

## АНОТАЦІЯ

Потієнко О.С. Метод Лапласа для опису інтерференційних ефектів в протон-протонному розсіянні і для побудови Монте-Карло генераторів. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора філософії за спеціальністю 104 Фізика та астрономія – Одеський національний політехнічний університет, Одеса, 2020.

Дисертацію присвячено розробці методу врахування інтерференційних внесків в виразах для перерізів протон-протонного розсіяння і при Монте-Карло генерації непружних подій методом матричних елементів. Всі розрахунки проведено в межах модельної теорії  $\phi^3$  із дійсним скалярним полем, але можуть застосовуватися в КХД та інших калібрувальних теоріях.

Розроблено новий метод розрахунку інтерференційних внесків, заснований на застосуванні методу Лапласа не для кожного інтерференційного внеску окремо, а для сум внесків із близькими точками максимуму. За допомогою цього методу проведено розрахунки парціальних перерізів та інклюзивних перерізів по швидкості з урахуванням кінцевих станів, що містять до 50 частинок. Вперше дано теоретичне пояснення зміни характеру залежності інклюзивного перерізу від швидкості вторинних частинок саме як інтерференційного ефекту. Розроблено і реалізовано відповідні розрахункові алгоритми.

Розроблено новий метод Монте-Карло генерування подій на основі на методу Лапласа із застосуванням розробленого методу інтерференційних внесків. Цей метод значно розширює можливості застосування методу матричних елементів при генерації непружних подій, дозволяючи генерувати події із утворенням великої кількості вторинних частинок.

Розроблено алгоритмічний метод врахування інтерференційних ефектів при генерації непружних подій. Отримані результати, а також реалізовані

алгоритми можуть бути використані як підпрограми в існуючих генераторах подій та інтеграторах перерізів.

Показано, що максимум модуля деревної діаграми з однією вхідною і довільною кількістю вихідних частинок досягається при однакових чотириімпульсах вихідних частинок. З урахуванням суми по перестановках вихідних частинок це призводить до факторіального підсилення константи зв'язку. Цей результат суттєво відрізняється від виявленого в моделі ДГЛАП підсилення ступенями великого логарифму і доказує суттєвість внеску в перерізи розсіяння іншої ніж в ДГЛАП області фазового простору. Таким чином, виявлено новий механізм когерентності тотожних частинок в зливах, який може бути не тільки врахований при побудові генераторів подій, а й може бути використаний для створення лазерів на принципово новій основі ніж існуючі. Окрім того, отримані результати дозволяють проводити генерацію злив (партонних або адронних в залежності від моделі) методом матричних елементів.

Показано, що в процесах з утворенням декількох злив суттєву роль грають внески, пов'язані із перестановками частинок між різними зливами, тобто доведено необхідність врахування інтерференції між зливами при теоретичних розрахунках і генеруванні подій. Показано, що запропоновані в дисертації методи можуть бути застосовані для чисельних розрахунків і генерації подій для випадку процесів з утворенням декількох багаточастинкових злив.

*Ключові слова:* протон-протонне розсіяння, інтерференційні внески, інтерференційні ефекти, парціальні перерізи, інклюзивні перерізи по швидкості вторинних частинок, Монте-Карло генератори, партонні зливи, адронні зливи.

## **СПИСОК ПУБЛІКАЦІЙ ЗДОБУВАЧА**

Основні результати дисертаційної роботи викладено в 18 публікаціях, 6 з яких індексуються в наукометричній базі Scopus, у тому числі в 8 статтях у наукових фахових виданнях України та інших держав (1 статтю опубліковано у

виданні, віднесеному до першого квартилю (Q 1) відповідно до класифікації SCImago Journal and Country Rank), 2 статтях у збірниках наукових праць міжнародних конференцій і додатково висвітлено в 8 тезах доповідей на міжнародних конференціях.

