

«ЗАТВЕРДЖУЮ»

Т.в.о. директора Інституту ядерних досліджень
НАН України



«22» серпня 2025 р.

Володимир ТРИШИН

ВИСНОВОК

Інституту ядерних досліджень НАН України
про наукову новизну, теоретичне та практичне значення результатів
дисертації Шаульського Костянтина Андрійовича на тему:
«Квантові релятивістські методи опису ядерних процесів у компактних
зорях», поданої на здобуття ступеня доктора філософії
з галузі знань 10 Природничі науки
за спеціальності 104 Фізика та астрономія

Витяг

з протоколу № 5 засідання семінару відділу теорії ядерних процесів
від «05» серпня 2025 року

Присутні:

Голова засідання – заст. директора з наукової роботи ІЯД НАН України, зав. ВТЯП д.ф.-м.н. с.н.с. **В.В. Давидовський** (ВТЯП ІЯД); секретар семінару – к.ф.-м.н. н.с. **С.О. Омельченко** (ВТЯП ІЯД); директор ІЯД НАН України, академік НАН України д.ф.-м.н. с.н.с. **В.І. Слісенько**; зав. ВФВЕ ІЯД чл.-кор. НАН України, д.ф.-м.н., проф. **В.М. Пугач**; д.ф.-м.н. с.н.с. **С.М. Федоткін** (ВТЯ ІЯД); д.ф.-м.н. головн.н.с., проф. **О.І. Левон** (ВФВІ ІЯД); д.ф.-м.н. с.н.с. **О.Г. Магнер** (ВТЯ ІЯД); д.ф.-м.н. с.н.с. **С.П. Майданюк** (ВТЯП ІЯД); д.ф.-м.н. с.н.с. **В.В. Осташко** (ВФВЕ ІЯД); д.ф.-м.н. с.н.с. **О.Я. Дзюблик** (ВТФ ІЯД); д.ф.-м.н. с.н.с. **А.Д. Фурса** (ВТЯП ІЯД); докт. філос. с.н.с. **М.В. Романюк** (ВТЯП ІЯД); к.ф.-м.н. с.н.с. **Т.В. Обіход** (ВФВЕ ІЯД), к.ф.-м.н. с.н.с. **Д.В. Касперович** (ВФЛ ІЯД); зав. ВФЛ, к.ф.-м.н. с.н.с. **В.В. Кобичев** (ВФЛ ІЯД); к.ф.-м.н. с.н.с. **Г.П. Куртева** (ВТЯП ІЯД); к.ф.-м.н. с.н.с. **С.В. Лук'янов** (ВТЯ ІЯД); к.ф.-м.н. с.н.с. **А.І. Санжур** (ВТЯ ІЯД); к.ф.-м.н. с.н.с. **В.В. Улещенко** (ВФВІ ІЯД); к.ф.-м.н. с.н.с. **Є.В. Малий** (ВТФ ІЯД); к.ф.-м.н. с.н.с. **В.В. Михайловський** (ВТФ ІЯД); к.т.н. с.н.с. **М.Е. Долинська** (ВТЯП ІЯД); інж. **А. Улесєв**, тех. працівник **І. Ключєв**; м.н.с. **А. Подвіянюк**; асп. **Д. Коваленко**.

Серед присутніх 10 докторів наук і 12 кандидатів фізико-математичних наук та докторів філософії, з них 20 – фахівці із спеціальності, з якої виконано дисертацію.

Порядок денний:

Представлення та обговорення дисертаційного дослідження К.А. Шаульського на тему «Квантові релятивістські методи опису ядерних процесів у компактних зорях», поданої на здобуття ступеня доктора філософії з галузі знань 10 Природничі науки за спеціальністю 104 Фізика та астрономія.

Науковий керівник – доктор фізико-математичних наук, провідний науковий співробітник відділу теорії ядерних процесів Інституту ядерних досліджень НАН України Майданюк Сергій Петрович.

Дисертація виконувалась у відділі теорії ядерних процесів Інституту ядерних досліджень НАН України. Тема дисертації затверджена на засіданні вченої ради Інституту ядерних досліджень НАН України (протокол № 1 від 15.02.2022 р.).

Виступили:

Голова засідання заст. директора з наукової роботи д.ф.-м.н. с.н.с. **В.В. Давидовський** у своєму вступному слові проінформував присутніх про те, що аспірант К.А. Шаульський звернувся з письмовою заявою про проведення попередньої перевірки та наукової експертизи його дисертаційної роботи, оскільки він за час свого навчання в аспірантурі ІЯД НАН України з 1 листопада 2021 р. повністю виконав освітню складову програми підготовки докторів філософії за спеціальністю 104 Фізика та астрономія, провів власне наукове дослідження та оформив свою дисертацію.

Здобувач надав увесь необхідний комплект документів, а саме: рукопис дисертації (електронну копію), копії публікацій, витяг із екзаменаційної відомості про виконання освітньо-наукової програми (освітню компоненту підготовки виконано у повному обсязі (усього 54 кредити) та успішно пройдено усі проміжні атестації наукової роботи), довідку про оригінальність дисертації (плагіату в тексті дисертації не виявлено, дисертаційна робота є оригінальною за своїм науковим змістом) та позитивний висновок наукового керівника про готовність дисертації до офіційного представлення.

Далі здобувач **К.А. Шаульський** представив наукову доповідь за основними положеннями дисертації «Квантові релятивістські методи опису ядерних процесів у компактних зорях», яку подано на здобуття ступеня доктора філософії за спеціальністю 104 Фізика та астрономія.

Після закінчення презентації учасники засідання поставили такі запитання доповідачу:

Голова засідання заст. директора з наукової роботи д.ф.-м.н. с.н.с. В.В. Давидовський: Ви розглядали такі складні об'єкти як компактні зорі і звичайно Ви використовували певний модельний підхід для представлення таких масивних космічних об'єктів. Скажіть, будь ласка, те що вони щільні і ядра розташовані близько одні до одного, це зрозуміло, а от такі параметри як потужні магнітні поля, які можуть бути в цих космічних об'єктах, чи сильне обертання, воно, у Ваших моделях якимось чином враховувалося, чи це, скажімо так, завдання на перспективу?

