

З КАФЕДРИ ПРЕЗИДІЇ НАН УКРАЇНИ



ЗАГОРОДНІЙ
Анатолій Глібович — академік НАН України, віце-президент НАН України, голова Наукової ради цільової програми співробітництва НАН України з Європейським центром ядерних досліджень та Об'єднаним інститутом ядерних досліджень

ПЕРСПЕКТИВНІ ФУНДАМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ З ФІЗИКИ ВИСОКИХ ЕНЕРГІЙ ТА ЯДЕРНОЇ ФІЗИКИ

Стенограма наукової доповіді на засіданні Президії НАН України 13 січня 2016 року

У доповіді висвітлено основні результати, отримані під час виконання цільової програми співробітництва НАН України з Європейським центром ядерних досліджень та Об'єднаним інститутом ядерних досліджень. Реалізація цієї програми сприяла розвитку міжнародного наукового співробітництва із зазначеними дослідницькими центрами і стала одним із ключових чинників прийняття рішення про набуття Україною асоційованого членства у ЦЕРН.

Вельмишановний Борисе Євгеновичу!
Вельмишановні члени Президії!

Мою доповідь присвячено результатам виконання цільової програми співробітництва НАН України з Європейським центром ядерних досліджень та Об'єднаним інститутом ядерних досліджень «Перспективні фундаментальні дослідження з фізики високих енергій та ядерної фізики». Цю програму було започатковано постановою Президії НАН України від 23.12.2011 № 349 «Про участь НАН України в роботі міжнародних наукових організацій» та відповідним розпорядженням Президії НАН України від 18.07.2012 № 488. Постановою Президії НАН України від 13.11.2013 термін виконання Програми було подовжено на 2014–2015 рр.

Головна мета Програми полягала у створенні умов для успішного розвитку фундаментальних досліджень з фізики високих енергій та ядерної фізики, тобто тих галузей науки, в яких значного поступу сьогодні можна досягти, лише беручи участь у масштабних міжнародних проектах. Саме такі проекти зараз здійснюються в Європейській організації ядерних досліджень (ЦЕРН) та Об'єднаному інституті ядерних досліджень (ОІЯД). Зокрема, ЦЕРН є беззаперечним світовим лідером у дослідженнях з фізики високих енергій. Саме в ЦЕРН було побудовано Великий адронний колайдер (ВАК) — найпотуж-



Великий адронний колайдер у ЦЕРН — найпотужніший прискорювач елементарних частинок, розташований на глибині 100 м, з довжиною кільця 27 км, до складу якого входять 4 основні детектори — ALICE, ATLAS, CMS, LHCb — та 3 допоміжні — TOTEM, LHCf, MoEDAL

ніший прискорювач, здатний забезпечити зіткнення частинок з енергіями 13 TeV (1 TeV = 10^{12} eV; для порівняння: енергія електронів в електронно-променевої трубці має порядок 10^3 eV). Цей прискорювач розміщено на глибині 100 м, довжина його кільця становить 27 км.

Експерименти на ВАК мають амбітну мету — з'ясувати ряд засадничих принципів світобудови, зокрема, дати відповіді на відкриті світоглядні питання сучасної фізики. З тим щоб вагомість результатів, отриманих під час виконання Програми, була зрозумілішою, спробую популярно пояснити сутність цих питань.

Перше питання — чи існує так звана «нова фізика» за межами Стандартної моделі, зокрема, чи існує суперсиметричне розширення цієї моделі? Під Стандартною моделлю розуміють набір квантово-польових теорій, що описують три з чотирьох відомих на сьогодні типів взаємодій — електромагнітну, слабку і сильну. Стандартна модель дозволяє пояснити більшість спостережуваних явищ мікросвіту та космологічних даних, за винятком окремих з них, і оперує з двома типами квантових частинок — бозонами і ферміонами, що відрізняються симетрійними властивостями і можуть існувати незалежно одні від одних. Так от, для опису винятків, які ще не мають свого

пояснення, наприклад для з'ясування можливої природи темної матерії, осциляцій нейтрино, баріонної асиметрії Всесвіту, потрібно розширити Стандартну модель і припустити, що за високих енергій кожна з елементарних частинок обов'язково має суперпартнера, тобто частинку з протилежною симетрією. Для ферміона це бозон, а для бозона — ферміон. Це ключове питання квантової теорії досі ще не має експериментального підтвердження, але фізики сподіваються, що завдяки експериментам на ВАК воно буде з'ясоване.

