

**НАЦІОНАЛЬНА АКАДЕМІЯ НАУК УКРАЇНИ
ІНСТИТУТ ТЕОРЕТИЧНОЇ ФІЗИКИ ІМ. М.М. БОГОЛЮБОВА**

АЛЬКІН Антон Олегович

УДК 537.311; 530.199

**ФЕНОМЕНОЛОГІЯ МНОЖИННОГО НАРОДЖЕННЯ
ЗАРЯДЖЕНИХ ЧАСТИНОК У ВИСОКОЕНЕРГЕТИЧНІЙ
ВЗАЄМОДІЇ ПРОТОНІВ**

01.04.02 — теоретична фізика

Автореферат
дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата фізико-математичних наук

Київ — 2018

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана в Інституті теоретичної фізики ім. М.М. Боголюбова НАН України.

Науковий керівник: доктор фізико-математичних наук, старший науковий співробітник
Мартинів Євген Сергійович,
Інститут теоретичної фізики ім. М.М. Боголюбова НАН України, зав. лабораторією.

Науковий консультант: Ph.D., professor
Jean-Pierre Revol,
CERN, associated researcher.

Офіційні опоненти: доктор фізико-математичних наук, професор
Рєбенко Олексій Лукич,
Інститут математики НАН України, головний науковий співробітник;

доктор фізико-математичних наук, професор
Каденко Ігор Миколайович,
Київський національний університет імені Тараса Шевченка, зав. кафедрою ядерної фізики.

Захист відбудеться «___» _____ 2018 р. об ___ годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 26.191.01 Інституту теоретичної фізики ім. М.М. Боголюбова НАН України за адресою: 03143 м. Київ, вул. Метрологічна, 14б.

З дисертацією можна ознайомитись у бібліотеці Інституту теоретичної фізики ім. М.М. Боголюбова НАН України.

Автореферат розісланий «___» _____ 2018 р.

Вчений секретар
спеціалізованої вченої ради Д 26.191.01,
доктор фізико-математичних наук

Кузьмичев В. Є.

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. На даний час доступна величезна кількість експериментальних даних із фундаментальних загальних фізичних спостережуваних величин у взаємодії адронів, зокрема протонів з протонами, мезонів з протонами, протонів з іонами та іонів з іонами. На відміну від останніх двох систем, для яких існує клас наочних моделей Глаубера-Ситенка, що пов'язує множинність заряджених частинок, що народилися у акті сильної взаємодії адронів, із геометричними характеристиками взаємодії, для решти не існує простих шляхів співвіднести ці властивості в експерименті. Більш того, сучасні універсальні Монте-Карло генератори подій, що реалізують передній край уявлень про процеси квантової хромодинаміки та адронізації, що відбуваються, не справляються із сукупним описом усіх загальних усереднених характеристик. Досі не існує фундаментальних моделей процесу адронізації. Не має також можливості проводити пертурбативні КХД-розрахунки на великих порядках константи взаємодії, що стосується, наприклад, процесів периферичного народження частинок, таких як одностороння дифракція. Тому феноменологічні міркування є ключовим компонентом алгоритмів, що реалізовано у генераторах подій. Генератори подій, у свою чергу, відіграють надзвичайно важливу роль в експерименті, адже у великому числі випадків тільки вони дозволяють оцінювати ефективності детекторів та проводити корекцію даних. Дуже мала частина сучасних експериментальних результатів у фізиці високих густин енергії, зокрема у колайдерних експериментах, є модельно-незалежною.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Дана дисертаційна робота була виконана у відділі фізики високих густин енергії Інституту теоретичної фізики ім. М. М. Боголюбова Національної академії наук України. Вона є складовою частиною широкого кола досліджень властивостей сильновзаємодіючої речовини в екстремальних умовах (високі температури та густини, високі енергії взаємодії адронів), що проводились в рамках наступних тем:

- 2009–2012: Дослідження сильновзаємодіючої матерії в зіткненнях частинок і ядер при високих енергіях. Номер державної реєстрації – 0107U006889, шифр 1.4.7.
- 2013: Дослідження сильновзаємодіючої матерії та структури адронів в релятивістських зіткненнях адронів та ядер. Номер державної реєстрації – 0113U001092, шифр 1.4.1.

Окрім того, ця робота пов'язана із наступними державними та академічними програмами:

1. «Державна цільова науково-технічна програма впровадження і застосування грид-технологій на 2009—2013 роки», затверджена постановою Кабінету Міністрів України № 1020 від 23.09.2009.
2. Грант №Ф58 на виконання проекту «Дослідження сильновзаємодіючої матерії, що утворюється в зіткненнях адронів та ядер при високих енергіях на прискорювачах ЦЕРН» від державного фонду фундаментальних досліджень України. 2013-2014р.

3. «Впровадження грид-технологій та створення кластерів Національної академії наук України». Затверджено постановою № 249 Президії НАН України від 25.04.2006.
4. Комплексна програма наукових досліджень НАН України «GRID-інфраструктура і GRID-технології для наукових і науково-прикладних застосувань». Затверджено постановою Президії НАН України від 11.12.2013 (№164-а).
5. Цільова програма співробітництва НАУ України з Європейським центром ядерних досліджень (ЦЕРН) та Об'єднаним інститутом ядерних досліджень (ОІЯД) «Перспективні фундаментальні дослідження з фізики високих енергій та ядерної фізики». Розпорядження Президії НАН України від 22.02.2013 №126.

Мета і задачі дослідження. Дослідження присвячене перевірці, аналізу та вдосконаленню загальних феноменологічних моделей взаємодії адронів. Поява великої кількості експериментальних даних з повних та диференціальних перерізів, розподілів множинності та густини заряджених частинок за псевдохуткістю, надає шлях для систематичної та повної перевірки моделей, що здатні відтворити ці величини. Вони є практично єдиним засобом для побудови узгодженої картини взаємодії індивідуальних адронів. Це також дозволяє вдосконалити Монте-Карло методи, необхідні для подальшого збільшення точності колайдерних експериментів. Сукупний опис статистичних розподілів протонної взаємодії дозволяє краще відтворити загальну картину адронної динаміки та визначити шляхи до більш детальних спостережень.

У рамках загальної мети було поставлено наступні задачі.

1. Сконструювати та перевірити лінійні¹ моделі Редже для повних перерізів розсіювання pp , $\bar{p}p$, π^-p та $K^\pm p$ систем на основі наявних до запуску LHC експериментальних даних. Порівняти передбачення цих моделей із експериментальними результатами LHC.
2. На основі наявних експериментальних даних з диференціальних перерізів розсіювання pp та $\bar{p}p$ систем проаналізувати та вдосконалити Редже моделі шляхом застосування схем унітаризації та досягти якісного опису диференціальних перерізів.
3. На основі наявних експериментальних даних з диференціальних перерізів розсіювання pp та $\bar{p}p$ систем побудувати та дослідити залежність амплітуди розсіювання та пов'язаних із нею величин від прицільного параметра.
4. На основі наявних даних з густини заряджених частинок за псевдохуткістю та розподілів множинності заряджених частинок у взаємодії протонів систематизувати та вдосконалити феноменологічні моделі множинного народження адронів.
5. Побудувати феноменологічну модель, що дозволить сукупний одночасний опис розподілів множинності у фінальному стані в різних областях фазового простору частинок.

¹ Тут і далі під лінійними моделями розуміються такі, що мають лінійні траєкторії у комплексній площині кутового моменту та експоненціальні функції лишків

Об'єкт дослідження. Об'єктом дослідження є система взаємодіючих адронів, а саме мезона та протона, протона та протона, чи протона й антипротона; загальні характеристики такої системи у фінальному стані, її фізичні властивості та залежність від характеристик вихідного стану.

Предмет дослідження. Предметом дослідження є загальні та статистичні характеристики системи у фінальному стані, такі як повні й диференціальні перерізи розсіювання, просторова конфігурація заряджених частинок у фінальному стані, а також розподіли ймовірності народження різної кількості заряджених частинок, що є в деякому сенсі мірою непружності у взаємодії адронів.

Методи дослідження. Методи, що використані в роботі включають методи теорії S -матриці, методи теорії комплексних кутових моментів (теорії полюсів Редже), методи Монте-Карло симуляцій та комп'ютерного моделювання, а також загальнопридатні, статистичні, аналітичні й чисельні методи.

