

**ЗАГОРОДНІЙ**

**Анатолій Глібович** — академік НАН України, доктор фізико-математичних наук, професор, директор Інституту теоретичної фізики ім. М.М. Боголюбова НАН України

## СТВОРЕННЯ І РОЗВИТОК ІНСТИТУТУ ТЕОРЕТИЧНОЇ ФІЗИКИ ІМ. М.М. БОГОЛЮБОВА НАН УКРАЇНИ

### До 50-річчя від часу заснування установи

*Розглянуто основні віхи історії Інституту теоретичної фізики ім. М.М. Боголюбова НАН України, формування і розвитку наукових шкіл. Окреслено головні напрями діяльності Інституту та найвагоміші наукові здобутки його співробітників.*

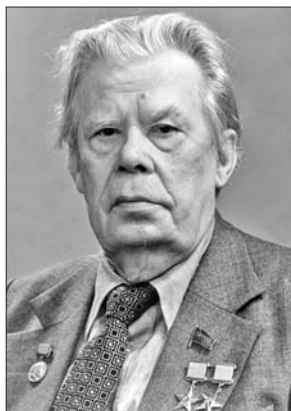
#### Вступ

Інститут теоретичної фізики АН УРСР (нині — Інститут теоретичної фізики ім. М.М. Боголюбова НАН України) створено 1966 р. Засновником та першим директором Інституту (1966—1973) був видатний фізик-теоретик і математик академік Микола Миколайович Боголюбов. Усе, що пов'язано з організацією нової установи — від вибору майданчика для будівництва корпусу і оздоблення його інтер'єру до формування наукових напрямів і підбору кадрів — відбувалося за безпосередньої участі Миколи Миколайовича. Створення теоретичного інституту в Києві було подією непересічною і навіть малоймовірною. На той час уже існував Інститут теоретичної фізики АН СРСР у Чорноголовці під Москвою (нині — ІТФ ім. Л.Д. Ландау РАН), тому ініціативу академіка Боголюбова прохолодно зустріли як в Академії наук СРСР, так і у вищому керівництві країни. Успіху вдалося досягти лише завдяки світовому імені та незаперечному авторитету Миколи Миколайовича Боголюбова, надзвичайно важливою виявилася також підтримка президента АН УРСР академіка Б.Є. Патона та партійного керівництва України, зокрема Першого секретаря ЦК КПУ П.Ю. Шелеста.

Спершу Інститут розміщувався в будівлі на вулиці Чкалова, 55-б (нині — вул. Олеся Гончара), поки у 1970 р. не було зведено новий корпус у Феюфанії неподалік Свято-Пантелеймонівського монастиря. На будівництво знадобилося лише кілька років, що, вочевидь, стало можливим тільки завдяки



Головний корпус Інституту теоретичної фізики ім. М.М. Боголюбова НАН України, збудований у 1970 р.



М.М. Боголюбов  
1966–1973



О.С. Давидов  
1973–1988



О.Г. Ситенко  
1988–2002



А.Г. Загородній  
з 2002

Директори Інституту теоретичної фізики ім. М.М. Боголюбова НАН України різних років

ініціативі учня М.М. Боголюбова — Віталія Петровича Шелеста та його батька Петра Юхимовича Шелеста. До роботи над проектом і оздобленням установи було залучено талановитих молодих митців — Івана Степановича Марчука і Миколу Андрійовича Стороженка. Сьогодні імена цих художників відомі усьому світу, а їхній творчий доробок становить гордість українського народу.

Від самого початку М.М. Боголюбов залучив до роботи в Інституті науковців зі світовими іменами, зокрема академіків О.С. Давидова, О.З. Петрова, О.Г. Ситенка, О.С. Парасюка, І.Р. Юхновського, своїх учнів А.Н. Тавхелідзе (майбутнього академіка РАН), Д.Я. Петрину, В.П. Шелеста та інших. Основні напрями наукової діяльності концентрувалися навколо теорії елементарних частинок, теорії ядра і ядерних реакцій, теорії твердого тіла і статистичної фізики. За перші сім років Інститут перетворився на знаний у світі науковий центр, здобутки якого стали добре відомі міжнародній науковій спільноті.

### Віхи історії Інституту

При створенні Інституту в його структурі було три наукові відділи: математичних методів у теоретичній фізиці (завідувач — академік О.С. Парасюк), теорії ядра (завідувач — академік

О.С. Давидов), теорії елементарних частинок (завідувач — д-р фіз.-мат. наук А.Н. Тавхелідзе, з 1969 р. — чл.-кор. НАН України В.П. Шелест). З часом тематика розширювалася, створювалися нові відділи. Зокрема, у 1966–1973 рр. було створено відділ теорії ядерних реакцій під керівництвом чл.-кор. АН УРСР (з 1982 р. — академіка) О.Г. Ситенка; відділ статистичної теорії конденсованих систем у Львові під керівництвом д-ра фіз.-мат. наук (з 1982 р. — академіка) І.Р. Юхновського; відділ теорії відносності та гравітації (завідувач — академік АН УРСР О.З. Петров); відділ теорії адронів в Ужгороді (завідувач — д-р фіз.-мат. наук Ю.М. Ломсадзе). У 1973 р. на базі відділів теорії елементарних частинок і теорії відносності та гравітації було організовано відділ астрофізики та елементарних частинок, керівником якого став д-р фіз.-мат. наук (з 1990 р. — чл.-кор. НАН України) П.І. Фомін, від 2007 р. відділ очолює чл.-кор. НАН України В.П. Гусинін.

