

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

ІВАНИЦЬКИЙ ОЛЕКСІЙ ІГОРОВИЧ

УДК 532.612; 539.120.812

**ФЕНОМЕНОЛОГІЧНІ РІВНЯННЯ СТАНУ
СИЛЬНОВЗАЄМОДІЮЧОЇ МАТЕРІЇ
З КРИТИЧНОЮ ТОЧКОЮ**

01.04.02 – теоретична фізика

Автореферат
дисертації на здобуття наукового ступеню
кандидата фізико-математичних наук

КИЇВ – 2013

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана в відділі фізики високих густин енергії Інституту теоретичної фізики ім. М.М. Боголюбова НАН України.

Науковий керівник: доктор фізико-математичних наук

Бугаєв Кирило Олексійович,

Інститут теоретичної фізики ім. М.М. Боголюбова НАН України,
провідний науковий співробітник
відділу фізики високих густин енергії

Офіційні опоненти: доктор фізико-математичних наук

Дзюблик Олексій Ярославович,

Інститут ядерних досліджень НАН України,
провідний науковий співробітник відділу теоретичної фізики

доктор фізико-математичних наук, професор

Ребенко Олексій Лукич,

Інститут математики НАН України,
завідувач відділу математичної фізики

Захист відбудеться «_____»_____2013 р. о ____ годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 26.191.01 Інституту теоретичної фізики ім. М.М. Боголюбова НАН України за адресою: 03680, м. Київ, вул. Метрологічна 14-б, аудиторія 322.

З дисертацією можна ознайомитись у науковій бібліотеці Інституту теоретичної фізики ім. М.М. Боголюбова НАН України за адресою: 03680, м. Київ, вул. Метрологічна 14-б.

Автореферат розісланий «_____»_____2013 р.

Вчений секретар

спеціалізованої вченої ради,

доктор фізико-математичних наук

Кузьмичев В.Є.

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми

Передбачення існування нового екзотичного стану сильновзаємодіючої матерії стало теоретичним підґрунтям інтенсивних експериментальних досліджень у цьому напрямку, які проводилися впродовж останніх тридцяти років в рамках програм CERN SPS, BNL RHIC та CERN LHC і заплановані в найближчому майбутньому на нових установках ОІЯД NICA та GSI FAIR. Вони спрямовані на пошуки та вивчення властивостей кварк-глюонної плазми (КГП), в якій відбувається вивільнення кольорових ступенів вільності та/чи відновлення кіральної симетрії сильної взаємодії. Великий об'єм накопичених експериментальних даних та розвиток реалістичних методів моделювання динаміки релятивістських ядро-ядерних зіткнень дозволяють безпосередньо підійти до відкриття змішаної кварк-адронної фази квантової хромодинаміки (КХД), яка, можливо, виникає при фазовому переході (ФП) деконфайнмента. Це вимагає розробки надійних теоретичних методів моделювання і опису фазової діаграми КХД. Пріоритетною задачею в цьому контексті є вивчення рівняння стану сильновзаємодіючої речовини в широкому діапазоні термодинамічних параметрів її стану. Дана дисертаційна робота присвячена саме його побудові. Треба зауважити, що на сучасному етапі свого розвитку КХД не спроможна вирішити дану задачу, а її ґраткове формулювання дозволяє надійно вивчати термодинамічні властивості сильновзаємодіючої речовини лише при малих значеннях баріонної густини. Труднощі теоретико-польових методів досліджень у цьому напрямку зумовлюють виключне значення та інтерес до феноменологічного підходу в моделюванні властивостей рівняння стану КХД.

В результаті високоенергетичних експериментальних програм із зіткнень важких іонів було встановлено, що при малих баріонних густинах деконфайнмент носить характер неперервного крос-оверу (КО). Цей експериментальний факт та теоретико-польове уявлення про те, що при великих баріонних густинах вивільнення кольорових ступенів вільності носить характер ФП першого роду узгоджуються лише за умови існування на фазовій діаграмі КХД кінцевої точки, в якій змінюється рід ФП. Однак, КХД не дозволяє визначити її тип, критична (КТ) або трикритична (ТКТ), розташування та основні властивості з перших принципів. Через це побудова реалістичних моделей рівняння стану сильновзаємодіючої матерії із наперед заданими властивостями її КТ/ТКТ має принципове значення для успішного експериментального вивчення фазової діаграми КХД та пошуків КГП.

Іншою причиною, яка обумовлює інтерес до феноменологічних моделей рівняння стану КХД-матерії, є уявлення про те, що в області ФП деконфайнменту КГП є сильновзаємодіючою рідиною. Цей концептуальний погляд виник внаслідок успіхів гідрокінетичного підходу до опису експериментальних даних із зіткнень релятивістських важких іонів та визначення відношення зсувної в'язкості КГП до густини її ентропії, яке є навіть меншим ніж у рідкого гелію в λ -точці. Крім того, вивчення в ґраткових симуляціях відношення середньої енергії кольорової струни, яка сполучає статичну кварк-антикваркову пару, до температури оточуючого середовища продемонструвало, що в області ФП ця величина приймає типові саме для рідин значення ~ 10 . Через вказані причини ФП деконфайнменту може бути

аналогічним ФП типу рідина – пара. Це дозволяє моделювати властивості КТ/ТКТ фазової діаграми КХД так само, як у випадку простих рідин, в яких коефіцієнт поверхневого натягу зникає в кінцевій точці ФП першого роду.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами

Результати дисертації відповідають плановій науковій тематиці відділу фізики високих густин енергії Інституту теоретичної фізики ім. М.М. Боголюбова НАН України та були отримані в рамках наступних державних програм:

2009–2012: Дослідження фазової структури сильновзаємодіючої матерії та динаміки взаємодії адронів та ядер при високих енергіях. Номер д. р. – 0107U006889, шифр – 1.4.7.

2013: Дослідження сильновзаємодіючої матерії та структури адронів в релятивістських зіткненнях адронів та ядер. Номер д. р. – 0113U001092, шифр – 1.4.1.

Метою і задачею дослідження є детальний аналіз та подальший розвиток реалістичного феноменологічного рівняння стану сильновзаємодіючої речовини на основі існуючих статистичних моделей, що розв'язуються точно. Це зумовило необхідність вирішення наступних задач:

- знайти фізичний механізм генерації кінцевої точки ФП першого роду, який є застосовним в статистичних моделях рівняння стану сильновзаємодіючої речовини, що розв'язуються точно;
- побудувати коректну параметризацію всіх елементів статистичних моделей рівняння стану сильновзаємодіючої речовини, що розв'язуються точно, та дослідити на їх основі головні властивості КТ/ТКТ КХД матерії;
- визначити критичні показники статистичних моделей, що застосовуються до моделювання властивостей КТ/ТКТ та порівняти їх із критичними показниками інших фізичних систем; знайти обмеження на значення параметрів даних моделей у відповідності до класу універсальності КХД;
- вивчити на основі феноменологічних рівнянь стану вплив скінченності ядерної системи на властивості її фазової діаграми і проаналізувати модифікацію фазової діаграми при спрямуванні скінченної системи до термодинамічної границі.

Об'єктами дослідження є властивості фазової діаграми сильновзаємодіючої речовини в широкому діапазоні термодинамічних параметрів її стану, які допускають існування кінцевої точки ядерного ФП типу рідина – пара або ФП деконфайнмента кольорових ступенів вільності.

Предметом дослідження є рівняння стану систем з ФП, що відбуваються в сильновзаємодіючій матерії та мають кінцеву точку, в якій змінюється рід ФП.