1. 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://journals.aps.org/prd/abstract/10.1103/PhysRevD.101.076021>

2. Чудак Н.О., Меркотан К.К., Пташинський Д.А., Потієнко О.С., Делієргієв М.А., Тихонов А.В., Сохранний Г.О., Жарова О.В., Березовський О.Д., Войтенко В.В., Волкотруб Ю.В., Шарф І.В., Русов В.Д., Внутрішні стани адронів в релятивістських системах відліку, *Укр. фіз. жур.* 61(12), 1033 (2016).  
<https://ujp.bitp.kiev.ua/index.php/ujp/article/view/2019004>

3. Чудак Н.О., Меркотан К.К., Пташинський Д.А., Потієнко О.С., Шарф І.В., Брегід В.І., Розрахунок диференціального перерізу пружного розсіяння адронів за переданим чотириімпульсом в межах теорії збурень, *Журн. фіз. досл.* 23(1), 1101 (2019).  
[http://physics.lnu.edu.ua/jps/index\\_ua.html](http://physics.lnu.edu.ua/jps/index_ua.html)

4. 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. Zharova, T.V. Yushkevich, I.V. Sharph, V.D. Rusov, Multiparticle fields on the subset of simultaneity, *Ukrainian Journal of Physics* 64(8), 732 (2019).  
<https://ujp.bitp.kiev.ua/index.php/ujp/article/view/2019394/1441>

5. Меркотан К.К., Зеленцова Т.М., Чудак Н.О., Пташинський Д.А., Урбаневич В.В., Потієнко О.С., Войтенко В.В., Березовський О.Д., Шарф І.В., Русов В.Д., Багаточастинкові поля і механізм Хіггса, *Журн. фіз. досл.* 22(3), 3001 (2018).  
<http://physics.lnu.edu.ua/jps/index.html>

6. N. Chudak, M. Deliyergiyev, K. Merkotan, O. Potiienko, D. Ptashynskiy, Y. Shabatura, G. Sokhrannyi, A. Tykhonov, Y. Volkotrub, I. Sharph, V. Rusov, Multi-Particle Quantum Fields, J Phys Stud 2(3), 181 (2016).

<http://www.aiscience.org/journal/paperInfo/pj?paperId=2183>

7. K.K. Merkotan, T.M. Zelentsova, N.O. Chudak, D.A. Ptashynskiy, V.V. Urbanevich, O.S. Potiienko, V.V. Voitenko, O.D. Berezovskyi, I.V. Sharph, V.D. Rusov, A New Symmetry of Electroweak Lagrangian, East Eur. J. Phys. 5(2), 35 (2018).

<http://eejp.univer.kharkov.ua/Biblio/2018/52p35-48.pdf>

8. Ю.Волкотруб, І. Шарф, В. Русов, Н.Чудак (Подольян), О. Потієнко, Д. Пташинський, К.Меркотан, А.Тихонов, М.Делієргієв, В.Урбаневич, Метод Лапласа для Монте-Карло-генераторів процесів розсіяння, Науковий вісник Ужгородського університету. Серія Фізика 38, 96 (2015).

[http://fizyka-visnyk.uzhnu.edu.ua/article/view/110753/pdf\\_13](http://fizyka-visnyk.uzhnu.edu.ua/article/view/110753/pdf_13)

9. I.V Sharf, K. K. Merkotan, N. A. Podolyan, D. A. Ptashynskyy, A. V. Tykhonov, M. A. Deliyergiyev, G. O. Sokhrannyi, Y. V. Volkotrub, O.S. Potiienko, V. D. Rusov, On equivalence of gluon-loop exchange in the inelastic processes in perturbative QCD to pion exchange in  $\phi^3$  theory, EPJ Web of Conferences 60, 20018 (2013).

[https://www.epj-conferences.org/articles/epjconf/pdf/2013/21/epjconf\\_lhcp2013\\_20018.pdf](https://www.epj-conferences.org/articles/epjconf/pdf/2013/21/epjconf_lhcp2013_20018.pdf)

10. K.K. Merkotan, T.M. Zelentsova, N.O. Chudak, D.A. Ptashynskiy, V.V. Urbanevich, O.S. Potiienko, V.V. Voitenko, O.D. Berezovskyi, I.V. Sharph, V.D. Rusov, An alternative method of an electromagnetic field introduction into a Standard Model, in Proceedings of International Conference of Young Scientists “Problems of Physics and Astronomy”, edited by A.M. Maharramov (Baku University Publishing House, Baku, 2017), 82.