Наукова новизна одержаних результатів. В рамках дисертаційної роботи отримано наступні оригінальні наукові результати.

1. Методом дисперсійних співвідношень для амплітуди розсіювання проаналізовано найповніший (на момент публікації) масив даних з повних перерізів розсіювання та відношення реальної до уявної частини амплітуди при $t = 0$ для $h p$ та $\bar{h} p$ систем, в результаті чого досягнуто гарного опису обох величин. Показано, що оддеронний внесок в амплітуди настільки малий при енергіях до 2 TeV та $t = 0$, що ним можна знехтувати. Таким чином можна розглядати однолишкове дисперсійне співвідношення замість дволишкового. Порівнянням екстраполяції із даними з повного перерізу взаємодії протонів при енергії зіткнення $\sqrt{s} = 7$ TeV від колаборації TOTEM на LHC знайдено, що сингулярність типу подвійний полюс у площині комплексного кутового моменту є асимптотично несумісною за даними.
2. Проаналізовано найповніший (на момент публікації) масив даних з диференціальних перерізів pp та $\bar{p}p$ розсіювання, як функції переданого імпульсу. Показано, що лінійні унітаризовані моделі Редже можуть описати наявні дані, якість цього опису є гарною, але потрібно дослідити більш детально, зокрема, відхилення дифракційних конусів від експоненціального спаду.
3. Вперше для нових даних експерименту TOTEM з диференціальних перерізів pp та $\bar{p}p$ систем реконструйовано залежність дійсної та уявної частини амплітуди, а також профілю непружного перекриття від прицільного параметра. Показано, що вже при енергії зіткнення $\sqrt{s} = 7$ TeV уявна частина амплітуди $H(s, b)$ перевищує границю чорного диску, тобто $H(s, 0) \geq 1/2$, що має принципово важливі наслідки для опису пружної й непружної взаємодії протонів при високих енергіях. Показано, що профіль перекриття $G_{\text{нпруж}}(s, b)$ при $\sqrt{s} = 7$ TeV досягає максимуму при $b > 0$. Ці факти натякають на нетривіальну геометричну картину розсіювання протонів при цих енергіях, та можливу зміну характеру взаємодії адронів в області енергій порядку 1 TeV.

4. На основі даних з розподілів множинності заряджених частинок у протон-протонних зіткненнях в широкому діапазоні енергії в центральному регіоні псевдохуткості продемонстровано, що такі розподіли не можна описати моделлю з одним негативно-біноміальним розподілом. Показано, що наявність структури типу «плечо» у розподілу множинності проявляється вже при енергії $\sqrt{s} = 0.9$ TeV. Це добре узгоджується із наявністю додаткового механізму народження частинок у взаємодії протонів, що відповідає подіям із дуже великою множинністю. Також продемонстровано, що для подальшого аналізу розподілів множинності необхідно суттєво підвищити точність вимірювань. Запропоновано методи аналізу, які дозволять цього досягти.
5. Побудовано просту феноменологічну модель, що є здатною одночасно сукупно описати розподіли множинності у декількох регіонах фазового простору частинок у фінальному стані (а саме у трьох інтервалах псевдохуткості, $|\eta| < 0.5, 1.0, 1.5$) при доступних енергіях. Показано, що структура типу «плечо» у розподілах множинності в обмеженому інтервалі псевдохуткості з необхідністю є наслідком наявності такої структури у глобальному розподілу, що є непрямим підтвердженням існування додаткового механізму народження частинок в сильно-непружних зіткненнях протонів. Показано, що в рамках запропонованої моделі КНО-скейлінг може проявлятися незалежно у кожному з механізмів народження, що обумовлюють компоненти розподілу.

Практичне значення одержаних результатів. Отримані в роботі результати мають теоретичний характер та можуть бути застосовані для подальшого уточнення картини сильної взаємодії адронів на високих енергіях, зокрема залежності загальних статистичних характеристик фінального стану від енергії зіткнення та ступеню непружності події. Також вони можуть бути застосовані для вдосконалення Монте-Карло генераторів подій та покращення експериментальної точності вимірювання статистичних характеристик фінального стану у подіях зіткнення протонів.

Особистий внесок здобувача. В роботі [1] проведено обчислення за дисперсійними співвідношеннями для апроксимації модельних кривих до даних з повних перерізів та відношення дійсної до уявної частини амплітуди для протонного-, антипротонного-, мезонного- та антимезон-протонного зіткнення.

В роботі [2] розроблено методологію та проведено апроксимацію моделей до даних із диференціальних перерізів як функції переданого імпульсу.

В роботі [3] з експериментальних диференціальних перерізів протон-протонної та антипротон/протонної взаємодії реконструйовано залежність уявної частини амплітуди, дійсної частини амплітуди та функції непружного перекриття від прицільного параметра. Запропоновано та реалізовано оригінальний спосіб пропагації похибки експериментальних даних у фінальні величини, що використовує сучасні обчислювальні можливості.

У роботах [1—3] автором розроблено та використано, незалежно від співавторів, програмний код, що реалізує відповідні обчислення, з метою перехресної перевірки результатів обчислень.

У роботі [4] автором проведено модельний аналіз експериментальних розподілів множинності заряджених частинок в непружній взаємодії протонів від колаборації ALICE на LHC у рамках двокомпонентної моделі. На основі розроблених автором програмних кодів, проведено корекцію даних з множинності заряджених частинок, зокрема з використанням оригінального методу пропагації систематичної похибки, що дозволяє часткове збереження інформації про кореляції в систематичній похибці у фінальних розподілах множинності. Це дозволяє суттєво підвищити можливості їх модельного аналізу. Програмні коди доступні як частина програмного фреймворку для аналізу даних AliROOT/AliPhysics колаборації ALICE.

У роботі [5] автором запропоновано і розроблено феноменологічну модель для сукупного опису розподілів множинності в обмежених інтервалах псевдохуткості та випробувано її на наявних експериментальних даних колаборації ALICE. Продемонстровано, що обмежені розподіли можна описати як редуковані образи загального розподілу, який задається двокомпонентною моделлю. Показано, що масштабна поведінка у формі КНО у двокомпонентній моделі є властивістю окремих компонентів розподілу множинності, а не розподілу в цілому. Запропоновано шляхи вдосконалення моделі та експериментальні шляхи перевірки припущень, що використані у формулюванні моделі.

Апробація роботи. Матеріали роботи було представлено на семінарах в Інституті теоретичної фізики ім. М.М. Боголюбова НАН України, а також внутрішніх конференціях колаборації ALICE у ЦЕРНі. Окремі результати доповідалися на міжнародних конференціях:

- Forward Physics at LHC, 27-29 May 2010. La Biodola, Isola d'Elba, Italy;
- 30 Years of Strong Interactions: A three-day Meeting in honor of Joseph Cugnon and Hans-Jürgen Pirner, 6-8 Apr 2011. Spa, Liege, Belgium;
- Fundamentals of Astroparticle and Quantum Physics, 17 - 23 September, 2017, BITP, Kyiv, Ukraine

Публікації. Результати даної дисертаційної роботи представлено у 5-и роботах (з них одна – сумісно із колаборацією ALICE), що опубліковані у провідних фізичних журналах [1—5], та у збірці трудів конференцій [6].

Структура дисертаційної роботи. Робота складається із вступу, трьох розділів, що відповідають логічно завершеним етапам досліджень, висновків та бібліографії, яка містить 81 посилання. Дисертація включає 30 рисунків та 5 таблиць. Загальний об'єм роботи становить 110 сторінок друкованого тексту.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ

Розділ 1. Перший розділ присвячено моделюванню пружного розсіяння, яке, в силу унітарності, дає непряму інформацію про непружні процеси, а також розгляду властивостей розсіяння як функції переданого імпульсу та прицільного параметра.