Методи дослідження включають в себе методи математичного аналізу з використанням узагальнених функцій, метод термодинамічних ансамблів Гіббса та чисельні методи розв'язання систем трансцидентних рівнянь.

Наукова новизна одержаних результатів. В дисертаційній роботі вперше:

1. узагальнено на випадок реалістичних рівнянь стану ядерної рідини точний

- аналітичний розв'язок моделі статистичної мультифрагментації ядер (СММ) та побудовано на його основі аналог фазової діаграми скінченної ядерної речовини;
2. розроблено методу, яка дозволяє визначати коефіцієнт поверхневого натягу мішків КГП за даними ґраткової КХД;
 3. запропоновано схему визначення критичної температури КХД матерії та передбачено її значення $T_{\text{сер}}=152,9 \pm 4,5$ MeV;
 4. знайдено традиційні та запропоновано нові критичні показники моделі кварк-глюонних мішків (КГМ) з поверхневим натягом і проаналізовано скейлінгові співвідношення між ними;
 5. продемонстровано можливість існування класів універсальності, для яких традиційні скейлінгові співвідношення не виконуються, та проведено узагальнення існуючих скейлінгових законів для таких класів універсальності.

Практичне значення одержаних результатів

Отримані в дисертації результати є внеском у теоретичний опис фазової діаграми сильновзаємодіючої речовини. Запропонований фізичний механізм генерації ТКТ/КТ може бути використаний в інших моделях із ФП типу рідина – пара. Одержана на його основі оцінка критичної температури КХД є важливою в контексті низькоенергетичних експериментальних програм із зіткнень важких іонів. Явні аналітичні вирази для критичних індексів моделі КГМ з поверхневим натягом дозволяють фіксувати її параметри у відповідності до класу універсальності КХД, що є необхідним для гідродинамічного та гідрокінетичного моделювання фазових перетворень в сильновзаємодіючій речовині. Визначення цих показників також має загальнотеоретичне значення для розвитку підходів до опису простих рідин.

Особистий внесок здобувача. Внесок здобувача є визначальним для отримання представлених в дисертації результатів. Зокрема:

- в роботах [1, 2] здобувач узагальнив аналітичний розв'язок СММ на випадок реалістичного рівняння стану ядерної рідини, одержав та чисельно розв'язав систему рівнянь для знаходження аналога кривої ФП в скінченній системі;
- в роботі [3] здобувачем отримано співвідношення для визначення коефіцієнту поверхневого натягу КГМ за даними ґраткової КХД та виконано на його основі розрахунки критичної температури КХД-матерії;
- в роботі [4] дисертантом продемонстровано існування КО в спрощеній моделі кварк-глюонних трубок;
- в роботах [5, 6, 7] здобувачем запропоновано нові критичні індекси β^+ , β^- , ω , α'_c і α'_m та одержано явні аналітичні вирази як для них, так і для традиційних критичних показників α , α' , α'_s , β , γ' , δ моделі КГМ з поверхневим натягом для випадків КТ та ТКТ і проаналізовано скейлінгові співвідношення між ними;
- в роботі [8] дисертантом продемонстровано можливість існування нефішерівських класів універсальності, для яких традиційні скейлінгові співвідношення порушено, проте мають місце узагальнені скейлінгові закони; запропоновано узагальнення цих законів для таких класів універсальності.

Апробація роботи

Результати дисертації доповідались на численних семінарах відділу фізики високих густин енергії ІТФ НАН України та наступних конференціях: "International Conference of Physics of Liquid Matter: Modern Problems 2010, Kyiv" (Київ, Україна, 21–24 травня 2010 р.); Конференція молодих вчених "II Young Scientists Conference: Modern Problems of Theoretical Physics" (Київ, Україна, 22–24 грудня 2010 р.); "XV-th Research Workshop: Nuclear Theory and Applications" (Дубна, Росія, 1–30 квітня 2011 р.); International school-seminar "New Physics and QCD at External Conditions" (Дніпропетровськ, Україна, 3–6 травня, 2011 р.); International Young Scientists Conference IEP-2011 (Ужгород, 24–27 травня, 2011 р.); Helmholtz International Summer School (Дубна, Росія, 24 липня–2 серпня 2011 р.); Конференція молодих вчених "III Young Scientists Conference: Modern Problems of Theoretical Physics" (Київ, Україна, 21–23 грудня 2011 р.); European School of High-Energy Physics (Анжу, Франція, 6–19 червня, 2012 р.); Helmholtz International Summer School (Дубна, Росія, 28 серпня–8 вересня 2012 р.); Конференція молодих вчених "IV Young Scientists Conference: Modern Problems of Theoretical Physics" (Київ, Україна, 23–26 жовтня 2012 р.); International school-seminar "New Physics and QCD at External Conditions" (Дніпропетровськ, Україна, 22–24 травня, 2013 р.).

Публікації

За матеріалами дисертаційної роботи опубліковано 13 робіт. А саме, 5 із них видані в журналах [2, 3, 6, 7, 8], 3 – в працях конференцій [1, 4, 5], а 5 робіт було опубліковано як тези конференцій [9, 10, 11, 12, 13].

Структура дисертаційної роботи

Дисертаційна робота складається із вступу, трьох глав, висновків, трьох додатків та бібліографії, що містить 118 посилань. Вона включає 9 рисунків та 5 таблиць. Загальний об'єм роботи становить 122 сторінки друкованого тексту.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ

У вступі обґрунтовано актуальність обраної теми, сформульовано мету та задачі дослідження, продемонстровано наукову та практичну цінність отриманих результатів і коротко викладено зміст розділів дисертації.

Першу главу присвячено побудові реалістичного феноменологічного рівняння стану КХД матерії на основі точних аналітичних розв'язків моделі КГМ з поверхневим натягом. Основну увагу приділено області фазової діаграми, в якій відбувається ФП деконфайнменту. Потреба надійно моделювати термодинамічні властивості сильновзаємодіючої речовини в критичному регіоні викликає необхідність розвитку саме статистичних моделей рівняння стану, які мають точні аналітичні розв'язки, а не засновані на наближенні середнього поля. Дана модель, яка належить до моделей кластерного типу, задовольняє вказаній вимозі.

Основна ідея кластерного підходу полягає в існуванні фізичних кластерів, які утворено із фундаментальних ступенів вільності. Їх використання суттєво спрощує опис певної фізичної системи. Послідовне введення поняття кластеру вперше було виконано на основі розкладу статистичної суми взаємодіючої системи за ступенями функції Маєра, яка описує кореляції між фундаментальними ступенями вільності.

При цьому між кластерами майже повністю відсутня взаємодія, а їх індивідуальні властивості ефективно враховують взаємодію між фундаментальними ступенями вільності даної системи. Самі ж кластери є зв'язаними станами, що існують деякий час та перебувають в рівновазі між собою. Зрозуміло, що середня кількість кластерів певного типу визначається термодинамічними параметрами стану даної системи. При цьому, центральним елементом є вільна енергія кластеру даного сорту. Саме вона визначає рівноважний розподіл кластерів у відповідності до їх статистики. Опис різноманітних фізичних явищ, серед яких нуклеація із газової фази та мультифрагментація ядер, продемонстрували плідність кластерного підходу.

