

ВИСНОВОК

**про наукову новизну, теоретичне та практичне значення
результатів дисертації Юшкевич Тетяни Владиславівни на тему
«Пертурбативні та непертурбативні аспекти адронної фізики»,
поданої на здобуття наукового ступеня доктора філософії
за спеціальністю 104 Фізика та астрономія
в галузі знань 10 Природничі науки**

1. **Актуальність теми дисертаційної роботи** полягає в тому, що нові методи розрахунку внесків петльових фейнманівських діаграм в вирази для спостережуваних величини відкривають нові можливості для теоретичного опису адронних процесів в частині, яка стосується застосування пертурбативних методів, а динамічна модель багаточастинкових полів дозволяє об'єднати в одному підході як пертурбативні так і непертурбативні методи розрахунку.

В той же час, теоретична узгодженість та практична застосовність теорем факторизації, особливо взаємодія між поперечною залежністю від імпульсу (TMD) та колінеарною факторизацією, є критично важливими для інтерпретації даних напівінклюзивного глибоконепружного розсіювання (SIDIS) як у колінеарному, так і в TMD режимах. Ці дані містять надзвичайно важливу інформацію про внутрішню структуру адронів, яка вбудована в специфічні непертурбативні структурні функції, що називаються функціями розподілу партонів (PDF та TMD PDF).

2. Мета дисертаційного дослідження

Метою дисертаційної роботи є розробка і застосування метода Лапласа для розрахунку фейнманівських діаграм з найпростішими петлями в динамічній моделі багаточастинкових полів, теоретичний опис ефекту немонотонності залежності диференційного перерізу пружного розсіювання від квадрата переданого чотириімпульса в межах цієї динамічної моделі, а також побудова та застосування класифікаційної структури на основі інструменту “афініті” для вивчення переходу між режимами TMD та колінеарної факторизації в SIDIS, можливо, досягнення певного ступеня розуміння в проміжній області, де очікується безперервне та

плавне узгодження між прогнозами, отриманими з колінеарної та TMD схем факторизації.

Для досягнення вказаної мети дослідження в дисертаційній роботі було поставлено та розв'язано наступні задачі:

- досліджено області, які відповідають найбільшій сингулярності підінтегрального виразу для внеску в амплітуду пружного розсіяння діаграм четвертого порядку по константі зв'язку в моделі багаточастинкових полів;
- розраховано внески цих областей в інтеграл за допомогою метода Лапласа;
- усереднено суму отриманих виразів і внесків полюсних діаграм пружного розсіяння другого порядку по спіральністях вихідних протонів за допомогою спінової матриці густини;
- знайдено значення підгінних параметрів моделі — маси глюдола і константи зв'язку, які забезпечують найкращу відповідність до експериментальних даних;
- показано, що фізичною причиною немонотонності залежності диференційного перерізу пружного розсіяння від квадрата переданого чотириімпульса є процеси із зміною спіральності;
- визначено кінематичні межі між режимами факторизації за допомогою інструменту “афініті”, переходячи від методології, заснованої на побіновому аналізі, до нещодавно розробленої стратегії, заснованої на поівентному аналізі;
- дано оцінку застосовності запропонованої методології інструменту “афініті” в різних експериментальних енергетичних масштабах.

Об'єктом досліджень є процеси пружного розсіяння протонів і напівінклюзивний процес глибоконепружного розсіювання (SIDIS), зокрема, зосередження на теоретичному описі та інтерпретації даних SIDIS в контексті факторизаційних фреймворків квантової хромодинаміки (КХД).

Предметом досліджень є залежність диференційного перерізу пружного розсіяння протонів від квадрату переданого чотириімпульсу і механізм її немонотонності, а також перехід та взаємодія між режимами факторизації, залежними від поперечного імпульсу, та колінеарною факторизацією в SIDIS, з

особливим акцентом на розробці та застосуванні методології класифікації на основі інструменту “афініті” для визначення кінематичних меж між цими режимами.

