

ВІДГУК
офіційного опонента на дисертаційну роботу
Тарасова Олександра Миколайовича
«Узагальнений фермі-рідинний підхід в теорії надплинності ^3He і нейтронної
матерії з анізотропним триплетним спарюванням в сильних магнітних
полях»,
яка представлена на здобуття наукового ступеню доктора фізико-
математичних наук (спеціальність 01.04.02 – «теоретична фізика»)

Дисертаційна робота Тарасова О.М. присвячена теоретичному дослідженню фазових переходів і властивостей в стані статистичної рівноваги в надплинних фермі-рідинах з триплетним спарюванням електронейтральних ферміонів в сильних магнітних полях. В ній наведено подальший розвиток та застосування узагальненого фермі-рідинного методу для опису надплинних систем багатьох частинок з електромагнітною і ядерною взаємодіями - гелію-3 і нейтронної рідини - в сильних магнітних полях. Розрахунки проводилися аналітичними методами теоретичної і математичної фізики з використанням чисельних методів при розв'язанні деяких нелінійних інтегральних рівнянь.

Надплинні фази гелію-3 при ультранизьких температур і в магнітних полях поєднують в собі анізотропні надплинні, магнітні та рідкокристалічні властивості. Саме це робить об'єкт дослідження унікальним серед конденсованих речовин. У Всесвіті є аналогічні надплинні об'єкти, що складаються з електронейтральних фермі-частинок — нейтронів. Це нейтронні рідини в серцевинах нейтронних зірок, які мають сильне магнітне поле. *Дослідження* триплетної надплинності і магнетизму рідкого гелію-3 та нейтронних рідин суб'ядерних і над'ядерних густин є *актуальними* як для теоретичної фізики, так і для ядерної астрофізики і мають фундаментальне значення для висвітлення природи явищ в конденсованих речовинах зі спонтанно порушеними симетріями, і, зокрема, у надгустих фазах конденсованої матерії.

Актуальність досліджень, проведених в дисертації О.М. Тарасова, також підтверджується тим, що вони є складовою частиною низки науково-дослідних робіт і проектів, що виконувались в Інституті теоретичної фізики ім. О.І. Ахієзера національного наукового центру “Харківський фізико-технічний інститут” НАН України з 1993 по 2020 роки, а отримані дисертантом наукові результати за цей період часу опубліковані одноосібно в 49 роботах у вигляді статей в рейтингових журналах, доповідей та тез доповідей у матеріалах вітчизняних і міжнародних конференцій.

За змістом і структурою дисертаційна робота повністю відповідає вимогам до докторських дисертацій — її викладено на 329 сторінках друкованого тексту,

вона складається зі вступу, п'яти основних розділів, висновків, списку використаних джерел із 529 найменувань і двох додатків. У вступі, крім наведених даних про структуру дисертаційної роботи, обґрунтовано вибір теми дисертації та її актуальність, сформульовано мету і основні задачі дослідження, а також вказано теоретичні методи застосовані при розв'язанні цих задач, розкрита новизна, наукове, практичне і методичне значення отриманих результатів, відзначається вирішальний особистий внесок здобувача при виконанні та опублікуванні результатів дослідження. Наведено перелік вітчизняних та міжнародних конференцій і шкіл, на яких відбувалась апробація отриманих здобувачем результатів, а також викладено зв'язок виконаної роботи з науковими програмами, планами, темами і вказано про кількість публікацій.

