

ВІДГУК

офіційного опонента на дисертаційну роботу

Коппа Михайла Йосиповича

«Генерація нелінійних структур в гідродинамічних середовищах під впливом зовнішніх полів»,

яка представлена на здобуття наукового ступеня доктора фізико-математичних наук за спеціальністю 01.04.02 - «теоретична фізика»

У реальних умовах гідродинамічні системи мають складну природу. До таких систем належать багатокomпонентна плазма, рідини в пористих середовищах зі складною геометрією, нанорідини з високою теплопровідністю, активні середовища з мікроорганізмами або саморухомими частинками. В усіх цих середовищах виникають нелінійні просторово-часові структури, які відіграють ключову роль у динаміці систем. Однак, у багатьох випадках існуючі лінійні або спрощені моделі не здатні повноцінно описати механізми їх виникнення, стійкості та взаємодії з зовнішніми полями. Це створює запит на розробку узагальнених підходів, які враховують нелінійні ефекти. Варто відзначити, що дисертація торкається проблеми формування великомасштабних вихрових та магнітних структур, що є надзвичайно важливою темою для сучасної астрофізики, фізики плазми та нелінійної гідродинаміки. Враховуючи зростаючий інтерес до керованого структуроутворення у складних середовищах, тема дисертаційної роботи є **актуальною**, своєчасною та науково обґрунтованою. Вона відповідає ключовим напрямам сучасної фізики та має важливе значення для подальшого розвитку теоретичних і прикладних досліджень у галузі складних гідродинамічних систем.

Треба зазначити, що **актуальність** проведених у дисертації Коппа М.Й. досліджень підтверджується тим, що вони виконані в рамках наукових державних програм та проєктів, які виконувались в Інституті монокристалів

Національної академії наук України: «Визначення фундаментальних закономірностей поведінки дефектних структур у мезо- та наносистемах і встановлення електромагнітних властивостей двовимірних кристалів, гетероструктур та метаматеріалів на їх основі» (шифр «НАНОДЕФЕКТ», номер держреєстрації 0116U001182, термін виконання 2016-2018 рр.); «Оптичні властивості кристалічних наноструктурних, дефектних матеріалів» (шифр «НАНОКЛАСТЕР», номер держреєстрації 0119U100673, термін виконання 2019-2021 рр.); «Дослідження фундаментальних властивостей наноструктурованих систем та середовищ» (шифр «НАНОСТРУКТУРА», номер держреєстрації 0122U001499, термін виконання 2022-2024 рр.).

Дисертація Коппа М.Й. складається з шести розділів, кожен із яких містить огляд літератури та оригінальні результати.

У першому розділі розглядаються теоретичні аспекти проблеми виникнення великомасштабних вихрових структур у середовищах, що обертаються, внаслідок впливу дрібномасштабних зовнішніх сил. Дрібномасштабна сила є джерелом дрібномасштабних пульсацій швидкості (турбулентності). Для аналізу процесів на різних просторово-часових масштабах застосовано багатомасштабний асимптотичний підхід. Важливо відзначити, що у нестисливій турбулентній рідині навіть спіральна турбулентність не здатна створювати вихрове динамо, оскільки необхідні додаткові умови порушення симетрії. Як показано в цьому розділі, обертання з постійною кутовою швидкістю є таким фактором порушення симетрії в напруженнях Рейнольдса. На основі цього факту була побудована теорія нелінійного вихрового динамо в однорідній в'язкій рідині, що обертається, з врахуванням впливу дрібномасштабної спіральної і неспіральної зовнішньої сили. Визначено, що причиною генерації великомасштабних структур є присутність сили Коріоліса та зовнішнього впливу дрібномасштабної сили, що викликає нестійкість типу α -ефекту. Особливо цікавим є встановлення

геометричних обмежень для генерації великомасштабних вихрових структур: доведено, що для неспіральної зовнішньої сили необхідною умовою розвитку нестійкості є відхилення осі обертання від вертикального напрямку, що унеможливорює генерацію на полюсах і робить її найефективнішою в екваторіальній зоні. Цей результат має важливе значення для розуміння геофізичних процесів. Встановлено, що облік ефектів стратифікації (температурний підігрів і конденсаційне тепловиділення) призводить до істотного посилення великомасштабних вихрових полів, а також отримано критерії генерації залежно від параметрів обертання та стратифікації. Виявлено принципово новий ефект генерації великомасштабних вихрових структур у нанорідинах без градієнта температури, зумовлений збільшенням концентрації наночастинок. Встановлено можливість контролю процесу генерації через зміну частоти параметричного впливу зовнішньої сили. Отримано нові класи локалізованих стаціонарних структур, включаючи спіральні кінки, нелінійні хвилі Бельтрамі та кінки з профілем швидкості у вигляді перегину, які виявлено як в однорідних, так і в стратифікованих середовищах.