К.А. Шаульський: Дякую за запитання. Ні, в цих моделях ні обертання, ні вплив магнітних полів не враховувалися. В третьому розділі, що в рівнянні Лейна-Емдена, що в рівнянні Толмена-Оппенгеймера-Волкова ніяким чином не враховують магнітні поля чи обертання, і в модель іншим чином це не включалося.

К.ф.-м.н. с.н.с. В.В. Кобичев: Хотів би уточнити, у дуже гарячих нейтронних зорях мабуть також є внесок у рівняння стану від електрон-позитронних пар. Чи було враховано саме це для дуже гарячих зір: внесок у політропу народження електрон-позитронних пар?

К.А. Шаульський: Ні, це не було враховано.

Докт. філос. с.н.с. М.В. Романюк: Треба більше часу приділити результатам дослідження і поменше часу на вступ. 1. Питання з приводу терміну «пикноядерні реакції». Наскільки цей термін прийнятий в Україні? Чи зустрічався цей термін в українській мові? 2. На слайді 7 у Вас зустрічається фраза «вперше можливо порахувати». Що це мається на увазі? Чи це вперше було пораховано, чи дає змогу вперше порахувати? 3. Підписи до таблиць, рисунків та нумерація. Взагалі по першому розділу часто використовується слово «енергія». Енергія чого, наприклад слайд 19? 4. Скоротити слайд 22 та в загальному покращити візуалізацію результатів.

К.А. Шаульський: Дякую за питання. В даному випадку це практично транслітерація з англійської мови слова «русноuclear», де «русно» з грецької мови означає «щільний». Я особисто в роботах українською мовою цей термін ще не зустрічав.

Стосовно 7 слайду, вкралася описка: замінити на «вперше пораховано», що краще відображає суть.

Конкретно по 19 слайду це розглядається процес розсіяння одного ізотопу карбона на потенціальному бар'єрі іншого, та розраховується енергія квазіз'язаного стану двох ізотопів карбону після тунелювання через бар'єр.

Дякую за побажання, це все буде враховано.

К.ф.-м.н. с.н.с. В.В. Улещенко: 1. Наскільки важливо показувати оці 10 знаків після коми в розрахунках? По-перше, це важко сприймається, а по-друге, при порівнянні з попередніми розрахунками зробленими іншими людьми, наскільки важливими є ці всі знаки після коми? 2. Для розрахунку гальмівного розсіяння на дейтроні ви врахували адіабатичну модель. При цьому розраховуєте для пучка півтора GeV в системі центра-мас. Скажіть, наскільки застосовна адіабатична модель за таких енергій? 3. У висновках написано, що особистий внесок полягає в модифікації методу багаторазових внутрішніх відбиттів. Можете конкретизувати цю модифікацію? Це стосується кількості розбиттів за допомогою методу БВВ, чисельно? 4. Ви вивчаєте вплив середовища на гальмівне випромінювання. Який є шанс спостерігати гальмівне випромінювання в спектрі компактних зір? 5. Метод багаторазових внутрішніх відбиттів, порівняно з попередніми методами, які базувалися на ВКБ, показав редукцію ймовірності злиття в 1,89 рази. Це універсальний результат для багатьох ядер, чи для конкретної пари ядер? Чи можна вважати, що згідно з методом БВВ є загальний висновок про швидкості пікноядерних реакцій?

К.А. Шаульський: Дякую за питання. При розрахунках методом багаторазових внутрішніх відбиттів є тест через суму модулів амплітуд яка повинна дорівнювати одиниці. Сам алгоритм дає похибку лише в 13-14 знаці після коми при перевірці. Я погоджуюся, що при порівнянні з попередніми розрахунками можна обмежитися двома-трьома знаками після коми.

Всі розрахунки дійсно проводилися із застосуванням адіабатичної моделі, хоч вона і не виконується для таких енергій.

Дійсно, модифікації самого методу багаторазових внутрішніх відбиттів не було. Справа, скоріше, про перше застосування методу для розрахунку коефіцієнтів проникності та відбиття для пікноядерних реакцій в компактних зорях, для відповідних потенціалів та відстанях між ядрами.

Питання про спектри варто було б передати до астрономів, але в першу чергу спектри зір – то лінії поглинання та випромінювання з елементів на поверхні зорі чи в просторі між нами та зорею, які дискретні за своєю природою, на відміну від спектру гальмівного випромінювання. Який конкретно внесок гальмівного

випромінювання в загальний спектр може бути, та як його виділити, не було оцінено в даному дослідженні.

Редукція швидкостей пікноядерних реакцій була розрахована для 12 ізотопу карбону.

К.ф.-м.н. н.с. С.О. Омельченко: Коментар щодо пікноядерних реакцій: наскільки я розумію, вони є низькотемпературними реакціями злиття за рахунок тунелювання. Щодо назви «Квантові релятивістські методи опису ядерних процесів у компактних зорях». Компактні зорі, в загальному розумінні, білі карлики та нейтронні зорі. У Вас в роботі розглядається в основному ядра карбону, а в нейтронних зорях їх наявність досить умовна. Може варто цей момент деталізувати?

К.А. Шаульський: Дякую за питання, дійсно, є такий момент. Як було сказано в доповіді, вибір саме на ці ізотопи пав тому, що пікноядерні реакції для них вже були пораховані і була основа для порівняння.

К.ф.-м.н. с.н.с. Є.В. Малий: Я так розумію, що компактні зірки мають параметри, які можна зафіксувати спостереженнями. Наскільки ця модель в дослідженні відтворює такі властивості компактних зір, як маса, радіус, світність, температура?

