

УДК 531.1

Д. Анчишкін¹, А. Мускеєв², В. Вовченко², С. Єжов²

¹Інститут теоретичної фізики ім. М.М. Боголюбова, 03680, Київ, вул. Метрологічна, 14-б
e-mail: anch@bitp.kiev.ua

²Київський національний університет імені Тараса Шевченка
01601, Київ, вул. Володимирська, 64

ПРОСТОРОВО-ЧАСОВА СТРУКТУРА РЕЛЯТИВІСТСЬКИХ ЯДРО-ЯДЕРНИХ ЗІТКНЕНЬ

За допомогою запропонованого алгоритму для визначення зони реакцій досліджено просторово-часову структуру релятивістських ядро-ядерних зіткнень. Використовуючи мікроскопічну транспортну модель UrQMD, побудовано зони адронних реакцій та частоти реакцій різного типу для умов експериментів AGS і SPS. Отримано гіперповерхні, які можуть бути асоційовані з процесом фрізауту. На основі проведених розрахунків виявлено характерні точки у часовій еволюції фаєрбола.

Ключові слова: релятивістські ядро-ядерні зіткнення, адронна матерія, мікроскопічні транспортні моделі, еволюція, фаєрбол, зона реакції.

Вступ

У зіткненні ядер при високих енергіях утворюється сильнозбуджена система взаємодіючих частинок, що називається фаєрболом. Фактично, при такому означенні фаєрбол ототожнюється з “зоною реакцій”, тобто з областю простору-часу, в якій відбуваються реакції частинок. Отже, “зона реакцій” має відображати просторово-часові характеристики фаєрбола, а її дослідження дає інформацію про еволюцію взаємодіючої системи.

Для дослідження просторово-часової структури системи використовується густина реакцій адронів (кількість реакцій в одиниці 4-об'єму простору-часу) в заданій області простору-часу. Така кількісна оцінка дозволяє визначити зону реакцій, дослідження якої дає можливість встановити просторово-часову структуру фаєрбола з точки зору інтенсивності взаємодії в кожній точці простору-часу. Таким чином, області фаєрбола можна розрізняти за інтенсивністю взаємодії, показником якої може слугувати густина реакцій частинок, а отже, і повна кількість реакцій, що відбулися в цій області. Далі ця величина використовується для визначення границь зон реакцій.

Зона реакцій

Одночастинкова функція розподілу системи $f(x, p)$ дає можливість визначити кількість реакцій у заданій області простору-часу. Наприклад, у наближенні двочастинкових реакцій $2 \rightarrow 2$ імовірність P реакції двох частинок з імпульсами p_1 та p_2 в просторово-часовій точці x буде визначатися як

$$P(x, p_1, p_2) = \int_3 \int_4 W_{12 \rightarrow 34} f(x, p_1) f(x, p_2). \quad (1)$$

Тут $W_{12 \rightarrow 34}$ є швидкість переходу, що містить переріз реакції та закони збереження енергії та імпульсу,

$$\int_i \equiv \int \frac{d^3 p_i}{(2\pi)^3 E_i}, \quad E_i = \sqrt{m_i^2 + p_i^2} \quad - \text{енергія}$$

частинки з імпульсом p_i . Інтегруючи цей вираз по імпульсах частинок, отримуємо частоту реакцій у точці x

$$\Gamma(x) = \int_1 \int_2 \int_3 \int_4 W_{12 \rightarrow 34} f(x, p_1) f(x, p_2). \quad (2)$$

Тоді кількість двочастинкових $2 \rightarrow 2$ реакцій у заданій області простору-часу Ω набуває вигляду

$$N_{\text{coll}}(\Omega) = \int_{\Omega} d^4 x \Gamma(x) \quad (3)$$

$$= \int_{\Omega} d^4 x \int_1 \int_2 \int_3 \int_4 W_{12 \rightarrow 34} f(x, p_1) f(x, p_2).$$

Таким чином, 4-густина реакцій $\Gamma(x)$, яку можна знайти у деякому

модельному наближенні, визначає кількість реакцій у заданій області простору-часу. Зокрема, для знаходження $\Gamma(x)$ можна використовувати транспортні моделі.

