодинаміку і Стандартну модель.

Всі ці аспекти є дуже важливою частиною досліджень у сучасній фізиці високих енергій, вони доповнюють інформацію, що надходить з Великого адронного колайдера (LHC) у ЦЕРН. Тема дисертаційної роботи є безумовно актуальною.

Дисертація складається зі вступу, чотирьох розділів основного тексту, висновків, списку використаних джерел та двох додатків. Повний обсяг роботи – 133 сторінки. Структура роботи логічно відповідає темі дослідження.

У **вступі** автором обґрунтовується актуальність теми, формулюється мета і завдання дослідження, вказана наукова новизна здобутих результатів, їх наукове і практичне значення, особистий вклад дисертанта, дана інформація про апробацію дисертації і публікації, та обговорюється структура дисертації.

В **першому розділі** автор дає огляд сучасної теорії сильної взаємодії — квантової хромодинаміки, теорії збурень та непертурбативні методи, які використовуються при інтерпретації проведених експериментів. Описуються методи опису структури протона, кварк-партонна модель, функції розподілу партонів, ефекти мультіпартонної взаємодії та історія відкриття і властивості с (“charm”) та b (“bottom”) кварків.

В **другому розділі** розглянуто багатоцільову детекторну систему “D0” на колайдері Теватрон у Національній прискорювальній лабораторії імені Фермі (США), де проводилися експерименти. Крім того, дано короткий опис експериментальної установки ZEUS на електрон-протонному колайдері HERA (Гамбург, Німеччина), де було виконано частину роботи. Детально обговорюються генератори випадкових подій у методі Монте-Карло, які використовуються автором для оцінки ефективності та акцептанса детектора.

В **третьому розділі** містяться результати вимірювань диференціальних перерізів утворення W-бозонів та адронних струменів від с та b кварків в мюонному каналі розпаду  $W \rightarrow \mu\nu_\mu$ . Перерізи знайдені як функції поперечного імпульсу струменів. Проведено порівняння даних експериментів із теоретичними розрахунками у КХД у другому порядку



по сталій сильної взаємодії  $\alpha_s$ , та двох Монте-Карло генераторів SHERPA і ALPGEN (+PYTHIA).

**В четвертому розділі** автор викладає результати вимірювання перерізів народження кварконіїв та визначенню параметра, що характеризує розсіювання двох пар партонів, - ефективного перерізу. Проаналізовано процеси „прямого” народження  $J/\psi$  мезонів, та їх „непрямого” утворення за рахунок розпадів  $B$  мезонів. Виміряні перерізи народження одиночних  $J/\psi$  мезонів. Найбільш важливі і оригінальні результати цього розділу – це визначення перерізів одночасного народження двох  $J/\psi$  мезонів та одночасного народження  $J/\psi$  мезона і  $Y$  мезона, тому що ці процеси безпосередньо пов’язані з двохпартонним розсіюванням у протон-антипротонних зіткненнях. Це дозволило автору визначити так звані ефективні перерізи  $\sigma_{\text{eff}}$  для утворення систем  $J/\psi + J/\psi$ , та  $J/\psi + Y$ , та порівняти їх значення з результатами, одержаними колабораціями CDF (Теватрон), ATLAS, CMS і LHCb (ЦЕРН).

**У Висновках** наведені головні наукові результати, здобуті у дисертації.

**У Додатках** містяться деталі аналізу експериментальних даних та деякі рисунки з експериментальними розподілами.

**Апробація дисертації.** Основні положення і висновки дисертації повністю відображені у сімох публікаціях у авторитетних фахових журналах Physics Letters, Physical Review D, Journal of High Energy Physics та Physical Review Letters. Дисертант особисто доповідала результати дисертації на багатьох міжнародних школах, нарадах та конференціях.