3. Зв'язок дисертаційної роботи з науковими програмами, науковими напрямами Університету та кафедри

Робота виконувалась у відповідності до держбюджетних науково-дослідних робіт “Розрахунок перерізів непружного розсіювання адронів методом Лапласа” (№ державної реєстрації 0116U004527) та “Розробка методу багаточастинкових полів для пружного і непружного розсіювання адронів” (номер держ. реєстрації 0119U103982) згідно з програмою науково-дослідних робіт МОН України, а також в рамках постдокторської стипендії Марії Склодовської-Кюрі, що надавалась в рамках MSCA4Ukraine Action, яка фінансується Європейським Союзом, і підтримується програмою «Scholar at Risk». Стипендія підтримувала мобільність здобувача та його дослідницьку діяльність в Туринському університеті. Проєкт здійснювався в широкому контексті міжнародних зусиль щодо розвитку описів адронної структури та розсіювання на основі КХД.

4. Особистий внесок здобувачки в отриманні наукових результатів

Особистий внесок здобувачки полягає в тому, що вона розробила метод розрахунку петльових діаграм Фейнмана в умовах сингулярного підінтегрального виразу із застосуванням метода Лапласа, метод опису процесу пружного розсіювання протонів з використанням моделі тричастинкового поля, поєднуючи непертурбативний метод для опису внутрішньої структури адрона із пертурбативним методом для опису взаємодії між адронами, застосувала ці методи для розрахунку залежності диференційного перерізу пружного розсіювання протонів від квадрату переданого чотириімпульсу, знайшла значення параметрів моделі – маси глюбола і константи зв'язку, при яких модель описує немонотонність залежності диференційного перерізу від квадрата переданого чотириімпульсу.

Також особистий внесок полягає в концептуальній розробці, аналітичному формулюванні та практичному впровадженні методологій і моделей, представлених у дисертації. Зокрема, здобувачка відіграла ключову роль у концептуалізації, впровадженні та тестуванні методології класифікації на основі інструменту “афініті”, застосованої для вивчення режимів факторизації в SIDIS. Вона розробила підхід до класифікації інструменту “афініті” для кожної події, провела числове моделювання та аналіз результатів, що призвело до нових висновків щодо розширення режиму TMD за межі, що раніше були встановлені. У випадках, коли елементи дослідження проводилися в рамках спільних проектів або під керівництвом старших дослідників, індивідуальний внесок здобувачки є чітко ідентифікованим і стосується як теоретичної розробки, так й інтерпретації отриманих результатів.

Порушень академічної доброчесності в дисертації та наукових публікаціях не виявлено.

5. Достовірність та обґрунтованість отриманих результатів та запропонованих автором рішень, висновків, рекомендацій

Достовірність і обґрунтованість отриманих результатів визначається застосуванням у дослідженні ряду сучасних теорій, моделей і методів розрахунку: метод багаточастинкових полів для побудови динамічної моделі взаємодії протонів; теорія релятивістського розсіювання для побудови виразів для повних, парціальних та інклюзивних перерізів через амплітуду розсіювання; квантова теорія поля і вторинного квантування, а також діаграмний метод Р.Фейнмана для побудови внесків в амплітуду розсіювання, які виникають при розв’язку динамічних рівнянь квантових полів методом теорії збурень; теорія функцій комплексного змінного для визначення аналітичних властивостей підінтегральних виразів в інтегралах, що відповідають петльовим діаграмам і відповідного перетворення контурів інтегрування; метод Лапласа для розрахунку внесків основних сингулярностей підінтегрального виразу.

Розрахунки проводилися строго в межах динамічної моделі без додаткових припущень. Отримані результати були зіставлені із відомими і неодноразово перевіреними експериментальними даними, що демонструють ефект немонотонності залежності диференційного перерізу від квадрата переданого чотириімпульсу. Отримані в дисертації результати відтворюють цей експериментальний факт, хоча й на рівні якісної поведінки.

Методологію класифікації на основі інструменту “афіниті” було перевірено за допомогою масштабного числового моделювання та методів Монте-Карло, що гарантувало її стабільність, відтворюваність та сумісність з існуючими експериментальними даними для різних енергетичних шкал. Узгодженість отриманих результатів із встановленими теоретичними очікуваннями та експериментальними прогнозами додатково підтверджує їхню достовірність.

Крім того, результати дослідження були представлені та обговорені на відомих міжнародних наукових конференціях, семінарах та школах, де вони пройшли критичну оцінку експертами в цій галузі. Позитивний відгук та конструктивні відгуки наукової спільноти ще раз підтверджують наукову обґрунтованість та практичну актуальність запропонованих моделей та висновків.