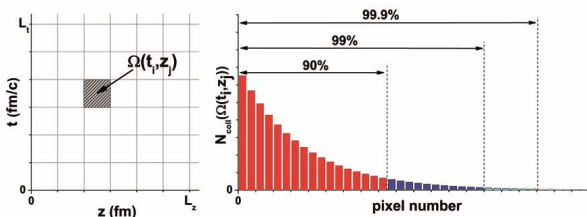


Рис. 1. Алгоритм відбору пікселів для визначення зони реакцій.

Розглянемо просторово-часову область, в центрі якої знаходиться фаєрбол. Нехай ця область достатньо велика для того, щоб у ній містилась переважна частина всіх зіткнень адронів системи, наприклад, 99.9% від абсолютної кількості двочастинкових реакцій та розпадів резонансів, які відносяться до заданої події, тобто до даного фаєрбола. Нехай це буде 4-куб реакцій C_R з ребром L_i , де $i = t, x, y, z$. Ця область є неоднорідною у просторі і часі, що приводить до необхідності детального вивчення її структури. Ця структура може бути описана за допомогою методу зони реакції [1].

Для того, щоб визначити зону реакцій, розіб'ємо цю область на окремі рівні частини (пікселі), тобто елементи об'єму 4-простору (див. ліву частину рис. 1). Нехай $\Omega = \Omega(t, \mathbf{r})$ це об'єм пікселя з координатами центру цього об'єму (t, \mathbf{r}) . Загальна кількість пікселів рівна $N_{\text{pix}} = L_t L_x L_y L_z / \Omega$. Тоді для кожної четвірки чисел (t, \mathbf{r}) , використовуючи, наприклад, формулу (3), можна обрахувати абсолютну кількість зіткнень та розпадів резонансів у данному пікселі об'ємом $\Omega(t, \mathbf{r})$. Знайдемо абсолютну кількість реакцій у кожному пікселі та відсортуємо пікселі зліва направо згідно такої ієрархії: при порівнянні кожної пари пікселів зліва буде той, в якому відбулося більше реакцій.

Розташуємо їх, як це показано на рис. 1, де загальна площа всієї гістограми

дорівнює загальній кількості зіткнень усіх адронних реакцій N_{tot} у 4-кубі реакцій C_R .

Очевидно, що задача знаходження просторо-часової області, в якій відбулися усі реакції, має статистичний характер, і тому цю область можна шукати тільки з деякою точністю. Невелика частина неврахованих реакцій, до якої можна віднести в тому числі і розпади довгоживучих резонансів, відбуваються на таких часових інтервалах та на таких відстанях, що перевищують розміри 4-куба реакцій C_R .

Можна визначити суму деякої частини реакцій, підсумовуючи зміст пікселів зліва направо відповідно до отриманої ієрархії. Таким чином, можна отримати величину $\alpha_1 N_{\text{tot}}$, де α_1 є деякий відсоток від абсолютної кількості усіх реакцій N_{tot} (рис. 1). Область в 4-просторі, яку займають пікселі, що входять до цієї суми, дає зону найбільш інтенсивної взаємодії, в якій відбувся α_1 відсоток від усіх адронних реакцій N_{tot} в системі. Використовуючи цей алгоритм, можна отримати наступну частину $\alpha_2 N_{\text{tot}}$ від усіх реакцій. Ці пікселі будуть визначати сусідню до попередньої область в 4-просторі, в якій відбувся α_2 відсоток від усіх адронних реакцій. Аналогічно можна визначити область, в якій відбувся ще α_3 відсоток реакцій тощо, при цьому $\alpha_1 + \alpha_2 + \alpha_3 + \dots = 1$.

Даний підхід дозволяє отримати інформацію щодо просторово-часової структури фаєрбола для різних сортів частинок та типів реакцій. Ця інформація дає можливість детального аналізу динаміки та структури реакції зіткнення релятивістських іонів. Наприклад, можна визначити область у просторі-часі, в якій відбувся певний відсоток непружних реакцій.