Друге питання — чи існує бозон Хіггса? Це частинка, що забезпечує генерацію маси в квантових теоріях поля. Позитивну відповідь на це питання вже отримано.

І, нарешті, третє питання — чи може існувати кварк-глюонна плазма? Це речовина, що складається з кварків і глюонів, з яких утворюються складові атомного ядра. Популярно суть цієї проблеми можна пояснити так. Зі шкільного курсу фізики всім відомо, що речовина складається з молекул, які, у свою чергу, — з атомів. Атом складається з атомного ядра і електронної оболонки, а атомне ядро — з протонів і нейтронів, інакше — адронів. Теоретичні та експериментальні дослідження вказують на те, що адрони також повинні мати більш елементарні складові — так звані квар-

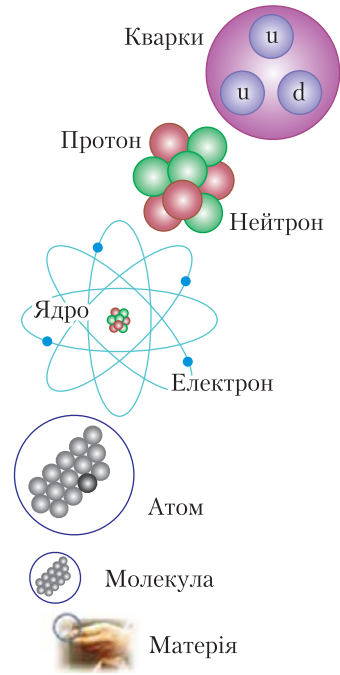
ки і глюони. Перевірити їх існування досить складно, оскільки кварки, на відміну, скажімо, від електронів і протонів, не можуть існувати відокремлено одні від одних. Тому і виникла гіпотеза про те, що в процесах зіткнень атомних ядер за високих енергій має утворитися «суміш» великої кількості кварків і глюонів, тобто кварк-глюонна плазма. Експериментальне спостереження такої плазми стане найвагомішим прямим підтвердженням кваркової структури адронів.

В основі всіх згаданих вище досліджень лежить аналіз результатів зіткнень атомних ядер, які реєструються чотирма основними детекторами Великого адронного колайдера. Це велетенські конструкції, розміром з 5-поверховий будинок, які складаються з гігантського числа мікроелектронних пристроїв, здатних зафіксувати мільярди так званих вторинних частинок, що народжуються внаслідок зіткнень атомних ядер. Аналізуючи характеристики таких частинок, роблять висновки про структуру нуклонів та їх складових і зрештою отримують нові знання про природу і властивості ядерної матерії.

Принагідно зазначу, що інститути нашої Академії взяли безпосередню участь у створенні трьох із чотирьох детекторів на БАК. Наприклад, українські науковці долучилися до створення стріпового і дрейфового шарів внутрішньої трекової системи детектора ALICE.

Об'єднаний інститут ядерних досліджень — один зі світових лідерів у відкритті трансуранових елементів, дослідженні властивостей конденсованої речовини методом розсіяння холодних нейтронів, теоретичних та експериментальних дослідженнях елементарних частинок. Саме ОІЯД спільно з Ліверморською національною лабораторією належить пріоритет відкриття елементів 114 і 116 — флеровіуму та ліверморіуму, а пріоритет у відкритті елементів 115, 117, 118 належить виключно ОІЯД. Зараз в ОІЯД реалізується мегапроект NICA (Nuclotron-based ion collider facility) зі створення колайдера, за допомогою якого досліджуватимуть властивості ядерної матерії в області існування кварк-глюонної плазми та формування баріонної матерії. Про важливість

Речовина складається з молекул, молекули — з атомів, атоми — з ядра і електронної оболонки, атомне ядро — з протонів і нейтронів (адронів), адрони мають складатися з кварків і глюонів



