

Національна академія наук України
Інститут теоретичної фізики ім. М. М. Боголюбова

Набока Владислав Юрійович

УДК 539.172.17,539.172.12

**Термалізація та еволюція сильновзаємодійної матерії
в інтегрованій гідрокінетичній моделі ядро-ядерних
зіткнень**

01.04.02 — теоретична фізика

Автореферат
дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата фізико-математичних наук

Київ — 2016

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана в Інституті теоретичної фізики ім. М. М. Боголюбова НАН України.

Науковий керівник: доктор фізико-математичних наук, старший науковий співробітник
Синюков Юрій Михайлович,
Інститут теоретичної фізики ім. М. М. Боголюбова
НАН України, головний науковий співробітник

Офіційні опоненти: доктор фізико-математичних наук, професор
Вільчинський Станіслав Йосипович,
Київський національний університет імені Тараса
Шевченка, завідувач кафедри квантової теорії поля
доктор фізико-математичних наук, старший
науковий співробітник
Нурмагамбетов Олексій Юрійович,
Інститут теоретичної фізики ім. О.І.Ахієзера
Національного наукового центру «Харківський
фізико-технічний інститут», Національна академія
наук України, провідний науковий співробітник

Захист відбудеться «___» _____ р. о ___ годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 26.191.01 Інституту теоретичної фізики ім. М. М. Боголюбова НАН України за адресою:
вул. Метрологічна 14-б, м. Київ, 03143, Україна.

З дисертацією можна ознайомитись у науковій бібліотеці Інституту теоретичної фізики ім. М. М. Боголюбова НАН України за адресою:
вул. Метрологічна 14-б, м. Київ, 03143, Україна.

Автореферат розісланий «___» _____ р.

Вчений секретар
спеціалізованої вченої ради Д 26.191.01,
доктор фіз.-мат. наук

Кузьмичев В. Є.

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Актуальність дослідження ультрарелятивістських важких йонів визначається в першу чергу можливістю утворення матерії, фізичний стан якої характеризується високою густиною енергії та температурою. Кварки та глюони не спостерігаються в вакуумі у вільному стані, оскільки сильна взаємодія пов'язує їх між собою. Тому у нормальному стані всі спостережувані частинки безкольорові або кольорово нейтральні. Але при високих температурах сильний зв'язок між партонами послаблюється, і кольорово заряджені об'єкти можуть пропагувати на більші відстані.

Дослідження на прискорювачі RHIC показали, що на проміжній стадії ядро-ядерного зіткнення речовина поводить себе як рідина. З цим пов'язане широке застосування гідродинамічних моделей, які успішно використовуються для опису поведінки матерії на цій стадії при енергіях прискорювачів SPS, RHIC та LHC. Для генерації початкових умов для гідродинамічних моделей використовуються різні генератори подій, такі як MC-Glauber, MC-KLN, IP-Glasma. Але отримані таким чином початкові умови не є термічно рівноважними, ні глобально, ні локально. До останнього часу основна увага дослідників була приділена вирішенню питання моделювання переходу від рідини до адронного газу на останньому етапі гідродинамічної еволюції, на якому вже не задовольняється умова локальної рівноваги. В той же час не існує загальноприйнятої моделі нерівноважної динаміки та термалізації початкового стану. Вирішення проблеми переходу від початкових станів матерії до її гідродинамічного розширення є одною із основних задач дисертаційного дослідження.

Іншою причиною дослідження ультрарелятивістських ядро-ядерних зіткнень є утворення в них великої кількості дивних частинок. Це уможливує дослідження фундаментальних взаємодій у парах таких частинок, які неможливо досліджувати іншими методами, такими як традиційні експерименти з розсіяння.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Дана дисертаційна робота була виконана у відділі фізики високих густин енергії Інституту теоретичної фізики ім. М. М. Боголюбова Національної академії наук України. Вона є складовою частиною широкого кола досліджень властивостей сильновзаємодіючої речовини в екстремальних умовах (високі температури та густини), що проводились у відділі в рамках наступної державної програми:

2013: Дослідження сильновзаємодіючої матерії та структури адронів в релятивістських зіткненнях адронів та ядер. Номер державної реєстрації

– 0113U001092, шифр – 1.4.1.

Мета і задачі дослідження. Метою даної роботи є опис просторово-часової структури та еволюції матерії, утвореної в ультрарелятивістських зіткненнях ядер свинцю при енергії LHC $\sqrt{s} = 2.76$ TeV на нуклонну пару. Особливу увагу приділено претермальній стадії процесу зіткнення, тобто стадії від генерації нерівноважного початкового стану до її термалізації і початку в'язкої гідродинамічної еволюції сильновзаємодійної матерії, яка в подальшому трансформується в газ взаємодіючих адронів, що швидко розширюється. Опис та передбачення спостережуваних фізичних величин, зокрема, фемтоскопічний аналіз, у такій моделі, дозволяє реконструювати картину зіткнення ядер. Для досягнення мети було поставлено наступні задачі:

1. Обчислити інтерферометричні радіуси для тотожних піонів та каонів за допомогою гідрокінетичної моделі.
2. Дослідити залежності фемтоскопічних масштабів від поперечної маси для різних пар: піон-піон, каон-каон, протон-протон, протон-лямбда. Побудувати аналітичне наближення для цих масштабів, що дозволяє вимірювати час максимальної емісії адронів різного сорту.
3. Дослідити кореляційну функцію протон-антилямбда та антипротон-лямбда з урахуванням залишкових кореляцій та просторово-часової структури ядро-ядерних зіткнень у термінах функції джерела випромінювання.
4. Змоделювати еволюцію на претермальній стадії за допомогою релаксаційної моделі, що описує поступовий перехід від початкової стадії до гідродинамічного опису.
5. Побудувати інтегровану гідрокінетичну модель для опису еволюції ядро-ядерного зіткнення від початкової стадії до кінцевого розльоту частинок.

