



АДЖИМАМБЕТОВ

Мусфер –

доктор філософії, науковий співробітник відділу фізики високих густин енергії Інституту теоретичної фізики ім. М.М. Боголюбова НАН України

УЗАГАЛЬНЕНА МОДЕЛЬ РЕЛЯТИВІСТСЬКИХ ЯДРО-ЯДЕРНИХ ЗІТКНЕНЬ

За матеріалами наукового повідомлення на засіданні Президії НАН України 26 грудня 2024 р.

У доповіді розглянуто сучасний стан досліджень у галузі фізики елементарних частинок та фізики високих енергій. Особливу увагу приділено вивченню екзотичних форм сильновзаємодійної матерії, які виникають у релятивістських колайдерних експериментах. Описано перспективи найсучасніших і майбутніх експериментів, спрямованих на дослідження фазової діаграми квантової хромодинаміки, зокрема пошук проявів гіпотетичного фазового переходу між кварк-глюонною плазмою та адронним газом, а також критичної точки. Обговорено необхідність розвитку теоретичних моделей для опису процесу зіткнення важких ядер за релятивістських енергій. Окремо розглянуто останні досягнення в інтегрованій гідрокінетичній моделі та наведено деякі її результати, що стосуються моделювання експериментів на Релятивістському колайдері важких іонів.

Одним із ключових досягнень фізики ХХ ст. стало усвідомлення, що все у Всесвіті складається з кількох базових будівельних блоків — фундаментальних частинок, які взаємодіють між собою через чотири фундаментальні сили. Серед них гравітаційна сила, мабуть, є найвідомішою, оскільки її вплив найвиразніше спостерігається на масштабах планет, зірок і галактик. Вона відповідає за падіння тіл на поверхню Землі, обертання планет навколо Сонця, рух Місяця навколо Землі, а також формування галактик і великих космічних структур. Електромагнітна сила забезпечує взаємодію між зарядженими частинками та проявляється у вигляді електрики, магнетизму й світла. Вона відіграє ключову роль у формуванні атомів і молекул, дозволяючи електронам утримуватися біля атомних ядер. Електромагнітна сила є основою хімічних реакцій, що підтримують життя. Сильна взаємодія — найпотужніша з усіх фундаментальних сил на малих масштабах. Вона утримує разом протони і нейтрони в ядрах атомів. Слабка взаємодія відповідає за радіоактивні розпади та перетворення частинок, наприклад розпад нейтрона на протон, електрон і антинейтрино.

У 1970-х роках електромагнітну, слабку та сильну взаємодії було об'єднано в єдину Стандартну модель. У межах цієї моделі висунуто численні передбачення, які згодом було підтверджено з неймовірною точністю в різноманітних експериментах. Одне з найвідоміших передбачень Стандартної моделі — існування бозона Хіггса [1], який було введено ще у 1964 р. для пояснення набуття маси деякими іншими частинками. Пошук бозона Хіггса став однією з основних місій спорудженого в Європейській організації ядерних досліджень (CERN) Великого адронного колайдера (LHC). Експериментальне підтвердження його існування було опубліковано колабораціями CMS [2] і ATLAS [3] у 2012 р. Інші частинки Стандартної моделі разом із їхніми квантовими числами схематично наведено на рис. 1.

Колайдерні експерименти, зокрема проведені на згаданому вище Великому адронному колайдері або Релятивістському колайдері важких іонів (RHIC), відіграють вирішальну роль у фізиці елементарних частинок та фізиці високих енергій. Річ у тім, що матерія, яка нас оточує, складається з атомів. Кожен атом у свою чергу складається з масивного ядра та легких електронів, що взаємодіють через електромагнітне поле, квантом якого є фотон. Ядро атома складається з протонів та нейтронів, які в свою чергу складаються з трьох кварків (uud для протона та udd для нейтрона). Саме кварки є елементарними частинками у квантовій хромодинаміці (КХД), що відповідає за сектор сильної взаємодії у Стандартній моделі. Кварки утримуються разом завдяки обміну квантами глюонного поля, яке є аналогом електромагнітного поля у КХД. Як згадувалося раніше, у розпадах нейтрона, або, точніше, d -кварка, народжується також електронне нейтрино, завершуючи список частинок, з якими ми зазвичай маємо справу.

