



ЗАТВЕРДЖУЮ

Директор Інституту теоретичної фізики  
ім. М. М. Боголюбова НАН України  
академік НАН України  
Анатолій ЗАГОРОДНІЙ

*[Handwritten signature]*  
“ 15 ” квітня 2024 р.

### ВИСНОВОК

Відділу фізики високих густин енергії  
Інституту теоретичної фізики ім. М.М. Боголюбова НАН України про наукову  
новизну, теоретичне та практичне значення результатів  
дисертації Савчука Олега Володимировича на тему:  
“Рівняння стану сильновзаємодійної матерії та релятивістські зіткнення  
важких іонів”  
поданої на здобуття ступеня доктора філософії з галузі знань 10 - Природничі  
науки за спеціальністю 104 - Фізика та астрономія

### ВИТЯГ

з протоколу № 1 від 10 квітня 2024 р. засідання  
відділу фізики високих густин енергії  
Інституту теоретичної фізики ім. М. М. Боголюбова НАН України

**СЛУХАЛИ:** аспіранта відділу фізики високих густин енергії Інституту  
теоретичної фізики ім. М. М. Боголюбова НАН України Савчука Олега  
Володимировича за матеріалами дисертаційної роботи “Рівняння стану  
сильновзаємодійної матерії та релятивістські зіткнення важких іонів”, що  
висувається на здобуття наукового ступеня доктора філософії з галузі знань  
10 - Природничі науки за спеціальністю 104 - Фізика та астрономія

### ПРИСУТНІ:

керівник семінару – доктор філософії, Мусфер АДЖИМАМБЕТОВ;  
доктор фіз.-мат. наук, проф. Марк ГОРЕНШТЕЙН;  
доктор фіз.-мат. наук, проф. Юрій СИНЮКОВ;  
доктор фіз.-мат. наук, проф. Євген МАРТИНОВ;  
доктор фіз.-мат. наук, проф. Олександр МАГНЕР;  
доктор фіз.-мат. наук, проф. Олександр ГАВРИЛИК;

доктор фіз.-мат. наук, Андрій НАЗАРЕНКО;  
доктор фіз.-мат. наук, Олег БОРИСЕНКО;  
доктор фіз.-мат. наук, Сергій ПЕРЕПЕЛИЦЯ;  
кандидат фіз.-мат. наук, Борис ГРИНЮК;  
кандидат фіз.-мат. наук, Володимир ГОРКАВЕНКО;  
кандидат фіз.-мат. наук, Олександр ЧЕРНЯК;  
кандидат фіз.-мат. наук, Володимир ШАПОВАЛ;  
кандидат фіз.-мат. наук, Антон РУДАКОВСЬКИЙ;  
кандидат фіз.-мат. наук, Роман ПОБЕРЕЖНЮК;  
кандидат фіз.-мат. наук, Сергій ОМЕЛЬЧЕНКО;  
кандидат фіз.-мат. наук, Сергій АККЕЛІН;  
кандидат фіз.-мат. наук, Сергій ВОЛОШИН;  
Володимир КУЗНЕЦОВ;  
Олександр СТАШКО.

**УХВАЛИЛИ:** вважати дисертаційну роботу Савчука Олега Володимировича “Рівняння стану сильновзаємодійної матерії та релятивістські зіткнення важких іонів” завершеним науковим дослідженням і затвердити такий висновок.

### **ВИСНОВОК**

Дисертаційна робота Савчука Олега Володимировича “Рівняння стану сильновзаємодійної матерії та релятивістські зіткнення важких іонів” написана за матеріалами робіт, що виконані ним під час навчання в аспірантурі в Інституті теоретичної фізики ім. М. М. Боголюбова НАН України (2021-2024 рр.) у відділі фізики високих густин енергії. Тема дисертації затверджена на засіданні вченої ради Інституту теоретичної фізики ім. М. М. Боголюбова НАН України від 27 грудня 2021р., науковим керівником призначено доктора фіз.-мат. наук, професора Марка Горенштейна.

#### **Актуальність роботи.**

Існує чотири типи фундаментальних взаємодій: сильна, електромагнітна, слабка та гравітаційна. Цей поділ зумовлений масштабами, на яких діють ці сили, а також особливостями фундаментальних частинок, яким ці взаємодії відповідають. Найзвичнішими для нас є електромагнітна та гравітаційна взаємодії. Гравітація утримує людину на поверхні планети та примушує тіла

падати. Вивчення властивостей тіл, які падають, стало основою для зародження фізики.