З точки зору даного підходу, КГМ є кластерами, сформованими з кварків та глюонів, а адрони є легкими та стабільними КГМ. Формулювання даної моделі в їх термінах замість фундаментальних ступенів вільності дозволяє аналітично одержати точний вираз для відповідної статистичної суми у великому канонічному ансамблі, що є важливим для надійного моделювання властивостей КХД матерії виходячи з перших принципів статистичної механіки. Взаємодія між КГМ апроксимується відштовхуванням твердого кору. Притягання, як і в оригінальній моделі статистичного бутстрапу, ефективно враховано за рахунок великої кількості конститuentів. Врахування далекодіючої взаємодії між КГМ вимагає розвитку методів опису скінченних систем. Це пов'язано з відсутністю термодинамічної гранці в системах із кулонівською взаємодією. Іншою важливою обставиною, яка зумовлює інтерес до вивчення скінченних систем, є принципова обмеженість за розміром досліджуваної при зіткненнях важких іонів сильновзаємодіючої матерії.

Вплив скінченності сильновзаємодіючої системи на властивості її фазової діаграми вивчався на основі точних аналітичних розв'язків СММ [1, 2]. Її фізичними ступенями вільності є безструктурні нуклони та композитні k -нуклонні ($k \geq 2$) ядерні фрагменти. Їх вільна енергія має типовий для кластерних моделей вигляд

$$F_{k \geq 2}(T, \mu) = (\mu - p_l(T, \mu)b)k + T\sigma(T)k^\kappa + T\left(\tau + \frac{2}{3}\right) \ln k. \quad (1)$$

Об'ємний доданок в (1) записано в термінах тиску ядерної рідини $p_l(T, \mu)$ та об'єму одного нуклона $b = \rho_0^{-1}$, де ρ_0 є нормальною ядерною густиною, поверхневий – через редукований коефіцієнт поверхневого натягу (КПН) $\sigma(T)$ та параметр $\kappa \simeq \frac{d-1}{d}$, який визначається розмірністю простору d . Індекс τ є фішерівським показником. Відповідно до експериментальних даних, ядерна рідина є стисловою. Для забезпечення цього її тиск було параметризовано у вигляді [2]

$$p_l(T, \mu) = \frac{\mu + W(T) + a_2(\mu + W_0)^2 + a_4(\mu + W_0)^4}{b}, \quad (2)$$

де $W(T) = W_0 + T^2/E_f$ є енергією зв'язку на нуклон, яка враховує вклад фермієвськи збуджених рівнів, а $W_0 = E_f = 16$ МеВ. Критична температура T_{cep} приймається рівною 18 МеВ. При $a_2 = 1,233 \cdot 10^{-2} \text{МеВ}^{-1}$ і $a_4 = 4,099 \cdot 10^{-7} \text{МеВ}^{-3}$ показник нестисливості нормальної ($T = 0, \rho = \rho_0$) ядерної речовини $\mathcal{K}_0 \equiv 9 \frac{dp_l}{d\rho_l}$ та критична густина приймають значення 365 МеВ та $\rho_0/3$, відповідно. Ізотермічна стисливість ядерної рідини $K_T^l \equiv \frac{1}{\rho_l} \frac{d\rho_l}{dp_l} \Big|_T$ невід'ємна при додатніх a_2 та a_4 . Тому рівняння стану (2) є сумісним із другою аксіомою статистичної механіки Л. ван Хова.

Параметризація редукованого КПН даної моделі має вигляд [2]

$$\sigma(T) = \text{sign}(T_{\text{cep}} - T) \cdot \sigma_0 \cdot \left| \frac{T_{\text{cep}} - T}{T_{\text{cep}}} \right|^\zeta, \quad (3)$$

де $\sigma_0 = 18 \text{ MeV}$ та $\zeta \geq 1$. Висновок про від'ємні значення $\sigma(T)$ при високих температурах слідує з точних аналітичних розв'язків моделі пагорбів та долин, що є моделлю поверхневих деформацій. Параметризація (2), (3) дозволяє безпосередньо дослідити аналог фазової діаграми скінченної ядерної речовини на основі аналітичного виразу для великої канонічної статистичної суми СММ у скінченному об'ємі, яка визначається комплексними розв'язками $\lambda_n = R_n + iI_n$ рівняння [1]

$$\lambda_n = \sum_{k=1}^{K(V)} \varphi_k \exp\left(\frac{(\mu - \lambda_n b)k}{T}\right). \quad (4)$$

Тут $K(V)$ позначає обмежений об'єм системи розмір максимального фрагменту, а $\varphi_{k=1} \equiv 4 \left(\frac{mT}{2\pi}\right)^{3/2}$ та $\varphi_{k \geq 2} \equiv \left(\frac{mkT}{2\pi}\right)^{3/2} e^{-\frac{F_k}{T}}$ – редуковану одночастинкову густину. При малих T і μ рівняння (4) має один дійсний корінь $\lambda_0 > 0$. Це відповідає аналогу газової фази. При збільшенні T чи μ з'являються пари комплексно спряжених коренів $\lambda_n = \lambda_{-n}^*$, що відповідає аналогу змішаної фази. Аналог ФП першого роду відбувається при зміні кількості коренів рівняння (4) з одного до трьох і більше. На рис. 1 представлено аналоги фазової діаграми даної моделі в скінченному об'ємі в координатах $T - Rev$ та $T - \mu$ при $K(V) = 20$ та $K(V) = 100$ [2], де $v_n \equiv (p_l - \lambda_n T)b$ позначає ефективний хімічний потенціал. Універсальність даного методу вивчення термодинаміки скінчених систем дозволяє його використання в різноманітних кластерних моделях, взаємодія між фізичними ступенями вільності яких апроксимована відштовхуванням твердого кору.

Вказана обставина є важливою для моделювання рівняння стану КХД матерії на основі моделі КГМ з поверхневим натягом. Фізичними ступенями вільності даної кластерної моделі є легкі безструктурні адрони та КГМ з вільною енергією

$$F^{\text{bags}}(v) - b(v)\mu = -Tz_Q(T, \mu)v + T\Sigma(T, \mu)v^\alpha + T\tau \ln \frac{v}{V_0}. \quad (5)$$

Тут $b(v)$ позначає баріонний заряд КГМ об'єму v , $z_Q(T, \mu)$ є регулярною функцією своїх аргументів, а $V_0 \simeq 1 \text{ фм}^3$. Принциповим для генерації в даній моделі ТКТ/КТ елементом є редукований КПН Σ . Для вивчення властивостей Σ було розвинено модель невзаємодіючих кольорових трубок, які сполучають статичну кварк-антикваркову пару і є циліндричними КГМ [3, 4]. За даними ґраткової КХД, вільна енергія такої пари $F_{q\bar{q}}$ пропорційна її видовженню L . Тобто $F_{q\bar{q}} = \sigma_{\text{str}}(T)L$, де $\sigma_{\text{str}}(T)$ є натягом нерозривної глюонної струни. На основі еквівалентності ансамблів поверхневих деформацій циліндричного КГМ об'єму $v = \pi R^2 L$ та деформацій кольорової струни фіксованої довжини L можна знайти КПН, як відношення поверхневого вкладу у вільну енергію мішка до площі його поверхні $s = 2\pi RL$

$$\sigma_{\text{surf}}(T)|_{\mu=0} = \frac{p_v(T)R(T)}{2} + \frac{\sigma_{\text{str}}(T)}{2\pi R(T)} - \frac{T\tau}{2\pi R(T)L} \ln \frac{\pi R(T)^2 L}{V_0}. \quad (6)$$

Тут $p_v(T) = Tz_Q(T, 0)$ має зміст внутрішнього тиску циліндричного КГМ. Вираз (6)