Амплітуда розсіяння адронної системи $h\bar{p}$ ($h\bar{p}$)² є аналітичною функцією змін-

² де $h/\bar{h}$ позначає один з адронів, $\pi^\pm$, $K^\pm$ або $p^\pm$

них Мандельштама з ізольованими особливостями (тобто полюсами різної кратності та розрізами, що обумовлені точками розгалуження) парціальних амплітуд у площині комплексного кутового моменту. Амплітуда також задовольняє кросінг-симетрії при відповідних переходах між парами незалежних змінних Мандельштама. Особливості функції амплітуди однозначно обумовлені вищенаведеними вимогами та порогами народження частинок в проміжних станах. Таким чином для амплітуди існують дисперсійні співвідношення, що є наслідком теореми Коші та відомих обмежень на асимптотику амплітуди у комплексній площині змінної s .

Двічі-лишкові інтегральні дисперсійні співвідношення, у лабораторній системі відліку де $s = 2m_p(E + m_p)$, $u = 2m_p(-E + m_p)$, а точка $s_0 = u_0$ відповідає $E_0 = 0$, мають вигляд

$$\rho_{\pm}\sigma_{\pm} = \frac{A_{\pm}(s_0, 0)}{2m_p p} + \frac{E A'_{\pm}(s_0, 0)}{p} + \frac{E^2}{\pi p} \mathbf{P} \int_{m_h}^{\infty} \left[\frac{\sigma_{\pm}}{E'^2(E' - E)} + \frac{\sigma_{\mp}}{E'^2(E' + E)} \right] p' dE' \quad (1)$$

де знак « $-$ » (« $+$ ») відповідає величинам для протон- чи мезон-протонного (анти-протон- чи антимезон-протонного) розсіяння, а

$$\rho_{\pm} = \text{Re } A_{\pm}(s, 0) / \text{Im } A_{\pm}(s, 0), \quad A'(z, 0) = dA(z, 0) / dz, \quad (2)$$

$$s_0 = (m_h + m_p)^2, \quad A_+(s_0) = A_-(s_0), \quad A'_+(s_0) = -A'_-(s_0), \quad (3)$$

$$\sigma_+ = \bar{\sigma}_{\text{tot}}^{\text{hp}}, \quad \sigma_- = \sigma_{\text{tot}}^{\text{hp}}, \quad (4)$$

а інтеграл береться у головному значенні. В цій формі спеціально виділено величини ρ (при $t = 0$) та σ_{tot} , як такі, що безпосередньо вимірюються в експерименті. Таким чином, моделюючи повний переріз розсіяння в достатньо великому інтервалі енергій системи, що розсіюється, ми можемо досягти одночасного опису як самого перерізу, так й важливої характеристики амплітуди, відношення дійсної до уявної частини. Зазначимо, що при асимптотичній відсутності кросінг-непарного (оддеронного) вкладу, тобто якщо при $s \rightarrow \infty$

$$\Delta\sigma_{\text{tot}}(s) = \sigma_+(s) - \sigma_-(s) \rightarrow 0$$

дисперсійне співвідношення спрощується до одно-лишкового

$$\rho_{\pm}\sigma_{\pm} = \frac{A_{\pm}(s_0, 0)}{2m_p p} + \frac{E}{\pi p} \mathbf{P} \int_{m_p}^{\infty} \left[\frac{\sigma_{\pm}}{E'(E' - E)} - \frac{\sigma_{\mp}}{E'(E' + E)} \right] p' dE'. \quad (5)$$

Показано, що саме таке співвідношення підтверджується наявними даними для протон-протонних та мезон-протонних повних перерізів взаємодії.

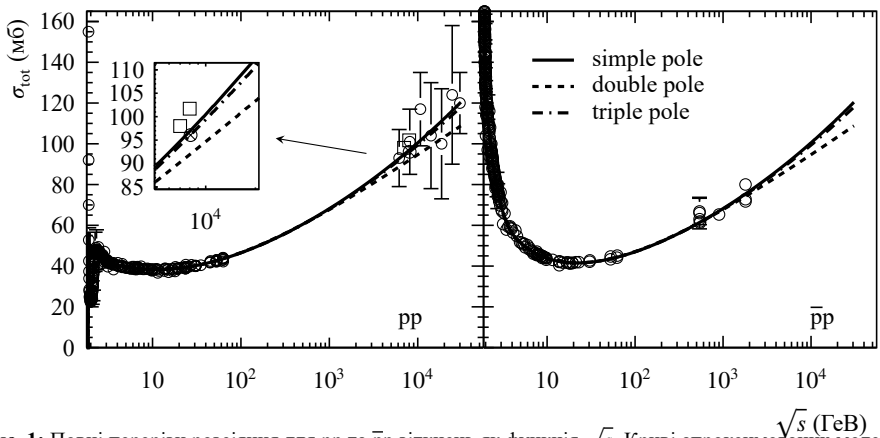


Рис. 1: Повні перерізи розсіяння для pp та $\bar{p}p$ зіткнень як функція $\sqrt{s}$. Криві апроксимованих моделей отримано в даній роботі, експериментальні точки на 7 та 8 TeV є результатами експериментів TOTEM (пурпурові точки) та ATLAS (блакитна точка) (на 8 TeV), що з'явилися після завершення аналізу, наведені для порівняння з екстраполяцією.

В роботі розглянуто три моделі повних перерізів розсіяння $p^\pm p$, $\pi^\pm p$ й $K^\pm p$ систем, та відповідних відношень реальної до уявної частини амплітуди ρ . За допомогою дисперсійних співвідношень проведено сукупну апроксимацію експериментальних повних перерізів та ρ для всіх розглянутих систем адронів, що взаємодіють. Для $p^\pm p$ перерізів розглянуто моделі як із кросінг-непарним вкладом так й без нього. Показано, що кросінг-непарним вкладом можна знехтувати³. Загалом, досягнуто гарного опису високоенергетичної частини еволюції повних перерізів та ρ , наведено екстраполяції для порівняння із наступними експериментами. Важливим компонентом аналізу, що проведено, є параметризація перерізів розсіяння на низьких ($\sqrt{s} \leq 5$ GeV) енергіях, яка є необхідною для підрахунку інтегралу у формулі (1).

Основним вкладом, що обумовлює поведінку повного перерізу при високих енергіях є померон. Для того щоб забезпечити різну асимптотичну поведінку було розглянуто три варіанти цього вкладу: (а) простий полюс; (б) подвійний полюс; та (в) потрійний полюс. Отримані результати наведено на рис. 1, 2.

Оскільки звичайні моделі Редже з помероном у вигляді простого полюсу з інтерцептом більшим за одиницю не є унітарними, для відновлення унітарності використовуються спеціальні методи. Застосовуючи квазі-ейкональну та квазі- U -матричну схеми унітаризації, ми будуємо моделі Редже, що дозволяють описати диференціальні перерізи розсіяння протонів як функції переданого імпульсу в широкому діапазоні експериментально доступних енергій. Явні вирази для амплітуд у представленні прицільного параметра наведені нижче. Квазі-ейкональна модель

$$H^{hp}(s, b) = \frac{\exp[2i\lambda_{hp}h^{hp}(s, b)] - 1}{2i\lambda_{hp}}, \quad \lambda_{hp}(n) = (\lambda_{hp})^n, \quad (6)$$

³Для даних, що були наявні на момент публікації.

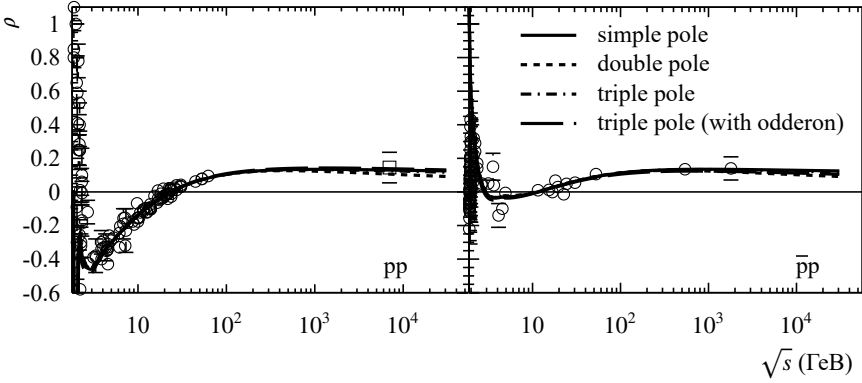


Рис. 2: Відношення дійсної до уявної частини амплітуди розсіяння (ρ) як функція $\sqrt{s}$ для pp та $\bar{p}p$ зіткнень. Криві апроксимованих моделей отримано в даній роботі, експериментальна точка на 7 TeV є значенням, що використане в експерименті TOTEM для визначення повного перерізу.