Зону реакцій можна розраховувати для різних типів реакцій. Реакції можна класифікувати за типом та кількістю частинок, що беруть у них участь.

Для реалізації алгоритму зони реакцій була використана транспортна

модель UrQMD v2.3 [2, 3]. Дана модель була вибрана для розрахунків з міркувань того, що вона дозволяє розрахувати густину реакцій $\Gamma(x)$ у кожній точці простору-часу і дає можливість відбору заданого типу реакцій для заданого сорту частинок (див. Таблицю 1).

Таблиця 1
Класифікація реакцій за кількістю учасників

1	$1 \rightarrow 2' + m, m \geq 0$	розпади
2	$2 \rightarrow m\gamma, m \geq 2$	анігіляції
3	$2 \rightarrow 1'$	злиття
4	$2 \rightarrow 2$	пружне розсіяння
5	$2 \rightarrow 2' + m, m \geq 0$	непружні реакції

Для розрахунків був взятий 4-куб C_R у просторі-часі реакцій, що мав

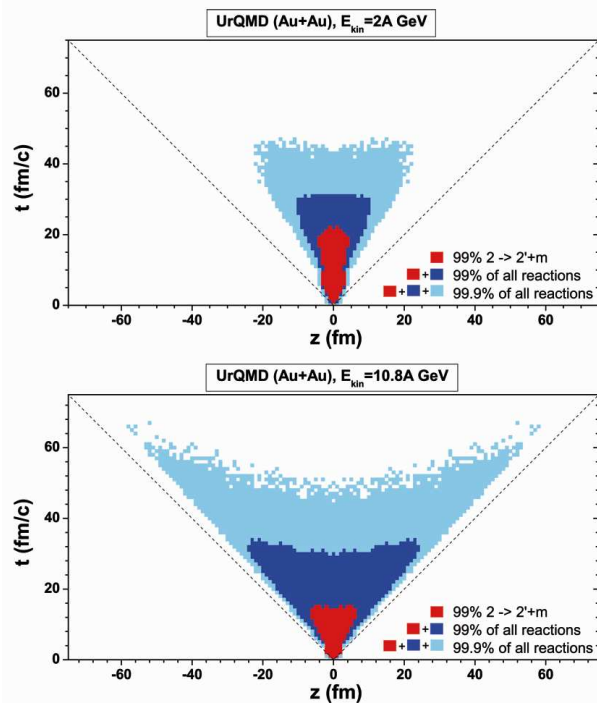


Рис. 2. Проекція зони реакцій на площину z - t для умов експерименту AGS (Au+Au) при енергіях зіткнення 2A ГеВ (вгорі) та 10.8A ГеВ (внизу). Червона область містить 99% всіх непружних реакцій. Червона та синя області разом містять 99% всіх адронних реакцій. Бірюзова область містить 0.9% адронних реакцій.

На рис. 2 і 3 наведено результати розрахунків зони реакції для експерименту AGS (Au+Au) 2A ГеВ, 10.8A ГеВ і SPS (Pb+Pb) 40A ГеВ, 158A ГеВ. У відповідності з запропонованим алгоритмом, ми визначаємо область, що містить 99% від усіх непружних адронних реакцій

розміри грані $L_i = 200$ фм, де $i = t, x, y, z$. Кількість реакцій $N_{\text{coll}}(\Omega(t, \mathbf{r}))$ у пікселі $\Omega(t, \mathbf{r})$ розраховувалась як результат усереднення по 1000 зіткнень ядер.