6. Ступінь новизни основних результатів дисертаційної роботи порівняно з відомими дослідженнями аналогічного характеру

Наукова новизна результатів дисертації полягає в тому, що автором:

- вперше застосовано модель багаточастинкових полів для опису процесу розсіяння протонів як композитних частинок, що складаються з кварків і глюонів;
- вперше запропоновано алгоритм застосування метода Лапласа для розрахунку петльових фейнманівських діаграм;
- вперше описано ефект немонотонності залежності диференційного перерізу пружного розсіяння протонів від квадрату переданого чотириімпульсу (або від косинуса кута розльоту протонів в системі центра мас) в межах динамічної, а не феноменологічної моделі;

- розробка методології на основі інструменту “афіниті” для відображення TMD, колінеарних та проміжних областей у фазовому просторі SIDIS є концептуальною та технічною інновацією. Перехід до класифікації інструменту “афіниті” для кожної події покращує роздільну здатність кінематичних меж та зберігає кореляції в даних, які в іншому випадку усереднюються;

- отримані результати показують, що режим TMD виходить за межі раніше прийнятих меж, особливо при помірних енергіях (наприклад, JLab12), це свідчить про перегляд загальних кінематичних припущень, які використовуються в глобальних підгонках та експериментальних аналізах.

7. Наукове та практичне значення результатів дисертаційного дослідження

Отримані в дисертаційному дослідженні результати відкривають нові можливості для розрахунку петльових фейнманівських діаграм і, відповідно, нові можливості опису фізичних процесів за допомогою таких діаграм. Також показано, що модель багаточастинкових полів має потенціал для використання при описі експериментальних даних щодо адронних процесів.

Практичне значення отриманих результатів пов'язано з розробленими алгоритмами і комп'ютерними програмами, які можуть бути використані для подальшого вдосконалення з урахуванням більш складних петльових діаграм, що відповідають наступним порядкам теорії збурень.

Методології, розроблені в цій дисертації, пропонують практичні інструменти для вибору та аналізу даних у майбутніх експериментальних програмах. Ці інструменти можуть допомогти в оптимізації кінематичних розрізів, перевірці припущень щодо факторизації та управлінні вилученням непертурбативних вхідних даних у глобальних апроксимаціях.

8. Повнота опублікування результатів дисертаційного дослідження та особистий внесок здобувача до всіх наукових публікацій, опублікованих у співавторстві та зарахованих за темою дисертації

Результати дисертаційної роботи викладені в 3 публікаціях, що індексуються в наукометричній базі Scopus, 2 з яких опубліковані у журналах, віднесених до першого квартилю Q1 (відповідно до класифікації SCImago Journal and Country Rank) і додатково висвітлені в 5 тезах доповідей на міжнародних конференціях. Основні результати і зміст дисертації повністю висвітлено в цих публікаціях.

Особистий внесок здобувачки до всіх наукових публікацій, опублікованих у співавторстві та зарахованих за темою дисертації, полягає в наступному:

1. Laplace's method for elastic scattering diagrams within multiparticle fields model N. Chudak, I. Sharph, O. Potienko, A. Milieva, K. Merkotan, T. Yushkevych, and V. Rusov Phys. Rev. D 106, 036023.

<https://doi.org/10.1103/PhysRevD.106.036023> (2022)

Здобувачці належать проведення чисельних і аналітичних розрахунків, розробка алгоритмів та їх реалізація в виді комп'ютерних програм, пошук оптимальних значень параметрів і зіставлення із результатами експерименту.

Зокрема здобувачка провела пошук областей, які вносять найбільший внесок в підінтегральний вираз для внесків петльових діаграм в амплітуду пружного розсіяння протонів, розрахувала внески від цих областей із застосуванням метода Лапласа, провела усереднення отриманого виразу із спіновою матрицею густини, знайшла параметри, які забезпечують найкраще узгодження з експериментальними даними.