Об'єктом дослідження є просторово-часова структура та еволюція систем, що формуються при зіткненні ультрарелятивістських важких йонів свинцю з енергією $\sqrt{s} = 2.76$ TeV.

Предметом дослідження є профілі густини енергії та швидкості в певний момент власного часу системи, імпульсні спектри, множинності всіх заряджених частинок, коефіцієнти анізотропного поперечного потоку, двочастинкові імпульсні кореляційні функції та інтерферометричні радіуси.

Методи дослідження. У дисертаційній роботі застосовано метод комп'ютерного моделювання в рамках релаксаційної та інтегрованої гідрокінетичної моделей еволюції речовини, утвореної при зіткненнях ультраре-

лятивістських важких йонів, а також аналітичні та чисельні методи.

Наукова новизна одержаних результатів. В дисертаційній роботі отримано наступні оригінальні результати:

1. Обчислено інтерферометричні радіуси пар піонів та каонів для випадку RHIC, проведено порівняння з експериментальними даними. Також зроблено передбачення аналогічних величин для зіткнень на LHC при енергії $\sqrt{s_{NN}} = 5.125$ TeV на нуклонну пару. Отримано баріон-антибаріонні функції джерела, що відображають інтенсивність випромінювання таких пар частинок в залежності від відстані між останніми.
2. Отримано аналітичну формулу для поздовжніх інтерферометричних радіусів, що дозволяє обчислювати час максимального випромінювання. Дано пояснення основних причин порушення m_T -скейлінгу між каонами та піонами.
3. Зроблено передбачення для кореляційних функцій протон-антилямбда та антипротон-лямбда для зіткнень на LHC при енергії $\sqrt{s} = 2.76$ TeV на нуклонну пару з урахуванням залишкових кореляцій.
4. Проведено моделювання претермальної стадії ядро-ядерного зіткнення за допомогою релаксаційної моделі, отримано профілі густини енергії та швидкості при різних початкових умовах. Досліджена залежність результатів від параметрів релаксаційної моделі.
5. Проведено моделювання ядро-ядерного зіткнення від початкової до кінцевої стадії за допомогою інтегрованої гідрокінетичної моделі, отримані імпульсні спектри адронів, коефіцієнти анізотропії, множинності всіх заряджених частинок та фемтоскопічні радіуси при різних початкових умовах, значеннях коефіцієнта в'язкості та параметрах релаксаційної моделі.

Практичне значення одержаних результатів. Отримані в роботі результати мають теоретичний характер та можуть бути застосовані для дослідження просторово-часової структури матерії, народженої у зіткненнях ультрарелятивістських важких йонів, а також для аналізу спостережуваних величин в експериментах з ядро-ядерних зіткнень і теоретичного передбачення результатів майбутніх експериментів з ядро-ядерними зіткненнями.

Особистий внесок здобувача. В роботі [1] проведено комп'ютерне моделювання зіткнення важких йонів на ранній стадії. Для цього було модифіковано гідродинамічний модуль “vHLLC” шляхом включення до нього релаксаційної моделі претермічної стадії. За допомогою комп'ютер-

них обчислень отримано профілі густини енергії та швидкості в момент часу, що відповідає переходу до гідродинамічної стадії.

У роботі [2] в рамках інтегрованої гідрокінетичної моделі проведено обчислення імпульсних спектрів адронів, коефіцієнтів анізотропії, множинностей та фемтоскопічних радіусів. Проведено аналіз залежності результатів від значень параметрів моделі.

У роботі [3] в рамках гідрокінетичної моделі були зроблені передбачення інтерферометричних радіусів для зіткнень свинцю при енергії LHC $\sqrt{s_{NN}} = 5.125$ TeV на нуклонну пару.

У роботі [4] в рамках гідрокінетичної моделі була зроблена спільна апроксимація імпульсних спектрів піонів та каонів, з якої отримані значення параметрів, необхідних для подальшого моделювання фемтоскопічних шкал.

У роботі [5] в рамках гідрокінетичної моделі було проведено моделювання гідродинамічної стадії, результати якого використовуються для опису подальшої еволюції розльоту окремих частинок та обчислення функції джерела і кореляційних функцій.

В роботі [6] за допомогою методу градієнтного спуску проведена апроксимація розподілів нуклонів з заданою кількістю зіткнень за позадочною компонентою імпульсу, отриманих з моделі ультрарелятивістської квантової молекулярної динаміки.

Апробація роботи. Усі висвітлені у даній дисертації результати були представлені на семінарах в Інституті теоретичної фізики ім. М. М. Боголюбова Національної академії наук України, доповідалися та обговорювалися на міжнародних конференціях:

- XVI GDRE Workshop Heavy Ions at Relativistic Energies “The relaxation model of the matter thermalization in A+A collisions” (plenary talk), Nantes July 07–13, 2014;
- International Conference of Young Scientists “Modern problems of theoretical physics”, BITP, Kiev, November 25–27, 2014;
- XVII GDRE Workshop Heavy Ions at Relativistic Energies “Thermalization, evolution and LHC-observables in the integrated hydrokinetic model of nuclear collisions” (plenary talk), Nantes June 28–July 04, 2015;
- NICA days 2015 “Thermalization, evolution and observables in the integrated hydrokinetic model of heavy ion collisions”, Warsaw, Poland, November 3–7, 2015.