У другому розділі розроблено самоузгоджену нелінійну теорію магніто-вихрового динамо в середовищах, що обертаються, під дією зовнішньої дрібномасштабної сили. Особливо цікавим є встановлення дуального механізму генерації на лінійній стадії: показано, що вихрові структури генеруються через нестійкість гідродинамічного (ГД) α -ефекту, а магнітні структури — через нестійкість магнітогідродинамічного (МГД) α -ефекту. Обидва типи нестійкостей зумовлені спільною дією дрібномасштабної зовнішньої сили та сили Коріоліса, що демонструє фундаментальну роль обертання у процесах динамо. Принципово важливим є висновок про те, що за відсутності дрібномасштабної спіральності магнітного поля генерація великомасштабних вихрових структур (ВВС) і великомасштабних магнітних полів (ВМП) відбувається незалежно одна від одної. Встановлено нетривіальний ефект

впливу зовнішнього магнітного поля: «слабке» зовнішнє магнітне поле не перешкоджає генерації великомасштабних збурень, а «сильне» — пригнічує їх. При цьому за наявності зовнішнього поля темпи зростання вихрових і магнітних великомасштабних збурень збігаються. Особливу увагу заслуговують результати, отримані в рамках електронної магнітогідродинаміки (ЕМГД). Отримано рівняння нелінійного вихрового та магнітного динамо в температурно-стратифікованій, повністю іонізованій плазмі за наявності похилого зовнішнього магнітного поля та постійного гравітаційного поля. В результаті лінеаризації отриманих нелінійних рівнянь, виявлено нову великомасштабну нестійкість типу α -ефекту, що виникає в плоскому шарі температурно-стратифікованої плазми під дією зовнішнього однорідного магнітного поля, нахиленого відносно шару, у поєднанні з дрібномасштабною зовнішньою силою з нульовою спіральністю. Тут ключовим фізичним механізмом є зовнішнє постійне магнітне поле, яке порушує симетрію в напруженнях Рейнольдса. Принципово важливим є нахил магнітного поля, що веде до генерації вихрових полів навіть у випадку неспіральної дрібномасштабної сили — це суттєво розширює умови виникнення α -ефекту в плазмі, порівняно з чисто гідродинамічними системами. Встановлено новий ефект, пов'язаний із впливом «замагніченої» складової теплової сили, відомої як ефект Нернста, на генерацію великомасштабних вихрових і магнітних збурень. Зі збільшенням параметра Нернста швидкість розвитку великомасштабної нестійкості зменшується. Цей результат має важливе значення для розуміння динаміки магнітних полів у астрофізичних плазмових об'єктах. Отримано стаціонарні розв'язки рівнянь вихрового та магнітного динамо у вигляді локалізованих структур типу нелінійних хвиль Бельтрамі. Ці структури представляють стабільні стаціонарні стани, до яких еволюціонує плазмова динамо-система, забезпечуючи самоорганізацію магнітних і вихрових полів.