**Новизна здобутих результатів** полягає в наступному:

1. Вперше в експерименті D0 на Беватроні для повної статистики Run IIb було виміряно в протон-антипротонних зіткненнях диференціальні перерізи народження  $W$ -бозона та асоційованих адронних струменів з  $c$  та  $b$  кварків в мюонному каналі розпаду  $W \rightarrow \mu\nu_\mu$ , як функції поперечного імпульса адронного струменя  $p_T$ .
2. Вперше в протон-антипротонних зіткненнях виміряно окремо перерізи народження в однопартонній та двохпартонній взаємодіях пари  $J/\psi$  мезонів в кінематичній області з  $p^{J/\psi} > 4$  GeV,  $|\eta_{J/\psi}| < 2.0$ :

$$\sigma_{\text{DP},J/\psi J/\psi} = 59 \pm 6_{\text{stat}} \pm 22_{\text{syst}} \text{ фб}, \quad \sigma_{\text{SP},J/\psi J/\psi} = 70 \pm 6_{\text{stat}} \pm 22_{\text{syst}} \text{ фб}.$$

3. Виміряно поперечний переріз народження одиночних  $J/\psi$  мезонів:

$$\sigma_{J/\psi} = 23.9 \pm 4.6_{\text{stat}} \pm 3.7_{\text{syst}} \text{ нб}.$$

4. Вперше в  $p\bar{p}$  зіткненнях спостережено одночасне народження  $J/\psi + Y$  мезонів, що є прямим доказом мультипартонної природи досліджуваного процесу:

$$\sigma_{\text{DP},J/\psi Y} = 27 \pm 9_{\text{stat}} \pm 7_{\text{syst}} \text{ фб}.$$

5. Вперше на Теватроні виміряно параметр  $\sigma_{\text{eff}}$ , важливий для характеристики просторового розподілу партонів в протоні, для подій з народженням пари  $J/\psi$  мезонів

$$\sigma_{\text{eff},J/\psi J/\psi} = 4.8 \pm 0.5_{\text{stat}} \pm 2.5_{\text{syst}} \text{ мб},$$

і в процесах з одночасним народженням  $Y$  та  $J/\psi$  мезонів

$$\sigma_{\text{eff},J/\psi Y} = 2.2 \pm 0.7_{\text{stat}} \pm 0.9_{\text{syst}} \text{ мб}.$$

6. Особисто здобувачом розроблено програмні засоби для розрізнення процесів одно-



та двохпартонного розсіювання в подіях із спостереженням пар кварконіїв. Визначено коефіцієнти для корекції енергії адронних струменів, які використовуються усією колаборацією D0.

**Практична значимість** результатів дисертації пов'язана з тим, що здобуті результати є помітним внеском у сучасні дослідження структури протона, розподілів кварків і глюонів. Вони доповнюють результати Великого адронного коллайдера (ЛНС) у ЦЕРН.

**Особистий внесок здобувача.** Автор є членом колаборації D0 в лабораторії Фермілаб (США) з 2011 року. Вона безпосередньо приймала участь в експериментах під час вимірів на пучку, у робочих змінах і була відповідальною за калориметричну і мюонну підсистему детекторної установки, а також за калібровку калориметричної системи. Автор приймала участь у розрахунках корекції енергії адронних струменів, і на всіх етапах проведення експерименту, включаючи обробку даних та пряму участь у підготовці публікацій. Усі представлені в роботі результати одержані за її безпосередньою участю. Автором особисто здійснювався аналіз даних по народженню  $c$  і  $b$  кварків у  $p\bar{p}$  - зіткненнях, для чого розроблено різні програмні коди для відбору подій, для знаходження похибок даних, проведено Монте-Карло моделювання і інше. Не має сумнівів, що внесок автора в результати, представлені в дисертації, є домінуючим.

**Достовірність і обґрунтованість результатів дисертації** обумовлена високим рівнем досліджень, що проводяться на прискорювачі Теватрон (США) і у відомій колаборації D0, де автор працювала. В роботі використовувались апробовані методи обробки експериментів новітнім програмним забезпеченням, відпрацьовані методики вимірювання детекторами, результати роботи порівнюються з сучасною теорією – Стандартною моделлю та квантовою хромодинамікою.

#### **У мене є декілька зауважень до дисертації.**

1. На стор. 108 у Висновках написано, що *«Було виміряно поперечний переріз народження одиночних  $J/\psi$  мезонів, що дало змогу визначити параметр, який характеризує відстань між партонами всередині адронів»*. По-перше, в дисертації цей параметр ніде не обговорюється і було б важливим навести його значення, а по-друге, число партонів (зокрема, морських кварків і глюонів) у протоні є безкінечним і тому відстань між партонами у протоні не є добре визначеною величиною.

