

**Основні досягнення
Інституту теоретичної фізики ім. М.М. Боголюбова
Національної академії наук України
у 2020-2024 рр.**

1. Загальна характеристика
2. Головні наукові результати
3. Впровадження інформаційних технологій
4. Міжнародна співпраця
5. Освітній процес
6. Популяризація науки

1. Загальна характеристика

Головна місія Інституту теоретичної фізики ім. М.М. Боголюбова Національної академії наук України полягає у проведенні фундаментальних та прикладних наукових досліджень в галузі теоретичної фізики з метою одержання нових знань та їх використання для практичних цілей. Протягом 2020 – 2024 рр. інститут продовжив успішно виконувати свої статутні завдання. Проводилися дослідження в різних галузях теоретичної фізики, зокрема в квантовій теорії поля, фізиці елементарних частинок, астрофізиці і космології, ядерній фізиці, теорії конденсованих середовищ, теорії плазми, нанофізиці, синергетиці, дослідженнях нелінійних явищ в багаточастинкових системах, біофізиці, математичній фізиці і математичному моделюванні. На сьогодні інститут налічує 9 наукових відділів і 4 лабораторії, в яких працюють понад 100 науковців.

За результатами роботи протягом 5 років було опубліковано близько 800 статей, з яких понад 80% у міжнародних журналах. Міністерство освіти і науки України визнало інститут лідером серед наукових організацій України за кількістю публікацій у міжнародних виданнях з високими індексами впливовості (квартилями Q1-Q2). Молоді вчені інституту стали лауреатами Премії Верховної Ради України, аспіранти успішно захистили свої дисертації за програмою підготовки докторів філософії «Теоретична фізика». Працювала спеціалізована вчена рада, здійснювала свою роботу кафедра теоретичної і математичної фізики Київського академічного університету, чітко і злагоджено працювали редакція Українського фізичного журналу, фінансові, допоміжні та господарські служби інституту.

В 2024 р. було ухвалено нову стратегію розвитку інституту і затверджено нові наукові напрями (Постанова Президії НАН України №354 від 18.09.2024):

- фізика високих енергій, астрофізика і космологія, ядерна фізика;
- квантова теорія поля, симетрії в квантовій фізиці, теорія інтегровних систем;
- квантові матеріали, квантова оптика, квантові технології;
- теорія конденсованих середовищ та нелінійних динамічних систем, нанофізика;

- фізика нерівноважних систем, синергетика;
- фізика м'якої речовини, біофізика;
- інформаційні технології, машинне навчання та обчислювальні методи в теоретичній фізиці.

2. Головні результати

Фізика високих густин енергій. Інститут теоретичної фізики ім. М.М. Боголюбова НАН України є однією з небагатьох наукових установ в Україні, що проводять теоретичні дослідження в галузі фізики високих енергій та елементарних частинок. Між Інститутом та CERN було підписано меморандум про взаєморозуміння щодо майбутнього кругового колайдера (CERN FCC) [https://bitp.kiev.ua/files/doc/institute/agreements/Memorandum_CERN.pdf].

Інститут також підтримує тісні контакти з колаборацією ALICE у CERN і має договір про співпрацю, який, зокрема, дозволяє співробітникам Інституту представляти Україну в колаборації. В галузі фізики високих енергій було одержано низку результатів світового рівня, серед яких можна навести такі.

Розвинуто модель фруассарона та максимального оддерона (ФМО) для описання процесів розсіяння протонів та антипротонів з малою передачею імпульсів ще у 2018 році. Ця модель була запропонована Євгеном Мартиновим та Басарабом Ніколеску і потім вдосконалена та застосована для опису експериментів TOTEM та Tevatron при енергіях від 1 до 13 TeV. Було показано, що залежності диференціального перерізу розсіяння від переданого імпульсу та значення повного перерізу розсіяння, в тому числі в експериментах з поляризованими частинками, добре узгоджуються з моделлю ФМО, яка передбачає обмін оддероном у таких процесах (<https://doi.org/10.1140/epja/s10050-021-00563-z>). Існування оддерона, передбаченого цією моделлю, було експериментально підтверджено у 2021 році і стало одним із найбільших експериментальних досягнень після виявлення бозона Хігса. Великий внесок інституту до відкриття оддерона відмічений також у офіційному повідомленні CERN Courier у 2021 [<https://cerncourier.com/a/odderon-discovered>]. Це відкриття не лише має велике теоретичне значення, а й стало підтвердженням невідомих раніше механізмів сильної взаємодії. Крім того, воно сприяло розвитку плідної співпраці між Україною та CERN, що стало важливим кроком для подальшого розвитку науки. Завдяки цій співпраці були ініційовані нові експерименти з протон-протонних і протон-антипротонних розсіань у США (Tevatron) і Європі (CERN). Ці експерименти стали основою для подальших теоретичних і експериментальних досліджень у фізиці високих енергій.

Теоретичні роботи вчених інституту щодо порушення ізоспінової симетрії мотивували проведення точніших експериментів, які згодом були проведені колаборацією NA61/SHINE в CERN. Приблизна ізоспінова симетрія між u та d кварками є частиною загальної ароматної симетрії у квантовій хромодинаміці

(КХД). У випадку точної симетрії кількість заряджених (K^+ і K^-) та нейтральних (K^0 і анти- K^0) мезонів, що народжуються у ядро-ядерних зіткненнях, повинна бути однаковою. У роботі (<https://doi.org/10.48550/arXiv.2312.07176>) враховано всі відомі ефекти порушення цієї симетрії, і показано, що вони призводять до порушення цієї рівності на кілька відсотків. Однак попередні експериментальні результати вказують на значно більші відхилення, що свідчить про наявність інших, досі невідомих, ефектів порушення симетрії.

