

НАЦІОНАЛЬНА АКАДЕМІЯ НАУК УКРАЇНИ
ІНСТИТУТ ТЕОРЕТИЧНОЇ ФІЗИКИ ІМ. М. М. БОГОЛЮБОВА

Карпенко Юрій Олександрович

УДК 539.12.01

**РОЗВИТОК ГІДРОДИНАМІЧНОГО ТА ГІДРОКІНЕТИЧНОГО
ПІДХОДІВ
ДЛЯ УЛЬТРА-РЕЛЯТИВІСТСЬКИХ ЯДРО-ЯДЕРНИХ ЗІТКНЕНЬ**

Спеціальність 01.04.02 – теоретична фізика

Автореферат
дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата фізико-математичних наук

Київ – 2010

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана в Інституті теоретичної фізики ім. М.М. Боголюбова
Національної академії наук України та в Університеті м. Нант (Франція).

Наукові керівники: доктор фізико-математичних наук
Синюков Юрій Михайлович,
Інститут теоретичної фізики ім. М.М.
Боголюбова,
провідний науковий співробітник відділу
фізики високих густин енергії

професор
Клаус Вернер
Університет м. Нант (Франція)

Офіційні опоненти: доктор фізико-математичних наук,
Ріхард Ледніцкі
Об'єднаний інститут ядерних досліджень РАН
віце-директор

професор, старший науковий співробітник
Жан-Ів Оллітро
Інститут теоретичної фізики, Сакле (Франція)

Захист відбувся 24 травня 2010 р. на засіданні журі в лабораторії субатомної
фізики та супутніх технологій (університет м. Нант) за адресою:
4 rue Alfred Kastler, La Chantrerie, 44307 Nantes, France

З дисертацією можна ознайомитись у бібліотеці університету м. Нант за адресою:
Chemin de la Censive du Tertre, 44322 Nantes, France

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Головною фізичною мотивацією вивчення зіткнень важких йонів при ультра-релятивістських енергіях є відтворення фізичних умов, подібних до тих, які існували у гарячому Всесвіті приблизно 10^{-7} - 10^{-5} секунд після Великого вибуху. Вважається, що в цих зіткненнях виникає нова, фундаментальна фаза речовини, що називається кварк-глюонною плазмою, в якій фундаментальні частинки — кварки та глюони — не зв'язані в окремі гадрони (нуклони). Кварк-глюонна плазма є універсальною фазою речовини при екстремально великих температурах вище 10^{12} К. Системи ж, що утворюються у процесі ядро-ядерного зіткнення (файрболи) мають дуже малі просторово-часові характеристики: розміри порядку 10^{-15} м та час життя 10^{-22} с.

Обчислення в рамках квантової хромодинаміки — теорії сильної взаємодії — значно ускладнюються внаслідок великої константи зв'язку при малих переданих імпульсах в цій теорії. S-матричне формулювання такого процесу виходячи з перших принципів КХД є екстремально складною задачею. Однак, ще в 1953 Ландау було запропоновано описувати процеси множинного народження у так званих космічних зливах за допомогою розгляду детальної динамічної еволюції замість S-матричного формулювання. А саме, розглядалось розширення файрболу за допомогою рівнянь релятивістської гідродинаміки.

На даний момент гідродинамічні моделі успішно використовуються для опису динаміки зіткнень при енергіях прискорювачів SPS (CERN, Geneva), RHIC (Brookhaven, USA) та LHC (CERN, Geneva). Застосовність гідродинамічного наближення до ультра-релятивістських зіткнень важких йонів справджується як теоретичними розрахунками, так і експериментальними свідченнями. Зокрема, аналіз імпульсних спектрів частинок надає обмеження на коефіцієнт в'язкості такої рідини, який виявляється дуже малим. Можна навіть казати про застосовність наближення ідеальної рідини для опису такої еволюції.

З множини експериментальних даних можна виділити інтерферометричні вимірювання — дослідження двочастинкових імпульсних спектрів тотожних частинок, аналогічні до інтерферометричних вимірювань в астрономії для визначення кутових розмірів зірок. Такі інтерферометричні (або фемтоскопічні) виміри дозволяють отримати пряму інформацію про просторово-часові характеристики процесу зіткнення, що відображається у так званих інтерферометричних радіусах R_{out} , R_{side} , R_{long} та їх поведінки в залежності від

імпульсу пари частинок. Таким чином, значний інтерес складає побудова динамічної моделі ядро-ядерного зіткнення, що відтворює поведінку цих величин, а також інші спостережних величин, а значить - правильно відтворює просторово-часові характеристики процесу зіткнення. Це і є метою даної дисертаційної роботи.

Зв'язок з науковими програмами, планами та темами. Дисертаційна робота була виконана у відповідності до державної науково-дослідної програми, що виконувалась в Інституті теоретичної фізики ім. М.М. Боголюбова НАН України: “Дослідження сильновзаємодіючої матерії у зіткненнях частинок та ядер при високих енергіях” 2005-2007рр. (номер державної реєстрації в УкрІНТЕІ — 0105U000431, шифр 1.3.1). Дисертаційна робота була виконана в рамках програми сумісної аспірантури між університетом м. Нант (Франція) та Інститутом теоретичної фізики ім. М.М. Боголюбова НАН України.

Мета і задачі дослідження. Метою досліджень, що представлені в дисертаційній роботі, є побудова динамічної моделі процесу ядро-ядерного зіткнення при ультра-релятивістських енергіях, узгодженої з інтерферометричними даними. Повна динамічна модель має базуватись на моделі початкової стадії зіткнення, що формує початкові умови для гідродинамічної еволюції, а також обрахунку кінцевої, нерівноважної стадії зіткнення.

