

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
за спеціальністю 01.04.02 – «теоретична фізика»

В дисертації Тарасова О.М. теоретично досліджуються фазові переходи і рівноважні властивості надплинних фермі-рідин з триплетним спарюванням електронейтральних ферміонів в сильних магнітних полях. В ній розвивається та застосовується узагальнений фермі-рідинний підхід для теоретичного опису надплинних квантових рідин, а саме, гелію-3 і нейтронної рідини з міжчастинковими взаємодіями різної фізичної природи в сильних магнітних полях. Дослідження проводилися аналітичними методами теоретичної і математичної фізики.

Для низькотемпературних надплинних фаз гелію-3 в магнітних полях характерні анізотропні надплинні, магнітні та рідкокристалічні властивості, і це виділяє цю особливу квантову рідину серед інших конденсованих речовин. В галактиках Всесвіту і в нашій Галактиці, зокрема, є аналогічні надплинні об'єкти - це щільна нейтронна рідина в ядрах численних нейтронних зірок, які мають сильне магнітне поле. **Дослідження** триплетної надплинності і магнетизму рідкого гелію-3 та нейтронної рідини із суб'ядерними і над'ядерними густинами є **актуальними** не тільки для теоретичної фізики, але і для ядерної астрофізики і мають фундаментальне значення для висвітлення природи явищ в конденсованих речовинах зі спонтанно порушеними симетріями і у надгустих фазах конденсованої матерії.

Актуальність досліджень, проведених О.М. Тарасовим в дисертації, підтверджується також тим, що вони є складовою частиною 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 особисто (без співавторів) в 49 роботах: в статтях в рейтингових наукових журналах, доповідях та тезах доповідей у матеріалах вітчизняних і міжнародних конференцій.

Зміст і структура дисертаційної роботи повністю відповідають вимогам до докторських дисертацій: вона містить 329 сторінок друкованого тексту і складається зі вступу, п'яти основних розділів, висновків, списку використаних джерел із 529 найменувань і двох додатків. У **вступі** обґрунтовано вибір теми дисертації та її актуальність, сформульовано мету і основні задачі дослідження, вказано теоретичні методи, що застосовані при розв'язанні цих задач, розкрита новизна, наукове, практичне і методичне значення отриманих результатів, відзначено вирішальний особистий внесок здобувача при виконанні та опублікуванні результатів дослідження, а також міститься перелік вітчизняних та міжнародних конференцій, на яких апробовано отримані дисертантом результати, викладено зв'язок виконаної роботи з науковими програмами, планами, темами і вказана кількість публікацій.

У **розділі 1** виведено рівняння Гінзбурга - Ландау для параметра порядку надплинної фермі-рідини електронейтральних частинок з триплетним р-спарюванням (зокрема, для надплинних фаз рідкого ^3He), справедливі в області температур в околі температури фазового переходу з нормального в надплинний стан. Ці рівняння відповідають двом випадкам: у разі впливу помірно сильного магнітного поля на надплинну фермі-рідину в стані спокою і у відсутності магнітного поля, але за наявності однорідної течії нормальної компоненти над-

плинної фермі-рідини. Ці рівняння Гінзбурга - Ландау отримано за допомогою теорії збурень з урахуванням поправок до коефіцієнтів при градієнтних членах. 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. Цю уточнену формулу було б доцільно перевірити на експерименті.

Другий розділ має особливо важливе значення для всієї дисертації. Цей розділ присвячено розгляду загального випадку – дослідженню всієї області температур, де існує надплинність з триплетним спарюванням, за наявності впливу помірно сильного магнітного поля. В узагальненому фермі-рідинному підході отримано вперше аналітичні вирази для аномальних і нормальних функцій розподілу квазічастинок у довільних фазах надплинної парамагнітної фермі-рідини, що складається з електронейтральних ферміонів зі спін-триплетним спарюванням (коли спін куперівських пар ферміонів дорівнює одиниці, а орбітальний момент пари може приймати будь-яке непарне значення) у постійному однорідному магнітному полі з урахуванням обмінних фермі-рідинних взаємодій і за наявності течії нормальної компоненти надплинної рідини. Загальні результати другого розділу можуть слугувати теоретичною основою для опису різних конкретних фаз надплинної фермі-рідини з триплетним спарюванням в помірно сильному магнітному полі і знаходження для цих фаз різних термодинамічних функцій і магнітної сприйнятливості. Це може бути зроблено на основі отриманих здобувачем загальних формул для функцій розподілу квазічастинок і конкретної структури функціоналу енергії взаємодії квазічастинок надплинної фермі-рідини з дотриманням відповідних властивостей інваріантності цього функціоналу енергії щодо фазових перетворень, а також щодо обертань як в координатному (орбітальному), так і в спіновому просторах.