Електромагнітна взаємодія відповідає за властивості атомів хімічних елементів, зокрема утримує молекулу ДНК разом. Тонкий контроль струму і напруги електричних елементів лежить в основі сучасної електротехніки. Слабкі взаємодії проявляються при дуже великих енергіях у релятивістських зіткненнях лептонів та в ядерних перетвореннях, в лабораторіях, та Всесвіті. Сильні взаємодії також можуть бути виявлені в умовах високої густини енергії. Крім того, вони існують у нормальних умовах і в певному сенсі є визначальними. Достатньо зазначити будову ядра, утвореного з протонів та нейтронів, які взаємодіють саме сильною взаємодією. Або розглядати будову протона чи нейтрона, які складаються з кварків. У цьому випадку виявляється, що майже вся маса частинки викликана взаємодією і знаходиться у переносниках взаємодії, які народжуються з вакууму.

Компактні об'єкти в всесвіті, такі як нейтронні зірки, складаються з густої ядерної матерії. Їх злиття породжує гравітаційні хвилі, які можуть бути виявлені. У цьому випадку невідомою фізикою є саме сильна взаємодія, яка визначає властивості речовини всередині такої зірки. Нажаль, немає надійного теоретичного методу для обчислення величин з квантової хромодинаміки в умовах ненульової густини заряду, отже, наші знання про цю область можуть бути отримані або з експерименту, або за допомогою феноменологічних моделей.

Саме для того, щоб краще визначити залежність тиску від густини такої матерії, розпочався розвиток прискорювачів при низьких та середніх енергіях, зіткнення на яких, якраз, продукують відповідну густину баріонів. Це вимагає розвитку моделей, які відповідають новим експериментальним спостереженням. Крім того, самі спостереження повинні бути правильно відібрані, і всі їх особливості та недоліки повинні бути зрозумілі та контрольовані. Усе це є мотивацією до вивчення рівнянь стану сильновзаємодіючої матерії та релятивістських зіткнень важких іонів.

**Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.** Дисертаційна робота була виконана у відділі Фізики високих густин енергії Інституту теоретичної фізики ім. М. М. Боголюбова Національної академії наук України

у рамках академічної теми "Пошук нових форм сильновзаємодійної матерії в зіткненнях адронів та ядер за високих енергій". Державний реєстраційний номер: 0118U003197, (2018 – 2022). А також академічної теми "Теорія та моделювання властивостей сильновзаємодійної матерії в релятивістських зіткненнях адронів та ядер". Державний реєстраційний номер: 0123U100302, (2023 – 2027).

**Метою досліджень**, у складі дисертаційної роботи є моделювання зіткнень протонів і важких ядер за допомогою гідродинамічних, транспортних та статистичних моделей. За допомогою цих моделей повинен проводитися аналіз експериментальних даних. Чутливість різних спостережуваних до особливостей рівняння стану аналізується, щоб підібрати найкращу стратегію для сучасних та майбутніх експериментів.

Зокрема у дисертації було розглянуто:

1. Вплив існування фазового переходу типу рідина-газ у ядерній матерії на інтерпретацію ґраткових обчислень в умовах нульової густини.
2. Особливості експериментального спостереження флуктуацій числа частинок у імпульсному просторі.
3. Вплив вибору підсистеми у якій проводиться вимірювання флуктуацій, а також їх зв'язок з флуктуаціями рівноважної системи у великому канонічному ансамблі.
4. Вплив законів збереження заряду та енергії-імпульсу на кореляції частинок, що утворюються в ультрарелятивістських зіткненнях на LHC та RHIC.
5. Вплив протонних анігіляцій у адронній фазі на спостережувані після гідродинамічного опису системи.
6. Ефекти фазового переходу при густинах, що будуть досягнуті у майбутніх експериментах SIS100 (FAIR) на народження пар лептонів.
7. Особливості вимірювання флуктуацій в експериментах при низьких та середніх енергіях.

**Об'єктом дослідження** є сильновзаємодійна речовина, яка утворюється в зіткненнях протонів і важких ядер чи може існувати у компактних об'єктах всесвіту.