Спільно із іншими співавторами було розроблено метод застосування моделі багаточастинкових полів до опису процесу пружного розсіяння адронів. Здобувачкою було розроблено алгоритм застосування метода Лапласа в умовах наявності сингулярностей підінтегрального виразу притаманних інтегралам, що відповідають петлям на діаграмах Р. Фейнмана. У співробітництві із іншими співавторами аспірантка провела необхідні розрахунки для опису диференційного перерізу пружного розсіяння протонів за квадратом переданого чотириімпульсу.

2. O. Potiienko, K. Merkotan, N. Chudak, D. Ptashynskiy, T. Zelentsova, T. Yushkevich, I. Sharph, and V. Rusov, New method of accounting for interference contributions within a multiperipheral model, *Physical Review D* 101, 7 (2020).

<https://doi.org/10.1103/PhysRevD.101.076021>.

Здобувачці належить проведення чисельних розрахунків, розробка алгоритмів та їх реалізація в виді комп'ютерних програм.

Зокрема, здобувачка провела необхідні попередні розрахунки для застосування метода Лапласа – розрахунок похідних від логарифма квадрата модуля амплітуди розсіяння. Сумісно з співавторами були проведені необхідні розрахунки для застосування метода Лапласа до опису експериментальних даних щодо розсіяння протонів.

3. Ptashynskiy, D. A., Zelentsova, T. M., Chudak, N. O., Merkotan, K. K., Potiienko, O. S., Voitenko, V. V., Berezovskiy, O. D., Opyatyuk, V. V., Zharova, O. V., Yushkevich, T. V., Sharph, I. V., & Rusov, V. D. (2019). Multiparticle Fields on the Subset of Simultaneity. *Ukrainian Journal of Physics*, 64(8), 732. <https://doi.org/10.15407/ujpe64.8.732>

Здобувачці належить чисельний розрахунок потенціалу міжкваркової взаємодії в межах моделі багаточастинкових полів, побудова моделі протона як тричастинкового біспінорного поля отримання правил діаграмної техніки в межах моделі тричастинкового поля. Зокрема, їй належить отримання динамічних рівнянь для тричастинкового біспінорного поля, які описують внутрішню структуру протона непертурбативно, а взаємодію протонів пертурбативно.

Сумісно з іншими співавторами було розроблено алгоритм розрахунку потенціалу взаємодії між кварками. Розробку методу застосування цього алгоритму для розв'язку динамічних рівнянь тричастинкового біспінорного поля, які непертурбативно описують структуру протона, здобувачка провела самостійно.

4. T. Yushkevych, M. Boglione, A. Prokudin, "Afnity tool. Comparison between JLab12 and JLab22 "Science at the Luminosity Frontier: Jefferson Lab at 22 GeV" (9-12 December, Frascati, Italy, 2024).

<https://agenda.infn.it/event/39742/contributions/247698/>

Здобувачці належить концептуальна розробка підходу, модифікації інструменту “афініті” для класифікації кінематичних областей SIDIS, впровадження обчислювальних методів, а також аналіз отриманих результатів.

Інтерпретація кінцевих результатів та висновки зроблено сумісно з співавторами.

5. T. Yushkevych, N. Chudak, O. Potiienko, I. Sharph, Laplace method for single-loop diagrams of elastic proton scattering, 21-th Gamow International Astronomical Conference-School “Astronomy and beyond: astrophysics, cosmology and gravitation, high energy physics, astroparticle physics, radioastronomy and astrobiology”, August 15-21, 2021, Odessa, Ukraine.

<https://gamow.odessa.ua/wp-content/uploads/2021/08/gamow-abstracts-2021.pdf>.

Здобувачці належить розробка і реалізація алгоритму застосування метода Лапласа для розрахунку внесків від найпростіших петльових діаграм в моделі фітри з урахуванням сингулярної структури підінтегрального виразу. Аналітичні і чисельні розрахунки та отримання модельного виразу для диференційного перерізу пружного розсіяння за квадратом переданого чотири імпульсу проведено сумісно з співавторами.