Три покоління частинок матерії (ферміони)

	I	II	III
К			
В			
А			
Р			
К			
И			
Л			
Е			

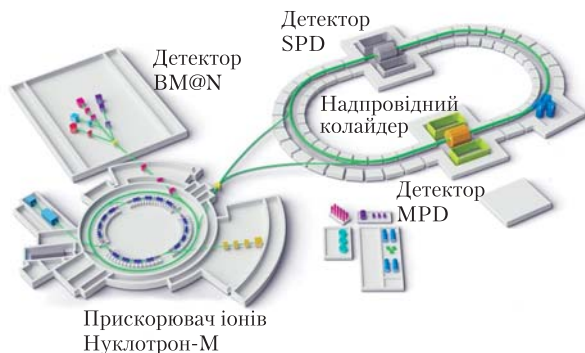
Калібрувальні частинки

Сильна взаємодія		глюон
Електромагнітна взаємодія		фотон
Слабка взаємодія		W-бозони Z-бозон

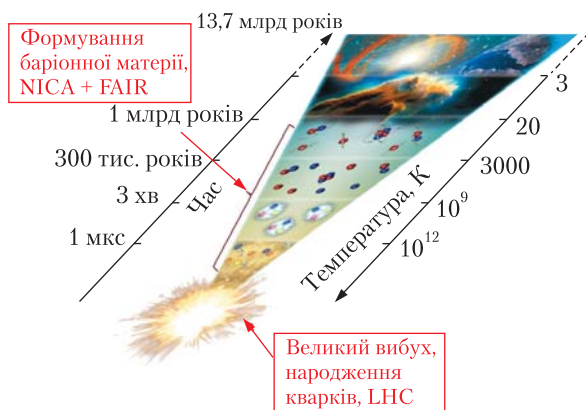
Скалярна частинка(и)



Елементарні частинки в Стандартній моделі. Складовими речовини є 6 кварків і 6 лептонів. Частинками-носіями взаємодій (калібрувальними частинками) є глюони, фотони та важкі калібрувальні бозони. Маса частинок визначається їх взаємодією з полем Хіггса, квантом якого є скалярна частинка (з нульовим спіном) — бозон Хіггса



NICA — мегапроект ОІЯД зі створення колайдера (схема: <http://nica.jinr.ru/>)



Дослідження в ЦЕРН і ОІЯД стосуються різних етапів існування Всесвіту

цього проекту свідчить велика зацікавленість і активна участь у ньому Китаю. Зокрема, в грудні минулого року було підписано угоду між Міністерством освіти і науки КНР, Китайською академією наук та ОІЯД про співпрацю у створенні прискорювача NICA.

Очевидно, що співпраця саме з такими партнерами дає змогу українським науковцям бути причетними до підготовки і виконання найновітніших експериментів, а отже, бути на передньому фронті фундаментальних досліджень у галузі фізики високих енергій та ядерної фізики. З цього випливали й основні завдання Програми:

1. Підвищення рівня досліджень з фізики високих енергій та ядерної фізики, що виконуються установами НАН України.

2. Забезпечення активної участі українських учених у наукових і технологічних проектах ЦЕРН та ОІЯД, присвячених дослідженню актуальних проблем фізики й астрофізики високих енергій та ядерної фізики.

3. Забезпечення можливостей обміну інформацією, ресурсів її зберігання, підтримка подальшого розвитку грид-технологій та інших інформаційних інновацій.

Протягом 2012–2015 рр. за Програмою виконувалося 23 наукові проекти, в яких брали участь 6 установ з трьох відділень наук НАН України, а саме: Національний науковий центр «Харківський фізико-технічний інститут», Інститут ядерних досліджень, Інститут теоретичної фізики ім. М.М. Боголюбова, Інститут скінтіляційних матеріалів, Інститут прикладної фізики, Інститут електрофізики і радіаційних технологій. Обсяги фінансування становили: у 2014 р. — 900 тис. грн, у 2015 р. — 828 тис. грн. Успішна реалізація Програми відіграла велику роль у прийнятті керівництвом ЦЕРН рішення щодо вступу України до цієї організації як асоційованого члена.