Проводилися дослідження еволюції адронної і кварк-глюонної матерії у релятивістських ядро-ядерних зіткненнях, яка включає декілька ключових етапів. Спочатку відбувається формування початкового надщільного стану матерії, після чого розгортається процес її термалізації. Далі система еволюціонує відповідно до рівнянь гідродинаміки, поступово переходячи у стадію розпаду на окремі частинки – адрони. Завершальний етап – це еволюція взаємодіючого адронного газу, яка приводить до формування фізичних спостережуваних величин. Всі ці процеси були враховані у інтегрованій гідрокінетичній моделі, що розроблена в інституті, для процесів ядро-ядерних зіткнень від 1 Гев до 10 ТеВ. За допомогою цієї моделі вже було описано ряд найсучасніших експериментів за ультрарелятивістських енергій (<https://doi.org/10.1140/epja/s10050-020-00266-x>). Роботи з розвитку інтегрованої гідрокінетичної моделі тісно пов'язані з експериментами на Великому адронному колайдері (LHC), Релятивістському колайдері важких іонів (RHIC) та майбутніми експериментами на прискорювачах у Німеччині (FAIR CBM). Ці дослідження є частиною міжнародного співробітництва України з науковими установами та організаціями Європи, зокрема з Ecole des Mines of Nantes (Франція), University of Nantes (Франція) та Warsaw University of technology (Польща).

Виходячи з перших принципів була побудована фазова діаграма квантової хромодинаміки (КХД) за ненульової баріонної густини, що є однією з найважливіших проблем фізики високих енергій. Хромоелектричні екрануючі маси визначають важливу непертурбативну шкалу у фазі деконфайнменту КХД. Числові розрахунки цих мас за скінченної густини ускладнені проблемою знака, тому досі виконувалися з уявним хімічним потенціалом. Було використано дуальне формулювання ефективної моделі з полюсами Полякова в КХД і обчислені кореляційні функції полюсів Полякова (<https://doi.org/10.1016/j.nuclphysb.2021.115332>). Це дозволило чисельно оцінити екранувальні маси, а також аналітично обчислили їх у наближенні середнього поля та порівняти з числовими результатами. Роботи в цьому напрямі сприяють залученню України до Європейських досліджень у фізиці високих енергій.

Дослідження нової форми сильновзаємодійної матерії – кварк-глюонної плазми, що виникає внаслідок зіткнень високоенергетичних ядер, належить до ключових завдань сучасної фундаментальної фізики. У 2020–2024 рр. науковці інституту під керівництвом проф. М.І. Горенштейна отримали важливі

результати, які істотно вплинули на подальший розвиток цього напрямку. Зокрема, розроблено теорію флуктуацій баріонного числа, яку застосували для експериментального дослідження релятивістських ядро-ядерних зіткнень (<https://surl.gd/vrqkli>). Методи розвинутої теорії використовуються експериментальними колабораціями CBM FAIR на прискорювачі елементарних частинок в Дармштадті, Німеччина, а також в ЦЕРНі: колабораціях NA61/SHINE та ALICE, які працюють на прискорювачах SPS та LHC відповідно.

Астрофізика і космологія. Роботи в області астрофізики і космології спрямовані на побудову цілісної картини еволюції раннього Всесвіту, глибшого розуміння Всесвіту, який нас оточує. В галузі астрофізики і космології одержано низку результатів світового рівня, серед яких можна навести такі.

На основі аналізу спостережень іонізаційного випромінювання галактик з активним зореутворенням і дослідження хімічного складу речовини в далеких галактиках, які проведено при виконанні чотирнадцяти спостережних програм на космічних телескопах Хаббла і Джеймса Вебба, доведено, що карликові галактики були головним джерелом реіонізації речовини у ранньому Всесвіті, коли розпочалось утворення перших галактик (цикл статей Ю. І. Ізотова та Н. Г. Гусевої).

Визначено хімічний склад близьких і далеких компактних галактик за даними спостережень на космічних телескопах Хаббла і Джеймса Вебба та найбільших наземних телескопах. Доведено, що збагачення галактик важкими елементами (такими як вуглець, азот і кисень) в епоху реіонізації відбувалось дуже швидко. Результати досліджень Ю. І. Ізотова та Н. Г. Гусевої, викладені в циклі статей, пов'язані з питанням, як близько від початку Всесвіту почали утворюватись перші зорі і галактики; коли і як швидко в зорях почали синтезуватись хімічні елементи, такі як вуглець, азот, кисень та інші, необхідні для утворення планет і біологічного життя на них; наскільки подібно до нашого локального оточення можуть розвиватись галактики на цих надзвичайно далеких відстанях. Їхні дослідження є піонерськими, широко цитуються і використовуються іншими дослідниками у світі. Кількість посилань на публікації за період 2020–2024 рр. становить понад 900 <https://tinyurl.com/494k8y2y>.

Співробітники інституту працюють над проблемою темної матерії. Природа темної матерії досі не встановлена і лежить за межами Стандартної моделі елементарних частинок та взаємодій. В роботах Ю.В. Штанова розвинуто модель темної матерії на основі простої модифікації ейнштейнівської теорії гравітації ([DOI:10.1088/1475-7516/2024/12/028](https://doi.org/10.1088/1475-7516/2024/12/028)). Перевагою цієї моделі є те, що вона містить лише один додатковий вільний параметр – масу частинки темної матерії, і тому є найбільш передбачуваною. Показано, що така темна матерія може генеруватись у космологічну епоху електрослабкого переходу.

Густина числа малих гало темної матерії, що містять слабкі галактики з великим червоним зміщенням, чутлива до власних (теплових) рухів частинок

темної матерії. А. В. Рудаковський і Д. О. Савченко із співавторами на основі аналізу ультрафіолетових функцій світності оцінили співвідношення «теплої» і «холодної» компонент темної матерії ([DOI:10.1093/mnras/stab2333](https://doi.org/10.1093/mnras/stab2333)).

Фізика конденсованого стану речовини. Вагомі результати були отримані при вивченні фізичних властивостей новітніх функціональних матеріалів на основі низьковимірних полімерів, біологічних макромолекул, графену, одно- та багат шарових діраківських і надпровідних матеріалів та інших систем, ролі неупорядкованостей в них та впливу на них зовнішніх полів, неоднорідностей структури та керованих просторово-неоднорідних деформацій. Ці матеріали широко застосовуються у сучасних технологіях, таких як наноелектроніка, спінтроніка, технології на основі біомімікрії, у пристроях альтернативних джерел енергії (сонячні панелі, батареї та ін.). Наші дослідження демонструють можливість керування цими процесами за допомогою зовнішніх постійних та змінних у часі електромагнітних полів. В галузі фізики конденсованого стану речовини було одержано низку результатів світового рівня, серед яких можна навести такі.