В дисертаційному дослідженні було використано теоретичні методи статистичної фізики, гідродинаміки, кінетичної теорії, квантової механіки, методи математичного аналізу. Також використовувалось чисельне моделювання для чисельного розв'язку рівнянь релятивістської гідродинаміки, обрахунку наближеного розв'язку рівняння Больцмана на мові програмування C++. Допоміжні обрахунки та візуалізація результатів були зроблені за допомогою пакету ROOT. Для знаходження чисельного розв'язку рівняння Больцмана також використовувався транспортний код UrQMD.

Наукова новизна одержаних результатів. Винайдено новий клас 3+1-вимірних аналітичних розв'язків рівнянь релятивістської гідродинаміки ідеальної рідини.

Побудовано модель кінцевої стадії еволюції зіткнення, що дозволяє описувати кінцеві імпульсні спектри частинок у наближенні миттєвого розпаду гідродинамічної системи. Аналіз, проведений в цій моделі, показує, що одночасний опис імпульсних спектрів та інтерферометричних радіусів в ядро-ядерних зіткненнях можливий тільки в динамічній моделі з роздільним хімічним

та термічним заморожуванням.

Запропонована повна динамічна модель ядро-ядерного зіткнення, що належить до класу так званих “гібридних” моделей, однак має декілька переваг у порівнянні з існуючими: використовується мікроскопічна модель початкової стадії EPOS, рівняння стану, узгоджене з результатами КХД на ґратці, та симуляція кожної події зіткнення окремо. Перераховані риси моделі дають можливість успішного опису як імпульсних спектрів гадронів та їх анізотропії в нецентральных зіткненнях, так і інтерферометричних радіусів в експериментах на колайдері RHIC.

Також запропоновано динамічну модель зіткнення, що базується на гідрокінетичному підході, який об'єднує гідродинамічний опис розширення файєрболу та його динамічний розпад, що визначається імовірностями звільнення частинок з середовища. Модель також успішно описує імпульсні спектри π - та K-мезонів та їх кореляційні радіуси для зіткнень з $\sqrt{s}=200 \text{ GeV}$ на колайдері RHIC та найвищій енергії зіткнення прискорювача SPS. Крім того, зроблене передбачення відповідних величин для зіткнень важких йонів на колайдері LHC.

В рамках гідрокінетичної моделі показано, що успішний опис як імпульсних спектрів частинок, так і інтерферометричних радіусів можливий завдяки декільком факторам: відносно жорсткому рівнянню стану з фазовим переходом неперервного типу, врахуванню колективних потоків, що розвиваються на початковій нерівноважній стадії зіткнення, та коректному опису рівняння стану при еволюції хімічно нерівноважної гадронної матерії на кінцевій стадії процесу зіткнення.

Практичне значення отриманих результатів. Винайдені аналітичні розв'язки рівнянь релятивістської гідродинаміки використовуються у подальших пошуках в цьому напрямку. Моделі, запропоновані в дисертації, можуть бути застосовними для опису широкого кола експериментальних даних або їх передбачення у сучасних та майбутніх експериментальних програмах на прискорювачах елементарних частинок та ядер. Модель, запропонована у розділі 3, в даний час використовується як складова частина моделі HYDJET++, що використовується для вивчення жорстких процесів та струменів в ультра-релятивістських ядро-ядерних зіткненнях. Динамічну модель, побудовану у розділі 4, також застосовано для опису процесів протон-протонних зіткнень з великою множинністю на колайдері LHC.

Особистий внесок здобувача. В роботах [1, 9] знайдені часткові гідродинамічні розв'язки. В роботах [2, 3] відтестовано алгоритм генерації

частинок, показано вплив додаткової ваги, спричиненої анізотропією випромінювання, розроблено процедури для обрахунку кореляційних функцій та їх фітування з метою отримання інтерферометричних радіусів. В роботах [4, 10] розроблено та реалізовано чисельний алгоритм розв'язку рівнянь релятивістської гідродинаміки, розроблено гідродинамічне рівняння стану та процедуру переходу від гідродинамічної еволюції до кінетичного розгляду. В роботах [5-8, 12] розроблено та реалізовано чисельний алгоритм, що проводить обчислення в гідрокінетичній моделі, запропоновано та реалізовано метод розрахунку хімічно нерівноважної еволюції гадронної суміші, та проведено чисельні розрахунки в гідрокінетичній моделі.

Апробація результатів дисертації. Результати доповідалися і обговорювалися на таких конференціях: Міжн. школа “RHIC School 2005”, м. Будапешт, Угорщина, 2005 р.; Міжн. робочі наради GDRE, м. Нант, Франція, 2005-2006 рр., м. Дубна, Російська федерація, 2006 р., м. Грибов, Польща, 2007 р.; Міжн. робоча нарада “From Nuclotron to LHC energies”, м. Київ, Україна, 2007 р.; Міжн. конференція “Quark Matter 2008”, м. Джайпур, Індія, 2008 р.; Міжн. школа “Week of Doctoral Students 2008”, м. Прага, Чеська республіка, 2008 р.; Міжн. конференція “New Trends in High Energy Physics”, м. Ялта, Україна, 2008 р.; Міжн. конференція “XXXIX International Symposium on Multiparticle Dynamics”, м. Золоті Піски, Білорусь, 2009 р.; Міжн. конференції “Workshop on Particle Correlations and Femtoscopy”, м. Женева, Швейцарія, 2009 р., та м. Київ, Україна, 2010 р.

Крім того, результати дисертаційної роботи були представлені на семінарах в ІТФ ім. М.М. Боголюбова НАН України та Університету м. Нант, Франція.

Публікації. Результати дисертацій опубліковано у XX статтях у фахових журналах [1–4], 1 електронних препринтах [XX].

