

**НАУКОВІ ЗДОБУТКИ
ІНСТИТУТУ ТЕОРЕТИЧНОЇ ФІЗИКИ
ІМ. М.М. БОГОЛЮБОВА НАН УКРАЇНИ
(до 55-річчя від часу заснування установи)**

В січні 2021 р. минуло 55 років від дня заснування Інституту теоретичної фізики ім. М.М. Боголюбова НАН України. Ініціатором створення центру теоретичних досліджень був видатний фізик-теоретик і математик академік Микола Миколайович Боголюбов. В Києві почався його творчий шлях, тут він став відомим теоретиком. Микола Миколайович добре знав науковців в Україні і високо оцінював рівень їхніх досліджень. Тому в нього природно виникла ідея згуртувати теоретиків під одним дахом. У створенні нового інституту йому допомагав його учень В.П. Шелест. Дуже важливою була підтримка Президента АН УРСР Б.Є. Патона та вищого партійного керівника України П.Ю. Шелеста.

Від 1966 р. минуло чотири роки, і в 1970 р. до XV Рочестерської конференції з фізики високих енергій Інститут отримав нове приміщення в урочищі Феофанія. Усе, від вибору майданчика для нового корпусу та оздоблення інтер'єру до формування наукових напрямів і підбору кадрів, відбувалося за участі Миколи Миколайовича. Він став першим керівником Інституту (1966–1972 рр.). Спочатку тут утворились такі напрями досліджень, як теорія ядра, теорія елементарних частинок та квантова теорія поля. Відповідно до цього було створено три відділи: теорії ядра (завідувач О.С. Давидов), теорії елементарних частинок (завідувач А.Н. Тавхелідзе, згодом, В.П. Шелест) та математичних методів у теоретичній фізиці (завідувач О.С. Парасюк). Пізніше область досліджень розширилась, створювались нові відділи. Три з них згодом перетворились в окремі інститути. Так, відділ статистичної теорії конденсованих середовищ (завідувач І.Р. Юхновський), що був у складі Інституту в 1969–1990 рр., перетворився на Інсти-

тут фізики конденсованих систем НАН України. Відділ теорії адронів (1977–1979 рр.), яким керував Ю.М. Ломсадзе, став зародком нинішнього Інституту електронної фізики НАН України. Відділ теорії твердого тіла (1982–1985 рр.), очолюваний В.Г. Бар'яхтаром, відокремився в Інститут магнетизму НАН України.

Нова справа, започаткована М.М. Боголюбовим, приваблювала досвідчених теоретиків з інших установ. За кілька років основу колективу склали відомі фахівці з квантової теорії поля, теорії елементарних частинок, теорії гравітації, теорії ядра і ядерних реакцій, теорії твердого тіла, теорії плазми, математичної фізики. Серед них були академіки О.С. Давидов, О.С. Парасюк, О.З. Петров, О.Г. Ситенко, І.Р. Юхновський, члени-кореспонденти В.П. Шелест, П.І. Фомін, доктори фізико-математичних наук В.Я. Антонченко, В.П. Гачок, Ю.Б. Гайдідей, І.П. Дзюб, Л.Л. Єнковський, Г.М. Зінов'єв, А.У. Клімик, М.А. Кобилінський, В.М. Локтев, Ю.М. Ломсадзе, А.Ф. Лубченко, В.І. Овчаренко, Д.Я. Петрина, Е.Г. Петров, І.В. Сименог, А.Й. Стешенко, Б.В. Струмінський, І.І. Український, В.Ф. Харченко, Г.Ф. Філіппов, І.П. Якименко.

Варто згадати декілька результатів зі світової скарбниці, пов'язаних з іменами засновників Інституту. Це метод перенормувань в квантовій теорії поля Боголюбова–Парасюка, давидовське розщеплення смуг поглинання світла молекулярними кристалами, теорія дифракційних ядерних процесів Ситенка–Глаубера, класифікація гравітаційних полів Петрова, колір кварків, запропонований М.М. Боголюбовим, Б.В. Струмінським і А.Н. Тавхелідзе, модель народження Всесвіту з фізичного вакууму П.І. Фоміна. Невдовзі після створен-

ня Інститут стає відомим в світі. Він приваблює молодих талановитих науковців, для яких вважалось удачею стати його співробітниками чи аспірантами.