Досліджено фізичні механізми взаємодії протийонів та активних молекул з ДНК. Встановлено, що суттєву роль у взаємодії молекулярних іонів з ДНК відіграє їх конформаційна гнучкість (<https://doi.org/10.1016/j.molliq.2023.122828>). Показано, що ефекти гідратації при взаємодії іонів металів з ДНК, є важливими у випадку появи в середовищі активних молекули пероксиду водню. Дослідження взаємодії молекул пероксиду водню з ДНК в присутності молекул води та іонів металів дозволили авторам запропонувати механізм іонної терапії дії для лікування ракових захворювань. За ці роботи С.Н. Волков та С.М. Перепелиця отримали премію імені О.С. Давидова НАНУ у 2022 р.

Працівниками інституту (Л.С. Брижик, О.О. Єремко, В.М. Локтев) знайдено новий інваріант для рівняння Дірака з потенціалом Кулона, за допомогою якого отримано розв'язок цього рівняння. Розраховано загальний оператор спін-орбітальної взаємодії, визначено розподіл середнього значення напрямку спіна у зв'язаних електронних станах і показано, що він може бути виявлений експериментально (doi.org/10.1016/j.aop.2022.168786). У 2022 році цей результат було відзначено Боголюбовською премією.

Досліджувались фізичні властивості графену і діраківських матеріалів, які представляють значний інтерес для побудови новітніх технологій. Зокрема, в роботах В.П. Гусиніна ([DOI:10.1103/PhysRevB.103.195104](https://doi.org/10.1103/PhysRevB.103.195104), [DOI:10.1103/PhysRevB.106.115143](https://doi.org/10.1103/PhysRevB.106.115143)) вивчено електронні стани, електричну та оптичну провідності, магнітну сприйнятливність, генерацію щілини в енергетичному спектрі квазічастинкових збуджень, а отже, можливість переходу метал-діелектрик. Також було досліджено вплив зовнішніх факторів, таких як температура, легування, деформація та електромагнітні поля, на ці властивості.

Дослідження електронних систем з повністю або майже бездисперсійними енергетичними зонами, в яких енергія слабо залежить від імпульсу, є одним з

актуальних напрямів в сучасній фізиці конденсованих середовищ. У роботах В.П. Гусиніна і Е.В. Горбара вивчено генерацію щілини в енергетичному спектрі квазічастинкових збуджень у т. зв. *дайс моделі* з локальною кулонівською взаємодією і показано, що внаслідок присутності повністю плоскої енергетичної зони щілина генерується для будь якої завгодно малої константи зв'язку.

Отримано спектри квазічастинкових збуджень, розрахована густина станів тетраграфену, встановлено існування сингулярностей ван Хофа високого порядку в спектрі квазічастинкових збуджень та виділені їх внески в густину станів і орбітальну намагніченість. Розраховано повздовжню та холівську провідності залежні від частоти для систем з псевдоспіном одиниця і анізотропною дисперсією квазічастинок. Виявлено особливості оптичних переходів між дисперсійними або плоскою та дисперсійною зонами.

Для графена та силіцена виходячи з першооснов знайдено роботу виходу та її залежність від однорідної деформації, обчислені коефіцієнти Пуассона, пов'язані із деформаціями в кріслоподібному та зигзагоподібному напрямках. Отримано деформаційний потенціал як функцію прикладеної деформації, а знайдену залежність підтверджено експериментально

Запропоновано експеримент, який дозволить спостерігати колапс рівнів Ландау у матеріалах, подібних до графену (doi.org/10.1103/PhysRevB.101.245115).

Знайдено електронні спектри олігомерів, що є базовими одиницями для побудови нанострічок.

Розраховано параметри Давидовського солітона у зовнішньому змінному у часі магнітному полі та розвинуто механізм нетеплової дії полів на носії заряду та терапевтичної дії таких полів на біологічні системи.

Показано вплив дискретності на процес зчитування стану кубіта, змодельованого просторовою неоднорідністю змінної полярності в довгій джозефсонівській лінії передачі. Знайдено різницю часів проходження флюксоном цієї лінії з кубітом в різних станах (doi.org/10.1088/1751-8121/abd156).

Нанофізика і мікроелектроніка. У кремнієвій, молекулярній електроніці та оптоелектроніці енергія і інформація переносяться зарядами, електронами та дірками. Робота відповідних електронних пристроїв керується головним чином зміною напруги зміщення та затвора. Якщо в структурі пристрою присутні парамагнітні іони, то наявність спінів дозволяє додатково керувати перенесенням заряду за допомогою магнітного поля. Цей додатковий контроль використовується в спінтроніці, де, як і в електроніці, заряджені частинки діють як носії енергії та інформації. Однак через джоулеву теплоту, що випромінюється пристроєм під час транспортування заряду, заряди погано підходять для передачі інформації на нанорозмірні відстані. Тому для такої передачі найбільш придатні незаряджені носії, для чого пропонується використовувати спінові збудження впорядкованих парамагнітних іонів, так звані спінові хвилі. Експеримент показує, що в магнітоупорядкованих

діелектриках кванти спінової хвилі, магнони, можуть поширюватися на досить великі відстані. Наприклад, у кристалах ітрієвого гранату ці відстані становлять близько кількох сантиметрів. Це робить магнони придатними для використання в квантових комунікаціях. Помічено також, що магнони досить добре взаємодіють з фононами і фотонами - відповідно квантами коливань атомних ядер відносно їхніх рівноважних положень і квантами електромагнітного поля. На основі цього вдалося створити гібридні пристрої, які являють собою мікропорожнини з введеними в них наномагнітами. У таких фотон-магنونних резонаторах виникають електромагнітні коливання з частотами порядку гіга- і терагерц, що також відповідає частотам збудження статичних магنونів. Тому завдяки сильному фотон-магنونному зв'язку кванти фотонів здатні генерувати магنونні кванти. Це відкриває широкі можливості ефективного перетворення одних квантів збудження в інші з метою використання гібридних фотон-магنونних резонаторів у квантовій технології. Ми запропонували фізичний механізм, згідно з яким магнони, що генеруються в одному з резонаторів, можуть бути передані в інший резонатор через феромагнітні нанорозмірні ланцюжки. Таку передачу можна здійснити за допомогою магنونного тунелювання, що вказує на новий спосіб реалізації квантової комунікації. Співробітниками інституту одержано низку вагомих фундаментальних результатів в цьому напрямі.