Проекції зони реакцій

Побудуємо проекції зони реакції в координатах t, z . У відповідності із запропонованим алгоритмом, визначимо 4-об'єм, що містить певний відсоток від усіх адронних реакцій певного типу. Для того, щоб побудувати проекцію цієї тривимірної просторової картини на вісь z , усі зіткнення у поперечному напрямку підсумовуються при фіксованих координатах (t, z) , тобто:

$$\tilde{N}_{\text{coll}}(\tilde{\Omega}(t, z)) = \int dx dy N_{\text{coll}}(\Omega(t, x, y, z)). \quad (4)$$

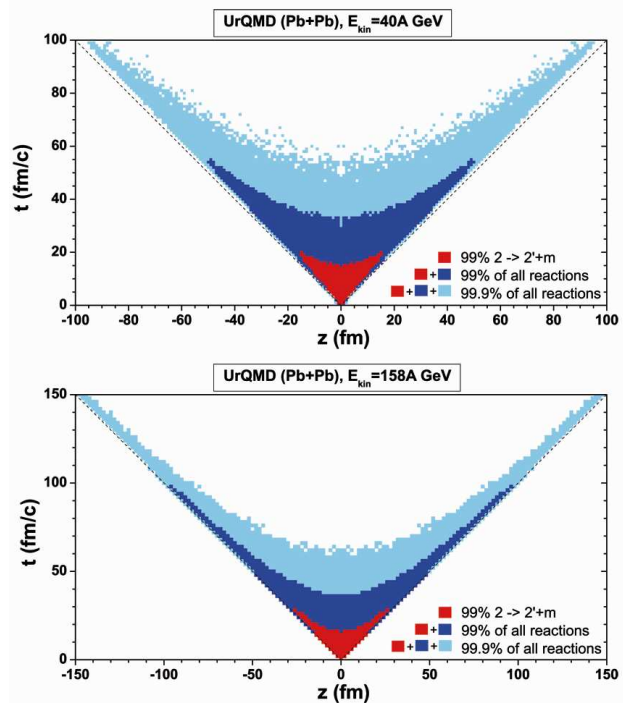


Рис. 3. Те саме, що і на Рис. 2, але для умов експерименту SPS (Pb+Pb) при енергіях зіткнення 40A ГеВ (вгорі) та 158A ГеВ (внизу).

$2 \rightarrow 2' + m, m \geq 0$. Ця область позначена на рисунку червоним кольором. Назвемо цю зону “гарячий фаєрбол”. За цим алгоритмом знайдемо область, в якій відбулося 99% всіх адронних реакцій. Назвемо зону, яка містить 99% всіх адронних реакцій, але виключаючи зону

“гарячого фаєрбола”, зоною “холодного фаєрбола” і на рисунку вона позначена синьою областю. Знайдемо область ще для 0.9% всіх реакцій, яку умовно назовемо “гало фаєрбола” (бірюзова область). Вона відповідає залишковій взаємодії та утворена переважно розпадами резонансів. Тут важливо відмітити той факт, що незважаючи на те, що зона гарячого фаєрбола і зона холодного фаєрбола є областями з різними масштабами взаємодії, їх назви суто умовні і не є їх прямими температурними характеристиками.

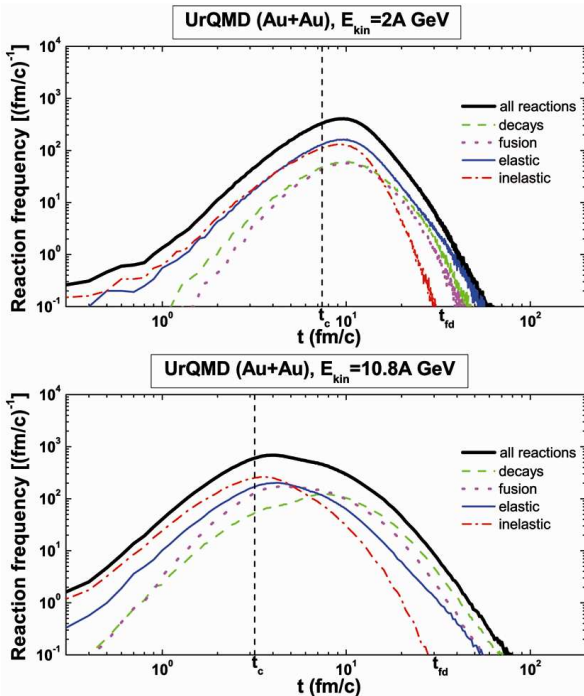


Рис. 4. Частота адронних реакцій різного типу для умов експерименту AGS (Au+Au) при енергіях зіткнення 2A GeV (вгорі) та 10.8A GeV (внизу).