В Розділі 1 на основі узагальненого фермі-рідинного підходу для надплинної фермі-рідини виведено інтегро-диференціальне рівняння для параметру порядку, яке справедливе при температурах близьких до температури фазового переходу з нормального в надплинний стан. На основі цього інтегро-диференціального рівняння отримані рівняння Гінзбурга-Ландау для параметра порядку надплинної фермі-рідини електронейтральних частинок з триплетним p -спарюванням (а саме, надплинних фаз рідкого ^3He). Отримані рівняння відповідають двом випадкам: у разі впливу на надплинну нерухому фермі-рідину помірно сильного магнітного поля, а також у відсутності магнітного поля, але за наявності однорідної течії нормальної компоненти надплинної фермі-рідини. За допомогою теорії збурень отримані рівняння Гінзбурга-Ландау з поправками до коефіцієнтів при градієнтах від параметра порядку. Як наслідок, з першого рівняння Гінзбурга - Ландау отримано уточнену формулу з новою додатковою нелінійною по полю поправкою для температури фазового переходу з надплинної фази $^3\text{He-A}$ в фазу $^3\text{He-B}$ в помірно сильному магнітному полі. Ця формула може бути перевірена на експерименті.

Розділ 2 є продовженням попереднього, але в ньому досліджується вся область температур, де існує надплинність з триплетним спарюванням, за наявності помірно сильного магнітного поля. В узагальненому фермі-рідинному підході вперше отримано загальні аналітичні вирази для аномальних і нормальних функцій розподілу квазічастинок у довільних фазах надплинної парамагнітної фермі-рідини, що складається з електронейтральних ферміонів з триплетним спарюванням у постійному однорідному магнітному полі і при наявності течії нормальної компоненти надплинної рідини. В другому параграфі розділу отримано систему нелінійних інтегральних рівнянь для компонент параметра порядку і ефективного магнітного поля з урахуванням двох обмінних фермі-рідинних амплітуд Ландау для анізотропної надплинної А-фази рідкого гелію-3 в помірно сильному магнітному полі. Цю складну систему рівнянь можна розв'язати наближено лише з використанням чисельних методів.

В другій частині дисертації, що складається з трьох розділів, для нейтронної рідини суб'ядерних і над'ядерних густин досліджуються рівноважні властивості надплинних фаз з триплетним спарюванням нейтронів в сильних магнітних полях, використовуючи в якості міжчастинкової взаємодії різні параметризації ефективних сил Скірма: традиційні (що містять лише один доданок залежний від густини нейтронів) і узагальнені параметризації сил Скірма з трьома доданками, що залежать від густини.

В Розділі 3 виведено систему нелінійних інтегральних рівнянь для ефективного магнітного поля і компонент параметра порядку надплинної нейтронної матерії з традиційними силами Скірма і зі спін-триплетним анізотропним p -спарюванням (подібним до спарювання в гелії- ^3He в магнітному полі). В результаті аналітичних розрахунків з цих рівнянь отримано наближені формули для температур фазових переходів в надплинній фазі A_1 і A_2 нейтронної матерії з анізотропним p -спарюванням нейтронів в магнітних полях і знайдено вид їх лінійної залежності від помірно сильного магнітного поля і нелінійної - від густини (в межах застосовності нерелятивістського підходу). Знайдено також явні залежності від густини для магнітної сприйнятливості нейтронної матерії в граничному випадку нульової температури. Показано, що у разі традиційних сил Скірма магнітна сприйнятливість надплинної нейтронної рідини прямує до нескінченності при наближенні густини до певного критичного значення, що, як правило, перевищує ядерну густину, і це свідчить про виникнення феромагнітної нестійкості в системі.

В Розділі 4 показано, що температурні залежності енергетичної щільності надплинної фермі-рідини типу гелію- ^3He поблизу нульової температури і в околі критичної температури обумовлені тільки симетрією параметра порядку і не залежать від природи взаємодій, які призводять до триплетного куперівського спарювання в системі. Але залежності від густини для температур фазових переходів і для енергетичної щільності в надплинній нейтронній матерії з узагальненими силами Скірма мають немонотонний «дзвоноподібний» профіль, чим істотно відрізняються від відповідних величин в надплинній A -фазі рідкого гелію- ^3He . Теоретично здобуто уточнені аналітичні вирази з додатковими поправками для питомої теплоємності надплинних нейтронної матерії та фермі-рідини типу гелію- ^3He з триплетним анізотропним p -спарюванням, які справедливі при температурах поблизу нульової температури і в околі критичної температури у відсутності магнітного поля. Характер ступеневої залежності питомої теплоємності від температури в надплинній фазі не залежить від взаємодії між ферміонами, а визначається типом їх анізотропного спарювання. Залежність питомої теплоємності від щільності частинок визначається параметрами взаємодії і істотно розрізняється для різних надплинних фермі-рідин.