Досліджено електронні властивості графенових квантових точок. Були отримані енергетичні спектри, хвильові функції та щільність електронних станів, які спостерігаються за допомогою скануючої тунельної спектроскопії в цих квантових точках. На основі проведених розрахунків запропоновано моделі наносенсорів. (<https://doi.org/10.1103/PhysRevB.103.235102>).

З'ясовано механізми формування електронного струму, знайдено потужність випромінювання молекули флуорофора. Розглянуто електролюмінесценцію в молекулярному з'єднанні на основі флуорофору ZnPc. Отримано аналітичні вирази для швидкостей, що визначають характерні часи встановлення рівноважного струму та потужності світловипромінювання. Оцінки показують, що в транзисторі на основі ZnPc характерний час переходу становить 10-100 пс, якщо струм знаходиться в діапазоні 0,1-10 нА ([doi: 10.1063/5.0119257](https://doi.org/10.1063/5.0119257)).

Проведено теоретичне дослідження механізму перенесення магنونів через феромагнітний наноланцюг між магнітоупорядкованими контактами. Розглянуто режим передачі спінових збуджень, коли містком для передачі магنونів є внутрішня ділянка ланцюга з однаковими парамагнітними ланками. Таким чином, ланцюг слабо заселений магнонами, що забезпечує когерентний транспорт безструмових збуджень на великі, в атомних масштабах, відстані. Показано, що перенесення магнона може здійснюватися шляхом послідовного стрибка локалізованого магнона через усі ланки ланцюга або шляхом тунелювання локалізованого магнона між кінцевими ланками ланцюга за механізмом «суперобміну». Виявлено аналітичну залежність відповідних швидкостей передачі від кількості парамагнітних місткових ланок. Наведено

магнетний аналог ефектів Зеебека і Пельтьє, які характеризують ефективність перенесення магнетних квантів. ([doi:10.1063/5.0189726](https://doi.org/10.1063/5.0189726)).

Результати розрахунків на основі теорії функціоналу густини у поєднанні з даними скануючої тунельної спектроскопії експериментів щодо структури самоорганізованих моношарів сегнетоелектричних нематичних рідкокристалічних молекул адсорбованих на атомно-гладкій поверхні золота застосовано до побудови феноменологічної моделі упаковки молекул у моношарі. Результати поглиблюють фундаментальні знання про процеси та механізми впорядкування молекул у сегнетоелектричних нематичних рідких кристалах. (doi.org/10.1103/PhysRevLett.132.098101).

Досліджено випадкові блукання ланцюжками з ресетингом за довільних граничних умов. Обчислено всі основні спостережні (розподіли ймовірностей, часи першого досягнення, парціальні ймовірності "успіху-невдачі", коефіцієнти варіації) та ефекти оптимізації пошуку цілі. Результати застосовано для пояснення контр-інтуїтивного ефекту прискорення ензиматичної реакції зі збільшенням швидкості непродуктивного розпаду фермент-субстратного комплексу. (doi.org/10.1088/1751-8121/ac5a21).

Теорія ядра і квантова теорія поля. Актуальною для суспільства залишається проблема безпеки об'єкту «Укриття-2» на ЧАЕС, особливо після ворожої атаки на цей об'єкт і часткового руйнування його покрівлі. Дослідження, проведені в роботі В.А. Бабенка зі співавтором (doi.org/10.15407/jnpae2023.03.239), дозволяють передбачати з позиції ядерної безпеки можливі наслідки робіт по видаленню води з матеріалів, які містять залишки ядерного палива під «саркофагом». Показано, що під час такої роботи може виникнути нейтронний спалах. Встановлено, що потік нейтронів може становити небезпеку для персоналу. Проте такі інциденти не позначатимуться на навколишньому середовищі. Знайдено залежність амплітуди нейтронного спалаху від швидкості видалення води і дано рекомендації, як зменшити інтенсивність нейтронних спалахів, що впливатиме на подальше планування робіт на об'єкті.

Розроблено нові підходи до вирішення «космологічної проблеми літію», які пояснюють нестачу ${}^7\text{Li}$ у старих зорях через додаткові ядерні реакції руйнування ${}^7\text{Be}$ у ранньому Всесвіті (doi.org/10.1103/PhysRevC.109.045803, doi.org/10.1103/PhysRevC.110.035806, doi.org/10.1007/s00601-024-01881-w).

Розроблено модель, що враховує багаторівневі ядерні процеси, зокрема ефекти кластерної поляризації, які суттєво впливають на енергію та ширину резонансних станів у легких ядрах і гіперядрах (doi.org/10.1016/j.nuclphysa.2021.122325).

Досліджено збуджені стани ізотопів літію, берилію, бору та карбону. Отримано ротаційні спектри і хвильові функції кластерних систем. Визначено вплив кулонівської взаємодії на резонансні стани дзеркальних ядер.

Проаналізовано порогові ядерні реакції із виходом нейтрино та антинейтрино (doi.org/10.1016/j.nuclphysa.2020.121692, doi.org/10.1007/978-3-030-32357-8_28).

Пояснено структурні функції основного і першого збудженого стану дзеркальних ядер ^{14}C і ^{14}O в рамках п'ятикластерної моделі (doi.org/10.1016/j.nuclphysa.2022.122588).

Розроблено трикластерний підхід для дослідження легких гіперядер. Вперше розраховано спектр зв'язаних і резонансних станів $\Lambda^9\text{Be}$ і фази пружного та непружного розсіяння Λ -гіперона на ядрі ^8Be (doi.org/10.1016/j.nuclphysa.2021.122325).

Розроблено теорію поляризації вакууму квантованого ферміонного поля космічною струною із врахуванням її поперечних розмірів (doi.org/10.1103/PhysRevD.106.105010).