<http://static.bsu.az/w10/Shekil/Conferences/MagistrLAR%20ve%20Tedqiqatcilar/Arxiv/2018/Conf%20tam.pdf>

11. N. Chudak, D. Ptashynskiy, A. Potienko, Multi-particle field operators as a method for hadron scattering description, in Abstracts of Posters of Wilhelm und Else Heraeus-Stiftung Physics School “QCD - Old Challenges and New Opportunities” (WE-Heraeus Physics School, Bad Honnef, 2017).  
<https://www.we-heraeus-stiftung.de/veranstaltungen/schulen/2017/qcd-old-challenges-and-new-opportunities/>

12. O. S. Potiienko, A new method for Monte-Carlo event generators of the scattering processes, in Abstracts of 18-th Odessa International Astronomical Gamov Conference-School “Astronomy and Beyond: Astrophysics, Cosmology, Cosmomicrophysics, Astroparticle Physics, Radioastronomy and Astrobiology” (Odessa, 2018), 14.

[ftp://ftp.mao.kiev.ua/pub/journals/discrete/abstracts\\_gamow\\_2018.pdf](ftp://ftp.mao.kiev.ua/pub/journals/discrete/abstracts_gamow_2018.pdf)

13. Ptashynskiy Dmytro, Chudak Nataliia, Merkotan Kyrylo, Potiienko Oleksii, A New Symmetry of Electroweak Lagrangian, in Proceedings of the Thirteenth Conference on the Intersections of Particle and Nuclear Physics (CIPANP 2018), edited by Wick Haxton, eConf C180529, 91.

<https://conferences.lbl.gov/event/137/session/12/>

14. O. Potiienko, I. Sharf, The new method of interference contributions accounting for inelastic scattering diagrams, in Abstracts of Wilhelm und Else Heraeus-Stiftung Physics School “Diffractive and electromagnetic processes at high energies” (WE-Heraeus Physics School, Bad Honnef, 2015).

<http://school-diff2015.physi.uni-heidelberg.de>

15. Dmytro Ptashynskiy, Nataliia Chudak, Oleksii Potiienko, Kyrylo Merkotan, Multi-particle fields as a method for hadron’s description, in Book of Abstracts of 8th International Workshop on Astronomy and Relativistic Astrophysics (IWARA2018, Ollantaytambo, 2018), 35.

<https://indico.cern.ch/event/646046/book-of-abstracts.pdf>

16. Н.О. Чудак, К.К. Меркотан, Д.А. Пташинський, О. С. Потієнко, В.І. Брегід, Розрахунок диференціального перерізу пружного розсіяння адронів за переданим чотириімпульсом в межах теорії збурень, Тези доповідей

Міжнародної конференції студентів і молодих науковців з теоретичної та експериментальної фізики (Еврика-2018), (Львівський національний університет імені Івана Франка, Львів, 2018), Е6.

[http://old.physics.lnu.edu.ua/confer/heureka2018/ua\\_index.php](http://old.physics.lnu.edu.ua/confer/heureka2018/ua_index.php)

17. Д.А. Пташинський, Н.О. Чудак, К.К. Меркотан, О. С. Потієнко, В.І. Брегід, Багаточастинкові польові оператори в квантовій теорії поля, Тези доповідей Міжнародної конференції студентів і молодих науковців з теоретичної та експериментальної фізики (Еврика-2018), (Львівський національний університет імені Івана Франка, Львів, 2018), Е4.

[http://old.physics.lnu.edu.ua/confer/heureka2018/ua\\_index.php](http://old.physics.lnu.edu.ua/confer/heureka2018/ua_index.php)

18. І.В. Шарф, О.С. Потієнко, Н.О. Подолян, Ю.В. Волкотруб, Д.А. Пташинський, К.К. Меркотан, А.В. Тихонов, М.А. Делієргієв, В.Д. Русов, Ю.В. Харитонов, Новий метод врахування інтерференційних внесків для діаграм непружного розсіяння, Матеріали міжнародної конференції молодих учених і аспірантів, (Береза А.Е., Ужгород, 2015), 207.