**Предметом дослідження** є термодинамічні властивості сильновзаємодійної матерії та особливості їх пошуку у умовах близьких до реальних експериментів.

**Методи дослідження** будується на динамічному описі зіткнення важких ядер. Для цього застосовано гідродинамічну модель в наближенні розв'язку Бйоркена, а також транспортну модель UrQMD, що описує пружні та непружні зіткнення адронів і включає потенціал взаємодії. Статистичний розгляд включав використання термодинамічних ансамблів і наближення середнього поля. Для побудови моделі експериментального спостереження було розглянуто різні статистичні підходи.

Для її досягнення було **поставлено такі задачі:**

- Розглянути поведінку радіусу збіжності ряду Тейлора тиску сильно взаємодійної матерії у моделі що включає ядерну критичну точку;
- Модифікувати потенціал взаємодії баріонів з метою додати гіпотетичний фазовий перехід у щільній ядерній матерії;
- Порахувати спектри і множинності дилептонів які утворюються в зіткненнях при енергіях що відповідають експерименту FAIR;
- Отримати залежності мір флуктуацій від вибору інтервалу імпульсу на якому проводиться спостереження у припущенні біноміальної імовірності зареєструвати частинки;
- Отримати особливості кореляцій зарядів що зберігаються в умовах не нульової густини баріонного заряду;
- Визначити величину впливу адронної фази на варіацію протонного числа у експерименті ALICE;
- Визначити кореляції поперечного імпульсу з поперечним імпульсом застосувавши теорію гідродинамічних флуктуацій;
- Дослідити можливість спостерігати флуктуації густини при умові що існують кореляції між середнім імпульсом та координатою.

Серед **найбільш важливих наукових результатів**, отриманих у роботі, семінар відзначає такі:

- Отримано нове обмеження на радіус збіжності за допомогою моделі ван дер Ваальса з ядерною критичною точкою, яке є меншим за попередні;

- Визначено ефект фазового переходу на множиності і спектри дилептонів з динамічної моделі для низьких енергій зіткнення ядер;
- Показано успішне порівняння мір флуктуацій між біноміальною моделлю і експериментом NADES.
- Обчислено кореляції поперечного імпульсу для експериментів ALICE.
- Показано чутливість балансуєчої кореляції до рівняння стану.

**Практичне значення одержаних результатів.** Робота має теоретичний характер. Отримані результати порівнюються з існуючими експериментальними даними. Деякі результати є передбаченнями для майбутніх експериментів і дозволяють судити про необхідну точність для виміру ефекту фазового переходу. Про корисність результатів також свідчать цитування робіт по матеріалам дисертації експериментальними колабораціями STAR та ALICE, NA61.

**Особистий внесок здобувача.** Пораховано положення найближчого нуля Лі-Янга у комплексній площині як функцію температури в адрон-резонансному газі з феноменологічним рівнянням стану ван дер Ваальса. Для цього побудовано алгоритм, що послідовно знаходить коефіцієнти ряду Тейлора (до 120-го).

Досліджено вплив інтервалу рапідності, в якому відбувається експериментальне спостереження, на флуктуації зарядів та чисел адронів у транспортній моделі UrQMD. Отримано теоретичне співвідношення між цими флуктуаціями у всій системі та підсистемі, якщо між частинками відсутні будь-які кореляції за винятком закону збереження.

Отримано функціональну залежність флуктуацій у підсистемі канонічного ансамблю з флуктуаціями у великому канонічному ансамблі, якщо розбиття на підсистеми відбувається у координатному просторі та поверхневими ефектами можна знехтувати.

За допомогою транспортної моделі обчислено вплив анігіляцій у адронній фазі на флуктуації протонного числа, а також ефекти локального збереження заряду.

Розглянуто систему рівнянь, що описують гідродинамічний відгук на збурення у густинах семи зарядів, що зберігаються (баріонному, електричному, дивному, а також енергії та вектору імпульсу) для фонового розв'язку, що відповідає моделі Бйоркена. Обчислено рівноважні кореляції, що виникають внаслідок закону збереження, їх особливості в умовах ненульової густини заряду. Рівноважна кореляція енергії-імпульсу була обчислена в сценарії, близькому до експерименту ALICE у CERN.