К.А. Шаульський: Дякую за питання. В дослідженні використовувалися прийняті моделі компактних зір, і як тут було наведено на слайді, по густинам, розмірам і масам ці розраховані параметри збігаються зі спостережуваними. Як наведено на слайді, тут маси розрахованих нейтронних зір не перевищують півтори сонячних, що збігається зі спостереженнями. Тож з цими параметрами повний порядок.

Д.ф.-м.н. с.н.с. В.В. Осташко: 1. Покажіть, будь ласка, 41 слайд. Друге рівняння. У вас $F = -(F \cdot r)$. Це можна взяти як девіз до Вашої роботи. 2. На 44 слайді у Вас була густина в степені. Ви ж коли підносити величину, Ви підносити розмірність в степінь, чи ні? 3. Ви досліджуєте зорі, які там кристалічні ґратки в зорях?

К.А. Шаульський: Дякую за питання, але в цьому рядку зазначено дві формули, а не одну: в одній визначено F через потенціал, а в другій – потенціал виражено через F . Тобто, зазначена у питанні помилка не має місця.

Стосовно густини в степені, в формулі також присутній коефіцієнт K , який визначається для кожного політропного рівняння і з розмірностями там повний порядок.

За сучасними уявленнями при утворенні компактних зір – білих карликів та нейтронних зір – на кінці життєвого циклу зорі головної послідовності можуть залишити по собі такі компактні об'єкти, в будові яких є кристалічні структури.

Дякую за питання.

Після питань/відповідей виступив **рецензент** дисертаційної роботи Магнер О.Г., який наголосив на позитивних аспектах дослідження та висловив свої побажання та зауваження.

Д.ф.-м.н. с.н.с. О.Г. Магнер: Перш за все, я хотів сказати, що дисертація присвячена актуальним проблемам ядерної фізики і ядерної астрофізики. Дуже цікаві розглядаються реакції злиття легких ядер в компактних зорях, розглядається також їх рух на прикладі протон-дейтронних процесів і вплив зіркового середовища на ці процеси.

Я скажу так, що мені два перші розділи більше подобаються ніж третій, але треба прийняти до уваги, що в третьому розділі розглядаються дуже складні процеси. Досі немає ясного розуміння, як теорію побудувати. Більше того, не існує експериментальних даних для конкретних структур, щоб була така підказка, яка дозволила би побудувати теорію. Тому я спокійно дивлюся на третій розділ, і спробую знайти найбільш цікаві моменти.

Тепер я перейду конкретно до зауважень до дисертації. Перш за все, важко уявити, як можна звести процеси зіткнень частинок в компактних зірках до одновимірних радіальних багаторазових процесів відбиття, навіть в білих карликах з малою густиною речовини в середині. Здається, що треба врахувати двох і трьох вимірні статистично усереднені зіткнення. Є, наприклад, тривимірна напівкласична теорія.

Друге, в роботі використовується газове рівняння стану політропи, та класичне наближення Лейна-Емдена, відоме як наближення слабкої гравітації, але чому воно розглядається всередині компактної зорі. На мій погляд, це наближення має обмежену область використання, тому що слабка гравітація має місце на великих відстанях від гравітуючої маси, а не всередині. Крім того, наприклад, нейтронні зірки більше нагадують краплину щільної рідини (або аморфного твердого тіла), а не газ частинок. Нейтронна зоря, це не газ нейтронів, як було сказано. Ця система щільна і густина там більше густини ядерної матерії, і це все може доводити з експериментальних даних для макроскопічних величин. Я тут рекомендую нашу роботу.

Є також багато дрібних зауважень. В формулі (2.13) – приведена маса нуклона. Ще на рисунку 2.4 є червоний пік у випадку кластерної моделі. Так це помилки

чисельних розрахунків, чи проблеми кластерної моделі? Справа логарифмічний масштаб, зліва простий, там не видно нічого. Яюсь так, трошки, не зрозуміло це, тому що для оболонкової моделі там немає розбіжностей між лівим та правим рисунком.

Важливо таке зауваження, що рівняння ТОВ не враховує значні ефекти поверхні нейтронних зір. Враховується краплина рідини, а не газ. Я би порекомендував подивитися нашу роботу, яка вже прийнята до публікації в Nuclear Physics A.

Я думаю, що не треба в висновках писати про нову мікроскопічну модель, тому що не існує мікроскопічної моделі ні білих карликів, ні нейтронних зір. Можливо писати про нову напівмікроскопічну модель.

Хочу додати, що ці зауваження не впливають на загальні позитивні враження від дисертації. Дисертація виконана на високому професійному рівні, добре опублікована в журналах світового рівня. Я думаю, що ці всі, на мій погляд, вимоги до дисертації виконані, і я рекомендую цю дисертацію до захисту і бажаю успіхів.

Далі виступив **рецензент** дисертаційної роботи Улещенко В.В., який наголосив на позитивних аспектах дослідження та висловив свої побажання та зауваження.

К.ф.-м.н. с.н.с. В.В. Улещенко: Якщо можна, я навпаки почну відразу від висновків, через те що в питаннях я вже критику навів. Очевидно, що я рекомендую цю роботу до захисту. Робота повністю відповідає критеріям до дисертаційної роботи доктора філософії. Я хотів би уточнити суто з формальної точки чи відповідає обсяг основного тексту дисертації (а він займає приблизно, не більше дев'яноста сторінок) чинним вимогам. Крім того, на що варто звернути увагу, на скільки критично зараз наявність саме міжнародних конференцій. Всі результати, представлені в дисертації, опубліковані в дуже рейтингових журналах і всі представлені на конференціях. Але, на жаль, ні одна конференція не має статусу міжнародної.

Не скажу, що я так ретельно вчитувався, але проглянув роботу і вона на мене справила враження. Робота виконана на високому рівні, є вагомі результати. Правдою є те, що основним результатом роботи є розрахунки. Розрахунки виконані, і виконані на високому рівні. Те, що вони застосовуються до області, яка є практично переднім фронтом науки, де ці моделі може і не завжди застосовні, але там невідомо, що інше можна застосувати. Передній фронт науки – складна фізика, моделі можуть бути складні, часто-густо невідомо які там моделі застосовуються, через те застосовуємо, що можемо. Те, що застосовано, застосовано достатньо

якісно. Виконано великий об'єм розрахунків, через те рівню доктора філософії робота відповідає.