У третьому розділі досліджено магнітну конвекцію в шарі

електропровідної рідини, що неоднорідно обертається. Тут було отримано низку цікавих результатів та ефектів. Розроблено лінійну теорію конвективної нестійкості для тонкого шару електропровідної рідини з неоднорідним обертанням в однорідному вертикальному магнітному полі. Виявлено принципово важливий ефект впливу знаку числа Россбі на конвективну стійкість: для профілів неоднорідного обертання з від'ємними числами Россбі $Ro < 0$ пороги стаціонарної та коливальної конвективної нестійкості (мінімальні критичні числа Релея) значно знижуються. Фізично це означає, що від'ємні профілі обертання створюють умови для розвитку зсувної нестійкості, яка додатково дестабілізує систему і стимулює початок конвекції навіть за менших температурних градієнтів. Встановлено нетривіальний ефект асиметрії тепло переносу: для профілів обертання з позитивними числами Россбі $Ro > 0$ інтенсивність теплоперенесення збільшується за час встановлення стаціонарного рівня теплопередачі. Особливо цікавим є отримання нової динамічної системи нелінійних рівнянь у 6D фазовому просторі, за допомогою якої чисельними методами доведено хаотичну поведінку магнітного поля та його інверсії. Хаос виникає внаслідок нелінійної взаємодії між конвективними рухами, магнітним полем і обертанням, що призводить до складної динаміки з випадковими змінами полярності магнітного поля. Проведено порівняльний аналіз впливу різних типів модуляції на тепло перенос: встановлено, що найбільший внесок робить ефект модуляції обертання, оскільки зміна сили Коріоліса безпосередньо впливає на структуру конвективних течій; ефект модуляції сили тяжіння дещо перевищує ефект модуляції магнітного поля, що пояснюється тим, що гравітаційна нестійкість є первинним механізмом конвекції; найменший внесок дає модуляція температури, бо вона діє лише на граничні умови. Така особливість ефектів має важливе значення для практичних застосувань у системах контролю теплопереносу. Виявлено можливість ефективного контролю тепло- та масопереносу через гравітаційну модуляцію,

нерівномірне обертання та різниці у об'ємній концентрації наночастинок на межах шару. Наночастинки змінюють теплофізичні властивості рідини (теплопровідність, в'язкість, теплоємність), а їх концентраційні градієнти створюють додаткові рушійні сили для конвекції. Отримано нові типи магніт оберткової нестійкості в шарі нанорідини за відсутності градієнта температури при спільному впливі струму Холла та аксіального магнітного поля. Ефект Холла виникає внаслідок відхилення носіїв заряду силою Лоренца, що створює поперечний електричний струм, приводячи до анізотропії провідності нанорідини. Встановлено дуальний характер впливу параметра струму Холла: збільшення цього параметра може як затримати (через додаткову магнітну дисипацію), так і підсилити (через модифіковану анізотропію провідності нанорідини) розвиток конвективної нестійкості.

Четвертий розділ присвячено дослідженню теплової конвекції в електропровідних середовищах, що обертаються, під впливом спірального магнітного поля. Цей розділ розкриває нові аспекти магнітоконвективних процесів у складних геометріях магнітного поля. Встановлено фундаментальний результат: пороги стаціонарної та коливальної нестійкості для конвекції у спіральному магнітному полі є нижчими, ніж для конвекції у постійному аксіальному магнітному полі за будь-яких профілів неоднорідного обертання. Фізично це пояснюється тим, що азимутальна компонента поля зменшує ефективність магнітного гальмування у радіальному напрямку, що полегшує розвиток конвективних рухів порівняно з чисто аксіальним полем, яке рівномірно пригнічує рух у всіх горизонтальних напрямках. Отримано нову 8D динамічну систему нелінійних рівнянь, яка описує слабонелінійну стадію магнітної конвекції в середовищі, що неоднорідно обертається у зовнішньому спіральному магнітному полі. Встановлено існування складної хаотичної структури - дивного атрактора. Збільшення розмірності фазового простору з 6D до 8D обумовлене додатковими ступенями свободи, пов'язаними з

азимутальною компонентою магнітного поля, що призводить до більш багатогранної динаміки системи з можливістю формування складніших хаотичних режимів. При дослідженні магнітної конвекції в нанорідинах виявлено три різні типи магнітообертальних нестійкостей (МОН) залежно від конфігурації магнітного поля: стандартна МОН в аксіальному полі ($H_{0z} \neq 0$), азимутальна МОН в неоднорідному азимутальному полі ($H_{0\phi}(R) \neq 0$), і спіральна МОН у комбінованому спіральному полі. Фізичний механізм кожного типу МОН різний: стандартна МОН виникає через взаємодію радіальних градієнтів кутової швидкості з аксіальним магнітним полем; азимутальна МОН обумовлена нестійкістю магнітних силових ліній в азимутальному полі; спіральна МОН є результатом складної взаємодії обох компонент поля. Встановлено, що присутність наночастинок призводить до помітного зниження порогового значення стаціонарного критичного числа Релея Ra , що свідчить про дестабілізуючий ефект в обох конфігураціях (аксіальній та спіральній). Фізично це обумовлено тим, що наночастинки підвищують ефективну теплопровідність середовища і створюють додаткові механізми передачі тепла через броунівський рух і термофорез. При дослідженні конвекції в пористому середовищі Дарсі-Брінкмана отримано новий тип нестійкості в спіральному магнітному полі навіть за відсутності температурного градієнта. Це пояснюється тим, що пористе середовище модифікує гідродинамічні властивості течії через додаткове тертя Дарсі, яке анізотропно взаємодіє зі спіральним магнітним полем, створюючи нові канали для розвитку нестійкості. Встановлено асиметричний вплив компонент спірального магнітного поля: обертання та аксіальна (вертикальна) складова затримують початок конвекції через стабілізуючі інерційні та магнітні ефекти, тоді як азимутальна складова чинить дестабілізуючий вплив при додатних числах Россбі Rb . Це пов'язано з тим, що азимутальне поле створює магнітний зсув, який при певних умовах може посилювати конвективну нестійкість замість її пригнічення. Застосування