<http://www.nas.gov.ua/UA/Book/Pages/default.aspx?BookID=0000009639>

## ABSTRACT

Potiienko O.S. Laplace's method for description of the interference effects in proton-proton scattering and for Monte Carlo event generators.

Dissertation for obtaining a degree of Doctor of Philosophy in specialty 104 Physics and Astronomy - Odessa National Polytechnic University, Odessa, 2020.

Thesis is devoted to the development of a method of accounting for the interference contributions for both the calculations of proton-proton scattering cross sections and the Monte Carlo event generations of inelastic processes using matrix elements method. Although all the calculations are performed within the real scalar  $\phi^3$  model, the method can be used for QCD and other gauge theories.

The new method of accounting for interference contributions is developed. The main idea behind the method is to apply the Laplace's method not for each of the interference contributions but rather for the sum of contributions with the close maximum points. The method was used to calculate the partial cross-sections and inclusive rapidity distributions with accounting for the final states containing up to 50 secondary particles. The theoretical explanation for the energy dependence of the shape of inclusive rapidity distribution is provided for the first time, considering this dependence exactly as the interference effect. All the corresponding computational algorithms are also implemented.

The new method for Monte Carlo event generations is developed. It is based on the ideas behind the method of accounting for the interference contributions, which significantly extends the potentials of application of the matrix elements method for the generation of inelastic scattering events. This method makes possible the generation of events with the large number of secondary particles.

The new algorithmic method of accounting for the interference effects for generation of inelastic scattering events is developed. The algorithms can be used as the subroutines in existing event generators and cross-section integrators.

It is shown that the modulus of the tree diagram amplitude with one incoming particle and an arbitrary number of outgoing particles reaches its maximum at equal four-momenta of the outgoing particles. Taking into account the sum over the permutations of outgoing particles, all this facts leads to the factorial amplification of the coupling. This result differs significantly from the amplification in DGLAP caused by the powers of large logarithm, which evidences about the significance of the phase space region different from that in DGLAP.

Thus the new mechanism of the coherence of secondary particles in the showers is established. This mechanism can be taken into account not only for development of event generations, but also can be used for development of lasers based on new principles. Moreover, the obtained results makes possible generations of the particle showers (parton or hadron, depending on a model) using the method of matrix elements. It is shown that in the processes with formation of multiple showers the significant role is played by the contributions arose from the permutations of secondary particles between showers. It evidences the necessity of accounting for the interference between showers when calculating the cross-sections or generating events.

It is shown that the methods proposed in the dissertation can be used for the numerical calculations and events generation for the processes with formation of several multi-particle showers.

*Keywords:* proton-proton scattering, interference contribution, interference effect, partial cross-section, inclusive rapidity distribution, Monte Carlo event generator, parton shower, hadron shower.

## **LIST OF PUBLICATIONS**

The main results of the dissertation are exposed in 18 publications, including 6 publications indexed in scientometric database Scopus, 8 articles published in professional editions of Ukraine and another countries (1 article is published in the edition of the first quartile (Q 1), according to the classification SCImago Journal and



Country Rank), 2 articles published in the collections of scientific works of the international conferences, and additionally exposed in 8 abstracts of international conferences.

1. 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://journals.aps.org/prd/abstract/10.1103/PhysRevD.101.076021>

2. N.O. Chudak, K.K. Merkotan, D.A. Ptashynskiy, O.S. Potiienko, M.A. Deliyergiyev, A.V. Tykhonov, G.O. Sokhrannyi, O.V. Zharova, O.D. Berezovs`kyi, V.V. Voitenko, Yu.V. Volkotrub, I.V. Sharph, V.D. Rusov, Internal states of hadrons in relativistic reference frames, *Ukr. J. Phys.* 61(12), 1033 (2016).