Завдяки цій Програмі українські фахівці могли брати участь у підготовці й виконанні фізичних експериментів у ЦЕРН та ОІЯД, а також в обробленні результатів досліджень. Було отримано низку важливих результатів. Зокрема, українські науковці мали можливість одержувати найновітніші експериментальні дані, що дозволило їм стати рівноправними співавторами кількох відкриттів. Це стосується як внеску України у підтримку роботи детекторів ВАР і вдосконалення програмного забезпечення експериментів, так і безпосередньої участі фахівців інститутів Академії в обробленні результатів експериментів колаборацій CMS та ALICE з використанням сучасних комп'ютерних технологій.

Наведу лише кілька конкретних прикладів успішного виконання проектів Програми.

Проект «Електромагнітні процеси при проходженні заряджених частинок великої енергії через кристалічні та аморфні середовища» (виконавець — ННЦ ХФТІ). Тут ідеться про можливість керування напрямом руху заряджених

частинок при їх проходженні крізь кристали. Ще в 2008–2010 рр. у ЦЕРН було поставлено спеціальні експерименти з перевірки передбаченого М. Шульгою та А. Гриненком (ННЦ ХФТІ) стохастичного механізму відхилення пучків заряджених частинок великої енергії завдяки багатократному розсіянню частинок на вигнутих ланцюжках атомів кристала. Експеримент підтвердив основні передбачення теорії, що відкрило нові можливості керування пучками частинок великої енергії за допомогою зігнутих кристалів малих розмірів. Отже, у деяких випадках на прискорювачах магнітні системи розміром кілька десятків метрів можна замінити зігнутими кристалами сантиметрових розмірів.

У 2014–2015 рр. під час виконання проекту за допомогою чисельного моделювання було досліджено орієнтаційну залежність процесів, пов'язаних з близькими зіткненнями швидких частинок з атомами у зігнутому кристалі, й показано можливість їх пригнічення при реалізації стохастичного механізму відхилення пучка протонів. Це вказує на вельми високу стійкість стохастичного механізму відхилення пучків частинок відносно інших механізмів відхилення зігнутими кристалами. Планується постановка нових експериментів у ЦЕРН для перевірки цього передбачення.

Другий проект пов'язаний з колаборацією LHCb. Це комплекс розробок у рамках підготовки експерименту до *Run 2 (2015)* та *Run 3 (2020)* (виконавець — ННЦ ХФТІ). Цей проект стосується розроблення та підтримки програмного забезпечення і детекторних підсистем для поточного і майбутнього експериментів колаборації LHCb. Зокрема, до головної бази даних щодо особливостей геометрії та умов експерименту LHCb (CondDB) було інтегровано необхідні оновлення. Розроблено програмну систему відстеження та аналізу багатовимірних зв'язків у метаданих LHCb (Ariadne). Для модернізації внутрішнього трекера LHCb було успішно розроблено, зібрано та протестовано прототип базового детекторного модуля на основі мікροстріпових кремнієвих сенсорів. З метою модернізації світлодіод-

ної системи моніторингу електромагнітного калориметра (ECAL) LHCb виконано заміну пластикових світловодів на кварцові, радіаційно стійкість яких як мінімум на два порядки вища. Проведено роботи із запуску та налагодження цієї системи.

Одним із ключових був проект «Участь ННЦ ХФТІ в обробці даних експерименту CMS на Великому адронному колайдері в ЦЕРН і дослідницьких роботах з модернізації адронної калориметрії детектора CMS» (виконавець — ННЦ ХФТІ). Серед головних завдань цього проекту були підтримка і розвиток спеціалізованого обчислювального комплексу ННЦ ХФТІ, що є активним елементом грид-інфраструктури експерименту CMS другого рівня. У результаті виконання завдань проекту вдалося забезпечити високу стабільність і надійність роботи комплексу в 2014–2015 рр. За час виконання проекту на комплекс було передано понад 450 Тбайт даних CMS.