що перетворюється на звичайну ейкональну коли $\lambda_{hp} = 1$, та квазі- U -матрична модель

$$H^{hp}(s, b) = \frac{h^{hp}(s, b)}{1 - 2i\lambda_{hp}h^{hp}(s, b)}, \quad \lambda_{hp}(n) = (\lambda_{hp})^n n! \quad (7)$$

що перетворюється на чисту U -матричну коли $\lambda_{hp} = 1/2$. В обох випадках $\lambda_{hp} \geq 1/2$, оскільки повна амплітуда повинна задовольняти нерівності $|H^{hp}| \leq 1$. Фінальна амплітуда конструюється з однореджеонних внесків у полюсному наближенні із факторизацією, що є наслідком вимоги унітарності.

В результаті застосування моделей до експериментальних даних, досягнуто якісного опису в доступному інтервалі енергій та переданого імпульсу, що наведено на рис. 3.

Також аналіз диференціальних перерізів в рамках представлення прицільного параметра дозволяє реконструювати такі важливі величини як уявна частина амплітуди $\text{Im } H(s, b)$ та непружний профіль $G_{\text{inel}}(s, b)$, що пов'язані співвідношенням унітарності

$$\text{Im } H(s, b) = |H(s, b)|^2 + G_{\text{inel}}(s, b), \quad G_{\text{inel}}(s, b) > 0. \quad (8)$$

Непружний профіль $G_{\text{inel}}(s, b)$ враховує внесок від усіх непружних процесів. Результати наведено на рис. 4а та 4б. Характер залежностей від b , що спостерігаються, натякає на важливі особливості протон-протонного розсіяння, що помітні вже при енергії зіткнення $\sqrt{s} = 7$ TeV. Зокрема ми знайшли, що значення $\text{Im } H(s, 0)$ перевищує ліміт чорного диску $1/2$. Цей факт має фундаментальні наслідки для уявлення про динаміку та геометричні характеристики області взаємодії протонів. З цього також випливає, що залежність непружного профілю від прицільного параметра повинна мати максимум при $b > 0$, що підтверджується реконструйованою

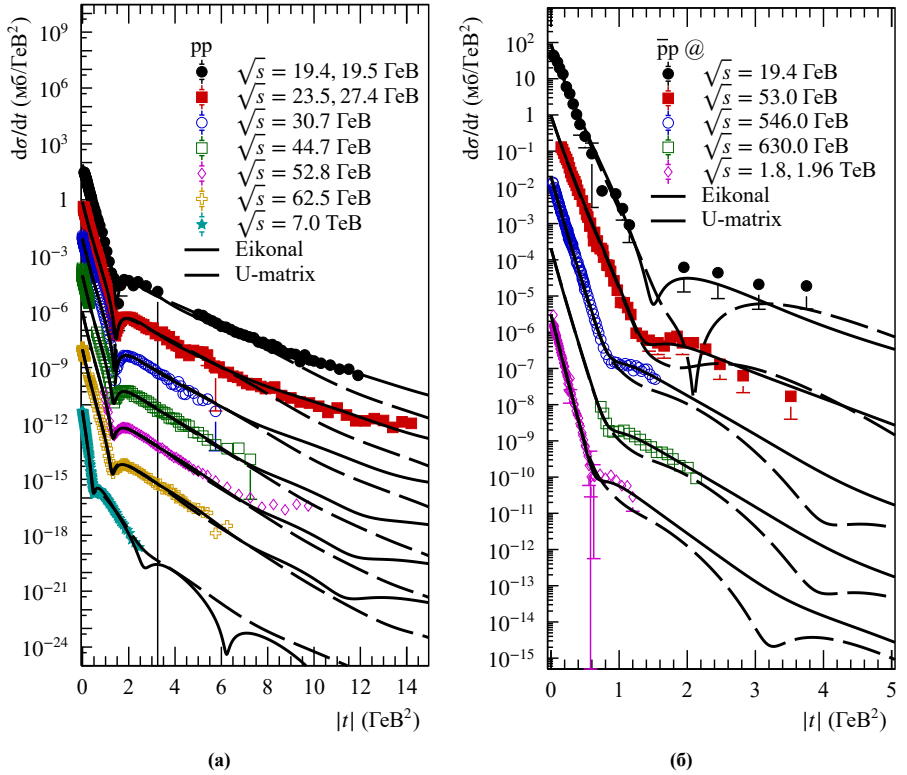


Рис. 3: Пружні диференціальні перерізи як функції $|t|$ для (а) pp й (б) $\bar{p}p$ розсіяння з ейкональною (неперервна крива) та U -матричною (пунктирна крива) модельною апроксимацією

залежністю, однак перевищення є таким, що може бути порівняно до експериментальної похибки. Необхідні додаткові експериментальні дослідження для перевірки цього ефекту, адже він повинен посилюватися зі зростанням енергії взаємодії. Аналіз диференціальних перерізів на енергіях, вищих за 7 TeV, є пріоритетом цього напрямку досліджень.

Розділ 2. Другий розділ присвячено інтерпретації експериментальних даних з множинності заряджених частинок в розсіянні протонів, зокрема можливості розрізняти моделі народження частинок враховуючи обмежену точність наявних вимірів. З теоретичних міркувань визначено шляхи вдосконалення методів аналізу та експериментальної реконструкції множинності заряджених частинок.

Множинність заряджених частинок, що народилися у непружному зіткненні адронів, є однією з базових характеристик високоенергетичного розсіяння та є предметом довготривалих експериментальних та теоретичних досліджень, що формували розуміння механізмів сильної взаємодії.

При енергіях LHC, народження частинок все ще переважно забезпечується м'я-

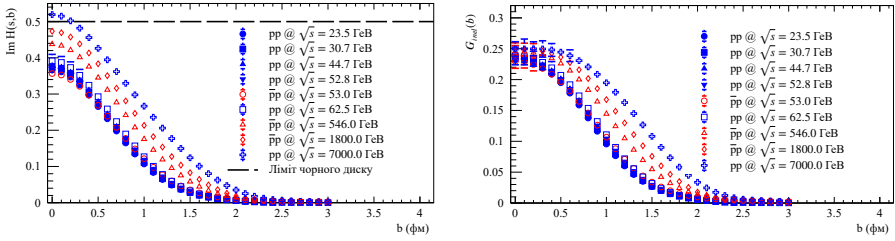


Рис. 4: Уявна частина амплітуди розсіяння (а) та функція непружного перекриття (б) в залежності від прицільного параметру b для pp та $\bar{p}p$ розсіяння на різних енергіях.

кими процесами з невеликою передачею імпульсу, але й містить помітну долю жорсткого розсіяння, тобто взаємодії із великою передачею імпульсу. Таким чином множинність народжених частинок, як і інші глобальні спостережні величини, дозволяє досліджувати обидва компоненти. Оскільки ці спостережні використовуються як вихідні дані для моделей типу Глаубера-Ситенка, подібні дослідження також необхідні для кращого моделювання іон-іонних зіткнень, таких як Pb–Pb на LHC. На найвищій досягнутій в експерименті енергії, зіткнення протонів з дуже високою множинністю досягають густини енергії, що порівняна до такої в найбільш центральних Au–Au зіткненнях в експерименті RHIC. Це дає нам інструмент для порівняння систем із схожою густиною енергії та об'ємами, що відрізняються на порядок величини.

За великий час досліджень процесів множинного народження у взаємодії адронів було розглянуто низку дискретних розподілів ймовірності, що виникають у різноманітних гіпотетичних механізмах народження, але найбільш успішним в описі розподілів множинності став негативно-біноміальний розподіл. Практично, розподіли множинності відійшли на другий план досліджень в силу того, що наявна точність експериментів була недостатньою. Однак існує науковий консенсус щодо важливої інформації про особливості сильної взаємодії, яка міститься у розподілах множинності та кореляційних вимірах.