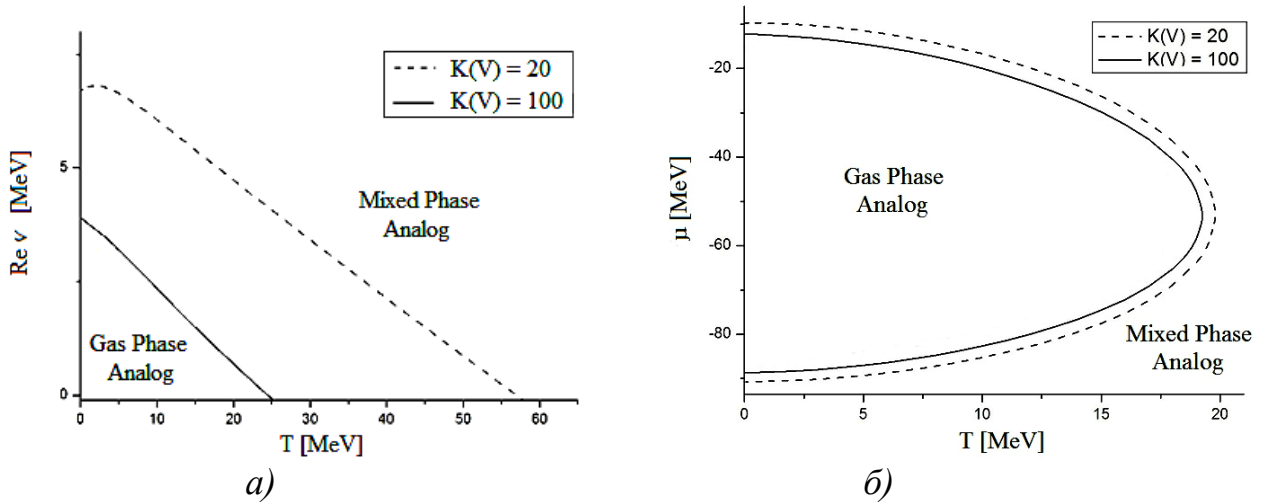


Рис. 1. Аналог фазової діаграми СММ в скінченному об'ємі в координатах а) $T - Re \nu$ та б) $T - \mu$ для випадків, коли максимальний ядерний фрагмент складається з $K(V)=20$ та $K(V)=100$ нуклонів.

дозволяє визначати КПН мішків за даними ґраткової КХД. Використовуючи типові для адронної спектроскопії значення $p_v(0) = -(0,25 \text{ GeV})^4$ та одержані в ґраткових симуляціях результати $R(0) = 0.5 \text{ фм}$, $\sigma_{\text{str}}(0) = -(0,42 \text{ GeV})^2$ отримаємо $\sigma_0 \equiv \sigma_{\text{surf}}(0) = 157,4 \text{ MeV/фм}^2$. Спираючись на результати моделі пагорбів і долин та використовуючи одержане значення σ_0 , можна знайти температуру, при якій зникає КПН мішків $T_\sigma \simeq \sigma_0 V_0^{2/3} \in [148,4; 157,4] \text{ MeV}$. Вона збігається із температурою ТКТ/КТ КХД матерії, чим і зумовлюється важливість даного результату. Вперше таку схему оцінки критичної температури КХД було запропоновано роботі [3].

Аналіз поведінки густини ентропії $s = \frac{\partial p_{\text{tot}}}{\partial T}$ циліндричного КГМ в області КО, де зникає натяг кольорової струни, показав, що s є додатною лише при $\sigma_{\text{surf}} < 0$ [4]. При цьому, повний тиск p_{tot} визначався через похідну по об'єму від вільної енергії (5). Цей результат є важливим для розробки коректної параметризації редукованого КПН та генерації ТКТ/КТ. Іншою властивістю даної моделі є існування в ній КО між двома фазами, що відрізняються радіусами кварк-глюонних трубок [4]. Їх середня довжина відповідає максимуму p_{tot} . Значення фішерівського індексу полягає в тому, що при $\tau = 0$ система завжди існує в стані конфайнменту ($L = 0$).

Одержані результати дозволили розробити найбільш загальну параметризацію редукованого КПН для моделі КГМ з поверхневим натягом

$$\Sigma(T, \mu) = \text{sign}(T_\Sigma(\mu) - T) \cdot \frac{\sigma}{T} \left| \frac{T_\Sigma(\mu) - T}{T_\Sigma(\mu)} \right|^\zeta, \quad (7)$$

де ζ є додатною сталою, $\sigma > 0$ може бути як сталою, так і гладкою функцією T та/або μ . При $\sigma = \text{const}$ цей параметр має зміст КПН при $T = 0$ і знаходиться за допомогою моделі кварк-глюонних трубок. При $T = T_\Sigma(\mu)$ змінюється знак $\Sigma(T, \mu)$, причому $T_\Sigma(0)$ також можна визначити за даними ґраткової КХД. Параметризація (7) дозволяє генерувати ТКТ/КТ на основі моделі КГМ з поверхневим натягом. Її точні аналітичні розв'язки передбачають існування газової та рідкої фаз.

В другій главі дисертації моделюється ТКТ фазової діаграми КХД на основі параметризації КПН (7) та рівняння стану моделі КГМ з поверхневим натягом. Її

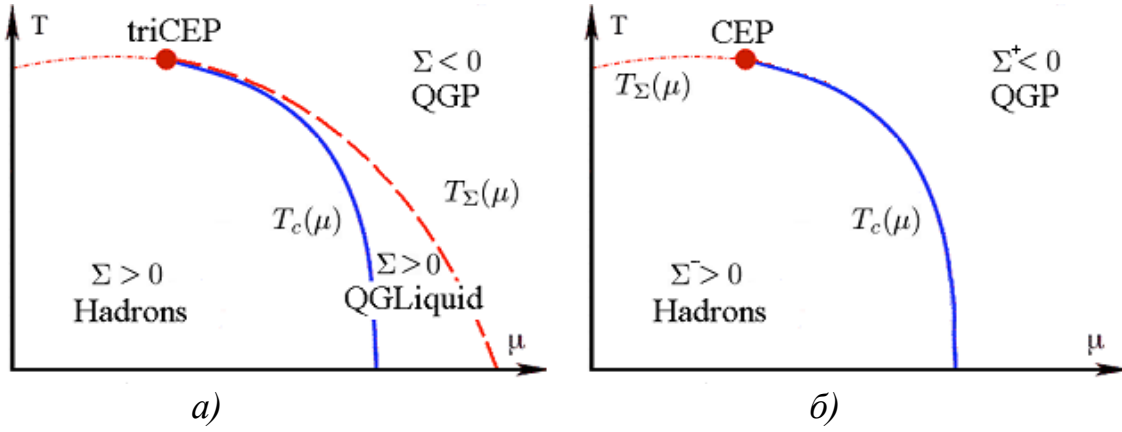


Рис. 2. Схематичне зображення фазової діаграми моделі КГМ з поверхневим натягом в координатах $\mu - T$ у випадку а) ТКТ та б) КТ. ФП першого роду відбувається вздовж суцільної кривої $T = T_c(\mu)$, КПН змінює знак вздовж пунктирної лінії $T = T_\Sigma(\mu)$. В моделі з КТ маємо $T_\Sigma(\mu) = T_c(\mu)$ при $\mu \geq \mu_{\text{cep}}$.