різних типів наночастинок (металоксидних, металевих і напівпровідникових) в нанорідинах відкриває можливості керування конвективними процесами через вибір відповідного типу наночастинок залежно від їх електричних і магнітних властивостей.

У п'ятому розділі досліджено процеси формування структур в неоднорідних середовищах з урахуванням термомагнітних (ТМ) ефектів. Цей розділ розкриває нові механізми генерації магнітного поля, що не пов'язані з класичними гідродинамічними нестійкостями. В наближенні локальної геометричної оптики отримано дисперсійне рівняння для малих ТМ-збурень в електропровідній рідині, що неоднорідно обертається, в зовнішньому аксіальному магнітному полі. Термомагнітні ефекти виникають внаслідок взаємодії температурних градієнтів з магнітним полем через явища теплової дифузії носіїв заряду (ефект Нернста) і магнітної модифікації теплопровідності (ефект Ледюка-Рігі). Ці ефекти створюють додаткові електрорушійні сили, які можуть призводити до генерації магнітного поля. Встановлено, що для низькопровідного середовища генерація магнітного поля неефективна через втрати, пов'язані з теплопровідністю та в'язкістю рідини. Фізично це означає, що в слабопровідних середовищах магнітна дифузія відбувається швидше за температурну, що призводить до швидкого затухання індукованих магнітних збурень. Навпаки, для високопровідної рідини генерація ефективна, якщо ефект «замагнічування» теплопровідності переважає над конвекцією тепла, оскільки в такому середовищі магнітне поле встигає накопичуватися швидше, ніж дисипувати. Для збурень, що розповсюджуються в аксіальному напрямку, ефект Холла може як стабілізувати, так і дестабілізувати зростання збурень залежно від профілю обертання. Це обумовлено тим, що ефект Холла створює поперечний електричний струм, який взаємодіє з обертанням, модифікуючи ефективну провідність плазми у різний спосіб для різних профілів кутової швидкості. Для радіальних збурень встановлено, що комбінація ефекту Нернста

у зовнішньому магнітному полі, ефекту Ледюка-Рігі, неоднорідностей рівноважної температури та питомої термо е.р.с., а також архімедової сили призводить до дестабілізації осесиметричних збурень. Фізичний механізм полягає в тому, що градієнти температури створюють термоелектричні струми через ефект Нернста, які взаємодіють з магнітним полем, генерують додаткові електричні поля через ефект Ледюка-Рігі, і в сукупності з плавучістю створюють самопідтримуваний процес генерації магнітного поля. Отримано нелінійне рівняння Гінзбурга-Ландау для опису слабонелінійної конвективної нестійкості з урахуванням ТМ-ефектів. Точне рішення показує вихід генерованого тороїдального магнітного поля на стаціонарний рівень, що демонструє можливість стабільної генерації магнітного поля термомагнітними механізмами. Розроблено нову 6D динамічну систему нелінійних рівнянь з урахуванням генерації збурень тороїдального магнітного поля ТМ-нестійкістю. Для кеплерівського профілю обертання ($Ro = -3/4$) виявлено режими конвекції з хаотичними змінами напрямку (інверсіями) та амплітуди генерованого магнітного поля. Хаотичність виникає через нелінійну взаємодію термомагнітних ефектів з конвективними рухами, що створює складну динаміку з непередбачуваними змінами полярності поля — аналог природних інверсій геомагнітного поля. Отримано новий тип термомагнітної нестійкості в стратифікованому тонкому шарі електронної рідини (плазмі) у гравітаційному полі. З'ясовано, що зменшення відношення масштабу конвекції до плазмового масштабу знижує граничне число Релея Ra , тобто полегшує розвиток нестійкості. Фізично це означає, що в тонких шарах плазми термомагнітні ефекти стають більш ефективними через зменшення конкуренції з дисипативними процесами. Встановлено, що в замагніченій плазмі, магнітне поле може генеруватися при паралельних градієнтах щільності та температури навіть у короткохвильовому діапазоні магніто-теплових збурень, оскільки механізм розвитку нестабільності стає конкурентним з механізмом теплової