Упродовж 1973–1988 рр. Інститутом керував академік Олександр Сергійович Давидов. У цей період організовано відділ структури атомних ядер, який і дотепер очолює д-р фіз.-мат. наук Г.Ф. Філіппов; відділ статистичної механіки під керівництвом д-ра фіз.-мат. наук (з 2006 р. — чл.-кор. НАН України) Д.Я. Петрини, однак у 1986 р. відділ було переведено до Інституту математики АН УРСР; відділ

обчислювальних методів теоретичної фізики на чолі з д-ром фіз.-мат. наук В.Я. Антонченком; відділ квантової теорії молекул та кристалів під керівництвом д-ра фіз.-мат. наук (з 2003 р. — чл.-кор. НАН України) Е.Г. Петрова; відділ квантової електроніки, який до 2003 р. очолював д-р фіз.-мат. наук І.П. Якименко, а зараз — д-р фіз.-мат. наук Ю.Б. Гайдідей.

У 1980 р., коли кадровий склад відділу статистичної теорії конденсованих систем у Львові поповнили молоді доктори наук, було створено ще два наукові підрозділи — відділ теорії розчинів під керівництвом д-ра фіз.-мат. наук (з 2003 р. — чл.-кор. НАН України) М.Ф. Головка та відділ квантової статистики на чолі з д-ром фіз.-мат. наук І.О. Вакарчуком, що дало змогу того ж року відкрити Львівське відділення статистичної фізики Інституту теоретичної фізики АН УРСР. У 1990 р. на базі Відділення створено Інститут фізики конденсованих систем НАН України, директором якого став академік І.Р. Юхновський.

У 1982 р. було створено відділ теорії твердого тіла (завідувач — академік АН УРСР В.Г. Бар'яхтар) і в 1983 р. у його складі — лабораторію теорії магнітних явищ, керівником якої став д-р фіз.-мат. наук (з 2009 р. — чл.-кор. НАН України) Б.О. Іванов. У 1985 р. відділ було переведено до Інституту металофізики ім. Г.В. Курдюмова НАН України.

З метою розвитку науково-дослідних робіт у галузі фізики високих густин енергії і фундаментальної метрології у 1983 р. створено проблемну галузеву науково-дослідну лабораторію фізики високих густин енергії, яку очолив д-р фіз.-мат. наук (з 2012 р. — чл.-кор. НАН України) Г.М. Зінов'єв. На її основі у 1986 р. організовано однойменний відділ.

У 1988–2002 рр. Інститут очолював академік Олексій Григорович Ситенко. У цей період створено відділ синергетики, який очолював д-р фіз.-мат. наук В.П. Гачок, а з 2007 р. — чл.-кор. НАН України Б.І. Лев; відділ прикладних проблем теоретичної фізики, завідувачем якого до 2014 р. був д-р фіз.-мат. наук І.В. Сименюк; відділ математичного моделювання під керівництвом д-ра фіз.-мат. наук М.С. Гончара.



Після відкриття нового корпусу Інституту. Академіки О.С. Давидов, О.Г. Ситенко, М.М. Боголюбов. 1971 р.

У 1993 р. на базі лабораторії теорії електронних процесів у молекулярних впорядкованих структурах створено відділ теорії нелінійних явищ в конденсованих середовищах (тепер — відділ нелінійної фізики конденсованого стану) під керівництвом д-ра фіз.-мат. наук (з 2003 р. — академіка НАН України) В.М. Локтева.

У 1996 р. на базі частини відділів теорії ядра і ядерних реакцій та квантової електроніки створено відділ теорії та моделювання плазмових процесів, який очолив д-р фіз.-мат. наук (з 2006 р. — академік НАН України) А.Г. Загородній.

З метою залучення до наукової роботи талановитої молоді у 1999 р. в Інституті створено Науково-освітній центр, що працює за системою неперервної фізико-математичної освіти для школярів фізико-математичних ліцеїв та студентів фізичних і математичних факультетів, зацікавлених у вивченні додаткових розділів фізики поза стандартною шкільною чи університетською програмою. Координатор центру — канд. фіз.-мат. наук В.М. Шадура.

Від 2002 р. директором Інституту є академік НАН України А.Г. Загородній. У цей період створено лабораторію грид-обчислень у фізиці (завідувач — д-р фіз.-мат. наук Є.С. Мартинов); лабораторію астрофізики і космології (завідувач — д-р фіз.-мат. наук Ю.В. Штанов); лабораторію сильнокорельованих низьковимірних систем (завідувач — д-р фіз.-мат. наук

С.Г. Шарапов); лабораторію інтегровних систем (завідувач — д-р фіз.-мат. наук М.З. Іоргов); відділ комп'ютерного забезпечення наукових досліджень і науково-технічної інформації (завідувач — канд. техн. наук С.Я. Свістунов).

Сьогодні до складу Інституту входять 14 наукових відділів і 4 лабораторії, в яких працюють 120 наукових співробітників, серед яких 43 доктори наук (2 академіки і 4 члени-кореспонденти НАН України) і 58 кандидатів наук. Результати досліджень співробітників Інституту визнано світовою науковою спільнотою, про що свідчить високий рівень цитованості в науковій літературі. За рейтингом цитувань і кількістю опублікованих статей на одного науковця Інститут посідає перше місце серед наукових установ України. Станом на липень 2015 р. 10 співробітників Інституту входять до списку ста найбільш цитованих науковців України.

Інститут активно співпрацює з провідними науковими установами світу, зокрема ЦЕРНом (Швейцарія), Об'єднаним інститутом ядерних досліджень, Університетом Антверпена, Данським технічним університетом, Науковим інститутом Вейцмана (Ізраїль), Інститутом твердого тіла та матеріалознавства ім. Лейбніца (Дрезден), Гумбольдтським університетом (Берлін), Міжнародним центром теоретичної фізики Абдуса Салама (Італія) та іншими відомими науковими центрами. Інститут був ініціатором створення Українського національного гріду і координує діяльність у цій сфері. Співробітники Інституту беруть участь у проведенні експериментів та обробленні даних на Великому адронному колайдері.

Науковці Інституту постійно беруть участь у роботі редколегій міжнародних журналів, долучаються до експертизи наукових проєктів, читають близько 20 курсів лекцій у провідних університетах України, зокрема в Київському національному університеті імені Тараса Шевченка, Національному університеті «Києво-Могилянська академія», НТУУ «Київський політехнічний інститут» та інших.