фазову діаграму схематично зображено на рис. 2, а. Вона включає в себе газові фази адронного газу (АГ) та КГП. ФП першого роду між АГ і кварк-глюонною рідиною (КГР) відбувається вздовж кривої $T_c(\mu)$. В ТКТ він вироджується в неперервний КО між АГ та КГП. Стандартні критичні показники описують властивості ТКТ при $t \equiv \frac{T - T_{\text{cep}}}{T_{\text{cep}}} \rightarrow 0$: індекси α' і α описують теплоємність системи при $t < 0$ і $t > 0$, зникнення різниці баріонних густин фаз, які співіснують при ФП, відображається показником β , а розбіжність стрибка їх ізотермічних стисливостей – індексом γ' . Форма критичної ізотерми в $\rho - p$ координатах визначається індексом δ . Величини, що відносяться до розділених кривою ФП високотемпературної (КГР) і низькотемпературної (АГ) фаз, зручно позначати індексами “+” та “-”. Відповідно до цих позначень, в роботах [7, 8] було введено критичні показники β^+ та β^- , що описують відхилення баріонних густин чистих фаз від критичного значення

$$\rho^\pm|_{T=T_c} - \rho_{\text{cep}} \sim |t|^{\beta^\pm}. \quad (8)$$

Критичні показники α' , β , γ' та δ пов'язані скейлінговими співвідношеннями

$$\alpha' + 2\beta + \gamma' \geq 2, \quad (9)$$

$$\alpha' + \beta(1 + \delta) \geq 2, \quad (10)$$

$$\gamma' + \beta(1 - \delta) \geq 0. \quad (11)$$

Для простих рідин вони доведені теоремою Фішера та носять назву Фішера, Гріффітса та Лібермана, а для магнітних систем – Рашбрука, Гріффітса та Відома.

ФП першого роду і ТКТ існують в даній моделі при $\frac{3}{2} < \tau \leq 2$. Криві $T_c(\mu)$ і $T_\Sigma(\mu)$ не перетинаються, а дотикаються в ТКТ [8]. Їх форму описує параметр $\xi^T > 0$ [5, 6], необхідний для опису критичних показників різних класів універсальності,

$$T_{\text{cep}} - T_c(\mu) \sim T_{\text{cep}} - T_\Sigma(\mu) \sim \left| \mu - \mu_{\text{cep}} \right|^{\xi^T}. \quad (12)$$

Він дозволяє відтворити різноманітні типи ТКТ відповідно до вимоги стійкості критичного стану. Перехід деконфайнменту від АГ до КГР в даній моделі має характер ФП типу рідина–пара. Через це вздовж кривої $T = T_c(\mu)$ має місце рівняння Клапейрона–Клаузіуса. Його аналіз демонструє, що поведінка похідних за температурою A_T та хімпотенціалом A_μ від відношення регулярної частини вільної

енергії системи до її об'єму описується в околі ТКТ параметром $\chi \geq \max\left(0, \frac{1}{\xi^T} - 1\right)$

$$A_T|_{T=T_c} \sim \left(T_{\text{сер}} - T_c(\mu)\right)^{\chi + \frac{1}{\xi^T} - 1}, \quad (13)$$

$$A_\mu|_{T=T_c} \sim \left(T_{\text{сер}} - T_c(\mu)\right)^\chi. \quad (14)$$

Введення χ є прямим наслідком рівняння Клапейрона–Клаузіуса [5, 6]. Він відіграє значну роль у генерації різних режимів даної моделі. Іншим важливим та новим параметром є ω [7, 8], який описує поведінку в околі ТКТ густини ентропії КГР

$$\left.\frac{\partial s_{QGL}}{\partial T}\right|_{T=T_c} = \left(T \frac{\partial^2 z_Q}{\partial T^2} + 2 \frac{\partial z_Q}{\partial T}\right)_{T=T_c} \sim |t|^\omega. \quad (15)$$

Він необхідний для генерації $\alpha' < 0$, що відповідає $O(N)$ класам універсальності.

Розроблена параметризація всіх елементів моделі КГМ з поверхневим натягом у випадку ТКТ цілком задовольняє вимогам загальності і враховує основні деталі ФП типу рідина–пара. В роботах [5, 6, 8] на її основі було знайдено критичні показники даної моделі, як функції відповідних параметрів. Явні аналітичні вирази для них, що відповідають режиму $\chi \neq 1 - 1/\xi^T$ даної моделі, представлено нижче

$$\alpha = \alpha' = 2 - \min\left(\frac{2}{\xi^T}, 2 + \omega, 1 + \frac{1}{\xi^T}\right), \quad (16)$$

$$\beta_{QGL} = \beta^+ = \min\left(1, \frac{1}{\xi^T}\right), \quad (17)$$

$$\beta = \beta_H = \beta^- = \frac{\zeta}{\varkappa} (2 - \tau) + \min\left(\chi, \frac{\zeta}{\varkappa} \min(\varkappa, \tau - 1) - \frac{1}{\xi^T}\right), \quad (18)$$

$$\gamma' = \frac{\zeta}{\varkappa} - 2\beta, \quad (19)$$

$$\delta^{-1} = \frac{\min\left(\xi^T \frac{\zeta}{\varkappa} \min(\varkappa, \tau - 1), 1\right)}{\tau - 1} - 1 \quad \text{при } \chi = 0. \quad (20)$$

Широкий спектр значень цих індексів дозволяє описати критичні показники простих рідин, двох- та тривимірних моделей Ізінга, $O(2)$, $O(3)$ та $O(4)$ симетричних спінових систем з Таблиці 1. Деякі значення відповідних модельних параметрів наведено в Таблиці 2. Вирази (18) – (20) відтворюють індекси β , γ' та δ СММ, при цьому α' може обиратися незалежно. Отже, відомі розв'язки СММ включено в дану модель, як частинний випадок. Ці вирази також дозволяють безпосередньо перевірити виконання скейлінгових законів, які традиційно відіграють значну роль в теорії критичних явищ. Співвідношення (11) завжди виконується в даній моделі, а нерівності (9) та (10) порушено в загальному випадку. Традиційним підходом до їх виправлення є переозначення індексу α' . Запропонований М. Фішером показник α'_s описує різницю теплоємностей двох чистих фаз в околі ТКТ

$$\Delta C \equiv (C^+ - C^-)_{T=T_c} \sim |t|^{-\alpha'_s}. \quad (21)$$

Це означення має значний недолік, пов'язаний із можливістю скорочення головних вкладів у виразах для теплоємностей чистих фаз. Для його усунення в роботі [8] було введено альтернативні означення, які відповідають лінійній комбінації C^+ і C^-

$$C_{\text{tot}} \equiv (K^+ C^+ + K^- C^-)_{T=T_c} \sim |t|^{-\alpha'_c} \quad (22)$$

	Прості Рідини	2D модель Ізінга	3D модель Ізінга	O(2) Модель	O(3) Модель	O(4) Модель
α'	0,10(1)	0	0,1096(5)	-0,0146(8)	-0,1336(15)	-0,19(6)
β	0,335(15)	1/8	0,3265(1)	0,3485(2)	0,3689(3)	0,38(1)
γ'	1,25(5)	7/4	1,2373(2)	1,3177(5)	1,3960(9)	1,44(4)
δ	4,5(3)	15	4,7893(8)	4,780(2)	4,78(3)	4,82(5)

Таблиця 1. Критичні показники простих рідин, двох- та тривимірних моделей Ізінга, O(2), O(3) та O(4) симетричних спінових систем. Тут і надалі число в дужках відповідає похибці в останній цифрі.