Після М.М. Боголюбова Інститут очолювали відомі фізики-теоретики О.С. Давидов (1973–1988 рр.) та О.Г. Ситенко (1988–2002 рр.). З'явилися нові напрями досліджень, жваво працювали семінари, відбувалися захисти дисертацій. Поступово утворилися наукові школи: математичної фізики і квантової теорії поля М.М. Боголюбова та О.С. Парасюка, теорії твердого тіла та теорії ядра О.С. Давидова, теоретичної ядерної фізики та теорії плазми О.Г. Ситенка, релятивістської астрофізики, космології та елементарних частинок П.І. Фомина. Сьогодні в семи наукових відділах та шести лабораторіях інституту працює 93 науковця, з них 42 доктори наук (3 академіки і 5 члени-кореспонденти НАН України) та 39 кандидати наук. Директором Інституту від 2003 р. є автор цієї статті. Наші дослідження охоплюють різні області теоретичної фізики від мікросвіту до Всесвіту. Це астрофізика і фізика високих енергій, релятивістська та квантова космологія, теорія ядерних систем та квантова теорія поля, теорія нелінійних процесів в конденсованих середовищах і плазмі, структура макромолекул і молекулярна електроніка, статистична та математична фізика і їхні застосування до економіки. Згадаємо деякі результати, що були отримані нашими співробітниками останнім часом.

Генерацію інтенсивного синхротронного випромінювання в релятивістських зіткненнях важких іонів, зумовленого взаємодією кварків з колективним кольоровим полем, яке забезпечує їхній конфайнмент, розглянув Г.М. Зінов'єв. Порівняння розрахованого спектра фотонів, що характеризуються великим поперечним імпульсом, з експериментальними даними свідчить на користь його існування. Було виявлено азимутальну анізотропію в кутовому розподілі дилептонів і показано, що ця особливість може бути використана для рестрації кварк-глюонної плазми.

М.І. Горенштейн запропонував розширення моделі ідеального адрон-резонансного газу, яке враховує притягальну та відштовхувальну взаємодію Ван дер Ваальса між баріонами. Модель описує фазовий перехід рідина–газ та критичну точку в ядерній матерії при низьких температурах і вели-

ких баріонних густинах. Врахування взаємодії між баріонами призводить до якісної зміни флуктуації зарядів. В області перехідних температур 140–190 MeV результати розрахунків є близькими до тих, що були отримані в квантовій хромодинаміці на ґратці. Модель передбачає особливу поведінку флуктуації числа протонів у релятивістських ядро-ядерних зіткненнях.

За допомогою розвинутого формалізму К.О. Бугаєв отримав нове рівняння стану для сумішей адронів і легких ядер. На його основі було створено модель адронного резонансного газу, яка з великою точністю описала сучасні експериментальні дані з виходу баріонів, мезонів і легких (анти-, гіпер-) ядер, виміряних у центральних зіткненнях важких іонів колаборацією ALICE CERN при енергії зіткнення в системі центра мас 2,76 TeV та колаборацією STAR BNL при енергії 200 GeV.

Гідрокінетична модель, яка описує еволюцію сильновзаємодійної матерії, що народжується в релятивістських зіткненнях важких іонів на сучасних прискорювачах, була запропонована Ю.М. Синюковим, С.В. Аккеліним та В.М. Шаповалом. Ця модель дозволяє відтворити просторово-часову картину випромінювання народжених частинок. Було розраховано поведінку спостережуваних величин у зіткненнях іонів свинцю при енергії колайдера LHC 5,02 TeV та у зіткненнях іонів золота при енергії колайдера RHIC 200 GeV на нуклонну пару.

Дослідження Ю.І. Ізотова та Н.Г. Гусевої були спрямовані на визначення головних джерел іонізації міжгалактичної речовини. Протягом еволюції Всесвіту відбувалось декілька глобальних перетворень речовини з одного стану в інший. Останнім з таких перетворень була вторинна іонізація Всесвіту в період, коли його вік становив від 200 до 1000 мільйонів років. Невизначеними залишались головні джерела іонізації міжгалактичної речовини. Одним з таких джерел могли бути молоді галактики за умови, що іонізуюче випромінювання було здатне в значній кількості виходити за межі галактики в міжгалактичне середовище та іонізувати нейтральний газ. Міжнародним колективом під керівництвом Ю.І. Ізотова була виконана обробка величезного масиву даних спостережень, результати якої показали здатність молодих галактик повністю іонізувати речовину Всесвіту.

