

# ВІДГУК

офіційного опонента

на дисертацію **Вовченка Володимира Юрійовича**

«Еволюція взаємодіючої багаточастинкової системи, що виникає у зіткненнях релятивістських ядер»,

поданої на здобуття вченого ступеня кандидата фізико-математичних наук

за спеціальністю 01.04.02 – теоретична фізика

Представлена дисертаційна робота присвячена теоретичному опису процесів, що відбуваються при зіткненні релятивістських протонів та ядер в умовах експериментів на сучасних та майбутніх прискорювачах. Основною метою досліджень є вивчення процесу еволюції адронів, які утворилися при зіткненнях релятивістських іонів, а також фізичний аналіз та інтерпретація імпульсних спектрів, отриманих в експериментах. Характерною рисою дисертації є трактування просторово-часових аспектів процесів, що досліджуються, з єдиного погляду на базі застосування методів ультра-релятивістської квантової молекулярної динаміки.

**Актуальність теми дисертації** обумовлена поточними та новими експериментами у фізиці високих енергій, що вимагають теоретичного пояснення або його покращення. Ефекти, що виникають при зіткненні важких ядер, потребують всебічного аналізу і різноманітних порівнянь, оскільки вони в основному спрямовані на відкриття та дослідження властивостей нового стану матерії – кварк-глюонної плазми (КГП), яка безпосередньо спостерігатися не може за причини явища конфайнменту

З погляду міжнародного співробітництва, Україна є асоційованим членом ЦЕРН, що передбачає не тільки участь в експериментах на Великому адронному колайдері (ВГК), але й на прискорювачі CERN SPS та експериментів інших міжнародних колаборацій, наприклад, NA49, NA61.

З погляду розвитку теоретичної фізики, застосовувані автором методи і наближення є типовими для сучасної фізики високих енергій.

**Дисертація складається** з анотації, вступу, чотирьох розділів, висновків, списку літератури з 177 найменувань, 46 рисунків та однієї таблиці.

У Розділі 1 представлено огляд літератури, що містить пояснення основних концепцій даної тематики, значну кількість посилань та обговорення низки сучасних моделей з опису зіткнень важких ядер.

У Розділі 2 розглядається імпульсні розподіли адронів у протон-протонних ( $p + p$ ) та ядро-ядерних ( $Pb + Pb$ ) зіткненнях при різних енергіях. Перші відповідають експерименту NA61/SHINE у ЦЕРН, а другі – експерименту, виконаному раніше колаборацією NA49 при однакових енергіях. Проводиться порівняння отриманих результатів. Мотивацією до таких порівнянь було можливість очікування сигналу КГП у разі виникнення розбіжностей. Але детальний аналіз проведених симуляцій призвів до нового важливого спостереження – необхідності послідовного врахування ізоспінових ефектів при розрахунках ядерних процесів. Це вагомий результат, отриманий у дисертації. Він повинен враховуватися в подальших дослідженнях із даної тематики.

Іншим цікавим результатом розділу є аналіз розподілу  $p_T$ - мезонів за швидкістю ( $rapidity$ ) ( $dN/dy$ ) та за поперечною масою  $m_T = (m^2 + p_T^2)^{1/2}$ . Із нього автор прийшов до висновку про необхідність більш детального вивчення розподілів за останнім параметром, який є чутливим до присутності та властивостей мало вивчених експериментально важких резонансів. Експериментальні дослідження даних колаборації NA61/SHINE у цьому напрямку тривають.

Ці результати отримані за допомогою комп'ютерної програми - транспортної моделі UrQMD - і демонструють її можливості та ефективність. Опанування таким потужним інструментом сучасної фізики високих енергій є безсумнівним досягненням дисертанта.

### У Розділі 3

вивчається процедура розділення адронної системи на спектаторів (спостерігачів) та учасників, яка проводиться на початкових стадіях зіткнення ядер. У стандартних підходах до опису цієї стадії вважалось, що поперечні розподіли нуклонів-спектаторів описуються моделлю Глаубера-Ситенка в оптичній границі. При цьому недостатньо уваги приділялось врахуванню динаміки процесу розділу та флуктуацій.