Публікації. Результати даної дисертаційної роботи представлені у 7 роботах, що опубліковані у провідних фізичних журналах та у матеріалах міжнародних конференцій. А саме, 6 з них – це видані у журналах оригінальні статті, [1], [2], [3], [4], [5], [6], і 1 робота у збірках праць та тез конференцій [7].

Структура дисертаційної роботи. Дисертаційна робота складається із вступу, 4 розділів, висновків та бібліографії, яка містить 110 посилань. Дисертація включає 43 рисунки, які винесені в кінець кожного розділу. Загальний об'єм роботи становить 111 сторінок друкованого тексту.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ

Розділ 1 дисертації присвячений дослідженню залежності фемтоскопічних масштабів для мезонних та баріонних пар від поперечної маси та імпульсу.

Просторово-часова структура матерії в процесі ядро-ядерного зіткнення зазвичай характеризується фемтоскопічними масштабами (інша назва — інтерферометричні радіуси). Вони являють собою параметри апроксимації двочастинкової кореляційної функції гаусовою функцією.

В дисертації в рамках гідрокінетичної моделі передбачається сильне порушення скейлінгу інтерферометричних радіусів для каонів та піонів по поперечній масі та стверджується скейлінг по поперечному імпульсу. Як з'ясувалося, причини цього досить загальні: сильні поперечні потоки, перерозсіяння та розпади резонансів на стадії адронного каскаду та негаусова форма кореляційної функції.

Виводиться проста аналітична формула для повздовжніх інтерферометричних радіусів, що добре апроксимує результати гідрокінетичної моделі для різних адронних пар. Оскільки гідрокінетична модель описує одночасно велику кількість спостережуваних, вона дає експериментаторам простий інструмент для оцінки часу життя фаєрболу. Ця формула має вигляд:

$$R_l^2(k_T) = \tau^2 \lambda^2 \left(1 + \frac{3}{2} \lambda^2 \right), \quad (1)$$

де R_l — повздовжній інтерферометричний радіус, τ — час максимального випромінювання (емісії), а $\lambda = \lambda_l / \tau$, де λ_l — довжина однорідності в повздовжньому напрямку в присутності поперечного потоку.

В **Розділі 2** виконується дослідження кореляційних функцій $p\Lambda$ та $\bar{p}\Lambda$. В цілому дослідження кореляційних функцій різних пар частинок дозволяє отримувати інформацію про характер еволюції матерії, утвореної в релятивістських ядро-ядерних зіткненнях, зокрема про характер колективного потоку.

Інша можливість, що відкрита для дослідника баріон-(анти)баріонного кореляційного аналізу — дослідження сильної взаємодії між частинками різних сортів за допомогою кореляційної техніки взаємодії в кінцевому стані (FSI). Оскільки LHC утворює велику кількість адронів різних сор-

тів, включаючи дивні, чарівні та красиві, перевага цього підходу полягає в можливості аналізувати взаємодії між парами екзотичних частинок, що навряд чи можливо за допомогою інших методів.

В дисертації виконуються передбачення для кореляційних функцій пар $p\Lambda$ та $\bar{p}\Lambda$. Для цього ми моделюємо баріон-баріонну кореляційну функцію ЛНС за допомогою аналітичної формули Ледницького-Любошица. Щодо випадку баріон-антибаріонних пар ми апроксимуємо експериментально виміряну кореляційну функцію $C_{uncorr}(k^*)$ наступним аналітичним виразом

$$C_{uncorr}(k^*) = 1 + \lambda(k^*)(C(k^*) - 1) + \alpha(k^*)(C_{res}(k^*) - 1), \quad (2)$$

де $\lambda(k^*)$ — чистота або доля коректно ідентифікованих пар, що складаються з первинних частинок, $C(k^*)$ — “справжня” кореляційна функція для цих частинок, $\alpha(k^*)$ — доля вторинних пар, що мають залишкові значення, та $C_{res}(k^*)$ — залишкова кореляційна функція.

Для побудови відповідної баріон-антибаріонної кореляційної функції необхідно визначити значення параметрів, що входять в (2) у випадку ЛНС. Так же як для РНІС ми припускаємо, що довжини розсіяння $f^s = f^t = f$ та ефективні радіуси $d_0^s = d_0^t = 0$. Радіуси джерела знову фіксовані з розрахунків гідрокінетичної моделі, $r_0 = 3.76$ fm. Щодо дійсної та уявної частин довжини розсіяння, $\text{Re } f_0$ and $\text{Im } f_0$, вони характеризують сильну взаємодію антипротон-лямбда і тому не змінюються при переході від РНІС до ЛНС. Тому ми можемо використовувати значення, отримані з апроксимації кореляційної функції $\bar{p}\Lambda$ для РНІС, $\text{Re } f_0 = 0.14 \pm 0.66$ fm та $\text{Im } f_0 = 1.53 \pm 1.31$ fm.