Мої зауваження такі самі як і у Олександра Григоровича. Треба більше обговорень про те, що ми тут застосовуємо і підкреслити те, що ніхто нічого кращого ще не застосовував. Застосовуємо, що можемо, і це як перші кроки, а потім буде видно. Коли розраховуємо щось, що ефект проявиться при 150 MeV енергії зіткнення, а при цьому кажемо, що застосовуємо до компактних зір, які вважаємо холодними об'єктами в декілька тисяч кельвінів. От це достатньо відобразити в висновках і доповіді. На якість результатів це не впливає, рівня доктора філософії це заслуговує. Дякую за увагу.

Голова засідання заст. директора з наукової роботи д.ф.-м.н. с.н.с. В.В. Давидовський: Дякую Вам. Я коротко прокоментую лише перші два зауваження стосовно обсягу дисертації і конференцій. Так, дійсно у нас встановлено (нашим положенням про присудження ступеня доктора філософії) мінімальний обсяг основної частини дисертації – 3,5 авторських аркуші. Один аркуш це приблизно 22 сторінки 14 шрифтом з полуторним інтервалом. І я порахував, у Костянтина десь приблизно, за винятком тих сторінок, де лише рисунки (вони не враховуються), 84 сторінки. Тобто, формально він перевищив цей мінімальний обсяг основної частини дисертації, який встановлений нашим положенням (приблизно 77 сторінок). А щодо другого зауваження стосовно представлення на міжнародних конференціях, немає такої вимоги до конференцій, щоб вони обов'язково були міжнародними, але, звісно, хто ж заперечує, що було б більш солідно представити свої результати на міжнародних конференціях. Так що, з формальної точки зору і згідно з вимогами сучасного законодавства до обсягу і апробації дисертації дисертація відповідає сучасним вимогам. Стосовно інших Ваших зауважень, Костянтин їх врахує в тексті і в подальших доповідях.

Далі слово було надано науковому керівнику – д.ф.-м.н. с.н.с. **Майданюку С.П.**

Науковий керівник: Я скажу, що я дуже радий, що Костянтин зміг подолати цей попередній шлях, дійти до цього семінару. На мій погляд, йому кинуто було такий величезний обсяг матеріалу теоретичного, що за такий час, декілька років, це практично неможливо для людини. Він вчився швидко. Я раніше розробляв метод багаторазових внутрішніх відбиттів, десь років двадцять тому. Потім я зрозумів, що краще його навчити найбільш його яскравим перевагам цього методу. Потім я подумав, що цього недостатньо і підключив людей з легендарного відділу інституту

теоретичної фізики, де працював раніше Г.Ф. Філіппов. Віктор Семенович Василевський нам допомагав, навчив і мене і Костянтина розрахункам. Багато чого ми не викладали ще в публікаціях, щось викладено в дисертації, але матеріалу значно більше. Як я оцінюю, практично неможливо сходу оволодіти цим усім. Наприклад, рівняння Фадєєва, метод резонансних груп.

Більше того, я так бачу, багато людей навіть бояться застосовувати дуже потужні власні розробки до компактних зір, дуже цікавих об'єктів, які існують в космосі. Наприклад, шукати нові екзотичні види матерії, щось інше. Через постійну регулярну критику один одного, вони навіть дуже довго це не пробували.

Але ми спробували це, я спробував на прикладі свого першого аспіранта. Я бачу, що ми дуже вдало увійшли в нову для нас галузь, я маю на увазі компактні зорі. Авжеж, я дуже хотів би, щоб це було позитивним напрямком в захисті, Костянтин знайшов своє місце в науці. Авжеж, можна багато чого казати про зауваження, але це я пропущу на цьому етапі.

В принципі все нормально, викладено методи на загальних уявленнях людей, які з цим працюють. На мій погляд, дисертація на дуже гарному рівні викладена. Якщо буде можливість, буде запрошено багато закордонних груп. На мій погляд, у Костянтина можуть бути дуже широкі наукові перспективи. В мене все, дякую.

Голова засідання заст. директора з наукової роботи д.ф.-м.н. с.н.с. В.В. Давидовський: Дякую, Сергій Петрович. Зрозуміло. Ви дуже позитивно оцінили свого аспіранта. Тепер, власне, ми переходимо до обговорення наукової новизни, теоретичного та практичного значення. Шановні колеги, будь ласка, Ви можете висловити, якщо можна коротко, свою думку взагалі про аспіранта, про результати, про дисертаційну роботу.

Ми отримали, по-перше, в цілому дві позитивні реакції від рецензентів. З іншого боку, ми почули позитивну оцінку наукового керівника. Ми бачимо, що дисертація, і скажу Вам, що я особисто за цим слідкую, відповідає всім формальним вимогам. Стосовно публікацій, вимагається мінімум три умовні публікації, але оскільки у дисертанта 4 публікації в журналах першого-другого квартиля, які рахуються як дві умовні публікації, і одна публікація у журналі Q4, яка рахується як одна умовна публікація, загальна кількість умовних публікацій дорівнює 9. Рівень журналів, в яких опубліковано основні результати дисертаційної роботи, є дуже високим. Цю дисертаційну роботу я за останні декілька місяців вичитував десь тричі, роблячи певні зауваження, звісно окрім тих, які опрацьовували разом науковий керівник і аспірант. І хочу сказати, що ми на цей семінар випустили роботу, яку дійсно приємно тримати в руках, вона є закінченим науковим продуктом. В

мене особисто враження про дисертацію є виключно позитивним: дійсно, зрозуміло які задачі було поставлено, які результати були досягнуті. Тому я пропоную підтримати позитивний висновок щодо наукової новизни і теоретичного значення роботи, які як раз на відповідному слайді були підсумовані Костянтином під час його доповіді.