На сьогодні Інститут є визнаним центром теоретичної фізики не лише в Україні, а й у світі.

## Наукові традиції і сучасні дослідження Інституту

Ще в початковий період почали формуватися наукові школи Боголюбова—Парасюка (математичної фізики і квантової теорії поля), Давидова (теоретичної фізики), Ситенка (теоретичної ядерної фізики та теорії плазми), Фоміна (релятивістської астрофізики, космології та елементарних частинок), діяльність яких нині продовжує розширюватися і поглиблюватися. Серед класичних результатів, що увійшли до світової скарбниці, варто згадати давидовське розщеплення, теорію дифракційного розсіяння Ситенка—Глаубера, класифікацію гравітаційних полів Петрова, колір кварків — додаткове квантове число, запропоноване М.М. Боголюбовим, Б.В. Струмінським і А.Н. Тавхелідзе, *R*-операцію Боголюбова—Парасюка, теорію квантового народження Всесвіту з вакууму П.І. Фоміна.

Зараз тематика Інституту охоплює широке коло проблем астрофізики та космології, фізики високих густин енергії, теорії ядра та квантової теорії поля, нелінійних явищ у конденсованих середовищах та плазмі, кінетичної теорії нерівноважних процесів, квантової електроніки, синергетики, квантової теорії молекул та кристалів, математичних методів у теоретичній фізиці та моделювання фізичних процесів. Результати, отримані науковцями Інституту, широко відомі як в Україні, так і за її межами. Наведемо деякі з останніх здобутків, які можна віднести до досягнень міжнародного рівня.

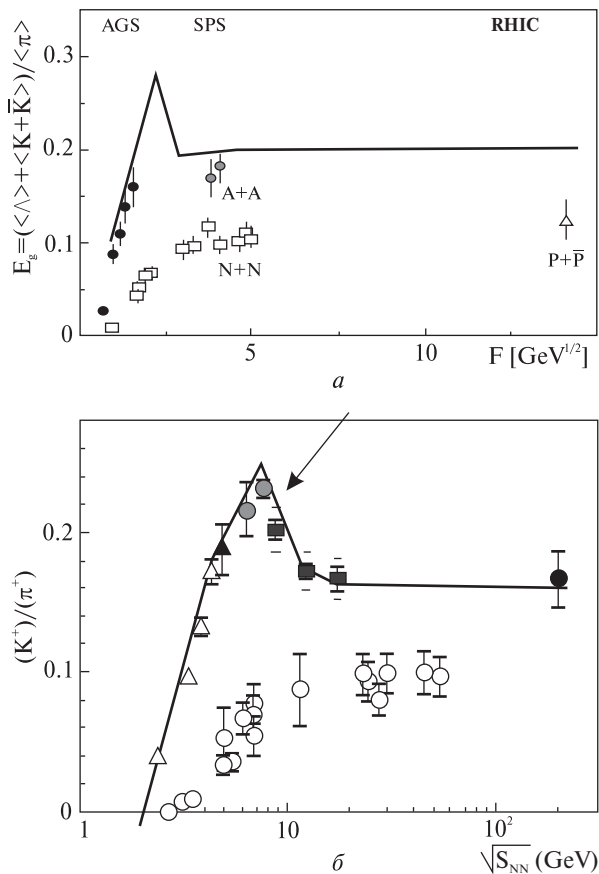
**1. Детектування можливої лінії розпаду темної матерії.** Природа темної матерії — найбільшої гравітуючої субстанції у Всесвіті — все ще залишається невизначеною. Ймовірне пояснення темної матерії за допомогою елементарних частинок означає необхідність розширення Стандартної моделі фізики частинок, яка не містить частинки, що підходить на роль кандидата темної матерії (нейтральної, масивної та достатньо довгоживучої). Запропоновані наразі розширення Стандартної моделі відрізняються за ключовими параметрами — масою частинки темної матерії та її силою взаємодії з



іншими частинками — на десятки порядків величини. Для звуження області параметрів часто припускають, що частинка темної матерії не є абсолютно стабільною, а може розпадатися на фотон та іншу частинку протягом часу, на багато порядків більшого за час життя Всесвіту.

Починаючи з 2005 р. багато наукових груп у всьому світі ведуть пошуки лінії розпаду темної матерії. Нещодавно дві міжнародні групи, до складу однієї з яких входить співробітник Інституту Д.А. Якубовський, незалежно одна від одної повідомили про детектування нової лінії випромінювання на енергії  $\sim 3,55$  кеВ у рентгенівському спектрі ряду космічних об'єктів, домінуючою складовою яких, як вважають, є темна матерія [1, 2]. Попри те, що ця лінія слабка, вона стає яскравішою в напрямку до центру космічних об'єктів, є сильнішою для скупчень галактик та центральної частини нашої Галактики, ніж для галактики Андромеди, і відсутня в дуже глибокому спостереженні «чистого неба». Подальші пошуки нової лінії в рентгенівських спектрах космічних об'єктів допоможуть визначити її природу.