В роботі автора для колаборації ALICE розроблено та застосовано декілька вдосконалених методів аналізу даних, що дозволяють суттєво покращити точність експериментальних розподілів множинності та оцінити масштаби кореляцій у систематичній похибці. Це приводить до можливості розрізнити та перевірити моделі множинного народження на основі нових даних.

Порівняння експериментальних результатів колаборації ALICE з модельними розрахунками за допомогою сучасних Монте-Карло генераторів подій наведено на рис. 5 та 6.

Негативно-біноміальний розподіл ймовірності. Велика кількість дискретних розподілів ймовірності використовувалася для моделювання множинності в зіткненнях як адронів, так й лептонів. Найбільш успішний опис при енергіях $\sqrt{s} \leq 0.9$ GeV,

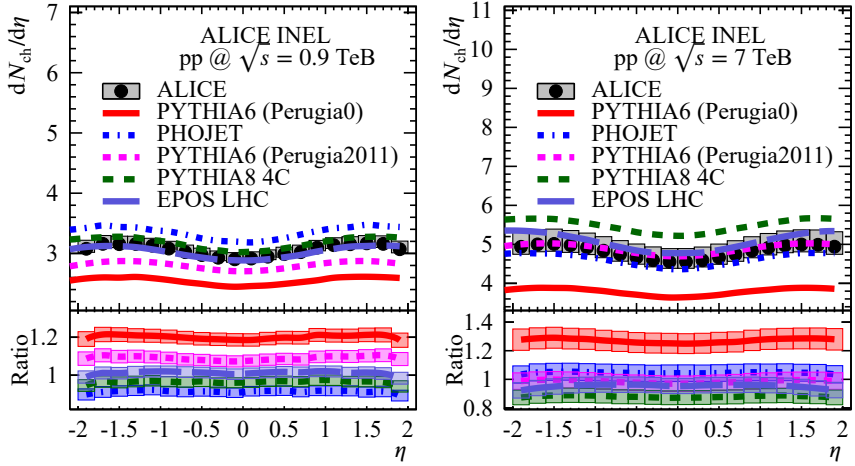


Рис. 5: Експериментальні результати ALICE з розподілу густини заряджених частинок за псевдохуткістю у порівнянні із модельними розрахунками за допомогою сучасних Монте-Карло генераторів подій. Затінені області відповідають повній систематичній та статистичній похибці експериментальних даних. В нижній частині рисунку наведені відношення експериментальних даних до моделей.

давався негативно-біноміальним розподілом (далі НБР) який ми запишемо як

$$P(n; \langle n \rangle, k) = \frac{\Gamma(k+n)}{\Gamma(k)\Gamma(n+1)} \left[\frac{\langle n \rangle}{k + \langle n \rangle} \right]^n \times \left[\frac{k}{k + \langle n \rangle} \right]^k, \quad (9)$$

де $\langle n \rangle$ є середньою множинністю та k є параметром форми, що пов'язаний із дисперсією розподілу співвідношенням

$$\frac{D^2}{\langle n \rangle^2} = \frac{1}{\langle n \rangle} + \frac{1}{k}. \quad (10)$$

В такому формулюванні параметр k безпосередньо пов'язаний із двохчастинковою кореляційною функцією. Згідно гіпотезі КНО, при великих енергіях у системі центру мас, розподіл ймовірності $P(n)$ народження n частинок у події зіткнення мас досягти асимптотичної форми як функція змінної $z = n/\langle n \rangle$ (далі - КНО змінна). При $\langle n \rangle/k \gg 1$, вираз (9) перетворюється на

$$P(n; k) = \frac{1}{\langle n \rangle} \psi(z; k) \quad (11)$$

із $\psi(z; k) \equiv \frac{k^k}{\Gamma(k)} z^{k-1} e^{-kz}$, що є частковим випадком *гамма-розподілу*

$$\psi(x; k, \langle x \rangle) = \frac{1}{\Gamma(k)} \frac{k}{\langle x \rangle} \left(\frac{k}{\langle x \rangle} x \right)^{k-1} e^{-\frac{k}{\langle x \rangle} x}. \quad (12)$$

Найбільш успішний опис розподілів множинності досягнуто двокомпонентною моделлю, що виражається у формі зваженої суми двох НБР

$$P(n) = \lambda [\alpha P_{\text{НБР}}(n, \langle n \rangle_1, k_1) + (1 - \alpha) P_{\text{НБР}}(n, \langle n \rangle_2, k_2)], \quad (13)$$

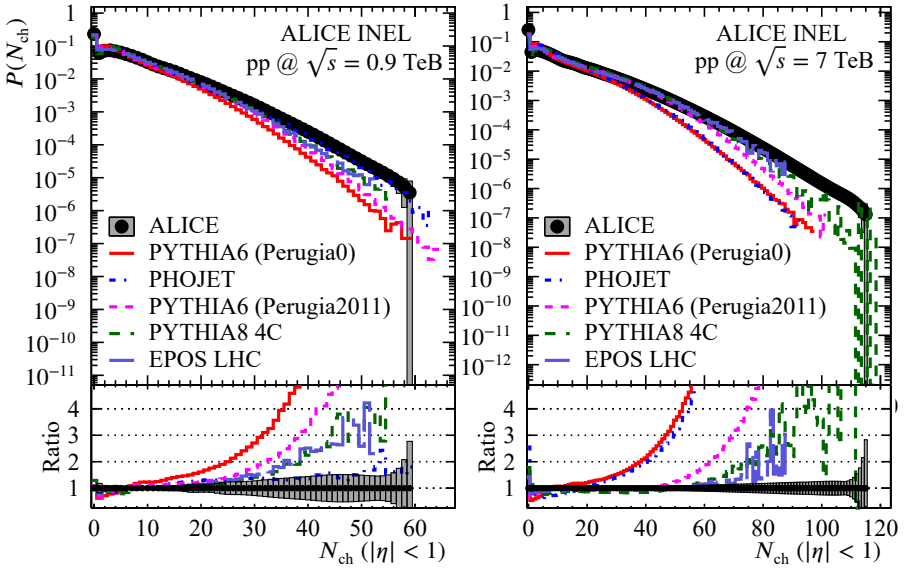


Рис. 6: Експериментальні розподіли множинності заряджених частинок від колаборації ALICE у порівнянні з модельними розрахунками за допомогою сучасних Монте-Карло генераторів подій. Затінені області відповідають повній систематичній та статистичній похибці експериментальних даних. В нижній частині рисунку наведені відношення моделей до експериментальних даних.

де $0 < \alpha < 1$ є відносною вагою компонентів, а λ є масштабним фактором, що враховує наявність значної кількості подій із множинністю 0 (в даному інтервалі псевдохуткості), що впливає на нормування розподілу. Модельна апроксимація розподілів множинності наведена на рис. 7.

Уточнені дані експерименту ALICE дозволяють однозначно відкинути однокомпонентний опис загального розподілу та виділити в розподілах множинності у взаємодії протонів структуру типу «плечо». Однак еволюція параметрів з ростом енергії та інтервалу псевдохуткості не демонструє ніяких очевидних трендів. Попри те, що наявність двох компонентів в експериментальних розподілах не підлягає сумніву, ми не маємо можливості розділити ці підмножини подій базуючись лише на формі експериментальних розподів. Окрім того, еволюція параметрів розподілу із розміром вікна псевдохуткості та з енергією не відповідає наявним теоретичним прогнозам. Також еволюція параметрів форми k , параметрів кланової моделі (з якої однозначно витікає НБР), не демонструє простої поведінки. Подальший аналіз потребує істотного підвищення точності вимірів множинності заряджених частинок, якого можна досягти, зокрема, підстроюванням генераторів подій до експериментальних результатів. Суттєвим результатом проведеного дослідження є однозначне підтвердження двокомпонентної структури розподілу множинності заряджених частинок та відсутності масштабної поведінки в термінах КНО. Значимо також, що якість опису експериментальних даних з використанням НБР у

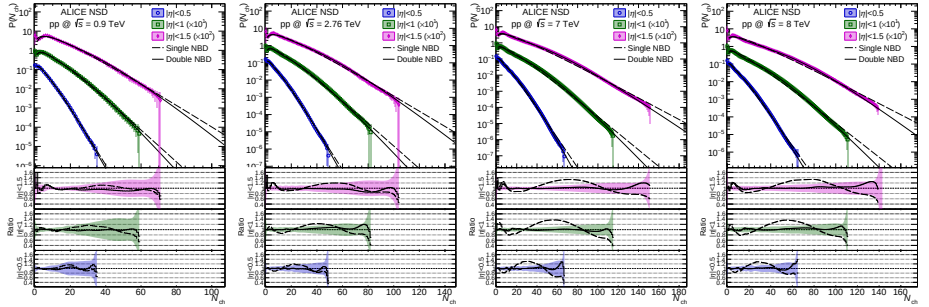


Рис. 7: Експериментальні розподіли множинності заряджених частинок для непружних подій за виключенням односторонньої дифракції від колаборації ALICE (при $\sqrt{s} = 0.9$ та 2.76 TeV) та їх модельна апроксимація за допомогою одного, або зваженої суми двох НБР. Розподіли для різних інтервалів псевдохуткості зміщено вертикально для кращого сприйняття. Затінені області відповідають повній систематичній та статистичній похибці експериментальних даних. В нижній частині рисунку наведені відношення модельних кривих до експериментальних з тим же самим значенням затіненої області.