Структура та обсяг дисертації. Дисертаційна робота складається із вступу, чотирьох розділів, висновків, списку використаних джерел із 148 найменувань. Повний обсяг дисертації становить 159 сторінок тексту, у т. ч. 19 рисунків та 18 таблиць.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У **Розділі 1** дисертаційної роботи викладено обґрунтування актуальності досліджень, мету та методи дослідження. Стисло викладено історичний розвиток колективних моделей, від перших застосувань до опису процесів множинного народження у так званих космічних зливах, до опису даних у процесах ядро-

ядерних зіткнень у сучасних експериментах на прискорювачах.

На даний час, широкий клас експериментальних даних з прискорювача SPS (CERN, Женева) та колайдера RHIC (Брукхевен, США) свідчить про те, що властивості речовини, що існує у процесі ядро-ядерного зіткнення та характеризується густиною енергії, значно більшою ніж в ядерній матерії, аналогічні до властивостей рідини з дуже малою в'язкістю. Зокрема, аналіз імпульсних спектрів різних сортів народжених частинок вказують на існування колективних потоків у системі, що утворюється у процесі зіткнення (файєрболи). Також розглядається інший клас величин — коефіцієнти анізотропії v_2 імпульсних спектрів частинок, що визначаються з наступного співвідношення:

$$\frac{dN}{d^2 p_T dy} = \frac{dN}{2\pi p_T dp_T dy} (1 + 2v_2 \cos(2\phi_p) + \dots) , (1)$$

опис яких при енергіях колайдера RHIC є можливим у моделях з гідродинамічним сценарієм еволюції речовини, та не є можливим у чисто кінетичних моделях. Нарешті, аналіз інтерферометричних радіусів R_{out} , R_{side} , R_{long} для π -мезонів, що визначаються з наступної формули:

$$C(p_1, p_2) = 1 + \lambda \exp(-R_{side}^2 q_{side}^2 - R_{out}^2 q_{out}^2 - R_{long}^2 q_{long}^2) , (2)$$

де CF є двочастинковою кореляційною функцією пари бозонів, накладає обмеження на просторово-часові характеристики процесу випромінювання, а значить, і еволюції файєрболу. Однак, наявні гібридні (гідродинамічні+кінетичні) моделі ядро-ядерних зіткнень не дають задовільного опису інтерферометричних радіусів.

Оригінальні результати подано в розділах 2–5.

У **Розділі 2** знайдено нові аналітичні розв'язки рівнянь релятивістської гідродинаміки ідеальної рідини, що мають еліптичну симетрію. Аналітичні розв'язки релятивістської гідродинаміки, на відміну від чисельних розв'язків, дозволяють однозначно пов'язати початкові параметри розширення з параметрами на кінцевій стадії, на якій формуються імпульсні спектри частинок.

На даний момент існують декілька аналітичних розв'язків релятивістської гідродинаміки вибухового типу, застосовних до ядро-ядерних зіткнень, наприклад, розв'язок Хва/Бьоркена, та інші. Однак, ці розв'язки є одновимірними або мають симетрії, що роблять їх ефективно одновимірними. Тому, метою цього розділу є пошук аналітичного розв'язку, застосовного до опису нецентрального ядро-ядерних зіткнень.

Рівняння релятивістської гідродинаміки мають наступний вигляд:

$$\partial_\mu T^{\mu\nu} = 0, \quad \text{де } T^{\mu\nu} = (\epsilon + p) u^\mu u^\nu - p \cdot g^{\mu\nu} \text{ відповідає ідеальній рідині.}$$

Для пошуку розв'язків використовуємо умову квазі-інерційності потоку:

$$u^\nu \partial_\nu u^\mu = 0 \quad (3)$$

Був знайдений наступний анзац для 4-швидкості:

$$u^\mu = \left\{ \frac{t}{\sqrt{t^2 - \sum a_i^2(t) x_i^2}}, \frac{a_k(t) x_k}{\sqrt{t^2 - \sum a_i^2(t) x_i^2}} \right\}$$

де функції $a_i(t)$ фіксуються умовою (3):

$$a_i(t) = \frac{t}{t + T_i}$$

T_i - константи, що визначають 3-вимірний анізотропний потік.

Щоб задовольнити інші рівняння, вибрано випадок постійного тиску, $p = const$.

При цьому, загальний розв'язок для густини енергії має наступний вигляд:

$$\epsilon + p_0 = \frac{F_\epsilon \left(\frac{x_1}{t+T_1}, \frac{x_2}{t+T_2}, \frac{x_3}{t+T_3} \right)}{(t+T_1)(t+T_2)(t+T_3)}, \quad n = \frac{F_n \left(\frac{x_1}{t+T_1}, \frac{x_2}{t+T_2}, \frac{x_3}{t+T_3} \right)}{(t+T_1)(t+T_2)(t+T_3)} \quad (5)$$

Наведемо частковий розв'язок, що відповідає просторово обмеженій системі, що розширюється у вакуум. При цьому густина ентальпії та густина частинок зануляються на межі системи, де $|\mathbf{v}(t, \mathbf{x})| = 1$:

$$\epsilon(t) + p_0 = \frac{C_\epsilon}{\prod_i (t+T_i)} \exp(-b_\epsilon^2 \frac{t^2}{\tilde{\tau}^2}), \quad n(t) = \frac{C_n}{\prod_i (t+T_i)} \exp(-b_n^2 \frac{t^2}{\tilde{\tau}^2}), \quad (6)$$

де $\tilde{\tau} = \sqrt{t^2 - \sum a_i^2(t) x_i^2}$. Інший частковий розв'язок є еліптично-симетричним узагальненням Хаблівського потоку:

$$u^\mu = \left\{ \frac{t}{\tilde{\tau}}, \frac{a_1 x_1}{\tilde{\tau}}, \frac{a_2 x_2}{\tilde{\tau}}, \frac{a_3 x_3}{\tilde{\tau}} \right\} \quad (7)$$

$$\epsilon + p_0 = C_\epsilon \frac{a_1 a_2 a_3}{\tilde{\tau}^3}, \quad n = C_n \frac{a_1 a_2 a_3}{\tilde{\tau}^3},$$

Константи C_ϵ, C_n визначаються з початкових умов. Слід зазначити, що розв'язки з ненульовим p_0 застосовні в обмеженому інтервалі часу. Тому, більш природно використовувати розв'язки з $p=0$, що може справджуватись у просторово-часовій області фазового переходу першого роду, де $c_s^2 = \partial p / \partial \epsilon \approx 0$, або на фінальній стадії ядро-ядерного зіткнення, що характеризується квазі-

інерційними потоками. Важливо зазначити, що існують обмежені у просторі розв'язки, які можуть використовуватись для тестування релятивістських гідродинамічних кодів.