дисипації через анізотропію теплопровідності в магнітному полі.

Шостий розділ присвячено комплексному аналізу біо-термальної конвекції у тонких шарах рідини та пористих середовищах з гіротактичними мікроорганізмами. Детально розглянуто вплив числа Пекле, гіротаксису, числа Релея-Дарсі, ефективної в'язкості та форми клітин на поріг біоконвективної нестійкості. Отримано такі фізичні ефекти: інтенсифікація рухливості та гіротаксису мікроорганізмів, а також більш різкий температурний перепад збільшують плавучість і градієнти густини, що полегшує розвиток біоконвекції; натомість підвищена в'язкість та сферична форма клітин демпфують рухи й стабілізують систему. Встановлено ефект динамічної модуляції: збільшення частоти модуляції знижує тепловіддачу (зменшує варіації Nu), а збільшення амплітуди – посилює теплообмін. Така поведінка відповідає коливальній конвекції, коли високочастотна модуляція пригнічує розвиток потоків, тоді як сильна амплітуда вносить додаткову енергію у систему. Показано також, що напрям наскрізного потоку відносно гравітації суттєво впливає на конвективний режим: висхідний потік посилює конвекцію завдяки додатковому перенесенню теплих мас угору, тоді як низхідний потік пригнічує природну конвекцію, зменшуючи ефективну плавучість. Цікавим є аналіз впливу зовнішнього магнітного поля у поєднанні з нанорідинами: вертикальне поле та число Дарсі підвищують стійкість системи, зменшуючи поперечні потоки (через додаткову магнітну силу та підвищену опірність середовища), тоді як середня пористість, число Льюїса та концентраційні ефекти дестабілізують стаціонарну конвекцію. Також збільшення концентрації гіротактичних мікроорганізмів підсилює магнітну конвекцію, оскільки їх рух створює додаткові масові потоки, які взаємодіють із магнітними силами. Особливо важливим є врахування обертання (числа Тейлора) – воно стабілізує систему, зменшуючи теплопередачу за рахунок коріолісових сил, тоді як внутрішнє нагрівання дестабілізує. Сферична форма клітин полегшує теплообмін через більш симетричний розподіл потоку.

Аналіз різних типів модуляції (IPM, OPM, LBMO) виявив характерні часові ефекти – короткочасне зростання Nu та Sh із подальшим виходом на стаціонарний рівень та різну амплітуду осциляцій залежно від типу модуляції.

Обґрунтованість і достовірність теоретичних результатів, отриманих у дисертації, забезпечується застосуванням сучасних, надійно апробованих методів теоретичної фізики, а також підтверджується ретельними розрахунками, наведеними в тексті. Значна частина одержаних результатів є точними або асимптотично точними розв'язками відповідних рівнянь і підтверджується результатами чисельних досліджень.

Практичне і наукове значення отриманих результатів полягає в тому, що вони доповнюють і розширюють пояснення походження великомасштабних вихрових структур у природних гідродинамічних середовищах, інтерпретацію явища спонтанної генерації магнітних полів у масивних зорях та нейтронних зірках, моделювання процесів генерації магнітних полів в електропровідних та нанорідинних середовищах і плазмі на основі нових багатовимірних динамічних систем, а також оптимізацію теплообміну в нанорідинних середовищах із можливістю застосування в біомедичних технологіях.