Для розділення на спектаторів та учасників автором дисертації розроблено аналітичну модель, яка базується на кінетичному рівнянні Больцмана. В ній застосовано теорію збурень, в якій за нульове наближення приймається балістичний режим, а розділення адронів здійснюється на наступних ітераціях з використанням низки доречних припущень. Проведений у такий спосіб аналіз показав, для умов енергій SPS, RHIC, процес формування системи учасників здійснюється у часовому інтервалі  $0.5 - 1.5 t_c$ , який залежить від енергії зіткнень. Результати аналітичних досліджень добре узгоджуються із розрахунками в рамках транспортної моделі UrQMD.

Також було досліджено утворення ненульового повного моменту імпульсу системи учасників і показано, що максимальний момент імпульсу виникає в зіткненнях

середньої центральності. Це відповідає значенням прицільного параметра порядку  $b \sim 3-4$  фм.

Процес розділення адронів на спектаторів та учасників характеризується флуктуаціями. В роботі для дослідження флуктуацій рапідності системи центра мас була розроблена спрощена аналітична модель, за допомогою якої було показано, що флуктуації  $y_{\{c.m.\}}$  є найбільшими у периферійних зіткненнях ядер і найменшими у центральних зіткненнях. Проаналізовано роль розміру ядер на флуктуації. Встановлено також, що флуктуації слабо залежать від енергії зіткнення ядер, на відміну від залежності від прицільного параметру.

Ці результати є новими і дуже важливими. Вони повинні враховуватися при аналізі експериментів за допомогою гідродинамічних моделей, де названі флуктуації не враховуються. Нещодавні результати аналізу колаборації ALICE для Pb + Pb зіткнень для енергії  $s_{\{NN\}}^{1/2} = 2.76$  TeV підтвердили передбачення моделі, зроблені в дисертації.

#### У Розділі 4

запропоновано узагальнення підходу середнього термодинамічного поля на випадок багатокомпонентних систем і застосування цього формалізму для врахування взаємодії між адронами в моделі адронно-резонансного газу (АРГ). Приймається, що термодинамічний підхід з урахуванням вилучених об'ємів дозволяю врахувати взаємодію між адронами у середовищі.

Головною ідеєю цього розділу є представлення густини вільної енергії адронів у вигляді суми внесків не взаємодіючих частинок і взаємодії. Сформульована умова самоузгодженості, яка дозволяє обчислити надлишковий тиск та середні поля і визначити таким чином повне середнє поле. Для найбільш простої моделі частинок, яка не враховує статистичні властивості елементів, із аналізу поведінки тиску для 3-х моделей (прямого виключення об'єму, виключення типу ван дер Ваальса та рівняння стану Карнагена-Старлінга) проведено дослідження тиску адронного газу для різних значень радіусу кора. Досліджена залежність густини баріонного заряду на стадії хімічного фрізауту від енергії зіткнень, тиску від температури для різних АРГ. Отримані обмеження на застосовність цих моделей. Зроблено загальний висновок про ефективність зробленого узагальнення розробленого методу. Також отримано, із порівняння з даними ґраткових КХД розрахунків обмеження на застосовність досліджених моделей. Зокрема, накладено обмеження на значення адронного радіусу:  $0.13 < r < 0.4$  фм. Важливим також є висновок про переваги рівняння стану Карнагена-Старлінга.

Це є основні результати, отримані в дисертації. Переходячи до їх аналізу, відзначимо, що вони отримані в авангардній галузі фізики високих енергій і без сумніву є актуальними. Більшість з них отримані із використанням сучасних моделей, які надійно перевірені в дослідженнях інших авторів, відомих у літературі. Важливо також, що отримані результати знайшли підтвердження в експериментах, або експерименти з перевірки передбачень роботи тривають. Це додатково свідчить про наукову цінність виконаних робіт.