К.ф.-м.н. н.с. С.О. Омельченко: Теж, дуже підтримую Костянтина Андрійовича. Методи досліджень унікальні, оригінальні. Наприклад, цей метод багаторазових внутрішніх відбиттів для дослідження пікноядерних реакцій злиття, тобто тих, що ідуть виключно за рахунок тунелювання в умовах стиснутих систем і низьких температур, якими є компактні зорі, використовується виключно цією дослідницькою групою і має великі перспективи. Я знаю, що при коректному виборі параметрів можна було одержати високу точність. Наприклад, якщо в дослідницькій зоні обрати більше тисячі сходинок, то тоді похибка апроксимаційна (не систематична) менша за десятку відсотка. Дуже перспективна робота, обома руками підтримую, дуже дякую за доповідь, дуже цікаво.

Голова засідання заст. директора з наукової роботи д.ф.-м.н. с.н.с. В.В. Давидовський: Дякую, Сергію. Я бачу, Тетяна Обіход піднімала руку. Будь ласка, Тетяно.

К.ф.-м.н. с.н.с. Т.В. Обіход: Так, я також знайома з доповідачем, майбутнім, я маю надію, доктором філософії. Він проходив у мене курс суперсиметрії та супергравітації, правда, трошки в скороченому режимі, але ми з ним зустрічалися довгенько, відносно. Повинна сказати, що він дисциплінований, по-перше. По-друге, швидко матеріал розуміє, складний навіть на рівні математики і базові речі розуміє, орієнтується сучасні, теоретичні. По-друге, що мені сподобалося, він займається питаннями, які мають велике майбутнє, оскільки сучасна фізика обов'язково перетинається з космологією, астрофізикою, і тут велике майбутнє щодо і теоретичного підходу, і експерименту. Той же самий chiral-J експеримент і ті ж самі експерименти VIRGO, LIGO і так далі, які відкрили злиття чорних дір і гравітаційні хвилі. Звичайно у нього апарат більш такий класичний, традиційний, ядерно-фізичний, але задача цікава і це дуже добре, що людина прагне до нових відкриттів і щось навіть порахував та співставив. Це дуже добре, я також підтримую та бажаю успіхів в майбутній науковій роботі.

Голова засідання заст. директора з наукової роботи д.ф.-м.н. с.н.с. В.В. Давидовський: Дякую за Вашу думку. Якщо більше бажаючих виступити немає, то, зважаючи на відповідність дисертації встановленим вимогам, а також враховуючи гарно представлену доповідь за результатами дисертаційної роботи, висловлені позитивні оцінки рецензентів і присутніх на семінарі, я можу поставити

на голосування позитивний висновок щодо наукової новизни, теоретичного і практичного значення представленої дисертаційної роботи, яким, зокрема, дисертація Шаульського Костянтина Андрійовича рекомендується до захисту. Прошу голосувати.

В результаті підрахунку голосів відкритого голосування рішення прийнято одноголосно!

Отже, враховуючи висловлену підтримку від обох рецензентів, наукового керівника, голови та учасників засідання, голова засідання підсумував результати обговорення та аналізу дисертаційного дослідження Костянтина Шаульського, тим, щоб видати на цьому розширеному семінарі висновок про наукову новизну, теоретичне та практичне значення результатів дисертації К.А. Шаульського з позитивною оцінкою, а саму дисертацію рекомендувати до захисту.

ВИСНОВОК

Про наукову новизну, теоретичне та практичне значення результатів дисертації Шаульського Костянтина Андрійовича на тему «Квантові релятивістські методи опису ядерних процесів у компактних зорях», поданої на здобуття ступеня доктора філософії за спеціальністю 104 Фізика та астрономія

Обґрунтування вибору теми дослідження. Основною темою наукового дослідження є розробка нових моделей для опису процесів, що відбуваються між атомними ядрами в компактних зорях. Компактні зорі – білі карлики та нейтронні зорі – є природними лабораторіями, де атомні ядра перебувають у екстремальних умовах. Дослідження атомних ядер в таких умовах є перспективним напрямком, про що свідчить велика кількість наукових публікацій в найбільш престижних журналах.

Вже розроблено багато моделей для опису структури атомних ядер у екстремальних умовах всередині зір. Так, вже побудовано багатонуклонні та кластерні об'єднані теорії ядра та ядерних реакцій, оболонкові моделі, колективні моделі, релятивістські теорії середнього поля (RMF), *Ab initio calculations theory*, методи КХД опису ядер, кваркові моделі (кварк-мезонні моделі, потенціальні моделі).

Метою роботи є розробка нових моделей, які були б суто квантово-механічними і не використовували методи теорії збурень чи числових методів, які потребують наявності суперкомп'ютерів. Перспективним є метод багаторазових внутрішніх відбиттів, який дозволяє рахувати коефіцієнти проникності бар'єрів при

тунелюванні частинок за низьких енергій – за яких напівкласичні методи перестають працювати. А також розроблена модель дозволяє порахувати ймовірності утворення складених ядер та відповідні енергії.

Розроблені моделі на основі методу багаторазових внутрішніх відбиттів дозволять порахувати квантові ефекти, такі як: проникність бар'єрів при тунелюванні при пікноядерних реакціях, отримати оцінку швидкостей пікноядерних реакцій, що все ще є джерелом дискурсу.

Гальмівне випромінювання є ще одним джерелом інформації про ядерні сили в атомних ядрах. Експериментальні дані про гальмівне випромінювання, що супроводжує різні процеси, є потужним інструментом для дослідження структури атомних ядер та властивостей ядерних сил. Моделі, розроблені для опису гальмівного випромінювання, яке супроводжує процеси досліджувані в земних лабораторіях, можливо адаптувати під умови всередині компактних зір. Подібна модифікація дозволяє оцінити вплив середовища зір на процеси та гальмівне випромінювання, що їх супроводжує.