<https://ujp.bitp.kiev.ua/index.php/ujp/article/view/2019004>

3. N.O. Chudak, K.K. Merkotan, D.A. Ptashynskiy, O.S. Potiienko, I.V. Sharf, V.I. Bregid, The calculation of the differential cross section of hadron elastic scattering by transferred four-momentum within the perturbation theory, *J Phys Stud* 23(1), 1101(2019).

[http://physics.lnu.edu.ua/jps/index\\_ua.html](http://physics.lnu.edu.ua/jps/index_ua.html)

4. 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. Zharova, T.V. Yushkevich, I.V. Sharph, V.D. Rusov, Multiparticle fields on the subset of simultaneity, *Ukrainian Journal of Physics* 64(8), 732 (2019).

<https://ujp.bitp.kiev.ua/index.php/ujp/article/view/2019394/1441>

5. K.K. Merkotan, T.M. Zelentsova, N.O. Chudak, D.A. Ptashynskiy, V.V. Urbanevich, O.S. Potiienko, V.V. Voitenko, O.D. Berezovs`kiy, I.V. Sharf, V.D. Rusov, Multiparticle fields and Higgs mechanism, *J Phys Stud* 22(3), 3001 (2018).

<http://physics.lnu.edu.ua/jps/index.html>

6. N. Chudak, M. Deliyergiyev, K. Merkotan, O. Potiienko, D. Ptashynskiy, Y. Shabatura, G. Sokhrannyi, A. Tykhonov, Y. Volkotrub, I. Sharph, V. Rusov, Multi-Particle Quantum Fields, *J Phys Stud* 2(3), 181 (2016).

<http://www.aiscience.org/journal/paperInfo/pj?paperId=2183>

7. K.K. Merkotan, T.M. Zelentsova, N.O. Chudak, D.A. Ptashynskiy, V.V. Urbanevich, O.S. Potiienko, V.V. Voitenko, O.D. Berezovskyi, I.V. Sharph, V.D. Rusov, A New Symmetry of Electroweak Lagrangian, East Eur. J. Phys. 5(2), 35 (2018).

<http://eejp.univer.kharkov.ua/Biblio/2018/52p35-48.pdf>

8. Yu. Volkotrub, I. Sharf, V. Rusov, N. Chudak (Podolyan), O. Potiienko, D. Ptashynskiy, K. Merkotan, A. Tykhonov, M. Deliyergiyev, V. Urbanevich, Laplace's method for Monte Carlo event generators for the scattering processes, Scientific Herald of Uzhhorod University. Series Physics 38, 96 (2015).

[http://fizyka-visnyk.uzhnu.edu.ua/article/view/110753/pdf\\_13](http://fizyka-visnyk.uzhnu.edu.ua/article/view/110753/pdf_13)

9. I.V Sharf, K. K. Merkotan, N. A. Podolyan, D. A. Ptashynskyy, A. V. Tykhonov, M. A. Deliyergiyev, G. O. Sokhrannyi, Y. V. Volkotrub, O.S. Potiyenko, V. D. Rusov, On equivalence of gluon-loop exchange in the inelastic processes in perturbative QCD to pion exchange in  $\phi^3$  theory, EPJ Web of Conferences 60, 20018 (2013).

[https://www.epj-conferences.org/articles/epjconf/pdf/2013/21/epjconf\\_lhcp2013\\_20018.pdf](https://www.epj-conferences.org/articles/epjconf/pdf/2013/21/epjconf_lhcp2013_20018.pdf)

10. K.K. Merkotan, T.M. Zelentsova, N.O. Chudak, D.A. Ptashynskiy, V.V. Urbanevich, O.S. Potiienko, V.V. Voitenko, O.D. Berezovskyi, I.V. Sharph, V.D. Rusov, An alternative method of an electromagnetic field introduction into a Standard Model, in Proceedings of International Conference of Young Scientists "Problems of Physics and Astronomy", edited by A.M. Maharramov (Baku University Publishing House, Baku, 2017), 82.