Розділ 3 дисертації присвячений моделюванню претермальної стадії ядро-ядерного зіткнення. Гідродинамічна модель зараз вважається частиною майбутньої “Стандартної моделі” еволюції фаєрболу, утвореного в релятивістських зіткненнях важких йонів на колайдерах РНІС та ЛНС. Для закінчення побудови “Стандартної моделі”, до гідродинамічного підходу необхідно додати початкові та кінцеві умови: перші мають описувати перехід від нерівноважного стану в локально-рівноважний, останні описують утворення частинок під час розпаду суцільного середовища на фінальній стадії гідродинамічної еволюції.

До останнього часу основні дослідження були виконані в напрямку моделювання переходу від гідродинамічного опису до утворення частинок на останній стадії гідродинамічної еволюції, на якій гідродинамічне наближення більш не застосовне. Що стосується початкових умов для гідродинамічної моделі, необхідно відмітити, що не існує загальноприйнятої моделі нерівноважної динаміки та термалізації. Проте існують теоретичні

докази того, що стан, що утворюється в ядро-ядерному зіткненні, є значно анізотропним в імпульсному просторі в системах спокою речовини. Такий стан є нерівноважним і не може бути використаний як початкові умови для гідродинамічної моделі. Оскільки початкові умови флюктуують від події до події, генератори подій на основі принципу Монте-Карло широко застосовуються для генерації початкового стану в релятивістських ядро-ядерних зіткненнях. Найбільш розповсюджені такі моделі початкового стану як MC-Glauber, MC-KLN, та IP-Glasma. Для того щоб застосувати ці моделі до опису експериментальних даних, необхідний деякий процес термалізації. Для зменшення похибки в результатах, породженої гідродинамічними моделями, необхідно включити в модель еволюцію від нерівноважного початкового стану в ядро-ядерних зіткненнях до стану, близького до рівноваги, за допомогою нерівноважної динаміки.

Для вирішення цієї проблеми в дисертації використовується феноменологічний підхід, що дозволяє узгодити нерівноважну динаміку з гідродинамічним описом. Метод базується на законах збереження енергії-імпульсу, що пов'язані з релаксаційною транспортною динамікою, виражених для тензора енергії-імпульсу, що еволюціонує до гідродинамічної форми. Це дозволяє, використовуючи параметр часу релаксації, оцінити гідродинамічний тензор енергії-імпульсу в передбачуваний час термалізації, стартуючи з будь-якого початкового часу. Основна особливість цього методу полягає в тому, що не потребується ніяких додаткових припущень для опису переходу від нерівноважного стану до майже рівноважного. Тоді така модель може забезпечити неперервний перехід від нерівноважного стану, з довільним типом анізотропії, до гідродинамічного режиму. Більше того, метод дозволяє враховувати великі неоднорідності початкового стану, що приводить до нетривіальної поперечної динаміки. Тому метод може використаний для моделювання ранньої стадії ядро-ядерного зіткнення подія за подією. В дисертації пропонується чисельна реалізація цього методу, націлена на те щоб дослідити зв'язок між локально ізотропним та анізотропним в імпульсному просторі початковими станами, та рівноважними початковими умовами для подальшої гідродинамічної еволюції в релятивістських ядерних зіткненнях.

Еволюція до локальної рівноваги матерії, утвореної в ультрарелятивістських зіткненнях важких йонів, симулюється за допомогою релаксаційної динаміки тензору енергії-імпульсу, що мотивується кінетикою Больцмана в наближенні релаксаційного часу,

$$\frac{p^\mu \partial f(x, p)}{p^0 \partial x^\mu} = -\frac{f(x, p) - f_{\text{eq}}(x, p)}{\tau_{\text{rel}}}, \quad (3)$$

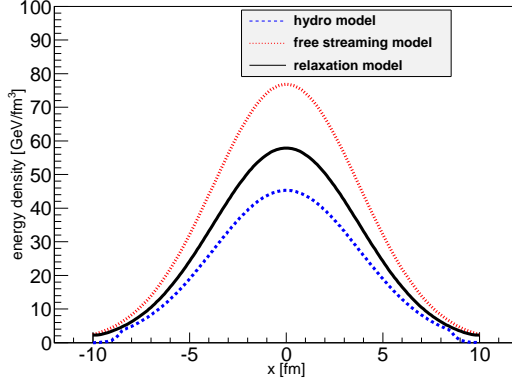


Рис. 1. Залежність густини енергії від x -координати (при $y = 0$), в поперечній площині для центральних бистрот при $\tau_{\text{th}} = 1.0$ fm/c.

де τ_{rel} — параметр релаксаційного часу в системі центра мас. $f(x, p)$ та $f_{\text{leq}}(x, p)$ являють собою функцію розподілу системи в даному стані та локально рівноважну. Тут та далі використовується Бйоркнеівська система координат, в якій час замінюється власним часом $\tau = \sqrt{t^2 - z^2}$, координата z замінюється геометричною псевдобистротою.