На основі комбінованого аналізу класичних сфероїдальних карликових галактик Д.О. Савченко та А.В. Рудаковський встановили нове обмеження на масу ферміонної частинки темної матерії. Для моделювання кінематики восьми таких галактик вони використали профіль густини гало ферміонної темної матерії, розрахований новим методом, запропонованим три роки тому. Згідно з їхніми розрахунками, мінімальна маса частинки ферміонної темної матерії має бути принаймні вдвічі більшою за ті значення, що були раніше отримані на основі аналізу індивідуальних об'єктів.

О.М. Гаврилик, А.В. Назаренко та М.В. Хелашвілі узагальнили модель бозеконденсатної холодної темної матерії шляхом введення до розгляду бозонів з μ -деформованою термодинамікою. Врахування модифікації теорії гравітації на субгалактичних масштабах дозволило їм уточнити оцінку маси темної матерії в карликових галактиках, покращити опис спостережуваних ротаційних кривих. Вони приділили увагу ефектам, що ведуть до структурування темної матерії і продемонстрували роль кореляцій на масштабах, співмірних з галактичними.

Нові особливості спін-орбітальної взаємодії в сучасних функціональних матеріалах виявили В.М. Локтєв, Л.С. Брижик та О.О. Єремко. Виходячи з релятивістського рівняння Дірака, вони дослідили вплив зовнішнього потенціалу на спінові стани електронів. У нерелятивістському наближенні був знайдений узагальнений оператор спін-орбітальної взаємодії, який поряд з поправкою Томаса-Френкеля містить невідомий раніше доданок. Передбачена ними залежність стану системи частинок від їхнього спіну була підтверджена експериментально. Знайдена поправка є важливою для удосконалення сучасних технологій, зокрема, спінтроніки, де керування властивостями приладів відбувається через спін-орбітальні взаємодії.

Теорію магнітних скірміонів Нееля (топологічних солітонів) на викривлених ферромагнітних плівках побудували Ю.Б. Гайдідей та В.П. Кравчук. Вони показали, що скірміон може ефективно пінінгуватись на локальному викривленні плівки, і знайшли спектр його спінових збурень. Було розглянуто також зворотний ефект, коли скірміон індукує деформацію еластичної ферромагнітної плівки. На основі отриманого рівняння руху скірміона на викривленій поверхні автори передбачили

дрейф неелівських скірміонів, ефективна рушійна сила при цьому виявилась пропорційною градієнту кривизни плівки. Завдяки топологічній структурі магнітні скірміони є стійкими до впливів зовнішніх збурень, тому розглядаються в спінтроніці як елементи пам'яті та логіки.

В.П. Гусинін і С.Г. Шарипов запропонували метод дослідження зонної структури нових матеріалів, за допомогою якого можна виявити топологічні фазові переходи. Вони показали, що характерною особливістю двовимірних систем, в яких послідовно відбуваються топологічні переходи Ліфшиця, є поява при низьких температурах піків ентропії на частинку з квантованою амплітудою, а залежність ентропії на частинку від хімічного потенціалу характеризується мінімумом та піком поблизу точки Дірака. Було запропоновано вимірювати ці особливості в експериментах з модуляцією температури зразків.

Я.О. Золотарюк та І.О. Стародуб дослідили динаміку джозефсонівського вихору у великому симетричному масиві точкових джозефсонівських контактів, які в своїй структурі містять ферромагнетик. За певних умов у такій системі з'являється новий режим вільного безвипромінювального руху вихору, тобто виникають так звані "вкладені солітони", що рухаються за деякою сталою швидкістю. Знайдено характеристики таких солітонів в масиві, де індуктивний зв'язок між комірками відбувається не лише між найближчими сусідами, а і з наступними також, ця взаємодія може бути як деструктивною, так і сприятливою для утворення вкладених солітонів. Про існування вкладених солітонів можна пересвідчитись, вимірявши вольт-амперні характеристики масиву.