масштабно-інваріантній формі для другого компоненту є не гіршим за опис з двома НБР.

Розділ 3. Третій розділ присвячено моделюванню розподілів множинності заряджених частинок в непружному розсіянні протонів та аналізу зв'язку між множинністю й властивостями, що викладено у попередніх розділах.

Середню кількість заряджених частинок в інтервалі $\Delta\eta$ при фіксованому N можна записати як

$$\langle n \rangle_{\Delta\eta} = \sum_n n \left(\sum_N P(n|N, \Delta\eta) P_{\text{tot}}(N) \right), \quad (14)$$

таким чином визначаючи

$$P_{\text{мод}}(n, \Delta\eta) \equiv \sum_N P(n|N, \Delta\eta) P_{\text{tot}}(N) \quad (15)$$

як модельний розподіл множинності в обмеженому фазовому просторі. Очевидним вибором для $P(n|N)$ є *біноміальний розподіл*, що є дуже зручним для повного розподілу $P_{\text{tot}}(N)$ у формі НБР, або суми НБР. В цьому випадку сума у (15) збігається до НБР із таким же самим параметром форми k та відповідно зменшеною середньою множинністю $A\langle N \rangle$, де A є параметром біноміального розподілу, що визначає ймовірність того, що частинка народилася у цільовому інтервалі псевдохуткості.

Використовуючи параметризацію розподілів псевдохуткості для оцінки вихідних значень параметрів $A_{1,2,3}$, у трьох інтервалах псевдохуткості $|\eta| < 0.5$, 1 та 1.5, ми досягли надійного опису розподілів множинності у наявних вікнах псевдохуткості в діапазоні енергій від 0.9 до 8 TeV. Результати застосування моделі до даних ALICE з розподілів множинності заряджених частинок в непружних подіях зіткнення протонів за виключенням односторонньої дифракції показано на рис. 8, 9.

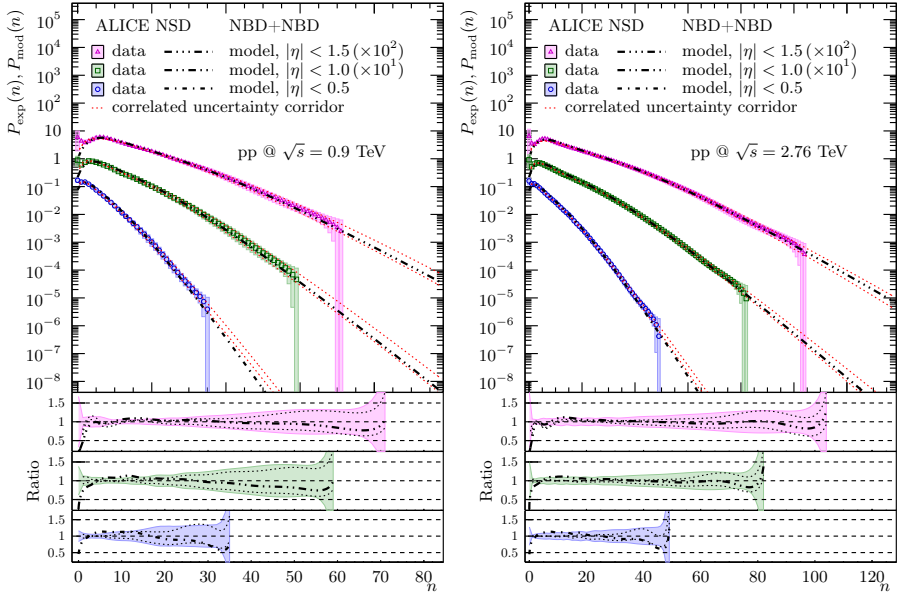


Рис. 8: Модельна апроксимація даних ALICE для розподілів множинності непружних подій за виключенням односторонньої дифракції за допомогою зваженої суми двох НБР для повного розподілу та біноміальної редукції при $\sqrt{s} = 0.9$ TeV(зліва) та 2.76 TeV(справа). Безпосередні апроксимації сумою двох НБР від ALICE, що обмежують коридор скорельованої похибки наведено для порівняння. Криві для різних інтервалів η зміщено вертикально для кращого сприйняття. Затінені області відповідають повній систематичній та статистичній похибці експериментальних даних. В нижній частині рисунку наведені відношення модельних кривих до експериментальних з такими ж самими позначеннями.

ВИСНОВКИ

За допомогою Реджівських моделей із сингулярностями у вигляді простого, подвійного та потрійного полюсів проведено сукупний опис повних перерізів мезон-протонного та протон-протонного розсіяння, разом із відношенням уявної частини амплітуди до дійсної. Показано, що для якісного опису, в дисперсійних співвідношеннях необхідно враховувати інтеграл повного перерізу при низьких (≤ 5 GeV) енергіях, для чого були параметризовані наявні експериментальні дані. В результаті досягнуто достатньо якісну апроксимацію даних, що зібрано до пуску LHC. В результаті порівняння передбачень для повного перерізу протон-протонного розсіяння, що отримано із трьох моделей, можна зробити висновок, що модель подвійного полюсу має асимптотичну поведінку, що не є сумісною із експериментальними даними (навіть при ре-апроксимації з використанням даних експерименту TOTEM). Моделі з простим та потрійним полюсом дещо недооцінюють фактичні результати⁴.

⁴зазначимо, що результати від різних колаборацій на LHC не є повністю сумісними, результат від ATLAS лежить на екстраполяції обидвох моделей, у той час як результати TOTEM є систематично ви-

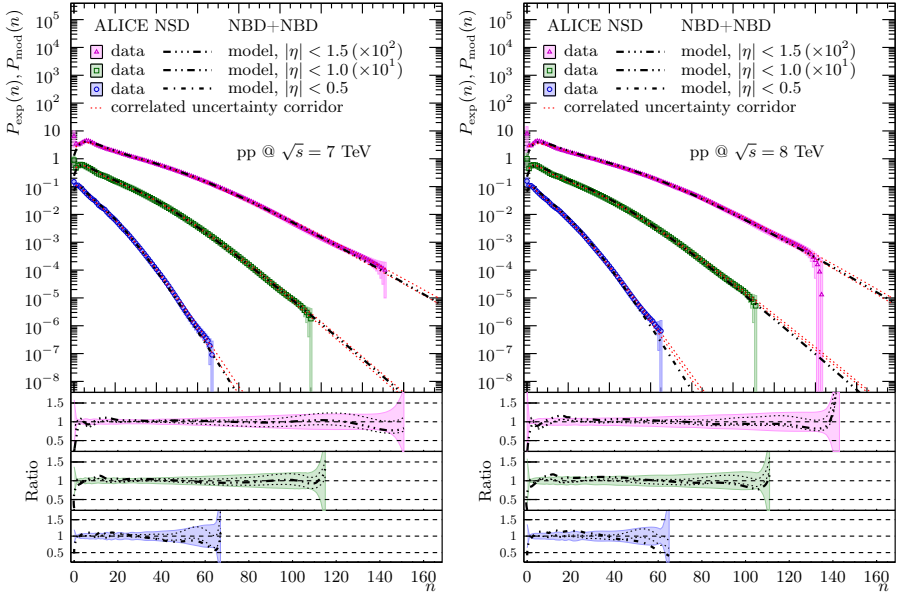


Рис. 9: Модельна апроксимація даних ALICE для розподілів множинності непружних подій за виключенням односторонньої дифракції за допомогою зваженої суми двох НБР для повного розподілу та біноміальної редукції при $\sqrt{s} = 7$ TeV(зліва) та 8 TeV(справа). Безпосередні апроксимації сумою двох НБР від ALICE, що обмежують коридор скорельованої похибки наведено для порівняння. Криві для різних інтервалів η зміщено вертикально для кращого сприйняття. Затінені області відповідають повній систематичній та статистичній похибці експериментальних даних. В нижній частині рисунку наведені відношення модельних кривих до експериментальних з такими ж самими позначеннями.