Досліджено термодинамічні властивості системи взаємодіючих скалярних бозонів за скінчених температур. Показано, що при збереженні ізотопічного спіну (заряду) в релятивістській системі частинок-античастинок, починаючи з нульових температур, існує бозе-конденсат. Дано класифікацію фазових переходів в такій системі (doi.org/10.3390/universe9090411, doi.org/10.15407/ujpe69.8.560).

Встановлено достатню умову для просторового колапсу в нескінченній системі взаємодіючих бозе-частинок і показано, що вона не пов'язана з довжиною розсіяння. (Б.Є.Гринюк) (doi.org/10.15407/ujpe66.12.1024, doi.org/10.15407/ujpe67.1.17).

Пояснено множинності легких анти- та гіпер-ядер, виміряних у зіткненнях ядер на детекторі ALICE LHC за енергій 2.76 TeV, і колаборацією STAR BNL при 200 GeV. (К.О.Бугаєв, Б.Є.Гринюк) (doi.org/10.1142/S0218301320400091, doi.org/10.1140/epja/s10050-020-00296-5).

Математичні методи в теоретичній фізиці.

На основі аналізу даних з бази SPARC спіральних та нерегулярних галактик виявлено нелінійний характер самодії і передбачено нові ефекти в темній матерії. Результати будуть корисними для пояснення спостережуваних даних.

Запропонований асимптотичний метод стискання багаточислової системи до нульових розмірів дозволяє ефективно аналізувати зв'язані стани в системах із сингулярними потенціалами, що є важливим для застосувань у квантовій електроніці та нанотехнологіях.

Розроблений метод ефективних форм-факторів є корисним для дослідження кореляційних властивостей квантових багаточастинкових систем на одновимірних ґратках. Він відкриває нові шляхи для вивчення квантових ефектів у низьковимірних системах, зокрема у конденсованих середовищах.

3. Розвиток інформаційних технологій

Протягом 2021-2022 року в рамках активної участі співробітника Інституту теоретичної фізики ім. М.М. Боголюбова НАН України (ІТФ) С.Я. Свістунова в Робочій групі *МОН* було розроблено *Національний план відкритої науки*, який був затверджений розпорядженням Кабінету Міністрів України від 8 жовтня 2022 № 892-р, він започаткував практичне впровадження принципів *відкритої науки* в Україні. На виконання цього плану Президія НАН України ухвалила постанову «Щодо участі НАН України в реалізації європейських принципів відкритої науки» від 02.11.2022 № 327 і організувала робочу групу з питань відкритої науки.

Практичну реалізацію переходу до відкритої науки було покладено на цільовий науково-технічний проєкт НАН України «Створення й впровадження інфраструктури відкритої науки в НАН України (OPENS) на 2023-2024 рр.», одним з виконавців якого був ІТФ. На інститут була покладена відповідальність за впровадження *Репозитарію відкритих даних*. Результатом реалізації частини проєкту співробітниками ІТФ є введення в промислову експлуатацію Репозиторію відкритих даних НАН України DataverseUA. *Репозитарій DataverseUA* надає відкритий доступ в електронній формі до дослідницьких даних та пов'язаних з ними файлів, розміщених на умовах відкритого доступу, через офіційний вебпортал Репозитарію DataverseUA за посиланням <https://opendata.nas.gov.ua/>.

Розміщені в Репозитарії DataverseUA набори даних досліджень співробітників НАН України отримують унікальний ідентифікатор DOI, що забезпечує пошук та повторне використання даних досліджень зі збереженням авторських прав надавача даних. Розроблено *Регламент* Репозитарію відкритих даних НАН України, який визначає порядок функціонування та експлуатації Репозитарію DataverseUA. Крім того, були розроблені основні нормативні документи, які забезпечують впровадження відкритої науки в НАН України, а саме «Концепція реалізації європейських принципів відкритої науки в НАН України на 2024-2030 рр.», затверджена постановою НАН України від 29.11.2023 № 400, та «Положення про відкриту науку в НАН України», затверджене розпорядженням Президії НАН України від 12.06.2024 № 350.

Протягом 2020-2024 років виконувалися роботи по вдосконаленню функціонування *Українського національного гріду (UNG)*, який забезпечує підтримку обробки великих даних та інтеграцію в Європейську грід-інфраструктуру. Найважливішим результатом виконання проєктів за ці роки є забезпечення надійної роботи обчислювального та хмарного кластерів в Центрі колективного користування «Ресурсний центр для грід- та хмарних технологій» в ІТФ. В рамках робіт по програмі *Horizon 2020* виконувалася координація та планування стратегічної діяльності у співпраці з робочими групами федерації *Європейської грід-інфраструктури EGI* щодо розповсюдження сервісів *Європейської хмари відкритої науки EOSC*, реалізації політики доступу до цих хмарних сервісів та роботи з навчання і підтримки користувачів.

Інститут теоретичної фізики ім. М.М. Боголюбова НАН України виступив ініціатором та координатором частини проєктів з побудови інфраструктури відкритої науки в НАН України.

С.Я. Свістунов брав участь в розробці *Національного плану заходів щодо впровадження принципів відкритої науки до 2026 р.* та *планів ефективного управління науковими даними* закладами вищої освіти та науковими установами (участь в робочій групі МОН), *Концепції реалізації європейських принципів відкритої науки* в НАН України на 2024-2030 рр. та *Положення про відкриту науку* в НАН України (участь в робочій групі НАН України). С.Я. Свістунов був керівником проєктів введення в промислову експлуатацію *Репозитарію відкритих даних* НАН України, а співробітники відділу П.В. Свірін, Ю.В. Гончар були виконавцями проєктів. С.Я. Свістунов був керівником проєктів з вдосконалення функціонування *Українського національного гріду (UNG)*, який забезпечує національну підтримку обробки великих даних та інтеграцію в Європейську грид-інфраструктуру та проєктів з забезпечення надійної роботи обчислювального та хмарного кластерів в Центрі колективного користування «Ресурсний центр для грид- та хмарних технологій» в ІТФ, а співробітники відділу В.В. Пелих, Ю.В. Гончар, І.М. Маковський були виконавцями проєктів.