Е.Г. Петров розвинув модифіковану суперобмінну модель формування нерезонансного тунельного струму через молекулярний провід, що складається з регулярного ланцюжка та термінальних одиниць. Була дана інтерпретація експериментальної залежності вольт-амперних характеристик алканових ланцюгів від числа С-С зв'язків. Також були сформульовані умови придатності найпростішої моделі прямокутного бар'єра з ефективною електронною масою, що тунелює, для обробки експериментальних даних.

Теорія збудження ультракороткими лазерними імпульсами механічного обертання металеві наночастинки, розміщеної у середовищі з зада-

ною діелектричною проникністю, була розвинута М.І. Григорчуком. Він запропонував поляризаційний механізм генерації обергальної сили для області частот, близьких до резонансів поверхневого плазмона. Під впливом лазерного поля металева наночастинка асиметричної форми поляризується і стає диполем. Показано, що на напрямок обертання можна впливати, змінюючи довжину хвилі падаючого світла.

Ю.О. Ситенко побудував теорію кіральних ефектів в гарячій щільній релятивістській спірній матерії, що знаходиться в сильному магнітному полі і обмежена у просторі. Він показав, що кіральний магнітний ефект зникає, а ефект кірального розділення залежить не тільки від хімічного потенціалу, а також від температури та граничної умови на межі простору. Це вказує на важливу роль границь для таких фізичних систем, як компактні астрофізичні об'єкти, продукти реакцій при релятивістських зіткненнях важких іонів, новітні матеріали, відомі як діраківські та вейлівські напівметали.

Поляризаційні ефекти при взаємодії двох заряджених порошинок в плазмовому оточенні було досліджено автором цієї статті. Цікавою особливістю є те, що потенціал порошинки, яка заряджається плазмовими струмами, на великих відстанях є далекосяжним, на відміну від частинки з фіксованим зарядом. На основі розвинутої теорії великомасштабних електромагнітних флуктуацій в слабко іонізованій заповненій плазмі було розраховано спектри колективних флуктуацій з урахуванням зіткнень. Отримані результати є важливими для удосконалення методів діагностики заповненої плазми.

Суттєвий внесок в теорію рідкокристалічних колоїдів зробив Б.І. Лев. Він передбачив існування взаємодії кулонівського типу між колоїдними частинками в нематичному рідкому кристалі, яка спостерігалась в експериментах. Така взаємодія зумовлена порушенням всіх елементів симетрії в розподілі пружного поля директора навколо окремої частинки, що індукується межовими умовами на поверхні комірки та самої частинки.

В.І. Засенко та О.М. Черняк разом з автором цієї статті дослідили перенесення заряджених частинок під впливом випадкових електричних полів поперек магнітного поля. На основі запропонованого формалізму було здійснено аналітичний

опис транспортних характеристик частинок для різних режимів перенесення від дифузійного до конвективного. Розраховані коефіцієнти перенесення узгоджувались з результатами моделювання в широкому діапазоні часів кореляції та ларморових радіусів. Розуміння факторів, що впливають на темп перенесення, допомагає збільшувати час утримання плазми в магнітних пастках.

Ю.А. Лашко, Г.Ф. Філіппов та В.С. Василевський встановили, що поляризація бінарних підсистем ${}^6\text{He}$, ${}^8\text{Be}$ (зміна їх форми і розміру під час взаємодії з третім кластером) суттєво збільшує взаємне притягання кластерів в компаунд-системі ${}^{10}\text{Be}$, яке спричиняє суттєве зниження енергії як зв'язаних, так і резонансних станів. В багатьох випадках кластерна поляризація зменшує також ширину резонансних станів трикластерної системи ${}^{10}\text{Be}$, відтак збільшуючи час їхнього життя. Ці результати добре узгоджуються з експериментальними даними для станів дискретного та неперервного спектра ядра ${}^{10}\text{Be}$.

Новий підхід до опису квантових атмосферних каналів запропонували А.О. Семенов та Д.Ю. Васильєв. Теорія об'єднує атмосферну та квантову оптику і може стати основою такого напрямку, як квантова оптика турбулентної атмосфери. Автори розглянули властивості квантових каналів різної конфігурації, зокрема, внутрішньо-міські і супутникові, врахували вплив атмосферних опадів. Їхня теорія добре узгоджується з експериментальними дослідженнями. Було проаналізовано декілька квантових комунікаційних протоколів в атмосферних каналах та передачу через них неklasичних властивостей світла, пов'язаних з квантовою телепортацією, нелокальністю Белла та гаусовим заплутуванням.