Якщо взяти “класичне” визначення різкого кінетичного фрїзауту як деяку межу, що розділяє взаємодіючу систему від області, де більше не відбуваються реакції, то можна вважати гіперповерхню, яка розділяє зону холодного фаєрбола і гало фаєрбола як границю різкого кінетичного фрїзауту. Гіперповерхня, яка розділяє зону гарячого фаєрбола і зону холодного фаєрбола, відповідно, є границею різкого хімічного фрїзауту, тобто вона обмежує область, зовні якої не відбувається непружних зіткнень між адронами в системі.

З рисунків видно, що у деякий момент часу зона холодного фаєрбола розділяється на дві просторові частини. Якщо $t=t(z)$ – рівняння просторово-подібної гіперповерхні, яка обмежує зону холодного фаєрбола, то час розділення фаєрбола t_{fd} визначається як $t_{fd}=t(z)|_{z=0}$. З рисунків видно, що фаєрбол має порівняно великий час життя. Гарячий фаєрбол має час життя порядку 15 фм/с для енергій AGS і 35 фм/с для енергій SPS. Холодний фаєрбол живе протягом 30-33 фм/с на AGS і 90-100 фм/с на SPS.

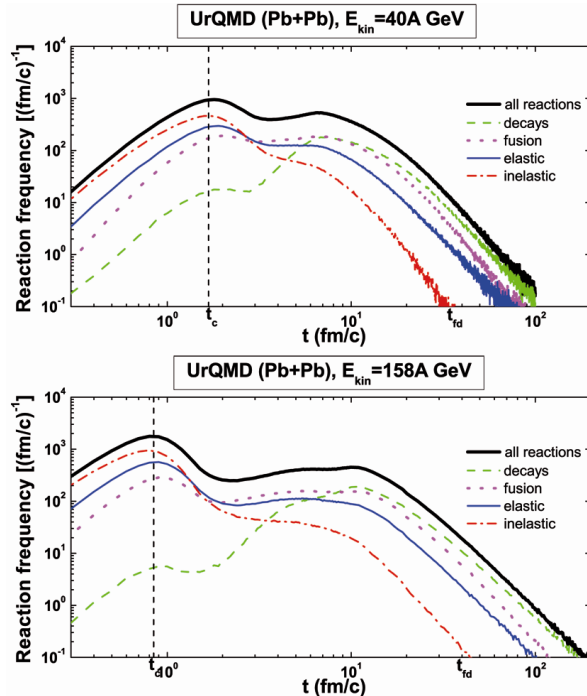


Рис. 5. Частота адронних реакцій різного типу для умов експерименту SPS (Pb+Pb) при енергіях зіткнення 40A GeV (вгорі) та 158A GeV (внизу).

Структура реакцій

UrQMD v2.3 дозволяє проводити аналіз структури реакцій у фаєрболі. Модель дає можливість розраховувати густину реакцій заданого типу. Всі реакції можна класифікувати за кількістю та типом частинок, що беруть участь у реакції (див. таблицю 1). Використовуючи таку класифікацію можна виділити: пружні реакції, непружні реакції, реакції злиття, реакції розпаду та реакції анігіляції частинок.

Можливість відбору реакцій заданого сорту дозволяє дослідити внесок реакцій різного типу в загальний процес еволюції

системи. Для цього розглянемо зміну частоти реакцій i -го типу в системі з часом:

$$v_i(t) = \int_{C_R} dx dy dz \Gamma_i(t, \mathbf{r}). \quad (5)$$

Результати розрахунків частоти реакцій в системі в різні моменти часу для

різних експериментів наведені на рис. 4 і 5. Товстою чорною лінією показані всі адронні реакції, синя лінія відповідає пружним реакціям ($2 \rightarrow 2$), червона – непружним реакціям ($2 \rightarrow 2' + m$, де $m \geq 0$), пурпурна лінія – реакціям злиття ($2 \rightarrow 1'$), зелена лінія – реакціям розпаду ($1 \rightarrow 2' + m$, $m \geq 0$).