### **Ступінь обґрунтованості наукових положень і висновків, сформульованих у дисертації**

Результати, здобуті автором, ґрунтуються на фізично розумних та зальноприйнятих наближеннях. Застосовність їх залежить від енергії протонів та ядер. При достатньо високих енергіях, таких, наприклад, як енергії CERN SPS, вони зазвичай буває виправданими. Таким чином, результати автора є фізично обґрунтованими і мають вагоме практичне значення.

### **Достовірність**

Як правило, результати автора також підкріплюються згодою з експериментами і/або з комп'ютерним моделюванням. Таким чином, результати можна вважати достовірними.

### **Новизна**

На захист винесено 4 результати, які є новими.

Одним з найбільш цікавих результатів, на мій погляд, є побудова аналітичної моделі для аналізу перших моментів зіткнення ядер та отримання обмежень на вхідні параметри для гідродинамічних моделей.

Інший новий результат - дослідження флуктуацій рапідіті для центру інерції.

Несподіваним і також перспективним є висновок про існування важких мало вивчених резонансів. Усе це достатньо надійно досліджено і відкриває перспективу для майбутнього.

### **Опубліковані праці**

Дисертація написана за результатами 18 робіт. Більшість з них опублікована в провідних міжнародних журналах. Результати дисертації також усно доповідались на фахових міжнародних конференціях, і тому можуть вважатися апробованими.

### **Недоліки**

Разом з тим, дисертація Вовченка В.Ю. не вільна від недоліків різного характеру. Перш за все, як на мій погляд, це недостатня інформація про власне фазовий перехід

деконфайнменту. Це основне явище, за для якого виконуються дослідження. Але чомусь зовсім не згадуються сигнали деконфайнменту, окрім моделей Монте Карло на ґратках. Але є прямі фотони, лептони, які також слугують надійними експериментальними сигналами і які всебічно досліджуються.

У четвертому розділі дисертації при вивченні моделі АРГ для різних виключень об'єму і аналізу тиску розглядається поведінка адронного газу в широкому інтервалі температур до 800 МеВ. Робиться висновок про придатність моделі з будь-якою  $T$  для  $r > 0.13$  фм. Але якщо це так, то можливо моделювати КГП адронним газом? Для з'ясування цього питання необхідно було б зробити порівняння з даними Монте Карло у всьому інтервалі температур. Фактично, в моделі не існує внутрішнього параметру для деконфайнмента. Тому нижня границя на радіус  $r$  не визначеною.

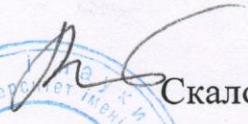
Також у роботі присутня певна кількість термінологічних недоліків. Наприклад, «ефект чуттєвий» замість «чутливий», «вкладів» замість «внесків», інтегрування «по параметру» замість «за параметром».

Але ці зауваження не впливають на в цілому позитивне враження від дисертації.

Підсумовуючи, в дисертації розв'язано низку сучасних і актуальних задач. Дисертація виконана на належному математичному рівні, і встановлює паралелі з теорією стохастичних процесів для адронної фізики високих енергій. Тому вона є завершеним, самостійним дослідженням, що повністю відповідає паспорту спеціальності. Автореферат повністю відображає зміст дисертації.

Вважаю, що дисертаційна робота Вовченка Володимира Юрійовича «Еволюція взаємодіючої багаточастинкової системи, що виникає у зіткненнях релятивістських ядер» задовольняє усім вимогам МОН України до докторських дисертацій, зокрема пп. 9, 10 та 12 «Порядку присудження наукових ступенів і наукового звання старшого наукового співробітника», затвердженого постановою №567 Кабінету Міністрів України від 24.07.2013, а її автор, безумовно, заслуговує на присудження йому наукового ступеня доктора фізико-математичних наук за спеціальністю 01.04.02 – теоретична фізика.

Офіційний опонент,

Доктор фізико-математичних наук, професор  Скалозуб В.В.

Підпис Скалозуба В.В. засвідчую

