

## ВІДГУК

офіційного опонента на дисертаційну роботу

**Тарасова Олександра Миколайовича**

" Узагальнений фермі-рідинний підхід в теорії надплинності  ${}^3\text{He}$  і нейтронної матерії з анізотропним триплетним спарюванням в сильних магнітних полях",  
яка представлена на здобуття наукового ступеню доктора фізико-математичних наук за спеціальністю **01.04.02 - «теоретична фізика»**

Дисертаційна робота Тарасова О. М. присвячена дослідженню рівноважних властивостей і фазових переходів у надплинних фермі-рідинах з триплетним спарюванням в  ${}^3\text{He}$  і в нейтронній рідині в ядрах нейтронних зірок в сильних магнітних полях.

Унікальність надплинних фаз  ${}^3\text{He}$  полягає в тому, що рідкий  ${}^3\text{He}$  є єдина на Землі фермі-рідина, яка складається з електронейтральних фермі-частинок і має при цьому незвичайну спін-триплетну надплинність. У Всесвіті аналогічним надплинним об'єктом, що складається з електронейтральних фермі-частинок, є надплинна нейтронна рідина, яка знаходиться всередині ядер (серцевин) нейтронних зірок. Декілька відсотків з усіх нейтронних зірок є так звані магнетарами - сильно намагніченими нейтронними зірками, які можуть проявляти себе як так звані аномальні рентгенівські пульсари та як джерела випромінювання м'яких гамма-сплесків. Вивчення різноманітних властивостей нейтронних зірок є важливою задачею в сучасній теоретичній та ядерній астрофізиці і вирішення цих задач має фундаментальне значення для висвітлення природи явищ, що відбуваються у надгустих фазах конденсованої адронної матерії. В цьому зв'язку дослідження властивостей надплинних фермі-рідинах з триплетним спарюванням в сильному магнітному полі на прикладі  ${}^3\text{He}$  і узагальнення розроблених теоретичних методів і підходів на випадок надплинної нейтронної матерії є **актуальною** задачею. Актуальність досліджень, які проведено в дисертаційній роботі Тарасова О. М., підтверджується також тим, що вони є складовою частиною науково-дослідних робіт (НДР), які виконувались в рамках відомчої тематики відділення ядерної фізики та енергетики НАН України, а саме, НДР "Теоретичні дослідження по проблемам статистичної механіки конденсованих систем і теорії поля" (термін виконання 2003 - 2005 рр.), НДР "Теоретичні дослідження по статистичній фізиці конденсованих середовищ зі спонтанно порушеною симетрією і газоподібних систем та теоретико-груповим методам у теорії поля" (термін виконання 2006 - 2010 рр.), НДР "Розвиток методів статистичної фізики та квантової теорії поля для дослідження проблем конденсованих і газоподібних середовищ та динаміки полів і суперсиметричних подовжених об'єктів" (термін виконання 2011 -

2015 рр.), НДР "Дослідження класичних і квантових симетрій у теоретико-польових та струнних моделях та проблем статистичної механіки конденсованих середовищ" (термін виконання 2016 - 2020 рр.).

Метою дисертаційного дослідження було вивчення в єдиному теоретичному підході рівноважних властивостей і фазових переходів в надплинних однокомпонентних фермі-рідинах, що складаються з електронейтральних ферміонів з міжчастинковими взаємодіями різної фізичної природи, а саме, в надплинних фазах рідкого  $^3\text{He}$  і в щільній нейтронній матерії з триплетним спарюванням в сильних магнітних полях.

Основним методом дослідження є розвинутий в даній дисертації напівфеноменологічний фермі-рідинний підхід, що узагальнює теорію нормальної фермі-рідини, розроблену Л.Д. Ландау, на випадок надплинних фермі-рідин.

Дисертація Тарасова О. М. повністю відповідає спеціальності 01.04.02 – теоретична фізика.

