

## АНОТАЦІЯ

*Юшкевич Т.В.* Пертурбативні та непертурбативні аспекти адронної фізики — Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата фізико-математичних наук (доктора філософії) за спеціальністю 104 Фізика та астрономія (10 — Природничі науки). — Національний університет «Одеська політехніка» МОН України, Одеса, та Туринський Університет, Турин (Італія), 2025.

Ця дисертація представляє комбіноване теоретичне та феноменологічне дослідження динаміки квантової хромодинаміки (КХД), зосереджуючись на двох взаємодоповнюючих аспектах.

По-перше, метод багаточастинкових полів використовується для побудови моделей процесів розсіювання протонів (антипротонів). Для апроксимації внесків петлевих діаграм у рамках цієї системи використовується метод Лапласа, який пропонує практичний, але потребуючий вдосконалення обчислювальний інструмент. Ця робота демонструє, що метод багаточастинкових полів дозволяє побудувати динамічну модель для опису процесів розсіювання протонів як системи кварків, досягаючи якісної узгодженості з експериментальними спостереженнями. Зокрема, застосування методу Лапласа забезпечує наближений, хоча й обчислювально вимогливий, підхід до оцінки петлевих діаграм у цих рамках. Показано, що експериментально спостережувана немонотонна поведінка диференціального перерізу пружного розсіювання протонів як функції квадрата переданого імпульсу виникає через спінові ефекти, які, будучи включеними як у деревоподібні, так і в прості петлеві діаграми, призводять до якісної узгодженості з експериментальними даними.

По-друге, розроблено методологію на основі спорідненості для дослідження кінематичного переходу між режимами поперечної залежності від імпульсу (TMD) та колінеарної факторизації в напівінклюзивному глибоконепружному розсіюванні (SIDIS). З цією метою пропонується детальна кінематична оцінка фазового простору SIDIS з використанням

підходу на основі інструменту "афініті". Ця методологія дозволяє надійно ідентифікувати області з домінуванням TMD, колінеарних теорем факторизації, а також області де вони збігаються, що надає нові можливості для дослідження механізмів факторизації та процесів адронізації. Перехід від усереднених по бінах до розрахунків "афініті" для кожної події зберігає суттєві кореляції між непертурбативними параметрами, що призводить до більш надійної класифікації кінематичних областей. Аналіз показує, що область TMD є ширшою, ніж очікувалося раніше, особливо в межах кінематики JLab12, тоді як колінеарна область стає добре доступною лише при вищих енергіях, таких як у JLab22 та електронно-іонного коллайдера. У рамках використання "афініті" стала можливою ідентифікація окремих TMD, колінеарної та TMD-колінеарного узгодження областей, що відкриває нові перспективи для вивчення взаємодії між режимами факторизації.

Результати цієї дисертації пропонують як теоретичні висновки, так і практичні інструменти для майбутніх досліджень структури нуклонів та процесів пружного розсіювання. Рекомендації для подальшого розвитку включають включення петльових діаграм вищого порядку в структуру розрахунків за методом багаточастинкових полів, вдосконалення обчислювальних методів, розширення аналізів на основі "афініті" на інші процеси та спрямування експериментальних зусиль через цільові кінематичні розрізи.

**Ключові слова:** Фізика високих енергій; феноменологія та експеримент; Квантова хромодинаміка (КХД): партони, кварки та глюони; Процеси жорсткого розсіювання; Багатокваркове розсіювання; Пружне розсіювання протонів; Спінова фізика; Апроксимація петльових діаграм; Інклюзивне та напівінклюзивне глибоконепружне розсіювання (DIS та SIDIS); Структура нуклона; Поперечна залежність від імпульсу (TMD); Колінеарна та TMD факторизація; Феноменологічне та математичне моделювання; Методи Монте-Карло; Нейронні мережі; Ядерні реакції

### **Список публікацій здобувача:**

Основні результати дисертаційної роботи викладено в 4 публікаціях, 3 з яких індексуються в наукометричній базі Scopus (2 статті опубліковано у виданні, віднесеному до першого квартилю (Q1) відповідно до

класифікації SCImago Journal and Country Rank). Додатково результати висвітлено у 5 тезах доповідей на міжнародних конференціях.