В розділі 5 отримано загальні аналітичні наближені вирази для температур фазових переходів у надплинній нейтронній матерії з триплетним спарюванням типу гелію- ^3He , що лінійно залежать від магнітного поля і немонотонно від

густини надплинної нейтронної матерії з узагальненими ефективними силами Скірма: мають дзвоноподібний профіль залежності від густини числа частинок при кожному фіксованому значенні магнітного поля. Показано, що не тільки в нормальній, але і в надплинній нейтронній матерії з анізотропним триплетним p -спарюванням нейтронів подібним до спарювання в гелії-3А і з узагальненими параметризаціями сил Скірма, які містять додаткові складові залежні від густини числа нейтронів, усувається феромагнітна нестійкість, тобто магнітна сприйнятливість проявляє несингулярну залежність від густини при суб'ядерних і над'ядерних її значеннях.

Також в *Розділі 5* в результаті чисельного розв'язання системи двох нелінійних інтегральних рівнянь для компонент параметра порядку надплинної нейтронної матерії з узагальненою параметризацією сил Скірма встановлено, що в помірно сильних магнітних полях поблизу межі з сильними полями починає проявлятися не тільки слабка нелінійна залежність від магнітного поля величини розщеплення розв'язків для компонент параметра порядку надплинної нейтронної матерії з анізотропним p -спарюванням типу ${}^3\text{He-A}$, але це розщеплення розв'язків має також малу асиметрію, зростаючу слабо нелінійним чином з ростом поля.

Таким чином, дисертаційна робота О.М.Тарасова містить подальший розвиток та застосування узагальненого фермі-рідинного підходу для опису надплинних систем багатьох частинок: гелію-3 і нейтронної рідини в сильних магнітних полях. Дисертантом отримано суттєво нові та вагомі теоретичні результати, які з наукової точки зору мають фундаментальний характер. Дисертація відповідає спеціальності **01.04.02 — «теоретична фізика»**.

Достовірність та обґрунтованість результатів отриманих в дисертації забезпечено застосуванням загальноприйнятих та добре перевірених теоретичних методів статистичної фізики і квантової механіки, а також теорії конденсованого стану квантових макросистем зі спонтанно порушеними симетріями, та методів математичної фізики. Нові результати та висновки, здобуті в дисертації, перевірялися на відповідність відомим і апробованим результатам у граничних випадках.

Автореферат повністю відображає зміст і основи положення дисертаційної роботи.

Вважаю, що наукові результати і теоретичні розробки дисертаційної роботи Тарасова О.М. можуть бути використані при проведенні теоретичних робіт у Національному науковому центрі «Харківський фізико-технічний інститут» НАН України, Фізико-технічному інституті низьких температур ім. Б.І.Веркіна НАН України (м. Харків), Інституті радіофізики і електроніки ім. О.Я.Усикова НАН України (м. Харків), Інституті монокристалів НАН України (м. Харків), Інституті теоретичної фізики ім. М.М.Боголюбова НАН України (м. Київ), Радіоастрономічному інституті НАН України (м. Харків), Інституті фізики конденсованих систем НАН України (м. Львів), Харківському національному

університеті ім. В.Н. Каразіна МОН України, Київському національному університеті ім. Т. Шевченка та в інших наукових центрах і університетах в Україні та за її межами.

По змісту дисертації виникли наступні зауваження рекомендаційного характеру:

1) У перших двох розділах дисертації, присвячених теоретичному дослідженню надплинних фаз рідкого гелію-3 в магнітному полі, наведено основні положення узагальненого фермі-рідинного підходу з урахуванням впливу помірно сильного магнітного поля і розглянуто як область температур поблизу критичної температури фазового переходу з нормального у надплинний стан, так і загальний випадок довільних температур, при яких гелій-3 існує у надплинних фазах з триплетним спарюванням атомів ^3He . Було б цікаво також отримати рівняння Гінзбурга-Ландау, де б одночасно враховувався вплив як помірно сильного магнітного поля, так і швидкості нормальної компоненти.