Записуючи формальний розв'язок рівняння (3), після деяких викладок приходимо до наступного вигляду нерівноважного тензора енергії-імпульсу речовини

$$T^{\mu\nu}(x) = T_{\text{free}}^{\mu\nu}(x)\mathcal{P}(\tau) + T_{\text{hyd}}^{\mu\nu}(x)(1 - \mathcal{P}(\tau)), \quad (4)$$

де $T_{\text{free}}^{\mu\nu}(x)$ та $T_{\text{hyd}}^{\mu\nu}(x)$ — вільного розльоту та гідродинамічна (локально-рівноважна) компоненти тензора енергії-імпульсу, відповідно. Для інтерполяційної функції, $\mathcal{P}(\tau)$, ми використовуємо наступний анзац:

$$\mathcal{P}(\tau) = \left(\frac{\tau_{\text{th}} - \tau}{\tau_{\text{th}} - \tau_0} \right)^{(\tau_{\text{th}} - \tau_0)/\tau_{\text{rel}}}. \quad (5)$$

Тоді для гідродинамічної компоненти тензора енергії-імпульсу ми приходимо до наступного рівняння еволюції гідродинамічного типу з джерелом:

$$\partial_{;\mu} \tilde{T}_{\text{hyd}}^{\mu\nu}(x) = -T_{\text{free}}^{\mu\nu}(x) \partial_{;\mu} \mathcal{P}(\tau), \quad (6)$$

де $\tilde{T}_{\text{hyd}}^{\mu\nu}(x) = (1 - \mathcal{P}(\tau))T_{\text{hyd}}^{\mu\nu}(x)$. Оскільки $T_{\text{free}}^{\mu\nu}(x)$ може бути обчислене явно для будь-якого моменту часу, якщо відомі початкові умови, то ми

можемо формально використовувати в'язку гідродинамічну модель для опису еволюції матерії на претермальній стадії за рівнянням (3).

На рисунку 1 показані профілі густини енергії для релаксаційної моделі в порівнянні з гідродинамічною моделлю та вільним розльотом для ізотропного по імпульсам початкового стану, з рівнянням стану $p = \epsilon/3$. Як можна побачити з рис. 1, кінцева (в момент часу термалізації $\tau = 1 \text{ fm}/c$) густина енергії для релаксаційної моделі знаходиться між відповідними результатами для гідродинаміки (найменші значення) та вільним розльотом (найбільші значення). Такі результати були очікуваними, оскільки релаксаційна еволюція включає в себе як гідродинамічний режим, так і режим вільного розльоту.

У **Розділі 4** дисертації будується інтегрована гідрокінетична модель на основі релаксаційної моделі, якій був присвячений попередній розділ.

Гідродинаміка вважається базовою частиною просторочасової картини еволюції матерії під час ультрарелятивістських зіткнень важких йонів. Для завершення опису ядро-ядерних зіткнень, до гідродинаміки слід додати генератор початкового нерівноважного стану, претермальну динаміку, що формує майже рівноважні початкові умови для гідродинамічної еволюції, та рецепт для утворення частинок під час розпаду суцільного середовища на останній стадії еволюції речовини. Таким чином, інтегрована гідрокінетична модель розділяє еволюцію матерії в процесі ядро-ядерного зіткнення на п'ять стадій:

1. Генерація початкового стану в момент часу. Незважаючи на те, що претермальна динаміка застосовується для утворення початкових умов для гідродинаміки, вона також потребує початкових умов для стану матерії в початковий час τ_0 , наприклад $\tau_0 = 0.1$ або $0.5 \text{ fm}/c$, при якому можна говорити про розподіл густини енергії нерівноважної речовини. Ми використовуємо пакет GLISSANDO 2 для генерації такого початкового стану. Цей пакет працює в рамках квазікласичної моделі Глаубера.
2. Претермальна релаксаційна модель, що була описана в третьому розділі дисертації.
3. В'язка гідродинамічна еволюція. При $\tau = \tau_{th} = 1 \text{ fm}/c$ маємо $\mathcal{P}(\tau_{th}) = 0$ та цільова функція досягнута: $T^{\mu\nu}(x) = T_{hydro}^{\mu\nu}(x)$. Подальша еволюція описується релятивістською в'язкою гідродинамікою відповідно до рівнянь релаксаційної моделі з $\mathcal{P}(\tau) \equiv 0$. Чисельний розв'язок в'язкої гідродинаміки побудований в кодї vHLE. Така еволюція описує розширення надщільної кварк-глюонної плазми та адронної матерії, близької до локальної хімічної та термічної рівноваги з баріонним хімічним потенціалом $\mu_B = 0$ (що

є досить добрим наближенням для енергій ЛНС) до температури, при якій такий підхід більше не працює. Тоді система втрачає властивості локальної рівноваги, термічної та хімічної, і має бути застосоване інше наближення.

4. Стадія утворення частинок. Ми припускаємо, що термічно та хімічно рівноважна еволюція проходить до того, як досягається температура $T = 165 \text{ MeV}$ (що відповідає густині енергії $\epsilon = 0.5 \text{ GeV}/\text{fm}^3$ для рівняння стану Лейна-Шрьодера), і відбувається перехід до каскаду частинок на гіперповерхні, що описується таким критерієм. Така поверхня переключення будується під час гідродинамічної еволюції за допомогою процедури Cornelius. Ми застосовуємо формулу Купера-Фрая для перетворення рідини на каскад частинок:

$$p^0 \frac{d^3 N_i(x)}{d^3 p} = d\sigma_\mu p^\mu f(p \cdot u(x), T(x), \mu_i(x)) \quad (7)$$

Для врахування в'язких корекцій до функції розподілу, використовується анзац Града з 14 моментами.