Офіційне представництво України в *Європейській грид-інфраструктурі (EGI)* та *Європейській хмарі відкритої науки (EOSC)*: С.Я. Свістунов є офіційним представником від України в цих організаціях.

Важливість інтеграції української науки в *Європейську хмару відкритої науки* та *Європейську інфраструктуру даних* було підкреслено в Розпорядженні Кабінету Міністрів України (КМУ) від 17 січня 2018 № 67-р «Про схвалення Концепції розвитку цифрової економіки та суспільства України на 2018-2020 роки та затвердження плану заходів щодо її реалізації».

В цьому контексті створення робочої групи з розробки Національного плану заходів щодо впровадження принципів відкритої науки до 2026 року (наказ Міністерства освіти і науки України №614 від 02.06.2021 року) було реальним кроком по реалізації *Європейських принципів відкритої науки* в Україні. А затвердження КМУ розпорядження «Про затвердження національного плану щодо відкритої науки» (8 жовтня 2022 р. № 892-р.) ініціювало процес практичної реалізації стратегії переходу до відкритої науки.

На виконання цього плану Президія НАН України ухвалила постанову «Щодо участі НАН України в реалізації європейських принципів відкритої науки» (від 02.11.2022 № 327) і організувала робочу групу з питань відкритої науки. Робоча група НАН України з питань відкритої науки підготувала Концепцію реалізації європейських принципів відкритої науки в НАН України на 2024-2030 рр.. Практичну реалізацію переходу до відкритої науки було покладено на цільовий науково-технічний проєкт НАН України «Створення й впровадження інфраструктури відкритої науки в НАН України (OPENS) на 2023 -2024 рр.».

Основними виконавцями даного проєкту були: Центр досліджень інтелектуальної власності та трансферу технологій НАН України, Інститут програмних систем НАН України, Національна бібліотека України імені

В.І. Вернадського, Видавничий дім «Академперіодика» НАН України, Інститут теоретичної фізики ім. М.М. Боголюбова НАН України (ІТФ), Державна наукова установа «Київський академічний університет», Інститут кібернетики імені В.М. Глушкова НАН України.

Співробітники ІТФ інсталивали та ввели в промислову експлуатацію Репозитарій відкритих даних НАН України DataverseUA. Розміщені в Репозитарії DataverseUA набори даних досліджень співробітників НАН України отримують унікальний ідентифікатор DOI, що забезпечує пошук та повторне використання даних досліджень з збереженням авторських прав надавача набору даних.

В Репозитарії DataverseUA створено бази для розміщення даних двох інститутів НАН України: Інституту проблем матеріалознавства ім. І.М.Францевича, Інституту металофізики ім. Г.В. Курдюмова та двох університетів МОН: Сумський державний університет та Державна наукова установа «Київський академічний університет».

Підтримка надійного функціонування Регіонального операційного центру та *Центру колективного користування науковими приладами (ЦККНП) «Ресурсний центр для грід- та хмарних технологій»* в ІТФ забезпечує виконання наукових розрахунків в різних областях. Основу ЦККНП складає обчислювальний та хмарний кластер ІТФ. Обчислювальний кластер, який є ресурсним центром Українського національного гріду, включено до Європейської грід-мережі проєкту EGI. Хмарний кластер включено до ресурсів EGI Federal Cloud.

Користувачами обчислювальних і хмарних ресурсів ЦККНП крім співробітників Інституту теоретичної фізики є співробітники Фізико-технічного інституту низьких температур ім. Б.І. Веркіна НАН України, Інституту молекулярної біології і генетики НАН України, Інституту фізики НАН України, фізичного факультету Київського національного університету імені Тараса Шевченка.

ІТФ є офіційним представником від України в міжнародних організаціях: асоційоване членство у EGI Foundation та повне членство з мандатом від країни у EOSC Association.

Така інтеграція Української національної грід-інфраструктури дає можливість користувачам використовувати спільні обчислювальні ресурси EGI, яка є складовою частиною EOSC.

Асоційоване членство України у EGI Foundation забезпечило участь установ НАН України в міжнародних дослідницьких інфраструктурах. Це переконливо відображено в звітах EGI Federation (egi.eu), а саме: “EGI Membership Impact Report UNG (Ukrainian National Grid)-2020» та «EGI Council Participant: BITP - Participating in EGI Impact Report: Ukraine 2023».

У 2020 році EGI Federation співпрацювала з понад 30 дослідницькими інфраструктурами, 8 з яких включають українських партнерів. Ці дослідницькі інфраструктури з підтримкою EGI та їхні українські члени опублікували більше 257 наукових статей. У 2023 році Україна приймала участь у 10 дослідницьких інфраструктурах, а кількість наукових публікацій була 490. Наведемо перелік

наукових колаборацій в EGI за 2023 рік, в яких приймали участь науковці з України: High-Energy Physics – *ALICE*, *BELLE*, *CMS*, *ILC*, *LHCb*; CTA (Astronomy), *DUNE* (Astroparticle Physics), *ELI-NP* (Nuclear Physics), *SeaDataNet* (Oceanography), *WeNMR* (Structural Biology). Слід відмітити, що ІТФ в 2020-2024 роках брав участь у двох міжнародних колабораціях *ALICE*, *WeNMR*.

4. Міжнародна співпраця

Беручи до уваги рішення Європейської Ради про надання Україні статусу держави-кандидата на вступ до Європейського Союзу та екзистенційний вибір Українського народу на набуття повноправного членства України в Європейському Союзі, стратегічним завданням для інституту є систематична робота з інтеграції України до європейського наукового простору. Інститут буде підтримувати і поглиблювати співпрацю з центрами теоретичної фізики Європи та світу. Серед установ, з якими зараз відбувається співпраця відзначимо зокрема такі:

- European Organization for Nuclear Research (CERN, Switzerland);
- Frankfurt Institute for Advanced Studies (Germany);
- University of Rostock (Germany);
- Dresden University of Technology (Germany);
- Abdus Salam International Center for Theoretical Physics (Italy);
- University of Roma “Tor Vergata” (Italy);
- University of Cagliari (Italy);
- Pisa University (Italy);
- University of Wrocław (Poland);
- Liquid Crystal Institute of the Kent State University (USA);
- Royal Institute of Technology (Sweden).