Використовуючи модифікацію залежного від густини потенціалу, що включає гіпотетичний фазовий перехід, проведено термодинамічне усереднення простору-часу з метою отримати температуру та густину, яких досягає система у процесі зіткнення. Після чого отримані температура та густина були використані, щоб отримати спектри ди-лептонів. При цьому розглянуто три різних можливі рівняння стану.

Обчислено флуктуації протонів, нейтронів, легких ядер у імовірнісних моделях, що відтворюють умови експерименту. Застосовано формули біноміальної імовірності частинки опинитися всередині чи зовні системи, в якій проводиться спостереження.

**Основні результати дисертації викладені у 12 журнальних публікаціях:**

- [1] O. Savchuk, V. Vovchenko, R. V. Poberezhnyuk, M. I. Gorenstein та H. Stoecker, "Traces of the nuclear liquid-gas phase transition in the analytic properties of hot QCD", *Phys. Rev. C* 101, 035205 (2020).
- [2] O. Savchuk, R. V. Poberezhnyuk, V. Vovchenko та M. I. Gorenstein, "Binomial acceptance corrections for particle number distributions in high-energy reactions", *Phys. Rev. C* 101, 024917 (2020).
- [3] V. Vovchenko, O. Savchuk, R. V. Poberezhnyuk, M. I. Gorenstein та V. Koch, "Connecting fluctuation measurements in heavy-ion collisions with the grand-canonical susceptibilities", *Phys. Lett. B* 811, 135868 (2020).
- [4] R. V. Poberezhnyuk, O. Savchuk, M. I. Gorenstein, V. Vovchenko, K. Taradiy, V. V. Begun, L. Satarov, J. Steinheimer та H. Stoecker, "Critical point fluctuations: Finite size and global charge conservation effects", *Phys. Rev. C* 102, 024908 (2020).
- [5] M. Gazdzicki, M. I. Gorenstein, O. Savchuk та L. Tinti, "Notes on statistical ensembles in the Cell Model", *Int. J. Mod. Phys. E* 29, 2050060 (2020).

- [6] R. V. Poberezhnyuk, O. Savchuk, M. I. Gorenstein, V. Vovchenko та H. Stoecker, "Higher order conserved charge fluctuations inside the mixed phase", Phys. Rev. C 103, 024912 (2021)..
- [7] O. Savchuk, V. Vovchenko, V. Koch, J. Steinheimer та H. Stoecker, "Constraining baryon annihilation in the hadronic phase of heavy-ion collisions via event-by-event fluctuations", Phys. Lett. B 827, 136983 (2022).
- [8] O. Savchuk, R. V. Poberezhnyuk та M. I. Gorenstein, "Possible origin of HADES data on proton number fluctuations in Au+Au collisions", Physics Letters B 835, 137540 (2022).
- [9] O. Savchuk, A. Motornenko, J. Steinheimer, V. Vovchenko, M. Bleicher, M. Gorenstein та T. Galatyuk, "Enhanced dilepton emission from a phase transition in dense matter", J.Phys.G 50 (2023) 12, 125104.
- [10] T. Reichert, O. Savchuk, A. Kittiratpattana, P. Li, J. Steinheimer, M. Gorenstein та M. Bleicher, "Decoding the flow evolution in Au+Au reactions at 1.23A GeV using hadron flow correlations and dileptons", Phys. Lett. B 841, 137947 (2023).
- [11] O. Savchuk та S. Pratt, "Correlations of conserved quantities at finite baryon density", Phys. Rev. C 109, 024910 (2024).
- [12] O. Savchuk, "Sensitivity of transverse momentum correlations to early-stage and thermal fluctuations", (2024).

**Апробація результатів дисертації.** Результати дисертаційної роботи доповідались на таких семінарах та конференціях:

1. Доповідь та постер на конференції "Quark Matter 2023", Хьюстон, Техас, США.
2. Літня Школа "Heavy Ion Collisions in the QCD phase diagram", Subatech, Нант, Франція.
3. Воркшоп "Dense Nuclear Matter Equation of State from Heavy-Ion Collisions", Сіетл, Вашингтон, США.
4. Доповідь на конференції "Strangeness in Quark Matter 2022", Бусан, Південна Корея.
5. Доповідь на "Transport Meeting", Goethe University, Франкфурт, Німечина.
6. Конференція молодих вчених "Проблеми теоретичної фізики" 2020, Київ, Україна.
7. Конференція молодих вчених "Проблеми теоретичної фізики" 2021, Київ, Україна.