та теплоємності системи, визначеній вздовж будь-якої регулярної та гладкої кривої, яка цілком міститься всередині змішаної фази

$$C_{\text{reg}} \equiv \frac{T_c}{\rho} \frac{d}{dT} (K^+ s^+ + K^- s^-)_{T=T_c} \sim |t|^{-\alpha'_m}. \quad (23)$$

В (22) коефіцієнти $K^\pm > 0$ мають зміст ймовірностей перебування системи в околі ТКТ у стані однієї з двох чистих фаз. В (23) вони визначають форму кривої, вздовж якої визначено C_{reg} . Їх обрана залежність від T, μ максимізує α'_m і α'_c . Між індексами

$$\alpha'_s = \max\left(\frac{1}{\xi T} - \omega, 2\right) - \beta - \frac{1}{\xi T}, \quad (24)$$

$$\alpha'_c = \max\left(\frac{1}{\xi T} - \omega + \beta, 2\right) - \beta - \frac{1}{\xi T}, \quad (25)$$

$$\alpha'_m = \max(1, \alpha'_c) \quad (26)$$

існує співвідношення $\alpha' \leq \alpha'_s \leq \alpha'_c \leq \alpha'_m$ [8]. Для нерівності (10) гіпотеза Фішера про переозначення α' спрацьовує вже при використанні α'_s . Але жоден з індексів (24) – (26) не виправляє нерівність (10) в загальному випадку. Так, $\alpha'_m + \beta(1 + \delta) < 2$ при $\kappa \geq \tau - 1$ та $\frac{\zeta}{\chi}(\tau - 1) - \frac{1}{\xi T} + \min\left(0, 1 - \frac{\zeta}{\chi}\right) > \chi > 0$.

Дана модель є повністю сумісною із вимогами теореми Фішера. Порушення в ній нерівностей (9) і (10) свідчить про можливість існування нефішерівських класів універсальності, для яких вони не виконуються [6, 7, 8]. Узагальнені на випадок таких класів універсальності скейлінгові закони Фішера і Гріффітса мають вигляд

$$\alpha'_c + 2\beta + \gamma' \geq 2, \quad (27)$$

$$\alpha_c + \beta + \delta\beta^+ \geq 2. \quad (28)$$

Вирази для критичних індексів безпосередньо демонструють їх виконання при всіх значеннях параметрів даної моделі. Закони (27) і (28) мотивовані чітким фізичним змістом індексу α'_c та тим, що показник δ описує форму критичної ізотерми, яка в даній моделі цілком розташована в області КГП (рис. 2, а), пов'язаної з індексом β^+ . Дані нерівності виконуються для всіх відомих фізичних систем та моделей.

Третю главу присвячено моделюванню на основі рівняння стану моделі КГМ з поверхневим натягом КТ фазової діаграми сильновзаємодіючої матерії, яку схематично зображено на рис. 2, б. При цьому, КПН змінює знак точно на кривій ФП, тобто $T_\Sigma(\mu) = T_c(\mu)$ при $\mu \geq \mu_{\text{сер}}$. Справжня КГР існує лише на кривій ФП, який відбувається між низькотемпературним АГ та високотемпературною фазою

	Прості Рідини	2D модель Ізінга	3D модель Ізінга	O(2) Модель	O(3) Модель	O(4) Модель
χ	0	0	0	≥ 0	≥ 0	≥ 0
ζ/κ	1,92(4)	2	1,8903(3)	2,0147(4)	2,1338(4)	2,220(3)
τ	1,818(9)	31/16	1,8273(5)	1,8270(5)	1,8271(5)	1,828(1)
κ	2/3	1/2	2/3	0,8270(5)	0,8270(5)	0,828(1)
ξ^T	1,0526(55)	1	1,0579(6)	0,6002(4)	0,5666(45)	0,55(1)
ω	≥ 0	≥ 0	≥ 0	0,0146(8)	0,1336(45)	0,19(6)

Таблиця 2. Деякі значення параметрів моделі КГМ з поверхневим натягом у випадку ТКТ, які відтворюють критичні показники з Таблиці 1.

КГП. Умовою цього є $\tau > 2$. Акуратний аналіз вимоги скінченності ізотермічних стисливостей чистих фаз при $T < T_{сер}$ призвів до уточнення цієї умови до $\tau > 3$ [7].

Параметризація редукованого КГП в даній моделі є сумісною із (7), але включає деякі відмінності. Степені, що описують зникнення Σ^\pm , є різними по різні боки від кривої ФП, тобто $\zeta^+ \neq \zeta^- \geq 1$ в загальному випадку. Умова додатності стрибка баріонної густини при ФП вимагає $\zeta^+ = 1$. Параметри σ^\pm є не сталими, а гладкими функціями своїх аргументів, зникнення яких в КТ описується степенями ξ^+ та ξ^- . Відмінності у значеннях параметрів Σ^\pm по різні боки від кривої $T = T_c(\mu)$ пов'язані із специфічним для даної моделі механізмом генерації ФП. Опис поведінки КГП не одним, а двома степенями ζ^\pm та ξ^\pm необхідний для генерації КТ. Дану параметризацію редукованого КГП було запропоновано в роботах [7, 8]. Інші елементи моделі з КТ параметризовано так само, як і у випадку моделі з ТКТ. Вирази для критичних показників даної моделі [5, 7, 8] представлено нижче

$$\beta_{QGP} = \beta^+ = \zeta^+ + \xi^+ - \frac{1}{\xi^T}, \quad (29)$$

$$\beta_H = \beta^- = \zeta^- + \xi^- - \frac{1}{\xi^T}, \quad (29)$$

$$\beta = \beta^+ \quad \text{при} \quad \zeta^- > 1, \quad (30)$$

$$\beta = \min(\beta^+, \beta^-) \quad \text{при} \quad \zeta^- = 1, \quad (31)$$

$$\gamma' = \frac{1}{\xi^T} - \beta, \quad (32)$$

$$\delta^{-1} = \xi^T \beta^+. \quad (33)$$

Індекси α , α' , α'_s , α'_c і α'_m визначаються виразами (16), (24) – (26). Відмінності у виразах для деяких критичних показників даної моделі та моделі з ТКТ пов'язані із різними механізмами генерації ФП та несумісними значеннями індексу τ . Аналітичні вирази для них дозволили знайти параметри моделі, які відтворюють відповідні індекси простих рідин, двох- та тривимірних моделей Ізінга, O(2), O(3) та O(4) симетричних спінових систем [7, 8]. Ці параметри наведено в Таблиці 3.

Модель КГМ з поверхневим натягом у випадку КТ не протирічить вимогам теореми Фішера. Співвідношення Лібермана завжди виконується в ній. Нерівності Фішера та Гріффітса порушені, наприклад, при $\xi^T \geq 1$. Переозначення α' виправляє

	Прості Рідини	2D модель Ізінга	3D модель Ізінга	O(2) Модель	O(3) Модель	O(4) Модель
ζ^+	1	1	1	1	1	1
ζ^-	> 1	> 1	> 1	> 1	> 1	> 1
ξ^+	1,84(1)	1	0,8902(5)	1,0143(4)	1,8271(5)	1,828(1)
ξ^-	> 0	> 0	> 0	> 0	> 0	> 0
ξ^T	0,631(19)	8/15	0,6395(9)	0,6002(4)	0,5666(45)	0,55(1)
ω^*	\emptyset	0	\emptyset	0,0146(8)	0,1336(45)	0,19(6)
ω^{**}	≥ 0	≥ 0	≥ 0	0,0146(8)	0,1336(45)	0,19(6)

Таблиця 3. Деякі значення параметрів моделі КГМ з поверхневим натягом у випадку КТ, які відтворюють критичні показники з Таблиці 1. Значення ω^* і ω^{**} отримані з виразів для α і α'_c , відповідно. Символ \emptyset означає, що неможливо знайти значення відповідного параметру, яке відтворює критичні показники з Таблиці 1.