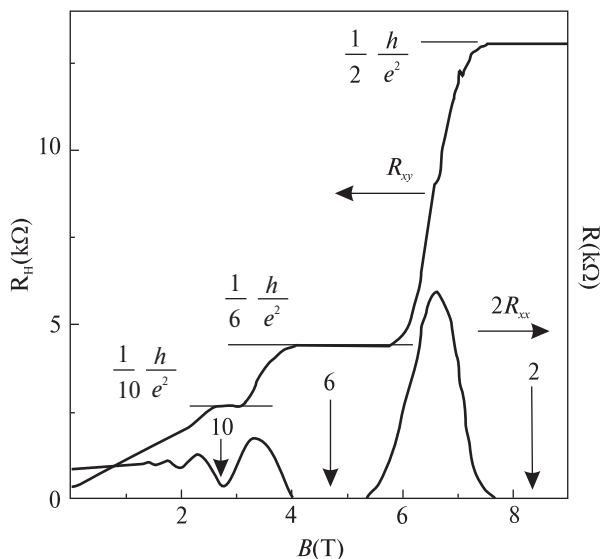
**2. Дослідження кварк-глюонного стану матерії.** На формування кварк-глюонної плазми (КГП) спрямовано міжнародні експериментальні програми на прискорювачах важких ядер у Брукхейвені (США) та ЦЕРНі (Швейцарія). У роботі [3] було побудовано статистичну модель ядерних зіткнень, у якій зміни в енергетичній залежності народження адронів виникають як результат фазового перетворення у сильно взаємодіючій матерії, відомого під назвою деконфайнмент: при підвищенні енергії зіткнення замість адронного газу сильно взаємодіюча матерія трансформується в КГП. Найбільш цікавим результатом такої моделі було передбачення поведінки відношення числа дивних частинок до числа пі-мезонів. За низьких енергій формується адронна фаза. Зростання енергії зіткнення ядер супроводжується підвищенням температури адронного газу, що призводить до різкого зростання відношення числа дивних частинок до числа пі-мезонів. За дуже великих енергій та формування КГП це відношення перестав



**Рис. 1.** Відношення числа дивних частинок до числа пі-мезонів як функції енергії зіткнення ядер: *a* — теоретичне передбачення 1998 р. (суцільна лінія) та наявні на той час експериментальні дані (точки); *б* — експериментальне підтвердження 2002–2005 рр.

залежати від температури і, як наслідок, не залежить від енергії зіткнення ядер. Перехід між цими двома дуже різними залежностями призводить до появи гострого максимуму у відношенні числа дивних частинок до числа пі-мезонів як функції енергії зіткнення ядер. Це теоретичне передбачення стимулювало експериментальну програму зі сканування енергій на прискорювачі SPS у ЦЕРНі. Експерименти з Рb+Рb-зіткнень, виконані в 2002–2005 рр. колаборацією NA49, підтвердили це передбачення статистичної моделі фазового перетворення (рис. 1).

**3. Універсальна оптична провідність графену.** Графен, який є одношаровим, а точніше,



**Рис. 2.** Експериментальні криві холлівського опору з характерними поличками, що відповідають його квантуванню в графені [5]

товщиною в один атом, вуглецевим кристалом, експериментально відкрили А. Гейм і К. Новосьолов у 2004 р. Кристалічна структура графену має гексагональну, або стільникову, ґратку. З точки зору фізики конденсованого стану унікальність графену полягає в тому, що заряджені носії в ньому поведуть себе як безмасові кіральні релятивістські частинки, рух яких описується рівнянням Дірака–Вейля. В Україні ще до відкриття графену співробітники Інституту виконали піонерні роботи, в яких передбачили цілий ряд ефектів, властивих саме цьому матеріалу. Зокрема, встановлено механізм генерації щільності в енергетичному спектрі квазічастинок і обчислено поздовжню та холлівську провідності графену в магнітному полі.

У 2005 р. В. Гусинін і С. Шарапов зробили передбачення незвичайного квантового ефекту Холла в графені [4]. З їх розрахунків випливало, що для діраківських електронів у графені холлівський опір приймає значення  $R_H = h/\nu e^2$ , де  $\nu$  – так званий фактор заповнення – має бути *подвоєним непарним*, тобто  $\nu = 2(2n + 1)$ , або  $\nu = 2, 6, 10, \dots$ , де  $n = 0, 1, 2, \dots$ . Це суттєво відрізняє графен від звичайних систем

з параболічним спектром низькоенергетичних збуджень, де у випадку звичайного квантового ефекту Холла фактор  $\nu$  може бути довільним цілим числом. Саме такий незвичайний ефект Холла, відкритий в експериментах, проведених групою нобелівського лауреата Г. Штормера в США (рис. 2) і нобелівськими лауреатами 2010 р. А. Геймом і К. Новосьоловим, допоміг експериментально довести, що заряджені квазічастинки в графені описуються рівнянням Дірака.

Однією з важливих властивостей графену, пов'язаних з діраківським характером носіїв, є його керована прозорість, що є наслідком того, що в графені крім переходів усередині зони існують також міжзонні переходи (між від'ємним та додатним діраківськими конусами). Унаслідок цього залежність оптичної провідності  $\sigma(\Omega)$  від частоти  $\Omega$ , окрім піка Друде, має поріг, який залежить від концентрації носіїв. При  $\Omega < 2|\mu|$ , де  $\mu$  – хімічний потенціал, оптична провідність майже відсутня, через блокування Паулі, а при  $\Omega > 2|\mu|$  вона виходить на своє універсальне значення  $\sigma_{\text{opt}}$ . Це нагадує ефект Бурштейна–Мосса в напівпровідниках. Величина  $\sigma_{\text{opt}} = \pi e^2/(2h)$  залежить тільки від універсальних констант – заряду електрона  $e$  і сталої Планка  $h$ . Таку поведінку оптичної провідності було вперше передбачено і описано в роботі [6].

Оскільки коефіцієнт проходження світла крізь графен виражається через динамічну провідність формулою  $T_{\text{opt}} = 1/(1 + 2\pi\sigma(\Omega)/c)^2$ , де  $c$  – швидкість світла, то одержуємо, що прозорість графену визначається сталою тонкої структури  $\alpha \approx 1/137$  і дорівнює 0,977, тобто поглинається тільки 2,3% світла, що падає. Саме таку поведінку оптичної провідності і коефіцієнта проходження світла спостерігали в експериментальних роботах. Керованість оптичної прозорості графену може мати низку важливих практичних застосувань, наприклад для використання в оптичних модуляторах.

**4. Бозе-конденсація магнонів (БЕК).** Оскільки завжди вважали, що БЕК може відбуватися лише за низьких ( $T \sim 10^{-7} - 10^{-8}$  К) температур і експеримент засвідчував, що це

так, сенсаційним стало відкриття в 2006 р. БЕК за кімнатних температур, яку за аналогією з надпровідністю можна назвати *високотемпературною*. Проте спостережена вона була не в системі частинок, а в системі квазічастинок. Йшлося про феромагнетики та їхні елементарні збудження — *магнони*. Цей результат спричинив великий сплеск уваги теоретиків, але найбільш послідовну теорію БЕК було запропоновано в 2007–2009 рр. співробітниками Інституту Анатолієм Бугрієм і Вадимом Локтевим, яким вдалося кількісно описати деякі спостережувані факти.

