

ЗАТВЕРДЖУЮ  
Директор Інституту теоретичної фізики  
ім. М.М. Боголюбова НАН України  
академік НАН України  
А.Г. Загородній



**АНОТОВАНИЙ ЗВІТ**  
**про виконану роботу у 2021 році в рамках реалізації проєкту**  
**із виконання наукових досліджень і розробок**

Режим фіксованої твердотільної мішені в експерименті LHCb (CERN) і пошук екстремальних стані матерії в зіткненнях важких ядер на Великому Адронному Колайдері

**Назва конкурсу:** Конкурс НФДУ “Підтримка досліджень провідних та молодих учених”  
**Реєстраційний номер Проєкту:** 2020.02/0257

**Підстава для реалізації Проєкту з виконання наукових досліджень і розробок** (реєстраційний номер та назва Проєкту) 2020.02/0257 “Режим фіксованої твердотільної мішені в експерименті LHCb (CERN) і пошук екстремальних стані матерії в зіткненнях важких ядер на Великому Адронному Колайдері”

Рішення наукової ради Національного фонду досліджень України щодо визначення переможця конкурсу Конкурс НФДУ “Підтримка досліджень провідних та молодих учених” протокол від «16-17» вересня 2020 року № 21

## 1. ЗАГАЛЬНА ІНФОРМАЦІЯ ПРО ПРОЄКТ

Загальна тривалість виконання проєкту 2020 рік – 2022 рік

Тривалість виконання Проєкту у 2021 році

Початок – 29.04.2021 р.  
(дата укладання Договору про виконання наукового дослідження і розробки)

Закінчення – 15.12.2021 р.

Загальна вартість Проєкту, грн. 4 588 901,00 гривень

Вартість Проєкту по роках, грн.:

1-й рік 495 101,00 гривень

2-й рік 1 993 800,00 гривень

3-й рік 2 100 000,00 гривень

## 2. ІНФОРМАЦІЯ ПРО ВИКОНАВЦІВ ПРОЄКТУ

до виконання Проєкту залучено 10 виконавців, з них:

доктори наук 3;

кандидати наук 1;

інші працівники 6.

## 3. ІНФОРМАЦІЯ ПРО ГРАНТООТРИМУВАЧА ТА ОРГАНІЗАЦІЮ(Ї) СУБВИКОНАВЦЯ(ІВ) ПРОЄКТУ УЧАСНИК

Найменування підприємства/установи/організації (укр.)  
Інститут теоретичної фізики ім. М.М. Боголюбова

Організаційно-правова форма підприємства/установи/організації  
Державна організація (установа, заклад, підприємство)

Підпорядкованість підприємства/установи/організації (укр.)  
Національна Академія Наук України (НАНУ)

Код ЄДРПОУ  
05417124

Код(и) КВЕД  
72.19

Стратегічні напрями наукової діяльності (укр.)  
Фундаментальні і дослідження за такими напрямками: фізика елементарних частинок і фізика високих енергій; астрофізика; фізика твердого тіла

ПІБ керівника підприємства/установи/організації (укр.)  
Загордній Анатолій Глібович

Юридична адреса підприємства/установи/організації (укр.)  
Метрологічна вул. 14 б, 03143 Київ

Фактична адреса (укр.)  
Метрологічна вул. 14 б, 03143 Київ

Поштова адреса (укр.)  
Метрологічна вул. 14 б, 03143 Київ

Телефон  
380 44 5213461

Посилання на веб сторінку підприємства/установи/організації  
[bitp.kiev.ua](http://bitp.kiev.ua)

## СУБВИКОНАВЕЦЬ

Найменування підприємства/установи/організації (укр.)  
Інститут ядерних досліджень Національної академії наук України (ІЯД НАН України)

Організаційно-правова форма підприємства/установи/організації  
Державна організація (установа, заклад, підприємство)

Підпорядкованість підприємства/установи/організації (укр.)  
Національна академія наук України

Код ЄДРПОУ  
23724640

Код(и) КВЕД  
72.19

Стратегічні напрями наукової діяльності (укр.)

Фундаментальні і прикладні дослідження та розробки за такими напрямками: ядерна фізика, фізика елементарних частинок і фізика високих енергій; ядерна енергетика; радіаційна фізика та реакторне матеріалознавство; фізика плазми та керований термоядерний синтез; ядерна, радіаційна та техногенно-екологічна безпека.

ПІБ керівника підприємства/установи/організації (укр.)