Дисертаційна робота складається з п'яти розділів. **Перший розділ** присвячено виведенню рівнянь Гінзбурга-Ландау для надплинної фермі-рідини електронейтральних частинок з триплетним спарюванням (надплинних фаз рідкого  $^3\text{He}$ ), які справедливі в області температур поблизу температури фазового переходу другого роду з нормального в надплинний стан в магнітному полі або при наявності течії нормальної компоненти надплинної рідини. З виведених рівнянь отримано залежності від магнітного поля температур фазових переходів з нормального стану до фази  $A_1$ , і з фази  $A_1$  до фази  $A_2$ . У **другому розділі** розглядається загальний випадок довільних температур, при яких існують надплинні фази  $^3\text{He}$  з триплетним спарюванням, при наявності магнітного поля. В цьому розділі в узагальненому фермі-рідинному підході отримано 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 магнітному полі і при наявності течії нормальної компоненти. Знайдена система рівнянь для компонент параметра порядку і загальний вираз для магнітної сприйнятливості таких фаз. **Третій розділ** присвячено дослідженню рівноважних властивостей надплинної нейтронної рідини з анізотропним спін-триплетним спарюванням нейтронів при наявності магнітного поля. Виведена система рівнянь для ефективного магнітного поля і компонент параметра порядку надплинної нейтронної матерії з триплетним анізотропним спарюванням  $A_1$  і  $A_2$  типів. Отримані аналітичні вирази для температур фазових переходів. Досліджена залежність цих температур від магнітного поля і густини нейтронної матерії. В **четвертому розділі** основну увагу приділено вивченню рівноважних властивостей густої

надплинної нейтронної матерії з узагальненою взаємодією Скірма, що містить три доданки залежні від густини (на відміну від єдиного члена залежного від густини в традиційних силах Скірма). Використання узагальнених параметризацій сил Скірма дозволило більш коректно описати властивості надплинної нейтронної матерії при ядерних і над'ядерних значеннях густини. П'ятий розділ присвячено аналізу аналітичними і чисельними методами залежності температур фазових переходів і магнітної сприйнятливості від магнітного поля і густини для надплинної нейтронної матерії з анізотропним триплетним р-спарюванням для узагальнених сил Скірма.

**Наукову новизну** дослідження визначають, насамперед наступні результати:

- знайдено нову нелінійну за магнітним полем поправку до коефіцієнту при просторових похідних від параметра порядку в рівнянні Гінзбурга-Ландау для надплинної  ${}^3\text{He}$  і здобуто уточнену (з додатковою нелінійною по полю поправкою) формулу для температури фазового переходу з надплинної фази А в фазу В в помірно сильному магнітному полі;
- отримано рівняння Гінзбурга-Ландау у разі триплетного р-спарювання при наявності течії нормальної компоненти надплинної фермі-рідини;
- для надплинної фази  ${}^3\text{He}$  в помірно сильному магнітному полі отримано систему нелінійних інтегральних рівнянь для компонент параметра порядку і ефективного магнітного поля з урахуванням двох обмінних амплітуд Ландау;
- виведено систему нелінійних інтегральних рівнянь для компонент параметра порядку і ефективного магнітного поля в щільній надплинній просторово однорідній нейтронній матерії з триплетним анізотропним р-спарюванням А типу для довільної параметризації сил Скірма;
- отримано загальні аналітичні вирази для температур фазових переходів просторово однорідної нейтронної матерії з довільною параметризацією сил Скірма в надплинні стани з триплетним р-спарюванням і показано, що температури фазових переходів лінійно залежать від магнітного поля і нелінійно - від густини числа нейтронів;
- для конкретних традиційних параметризацій сил Скірма отримано явні вирази для відношення парамагнітних сприйнятливостей ідеального фермі-газу нейтронів і надплинної нейтронної матерії, встановлено, що різниця температур фазових переходів густої нейтронної матерії з нормального стану в надплинний стан  $A_1$  типу, і з надплинного стану  $A_1$  типу в надплинний стан  $A_2$  типу, стає розбіжною при наближенні густини до певного критичного значення, і при цьому прямує до нескінченності парамагнітна сприйнятливість надплинної нейтронної матерії, що інтерпретується як фазовий перехід в феромагнітний

стан, який співіснує з анізотропною триплетною надплинністю;

- отримані аналітичні формули для питомої теплоємності надплинної нейтронної матерії і надплинної фермі-рідини з триплетним анізотропним р-спарюванням А типу і показано, що питома теплоємність містить додаткову поправку пропорційну  $T^5$ ;
- отримано аналітичні вирази для температур фазових переходів у надплинній нейтронній матерії з триплетним спарюванням А типу з узагальненими ефективними силами Скірма і встановлено, що температури переходів залежать лінійним чином від магнітного поля і немонотонним чином - від густини надплинної нейтронної матерії, тобто мають дзвоноподібний профіль залежності від густини при кожному фіксованому значенні магнітного поля;
- показано, що в надплинній нейтронній матерії з анізотропним триплетним р-спарюванням А типу і з узагальненими параметризаціями типів взаємодій Скірма магнітна сприйнятливості має несингулярну залежність від густини при суб'ядерних і над'ядерних її значеннях, і відсутній фазовий перехід у феромагнітний стан.