Також було виконано значний обсяг робіт з фізичного аналізу отриманих в експерименті CMS даних. На основі аналізу сертифікованої вибірки протон-протонних зіткнень за енергії $\sqrt{s} = 13$ TeV було здійснено ідентифікацію процесів інклюзивного народження Z-бозонів. Здобуті результати і напрацювання, а також розроблені алгоритми і програми будуть застосовані надалі для пошуку суперсиметричних частинок та інших проявів «нової фізики» при аналізі даних експерименту CMS для більших інтегральних світимостей.

Продовжено також роботи з модернізації торцевого адронного калориметра детектора CMS.

За час виконання проекту колаборацією було опубліковано понад 170 статей, співавторами яких є, зокрема, співробітники ННЦ ХФТІ. Причому в публікаціях як цієї, так і всіх інших колаборацій зазначено, що ці роботи виконано за підтримки програм НАН України.

Серед результатів проекту «Диференціальні поперечні перерізи генерації дивних мезонів та баріонів в p - p та p - A зіткненнях в експерименті LHCb» (виконавець — Інститут ядерних досліджень НАН України) можна відзначи-

ти аналіз даних експерименту LHCb з метою оцінки диференціальних поперечних перерізів генерації K_s -мезонів та Λ -баріонів у p-p та p-A зіткненнях і забезпечення стійкого функціонування Системи радіаційного моніторингу в неперервному режимі накопичення даних за енергії зіткнення протонів 13 TeV.

Наступний проект «*Створення радіаційно стійкого пластмасового сцинтилятора для поліпшення мегатайлів CMS-калориметра*» (виконавець — Інститут сцинтиляційних матеріалів НАН України) стосувався відпрацювання методів синтезу молекул активатора полістирольної основи пластмасового сцинтилятора. Отримані сцинтиляційні домішки було використано для створення радіаційно стійких сцинтиляційних полімерних композицій на основі полістиролу.

Проект «*Розвинення теоретичних основ дослідження сильновзаємодіючої матерії в експериментах з ультрарелятивістичними важкими іонами та протонами на Великому адронному колайдері ЦЕРН*» (виконавець — Інститут теоретичної фізики ім. М.М. Боголюбова НАН України) стосувався як отримання та оброблення експериментальних даних, так і фундаментальних теоретичних досліджень поведінки ядерної матерії в умовах експерименту. Зокрема, проведено симуляційну оцінку загальної роботоздатності детекторів для вимірювання розподілів множинності заряджених частинок та їх густини. Показано, що конфігурація деяких детекторів у моделі, яка використовувалася раніше для реконструкції подій, не відповідає реальному стану. Здійснено ревізію аналізу даних на попередніх енергіях з використанням вдосконаленої процедури реконструкції. Показано, що отримані в такий спосіб результати аналізу є стабільними і дають узгоджені результати на різних детекторах.

Досліджено моделі теорії поля з чотирикварковою взаємодією та нескінченно зростаючою кореляційною довжиною. Показано, що у таких кваркових ансамблів завдяки інтенсивним флуктуаціям основного стану, в традиційному розумінні, не існує. Як один із наслідків — такий нестійкий основний стан є по-

дібним до стану Великого вибуху. При цьому кольорова взаємодія кварків може призводити до перебудови вакуумного стану.

Запропоновано новий механізм еволюції раннього холодного Всесвіту, що народився в результаті квантової флуктуації з фізичного вакууму, заповненого однорідним нелінійним скалярним полем, яке взаємодіє з гравітаційним полем. З урахуванням усіх фізично обґрунтованих обмежень на параметри цієї моделі одержано нові дані про можливий сценарій еволюції холодного Всесвіту до Великого вибуху з необмеженим зростанням радіуса в точці фазового переходу першого роду. Цей сценарій необмеженого розширення раннього Всесвіту може бути названий «гіперінфляцією».

Проект «*Теоретичні та експериментальні дослідження впливу зовнішнього магнітного поля на ймовірність виникнення високовакуумного пробою*» (виконавець — Інститут прикладної фізики НАН України) стосується дослідження поведінки електрона в сильних зовнішніх полях. Зокрема знайдено розв'язок проблеми квантово-механічного руху електрона в зовнішніх електричному і магнітному полях, що перетинаються під довільним кутом. Отриманий розв'язок використано для розрахунку густини струму автоелектронної емісії з урахуванням зовнішнього магнітного поля. Показано можливість керування густиною струму польової емісії за допомогою магнітного поля. Оскільки автоемісійний струм є тригером високовакуумного пробою, це означає, що прикладенням зовнішнього магнітного поля можна зменшувати ймовірність виникнення пробою.