Друга частина дисертації складається з трьох розділів і присвячена теоретичному дослідженню рівноважних властивостей надплинних фаз нейтронної рідини суб'ядерних і над'ядерних густин з триплетним спарюванням нейтронів в сильних магнітних полях, використовуючи для опису міжчастинкової взаємодії різні параметризації ефективних сил Скірма: традиційні - лише з одним доданком, залежним від густини нейтронів, і узагальнені параметризації сил Скірма - з трьома доданками, що залежать від густини.

В **третьому розділі** на основі використання загальних результатів другого розділу виведено систему нелінійних інтегральних рівнянь для ефективного магнітного поля і компонент параметра порядку надплинної нейтронної матерії з традиційними силами Скірма і з триплетним анізотропним р-спарюванням, яке є подібним до спарювання в гелії- ^3He в магнітному полі. З цих рівнянь аналітичними методами отримано наближені формули для температур фазових переходів в надплинні фази A_1 і A_2 нейтронної матерії з анізотропним р-спарюванням в магнітних полях, знайдено вид їх лінійної залежності від помірно сильного магнітного поля і нелінійної - від густини. Крім цього, знайдено явні залежності від густини для магнітної сприйнятливості нейтронної матерії в граничному випадку нульової температури. Показано, що для традиційних сил Скірма магнітна сприйнятливість надплинної нейтронної рідини прямує до нескінченності при наближенні густини до деякого критичного значення, що, зазвичай, перевищує ядерну густину, і це свідчить про виникнення феромагнітної нестійкості в нейтронній рідині.

У **розділі 4** досліджено аналітичними методами рівноважні властивості надплинних фермі-рідин з анізотропним спін-триплетним р-спарюванням типу $^3\text{He-A}$ електронейтральних ферміонів (нейтронів або атомів ^3He) за відсутності магнітного поля при температурах як поблизу від нульової температури, так і в околі температури фазового переходу з нормальної в надплинну фазу. Основну увагу приділено вивченню рівноважних властивостей густої надплинної нейтронної матерії з узагальненою взаємодією Скірма, що містить три доданки залежні від густини. Використання саме узагальнених параметризацій сил Скірма дозволяє

більш коректно описувати властивості надплинної нейтронної матерії при ядерних і над'ядерних значеннях густини. У цьому ж **розділі 4** показано, що температурні залежності енергетичної щільності надплинної фермі-рідини типу гелію-3А обумовлені тільки симетрією параметра порядку і не залежать від природи взаємодій між ферміонами. А залежності від густини для температур фазових переходів і для енергетичної щільності в надплинній нейтронній матерії з узагальненими силами Скірма мають немонотонний, а саме, дзвоноподібний профіль, що суттєво відрізняє їх від відповідних величин в надплинній А-фазі рідкого гелію-3. Вперше теоретично виведено уточнені аналітичні вирази з новими додатковими температурними поправками для питомої теплоємності надплинних фермі-рідини типу гелію-3А і нейтронної матерії з триплетним анізотропним р-спарюванням, які справедливі при температурах поблизу нульової температури у відсутності магнітного поля. Характер степеневих залежностей питомої теплоємності від температури в надплинній фазі визначається типом анізотропного спарювання і не залежить від взаємодії між ферміонами. Залежність питомої теплоємності від щільності частинок визначається параметрами взаємодії і істотно розрізняється для різних надплинних фермі-рідин.

У **п'ятому розділі** виведено загальні наближені вирази для температур фазових переходів у надплинній нейтронній матерії з триплетним спарюванням типу гелію-3А, які 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 в надплинній нейтронній матерії з анізотропним триплетним р-спарюванням нейтронів подібним до спарювання в гелії-3А і з узагальненими параметризаціями сил Скірма усувається феромагнітна нестійкість: магнітна сприйнятливості проявляє несингулярну залежність від густини при суб'ядерних і над'ядерних її значеннях.