6. T. Yushkevych, N. Chudak, O. Potiienko, A. Mileva, Application of the Laplace method for oneloop diagrams of elastic scattering of protons in the framework of multiparticle fields”, International Conference of Students and Young Researchers in Theoretical and Experimental Physics “HEUREKA- 4 2021”, May 18-20, 2021. Lviv, Ukraine

<https://physics.lnu.edu.ua/conferences/heureka2021/>

В цій роботі здобувачці належить розробка алгоритму застосування метода Лапласа з урахуванням сингулярностей підінтегрального виразу за наявності пропагаторів біспінорного тричастинкового поля, що відповідають протонам. Розрахунок амплітуди передбачав проміжний розрахунок 16 – компонентного тензора, компоненти якого здобувачка розраховувала сумісно з співавторами.

7. Yushkevich T., Potiienko O., Neboga H., “Modeling the interference effects in elastic hadrons scattering with the Monte Carlo event generator based on Laplace’s

method”, 20-th Gamow International Astronomical Conference- School “Astronomy and beyond: astrophysics, cosmology and gravitation, high energy physics, astroparticle physics, radioastronomy and astrobiology” 9–16 August, 2020, Odessa, Ukraine.

<http://gamow.odessa.ua/wp-content/uploads/2020/10/>

Здобувачці належать результати аналітичних і чисельних розрахунків для моделювання диференційного перерізу пружного розсіювання протонів. Сумісно з іншими співавторами - написання генератора подій, якій базується на цих розрахунках.

8. D.A. Ptahynskiy, T.V. Yushkevich, I.V. Sharph, V.D. Rusov, et.al, Multi-particle fields on a subset of simultaneity, Int. Cohf. New Trends in High-Energy Physics, May 12-18, 2019, Odessa, Ukraine.

<https://indico.bitp.kiev.ua/event/1/contributions/62/>

Здобувачці належить розробка методу опису тричастинкового біспінорного поля, розробка алгоритму розрахунку міжкваркового потенціалу для випадку трьох внутрішніх кварків. У співробітництві із іншими співавторами було показано, що динамічні рівняння багаточастинкових полів описують конфайнмент кварків та їх асимптотичну свободу. Аналогічні результати саме для випадку тричастинкового біспінорного поля протонів були отримані здобувачкою самостійно.

9. Апробація результатів дисертаційної роботи

Основні положення і результати дисертації доповідалися й обговорювалися на International School “Frontiers in Nuclear and Hadronic Physics 2025” (Galileo Galilei Institute, Florence, Italy, 2025), Міжнародній конференції “Science at the Luminosity Frontier: Jeferson Lab at 22 GeV” (Фраскати, Італія, 2024), IrisHEP Fellowship program (Princeton University, USA, 2022), 49th SLAC Summer Institute (California, USA, 2021), Amplitudes 2021 (Niels Bohr International Academy and the Niels Bohr Institute, Penn State, USA, 2021), 20-21 Gamow International Astronomical Conference-School “Astronomy and beyond: astrophysics, cosmology and gravitation, high energy physics, astroparticle physics, radioastronomy and astrobiology” (Odessa,

Ukraine, 2020; 2021), International Conference of Students and Young Researchers in Theoretical and Experimental Physics "HEUREKA- 2021" (Lviv, Ukraine, 2021), International Conference «New Trends in High-Energy Physics» (Odessa, Ukraine 2019).

10. Відповідність дисертаційної роботи вимогам, що передбачено пунктами 6 і 7 «Порядку присудження ступеня доктора філософії та скасування рішення разової спеціалізованої вченої ради закладу вищої освіти, наукової установи про присудження ступеня доктора філософії»

В цілому, дисертаційна робота є *завершеною науковою працею*, що відповідає вимогам спеціальності 104 Фізика та астрономія.

За актуальністю, науковою новизною, теоретичним, методичним та практичним значення, обґрунтованістю одержаних результатів та оформленням, дисертаційна робота Юшкевич Тетяни Владиславівни відповідає чинним вимогам Міністерства освіти і науки України, зокрема, п. п. 6 і 7 «Порядку присудження ступеня доктора філософії та скасування рішення разової спеціалізованої вченої ради закладу вищої освіти, наукової установи про присудження ступеня доктора філософії», та може бути рекомендована до захисту на здобуття ступеня доктора філософії у галузі знань 10 Природничі науки за спеціальністю 104 Фізика та астрономія.

Головуючий на засіданні,
завідувач кафедри теоретичної та
експериментальної ядерної фізики,
д.ф.-м.н., професор



Віктор ТАРАСОВ