Проведено опис диференціальних перерізів лінійними Реджівськими моделями у представленні прицільного параметра на доступному діапазоні енергій з використанням квазіейкональної та U -матричної унітаризації. Показано, що якість опису лінійними моделями не є достатньою для набору даних, що включає результати при енергії 7 TeV. Цей недолік було ліквідовано введенням додаткових внесків у вихідну амплітуду. Екстраполяція опису диференціальних перерізів протон-протонного, та протон-антипротонного розсіяння на великі значення $|t|$ демонструє осциляції, подібні той, що присутня при переході від області дифракційного конуса до степеневого спуску.

Проаналізовано дані з диференціальних перерізів розсіяння протонів та видобуто інформацію щодо залежності дійсної та уявної частини амплітуди розсіяння та непружного профілю від прицільного параметра. Обидві величини демонструють гладку еволюцію з енергією зіткнення в системі центра мас. Важливим та отриманим вперше результатом є той факт, що уявна частина при $b = 0$ при 7 TeV є більшою за $1/2$, що означає несправедливість гіпотези «чорного диску» для роз-

сіяння адронів. Окрім того, було помічено важливу особливість непружного профілю, а саме наявність максимуму при значеннях прицільного параметра більших 0. Це має суттєві наслідки для геометричної картини зіткнення протонів. Зокрема, це натякає на нетривіальну структуру області взаємодії та явища у взаємодії протонів, зокрема, перевищення поглинальної моди розсіяння в найбільш центральних зіткненнях над відбивною.

При енергіях LHC вищих за 2 TeV розподіли множинності не можуть бути описані одним НБР, але зважена сума двох НБР дає добру апроксимацію даних. Відхилення від одного НБР, що було помічено ще при енергії 0.9 TeV, зростає із ростом енергії.

Перевірка гіпотези КНО при енергіях від $\sqrt{s} = 0.9$ до 8 TeV підтверджує, що для повної вибірки масштабно-незалежна поведінка не досягається, більш того, відхилення від КНО скейлінгу зростає з $\sqrt{s}$ та, для фіксованої енергії, з розширенням вікна псевдохуткості.

Порівняння розподілів з моделями генераторів подій у інтервалі $|\eta| \leq 1$ демонструє, що жоден з сучасних генераторів неспроможний описати багато характеристик сильної взаємодії при енергіях до $\sqrt{s} = 8$ TeV. Генератори подій PYTHIA6 з підстройкою Perugia 2011, PYTHIA8 з підстройкою 4C та EPOS LHC достатньо добре описують розподіли за псевдохуткістю при $\sqrt{s} = 7$ TeV, та, частково, розподіли множинності, до $N_{\text{ch}} \sim 60$. Той факт, що генератори PYTHIA6 з підстройкою Perugia 2011, PYTHIA8 з підстройкою 4C та EPOS LHC узгоджуються з даними пояснюється тим, що ці генератори було підстроєно до даних експериментів на LHC.

Вивчення народження заряджених частинок дозволяє вдосконалити розуміння глобальних властивостей протон-протонних зіткнень на LHC. Було показано, що, як і для менших енергій, існує сильна кореляція між множинністю та середнім поперечним імпульсом $\langle p_{\perp} \rangle$. Однак також існують спостереження що події з високою множинністю мають більш сферичну топологію, ніж очікується з передбачень сучасних моделей в генераторах подій PYTHIA6, PYTHIA8 та RHOJET, демонструючи що окремі жорсткі акти взаємодії партонів не є єдиним механізмом множинного народження. Загалом, від $\sqrt{s} = 0.9$ до 8 TeV, розподіли множинності і густина за псевдохуткістю гладко еволюціонують зі зростанням енергії.

Запропонована феноменологічна модель успішно описує сукупність розподілів множинності в різних інтервалах псевдохуткості при фіксованій енергії. Використання експериментальних даних у більш широких інтервалах дозволить значно покращити якість опису, а також отримати обмеження на параметр відносної ваги α , який контролює розділення класів м'яких та напівжорстких подій, та обмеження на параметри форми $k_{1,2}$ НБР. Такий підхід намічає шлях до збільшення теоретичної ваги розподілів множинності, зокрема у встановленні відносних долей подій різного типу, та можливості оцінювати множинність в необмеженому фазовому просторі із декількох вимірів з обмеженнями.

Показано, що розподіли множинності на енергіях LHC добре описуються мо-

деллю, яка припускає існування двох незалежних підкласів подій з різними механізмами множинного народження, або різними типами одного механізму при переході через деякий енергетичний поріг.

Форма густини частинок за псевдохуткістю відіграє важливу роль в цьому підході, адже вона обумовлює модель обмеження множинності. Поява експериментальних результатів з густини за псевдохуткістю у протон-протонних зіткненнях, яка класифікована за деяким параметром, що корелює із загальною множинністю, дозволить значно вдосконалити запропоновану модель.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ РОБОТИ

- [1] A. Alkin, J. R. Cudell, and E. Martynov, «Dispersion relations for meson-proton and proton-proton forward elastic scattering», *Few Body Syst.* **53**, 87–98 (2012) DOI: 10.1007/s00601-012-0306-5, arXiv: 1109.1306 [hep-ph].
- [2] A. Alkin, O. Kovalenko, and E. Martynov, «Can the "standard" unitarized Regge models describe the TOTEM data?», *Europhys. Lett.* **102**, 31001 (2013) DOI: 10.1209/0295-5075/102/31001, arXiv: 1304.0850 [hep-ph].
- [3] A. Alkin, E. Martynov, O. Kovalenko, and S. M. Troshin, «Impact-parameter analysis of TOTEM data at the LHC: Black disk limit exceeded», *Phys. Rev.* **D89**, 091501 (2014) DOI: 10.1103/PhysRevD.89.091501, arXiv: 1403.8036 [hep-ph].
- [4] J. Adam [et al.], **ALICE** Collaboration, «Charged-particle multiplicities in proton–proton collisions at $\sqrt{s} = 0.9$ to 8 TeV», *Eur. Phys. J.* **C77**, 33 (2017) DOI: 10.1140/epjc/s10052-016-4571-1, arXiv: 1509.07541 [nucl-ex].
- [5] A. Alkin, «Phenomenology of charged particle multiplicity distributions», *Ukr. J. Phys.* **62**, 743–756 (2017) DOI: 10.15407/ujpe62.09.0743, arXiv: 1710.01979 [hep-ph].
- [6] A. Alkin and E. Martynov, «Integral and derivative dispersion relations for p p and anti-p p amplitudes», in *Proceedings, Workshop on Forward Physics at the LHC: La Biodola, Isola d’Elba, Italy, May 27–29, 2010* (2010), pp. 7–16, arXiv: 1012.5169 [hep-ex].

АНОТАЦІЯ

Алькін А.О. Феноменологія множинного народження заряджених частинок у високоенергетичній взаємодії протонів — Рукопис.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата фізико-математичних наук за спеціальністю 01.04.02 — теоретична фізика. — ІТФ ім. М.М. Боголюбова НАН України, Київ, 2018

Описано наявні дані з повних перерізів та відношення уявної до дійсної частини амплітуди для адронного розсіяння, зроблено передбачення для енергій ЛНС. Унітаризованими Реджівськими моделями описано експериментальні диференціальні перерізи при енергіях до 7 TeV в усьому доступному інтервалі переданого імпульсу $|t|$. Реконструйовано з експериментальних даних залежність амплітуди розсіяння від прицільного параметра. Вперше продемонстровано, що при енергії 7 TeV порушується границя чорного диску та максимум непружного профілю зміщується в область ненульових значень прицільного параметра. Знайдено, що форма розподілів множинності заряджених частинок у взаємодії протонів при енергіях до 8 TeV демонструє двокомпонентну поведінку вже при $\sqrt{s} = 0.9$ TeV. Сформульовано та перевірено на експериментальних даних феноменологічну модель, яка описує розподіли множинності одночасно у декількох інтервалах псевдохуткості. Продемонстровано, що двокомпонентна поведінка розподілів в обмежених інтервалах псевдохуткості не є результатом обмеження.