Таблиця 2

Часові характеристики частоти реакцій в системі

E_{kin} (А ГеВ)	$\sqrt{s_{AA}}$ (А ГеВ)	γ	t_c (фм/с)	t_{m1} (фм/с)	t_{m2} (фм/с)	t_{fd} (фм/с)
2.0	2.70	1.44	7.53	9.7	10.0	33.0
10.8	4.88	2.60	3.21	3.9	7.5	30.5
20.0	6.41	3.42	2.38	2.62	6.1	34.0
40.0	8.86	4.72	1.68	1.75	6.7	34.5
80.0	12.39	6.61	1.19	1.23	8.2	35.0
158.0	17.32	9.23	0.85	0.87	10.4	38.5

Основною особливістю частоти адронних реакцій (чорна крива) в системі є наявність двох максимумів у час t_{m1} та t_{m2} . Ріст частоти реакцій і перший максимум можна пояснити поступовим збільшенням кількості нуклонів, що вступають у реакції в міру проникнення одного ядра в інше. Справді, максимальне перекриття двох ядер відбувається тоді, коли повністю перекриваються їх центри. Час перекриття центрів ядер t_c може бути оцінений за наступною формулою:

$$t_c = \frac{R_0}{\gamma} \cdot \frac{1}{v_z}, \quad (6)$$

де R_0 – радіус ядра, $v_z = \frac{p_{0z}}{\sqrt{m_N^2 + p_{0z}^2}}$,

$$\gamma = \frac{1}{\sqrt{1 - v_z^2}}, \quad p_{0z} - \text{початковий імпульс}$$

нуклона в системі центра мас двох ядер, m_N – маса нуклона. Час перекриття t_c та час максимумів t_{m1} та t_{m2} , а також час розділення фаєрбола t_{fd} для різних енергій зіткнення ядер, наведено в таблиці 2.

Після повного перекриття ядер, система, що складається з власних нуклонів ядер та народжених у зіткненнях нуклонів частинок, починає розширюватися в просторі, що приводить до

падіння частоти реакцій. З іншого боку, кількість вторинних частинок все ще зростає, що приводить до збільшення частоти реакцій. Відношення швидкості розширення системи до швидкості народження вторинних частинок буде визначати результат цих конкуруючих процесів, а отже, буде визначати і динаміку еволюції фаєрбола. Особливості співвідношення схожих величин досліджувались у [4] стосовно до процесу фрізауту.

Кількість вторинних частинок, які представлені переважно π -мезонами, по відношенню до кількості нуклонів зростає зі збільшенням енергії ядер в системі центра мас за законом [5]:

$$N_\pi/N_N; 0.33 + 0.0055\sqrt{s_{AA}}. \quad (7)$$

На енергіях прискорювача AGS ($E_{kinlab} = (2 - 10.8) \text{ А ГеВ}$) кількість вторинних частинок порівняна з кількістю нуклонів $N_\pi/N_N = 0.6 - 1.6$ і основну роль в еволюції фаєрбола відіграють реакції нуклонів. На енергіях прискорювача SPS ($E_{kinlab} = (20 - 200) \text{ А ГеВ}$) кількість вторинних частинок уже в декілька разів перевищує кількість власних нуклонів ядер $N_\pi/N_N; 2 - 6.5$ і реакції за участю вторинних частинок зіграють основну

роль. Збільшення кількості вторинних частинок з енергією призводить до зміни залежності частоти реакцій з часом при підвищенні енергії зіткнення ядер, а саме: для енергій AGS частота реакцій монотонно спадає після першого максимуму t_{m1} і повного проходження ядер одне через одне $t; 2t_c$, тоді, як для енергій SPS крива частоти реакцій має другий максимум t_{m2} , пов'язаний зі збільшенням частоти реакцій за участі вторинних частинок.