Мета і завдання дослідження. Метою є створення квантових моделей для опису ядерних процесів у компактних зорях та їх дослідження. В дисертаційній роботі досліджуються пікноядерні реакції в кристалічних ґратках нейтронних зір та гальмівне випромінювання, що супроводжує процеси розсіяння протона на дейтроні та нуклонів на атомних ядрах в середовищі компактних зір.

Відповідно до мети дослідження були поставлені такі завдання:

1. сформулювати робочі гіпотези дослідження ядерних процесів в компактних зорях та способи їх опису за допомогою нових квантово-механічних моделей;
2. розробити теоретичну модель опису пікноядерних реакцій в середовищі компактних зір на основі методу багаторазових внутрішніх відбиттів; розрахувати коефіцієнти проникності бар'єра та швидкості пікноядерних реакцій; розрахувати ймовірності утворення складених ядер; порівняти отримані результати з попередніми оцінками;
3. розробити теоретичну модель опису процесу розсіяння протона на дейтроні та дослідити гальмівне випромінювання, що супроводжує даний процес; включити параметр, що описує дейтрон, в модель; дослідити вплив цього параметра на спектр гальмівного випромінювання;
4. розробити теоретичну модель опису атомних ядер, поміщених в щільне середовище компактних зір; дослідити гальмівне випромінювання в процесах розсіяння нуклонів на атомних ядрах в цих умовах; оцінити

вплив густини середовища компактних зір на гальмівне випромінювання.

Об'єкт дослідження. Взаємодії нуклонів та атомних ядер в середовищі компактних зір, квантові ефекти, що виникають при цих взаємодіях та методи їх опису. Компактні зорі. Пікноядерні реакції в щільному середовищі компактних зір. Гальмівне випромінювання, що супроводжує процеси розсіяння нуклонів на атомних ядрах в середовищі компактних зір.

Предмет дослідження. Теоретичні моделі, що описують взаємодію атомних ядер та нуклонів в середовищі компактних зір. Моделі опису гальмівного випромінювання, що супроводжують різні процеси розсіяння нуклонів на атомних ядрах в середовищі компактних зір.

Методи дослідження.

У роботі використано методи емпіричного та теоретичного рівня дослідження. Головним методом є моделювання взаємодій атомних ядер в середовищі компактних зір. Моделювання ґрунтується на розв'язку задачі Шредінгера для атомних ядер в середовищі компактної зорі.

Для задачі з пікноядерними реакціями використовується метод багаторазових внутрішніх відбиттів, що є одним з методів розв'язку задачі тунелювання через бар'єр.

Для моделювання процесів в задачах з гальмівним випромінюванням використовується дво- та три-кластерні методи, а також модель деформованих осциляторних оболонок. Гальмівне випромінювання описується оператором народження гальмівного фотона під час процесу розсіяння частинок, що мають електричний заряд, електричний та магнітний моменти.

Для чисельних розрахунків за побудованими моделями використовується метод скінченних елементів. Результати розрахунків перевіряються за допомогою використання тестів математичного апарату квантової механіки, а де це можливо -- шляхом порівняння з наявними експериментальними даними.

Наукова новизна дослідження полягає в оригінальному підході та базується на таких основних положеннях:

Вперше застосовано метод багаторазових внутрішніх відбиттів для опису пікноядерних реакцій між ізотопами карбону в кристалічних ґратках компактних зір. Розроблена модель дозволяє рахувати швидкості пікноядерних реакцій за енергій, раніше недосяжних для формалізмів на основі квазікласичних наближень ($E \leq 3,5$ MeV), бо побудована модель на основі методу багаторазових внутрішніх відбиттів дозволяє врахувати квантові потоки у внутрішній області потенціалу.

Розроблено нову модель випромінювання гальмівних фотонів при розсіянні протона на дейтроні при енергіях відносного руху між протоном та дейтроном від нульових до 1,0 GeV (що відповідає максимальній енергії пучка дейтронів 1,5 GeV). Вперше такий процес досліджено у кластерному підході в описі розсіяння, а саме розроблено дво- та три-кластерний варіанти моделі. Виявлено, що переріз гальмівного випромінювання має залежність від параметрів кластерної моделі, що вперше дозволяє вивчати структуру дейтрона на основі аналізу перерізів гальмівного випромінювання у такому розсіянні. А саме, модель дозволяє визначити значення осциляторної довжини – параметра, що відповідає за будову дейтрона, — з аналізу спектрів гальмівного випромінювання. Модель застосовано до аналізу наявних експериментальних даних випромінювання, які отримано на циклотроні Університету Індіана у Блумінгтоні, США (cyclotron at the Indiana University Cyclotron Facility, IUCF) при енергії пучка дейтронів 145 MeV.

Розроблено нову мікроскопічну модель, що описує властивості парно-парних атомних ядер в щільному середовищі компактних зір – білих карликів та нейтронних зір. Формалізм побудовано шляхом модифікації моделі деформованих осциляторних оболонок, яка дозволяє швидко розрахувати енергію зв'язку атомних ядер, їх деформації та розміри. Новим елементом моделі є механізм, розроблений на основі політропного рівняння стану для виродженого електронного та нейтронного газу, що дозволяє описати вплив зоряного середовища на ядро у мікроскопічному підході.

Теоретичне значення.

Теоретичне значення розробленої моделі для пікноядерних реакцій полягає в можливості врахувати квантові потоки у внутрішній області потенціалу, які не доступні для квазікласичних методів через обмеження ВКБ-наближень. Формалізм застосовний для більшого діапазону енергій взаємодіючих ядер в кристалічних ґратках компактних зір.

Значення розробленої моделі дейтрона і його взаємодії в процесі розсіяння протона на дейтроні полягає в можливості дослідити вплив параметрів моделі на процес та на гальмівне випромінювання, що його супроводжує. Порівнюючи експериментальні дані з перерізами гальмівного випромінювання з розрахунками по моделі, є можливість уточнити модель дейтрона.