Ключові слова: розсіяння адронів, перерізи розсіяння адронів, прицільний параметр, множинне народження частинок.

АННОТАЦИЯ

Алькин А.О. Феноменология множественного рождения заряженных частиц в высокоэнергетическом взаимодействии протонов — Рукопись.

Диссертация на соискание учёной степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.02 — теоретическая физика. — ИТФ им. Н.Н. Боголюбова НАН Украины, Киев, 2018

Описаны существующие данные о полных сечениях и отношения мнимой к действительной части амплитуды адронного рассеяния, сделаны предсказания для энергий ЛНС. Унитаризованными моделями Редже описаны экспериментальные дифференциальные сечения при энергиях до 7 ТэВ во всём доступном интервале переданного импульса $|t|$. Из экспериментальных данных реконструирована зависимость мнимой и действительной части амплитуды от прицельного параметра. Впервые продемонстрировано, что при энергии 7 ТэВ нарушается предел чёрного диска и максимум неупругого профиля смещается в область ненулевых значений прицельного параметра. Обнаружено, что форма распределений множественности заряженных частиц во взаимодействии протонов при энергиях до 8 ТэВ демонстрирует двухкомпонентное поведение уже при $\sqrt{s} = 0.9$ ТэВ. Сформулирована и проверена на экспериментальных данных феноменологическая модель, описывающая распределения множественности одновременно в нескольких интервалах псевдорapidити. Продемонстрировано, что двухкомпонентное поведения распределений в ограниченных интервалах псевдорapidити не является результатом ограничения.

Ключевые слова: рассеяние адронов, сечения рассеяния адронов, прицельный параметр, множественное рождение частиц.

ABSTRACT

Alkin A.O. Phenomenology of multiple charged particle production in high-energy proton interaction — Manuscript.

Thesis for the Doctor of Philosophy degree (Candidate of Science in Physics and Mathematics) in speciality 01.04.02 — theoretical physics. — Bogolyubov Institute for Theoretical Physics of the National Academy of Sciences of Ukraine, Kyiv, 2018

An enormous set of experimental data on general physical properties of hadronic collisions has been accumulated, in particular for proton-proton, meson-proton, ion-proton and ion-ion interactions. Unlike the latter two colliding systems, for which there exists a family of Glauber-Sitenko models relating the multiplicity of particles produced in an act of collision to its geometry, the smaller systems aren't described in such terms experimentally. Moreover, modern general purpose Monte-Carlo event generators realizing the cutting edge of QCD processes description as well as hadronization aren't able to describe the whole set of interaction properties simultaneously. Until now there is no fundamental description of the hadronization process. There is no practical way to perform perturbative QCD calculation at higher orders of coupling constant which relates, for example, to peripheral inelastic processes such as single diffraction. Therefore phenomenological considerations are a key component of the event generator algorithms. These generators, in turn, play an incredibly important role in modern high-energy physics experiments as in many cases they provide the sole way to account for detector efficiencies and biases to facilitate data correction. Only a very small fraction of current experimental results in high-energy physics can be said to be model-independent.

This research work is dedicated to testing, analysis and improvement of general phenomenological models for hadronic interactions. Appearance of a significant body of total and differential cross-sections data, multiplicity distributions and pseudorapidity densities of charged particles, produced in a collision, provides a way for a systematic and comprehensive testing of existing models, which are virtually the only instrument for building a consistent picture of individual hadronic interactions. Simultaneous description of proton interaction statistical distributions provides a way for better reconstruction of hadronic dynamics and direct us to more detailed observables and measurements.

In the framework of this research, the following scientific results were obtained.

1. Using the dispersion relations method for scattering amplitude the most complete (at the time of publication) dataset of experimental total cross-section data and real-to-imaginary part of the amplitude ratio at $t = 0$ for hp and $\bar{h}p$ collision systems was analyzed. A good description of both observables was achieved. It was shown that odderon contribution at high-energies and $t = 0$ is negligible. Thus once-subtracted dispersion relation can be used instead of twice-subtracted. The models were extrapolated to higher energies and then compared to experimental results when those became available. Comparison with TOTEM Collaboration results for total cross-section at $\sqrt{s} = 7$ TeV clearly indicates that leading singularity in a form of double pole in the complex angular momentum plane is asymptotically incompatible with data.

2. The most complete (at the time of publication) dataset of experimental differential

cross-sections for hp and $\bar{h}p$ collision systems as a function of momentum transfer was analyzed. It was shown that linear unitarized Regge models are able to satisfactorily describe the present data, however the further improvement can be achieved, in particular, accounting for the non-exponential behavior of diffractive cone.

3. For the first time for the newest differential cross-section data for pp and $\bar{p}p$ colliding systems functional dependence of real and imaginary part of the amplitude, as well as the inelastic profile, on impact parameter was reconstructed. It was shown that already at the collision energy $\sqrt{s} = 7$ TeV imaginary part of the amplitude at $b = 0$ exceeds the so called *black disk limit*, $H(s, 0) \geq 1/2$. This has fundamental consequences for the description both elastic and inelastic proton-proton interactions at high energies. It was also shown that inelastic profile $G_{\text{inel}}(s, b)$ at $\sqrt{s} = 7$ reaches its maximum for values of impact parameter $b > 0$. All these facts hint at non-trivial geometry of proton interaction at these energies and possible change of the hadronic interaction regime in the 1 TeV region.

4. Using the experimental charged particle multiplicity distributions in proton collisions in a wide region of center-of-mass energies for a central pseudorapidity region it was shown that such distributions cannot be described by a single negative-binomial probability distribution. It was also shown that «shoulder»-like structure in multiplicity distributions appears already at $\sqrt{s} = 0.9$ TeV. This is compatible with a presence of an extra particle production mechanism in proton-proton interactions, corresponding to collision events with very high final state multiplicity. It was demonstrated, that further improvement of multiplicity distributions model analysis can be only achieved with significant improvements in experimental precision. Suggestions were made for the ways to address this problem.

5. A straightforward phenomenological model was constructed that is able to describe simultaneously charged particle multiplicity distributions in several final state phase space regions (in particular three pseudorapidity intervals, $|\eta| < 0.5, 1.0, 1.5$) at the available LHC energies. It is shown that «shoulder»-like structure in restricted phase space multiplicity distributions arises as a consequence of the similar structure in unrestricted phase space multiplicity distribution. This indirectly confirms the presence of an extra particle production mechanism for highly inelastic proton-proton collisions. It is also shown that in the framework of the proposed model KNO-scaling behavior would appear independently in individual multiplicity distribution components corresponding to different particle production mechanisms.

Research, this thesis is based on, was published in leading peer-reviewed journals [1–5] and conference proceedings [6].

Structure of the thesis. This thesis consists of Introduction, three chapters, that correspond to logically confined research efforts, Conclusion and Bibliography that contains 81 references. Thesis includes 30 figures and 5 tables. Overall volume of the thesis is 110 pages of printed text.

Keywords: hadronic scattering, hadronic cross-sections, impact parameter, multiple particle production.

Алькін Антон Олегович

Феноменологія множинного народження заряджених частинок у високоенергетичній взаємодії протонів. (Автореферат дисертації на здобуття наукового ступеня кандидата фізико-математичних наук.)

Зам. – 2. Формат $60 \times 84/20$. Обл.-вид. арк. – 1.00

Підписано до друку 01.02.2018. Тираж 100 прим.

Поліграфічна дільниця Інституту теоретичної фізики ім. М.М. Боголюбова НАН
України,
03143 м. Київ, вул. Метрологічна, 14б.