Якщо ще раз подивитися на рис. 1, можна зрозуміти, що перелічені частинки є легкими. Важкі частинки є нестабільними, швидко розпадаються і за звичних земних умов майже не утворюються. Тому доступ до них можна отримати або через космічні промені, які є не-

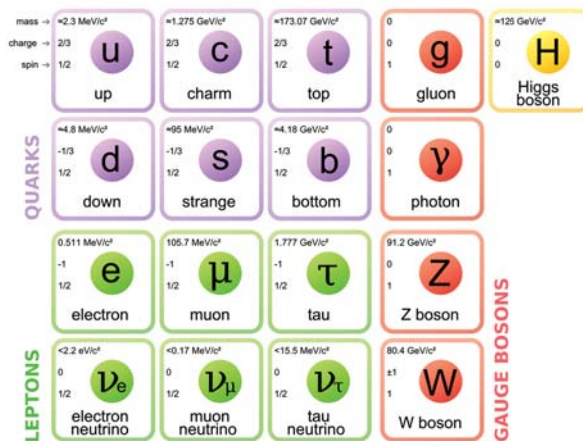


Рис. 1. Елементарні частинки у Стандартній моделі. Три покоління кварків (u, d, c, s, t, b) та лептонів (e, μ, τ, ν_e, ν_μ, ν_τ) — ферміонів, що асоціюються з матерією в сильній та електрослабкій взаємодії, позначено відповідно фіолетовим та зеленим кольором; червоним позначено калібрувальні бозони — глюони g у сильній взаємодії, фотон γ, Z- та W-бозони в електрослабкій взаємодії; жовтим позначено бозон Хіггса H

контрольованими, або в лабораторії під час коллайдерних експериментів. Прискорюючи заряджені частинки (електрони, протони або ядра важких атомів, таких як золото чи свинець) майже до світлових швидкостей і зіштовхуючи їх одну з одною, можна перетворити кінетичну енергію цих частинок на масу сотень тисяч нових частинок. Таке завдання є неймовірно складним з інженерної точки зору, а Великий адронний колайдер — одним з найдорожчих наукових проєктів, реалізованих людством.

Іншою мотивацією коллайдерних експериментів є пошук нових форм сильновзаємодійної матерії. Подібно до електронів, які є носіями електричного заряду, кварки також мають кольоровий заряд. У рамках КХД притягання між носіями кольорового заряду — кварками та глюонами — зростає з відстанню, що унеможливорює існування вільних кварків. Це явище відоме як конфайнмент [4]. Через це ми спостерігаємо лише адрони — частинки, які складаються з кількох кварків так, щоб їхній сумарний кольоровий заряд дорівнював нулю. Цього можна досягти двома способами: зібравши кількість кварків, кратну трьом (баріони,

наприклад протони та нейтрони), або однаково кількість кварків і антикварків (мезони, наприклад пі-мезони). Математичне пояснення явища конфайнменту залишається однією з найскладніших задач сучасної теоретичної фізики і входить до переліку проблем тисячоліття, сформульованих Інститутом математики Клея [5].

Ситуація змінюється на високих енергетичних масштабах, наприклад у ранньому Всесвіті, лише через мікросекунди після Великого вибуху, або в компактних і масивних космічних об'єктах, таких як нейтронні зорі. За високих температур (у 10 000 разів вищих, ніж у ядрі Сонця) та густин кварки і глюони можуть існувати в новому стані матерії — кварк-глюонній плазмі. У цьому стані кварки та глюони можуть пересуватися на відстань, значно більшу за розмір протона, аналогічно тому, як електрони та іони поведуться у звичайній плазмі.