5. Стадія адронного каскаду. Згенеровані адрони потім подаються до каскаду UrQMD. Оскільки каскад сприймає як вхідні дані лише список частинок в однаковий момент декартового часу, утворені частинки пропагують назад в часі до часу, коли була утворена перша частинка. Частинкам не дозволено взаємодіяти поки їх траєкторія не перетне гіперповерхню партиклізації. Рівняння стану Лейна-Шрьодера, що застосовується в нашому аналізі, відповідає рівноважному адронно-резонансному газу, що включає в себе біля 360 типів адронів на границі низької температури. Багато з цих типів не включені в список адронів UrQMD. Для запобігання порушення законів збереження енергії-імпульсу навіть на простороподібних частинах ізотерми $T = 165 \text{ MeV}$, ми виконуємо розпад важких резонансів, що не входять у список UrQMD, на гіперповерхні переключення.

На рис. 2 ми порівнюємо спектри піонів при імпульсах $0.1 < p_T < 3 \text{ GeV}/c$ при різних параметрах моделі, і також порівнюємо з експериментом. В дисертації побудовані аналогічні графіки для каонів та антипротонів, а також графіки імпульсної залежності коефіцієнтів анізотропії та інтерферометричних радіусів. З цих графіків можна зробити висновок, що інтегрована гідрокінетична модель добре описує експеримент, та найкращий опис досягається при швидкій термалізації ($\tau_{rel} = 0.25 \text{ fm}/c$), мінімальній в'язкості $\eta/s = 0.08$ та високій імпульсній анізотропії поча-

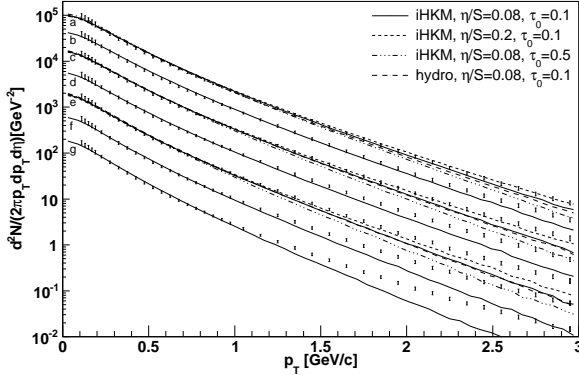


Рис. 2. Результуючі спектри піонів в області $0.1 < p_T < 3$ GeV/c для класів центральності 0-5% (криві з літерою а), 5-10% (b), 10-20% (c), 20-30% (d), 30-40% (e), 40-50% (f) та 50-60% (g), отримані в базовому сценарії iHKM. Результати порівнюються з аналогічними результатами в iHKM з $\tau_0 = 0.5$ fm/c та з чистою в'язкою гідродинамікою з початковим часом $\tau_{th} \rightarrow \tau_0 = 0.1$ fm/c для класів центральності 0-5%, 10-20%, 30-40%. Експериментальні дані отримані колаборацією ALICE на ЛНС. Спектри для різних центральностей помножені на степені 2 ($2^6 = 64$ для центральності 0-5%).

ткового стану. В усіх варіантах моделі (при різних наборах параметрів) виконується нормування густини енергії в початковий момент часу в центрі координат таким чином, щоб множинність усіх заряджених частинок для центральності 0-5% співпадала з експериментальною. Множинності всіх заряджених частинок при цьому отримуються з моделі і дорівнюють експериментальним в межах похибки.

Підвищення релаксаційного часу (напр., з $\tau_{rel} = 0.25$ fm/c до $\tau_{rel} = 0.75$ fm/c) приводить до гіршого опису м'якого спектру піонів, каонів та антипротонів. Підвищення коефіцієнту в'язкості приводить до гіршого опису коефіцієнтів анізотропії. Використання ізотропних по імпульсам початкових умов або підвищення початкового часу релаксаційної моделі приводить до гіршого опису спектрів в цілому. В дисертації виконується кількісне порівняння результатів моделі при різних наборах параметрів за методом χ^2 .

ВИСНОВКИ

1. Використовуючи рівняння Больцмана в наближенні релаксаційного часу, розроблена релаксаційна модель претермальної стадії, що описує поступовий перехід від початкового нерівноважного стану до локально (майже) рівноважного стану. На базі розробленої комп'ютерної програми в рамках цієї моделі проведено дослідження залежності результатів від параметрів претермальної стадії (коефіцієнту анізотропії та рівняння стану).

2. На основі побудованої релаксаційної моделі, в'язкої гідродинамічної моделі та ультрарелятивістської квантової молекулярної динаміки побудована інтегрована гідрокінетична модель ядро-ядерних зіткнень, що описує еволюцію матерії в процесі ядро-ядерного зіткнення від початкової стадії формування матерії до кінцевої стадії розльоту адронів. За допомогою інтегрованої гідрокінетичної моделі отримані значення фізичних спостережуваних, таких як спектри, коефіцієнти анізотропії всіх заряджених частинок та піонні інтерферометричні радіуси для експерименту по зіткненням ядер свинцю на ЛНС з енергією $\sqrt{s} = 2.76 \text{TeV}$ при різних центральностях. Отримані спостережувані узгоджуються з експериментальними даними. Проведено аналіз залежності спостережуваних від параметрів моделі; показано, що мінімальна в'язкість гідродинамічної стадії, швидкий перехід від нетермального стану до локально рівноважного та висока імпульсна анізотропія початкового стану приводять до найкращого опису експериментальних даних.

3. В рамках гідрокінетичної моделі проведено дослідження причин порушення скейлінгу інтерферометричних радіусів по поперечній масі. Встановлено, що основними такими причинами є перерозсіяння частинок та інтенсивні поперечні потоки. Передбачено наявність скейлінгу інтерферометричних радіусів по поперечному імпульсу, що пізніше було підтверджено в експерименті.