У **Розділі 3** запропоновано генератор подій ядро-ядерних зіткнень, в якому використовується наближення Ландау/Купера-Фрая для формування спектрів випромінених частинок. Використовується припущення про те, що гідродинамічне розширення файерболу закінчується швидким розпадом системи на гіперповерхні постійного поздовжнього власного часу $\tau = \sqrt{t^2 - z^2}$.

В цьому наближенні, розподіл випромінених на гіперповерхні розпаду частинок за імпульсом має наступний вираз:

$$p^0 \frac{d^3 N_i}{d^3 p} = \int_{\sigma(x)} d^3 \sigma_\mu(x) p^\mu f_i^{\text{leq.}}(p \cdot u(x); T, \mu_i) \quad (8)$$

Розроблено процедуру, що генерує набір частинок за даною формулою. Множинність частинок в кожній події вибирається згідно з розподілу Пуассона з середньою множинністю $\langle N_i \rangle$, обчисленою за допомогою інтегрування (8). При цьому, для прискорення генерації, координати частинок генеруються в системі спокою зіткнення, виходячи з інваріантного об'єму на даній гіперповерхні, а імпульси частинок — в системі спокою елемента рідини, після чого виконується лоренц-перетворення імпульсу до системи спокою зіткнення. Також за допомогою залишкової ваги враховується неодноразність розпаду в системі спокою елемента рідини. На гіперповерхні розпаду випромінюються як (квазі-)стабільні гадрони, так і довго- та короткоживучі гадронні резонанси. Кінематика розпадів останніх обраховується точно, і продукти розпаду додаються до набору випромінених частинок.

Вхідними параметрами моделі є термодинамічні параметри на гіперповерхні розпаду — температури хімічного (T_{ch}) та термічного (T_{th}) заморожування спектрів, баріонний, зарядовий та дивний хімічні потенціали μ_B, μ_Q, μ_S , фактор зменшення дивності γ_S ; геометричні параметри гіперповерхні розпаду: власний час τ , та його відхилення $\Delta\tau$, геометричний розмір системи R_{max} , максимальний потік ρ_u^{max} . Також, для нецентральных зіткнень вводяться додаткові параметри просторової та імпульсної асиметрії розподілів $\epsilon(b), \delta(b)$, що залежать від прицільного параметру зіткнення b .

Проведено опис експериментальних даних для центральних та нецентральных зіткнень йонів золота з енергією $\sqrt{s} = 200 \text{ GeV}$ на колайдері RHIC, а

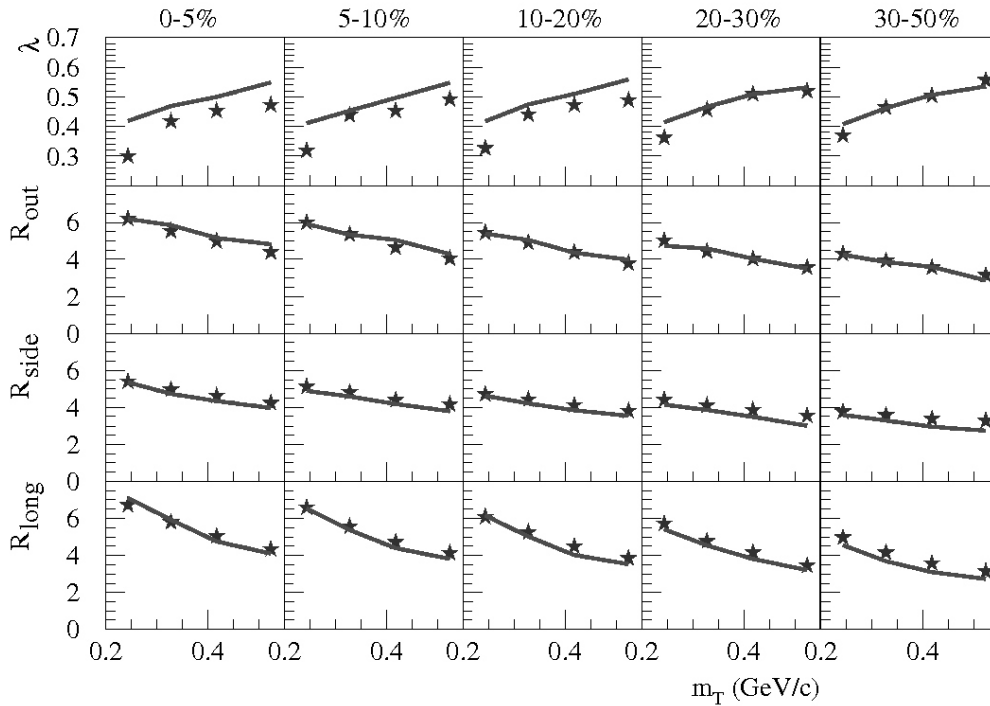


Рис. 1. Інтерферометричні радіуси R_{out} , R_{side} , R_{long} та інтерсепт λ кореляційної функції пари π -мезонів як функція поперечної маси m_T , обраховані в гібридній моделі, у порівнянні з експериментальними даними для зіткнень $\sqrt{s}=200$ GeV на колайдері RHIC.