Таким чином, у дисертаційній роботі О.М. Тарасова наведено подальший розвиток та застосування узагальненого фермі-рідинного підходу для опису надплинних систем багатьох частинок - гелію-3 і нейтронної рідини - в сильних магнітних полях. Здобувачем отримано нові вагомі теоретичні результати, які мають фундаментальний характер. Дисертація **відповідає спеціальності 01.04.02 — «теоретична фізика»**.

Достовірність та обґрунтованість результатів здобутих 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, отримані дисертантом, перевірялися на відповідність відомим і апробованим результатам у граничних випадках.

Вважаю за доцільне ознайомити з теоретичними результатами і розробками дисертаційної роботи Тарасова О.М. фахівців у Національному науковому центрі «Харківський фізико-технічний інститут» НАН України, Інституті радіофізики і електроніки ім. О.Я. Усикова НАН України (м. Харків), Фізико-технічному інституті низьких температур ім. Б.І. Веркіна 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 університетах і наукових центрах в Україні та за її межами.

По змісту дисертації можна зробити такі **зауваження**:

1) В першій частині дисертації, що складається з розділів 1 і 2, досліджувались надплинні фази рідкого гелію-3 з триплетним спарюванням атомів ^3He в помірно сильних

магнітних полях в так званому узагальненому фермі-рідинному підході. Вважаю, що в якості продовження цієї тематики доцільно провести теоретичні дослідження можливих змін фазової діаграми надплинних анізотропних А-подібних фаз рідкого гелію-3 в сталих сильних магнітних полях, які в експерименті можуть досягати значень близьких до 100 Тесла.

2) Що стосується другої частини дисертації, яка присвячена дослідженню анізотропних надплинних фаз щільної нейтронної рідини з триплетним спарюванням нейтронів теж в «помірно» сильних магнітних полях, які в дисертації сягають величин близьких до 10^{17} Гс, то можна продовжити ці ж дослідження для полів принаймні ще на порядок сильніших, які можуть існувати всередині щільних ядер магнетарів – сильно намагнічених нейтронних зірок.

У цілому, зазначені зауваження мають рекомендаційний характер і не зменшують наукову важливість отриманих результатів, а також загальну високу оцінку роботи. Дисертація якісно написана. Основні результати опубліковано в 18 статтях, більшість з яких у вітчизняних та зарубіжних фізичних журналах з кваліфікаціями Q1, Q2, Q3 і апробовані на багатьох міжнародних конференціях. Особистий внесок дисертанта є беззаперечним, що підтверджується одноосібним авторством в усіх статтях і доповідях на конференціях і семінарах. Новизна та наукове значення здобутих результатів не викликають сумнівів, а опубліковані роботи й автореферат повно і вірно відображають зміст, висновки і особистий внесок автора дисертаційної роботи. Дисертація О.М. Тарасова є закінченою науковою роботою, в якій отримано нові науково обґрунтовані результати, що вирішують важливу наукову проблему теоретичної фізики, а саме: розвинуто та застосовано узагальнений нерелятивістський фермі-рідинний підхід для опису рівноважних властивостей надплинних фаз гелію-3 і щільної надплинної нейтронної матерії з триплетним спарюванням в сильних магнітних полях.

Враховуючи актуальність обраної теми, наукову значимість і новизну отриманих результатів, достовірність і обґрунтованість висновків, я 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 дисертації Тарасов Олександр Миколайович заслуговує на присудження наукового ступеня доктора фізико-математичних наук за спеціальністю 01.04.02 – теоретична фізика.

Офіційний опонент
доктор фізико-математичних наук,
професор, член-кореспондент НАН України,
головний науковий співробітник
відділу теоретичної фізики
Інституту радіофізики та електроніки
ім. О.Я. Усикова НАН України

В.О. Ямпольський

В.О. Ямпольський

Підпис головного наукового співробітника ІРЕ ім. О.Я. Усикова НАН України
В.О. Ямпольського засвідчую

Вчений секретар ІРЕ ім. О.Я. Усикова НАН України
кандидат фіз.-мат. наук



І.Є. Почаніна

І.Є. Почаніна