Теоретичне передбачення існування кварк-глюонної плазми з'явилося наприкінці 1970-х років [6]. Згодом було висунуто ідею щодо утворення цього стану матерії у високоенергетичних ядро-ядерних зіткненнях. Вважається, що існування кварк-глюонної плазми експериментально підтвердили в CERN у 2000 р. [7]. Подальші дослідження, проведені на Релятивістському колайдері важких іонів та Великому адронному колайдері, було спрямовано на детальне вивчення властивостей цієї матерії. Зокрема, встановлено, що кварк-глюонна плазма поводить, як найбільш ідеальна в природі рідина, тобто така, що характеризується найменшою в'язкістю серед відомих речовин [8].

Еволюція системи, що виникає під час зіткнення двох релятивістських ядер, є надзвичайно складним процесом. Типовий розмір цієї системи становить кілька десятків розмірів протона, а тривалість її існування відповідає часу, необхідному світлу, щоб подолати таку відстань. Протягом цього часу густина енергії швидко спадає, проходячи через кілька енергетичних масштабів, що призводить до зміни ступенів вільності системи: від кварків і глюонів до адронів. Однак експериментальні вимірювання виконують значно пізніше, че-

рез наносекунди після зіткнення, коли система «заморожується» (від англ. freeze-out) і її склад обмежується адронами, які майже не взаємодіють між собою.

Отже, для того щоб у таких експериментах робити висновки про властивості сильновзаємодійної матерії, необхідно мати теоретичні моделі, здатні встановити зв'язок між різними стадіями еволюції системи та допомогти зрозуміти вплив ранніх етапів цієї еволюції на експериментально спостережувані величини. Розробленням таких моделей займаються, зокрема, у відділі фізики високих густин енергії Інституту теоретичної фізики ім. М.М. Боголюбова НАН України.

Наукова група під керівництвом професора Юрія Синюкова розробила інтегровану гідродинамічну модель (iHKM) для опису ядро-ядерних зіткнень за найвищих доступних на сьогодні експериментальних енергій, зокрема в експериментах на Великому адронному колайдері [9]. Модель охоплює повну еволюцію системи і складається з п'яти послідовних стадій, кожна з яких описує різні фізичні процеси.

На першій стадії два ядра, що рухаються майже зі світловими швидкостями, проникають одне в одне. При цьому їхні елементарні складові — кварки і глюони — розсіюються між собою, народжуючи нові частинки, які утворюють щільну матерію. Система з новонароджених кварків і глюонів перебуває в сильно нерівноважному стані, оскільки за такий малий проміжок часу окремі частинки не встигають провзаємодіяти одна з одною. Крім того, в їх імпульсному розподілі має бути сильна анізотропія через наявність виділеного напрямку — напрямку руху початкових ядер. Зазвичай цей напрямок називають поздовжнім, відокремлюючи його від поперечної площини.

Сукупність експериментальних даних вказує на те, що кварки і глюони мають відносно швидко досягти термодинамічної рівноваги, формуючи кварк-глюонну плазму. Цей процес феноменологічно описується на другій стадії моделі. За ним іде стадія в'язкого гідродинамічного розширення плазми у вакуумі. Під час розширення плазма охолоджується, і при

досягненні критичної температури, приблизно 165 MeV, кварки та глюони об'єднуються у безколіорові адрони внаслідок явища конфайнменту, яке згадувалося раніше. Процес адронізації описується на четвертій стадії моделі, після чого йде фінальний етап — розширення адронного газу з розпадом нестабільних резонансів. У підсумку ми отримуємо тисячі адронів, що вільно розлітаються до детекторів, аналогічно до того, як це відбувається в реальному експерименті.