співвідношення (9), але не спрацьовує у випадку нерівності (10) навіть із індексом α'_m , наприклад, при $\beta = \beta^- < \min\left(\beta^+, \frac{\xi^T \beta^+}{1 + \xi^T \beta^+}\right)$. Порушення у загальному випадку нерівності Гріффітса свідчить про існування нефішерівських класів універсальності. В той же час, співвідношення (27) та (28) завжди виконуються в даній моделі [7, 8]. Одже, їх слід розглядати, як узагальнення скейлінгових законів Фішера та Гріффітса на випадок нефішерівських класів універсальності.

У **висновках** підсумовуються основні результати роботи.

ВИСНОВКИ

Для розвитку феноменологічних моделей реалістичних рівнянь стану сильновзаємодіючої речовини, які дозволяють моделювати ТКТ/КТ із наперед заданими властивостями, в даній дисертації було одержано наступні результати.

Запропоновано термодинамічно узгоджене рівняння стану стисливої ядерної рідини, яке дозволило розвинути реалістичне узагальнення СММ у скінченних об'ємах та дослідити на її основі аналог фазової діаграми скінченної ядерної матерії.

Розвинено модель невзаємодіючих кварк-глюонних трубок, яка дозволяє визначати КПН КГМ за даними ґраткової КХД. Запропоновано схему визначення критичної температури КХД. Передбачено її значення, яке добре узгоджується з аналогічними результатами, одержаними на основі аналізу поведінки кваркового конденсату та множинностей адронів, які народжуються в зіткненнях важких іонів.

На основі рівняння стану моделі КГМ з поверхневим натягом виконано моделювання ТКТ та КТ КХД матерії в термінах критичних показників. Аналітично одержано традиційні критичні індекси даної моделі та запропоновано нові. На основі одержаних виразів зафіксовано параметри моделі КГМ з поверхневим натягом у випадку ТКТ та КТ у відповідності до різних класів універсальності.

Ретельно проаналізовано скейлінгові співвідношення між критичними індексами даної моделі. Безпосередньо продемонстровано, що нерівності Фішера та

Гріффітса порушено у загальному випадку для всіх означень індексу α' . Визначено причини цього порушення та зроблено висновок про можливість існування нових нефішерівських класів універсальності. Запропоновано узагальнення традиційних скейлінгових законів на випадок таких класів універсальності.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ ПРАЦЬ

1. Bugaev K. A. *Can We Rigorously Define Phases in a Finite System?* / K. A. Bugaev, A. I. Ivanitskii, E. G. Nikonov et al. // In Proceedings of XV Research Workshop Nucleation Theory and Applications, Dubna, Russia, 2011, P. 287 - 300.
2. Bugaev K.A. *Is bimodality a sufficient condition for a first order phase transition existence?* / K.A. Bugaev, A.I. Ivanytskyi, V.V. Sagun and D.R. Oliinychenko // Phys. Part. Nucl. Lett. – 2013. – Vol. 10, № 6. – P. 831 – 852.
3. Bugaev K.A. *Physical mechanism of the (tri)critical point generation* / K. A. Bugaev, A.I. Ivanytskyi, E.G. Nikonov et al. // Yad. Fyz. – 2012.– Vol. 75, № 6. – P. 757-759.
4. Bugaev K. A. *The Role of Bag Surface Tension in Color Confinement* / K. A. Bugaev and A. I. Ivanytskyi // In Proceedings of the International School-seminar NPQCD 2011, Dnepropetrovsk, Ukraine, 2011, P. 21 - 28.
5. Ivanytskyi A.I. *The critical exponents of the QCD (tri)critical endpoint within exactly solvable models* /A.I. Ivanytskyi and K.A. Bugaev// In Proceedings of the International School-seminar NPQCD 2011, Dnepropetrovsk, Ukraine, 2011, P. 109 - 112.
6. Ivanytskyi A.I. *The critical indices of the quark gluon bags with surface tension model with tricritical endpoint* / A.I. Ivanytskyi // Nucl. Phys. A. – 2012. – Vol. 880, № 4. – P. 12 - 28.
7. Ivanytskyi A.I. *Critical exponents of the quark-gluon bags model with a critical endpoint* / A.I. Ivanytskyi, K.A. Bugaev, A.S. Sorin and G.M. Zinovjev // Phys. Rev. E. – 2012. – Vol. 86, № 6. – P. 061107-01— 061107-13.
8. Ivanytskyi A.I. *On possible existence of the non-Fisher universality classes* / A. I. Ivanytskyi and K. A. Bugaev // Ukr. J. Phys. – 2012. – Vol. 57, № 9. – P. 964 - 981.
9. Ivanytskyi A.I. *The critical indices of Quark-Gluon bags with surface tension model* / A.I. Ivanytskyi and K.A. Bugaev // In book of abstracts of the International Conference Problems of Liquid Mater Physics – 2010, Kiev, Ukraine, P. 166.
10. Ivanytskyi A.I. *Calculation of the critical indices of the Quark-Gluon Bags with Surface Tension Model* / A.I. Ivanytskyi and K.A. Bugaev // In book of abstracts of II Young Scientists Conference: Modern Problems of Theoretical Physics – 2010, Kiev, Ukraine, P. 20.
11. Ivanytskyi A.I. *Critical indices of quark-gluon bags with surface tension* / A.I. Ivanytskyi and K.A. Bugaev // In book of abstracts of Young Scientists Conference: IEP – 2011, Uzhgorod, Ukraine, P. 70.
12. Ivanytskyi A.I. *On possible existence of the non Fisher universality classes* / A.I. Ivanytskyi and K.A. Bugaev // In book of abstracts of III Young Scientists Conference: Modern Problems of Theoretical Physics – 2011, Kiev, Ukraine, P. 24.
13. Ivanytskyi A.I. *Scaling inequalities for the non-Fisher universality classes* / A.I. Ivanytskyi and K.A. Bugaev // In book of abstracts of IV Young Scientists Conference: Modern Problems of Theoretical Physics – 2012, Kiev, Ukraine, P. 31.

Іваницький О.І. Феноменологічні рівняння стану сильно взаємодіючої матерії з критичною точкою – 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, 2013.

Дисертація присвячена побудові феноменологічних рівнянь стану сильно взаємодіючої матерії на основі статистичних моделей, що розв'язуються точно. На основі даних моделей детально розроблено механізм генерації (три)критичної точки фазової діаграми КХД, який пов'язаний із зникненням коефіцієнту поверхневого натягу фізичних кластерів. Запропоновано схему одночасного визначення коефіцієнту поверхневого натягу кварк-глюонних мішків та критичної температури КХД за даними ґраткових симуляцій. Одержано явні аналітичні вирази для критичних показників моделі КГМ з поверхневим натягом у випадку критичної та трикритичної точок, що дозволяє безпосередньо фіксувати її параметри у відповідності до класу універсальності КХД. Безпосередньо продемонстровано можливість існування нефішерівських класів універсальності, для яких традиційні скейлінгові співвідношення порушено. Запропоновано узагальнення скейлінгових законів на випадок таких класів універсальності. Узагальнено аналітичні розв'язки моделі статистичної мультифрагментації ядер в скінченному об'ємі на випадок реалістичного рівняння стану ядерної рідини та досліджено вплив скінченності системи на фазову діаграму ядерної речовини.