само, імпульсних спектрів π -, K-мезонів та протонів, а також v_2 -коефіцієнтів та інтерферометричних радіусів для π -мезонів. Опис даних дає можливість відновити параметри системи на стадії розпаду в даній моделі. Зокрема, зроблено висновок про різницю в температурах термічного та хімічного заморожування спектрів.

У **Розділі 4** запропоновано повну динамічну модель процесу зіткнення, що складається зі струнної моделі початкової стадії зіткнення EPOS, що формує початкові умови для гідродинамічного розширення, чисельного гідродинамічного алгоритму та транспортного коду UrQMD для опису фінальної стадії процесу зіткнення.

Для побудови чисельного 3-вимірної розв'язку рівнянь релятивістської гідродинаміки використовується метод скінченного об'єму: фізичний простір представляється у вигляді ґратки з комірками кінцевого об'єму. Зміна значень величин у комірках відбувається завдяки потокам через границі комірок, для обрахунку яких використовується наближений метод HLLE (Harten-Lax-van Leer-

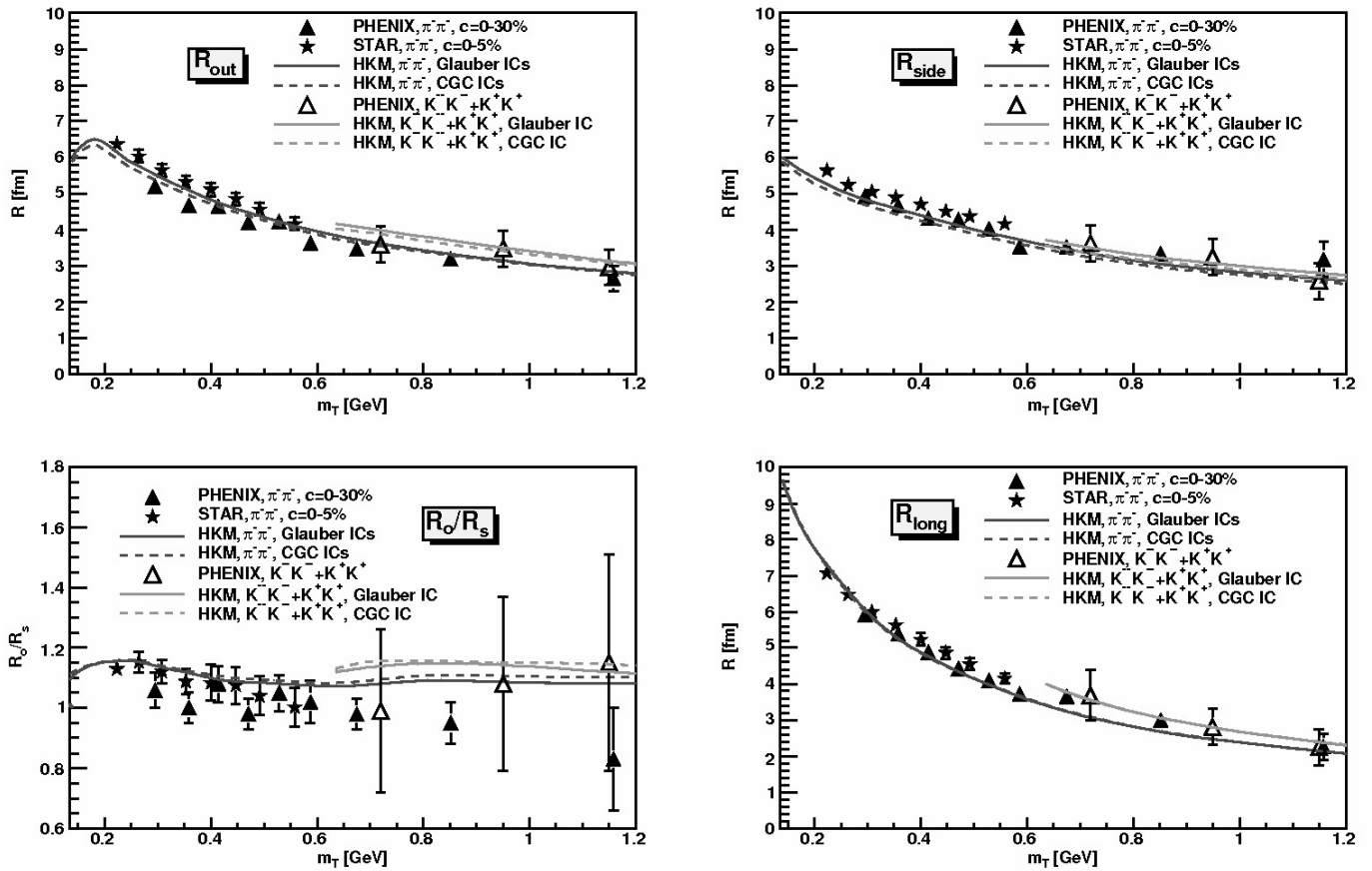


Рис. 2. Інтерферометричні радіуси R_{out} , R_{side} , R_{long} кореляційної функції пари π -мезонів та K -мезонів як функція поперечної маси m_T , обраховані в гідрокінетичній моделі, у порівнянні з експериментальними даними для зіткнень $\sqrt{s}=200$ GeV на колайдері RHIC.

Einfeldt).

Рівняння стану побудоване з моделі суміші ідеальних газів гадронів та феноменологічної параметризації, що базується на результатах КХД на ґратці, при цьому виникає фазовий перехід нескінченного типу (т.зв. кросовер) між гадронною та кварк-глюонною фазами. На гіперповерхні гадронізації генерується набір гадронів згідно з формулою Ландау/Купера-Фрая (6) за методом Монте-Карло, після чого за допомогою коду UrQMD обраховуються перерозсіяння гадронів до моменту, коли всі взаємодії між ними закінчуються. Така процедура повторюється для кожної події зіткнення, з різними початковими умовами, внаслідок флюктуацій останніх.