Результати, що представлені у дисертації, і її висновки є **обґрунтованими та достовірними**, оскільки вони отримані із застосуванням сучасних та добре апробованих методів теоретичної фізики, і аналітичні результати підтверджено чисельними розрахунками.

**Наукова і практична цінність** проведених досліджень полягає в тому, що вони виконані в єдиному теоретичному підході (узагальненому фермі-рідинному підході) і мають фундаментальний характер, їх результати можуть бути застосовані для подальшого розвитку статистичної фізики і теорії надплинних систем, розроблені методи можуть знайти застосування у суміжних областях, зокрема, у фізиці надпровідників та астрофізиці.

Наукові результати належним чином опубліковані у **18 одноосібних статтях** у фахових міжнародних і вітчизняних періодичних виданнях, а також пройшли апробацію на вітчизняних і міжнародних наукових конференціях загальною кількістю більше 20.

**Автореферат** повністю відображає зміст і основні положення дисертаційної роботи.

**До змісту дисертації є такі зауваження:**

1. В розділі 1 було б доцільним дослідити вплив течії нормальної компоненти надплинної фермі-рідини на її термодинамічні характеристики і пояснити фізичний механізм такого впливу.

2. В розділі 2, де мова йде про надплинний  $^3\text{He}$ , отримані рівняння для параметрів порядку. В подальших розділах вони застосовані для аналізу властивостей нейтронної матерії. Було б логічним також провести подібний аналіз саме для  $^3\text{He}$ .

3. Розвинутий в роботі узагальнений фермі-рідинний підхід розглядається як альтернатива

інших підходів до опису надплинних властивостей надплинної нейтронної матерії, насамперед, підходів, що базуються на формалізмі функцій Гріна. Було б доцільним більш детально порівняти результати, що отримані в розділах 3-5 в рамках узагальненого фермі-рідинного формалізму, з відомими результатами, одержаними при використанні інших підходів.

4. Дисертацію б прикрасило, якщо в ній було б обговорено астрофізичні маніфестації передбачених в розділах 3-5 нових ефектів.

Зазначені зауваження переважно можуть розглядатись як побажання на майбутнє і вони не знижують загальну високу оцінку роботи.

Дисертація Тарасова О. М. є завершеною науковою працею, в якій вирішено важливу задачу теоретичної фізики, а саме, розроблено узагальнений фермі-рідинний підхід до опису рівноважних властивостей надплинних фаз  ${}^3\text{He}$  і щільної надплинної нейтронної матерії з триплетним спарюванням в сильних магнітних полях.

Вважаю, що за актуальністю обраної теми, новизною та науковим значенням отриманих результатів, достовірністю і обґрунтованістю висновків дисертація "Узагальнений фермі-рідинний підхід в теорії надплинності  ${}^3\text{He}$  і нейтронної матерії з анізотропним триплетним спарюванням в сильних магнітних полях" задовольняє всім вимогам, які ставляться МОН України до докторських дисертацій, зокрема, пунктам 9, 10, 12 та 13 "Порядку присудження наукових ступенів", а її автор, Тарасов Олександр Миколайович, заслуговує на присудження йому наукового ступеня доктора фізико-математичних наук за спеціальністю 01.04.02 – теоретична фізика.

Офіційний опонент,  
доктор фізико-математичних наук,  
провідний науковий співробітник відділу  
теорії конденсованого стану речовини  
Інституту монокристалів НАН України



Філь Дмитро Вячеславович

Підпис д.ф.-м.н. Д.В.Філя засвідчую,  
учений секретар  
Інституту монокристалів НАН України  
кандидат фіз.-мат. наук



Кулик Костянтин Миколайович