Ключові слова: фазова діаграма сильно взаємодіючої речовини, рівняння стану, фазовий перехід типу рідина – пара, критичні показники.

Ivanytskyi O.I. Phenomenological equations of state of strongly interacting matter with critical endpoint – 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 National Academy of Sciences of Ukraine, Kyiv, 2013.

The thesis is devoted to the development of phenomenological equations of state of strongly interacting matter within exactly solvable statistical models. The mechanism of the QCD (tri)critical endpoint generation is worked out within these models. This mechanism is based on vanishing of the physical clusters surface tension. The scheme to simultaneously determine the quark-gluon bags surface tension coefficient and the QCD critical temperature from the lattice QCD data is proposed. Explicit analytical expressions for the critical exponents of quark-gluon bags with surface tension model with critical and tricritical endpoints are obtained. These expressions make possible to fix the parameters of the present model with respect to QCD universality class. It is explicitly demonstrated that the non-Fisher universality classes which violate the traditional scaling relations can exist. The generalized scaling laws valid for these universality classes are established. Analytical solutions of the statistical multifragmentation model in a finite volume are generalized for the case of realistic equation of state of nuclear liquid. The question on how the finiteness of the system affects the nuclear matter phase diagram is studied.

Key words: strongly interacting matter phase diagram, equation of state, liquid – gas phase transition, critical exponents.

Иваницкий А.И. Феноменологические уравнения состояния сильно-взаимодействующей материи с критической точкой – На правах рукописи.

Диссертация на соискание научной степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.02 – теоретическая физика. – Институт теоретической физики им. Н.Н. Боголюбова НАН Украины, Киев, 2013.

Диссертация посвящена построению феноменологических уравнений состояния сильно-взаимодействующей материи на основе точнорешаемых статистических моделей. Интерес к моделям данного типа обусловлен практической потребностью надёжно моделировать фазовую диаграмму КХД материи в широком диапазоне термодинамических параметров её состояния, что является невозможным в рамках методов, основанных на приближении среднего поля. При этом важным требованием является возможность генерации (три)критической точки с наперед заданными свойствами. Разработанный в рамках используемых в диссертации моделей механизм генерации (три)критической точки фазовой диаграммы КХД позволил удовлетворить это требование в полной мере. Он основан на смене знака коэффициента поверхностного натяжения физических кластеров в конечной точке фазового перехода первого рода, что приводит к неразличимости двух сосуществующих фаз. В случае КХД такими физическими кластерами являются адроны и кварк-глюонные мешки, состоящие из кварков и глюонов. Для определения их коэффициента поверхностного натяжения была разработана модель невзаимодействующих кварк-глюонных трубок, которые являются ничем иным, как цилиндрическими кварк-глюонными мешками. Их формирование является следствием флуктуаций формы неразрывной цветовой струны, соединяющей статическую кварк-антикварковую пару. Свободная энергия таких цветковых струн хорошо изучена в рамках решёточной КХД. Это позволило на основе соответствия между ансамблями поверхностных деформаций цилиндрического кварк-глюонного мешка и деформаций цветовой струны фиксированной длины выработать схему определения коэффициента поверхностного натяжения кварк-глюонных мешков по данным решёточных симуляций. Предложенная схема позволила определить температуру, при которой исчезает коэффициент поверхностного натяжения мешков. В исследуемых моделях эта величина совпадает с критической температурой КХД, что и обуславливает важность полученного результата. Кроме того, на основе данной модели были исследованы свойства коэффициента поверхностного натяжения мешков в области деконфайнмента цветковых степеней свободы. В результате было установлено, что данная величина с неизбежностью является отрицательной в области малых (нулевых) значений коэффициента натяжения цветовой струны. Учёт этого принципиального факта необходим для разработки корректной параметризации коэффициента поверхностного натяжения кварк-глюонных мешков, которая позволяет генерировать конечную точку фазового перехода деконфайнмента. Необходимо отметить, что используемый при этом механизм её генерации является весьма общим и поэтому может быть применён в рамках широкого круга моделей с фазовым переходом типа жидкость – пар. На основе разработанной параметризации коэффициента поверхностного натяжения было проведено тщательное моделирование фазовой диаграммы КХД в критическом регионе в рамках статистической модели кварк-глюонных мешков с

поверхностным натяжением. Значительное внимание было уделено изучению топологии кривых фазовых переходов в этой области. Основными наблюдаемыми в этом регионе величинами, которые определяют свойства и класс универсальности (три)критической точки, являются традиционные критические показатели. Они были аналитически найдены как для критической, так и для трикритической точек в рамках модели кварк-глюонных мешков с поверхностным натяжением. Явные выражения для них позволили зафиксировать параметры, а следовательно, и класс универсальности данной модели в соответствии со значениями критических индексов простых жидкостей, двух- и трёхмерных моделей Изинга, $O(2)$, $O(3)$ и $O(4)$ симметричных спиновых систем. Это является важным для практического моделирования класса универсальности КХД. Кроме того, аналитические выражения для найденных критических показателей позволили непосредственно проверить выполнение скейлинговых законов, которые традиционно играют значительную роль в теории критических явлений. Были найдены явные примеры нарушения указанных законов. В результате тщательного анализа было установлено, что это нарушение связано с некорректностью определения некоторых критических показателей. Для исправления скейлинговых соотношений, в соответствии с гипотезой М. Фишера, был вычислен альтернативно определённый критический индекс α'_s . Для придания данному анализу полноты были введены и непосредственно найдены новые индексы α'_c , α'_m , β^+ и β^- . Вследствие нарушения в общем случае скейлинговых неравенств Фишера и Гриффитса для любого определения индекса α' , был сделан вывод о возможном существовании новых нефисеровских классов универсальности, для которых традиционные скейлинговые законы являются нарушенными. Анализ причин такого нарушения позволил сформулировать обобщённые скейлинговые законы, справедливые для таких классов универсальности. Необходимо отметить, что они выполняются для всех известных физических систем и моделей. Важной частью данного исследования было изучение влияния конечности сильно-взаимодействующей системы на свойства её фазовой диаграммы, которое проводилось на основе модели статистической мультифрагментации ядер в конечном объёме. Аналитические решения данной модели были обобщены на случай реалистического уравнения состояния ядерной жидкости, которая характеризуется ненулевой сжимаемостью. Это позволило корректно описать свойства конечного ядерного вещества и построить аналог его фазовой диаграммы. Значительным преимуществом использованного метода изучения термодинамических свойств конечного вещества является универсальность, которая допускает его использование в разнообразных моделях кластерного типа, взаимодействие между физическими степенями которых аппроксимировано отталкиванием твёрдого ядра.

Ключевые слова: фазовая диаграмма сильно-взаимодействующего вещества, уравнение состояния, фазовый переход типа жидкость-пар, критические показатели.

Іваницький Олексій Ігорович

Феноменологічні рівняння стану сильновзаємодіючої матерії з критичною точкою.
(Автореферат дисертації на здобуття наукового ступеня кандидата фізико-математичних наук.)

Зам. – 9 Формат 60 x 84/16 Обл.-вид. арк. - 0.93

Підписано до друку 13.09.2013 р. Тираж 100 прим.

Поліграфічна дільниця ІТФ ім. М.М. Боголюбова НАН України,
03680, м. Київ, вул.. Метрологічна, 14-б