В даній моделі досягнуто опис широкого класу експериментальних даних для зіткнень $\sqrt{s}=200$ GeV на колайдері RHIC: поперечних імпульсних спектрів π -

та К-мезонів, (анти)протонів, Λ , Ξ -баріонів, v_2 -коефіцієнтів для π - та К-мезонів, (анти)протонів. Також, як видно на Рис.1, досягається опис кореляційних радіусів π -мезонів, таким чином, відтворюються просторово-часові масштаби процесу зіткнення. Цей результат є відносно новим для існуючих динамічних моделей ультра-релятивістських ядро-ядерних зіткнень.

У **Розділі 5** розроблено гідро-кінетичну модель еволюції матерії у ядро-ядерних зіткненнях. Гідро-кінетичний підхід базується на розгляді випромінення частинок з густої системи, що розширюється у вакуум гідродинамічним чином. Функція розподілу випромінених частинок представляється у вигляді, аналогічному до інтегрального розв'язку рівняння Больцмана:

$$f_i(t, \vec{x}, p) = f_i(\bar{x}_{t \rightarrow t_0}, p) P_{t_0 \rightarrow t}(\bar{x}_{t \rightarrow t_0}, p) + \int_{t_0}^t G_i(\bar{x}_{t \rightarrow s}, p) P_{s \rightarrow t}(\bar{x}_{t \rightarrow s}, p) \quad (9)$$

де $\bar{x}_{t \rightarrow s} = (s, \vec{x} + \frac{p}{p_0}(s-t))$, f_i - локально-рівноважна функція розподілу, G_i —

член у правій частині рівняння Больцмана, що відповідає приросту частинок в елементі фазового об'єму, $P_{t_0 \rightarrow t}$ - ймовірність частинки пролетіти по траєкторії вільного руху з часу t_0 до t без зіткнення. Використовується наближення члену притоку $G_i(x, p) = f_i^{\text{leq.}}(x, p) R_i^{\text{leq.}}(x, p) + G_i^{\text{decay}}(x, p)$, де $f_i^{\text{leq.}}$ - локально-рівноважна функція розподілу, $R_i^{\text{leq.}}$ - темп зіткнень частинки з середовищем, G_i^{decay} - приток частинок до елементу фазового об'єму в результаті розпаду резонансу без подальших розсіянь. Переріз розсіяння гадронів, що входить в $R_i^{\text{leq.}}$, розраховується способом, аналогічним такому в транспортному кодi UrQMD.

Емісія частинок, що визначається (9), залежить від розподілів термодинамічних параметрів та швидкостей розширення, які визначаються з чисельного розв'язку релятивістської гідродинаміки за допомогою коду, описаного у попередньому розділі. Використовується гідродинамічне рівняння стану, що поєднує феноменологічні результати КХД у кварк-глюонній фазі, фазовий перехід нескінченного типу та хімічно нерівноважна суміш ідеальних газів різних сортів гадронів. Розпади короткоживучих резонансів враховуються динамічно у рівнянні стану.

В рамках гідро-кінетичної моделі показано, що наближення Ландау/Купера-Фрая може бути використано для обчислення імпульсних спектрів гадронів, однак гіперповерхня заморожування спектрів має обчислюватись з критерію максимуму

функції емісії та залежить від імпульсу випромінених частинок.

Модель застосовано до одночасного опису імпульсних спектрів та інтерферометричних радіусів π - та K -мезонів для зіткнень з $\sqrt{s}=200$ GeV на колайдері RHIC (див. Рис. 2), а також для опису поведінки інтерферометричних радіусів π -мезонів в залежності від енергії зіткнення.

ВИСНОВКИ

Дисертаційна робота присвячена побудові динамічної моделі ядро-ядерних зіткнень при ультрарелятивістських енергіях, сумісної з інтерферометричними вимірами у цих експериментах.

В роботі знайдено новий клас аналітичних розв'язків рівнянь релятивістської гідродинаміки ідеальної рідини з еліптичною симетрією. Такі розв'язки описують розширення скінчених систем у вакуум. Внаслідок специфічного рівняння стану вони не можуть бути застосовними до опису усієї гідродинамічної стадії розширення, однак їх можна використовувати для тестування та перевірки чисельних розв'язків релятивістської гідродинаміки для таких процесів.

Запропоновано швидкий генератор подій ядро-ядерних зіткнень, що базується на наближенні Ландау/Купера-Фрая та враховує сильні та слабкі розпади резонансів. Проведено опис центральних та нецентральных зіткнень для енергії $\sqrt{s}=200$ GeV на колайдері RHIC, та досягнуто узгодження з експериментально виміряною залежністю інтерферометричних радіусів від середнього імпульсу пари частинок k_T . Показано, що сценарій з роздільними хімічним та термічним заморожуванням є більш відповідним для пису експериментальних даних для інтерферометричних радіусів та еліптичних потоків v_2 .

Запропоновано повну динамічну модель процесу ядро-ядерного зіткнення, що базується на струнній моделі початкової стадії зіткнення EPOS, чисельному гідродинамічному алгоритмі та транспортному коді UrQMD для опису фінальної стадії процесу зіткнення. Модель належить до класу т.зв. "гібридних" моделей, але має декілька переваг у порівнянні з існуючими, а саме, обрахунок окремих подій зіткнення (event-by-event), використання ефективного 3+1-вимірного гідродинамічного алгоритму зі збереженням квантових зарядів, реалістичне рівняння стану речовини, сумісне з результатами КХД на гратці. Ці риси моделі дозволяють описати експериментально виміряні значення інтерферометричних радіусів разом з імпульсними спектрами частинок та коефіцієнтами анізотропії v_2 для нецентральных зіткнень на колайдері RHIC.