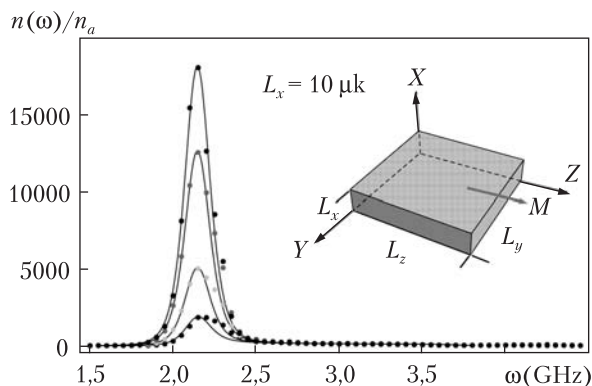
Класична формула для температури бозеконденсації  $T_{BEC}$  залежно від густини квазічастинок  $n$  та їхньої маси  $m$ :

$$T_{BEC} = \frac{n^{2/3}}{m} \frac{2\pi\hbar^2}{k_B \zeta^{2/3}(3/2)}.$$

Спектральна густина магنونів  $n(\omega)$  формується завдяки трьом внескам: власне від БЕК  $n_c(\omega)$ , поверхневого  $n_s(\omega)$  та об'ємного  $n_v(\omega)$ . Проблема полягає в тому, що вони мають принципово різну природу, але близьку дзвіноподібну залежність від частоти. Тобто така поведінка спостережуваних кривих не є підставою для висновку щодо утворення БЕК. Автори знайшли умови, за якими можна експериментально відокремити БЕК від маскуючих ефектів, зумовлених некогерентними внесками.

Як видно з рис. 3, розрахунок функції  $n(\omega)$  непогано відображає експеримент. Цей результат Відділення фізики і астрономії НАН України визнало одним з найкращих у 2009 р. Пізніше вдалося довести, що через особливості спектра магنونів у плівках БЕК у них має бути неоднорідно-періодичною, що також було експериментально підтверджено.

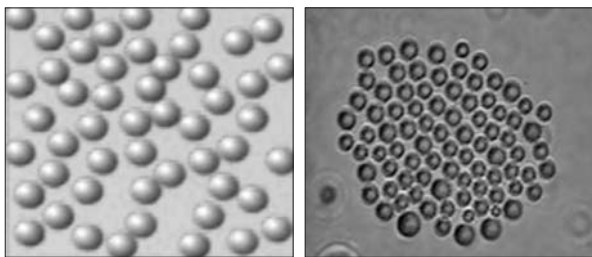
**5. Перемикання полярності магнітних вихорів у наномагнетиках.** Характерні просторовий та часовий масштаби, які характеризують динаміку феромагнітного середовища, зазвичай не перевищують 10 нм та 100 пс відповідно. Характерна магнітна довжина визначається конкуренцією обмінної взаємодії, анізотропії та диполь-дипольної взаємодії і визначає ширину доменної стінки чи розмір ядра



**Рис. 3.** Спектральна густина магنونів за різної потужності накачки: кружечки — експериментальні дані; лінії — теоретичні розрахунки. На вставці зображено геометрію феромагнітної плівки залізо-ітрієвого гранату

магнітного вихору. Якщо в одному з просторових вимірів розмір феромагнетика є зів'язаним з характерною магнітною довжиною, то такий зразок може набувати специфічних і цікавих з точки зору застосувань властивостей. Наприклад, динаміка намагніченості тонкої феромагнітної плівки часто характеризується появою магнітних вихорів. Магнітний вихор також може бути основним станом намагніченості плоскої магнітної наноточки субмікрометрового розміру. В Інституті запропоновано метод *перемикання полярності магнітного вихору* (напряму намагніченості ядра) за допомогою змінного магнітного поля [7, 8]. Ця задача є ключовою для створення енергонезалежної комп'ютерної пам'яті нового покоління VRAM (Vortex Random Access Memory), в якій біт інформації зберігається як полярність вихору.

Для задач спінтроники ключовим є питання взаємодії спін-поляризованого струму з магнітним середовищем. Було встановлено умови *утворення вихор-антивихорової метаречовини* в магнітних плівках під дією поперечного спін-поляризованого струму: за густини струму, близької до критичного значення насичення, виникає стійкий кристал з двома квадратними підґратками — вихровою та антивихровою; зі зменшенням струму кристал плавиться, демонструючи перехід до рідинної фази, де руйнується дальній порядок, проте зберігається



**Рис. 4.** Процес формування просторово неоднорідного розподілу в системі бозе-частинок

ближній; у разі подальшого зменшення густини струму відбувається перехід до газоподібної фази, яка характеризується хаотичним рухом вихорів та антивихорів [9, 10].

Розвинуто новий напрям у наномagnetизмі — *магнетизм криволінійних низьковимірних систем*. Отримано загальний вираз для обмінної енергії криволінійних двовимірних плівок і одновимірних дротів довільної форми. Показано, що кривизна та кручення призводять до появи в обмінній енергії ефективних анізотропії та взаємодії Дзялошинського [11, 12]. У рамках цього підходу було передбачено зв'язок між хіральністю магнітної підсистеми і геометричною хіральністю магнетика [13], а також передбачено ряд нових ефектів: зумовлений крученням лінійний зсув у дисперсії магнонів у криволінійному дроті, пінінг доменної стінки на згині дроту.