Вважаю за доцільне ознайомити з науковими результатами дисертаційної роботи Коппа М.Й. фахівців таких інститутів НАН України і університетів МОН України, як Інститут фізики, Інститут теоретичної фізики ім. М.М. Боголюбова, Інститут радіофізики та електроніки ім. О.Я. Усикова, Національний науковий центр «Харківський фізико-технічний інститут», Харківський національний університет ім. В.Н.Каразіна.

За змістом дисертації слід зробити такі зауваження:

1) У розділі 2.5 показано, що слабе зовнішнє магнітне поле не перешкоджає генерації великомасштабних вихрових і магнітних полів. Цей висновок отримано за умови, що магнітне число Прандтля дорівнює одиниці. Доцільно було б провести параметричний аналіз у певному діапазоні значень магнітного

числа Прандтля, оскільки ефективність генерації полів може суттєво змінюватися залежно від цього параметра.

2) У розділі 5.4 представлено новий механізм термомагнітної нестійкості в тонких плазмових шарах, який може бути застосований для пояснення виникнення сильних магнітних полів у масивних або нейтронних зірках. Доцільно також розглянути коротке порівняння цього механізму з відомими типами нестійкостей у тонких струмових шарах, зокрема з нестійкістю розриву.

3) У розділі 5.5 було розглянуто механізми генерації магнітних полів у повністю іонізованій плазмі з колінеарними градієнтами густини та температури. При цьому масштаб згенерованого поля є малим порівняно з характерними масштабами неоднорідностей плазми за температурою та щільністю. У зв'язку з цим доцільно узагальнити виклад матеріалу, розширивши його на випадок генерації магнітних полів у неоднорідній плазмі в усьому діапазоні довжин збурень із урахуванням конвективних потоків плазми.

4) Більш загальне зауваження полягає в відсутності основних принципів побудови відповідних рішень, використовуючи або можливість побудови твірного потенціалу, де записані рівняння визначають його мінімум, або в побудові нерівноважного термодинамічного потенціалу (типу Грехема), де самі структури (розмір і форма) будуть визначати його мінімум.

5) Викликає деяке нерозуміння стаціонарних стохастичних структур великомасштабних полів. Якщо це стохастична поведінка структур при наявності однорідних полів великих масштабів тоді чим вона зумовлена? Якщо це наразі стохастична поведінка полів великих масштабів тоді в рівняннях повинні бути присутні стохастичні джерела.

Зазначені зауваження не впливають на загальну позитивну і високу оцінку дисертаційної роботи Коппа М.Й. Без сумніву, вона є науковою працею, що відкриває нове вирішення важливої наукової проблеми. Робота виконана на високому науковому рівні, побудована на ретельній і великій за обсягом роботі

автора та в ній отримані нові важливі і обґрунтовані наукові результати. Основні результати дисертації викладено у 39 наукових працях: 30 статей у фахових вітчизняних і міжнародних періодичних виданнях, що рецензуються, в тому числі, 3 статті надруковано в наукових журналах першого квартилю (Q1), 5 - у журналах другого квартилю (Q2), 9- у виданнях третього квартилю (Q3) та 12 - у виданнях четвертого квартилю (Q4) відповідно до класифікації SJR (SCImago Journal Rank); 8 тезах доповідей на вітчизняних і міжнародних наукових конференціях та одному розділі збірника наукових праць.

Зміст автореферату вірно відображає основні положення дисертації, яка відповідає спеціальності 01.04.02 - теоретична фізика.

Вважаю, що за своїм рівнем, обсягом досліджень, новизною та науковим значенням результатів, дисертаційна робота Коппа М.Й. «Генерація нелінійних структур в гідродинамічних середовищах під впливом зовнішніх полів» повністю відповідає усім вимогам МОН України, що ставляться до докторських дисертацій, зокрема пунктам 9, 10 та 12 «Порядку присудження наукових ступенів», затвердженим постановою Кабінету Міністрів України №1197 від 17.11.2021 р. (зі змінами, внесеними згідно з Постановою КМУ № 502 від 19.05.2023 та № 507 від 03.05.2024), а автор дисертації — Копп Михайло Йосипович, поза сумнівом, заслуговує на присудження наукового ступеня доктора фізико-математичних наук за спеціальністю 01.04.02 - «теоретична фізика».

Офіційний опонент:

доктор фізико-математичних наук,
професор, академік НАН України,
головний науковий співробітник
Інституту теоретичної фізики
ім. М.М.Боголюбова НАН України

Богдан ЛЕВ