Інститут співпрацює з *Європейським центром ядерних досліджень (CERN)*. За результатами плідної співпраці між Інститутом та CERN було підписано меморандум про взаєморозуміння щодо майбутнього кругового колайдера (*CERN FCC*) [3.2]. Інститут також підтримує тісні контакти з колаборацією *ALICE* у CERN і має договір про співпрацю, який, зокрема, дозволяє співробітникам Інституту представляти Україну в колаборації.

Науковці інституту здійснюють астрофізичні спостереження за допомогою надсучасних телескопів *Хаббла* і *Джеймса Вебба*.

Підтримується співпраця з Міжнародним центром теоретичної фізики *ICTP (Трієст, Італія)* та іншими провідними міжнародними науковими центрами (це частково відображено і спільними науковими роботами). Співробітники брали участь в україно-ізраїльському проєкті, отримали гранти *Національного фонду досліджень України* та додаткове фінансування від Національної академії наук України за конкурсною програмою 1230.

Наші дослідники брали участь в міжнародних конференціях, виступали з запрошеними лекціями. У 2024 р. на базі інституту відбулося 5 міжнародних семінарів Україна - Швеція з теоретичної фізики. Було отримано грант від

Королівської академії наук Швеції для проведення конференції Україна - Швеція у Стокгольмі у 2025 р. Співробітники беруть участь в освітніх програмах в Україні, керують курсовими, бакалаврськими та магістерськими роботами студентів, а також науковою роботою аспірантів.

Організуються міжнародні школи, зокрема за підтримки *Американського фізичного товариства APS* та за програмою *Європейської дослідницької мережі COST Actions*.

5. Освітній процес

Швидкий розвиток науки і технологій в останні десятиліття вимагає розширення традиційних фахових спільнот за рахунок спеціалістів із нових галузей. Ця проблема є особливо гострою в Україні, де, по-перше, освітня система історично слабше пов'язана з сучасними дослідженнями, ніж у більшості розвинутих країн, і, по-друге, вона серйозно постраждала через брак фінансування та війну. Яскравим прикладом є сучасні квантові технології – міждисциплінарна галузь, що охоплює квантові обчислення, квантові симуляції, квантову комунікацію та квантову сенсорику та метрологію. Потенційний вплив цих технологій є настільки значним, що його часто називають *другою квантовою революцією*. Проте, на відміну від багатьох інших країн, навіть з числа сусідніх, Україна має дуже мало міжнародно визнаних наукових груп у цій галузі. Така нестача фахівців створює серйозний ризик для конкурентоспроможності, стійкості та сталого розвитку країни. Іншим критичним прикладом є штучний інтелект і машинне навчання, які завдяки високому рівню технологій користуються великим попитом в ІТ-індустрії. Багато університетів ввели відповідні курси до своїх навчальних програм, але швидкий розвиток цієї галузі вимагає їхньої неперервної адаптації. Це зумовлює нагальну потребу в глибокій інтеграції освітньої системи України з дослідницькими установами, зокрема у галузі фізики та математики.

Інститут послідовно просуває взаємовигідне поєднання наукової та освітньої роботи. Група квантової оптики та квантової інформації вивчає вплив реалістичних умов, як-от шум квантового каналу, недосконалість детектування та неповнота інформації, на оптичні квантові технології. Наше дослідження не просто розглядає ці фактори в кожному конкретному випадку, а систематизує їхній вплив і створює основу для курсів лекцій в університетах-партнерах, бакалаврських та магістерських робіт, керування якими часто завершується публікаціями у високореєтингових журналах. Так само за нашими дослідженнями сформовано курси з машинного навчання та нейронних мереж, один з яких був сертифікований *Deep Tech Talent Initiative* Європейського інституту інновацій та технологій (EIT). Діяльність в галузі сучасних квантових технологій і машинного навчання також має освітній аспект: наших дослідників запрошують читати лекції на студентських школах для українських та іноземних студентів. Окрім цих напрямів, ми розробили курси зі статистичної фізики, самоорганізованої динаміки та диференціальних рівнянь. Наші співробітники готують аспірантів в інституті реалізують програму підготовки

докторів філософії. Членство професора Богдана Лева в Експертній раді Міністерства освіти і науки України з питань атестації наукових кадрів (2018-2023) сприяло розвитку національних освітніх програм.

Наша освітня діяльність спрямована головним чином на студентів університетів-партнерів: Київський національний університет імені Тараса Шевченка (КНУ), Київський академічний університет (КАУ) та Національний університет «Києво-Могилянська академія» (НаУКМА). Лекції наших співробітників на навчальних школах були доступні для ширшого кола українських та іноземних студентів.

Наш досвід покладено в основу курсів освітніх програм, пов'язаних із сучасними квантовими технологіями та фізикою плазми в КНУ, зокрема «Теоретична квантова оптика» (2024; раніше «Фізичні основи квантової інформації» 2021-2023), «Сучасні проблеми квантової оптики та квантової інформації» (2020-2024), «Теорія квантової оптики та квантової інформації» (2020) та «Теорія плазми» (2020-2024). В КАУ ми викладаємо «Теоретичну квантову оптику» (2020-2022), «Теорію квантової інформації» (2020, 2023), «Додаткові глави квантової механіки» (2020-2022, 2024), «Вступ до машинного навчання» (2020-2024), «Топологічний аналіз даних» (2024), «Алгоритми з Python» (2022, 2023), «Алгоритми та структури даних» (2022) і «Фізична кінетика» (2020, 2021). В НаУКМА ми розробили та прочитали курси лекцій «Диференціальні та інтегральні рівняння» (2020-2022), «Методи математичної фізики» (2020-2022), «Самоорганізація у фізиці та природі» (2021), «Коливальні та хвильові процеси у фізиці» (2024). У період від 2020 по 2024 роки ми керували десятками магістерських та бакалаврськими проєктів, шість студентів отримали ступінь доктора філософії від 2022 по 2024 рік. Зараз 15 аспірантів вивчають теоретичну фізику за нашою програмою. Прочитано декілька циклів запрошених лекцій на українських та міжнародних навчальних школах для студентів.