**6. Статистичний опис систем з взаємодією.** Є багато методів статистичного опису систем взаємодіючих частинок. Для деяких потенціалів взаємодії статистична сума просто розбігається. Такі потенціали називають катастрофічними, а вивчення відповідних систем вимагає розроблення спеціальних підходів. На основі апарату теорії поля запропоновано новий підхід до статистичного опису систем взаємодіючих частинок. Підхід дає змогу описати фазовий перехід, що супроводжується просторово неоднорідним розподілом частинок. Застосування методів класичної статистичної фізики та теорії поля дозволило розробити новий підхід до опису систем взаємодіючих частинок з урахуванням їх просторово неоднорідного розподілу і побудувати теорію утворення кластерів у кон-

денсованих середовищах. За допомогою цього методу задачу статистичної фізики можна звести до задач математичної фізики, знаходження розв'язків нелінійних диференціальних рівнянь для відповідних полів. Ця задача значно легша за визначення статистичної суми. У цьому підході вдалося описати поведінку кулонівських систем з формуванням вігнерівського кристалу, поведінку самогравітуючої системи з формуванням просторово неоднорідного розподілу частинок, поведінку системи з далекосяжним відштовхуванням та короткодіючим притяганням. Можливість урахування взаємодії між різними ступенями вільності конденсованого середовища дозволила описати нетривіальний броунівський рух колоїдних частинок у рідкому кристалі (рис. 4) [14–18].

Запропоновано також новий феноменологічний підхід до опису фазових переходів, що супроводжуються формуванням просторово неоднорідного розподілу частинок у конденсованому середовищі. Цей підхід ґрунтується на використанні моделі, що враховує зв'язок параметра порядку з його градієнтом [19, 20].

**7. Молекулярна електроніка.** Однією з найважливіших проблем сучасної електроніки є мініатюризація її елементної бази, для якої передбачається використання органічних молекул та молекулярних наноструктур. Зараз розвинуто унікальну техніку дослідження струмів як через окремі молекули, так і через молекули, що входять у структуру моно- та бішарів (рис. 5а). Це дозволило розпочати з'ясування фундаментальних фізичних механізмів провідності окремих молекул. У відділі квантової теорії молекул і кристалів було розвинуто теорію електрон-транспортних процесів у нанопристроях «електрод—молекула—електрод» [21]. Показано принципову роль перезаряджання молекули у формуванні стрибкового (*hop*) та прямого міжелектродного (*dir*) тунельного струму (рис. 5б). Теорія добре описує експеримент. На рис. 5в проілюстровано діодні (випрямні) властивості молекули [22]. Теорія передбачає також, що швидке перемикання електричних потенціалів на контактах призводить до великих струмів вмикання/вимикання в діоді порівняно



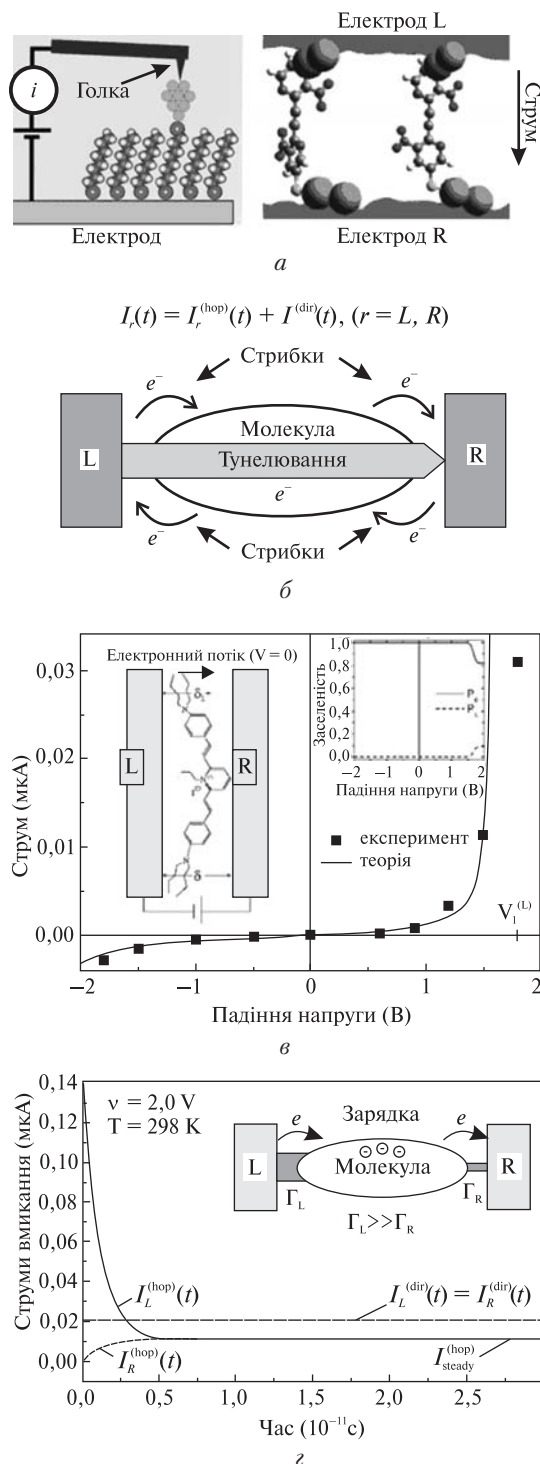
зі стаціонарними струмами у цьому діоді [23–25] (рис. 5з). Цей ефект має бути врахований при роботі молекулярних діодів, транзисторів, трансмітерів, перемикачів тощо.

**8. Теорія заповненої плазми.** Близько 20 років тому виник новий розділ – фізика заповненої плазми, яка містить дрібнодисперсну твердотільну фазу (порошинки). Така плазма має особливі властивості, пов'язані з тим, що порошинки можуть накопичувати і нести на собі великий електричний заряд. Оскільки теплова швидкість електронів набагато перевищує швидкість іонів, поглинання електронів відбувається інтенсивніше, а отже, заряд порошинки стає від'ємним. Заповнена плазма поширена як у природних (космічна і геофізична плазма, хвости комет, планетарні кільця тощо), так і в лабораторних умовах (газові розряди, плазма в технологічних установках для оброблення поверхонь, термоядерна плазма в токамаках тощо).