- *журнальні публікації:*

1. Chudak N., Sharph I., Potiienko O., Milieva A., Merkotan K., Yushkevych T. and Rusov V., Laplace's method for elastic scattering diagrams within multiparticle fields model, Phys. Review D 106, 3 (2022) DOI:<https://doi.org/10.1103/PhysRevD.106.036023>
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) DOI:<https://doi.org/10.1103/PhysRevD.101.076021>
3. D.A. Ptashynskiy, T.M. Zelentsova, N.O. Chudak, K.K. Merkotan, O.S. Potiienko, V.V. Voitenko, O.D. Berezovskiy, V.V. Opyatyuk, O.V. Zhavorova, T.V. Yushkevich, I.V. Sharph, V.D. Rusov, Multiparticle fields on the subset of simultaneity, Ukrainian Journal of Physics 64(8), 732 (2019). DOI: <https://doi.org/10.15407/ujpe64.8.732>

### **Апробація результатів дисертації**

- *тези конференцій:*

4. T. Yushkevych, M. Boglione, A. Prokudin, "Affinity tool. Comparison between JLab12 and JLab22 "Science at the Luminosity Frontier: Jefferson Lab at 22 GeV" (Frascati, Italy, 2024) (<https://agenda.infn.it/event/39742/contributions/247698/>)
5. T. Yushkevych, I. Sharph, et.al, "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, radio-astronomy and astrobiology", August 15-21, 2021 Odessa, Ukraine <https://gamow.odessa.ua/wp-content/uploads/2021/08/gamow-abstracts-2021.pdf>
6. T. Yushkevych, et.al, "Application of the Laplace method for one-loop 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-

2021”, May 18-20, 2021. Lviv, Ukraine <https://physics.lnu.edu.ua/conferences/heureka2021/>

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/>
8. D.A. Ptashynskiy, T.V. Yushkevich, I.V. Sharph, V.D. Rusov, et.al, “Multi-particle fields on a subset of simultaneity”, New Trends in High-Energy Physics, May 12-18, 2019, Odessa, Ukraine. <https://indico.bitp.kiev.ua/event/1/contributions/62/>

Окрім висвітлених вище в тезисах конференцій, 1 статтю додано до arXiv (Sharph I. V., Zelentsova T. M., Chudak N. O., Potiienko O. S., Ptashynskiy D. A., Merkotan K. K. Yushkevich T. V. and Milieva, A. O., Laplace method for the simplest diagrams of elastic scattering of scalar particles, <https://arxiv.org/abs/2003.07321>), а інша стаття наразі готується до публікації у журналі, що входить у базу Scopus. Також основні положення і результати дисертації доповідалися й обговорювалися на International School “Frontiers in Nuclear and Hadronic Physics 2025” (Galileo Galilei Institute, Florence, Italy, 2025), 49th SLAC Summer Institute (California, USA, 2021), Amplitudes 2021 (Niels Bohr International Academy and the Niels Bohr Institute, Penn State, USA, 2021), IrisHEP Fellowship program (Princeton University, USA, 2022) та Міжнародній конференції студентів і молодих науковців з теоретичної та експериментальної фізики “Еврика-2020” (Львів, 2020).

## ABSTRACT

*Yushkevych T. V.* Perturbative and Non-Perturbative Aspects of Hadronic Physics — Qualification scientific work presented as a manuscript.

Dissertation for the degree of Candidate of Physical and Mathematical Sciences (PhD) in the specialty 104 — Physics and Astronomy (10 — Natural Sciences). — Odesa National Polytechnic University, Ministry of Education and Science of Ukraine, Odessa, and University of Turin, Turin (Italy), 2025.

This thesis presents a combined theoretical and phenomenological investigation of QCD dynamics, focusing on two complementary aspects.

First, the method of multiparticle fields is applied to construct models of proton (antiproton) scattering processes. To approximate the contribution of loop diagrams within this framework, the Laplace method is used, providing a practical yet improvable computational tool. This work demonstrates that the method of multiparticle fields allows for the construction of a dynamical model to describe proton scattering processes as a system of quarks, achieving qualitative agreement with experimental observations. In particular, the application of the Laplace method offers an approximate, albeit computationally demanding, approach for evaluating loop diagrams in these models. It is shown that the experimentally observed non-monotonic behavior of the differential cross section for elastic proton scattering as a function of the squared momentum transfer arises from spin effects, which, when incorporated into both tree-level and simple loop diagrams, lead to qualitative agreement with experimental data.