Отже, на основі чисельного моделювання в рамках моделі можна розрахувати всі спостережувані в експерименті величини, наприклад поперечні імпульсні спектри різних частинок, анізотропію випромінювання цих частинок, а також кореляції між ними, спричинені квантовою статистикою або взаємодією між ними. У 2020 р. наша наукова група опублікувала огляд основних результатів для чотирьох різних експериментів, починаючи від зіткнень ядер золота за енергії 200 GeV на Релятивістському колайдері важких іонів і до експериментів із зіткнення ядер ксенону за енергії 5,44 TeV на Великому адронному колайдері [10].

Незважаючи на складність процесів в експериментах на Великому адронному колайдері, системи в таких експериментах мають кілька симетрій, які дещо спрощують їх теоретичне описання. Зокрема, кількість кварків та антикварків у центрі системи є майже однаковою, що означає нульовий баріонний хімічний потенціал. Крім того, з ґраткових розрахунків добре відомо, що за таких умов перехід між кварк-глюонною плазмою та адронним газом є кросоверного типу. Тобто такий перехід є плавним, без стрибків термодинамічних величин, на відміну від фазових переходів [11]. Проте очікується, що за великих баріонних хімічних потенціалів має відбуватися фазовий перехід, аналогічно до того, як випаровується вода або плавиться лід. Пошуку сигналів фазового переходу та дослідженню фазової діаграми КХД присвячено нові експерименти за відносно низьких енергій, такі як програма BES [12] на прискорювачі RHIC та майбутні експерименти, зокрема CBM у FAIR [13]. Схе-

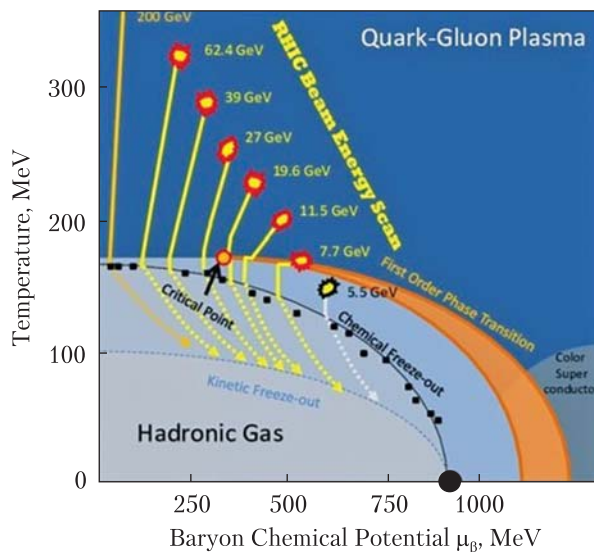


Рис. 2. Схематичне зображення фазової діаграми квантової хромодинаміки в координатах температура-баріонний хімічний потенціал [12]. Стрілки, що спрямовані вниз, у фазу адронного газу, ілюструють еволюцію системи, яка утворюється в ядро-ядерних зіткненнях за різних енергій прискорювача. Якщо початкова енергія є достатньо високою, еволюція розпочинається з фази кварк-глюонної плазми. Очікується, що за певних умов система проходить через лінію фазового переходу. Її ймовірне положення зображено помаранчевим кольором

матичне зображення цієї діаграми наведено на рис. 2. Для нас особливий інтерес становлять дві фази: кварк-глюонна плазма за високих температур та адронний газ за низьких температур. За малих баріонних хімічних потенціалів перехід між цими фазами є кросоверного типу. Очікується, що в разі великих хімічних потенціалів перехід буде фазовим. Імовірне положення лінії фазового переходу зображено помаранчевим кольором. Лінія фазового переходу, що веде до кросоверу, має закінчуватися критичною точкою.