4. Була отримана аналітична формула для повздовжніх інтерферометричних радіусів для систем, що розширюються в поперечному напрямку та неперервно випромінюють частинки. За допомогою цієї формули можна отримати власний час максимального випромінювання для різних сортів адронів з фаєрболу.

5. Для 5% найбільш центральних зіткнень свинцю з енергією $\sqrt{s} = 2.76 \text{TeV}$ були зроблені перші передбачення для кореляційних функцій пар $p\Lambda$ та $\bar{p}\Lambda$, враховуючи ефект залишкових кореляцій. Також показані зкоректовані за чистотою та залишковими кореляціями баріон-антибаріонні кореляційні функції, що не залежать від деталей експерименту.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Naboka V. Yu. Initialization of hydrodynamics in relativistic heavy ion collisions with an energy-momentum transport model / V. Yu. Naboka, S. V. Akkelin, Iu. A. Karpenko and Yu. M. Sinyukov // Phys. Rev. C. – 2015. – Vol. 91. – 014906.
2. Naboka V. Yu. Thermalization, evolution, and observables at energies available at the CERN Large Hadron Collider in an integrated hydrokinetic model of A+A collisions / V. Yu. Naboka, Iu. A. Karpenko, Yu. M. Sinyukov // Phys. Rev. C. – 2016. – Vol. 93. – 024902.
3. Sinyukov Yu. M. Femtoscopic pair correlations of mesons and baryons at RHIC and LHC from hydrokinetic model / Yu. M. Sinyukov, V. M. Shapoval, V. Yu. Naboka // Nuclear Physics A. – 2014. – Vol. 931. – P. 1072–1076.
4. Sinyukov Yu. M. On mT dependence of femtoscopic scales for meson and baryon pairs / Yu. M. Sinyukov, V. M. Shapoval, V. Yu. Naboka // Nuclear Physics A. – 2016. – Vol. 946. – P. 227-239.
5. Shapoval V. M. Proton- Λ correlation functions at energies available at the CERN Large Hadron Collider taking into account residual correlations / V. M. Shapoval, Yu. M. Sinyukov, V. Yu. Naboka // Phys. Rev. C. – 2015. – Vol. 92. – 044190.
6. Anchishkin D. Nonequilibrium distribution functions of nucleons in relativistic nucleus-nucleus collisions / D. Anchishkin, V. Naboka, J. Cleymans // Condens. Matter Phys. – 2013. – Vol. 16, No. 1. – 13201. – P. 1-9.
7. Naboka V. Yu. Initialization of hydrodynamics in relativistic heavy ion collisions with energy-momentum transport model / V. Yu. Naboka // VI Young Scientists Conference “Modern problems of theoretical physics”, November 25–27, 2014, Kyiv, Ukraine, Program and Abstracts. – Kyiv. – 2014. – O.2.

АНОТАЦІЯ

Набока В. Ю. Термалізація та еволюція сильновзаємодійної матерії в інтегрованій гідрокінетичній моделі ядро-ядерних зіткнень – На правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата фізико-математичних наук за спеціальністю 01.04.02 – теоретична фізика. – Інститут теоретичної фізики ім. М. М. Боголюбова НАН України, Київ, 2016.

Дисертація присвячена теоретичному дослідженню просторово-часової

структури ультрарелятивістських ядро-ядерних зіткнень та опису спостережуваних, отриманих на експерименті ALICE на LHC. Основна увага приділяється процесу термалізації початково нерівноважної матерії, після якої застосовна гідродинамічна модель. Розроблена інтегрована гідрокінетична модель, що об'єднує в собі генерацію початкових умов, поступову термалізацію матерії, в'язку гідродинамічну еволюцію, перехід до опису системи як сукупності адронів та кінцевий розльот адронів. За допомогою цієї моделі описані спектри, коефіцієнти анізотропії, піонні інтерферометричні радіуси, множинності всіх заряджених частинок для експерименту ALICE на LHC. Також в рамках гідрокінетичної моделі був показаний скейлінг піонних та каонних інтерферометричних радіусів по поперечному імпульсу та отримана аналітична формула для повздовжніх інтерферометричних радіусів, що дозволяє отримати час максимальної емісії. Були зроблені перші передбачення для кореляційних функцій пар протон-лямбда та антипротон-лямбда для експерименту ALICE на LHC.

Ключові слова: ядро-ядерні зіткнення, гідродинамічна модель, локальна рівновага, інтерферометричні радіуси, піони, каони, протони, лямбда-баріони, імпульсний спектр, коефіцієнт анізотропії, кореляційна функція, функція джерела.

АННОТАЦІЯ

Набока В. Ю. Термализация и эволюция сильновзаимодействующей материи в интегрированной гидрокинетической модели ядро-ядерных столкновений – На правах рукописи.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.02 – теоретическая физика. – Институт теоретической физики им. Н. Н. Боголюбова НАН Украины, Киев, 2016.