На першій стадії зіткнення ядер $t \leq t_{m1}$ домінують непружні реакції, пізніше починають домінувати пружні реакції та реакції злиття. Розпади відіграють основну роль на пізніх стадіях еволюції системи $t \geq t_{m2}$. На рисунках видно, що синя крива, яка відповідає частоті пружних реакцій, повністю повторює форму кривої частоти всіх адронних реакцій (чорна лінія). Перший максимум t_{m1} співпадає з максимумом непружних реакцій, другий максимум t_{m2} співпадає з максимумом розпадів.

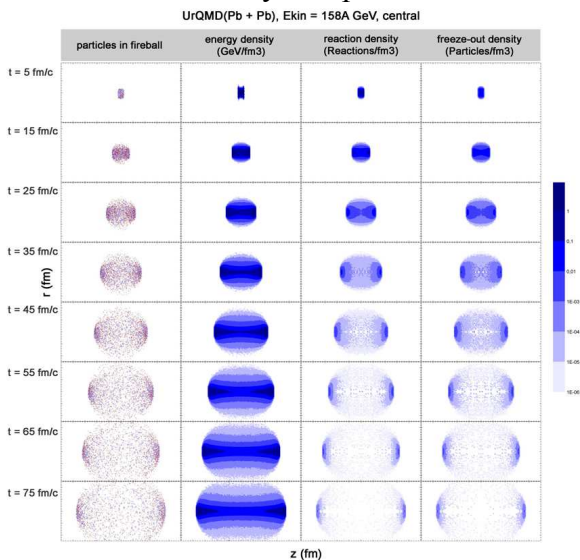


Рис. 6. Представлення фаєрбола за допомогою різних фізичних величин, для зіткнення ядер Pb+Pb при енергії зіткнення $E_{kinlab}=158A$ GeV. В першому стовпчику показано результати моделювання зіткнення ядер програмою UrQMD, точками вказано окремі адрони. В другому стовпчику показано зображення фаєрбола за допомогою густини енергії. В третьому стовпчику показана 4-густина реакцій. В четвертому стовпчику зображено 4-густину останніх реакцій адронів.

Для визначення меж та структури фаєрбола використовують також такі характеристики, як густина енергії [6], густина частинок і середня довжина вільного пробігу частинок тощо. На рис. 6 зображено різні представлення фаєрбола, що утворюється в зіткненнях ядер Pb+Pb при енергії зіткнення $E_{kinlab}=158A$ GeV. У першому стовпчику представлено результати моделювання зіткнення ядер в UrQMD, де точками показано адрони у системі в різні моменти часу. В другому стовпчику показано зображення фаєрбола за допомогою густини енергії. Представлення за допомогою густини частинок та густини енергії є загально-вживаними. У третьому стовпчику зображено 4-густину реакцій у різні моменти часу. Видно, що представлення за допомогою густини реакцій і густини енергії дають дещо різні картини. Наприклад, при достатньо великих часах реакцій у центрі системи вже немає, а густина енергії залишається ще досить великою. Така ситуація виникає, наприклад, коли система частинок рухається без зіткнень в одному напрямку. З третього стовпчика видно, що до часу $t_{fd} \sim 30-40$ фм/с фаєрбол розвивається як єдине ціле, але після певного моменту часу t_{fd} (який і є часом розділення фаєрбола) система розділяється навпіл і далі вже має вигляд двох окремих частин. У четвертому стовпчику зображено координати останніх реакцій частинок, тобто по суті зображено процес поступового кінетичного фрізаута. Це представлення має цінність з огляду на те, що зафіксовані детектором адрони несуть інформацію саме про ці останні точки реакцій. Видно, що зображення фаєрбола у третьому і четвертому стовпчиках є якісно схожими і відрізняються лише для ранніх стадій еволюції фаєрбола.

Висновки

Запропонований підхід дозволяє досліджувати просторово-часову структуру релятивістських ядро-ядерних зіткнень з точки зору перебігу адронних реакцій у системі, що утворюється при зіткненні.

Фаєрбол ототожнюється з системою взаємодіючих адронів.