Ідея нових експериментальних досліджень полягає у скануванні фазової діаграми шляхом зміни енергії ядер, що стикаються. Саме від цієї енергії залежить, у яку ділянку фазової діаграми потрапить система на початкових етапах еволюції. Це також визначає її подальшу траєкторію (жовті стрілки на рис. 2). Очікується, що

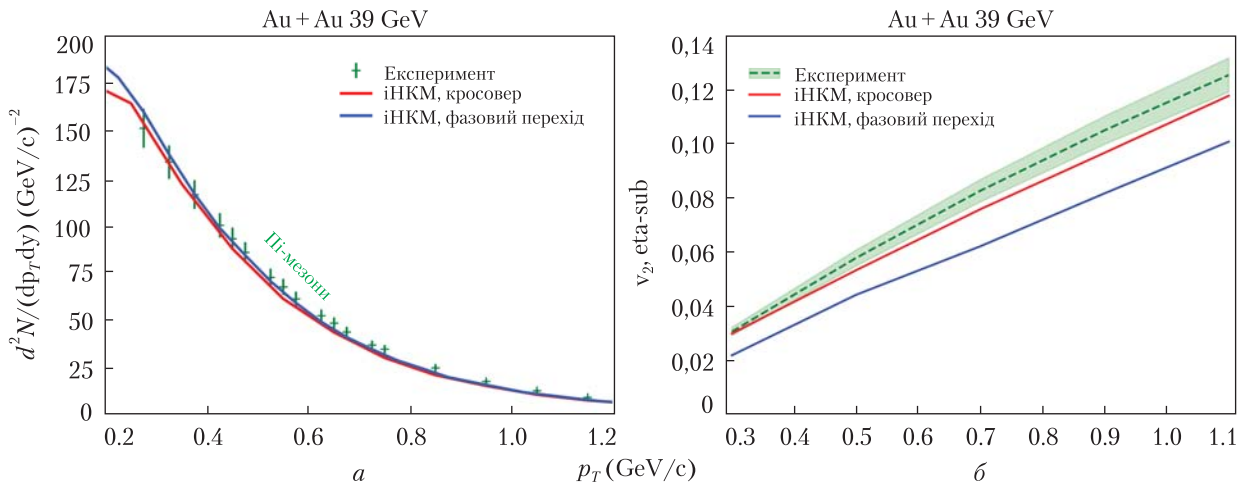


Рис. 3. Поперечні спектри пі-мезонів (а) та коефіцієнт анізотропії для всіх заряджених частинок (б) як функції поперечного імпульсу. Експериментальні дані відповідають нецентральному зіткненню ядер золота (центральність 20—30 %) за енергії 39 GeV у рамках експерименту RHIC BES [17, 18]. Результати моделювання в інтегрованій гідродинамічній моделі з рівнянням стану, що відповідає кросоверному переходу [15], показано червоними лініями, а з фазовим переходом [16] — синіми лініями. Експериментальні дані разом із похибкою позначено зеленим кольором

за певних енергій система пройде дуже близько до критичної точки, що матиме помітний вплив на кінцеві спостережувані величини. Однак цей вплив може бути слабким, оскільки після проходження критичної точки або лінії фазового переходу система продовжує еволюцію, поступово стираючи ефекти цих явищ. Крім того, система є неймовірно малою, тоді як фазові переходи чітко визначені лише для нескінченних систем у термодинамічній рівновазі, що є суттєвим наближенням у реальних експериментах. Це спонукає до створення динамічних моделей, здатних врахувати всі особливості таких експериментів.

Нещодавно ми розширили інтегровану гідродинамічну модель для опису нових експериментів на низькоенергетичних масштабах, у тому числі зіткнень ядер золота за енергії 2,4 GeV в експериментах NA49 [14]. У цій модифікації моделі враховано динамічні рівняння для еволюції баріонного струму, особливості взаємодії ядер за низьких енергій, флуктуації початкових умов у різних окремих зіткненнях, можливість недосягнення термодинамічної рівноваги тощо. Прикладом застосування цієї моделі може бути

моделювання з різними рівняннями стану сильновзаємодійної матерії. Такі рівняння описують фазову діаграму, зображену на рис. 2, і можуть включати ефекти фазового переходу та критичної точки або змінювати їх положення. Вони принципово впливають на еволюцію системи, оскільки, наприклад, задають залежність тиску речовини від її температури та хімічного потенціалу. Описання рівнянь стану є складною теоретичною задачею. Зазвичай цим займаються великі групи вчених. Наша ж модель дозволяє порівнювати різні рівняння стану та оцінювати їхній вплив на реальні спостережувані в експерименті величини.