Теоретичне значення моделі атомних ядер в щільному середовищі компактних зір полягає в можливості розрахувати властивості атомних ядер в такому середовищі без необхідності використовувати складні чисельні наближення та розрахунки.

Особистий внесок здобувача.

За період виконання дисертаційної роботи здобувач розробив та проаналізував модель пікноядерних реакцій в кристалічних ґратках компактних зір на основі методу багаторазових внутрішніх відбиттів. Згідно з розрахунками на основі моделі, оцінка швидкостей пікноядерних реакцій зменшилася в $\approx 1,893$ рази в порівнянні з попередніми методами на основі квазікласичних формалізмів. Також здобувачем вперше отримано ймовірності утворення складеного ядра при реакціях злиття ізотопів карбону ${}^X\text{C} + {}^X\text{C}$, де $X = 10, 12, 14, 16, 18, 20, 22, 24$. Розрахунки показали, що можна очікувати синтез ізотопів магнію в реакціях ${}^{10}\text{C} + {}^{10}\text{C}$, ${}^{12}\text{C} + {}^{12}\text{C}$ та ${}^{24}\text{C} + {}^{24}\text{C}$, адже саме в цих реакціях енергія утвореного квазізв'язаного менша за висоту бар'єра.

Здобувач розрахував переріз гальмівного випромінювання в реакції розсіяння протона на дейтроні. Було розроблено формалізм на основі дво- та три-кластерної моделей, за допомогою якого розраховано спектри гальмівного випромінювання в процесі $p + d$. Аналіз показав вплив параметрів моделі (осциляторної довжини b , яка описує будову дейтрона) на розраховані спектри гальмівного випромінювання. Чутливість спектрів збільшується зі збільшенням енергії пучка. Модель застосовано до аналізу наявних експериментальних даних випромінювання, які отримано на циклотроні Університету Індіана у Блумінгтоні, США (cyclotron at the Indiana University Cyclotron Facility, IUCF) при енергії пучка дейтронів 145 MeV.

Здобувач розробив мікроскопічну модель опису атомних ядер в щільному середовищі компактних зір на основі моделі деформованих осциляторних оболонок. Розрахунки за моделлю показали, що енергія зв'язку атомних ядер зменшується з зануренням в матерію нейтронної зорі. Було досліджено процеси розсіяння нуклонів на ядрах в щільному середовищі білих карликів та нейтронних зір. Розрахунки на основі моделі показали суттєвий вплив матерії нейтронної зорі на інтенсивність гальмівного випромінювання, що супроводжує дані процеси.

Апробація результатів дослідження.

Результати дослідження було виголошено здобувачем дисертації на таких наукових конференціях (семінарах):

1. С.П. Майданюк, **К.А. Шаульський**, Спектроскопія пікноядерних реакцій у компактних зорях, XXIX Щорічна наукова конференція Інституту ядерних досліджень НАН України: тези доповідей (Київ, 26-30 вересня 2022 року). - Київ: Інститут ядерних досліджень НАН України, 2022. - 236 с. - С 28.
2. **К.А. Шаульський**, С.П. Майданюк, В.С. Василевський, Гальмівне випромінювання у протон-дейтронному розсіянні та нуклон-нуклонні сили, XXX Щорічна наукова конференція Інституту ядерних досліджень

- НАН України: тези доповідей (Київ, 25-29 вересня 2023 року). - Київ: Інститут ядерних досліджень НАН України, 2023. - 246 с. - С 43.
3. **Kostiantyn Shaulskyi**, Sergei Maydanyuk, Victor Vasilevsky, Bremsstrahlung emission in proton-deuteron scattering and nucleon-nucleon forces}, XIV Conference of Young Scientists "Problems of Theoretical Physics": Book of Abstracts (Kyiv, January 16-17, 2024). - Kyiv: Bogolyubov Institute for Theoretical Physics, 2024. - 24 p. - P 15.
 4. **К.А. Шаульський**, С.П. Майданюк, В.С. Василевський, Дослідження структури дейтрона з аналізу гальмівного випромінювання при протон-дейтронному розсіянні в кластерних моделях, XXXI Щорічна наукова конференція Інституту ядерних досліджень НАН України: тези доповідей (Київ, 27-31 травня 2024 року). - Київ: Інститут ядерних досліджень НАН України, 2024. - 223 с. - С 50.
 5. **К.А. Шаульський**, С.П. Майданюк, Гальмівне випромінювання в нуклон-ядерних реакціях у компактних зорях, XXXII Щорічна наукова конференція Інституту ядерних досліджень НАН України: тези доповідей (Київ, 26-30 травня 2025 року). - Київ: Інститут ядерних досліджень НАН України, 2025. - 209 с. - С 43.

Публікації. За результатами дослідження опубліковано 5 наукових праць: 1 стаття, опублікована у науковому фаховому виданні України (категорія А, також індексується у Scopus та Web of Science Core Collection); 4 статті у закордонних фахових виданнях першого та другого квартилів, проіндексованих в базі даних Scopus та Web of Science Core Collection.

Список опублікованих праць за темою дисертації

Статті у наукових фахових виданнях України:

1. **К.А. Шаульський**, С.П. Майданюк, Квантові ефекти пікноядерних реакцій у компактних зорях: нові квазізв'язані стани та спектроскопія, Nucl. Phys. At. Energy 24(2), 93 (2023), DOI: <https://doi.org/10.15407/jnpae2023.02.093> (Q4)

Статті в іноземних виданнях:

2. S.P. Maydanyuk, **K.A. Shaulskyi**, Quantum design in study of pycno-nuclear reactions in compact stars, Eur. Phys. J. 58, 220 (2022), DOI: <https://doi.org/10.1140/epja/s10050-022-00870-z> (Q2)
3. S.P. Maydanyuk, G. Wolf, **K.A. Shaulskyi**, Synthesis of elements in compact stars in pycnonuclear reactions with Carbon isotopes: Quasibound states versus states of zero-points vibrations, Universe, 9(8), 354 (2023), DOI: <https://doi.org/10.3390/universe9080354> (Q1)

4. **K.A. Shaulskyi**, S.P. Maydanyuk, and V.S. Vasilevsky, Structure of the deuteron from an analysis of bremsstrahlung emission in proton-deuteron scattering in cluster models, Phys. Rev. C 110, 034001 (2024), DOI: <https://doi.org/10.1103/PhysRevC.110.034001> (Q1)
5. Sergei P. Maydanyuk, Ju-Jun Xie and **Kostiantyn A. Shaulskyi**, Bremsstrahlung emission from nucleon-nucleus reactions in dense medium of compact stars, Chinese Phys. C 49, 044105 (2025), DOI: <https://doi.org/10.1088/1674-1137/ada377> (Q1)

Структура та обсяг дисертації.