8. Конференція молодих вчених ``Проблеми теоретичної фізики`` 2022, Київ, Україна.
9. Конференція молодих вчених ``Проблеми теоретичної фізики`` 2023, Київ, Україна.

**Характеристика особистості здобувача.** Олег Савчук закінчив фізичний факультет Київського національного університету імені Тараса Шевченка (кафедра теоретичної фізики) у 2020 році, отримав диплом магістра фізики, і вступив до аспірантури Інституту теоретичної фізики ім. М.М. Боголюбова НАН України у 2021 році. Виконавши навчальний план Олег Савчук закінчує аспірантуру у 2024 році.

Позитивні відгуки про здобувача висловили, науковий керівник аспіранта, завідувач відділу фізики високих густин енергії, доктор фіз.-мат. наук, проф. Марк Горенштейн, а доктор фіз.-мат. наук, проф. Євген Мартинов, доктор фіз.-мат. наук, проф. Олександр Магнер, кандидат фіз.-мат. наук, Володимир Шаповал, а також доктор філософії, Мусфер Аджимамбетов.

#### **УХВАЛЕНО**

1. Затвердити висновок про наукову новизну, теоретичне та практичне значення результатів дисертації Савчука Олега Володимировича "Рівняння стану сильновзаємодійної матерії та релятивістські зіткнення важких іонів".
2. Визнати, що за актуальністю, ступенем наукової новизни, обґрунтованістю, науковою та практичною цінністю здобутих результатів дисертація Савчука О.В. відповідає спеціальності 104 Фізика та астрономія та вимогам Порядку підготовки здобувачів вищої освіти ступеня доктора філософії та доктора наук у закладах вищої освіти (наукових установах), затвердженого постановою Кабінету Міністрів України від 23 березня 2016 р. № 261, пп. 6, 7, 8 Порядку присудження ступеня доктора філософії та скасування рішення разової спеціалізованої вченої ради закладу вищої освіти, наукової установи про присудження ступеня доктора філософії, затвердженого постановою Кабінету Міністрів України від 12 січня 2022 р. № 44 та Постановою Кабінету Міністрів України «Про внесення змін до деяких постанов Кабінету Міністрів України з питань підготовки та атестації здобувачів наукових ступенів» від 19 травня 2023 р. № 502.

3. Рекомендувати дисертацію Савчука Олега Володимировича "Рівняння стану сильновзасмодійної матерії та релятивістські зіткнення важких іонів" до захисту на здобуття ступеня доктора філософії у разовій спеціалізованій вченій раді за спеціальністю 104 Фізика та астрономія
4. Рекомендувати Вченій раді Інституту теоретичної фізики ім. М.М. Боголюбова НАН України затвердити склад разової спеціалізованої вченої ради:

Голова ради:

**Гринюк Борис Євгенович**, кандидат фіз.-мат. наук, завідувач відділу теорії ядра і квантової теорії поля Інституту теоретичної фізики ім. М.М. Боголюбова НАН України.

Рецензенти:

**Лев Богдан Іванович**, доктор фіз.-мат. наук, професор, академік НАН України, завідувач відділу синергетики Інституту теоретичної фізики ім. М.М. Боголюбова НАН України.

**Назаренко Андрій Володимирович**, доктор фіз.-мат. наук, провідний науковий співробітник відділу математичних методів в теоретичній фізиці Інституту теоретичної фізики ім. М.М. Боголюбова НАН України.

Офіційні опоненти:

**Горкавенко Володимир Миколайович**, канд.фіз.-мат.наук, доцент кафедри квантової теорії поля Фізичного факультету Київського Національного Університету імені Тараса Шевченка.

**Магнер Александр Григорович**, доктор фіз.-мат. наук, професор, провідний науковий співробітник відділу теорії ядра Інституту ядерних досліджень НАН України.

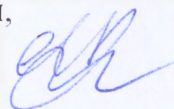
**Головуючий на засіданні:**

науковий співробітник

Інституту теоретичної фізики

ім. М. М. Боголюбова НАН України,

доктор філософії



Мусфер АДЖИМАМБЕТОВ