2. У розділі 4.6 проаналізовано ефективні перерізи, знайдені із експериментів з народження двох кварконіїв,  $J/\psi + J/\psi$ , та  $J/\psi + \Upsilon$ :  $\sigma_{\text{eff}, J/\psi J/\psi} = 4.8 \pm 0.5_{\text{stat}} \pm 2.5_{\text{syst}}$ ,  $\sigma_{\text{eff}, J/\psi \Upsilon} = 2.2 \pm 0.7_{\text{stat}} \pm 0.9_{\text{syst}}$  мб. Для інтерпретації автор наводить оцінку:  $\sigma_{\text{eff}} = \pi R_p^2 \approx 50$  мб. Але ця оцінка не є достатньо коректною, бо використовуючи експериментально визначений радіус протона  $R_p = 0,84$  фм ми знаходимо  $\sigma_{\text{eff}} = \pi R_p^2 \approx 22$  мб. Остання оцінка є близькою до перерізів, які виміряні у ЦЕРН колабораціями LHCb, CMS, ATLAS, але майже в десять разів перевищує значення, одержані у дисертації. Автор посилається на статтю [107], але аргументи не надто переконливі, оскільки  $\sigma_{\text{eff}}$  – це ефективна площа перекриття двох адронів, яка не повинна залежати від типу партонів всередині адронів та типу реакції. Було б доцільно більш детальне обговорення цієї характеристики структури протона.



3. Термінологічні зауваження. Процеси на малих відстанях (великих енергіях) називаються „жорсткими”, а не „важкими” (на стор. 31). На стор. 97 потрібно писати „псевдо-дифракційного”, а не „псевдо-дифрактивного”. На стор. 69 написано: «деякі частинки (*c* і *b*- кварки) є досить легкі, щоб існувати як розповсюджувачі ступенів свободи, але досить важкі, що ми можемо інтегрувати народження пари кварк-антикварку». Що мається на увазі під «інтегрувати»? Можливо «ігнорувати»?

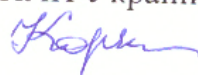
Незважаючи на зауваження я вважаю, що ці недоліки не знижують загальну дуже позитивну оцінку дисертації Гоготи О.П. та не впливають на достовірність і значимість одержаних автором результатів.

Матеріал у дисертації викладено послідовно і акуратно роз’яснений, ілюстрований багатьма рисунками. У кожному розділі є висновки. Автореферат повністю відповідає змісту і основним положенням дисертації.

На мій погляд дисертаційна робота Гоготи Ольги Петрівни є закінченою науково-дослідною роботою. Здобуті в дисертації результати є важливими для подальшого розвитку експериментальних і теоретичних досліджень в фізиці високих енергій, зокрема, структури протона і механізмів утворення кварк-антикваркових систем та багатопартонних взаємодій. Результати можуть бути використані в дослідженнях, які виконуються в ННЦ “Харківський фізико-технічний інститут” НАН України, Інституті ядерних досліджень НАН України (м. Київ), Науковому Центрі DESY (м. Гамбург, Німеччина), на прискорювачі LHC у ЦЕРН (Женева, Швейцарія) і інших.

Таким чином, на підставі актуальності теми дисертації, обґрунтованості її наукових положень і висновків, новизні здобутих результатів, я вважаю, що дисертаційна робота «Народження *c* та *b* кварків в  $p\bar{p}$  зіткненнях на колайдері Tevatron при  $E_{\text{cm}}=1.96$  TeV» задовольняє вимогам Атестаційної колегії МОН України до кандидатських дисертацій і „Порядку присудження наукових ступенів і присвоєння вченого звання старшого наукового співробітника”, затвердженого постановою Кабінету Міністрів України від 24.07.2013 № 567, а її автор, Гогота Ольга Петрівна, заслуговує присудження наукового ступеня кандидата фізико-математичних наук за спеціальністю 01.04.16 – фізика ядра, елементарних частинок і високих енергій.

Завідувач відділу “Квантово-електродинамічних явищ і електродинаміки адронів”  
Інституту теоретичної фізики імені О.І. Ахієзера  
ННЦ „Харківський фізико-технічний інститут” НАН України  
доктор фізико-математичних наук



О.Ю. Корчин

Підпис О.Ю. Корчина засвідчую  
Вчений секретар ННЦ „Харківський фізико-технічний інститут”  
НАН України



О.В. Волобуєв