Дисертаційне дослідження складається зі вступу, трьох розділів, висновків – основна частина, списку використаних джерел, одного додатку, подяки; загальний обсяг дисертації – 111 сторінок, з них 87 сторінок – основна частина, містить 30 рисунків, 7 таблиць, список використаних джерел складається з 76 найменувань вітчизняних та зарубіжних авторів (9 сторінок).

Характеристика особистості здобувача.

Дисертант має високу кваліфікацію в галузі фізики, математики, застосуванні програмних методів, володіє декількома мовами програмування, достатньо вільно володіє англійською мовою.

Оцінка мови та стилю дисертації.

Дисертація виконана фаховою українською мовою, текстове подання матеріалу відповідає стилю науково-дослідної літератури.

Рецензенти рекомендують: відповідно до п.15 Порядку присудження ступеня доктора філософії та скасування рішення разової вченої ради закладу вищої освіти, наукової установи про присудження ступеня доктора філософії, затвердженого постановою Кабінету Міністрів України від 12 січня 2022 р. №44, *пропонується такий склад разової ради:*

Голова ради:

Олег Анатолійович Понкратенко, завідувач відділу фізики важких іонів, ІЯД НАН України, член-кореспондент НАН України, доктор фіз.-мат. наук, с.н.с.

Рецензенти:

Олександр Григорович Магнер, провідний науковий співробітник відділу теорії ядра ІЯД НАН України, доктор фіз.-мат. наук, с.н.с.

Володимир Васильович Улещенко, старший науковий співробітник відділу фізики важких іонів ІЯД НАН України, канд. фіз.-мат. наук, с.н.с.

Офіційні опоненти:

Юлія Анатоліївна Лашко, завідувач лабораторії структури атомних ядер ІТФ ім. М.М. Боголюбова НАН України, доктор фіз.-мат. наук

Олександр Миколайович Горбаченко, науковий співробітник НДЛ «Ядерної спектроскопії», кафедра ядерної фізики та високих енергій фізичного факультету Київського національного університету імені Тараса Шевченка, канд. фіз.-мат. наук

У результаті попередньої експертизи дисертації Шаульського Костянтина Андрійовича і повноти публікації основних результатів дослідження

УХВАЛЕНО:

1. Затвердити цей висновок про наукову новизну, теоретичне та практичне значення результатів дисертації Шаульського Костянтина Андрійовича на тему: «Квантові релятивістські методи опису ядерних процесів у компактних зорях».

2. Констатувати, що за актуальністю, ступенем наукової новизни, обґрунтованістю, науковою та практичною цінністю здобутих результатів дисертація Шаульського Костянтина Андрійовича відповідає спеціальності 104 Фізика та астрономія та вимогам **Порядку підготовки здобувачів вищої освіти ступеня доктора філософії та доктора наук у закладах вищої освіти (наукових установах)**, затвердженого постановою Кабінету Міністрів України від 23 березня 2016 р. № 261, пп. 6, 7, 8 **Порядку присудження ступеня доктора філософії та скасування рішення разової спеціалізованої вченої ради закладу вищої освіти, наукової установи про присудження ступеня доктора філософії**, затвердженого постановою Кабінету Міністрів України від 12 січня 2022 р. № 44.

3. Рекомендувати дисертацію Шаульського Костянтина Андрійовича на тему: «Квантові релятивістські методи опису ядерних процесів у компактних зорях» до захисту на здобуття ступеня доктора філософії у разовій спеціалізованій вченій раді за спеціальністю 104 Фізика та астрономія.

4. Рекомендувати вченій раді Інституту ядерних досліджень затвердити склад разової спеціалізованої вченої ради:

Голова ради

Олег Анатолійович Понкратенко, завідувач відділу фізики важких іонів, ІЯД НАН України, член-кореспондент НАН України, доктор фіз.-мат. наук, с.н.с.

Рецензенти:

Олександр Григорович Магнер, провідний науковий співробітник відділу теорії ядра ІЯД НАН України, доктор фіз.-мат. наук, с.н.с.

Володимир Васильович Улещенко, старший науковий співробітник відділу фізики важких іонів ІЯД НАН України, канд. фіз.-мат. наук, с.н.с.

Офіційні опоненти:

Юлія Анатоліївна Лашко, завідувач лабораторії структури атомних ядер ІТФ ім. М.М. Боголюбова НАН України, доктор фіз.-мат. наук

Олександр Миколайович Горбаченко, науковий співробітник НДЛ «Ядерної спектроскопії», кафедра ядерної фізики та високих енергій фізичного факультету Київського національного університету імені Тараса Шевченка, канд. фіз.-мат. наук

Результати голосування щодо рекомендації до захисту дисертації Шаульського Костянтина Андрійовича:

«За» – 26

«Проти» – немає

«Утримались» – немає

Презентація Шаульського Костянтина Андрійовича на 58 стор. додається.

Голова семінару

заст. директора з наукової роботи
ІЯД НАН України д.ф.-м.н., с.н.с.



Володимир ДАВИДОВСЬКИЙ

Секретар семінару

к.ф.-м.н., н.с.

Сергій ОМЕЛЬЧЕНКО

Т.в.о. ученого секретаря

ІЯД НАН України

Павло ПОРИЦЬКИЙ