Second, an affinity-based methodology is developed to explore the kinematic transition between transverse momentum dependent (TMD) and collinear factorization regimes in semi-inclusive deep inelastic scattering (SIDIS). For this purpose, a detailed kinematic assessment of the SIDIS phase space is proposed using the "affinity" tool. This methodology enables the identification of regions dominated by TMD factorization, collinear factorization, as well as the matching region where both regimes overlap, providing new opportunities to investigate the factorization scheme and the hadroni-

zation mechanism. The transition from bin-averaged to event-by-event affinity calculations preserves essential correlations among non-perturbative parameters, leading to a more reliable classification of kinematic regions. The analysis shows that the TMD region is broader than previously expected, especially within the JLab12 kinematics, while the collinear region becomes well accessible only at higher energies, like those of JLab22 and the Electron-Ion Collider. Within the affinity framework, the identification of distinct TMD, Collinear and Matching Regions becomes possible, providing new prospects for studying the interplay between factorization regimes.

The findings of this thesis work offer both theoretical insights and practical tools for future studies of nucleon structure and hard scattering processes. Recommendations for further development include incorporating higher-order loop diagrams into the multiparticle field framework, refining computational methods, extending affinity-based analyses to other processes, and guiding experimental efforts through targeted kinematic cuts.

**Key words:** High-Energy Physics: phenomenology and experiment; Quantum Chromodynamics (QCD): partons, quarks and gluons; Hard Scattering Processes; Multi-Quark Scattering; Proton Elastic Scattering; Spin Physics; Loop Diagram Approximation; Inclusive and Semi-inclusive Deep Inelastic Scattering (DIS and SIDIS); Nucleon Structure; Transverse Momentum Dependence (TMD); Collinear and TMD Factorization; Phenomenological and mathematical modeling; Monte Carlo methods; Neural Networks; Nuclear reactions

### List of Publications of the Author:

The main results of the dissertation are presented in 4 publications, 3 of which are indexed in the Scopus scientometric database (2 articles published in journals ranked in the first quartile (Q1) according to the SCImago Journal and Country Rank classification). Additionally, the results have been presented in 5 conference abstracts at international scientific conferences.

- *journal publications:*

1. Chudak N., Sharph I., Potiienko O., Milieva A., Merkotan K., Yushkevych T. and Rusov V., Laplace's method for elastic scattering diagrams within multiparticle fields model, Phys. Review D 106, 3 (2022) DOI:<https://doi.org/10.1103/PhysRevD.106.036023>
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) DOI:<https://doi.org/10.1103/PhysRevD.101.076021>

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

### **Approbation of the results of the dissertation**

- *conference abstracts:*

4. T. Yushkevych, M. Bogleone, A. Prokudin, "Affinity tool. Comparison between JLab12 and JLab22 "Science at the Luminosity Frontier: Jefferson Lab at 22 GeV" (Frascati, Italy, 2024) (<https://agenda.infn.it/event/39742/contributions/247698/>)
5. T. Yushkevych, I. Sharph, et.al, "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, radio-astronomy and astrobiology", August 15-21, 2021 Odessa, Ukraine <https://gamow.odessa.ua/wp-content/uploads/2021/08/gamow-abstracts-2021.pdf>
6. T. Yushkevych, et.al, "Application of the Laplace method for one-loop 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-2021", May 18-20, 2021. Lviv, Ukraine <https://physics.lnu.edu.ua/conferences/heureka2021/>
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:](http://)

[//gamow.odessa.ua/wp-content/uploads/2020/10/](https://gamow.odessa.ua/wp-content/uploads/2020/10/)

8. D.A. Ptashynskyi, T.V. Yushkevich, I.V. Sharph, V.D. Rusov, et.al, “Multi-particle fields on a subset of simultaneity”, New Trends in High-Energy Physics, May 12-18, 2019, Odessa, Ukraine. <https://indico.bitp.kiev.ua/event/1/contributions/62/>

In addition to the publications and conference abstracts listed above, one article has been uploaded to arXiv (Sharph I. V., Zelentsova T. M., Chudak N. O., Potiienko O. S., Ptashynskiy D. A., Merkotan K. K. Yushkevich T. V. and Milieva, A. O., Laplace method for the simplest diagrams of elastic scattering of scalar particles, eprint arXiv:2003.07321, <https://arxiv.org/abs/2003.07321>), and another article is currently being prepared for submission to a Scopus-indexed journal. The main results and conclusions of the dissertation have also been presented and discussed at the International School “Frontiers in Nuclear and Hadronic Physics 2025” (Galileo Galilei Institute, Florence, Italy, 2025), the 49th SLAC Summer Institute (California, USA, 2021), the “Amplitudes 2021” workshop (Niels Bohr International Academy and Niels Bohr Institute, Penn State, USA, 2021), IrisHEP Fellowship program (Princeton University, USA, 2022) and the International Conference of Students and Young Scientists in Theoretical and Experimental Physics “Eureka-2020” (Lviv, Ukraine, 2020).