На завершення представимо одну з численних можливостей роботи моделі в дії. Основною метою є порівняння двох рівнянь стану: без фазового переходу [15] та з фазовим переходом I роду [16]. Ці рівняння істотно різняться залежностями тиску на фазовій межі кварк-глюонного газу та адронізації. У випадку фазового переходу I роду спостерігається так зване «пом'якшення» рівняння стану, що приводить до повільнішого розширення системи через зниження в ній тиску.

Для кожного з рівнянь стану ми змоделювали 20 000 зіткнень ядер золота за енергії 39 GeV, що відповідає експериментам на Релятивістському колайдері важких іонів. Для порівняння з експериментальними даними ми побудували поперечні спектри заряджених частинок та коефіцієнти анізотропії поперечних потоків на основі експериментальних робіт*. Наші розрахунки (рис. 3) показують, що розрізнити два рівняння стану, спираючись лише на спектри, не вдається. Однак якщо врахувати більш тонкі ефекти, такі як анізотропія цих спектрів, рів-

няння стану без фазового переходу стає беззаперечним фаворитом — його передбачення значно ближчі до експериментальних даних.

Цей результат узгоджується з сучасними уявленнями про фазову діаграму КХД у ділянці, що відповідає енергії експерименту за 39 GeV. Він також є важливим для послідовного сканування фазової діаграми, особливо при переході до нижчих енергій у майбутніх експериментах CBM, де фазовий перехід є більш очікуваним. Це дослідження є наступним етапом роботи нашої наукової групи.

* Для демонстрації ми наводимо лише спектри негативно заряджених пі-мезонів. Детальний і точний опис зазначених спостережуваних спектрів можна знайти у відповідних експериментальних роботах [17, 18].

Автор висловлює подяку Юрію Синюкову, співавтору результатів, представлених у доповіді. Також автор дякує Simons Foundation за підтримку досліджень в Україні (грант № 1290596).

REFERENCES

1. Higgs P.W. Broken symmetries, massless particles and gauge fields. *Phys. Lett.* 1964. **12**(2): 132—133. [https://doi.org/10.1016/0031-9163\(64\)91136-9](https://doi.org/10.1016/0031-9163(64)91136-9)
2. Chatrchyan S. et al. Observation of a new boson at a mass of 125 GeV with the CMS experiment at the LHC. *Phys. Lett. B.* 2012. **716**(1): 30—61. <https://doi.org/10.1016/j.physletb.2012.08.021>
3. Aad G. et al. Observation of a new particle in the search for the Standard Model Higgs boson with the ATLAS detector at the LHC. *Phys. Lett. B.* 2012. **716**(1): 1—29. <https://doi.org/10.1016/j.physletb.2012.08.020>
4. Wilson K.G. Confinement of quarks. *Phys. Rev. D.* 1974. **10**(8): 2445—2459. <https://doi.org/10.1103/PhysRevD.10.2445>
5. Yang-Mills & The Mass Gap. Clay Mathematics Institute. <https://www.claymath.org/millennium/yang-mills-the-maths-gap/>
6. Cabibbo N., Parisi G. Exponential hadronic spectrum and quark liberation. *Phys. Lett. B.* 1975. **59**(1): 67—69. [https://doi.org/10.1016/0370-2693\(75\)90158-6](https://doi.org/10.1016/0370-2693(75)90158-6)
7. New State of Matter created at CERN. CERN. 10.02.2000. <https://home.cern/news/press-release/cern/new-state-matter-created-cern>
8. Bernhard J.E. Bayesian estimation of the specific shear and bulk viscosity of the quark-gluon plasma. *Zenodo*. 11.12.2012. <https://zenodo.org/record/2120892>
9. Naboka V.Yu., Akkelin S.V., Karpenko Iu.A., Sinyukov Yu.M. Initialization of hydrodynamics in relativistic heavy ion collisions with an energy-momentum transport model. *Phys. Rev. C.* 2015. **91**(1): 014906. <https://doi.org/10.1103/PhysRevC.91.014906>
10. Shapoval V.M., Adzhymambetov M.D., Sinyukov Yu.M. Femtoscopy scales and particle production in the relativistic heavy ion collisions from Au+Au at 200 AGeV to Xe+Xe at 5.44 ATeV within the integrated hydrokinetic model. *European Physical Journal A.* 2020. **56**(10). <https://doi.org/10.1140/epja/s10050-020-00266-x>
11. Aoki Y., Endrődi G., Fodor Z., Katz S.D., Szabó K.K. The order of the quantum chromodynamics transition predicted by the standard model of particle physics. *Nature.* 2006. **443**(7112): 675—678. <https://doi.org/10.1038/nature05120>
12. Odyniec G. The RHIC Beam Energy Scan program in STAR and what's next... *Journal of Physics: Conference Series.* 2013. **455**: 012037. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/455/1/012037>
13. Ablyazimov T. et al. Challenges in QCD matter physics — The scientific programme of the Compressed Baryonic Matter experiment at FAIR. *The European Physical Journal A.* 2017. **53**(3). <https://doi.org/10.1140/epja/i2017-12248-y>
14. Adzhymambetov M., Sinyukov Y. Extension of the integrated HydroKinetic Model to BES RHIC and GSI-FAIR nuclear collision energies. *arXiv.org.* 2024. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2412.00458>