У заповненій плазмі легко створити умови, за яких відбувається зміна фазового стану системи порошинок; вона може поводити себе як газ або як рідина чи навіть утворювати кристалічні структури. Такі зміни можна спостерігати практично неозброєним оком, а отже, заповнена плазма стає ідеальним полігоном для перевірки теорії критичних явищ у багаточастинкових системах. Послідовний опис заповненої плазми потребує урахування самоузгодженої динаміки заряджання порошинок. Таке узагальнення було здійснено на основі перших принципів статистичної механіки [26, 27]. Отримані кінетичні рівняння стали основою для подальшого розвитку теорії заповненої плазми.

Актуальним завданням є також визначення потенціалу взаємодії порошинок у плазмі. У результаті аналітичних і числових розрахунків вдалося детально вивчити властивості ефективних потенціалів порошинки, зумовлені наявністю плазмових потоків на порошинку [28–31].

Наявність потоків виявилася надзвичайно важливою. У випадку порошинки, заряд якої підтримується плазмовими струмами, потенціал є суперпозицією екранованого і кулонів-



**Рис. 5.** Формування електронного струму через молекулу: а – експериментальні методи; б – стрибкова та тунельна трансмісія; в – молекулярний діод; г – струм вмикання

ського потенціалів. Цікаві властивості має також потенціал порошинки, яка рухається. За певних умов попереду порошинки домінує надлишковий додатний заряд, а позаду від'ємний. Це означає, що порошинка, яка рухається, замість того, щоб гальмуватися індукованим навколо неї полем, починає прискорюватися [32, 33]. Цей механізм може бути однією з причин аномально високої середньої кінетичної енергії порошинки та плавлення плазмових кристалів, що спостерігається в експериментах.

Очевидно, що поблизу порогу нестійкого руху порошинки важливу роль починають відігравати флуктуації заряду порошинки, які є наслідком флуктуацій плазмових струмів заряджання. Як було показано [34], вони суттєво впливають на функції розподілу порошинок і можуть індукувати зміну фазового стану системи порошинок.

### Замість післямови

Наведені результати є лише незначною частиною наукового доробку Інституту за 50 років його існування. За цей період було опубліковано понад 10 тис. наукових праць, видано 140 монографій, захищено 83 докторські та близько 200 кандидатських дисертацій. Серед відзнак за наукові досягнення — дві Ленінські

премії, 15 Державних премій України в галузі науки і техніки, 22 премії імені видатних учених НАН України, 8 Премій Президента України для молодих учених і НАН України для молодих учених. Детальнішу інформацію про історію Інституту та здобутки його науковців можна знайти в книзі «Інститут теоретичної фізики ім. М.М. Боголюбова НАН України. 1966—2016» (К.: Академперіодика, 2015).

Попри всі труднощі і негаразди нашого сьогоднішнього колектив Інституту зберіг і наростив свій науковий потенціал. Ми не втрачаємо надії на краще майбутнє і продовжуємо активно працювати над актуальними проблемами фізичної науки, організацією наукових конференцій, підготовкою наукових кадрів, залученням до наукової роботи талановитої молоді. Подвижницька праця науковців Інституту, так само як і багатьох їхніх колег з інших академічних установ, заслуговує на глибоку повагу замість нинішнього зневажливого ставлення з боку урядовців і політиків, які не мають жодного уявлення про діяльність і досягнення Академії. Однак навіть за таких обставин Інститут робить усе від нього залежне, щоб підтримувати імідж України як країни з високим рівнем фундаментальної науки. Співробітники Інституту віряють у те, що теоретична фізика в Україні має майбутнє.

### REFERENCES

1. Boyarsky A., Ruchayskiy O., Iakubovskiy D., Franse J. Unidentified line in X-ray spectra of the Andromeda galaxy and Perseus galaxy cluster. *Phys. Rev. Lett.* 2014. **113**(25): 251301.
2. Boyarsky A., Franse J., Iakubovskiy D., Ruchayskiy O. Checking the dark matter origin of a 3.53 keV line with the Milky Way center. *Phys. Rev. Lett.* 2015. **115**(16): 161301.
3. Gazdzicki M., Gorenstein M.I. Structure and dynamics of elementary matter. *Acta Phys. Polon. B.* 1999. **30**: 2705.
4. Gusynin V.P., Sharapov S.G. Unconventional integer quantum Hall effect in graphene. *Phys. Rev. Lett.* 2005. **95**(14): 146801.
5. Zhang Y., Tan Y.-W., Stormer H.L., Kim P. Experimental observation of the quantum Hall effect and Berry's phase in graphene. *Nature.* 2005. **438**: 201.
6. Gusynin V.P., Sharapov S.G., Carbotte J.P. Unusual microwave response of Dirac quasiparticles in graphene. *Phys. Rev. Lett.* 2006. **96**(25): 256802.
7. Kravchuk V., Sheka D., Gaididei Yu., Mertens F.G. Controlled vortex switching in magnetic nanodisks by a rotating magnetic field. *J. Appl. Phys.* 2007. **102**(4): 043908.
8. Kravchuk V.P., Gaididei Yu., Sheka D.D. Nucleation of a vortex-antivortex pair in the presence of an immobile magnetic vortex. *Phys. Rev. B.* 2009. **80**(10): 100405(R).
9. Volkov O.M., Kravchuk V.P., Sheka D.D., Gaididei Yu. Spin-transfer torque and current-induced vortex superlattices in nanomagnets. *Phys. Rev. B.* 2011. **84**(5): 052404.