Границя між зоною холодного фаєрбола і гало фаєрбола може бути асоційована з гіперповерхнею різкого кінетичного фрізаута, якщо прийняти за умову кінетичного фрізаута умову закінчення всіх реакцій. Границя, що розділяє гарячий і холодний фаєрбол, може бути асоційована з гіперповерхнею

різкого хімічного фрізаута, якщо прийняти за умову хімічного фрізаута умову закінчення всіх непружних реакцій.

У часовій еволюції фаєрбола можна виділити декілька характерних точок – час перекриття ядер t_c , при якому спостерігається максимум частоти всіх адронних реакцій, а також час розділення фаєрбола на дві окремі частини t_{fd} .

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Anchishkin D., Muskeyev A. and Yezhov S. Relativistic nucleus-nucleus collisions. Zone of reactions and space-time structure of fireball // *Phys. Rev. C.* – 2010. – V.81. – P. 031902-01–031902-05.
2. Bass S.A., Belkacem M., Bleicher M. et al. Microscopic models for ultrarelativistic heavy ion collisions // *Prog. Part. Nucl. Phys.* – 1998. – V.41. – P. 255–369.
3. Bleicher M., Zabrodin E., Spieles C. et al. Relativistic hadron-hadron collisions in the ultra-relativistic quantum molecular dynamics model // *J. Phys. G: Nucl. Part. Phys.* – 1999. – V.25. – P. 1859–1896.
4. Hung C.M., Shuryak E. Equation of state, radial flow, and freeze-out in high energy heavy ion collisions // *Phys. Rev. C.* – 1998. – V.57. – P. 1891–1906.
5. Alt C. et al. (NA49 Collaboration). Pion and kaon production in central Pb+Pb collisions at 20A and 30A GeV: Evidence for the onset of deconfinement // *Phys. Rev. C.* – 2008. – V.77. – P. 024903-01–024903-10.
6. Russkikh V., Ivanov Yu. Dynamical freeze-out in three-fluid hydrodynamics // *Phys. Rev. C.* – 2007. – V.76. – P. 054907-01–054907-14.

Стаття надійшла до редакції 27.06.2011

D. Anchishkin¹, A. Muskeyev², V. Vovchenko², S. Yezhov²

¹Bogolyubov Institute for Theoretical Physics
03680, Kyiv, Metrologichna Str., 14-b

²Taras Shevchenko Kyiv National University, Kyiv, 01601, Volodymyrska Str., 64

THE SPACE-TIME STRUCTURE OF RELATIVISTIC NUCLEUS-NUCLEUS COLLISIONS

With making use of the proposed algorithm for determination of the reaction zone the space-time structure of relativistic nucleus-nucleus collisions is investigated. The reaction zones and reaction frequencies for different type of reactions are calculated for AGS and SPS energies within the microscopic transport model UrQMD. The reaction zone boundary hyper surfaces, which can be associated with freeze out process, are found. On the basis of performed calculations the characteristic points of the time dependence of fireball evolution are obtained.

Key words: relativistic nuclear-nuclei collisions, hadronic matter, microscopic transport models, evolution, fireball, zone of reaction.

Д. Анчишкин¹, А. Мускеев², В. Вовченко², С. Ежов²

¹Институт теоретической физики им. Н.Н. Боголюбова

03680, Киев, ул. Метрологическая, 14-б

²Киевский национальный университет имени Тараса Шевченко

Киев, 01601, ул. Владимирская, 64

ПРОСТРАНСТВЕННО-ВРЕМЕННАЯ СТРУКТУРА РЕЛЯТИВИСТСКИХ ЯДРО-ЯДЕРНЫХ СТОЛКНОВЕНИЙ

При помощи предложенного алгоритма для определения зоны реакций исследовано пространственно-временную структуру релятивистских ядро-ядерных столкновений. Используя микроскопическую транспортную модель UrQMD, построены зоны адронных реакций и частоты реакций разного типа для условий экспериментов AGS и SPS. Получены гиперповерхности, которые могут быть ассоциированы с процессом фризаута. На основе проведенных расчетов выявлены характерные точки во временной эволюции фаербола.

Ключевые слова: релятивистские ядро-ядерные столкновения, адронная материя, микроскопические транспортные модели, эволюция, фаербол, зона реакции.