15. Steinheimer J., Schramm S., Stöcker H. An effective chiral hadron–quark equation of state. *Journal of Physics G: Nuclear and Particle Physics*. 2011. **38**(3): 035001. <https://doi.org/10.1088/0954-3899/38/3/035001>
16. Kolb P.F., Heinz U. Hydrodynamic description of ultrarelativistic heavy-ion collisions. *arXiv.org*. 2003. <https://doi.org/10.48550/arXiv.nucl-th/0305084>
17. Adamczyk L. et al. Bulk properties of the medium produced in relativistic heavy-ion collisions from the beam energy scan program. *Phys. Rev. C*. 2017. **96**(4): 044904. <https://doi.org/10.1103/physrevc.96.044904>
18. Adamczyk L. et al. Inclusive charged hadron elliptic flow in Au+Au collisions at $\sqrt{s_{NN}}=7.7\text{--}39$ GeV. *Phys. Rev. C*. 2012. **86**(5): 054908. <https://doi.org/10.1103/physrevc.86.054908>

Musfer Adzhymambetov

Bogolyubov Institute for Theoretical Physics of the National Academy of Sciences of Ukraine, Kyiv, Ukraine

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7311-7830>

GENERALIZED MODEL FOR RELATIVISTIC HEAVY-ION COLLISIONS

According to the materials of report at the meeting of the Presidium of the NAS of Ukraine, December 26, 2024

This report provides an overview of the current state of research in elementary particle physics and high-energy physics, with a particular focus on studying exotic forms of strongly interacting matter that arise in collider experiments. It outlines the latest and upcoming experiments aimed at exploring the quantum chromodynamics phase diagram, emphasizing the search for signals of a potential phase transition between quark-gluon plasma and hadronic gas, as well as the identification of the critical point. The report underscores the need for developing theoretical models to describe heavy-ion collision processes at relativistic energies. Additionally, recent advancements in the integrated hydrodynamic model and its extension to GeV-range experiments are discussed. Several simulation results related to the search for phase transition signals in experiments at the Relativistic Heavy Ion Collider are also presented.

Cite this article: Adzhymambetov M. Generalized model for relativistic heavy-ion collisions. *Visn. Nac. Akad. Nauk Ukr.* 2025. (2): 80—86. <https://doi.org/10.15407/visn2025.02.080>