Також створено гідро-кінетичну модель ядро-ядерних зіткнень, що базується на однойменному наближенні. Ця модель дозволяє описувати випромінювання частинок з густої та гарячої системи, що розширюється у вакуум гідродинамічним чином, методом, сумісним з рівнянням Больцмана та законами збереження. В рамках цієї моделі знайдено умови застосовності узагальненого наближення Ландау/Купера-Фрая. Модель застосовано до опису ядро-ядерних зіткнень при енергіях прискорювачів RHIC та SPS, а також передбачень аналогічних експериментальних даних з колайдера LHC. В гідро-кінетичній моделі випробувано початкові умови для гідродинамічної стадії з різних моделей, побудовано рівняння стану з фазовим переходом типу кросоверу та хімічно нерівноважною адронною матерією. Досягнуто узгодження з експериментальними даними для імпульсних спектрів та інтерферометричних радіусів для π - та K-мезонів на колайдері RHIC, та аналогічних величин для π -мезонів на SPS.

Слід зазначити, що фактори, що поліпшують опис просторово-часових масштабів у ядро-ядерних зіткненнях, є загальними для гібридної та гідро-кінетичної моделі: розвиток колективних потоків на початковій, дотермальній стадії зіткнення, відносно жорстке рівняння стану з фазовим переходом типу кросоверу. Це підкреслює важливість отриманих результатів.

Розроблені в дисертаційній роботі динамічні моделі можуть бути застосовними до опису широкого кола експериментальних даних з сучасних та майбутніх експериментальних програмах з ядро-ядерних зіткнень на прискорювачах елементарних частинок.

ЦИТОВАНА ЛІТЕРАТУРА

Опубліковані праці за темою дисертації

1. Sinyukov Yu. M. Ellipsoidal Flows in Relativistic Hydrodynamics of Finite Systems / Yu. M. Sinyukov, Iu. A. Karpenko // Acta Phys. Hung. - 2006. - V. 25 I 1. - P. 141-147.
2. Amelin N. S. Fast hadron freeze-out generator / [N. S. Amelin, Iu. A. Karpenko, R. Lednicky et al.] // Phys. Rev. - 2006. - V. C74. - P. 64901 (11 p.)
3. Amelin N. S. Fast hadron freeze-out generator. II. Noncentral collisions / [N. S. Amelin, Iu. A. Karpenko, R. Lednicky et al.] // Phys. Rev. - 2008. - V. C77. - P. 14903 (11 p.)
4. Werner K. On the Role of Initial Conditions and Final State Interactions in Ultrarelativistic Heavy Ion Collisions / [K. Werner, T. Hirano, Iu. Karpenko et al.] // J.

Phys. - 2009. - V. G36. - P. 64030 (7p).

5. Sinyukov Yu. M. Spacetime scales and initial conditions in relativistic A+A collisions / Yu. M. Sinyukov, Iu. A. Karpenko, A. V. Nazarenko // J. Phys. - 2008. - V. G35. - P. 104071

6. Sinyukov Yu. M. Kinetics Versus Hydrodynamics: Generalization of Landau/Cooper–Frye Prescription for Freeze-Out / Yu. M. Sinyukov, S. V. Akkelin, Iu. A. Karpenko, Y. Hama // Acta Phys.Polon. - 2009. - V. 40. - P. 1025

7. Karpenko Iu. A. Energy dependence of pion interferometry scales in ultra-relativistic heavy ion collisions / Iu.A. Karpenko, Yu.M. Sinyukov // Phys. Lett. - 2010. - V. B688. - P. 50-54.

8. Karpenko Iu. A. Kaon and pion femtoscopy at top RHIC energy in hydrokinetic model / Iu.A. Karpenko, Yu.M. Sinyukov // Phys. Rev. - 2010. - V. C81. - P. 54903 (31p).

9. Sinyukov Yu. M. Quasi-inertial ellipsoidal flows in relativistic hydrodynamics [Електронний ресурс] / Yu. M. Sinyukov, Iu. A. Karpenko // 2005. – Препринт: nucl-th/0505041. – Режим доступу до архіву: <http://arxiv.org>.

10. Werner K. Event-by-Event Simulation of the Three-Dimensional Hydrodynamic Evolution from Flux Tube Initial Conditions in Ultrarelativistic Heavy Ion Collisions [Електронний ресурс] / [K. Werner, Iu. Karpenko, T. Pierog et al.] // 2010. – Препринт: 1004.0805. – Режим доступу до архіву: <http://arxiv.org>.

Праці конференцій

11. Sinyukov Yu. M. Interferometry analysis and initial conditions in A+A collisions / Yu.M. Sinyukov, Iu. Karpenko, A.V. Nazarenko // Proceedings of New Physics and Quantum Chromodynamics at External Conditions (Dnipropetrovsk, Ukraine, May 3-6, 2007) - P. 75-85.

12. Armesto N. Heavy-ion collisions at the LHC—Last call for predictions / [N. Armesto, N. Borghini, S. Jeon et al.] // J. Phys. - 2008. - V. G35. - P. 054001.

Цитована література

АНОТАЦІЯ

Карпенко Ю. О. Розвиток гідродинамічного та гідрокінетичного підходів для ультра-релятивістських ядро-ядерних зіткнень. – Рукопис.

Дисертація на здобуття звання доктора, спеціальність: фізика важких йонів. -- Університет м. Нант, Нант, Франція, 2010 г.

Дисертаційна робота присвячена розвитку динамічних моделей зіткнень важких іонів при ультра-релятивістських енергіях з метою відтворення просторово-часових масштабів процесу зіткнення.

У результаті досліджень запропонована динамічна модель еволюції матерії, що відноситься до класу гібридних моделей. Вона має ряд поліпшень в порівнянні з існуючими моделями: трубчасті початкові умови з моделі EPOS, розрахунок індивідуального зіткнення, використання ефективного 3+1-вимірному гідродинамічного коду, використання реалістичного рівняння стану, оновленої таблиці резонансних станів, а також код для розрахунку адронних перерозсіань після стадії адронізації.