Диссертация посвящена теоретическому исследованию пространственно-временной структуры ультрарелятивистских ядро-ядерных столкновений и описанию наблюдаемых, полученных на эксперименте ALICE на LHC. Основное внимание уделяется процессу термализации изначально неравновесной материи, после которой используется гидродинамическая модель. Разработана интегрированная гидрокинетическая модель, которая объединяет в себе генерацию начальных условий, постепенную термализацию материи, вязкую гидродинамическую эволюцию, переход к описанию системы как совокупности адронов и моделирование разлета этих адронов. С помощью этой модели описаны спектры, коэффициенты анизотропии, пионные интерферометрические радиусы, множественности всех

заряженных частиц для эксперимента ALICE на LHC. Также в рамках гидрокинетической модели был показан скейлинг пионных и каонных интерферометрических радиусов по поперечному импульсу и получена аналитическая формула для продольных интерферометрических радиусов, которая позволяет получить время максимальной эмиссии. Были сделаны первые предсказания для корреляционных функций пар протон-лямбда и антипротон-лямбда для эксперимента ALICE на LHC.

Ключевые слова: ядро-ядерные столкновения, гидродинамическая модель, локальное равновесие, интерферометрические радиусы, пионы, каоны, протоны, лямбда-барионы, импульсный спектр, коэффициент анизотропии, корреляционная функция, функция источника.

ABSTRACT

Naboka V. Yu. Thermalization and evolution of strong-interacting matter in integrated hydrokinetic model of A+A collisions – Manuscript.

Thesis for the Doctor of Philosophy degree (Candidate of science in Physics and Mathematics) in speciality 01.04.02 – theoretical physics. – Bogolyubov Institute for Theoretical Physics of the National Academy of Sciences of Ukraine, Kyiv, 2016.

The thesis is devoted to the theoretical study of the space-time structure of relativistic nucleus-nucleus collisions in integrated hydrokinetic model and description of the observables of experiments at LHC and RHIC using the integrated hydrokinetic model.

The p_T -dependence of femtoscopic scales for pions and kaons is calculated within the hydrokinetic model. The reasons of interferometry radii m_T -scaling for pions and kaons violation are demonstrated. The p_T -scaling was predicted, which was proven experimentally afterwards. The analytical formula for the longitudinal interferometry radii that allows one to extract the time of maximal emission for the certain hadron pairs in the case of strong transverse flows in A+A and p + p collision processes is proposed. It is compared with detail calculations and spatiotemporal picture of the particle emission in hydrokinetic model that already described well the large number of the bulk observables.

First predictions were made for the p_T -dependence of correlation functions for $p\Lambda$ and $\bar{p}\Lambda$ pairs with collision energy $\sqrt{s} = 2.76\text{TeV}$. The purity and residual correlation corrected baryon-antibaryon correlation functions, which should not depend on the experiment details and thus can be easily compared with experimental result, are demonstrated for these pairs.

The results of initialization of hydrodynamic initial conditions by means

of the simulations of pre-equilibrium relaxation dynamics with the energy-momentum transport phenomenological model were presented. The initial conditions for the hydrodynamical evolution using isotropic and anisotropic in momentum space initial states, were calculated. The dependence of the target thermal state on the rates of conversion to hydrodynamical regime and different equations of states is presented as well. It is found that at the same initial energy density, the final energy densities and pre-thermal transverse collective flows grow when the anisotropy parameter — the ratio of transverse pressure to longitudinal one, increases. Also, it is found that at any relaxation time and initial momentum anisotropy, both the final energy density and transverse velocity profile in relaxation model never coincide simultaneously with analogous values reached in hydrodynamic model or at the free streaming regime. Therefore, continuous relaxation dynamics from initially non-equilibrium state to (almost) equilibrium one can not be properly approximated by the free streaming or hydrodynamic models. The known prescription of sudden thermalization of the free streaming pre-thermal evolution results in discontinuity in the energy-momentum tensor, which for free streaming has specific (non-viscous) non-equilibrium structure, and so to a breakdown of the energy and momentum conservation laws.

A further development of the evolutionary picture of A+A collisions, the integrated HydroKinetic Model (iHKM), is proposed. The model comprises a generator of the initial state GLISSANDO, pre-thermal dynamics of A+A collisions leading to thermalization, subsequent relativistic viscous hydrodynamic expansion of quark-gluon and hadron medium (vHLLE), its particlization, and finally hadronic cascade ultrarelativistic QMD. The best description of the experimental data for beam energy $\sqrt{s} = 2.76\text{TeV}$ is reached when the initial states are attributed to the very small initial time 0.1 fm/c, the pre-thermal stage (thermalization process) lasts at least until 1 fm/c, and the shear viscosity at the hydrodynamic stage of the matter evolution has its minimal value, $\eta/s = 1/4\pi$. It is observed that the various momentum anisotropies of the initial states, different initial and relaxation times, as well as even a treatment of the pre-thermal stage within just viscous or ideal hydrodynamic approach, leads sometimes to worse but nevertheless similar results, if the normalization of maximal initial energy density in most central events is adjusted to reproduce the final hadron multiplicity in each scenario.

Key words: nucleus-nucleus collisions, hydrodynamic model, local equilibrium, interferometry radii, femtosopic scales, pions, kaons, protons, Lambda-baryons, momentum spectra, anisotropy coefficient, correlation function, source function.

Набока Владислав Юрійович

Термалізація та еволюція сильновзаємодійної матерії в інтегрованій гідрокінетичній моделі ядро-ядерних зіткнень. (Автореферат дисертації на здобуття наукового ступеня кандидата фізико-математичних наук.)

Зам. – 11. Формат 60 × 84/16. Обл.-вид. арк – 1.00

Підписано до друку 17.11.2016. Тираж 100 прим.

Поліграфічна дільниця ІТФ ім. М. М. Боголюбова НАН України,
03143, м. Київ, вул. Метрологічна, 14-б.