У рамках виконання теми перші експерименти з виявлення впливу зовнішнього магнітного поля на ймовірність високовакуумного пробою здійснювалися в ЦЕРН за участю співробітників Інституту. Для більш детального дослідження впливу зовнішнього магнітного поля на умови виникнення високовакуумного пробою в Інституті створено установку і проведено низку експериментів.

Проектів, пов'язаних зі співпрацею з ОІЯД, було три. Це «*Дослідження подвійного бета-*

розпаду атомних ядер» (виконавець — Інститут ядерних досліджень НАН України). Такі дослідження є одним із фундаментальних завдань фізики ядра і елементарних частинок, оскільки здатні визначити природу нейтрино, його масу, схему масових станів, перевірити закон збереження лептонного заряду. Досліджено подвійний бета-розпад ядра ^{106}Cd на новому рівні чутливості до періоду напіврозпаду $T_{1/2} > 10^{19} - 10^{21}$ років, зокрема, досягнуто теоретичного обмеження на період напіврозпаду ядра ^{106}Cd відносно двонейтринного електронного поглинання з випромінюванням позитрона. В експерименті NEMO-3 встановлено нові обмеження на безнейтринний подвійний бета-розпад ядра ^{100}Mo , звідки виникає одне з найжорсткіших обмежень на масу нейтрино майоранівської природи $< (0,33 - 0,62) \text{ eV}$.

Отримані фундаментальні дані про властивості нейтрино і особливості слабкої взаємодії будуть застосовані у 2β -експериментах з ядрами ^{106}Cd і ^{82}Se наступного покоління, підготовка до яких триває. Так, Україна візьме участь у двох міжнародних проектах, спрямованих на дослідження нейтрино, слабкої взаємодії, пошук ефектів за рамками Стандартної моделі елементарних частинок.

Інший проект, спрямований у тому числі на співпрацю з ОІЯД, має назву *«Каузальне рівняння стану адронної матерії та критерій її кінетичного фрізаута в зіткненнях релятивістських важких іонів»* (виконавець — Інститут теоретичної фізики ім. М.М. Боголюбова НАН України). У результаті його виконання було запропоновано модифіковану модель резонансного адронно-газу, що враховує відмінності характеристик

потенціалів взаємодії, а саме — відштовхування, для різних частинок і яка здатна не лише якісно, а й кількісно описувати фазові перетворення, що супроводжують народження адронів. Зокрема, досягнуто найкращу якість опису як відносних виходів адронів, так і всіх незалежних виходів адронів, виміряних в інтервалі енергій зіткнення $\sqrt{s} = 2,7 - 200 \text{ GeV/нукл}$. Запропонована модель дозволила також уперше описати два піки безрозмірної міри взаємодії δ від енергії. На основі цих результатів запропоновано гіпотезу про існування двох змішаних кварк-глюон-адронних фаз. Зроблено конкретні передбачення для майбутніх експериментів на прискорювачах NICA (ОІЯД) і FAIR (GSI).

Отже, підсумовуючи, можна зробити такі висновки:

- усі проекти Програми було успішно виконано;
- інститути — виконавці Програми змогли зміцнити і розширити наукову співпрацю з ЦЕРН і ОІЯД, долучитися до проведення найновітніших експериментів; результати опубліковано в понад 300 наукових статтях;
- Програма сприяла розвитку в Україні досліджень з фізики високих енергій та ядерної фізики.

З метою подальшого розвитку досліджень у галузі фізики високих енергій та ядерної фізики, а також ефективного використання набутого досвіду міжнародної співпраці доцільно започаткувати нову цільову програму співробітництва з ЦЕРН та ОІЯД «Ядерна матерія».

Дякую за увагу.

За матеріалами засідання підготувала О.О. МЕЛЕЖИК