<http://static.bsu.az/w10/Shekil/Conferences/MagistrLAR%20ve%20Tedqiqatcilar/Arxiv/2018/Conf%20tam.pdf>

11. N. Chudak, D. Ptashynskiy, A. Potienko, Multi-particle field operators as a method for hadron scattering description, in Abstracts of Posters of Wilhelm und Else Heraeus-Stiftung Physics School "QCD - Old Challenges and New Opportunities" (WE-Heraeus Physics School, Bad Honnef, 2017).

<https://www.we-heraeus-stiftung.de/veranstaltungen/schulen/2017/qcd-old-challenges-and-new-opportunities/>

12. O. S. Potiienko, A new method for Monte-Carlo event generators of the scattering processes, in Abstracts of 18-th Odessa International Astronomical Gamov Conference-School “Astronomy and Beyond: Astrophysics, Cosmology, Cosmomicrophysics, Astroparticle Physics, Radioastronomy and Astrobiology” (Odessa, 2018), 14.

[ftp://ftp.mao.kiev.ua/pub/journals/discrete/abstracts\\_gamow\\_2018.pdf](ftp://ftp.mao.kiev.ua/pub/journals/discrete/abstracts_gamow_2018.pdf)

13. Ptashynskiy Dmytro, Chudak Nataliia, Merkotan Kyrylo, Potiienko Oleksii, A New Symmetry of Electroweak Lagrangian, in Proceedings of the Thirteenth Conference on the Intersections of Particle and Nuclear Physics (CIPANP 2018), edited by Wick Haxton, eConf C180529, 91.

<https://conferences.lbl.gov/event/137/session/12/>

14. O. Potiienko, I. Sharf, The new method of interference contributions accounting for inelastic scattering diagrams, in Abstracts of Wilhelm und Else Heraeus-Stiftung Physics School “Diffractive and electromagnetic processes at high energies” (WE-Heraeus Physics School, Bad Honnef, 2015).

<http://school-diff2015.physi.uni-heidelberg.de>

15. Dmytro Ptashynskiy, Nataliia Chudak, Oleksii Potiienko, Kyrylo Merkotan, Multi-particle fields as a method for hadron’s description, in Book of Abstracts of 8th International Workshop on Astronomy and Relativistic Astrophysics (IWARA2018, Ollantaytambo, 2018), 35.

<https://indico.cern.ch/event/646046/book-of-abstracts.pdf>

16. N.O. Chudak, K.K. Merkotan, D.A. Ptashynskiy, O.S. Potiienko, V.I. Bregid, Calculation of the differential cross-section of elastic hadrons scattering on the transferred fourmomenta within the perturbation theory, in Abstracts of International conference of students and young scientists in theoretical and experimental physics (Heureka-2018), (Ivan Franko National University of Lviv, Lviv, 2018), E6.

[http://old.physics.lnu.edu.ua/confer/heureka2018/ua\\_index.php](http://old.physics.lnu.edu.ua/confer/heureka2018/ua_index.php)

17. D.A. Ptashynskiy, N.O. Chudak, K.K. Merkotan, O.S. Potienko, V.I. Bregid, Multiparticle field operators in quantum field theory, in Abstracts of International conference of students and young scientists in theoretical and experimental physics (Heureka-2018), (Ivan Franko National University of Lviv, Lviv, 2018), E4.

[http://old.physics.lnu.edu.ua/confer/heureka2018/ua\\_index.php](http://old.physics.lnu.edu.ua/confer/heureka2018/ua_index.php)

18. I.V. Sharf, O.S. Potienko, N.O. Podolyan, Yu.V. Volkotrub, D.A. Ptashynskiy, K.K. Merkotan, A.V. Tykhonov, M.A. Deliyergiyev, V.D. Rusov, Yu.V. Kharytonova, New method of accounting for the interference contributions for the inelastic scattering diagrams, in Proceedings of International conference of young scientists and postgraduates, (Bereza A.E., Uzhgorod, 2015), 207.

<http://www.nas.gov.ua/UA/Book/Pages/default.aspx?BookID=0000009639>