2) Аналогічне побажання дослідити вплив ультрасильних магнітних полів на рівноважні властивості нейтронної рідини в надплинних фазах з триплетним спарюванням стосується і останнього 5-го розділу дисертації. В цьому розділі в результаті чисельного розв'язку нелінійних інтегральних рівнянь виявлено слабе відхилення від лінійної залежності в помірно сильних магнітних полях, що межують з ультрасильними, для температур фазових переходів нейтронної матерії з нормального стану в надплинну анізотропну фазу типу A_1 і потім в фазу A_2 з р-спарюванням нейтронів.

3) У Розділі 2 отримано систему нелінійних інтегральних рівнянь для компонент параметра порядку і ефективного магнітного поля з урахуванням двох обмінних фермі-рідинних амплітуд Ландау для анізотропної надплинної А-фази рідкого гелію-3 в помірно сильному магнітному полі. Здається логічним дослідити дану систему за допомогою чисельних методів, тим більш, що в Розділі 5 автором були проведені чисельні дослідження інтегральних рівнянь (для компонент параметра порядку в надплинній нейтронній матерії з узагальненими силами Скірма).

Наведені зауваження не зменшують наукову важливість отриманих результатів, а також загальну високу оцінку роботи. Дисертація якісно написана. Основні результати опубліковано у 18 статтях, більшість з яких у відомих фізичних журналах з кваліфікаційними Q1, Q2, Q3. Ці результати пройшли апробацію на більш ніж 20 міжнародних та вітчизняних конференціях. Особистий внесок дисертанта є визначальним, бо усі статті, доповіді та тези доповідей на конференціях і семінарах опубліковані одноосібно. Наукове значення та новизна отриманих результатів не викликають сумнівів, а опубліковані роботи повною мірою відображають зміст, висновки і особистий внесок автора дисертаційної

роботи. Дисертація О.М. Тарасова є закінченою науковою роботою, в ній отримано нові результати, які вирішують важливу наукову проблему теоретичної фізики: наведено подальший розвиток та застосування узагальненого нерелятивістського фермі-рідинного підходу для опису рівноважних властивостей надплинних фаз гелію-3 і щільної надплинної нейтронної матерії з триплетним спарюванням в помірно сильних магнітних полях.

Враховуючи актуальність обраної теми, наукову значимість і новизну отриманих результатів, достовірність і обґрунтованість висновків, вважаю, що дисертація «Узагальнений фермі-рідинний підхід в теорії надплинності ^3He і нейтронної матерії з анізотропним триплетним спарюванням в сильних магнітних полях» повністю задовольняє вимогам до докторських дисертацій, зокрема, п.п. 9,10,12,13 «Порядку присудження наукових ступенів», затвердженого Постановою Кабінету Міністрів України № 567 від 24.07.2013 р. (зі змінами, внесеними згідно з Постановами КМУ № 656 від 19.08.2015 р., № 1159 від 30.12.2015 р., № 567 від 27.07.2016 р.), а **автор дисертаційної роботи, Тарасов Олександр Миколайович, заслугоує присудження наукового ступеня доктора фізико-математичних наук за спеціальністю 01.04.02 – теоретична фізика.**

Офіційний опонент
доктор фізико-математичних наук,
старший науковий співробітник,
завідувач лабораторії чисельних методів
теоретичної фізики Фізико-технічного
інституту низьких температур
імені Б.І. Веркіна Національної
академії наук України

В.В. Славін

Підпис В.В. Славіна засвідчую.
Вчений секретар Фізико-технічного
інституту низьких температур імені
Б.І. Веркіна Національної академії
наук України,
кандидат фізико-математичних наук



О.М. Калиненко