Також розвинено гідро-кінетичну модель ядро-ядерних зіткнень. Вона дозволяє описувати неперервне випромінювання частинок з гарячої та щільної кінцевої системи, що розширюється гідродинамічним чином у вакуум, у спосіб, сумісний з рівнянням Больцмана і законами збереження.

Обидві моделі застосовано до опису широкого кола експериментальних даних з колайдера RHIC: поперечних спектрів, v_2 -коефіцієнтів та інтерферометричних радіусів різних сортів гадронів. Фактори, що дозволяють добитися опису даних - жорстке рівняння стану, пре-термальні поперечні колективні потоки, врахування додаткової порції колективних потоків від ефектів в'язкості і флюктуацій початкових умов, а також коректний опис поступового розпаду хімічно нерівноважної рідини на пізніх стадіях розширення. Ці фактори є спільними для обох запропонованих моделей, що підкреслює твердість і важливість отриманих результатів.

Ключові слова: зіткнення важких йонів, гадрони, гідродинаміка, інтерферометрія, кінетика, генератор подій.

АННОТАЦИЯ

Карпенко Ю. А. Развитие гидродинамического и гидрокинетического подходов для ультра-релятивистских ядро-ядерных соударений. – Рукопись.

Диссертация на соискание звания доктора, специальность: физика тяжелых

ионов. -- Университет г. Нант, Нант, Франция, 2010 г.

Диссертационная работа посвящена развитию динамических моделей соударений тяжелых ионов при ультра-релятивистских энергиях с целью воспроизведения пространственно-временных масштабов процесса соударения.

В результате исследований, предложена динамическая модель эволюции материи, относящаяся к классу гибридных моделей. Она имеет ряд улучшений по сравнению с существующими моделями: трубчатые начальные условия из модели EPOS, расчет индивидуального соударения, использование эффективного 3+1-мерного гидродинамического кода, использование реалистического уравнения состояния, обновленной таблицы резонансных состояний, а также код для расчета адронных перерасеяний после стадии адронизации.

Также развита гидро-кинетическая модель ядро-ядерных соударений. Она позволяет описывать непрерывное излучение частиц из горячей и плотной конечной системы, расширяющейся гидродинамически в вакуум, способом, совместимым с уравнением Больцмана и законами сохранения.

Обе модели применены для описания широкого класса экспериментальных данных на коллайдере RHIC: поперечных спектров, v_2 -коэффициентов и интерферометрических радиусов различных сортов адронов. Факторы, позволяющие добиться описания данных — относительно жесткое уравнение состояния, пре-термальные поперечные коллективные потоки, учет дополнительной порции коллективных потоков от эффектов вязкости и флуктуаций начальных условий, а также корректное описание постепенного распада химически неравновесной жидкости на поздних стадиях расширения. Эти факторы являются общими для обоих предложенных моделей, что подчеркивает твердость и важность полученных результатов.

Ключевые слова: соударения тяжелых ионов, адроны, гидродинамика, интерферометрия, кинетика, генератор событий.

ABSTRACT

Karpenko Iu. A. Development of hydrodynamic and hydrokinetic approaches to ultrarelativistic nucleus-nucleus collisions. – Manuscript.

Thesis for doctor's degree, speciality: heavy ion physics. – University of Nantes, Nantes, France, 2010.

The thesis is devoted to the development of dynamical models for ultrarelativistic heavy ion collisions. The aim of the studies presented is creation of dynamical picture of

A+A collisions consistent with HBT radii measured in A+A collision experiments.

A new class of analytic solutions for 3D relativistic expansion with anisotropic flows is found. The ellipsoidal generalization of the spherically symmetric Hubble flow is considered within this class.

A fast MC event generator (FASTMC) based on Landau/Cooper-Frye freeze-out prescription is presented. The description of the k_T -dependence of the correlation radii at $\sqrt{s}=200\text{ GeV}$ RHIC collisions has been achieved with this MC generator. The analysis shows that the scenario with two separated freeze-outs is more favorable for the description of the p_T -dependence of the elliptic flow at RHIC.

The new hybrid dynamical model for matter evolution in ultrarelativistic heavy ion collisions is presented. It has many improvements, as compared to existing ones: flux-tube initial conditions (EPOS), event-by-event treatment, use of an efficient (3+1)D hydro code, employment of a realistic equation-of-state, use of a complete hadron resonance table, and a hadronic cascade procedure after an hadronization from thermal matter. The model is able to describe simultaneously different soft observables: transverse spectra, v_2 -coefficients and interferometry (HBT)-radii for various hadron species in RHIC experiments.

Finally, the hydrokinetic approach to A+A collisions is developed. It allows one to describe the continuous particle emission from a hot and dense finite system, expanding hydrodynamically into vacuum, in the way which is consistent with Boltzmann equations and conservation laws. The conditions of applicability of generalized Cooper-Frye distribution are found and proved by numerical calculations. The model is able to reproduce pion and kaon spectra together with interferometry radii at RHIC, and applied for the description of behavior of interferometry radii as a function of collision energy. The main factors, which allows one to describe well simultaneously the spectra and femtoscopic scales are: a relatively hard EoS, pre-thermal transverse flows developed to thermalization time, an account for an "additional portion" of the transverse flows due to the shear viscosity effect and fluctuation of initial conditions, a correct description of a gradual decay of the non-equilibrium fluid at the late stage of expansion.

One can note the presence of the same factors (crossover EoS, pre-thermal transverse flows) in both hybrid and hydrokinetic model, being important for the simultaneous reproduction of particle spectra and femtoscopic scales. This stresses the importance and solidity of the results obtained.

Key words: Heavy ion collisions, hadrons, hydrodynamics, interferometry, kinetics, event generator.