Механізми деактивації макромолекули ДНК ракових клітин під впливом високоенергетичних іонних пучків розглянули С.Н. Волков, Д.В. П'ятницький та О.О. Здоревський. Згідно з їхньою гіпотезою, при проходженні іонів крізь живі тканини утворюються продукти радіолізу водного середовища, серед яких найбільш довгоживучими є молекули пероксиду водню. Досліджено взаємодію пероксиду водню з атомними групами макромолекули ДНК та розраховано ефективний час життя цих молекул біля подвійної спіралі. Розрахунки показують, що молекули пероксиду водню утворюють стабільніші за молекули води комплекси з

атомними групами ДНК і за певної концентрації можуть блокувати генетичну активність ДНК ракових клітин.

С.М. Перепелиця за допомогою методу молекулярної динаміки дослідив взаємодію молекул природних поліамінів з макромолекулою ДНК. Він виявив, що поліаміни розташовуються переважно в мінорному жолобі подвійної спіралі в області зі специфічною нуклеотидною послідовністю типу А-тракта. Ці результати узгоджуються з експериментальними даними і пояснюють фізичний механізм переважної локалізації поліамінів на окремих ділянках ДНК.

Наведені результати ілюструють лише невелику частину наукового доробку Інституту. Протягом останніх п'яти років було опубліковано близько тисячі наукових статей, з них понад 80% в зарубіжних наукових журналах, видано десять монографій та три збірки наукових праць. Роботи наших дослідників визнані науковою спільнотою в Україні та за її межами, про що свідчить високий рівень цитувань. Інститут також сприяє публікації праць фізиків з інших установ, він є базовою організацією Українського фізичного журналу – провідного видання ВФА НАН України.

Триває наша співпраця з провідними міжнародними центрами, таким як ЦЕРН, Об'єднаний інститут ядерних досліджень, Міжнародний центр теоретичної фізики Абдуса Салама (Італія), а також з багатьма університетами і лабораторіями світу. У 2018 р. на базі Інституту було створено Центр колективного користування “Ресурсний центр для грид- та хмарних технологій”, який включено в Європейську грид-мережу проекту EGI, єдиного європейського і світового дослідницько-інформаційного простору.

Протягом останніх 5 років Інститут був співorganizатором півсотні наукових зібрань, і серед них

близько двадцяти конференцій міжнародного рівня. Значною подією була конференція, присвячена 110-річчю академіка Миколи Боголюбова. До цієї роковини в 2019 р. було випущено книжку “Творець теоретичної і математичної фізики”. В Інституті проходять щорічні читання, присвячені пам'яті наших видатних вчителів М.М. Боголюбова, О.С. Давидова, О.Г. Ситенка, П.І. Фоміна, семінари Київського відділення Українського біофізичного товариства, тематичні семінари у відділах, конференції молодих вчених. Інститут організовує школи з теоретичної та математичної фізики для обдарованої молоді, бере участь у щорічних фестивалях науки. Наші співробітники читають понад 20 курсів лекцій в університетах Києва. У 2017 р. на базі Інституту було створено кафедру теоретичної і математичної фізики Київського академічного університету

Діяльність науковців Інституту відзначено Державною премією України в галузі науки і техніки, Золотою медаллю імені В.І. Вернадського, іменними преміями НАН України, преміями для молодих вчених Президента України та НАН України. Співробітники та сама установа неодноразово одержували відзнаки Web of Science Awards.

В Інституті виросло не одне покоління фізиків. Разом працюють ті, хто був тут від самого початку і ті, хто прийшов зовсім недавно. За час, що минув, в житті відбулися великі зміни. Але відданість науці є тим незмінним, що об'єднує покоління і є запорукою її невинного поступу і у сприятливі, і у важкі часи.

Директор

*Інституту теоретичної фізики
ім. М.М. Боголюбова НАН України,
академік НАН України*

А.Г. ЗАГОРОДНІЙ