10. Gaididei Yu., Volkov O.M., Kravchuk V.P., Sheka D.D. Magnetic vortex-antivortex crystals generated by spin-polarized current. *Phys. Rev. B*. 2012. **86**(14): 144401.
11. Gaididei Yu., Kravchuk V.P., Sheka D.D. Curvature effects in thin magnetic shells. *Phys. Rev. Lett.* 2014. **112**(25): 257203.
12. Sheka D.D., Kravchuk V.P., Gaididei Yu. Curvature effects in statics and dynamics of low dimensional magnets. *J. Phys. A*. 2015. **48**(12): 125202.
13. Pylypovskyi O.V., Kravchuk V.P., Sheka D.D., Makarov D., Schmidt O.G., Gaididei Yu. Coupling of chiralities in spin and physical spaces: The Möbius ring as a case study. *Phys. Rev. Lett.* 2015. **114**(19): 197204.
14. Lev B.I., Zhugayevich A.Ya. Statistical description of model systems of interacting particles and phase transitions accompanied by cluster formation. *Phys. Rev. E*. 1998. **57**: 6460.
15. Grigorishin K.V., Lev B.I. Cluster formation in the system of interacting Bose particles. *Phys. Rev. E*. 2005. **71**(6): 066106.
16. Lev B.I. Nonequilibrium self-gravitating system. *Int. J. Mod. Phys. B*. 2011. **25**(16): 2237.
17. Lev B.I., Zagorodny A.G. Statistical description of Coulomb-like systems. *Phys. Rev. E*. 2011. **84**: 061115.
18. Turiv T., Lazo I., Brodin A., Lev B.I., Reiffenrath V., Nazarenko V.G., Lavrentovych O.D. Effect of collective molecular reorientation on Brownian motion of colloids in nematic liquid crystal. *Science*. 2013. **342**(6164): 1351.
19. Lev B.I., Zagorodny A.G. Pattern formation in the models with coupling between order parameter and its gradient. *Eur. Phys. J. B*. 2013. **86**(10): 422.
20. Lev B.I., Rozhkov S.S., Zagorodny A.G. Model of a scalar field coupled to its gradients. *Europhys. Lett.* 2015. **111**(2): 26003.
21. Petrov E.G. Towards a many-body theory of the combined elastic and inelastic transmission through a single molecule. *Chem. Phys.* 2006. **326**(1): 151.
22. Petrov E.G. Formation of a current through organic molecules with strongly separated energy levels. *Mol. Cryst. Liq. Cryst.* 2007. **467**(1): 3.
23. Petrov E.G., Shevchenko Ye.V., May V., Hanggi P. Transient switch-on/off currents in molecular junctions. *J. Chem. Phys.* 2011. **134**(20): 204701.
24. Milias-Argeitis A., Lygeros J. Steady-state simulation of metastable stochastic chemical systems. *J. Chem. Phys.* 2013. **138**(18): 184109.
25. Petrov E.G., Marchenko A., Kapitanchuk O.L., Katsonis N., Fichou D. Conductance mechanism in a linear non-conjugated trimethylsilyl-acetylene molecule: tunneling through localized states. *Mol. Cryst. Liq. Cryst.* 2014. **589**(1): 3.
26. Schram P.P., Sitenko A.G., Trigger S.A., Zagorodny A.G. Statistical theory of dusty plasmas: Microscopic equations and Bogolyubov-Born-Green-Kirkwood-Yvon hierarchy. *Phys. Rev. E*. 2001. **63**(1): 016403.
27. Zagorodny A.G. Bogolyubov-Born-Green-Kirkwood-Yvon hierarchy and the kinetic theory of dusty plasmas. *Theor. Math. Phys.* 2009. **160**(2): 1101.
28. Bystrenko O., Zagorodny A. Screening of dust grains in a weakly ionized gas. Effects of charging by plasma currents. *Phys. Rev. E*. 2003. **67**(6): 066403.
29. Bystrenko T., Zagorodny A. Effects of bound states in the screening of dust particles in plasmas. *Phys. Lett. A*. 2002. **299**(4): 383.
30. Filippov A.V., Zagorodny A.G., Momot A.I., Pal A.F., Starostin A.N. Kinetic description of the screening of the charge of macroparticles in a nonequilibrium plasma. *JETP Lett.* 2007. **86**(12): 761.
31. Semenov I.L., Zagorodny A.G., Krivtsun I.V. A kinetic study of dust grain screening based on the numerical solution of the Vlasov-Bhatnagar-Gross-Krook equations. *Phys. Plasmas*. 2011. **18**(10): 102110.
32. Filippov A.V., Zagorodny A.G., Momot A.I., Pal' A.F., Starostin A.N. Screening of a moving charge in a nonequilibrium plasma. *J. Exp. Theor. Phys.* 2009. **108**(3): 497.
33. Semenov I.L., Zagorodny A.G., Krivtsun I.V. Ion drag force on a dust grain in a weakly ionized collisional plasma. *Phys. Plasmas*. 2013. **20**(1): 013701.
34. Lev B., Tymchyshyn V., Zagorodny A. Influence of charging current fluctuations on the grain velocity distribution in weakly-ionized plasmas. *Phys. Lett. A*. 2011. **375**(3): 593.

*А.Г. Загородний*

Институт теоретической физики им. Н.Н. Боголюбова НАН Украины (Киев)

СОЗДАНИЕ И РАЗВИТИЕ ИНСТИТУТА ТЕОРЕТИЧЕСКОЙ ФИЗИКИ  
ИМ. Н.Н. БОГОЛЮБОВА НАН УКРАИНЫ

К 50-летию со дня основания учреждения

Рассмотрены основные вехи истории Института теоретической физики им. Н.Н. Боголюбова НАН Украины, формирования и развития научных школ. Представлены главные направления деятельности Института и важнейшие научные достижения его сотрудников.

*A.G. Zagorodny*

Bogolyubov Institute for Theoretical Physics of National Academy of Sciences of Ukraine (Kyiv)

FOUNDATION AND DEVELOPMENT OF BOGOLYUBOV INSTITUTE  
FOR THEORETICAL PHYSICS OF NAS OF UKRAINE

On the 50th anniversary of the Institute

The milestones in the history of the Bogolyubov Institute for Theoretical Physics of the National Academy of Sciences of Ukraine, formation and development of scientific schools are overviewed. The main directions of research of the Institute and the most important scientific results are highlighted.