6. Популяризація науки

Популяризація науки, поряд з освітою, є невід'ємною складовою наукової діяльності інституту, завданням, важливим для його сталого розвитку. В 2020 інститут започаткував YouTube канал <https://surl.li/ailkkv>, зараз на ньому виставлено 227 доповідей, записаних на відео. Лекції на семінарах, конференціях, майстер-класах були прочитані кваліфікованими фахівцями. Інститут забезпечував проведення цих заходів аудиторіями, обладнаними аудіо та відео технікою, ліцензійним зумом, серверами, безперебійним живленням та інтернетом.

Інститут підтримує сайт <https://bitp.kiev.ua>, звідки прокладені шляхи до ресурсів інституту. На сайті є сторінки «Лекції з фізики, освітні та популярні» <https://bitp.kiev.ua/lectures> та «Фізика в суспільстві» <https://bitp.kiev.ua/media>.

Для поширення поточної інформації інститут підтримує сторінку у фейсбуці <https://tinyurl.com/3rtwmte3>.

Інститут має багаторічний досвід роботи зі студентами та школярами в рамках Науково-освітнього центру, який працював від 2000 р. В 2022 р. він був реформований в Платформу OpenBITP. В травні 2023 на ній відбувся семінар OpenBITP з матфізики <https://surl.li/xzsrk>.

Інститут є базовою установою Українського фізичного журналу <https://ujp.bitp.kiev.ua/index.php/ufg/>, в якому крім суто наукових друкуються статті з історії науки. Співробітники інституту входять до складу редколегії і редакції, забезпечують роботу видавничого відділу, електронної редакції і сайту журналу.

Ми розглядаємо популяризацію науки та результатів досліджень в широкому контексті і виділяємо три рівні популяризації, до яких додаються ще нарис з історії науки та наукова публіцистика.

Матеріали першого рівня орієнтовані на школярів та студентів молодших курсів. Допитливим молодим людям бажано окреслити шляхи, якими вони можуть швидше долучитися до наукової роботи і вийти згодом на передній край досліджень. Ці матеріали є корисними також для широкого кола осіб, які не є науковцями, але цікавляться наукою. Знайомство з історією науки, методами та результатами досліджень сприяє формуванню наукового світогляду і стримує поширення псевдонаукових концепцій.

Метою другого рівня є залучити студентів та аспірантів до активних досліджень. В порівнянні з регулярними заняттями ці матеріали орієнтовані на те, щоб швидко ознайомитись з певними напрямками і методами досліджень, допомогти відчувати їхню суть. І в подальшому обрати напрям, який сподобався, для глибшого вивчення. Наслідком популяризації є зацікавленість молодих дослідників з інших установ в конференціях, які відбуваються в інституті.

Третій рівень популяризації стосується більш досвідчених науковців. Помітно, що зараз дослідження вимагають більшої сконцентрованості на вузьких проблемах ніж це було декілька десятиліть тому. Науковці не встигають відстежувати швидкий розвиток сусідніх напрямів, і все менше розуміють колег. Завданням третього рівня популяризації є запобігти надмірній фрагментації досліджень.

Популяризація на кожному рівні розділяється за науковими напрямками. Деякі з них виникли відносно недавно і розвиваються досить швидко, інші потребують поглибленої математичної підготовки. Таким напрямкам приділяється особлива увага. Тут, зокрема, можна виділити фізику новітніх матеріалів, сучасні методи моделювання і машинного навчання, а також методи математичної фізики.

Популяризація розділяється також за формами. В попередні роки інститут щороку організовував літні майстер-класи для школярів та студентів, лекторії на фестивалях науки. В стінах інституту крім наукових зборів та семінарів відбувалися конференції молодих науковців. Ковід і агресія РФ ускладнили безпосереднє спілкування, але інститут знайшов шляхи подолати труднощі. Очні зустрічі були доповнені відеоз'язком. Від 2020 працює інститутський YouTube канал <https://surl.li/ailkky>, на ньому виставлені доповіді, записані в інституті на відео. Його найбільший розділ складається з семінарів "Проблеми

теоретичної фізики для студентів, аспірантів і наукових працівників". Тут також представлені тематичні спеціалізовані конференції, щорічні конференції молодих науковців, традиційні семінари, присвячені видатним науковцям, тощо. Саме YouTube канал зараз відіграє ключову роль в популяризації наукових досліджень. Він дозволяє доносити знання людям з різним рівнем підготовки. Водночас він відкриває можливості для спілкування науковцям з різних країн, проводити міжнародні зустрічі. На інститутському YouTube каналі записані відео з виступами відомих іноземних фізиків, які брали участь в інститутських заходах. Важливим надбанням минулого року стала серія шведсько-українських семінарів з теоретичної фізики. На додаток до зустрічей он-лайн шведські колеги запросили наших науковців на спільний семінар в Стокгольмі в кінці квітня цього року.

Крім інститутського YouTube каналу популярними є канали нашого співробітника В.Б. Тимчишина <https://surl.gd/ybgwbl> і студента кафедри теоретичної і математичної фізики Київського академічного університету, яка працює на базі інституту, О. Оленченка <https://surl.li/vlakkt>. На них можна знайти чимало якісних відео, створених молодими науковцями.

Водночас з відео презентаціями науковці публікують популярні статті в журналах, а також записують подкасти. Невід'ємною складовою популяризаторської діяльності є публікації з історії наукових шкіл, опис внеску видатних науковців в розвиток окремих напрямів. При цьому увага приділялася особистостям, які закладали основи сучасних досліджень в нашому інституті.

Близькою до популяризації є наукова публіцистика. Її завданням є висвітлювати проблеми організації та шляхи розвитку науки, впливати на прийняття рішень на відомчому та державному рівнях.

Сучасні форми популяризації сприяють кращій видимості інституту як в Україні так і на міжнародному полі. Це позначилося в запрошеннях на конференції і пропозиціях провести спільні наукові заходи. Важливим наслідком популяризації є привернення уваги до інституту з боку студентів. Збільшується число охочих вступити до аспірантури інституту і магістратури кафедри ТМФ КАУ при інституті. Кількість молодих науковців інституту за останній рік збільшилась на 13%.