Слісенко Василь Іванович, директор ІЯД НАН України, член-кореспондент НАН України

Юридична адреса підприємства/установи/організації (укр.)

03028, м. Київ, просп. Науки, 47

Фактична адреса (укр.)

03028, м. Київ, просп. Науки, 47

Поштова адреса (укр.)

03028, м. Київ, просп. Науки, 47

Телефон

(044) 525-23-49

Посилання на веб сторінку підприємства/установи/організації

<http://www.kinr.kiev.ua>

## СУБВИКОНАВЕЦЬ

Найменування підприємства/установи/організації (укр.)

Київський національний університет імені Тараса Шевченка

Організаційно-правова форма підприємства/установи/організації

Державна організація (установа, заклад, підприємство)

Підпорядкованість підприємства/установи/організації (укр.)

Міністерство освіти і науки України

Код ЄДРПОУ

02070944

Код(и) КВЕД

85.42 , 72.19

Стратегічні напрями наукової діяльності (укр.)

Загальна фізика, ядерна фізика, радіофізика та астрономія

ПІБ керівника підприємства/установи/організації (укр.)

Губерський Леонід Васильович

Юридична адреса підприємства/установи/організації (укр.)

Україна, 01033, місто Київ, вул. Володимирська, 60

Фактична адреса (укр.)

Україна, 01033, місто Київ, вул. Володимирська, 60

Поштова адреса (укр.)

Україна, 01601, місто Київ, вул. Володимирська, 64/13

Телефон  
+38 044 239-33-33

Посилання на веб сторінку підприємства/установи/організації  
<http://www.univ.kiev.ua/>

## 4. ОПИС ПРОЄКТУ

### 4.1. Мета Проєкту (до 200 знаків)

Мета цього проєкту - дослідити закономірності, спричинені впливом «холодної» ядерної речовини та кварково-глюонної плазми (QGP) в диференціальних перерізах генерації важких адронів при релятивістських ядерних зіткненнях. Ми прагнемо розширити та поглибити цю область досліджень новими результатами аналізу даних експерименту LHCb (ЦЕРН) при енергіях поблизу  $\sqrt{s_{NN}} = 0,1, 5, 8, 13$  та  $14$  TeV. Ми також маємо намір внести свій внесок у розробку унікального для Великого Адронного Колайдера режиму фіксованої мішені, заснованого на металевих мікродетекторах (розроблених в Інституті ядерних досліджень НАН України), введених в гало пучка LHC. Це гарне наближення для дослідження зіткнень важких ядер у значно розширеному діапазоні ядер енергіями приблизно  $\sqrt{s_{NN}} = 0,1$  TeV, включаючи пошук сигналів у слабо дослідженій області фазової діаграми КХД.

### 4.2. Основні завдання Проєкту (до 400 знаків)

1. Підготувати та опублікувати в фаховому науковому виданні детальний опис пропозиції на проведення експериментів на ВАК, націлених на дослідження різних фізичних явищ в залежності від характеристик основного стану ядра-мішені, із використанням нового багатомішенного комплексу на основі металевих мікродетекторів для режиму фіксованої мішені.
2. Представити Раді Технічної Координації експерименту LHCb проєкт технічного завдання на створення багатомішенного комплексу для нової серії досліджень на ВАК (RUN4. 2027-2030 р.р.).
3. Здійснити аналіз даних експерименту LHCb в унікально широкому діапазоні енергій (0.1, 5, 8, 13 та 14 TeV), розраховавши диференційні поперечні перерізи генерації дивних та чарівних адронів в в зіткненнях ядерно-ядерних систем. Такі дані є надзвичайно цінним і ефективним підґрунтям для пошуку сигналів кварк-глюонної плазми.
4. Прийняти участь в чергуваннях на пульті керування експерименту LHCb під час набору фізичних даних, (RUN3. 2021-2024 р.р.). Забезпечити функціонування нової системи моніторингу інтенсивності ядерних зіткнень та фону (LHCb-RMS-R3), розробленої у та виготовленої в ІЯД НАН України.
5. Здійснити аналіз даних експерименту LHCb з використанням нового режиму фіксованої газової мішені (SMOG2).
6. Розробити технічну документацію створення багатомішенного комплексу на основі металевих мікродетекторів для режиму фіксованої металеві мішені експерименту LHCb. Обґрунтувати переваги цього режиму: суттєве покращення просторової фіксації області ядерних взаємодій; розширення діапазону досліджуваних ядер; прецизійна стабілізація парціальної світимості від багатьох мішеней з унікальною можливістю проводити експеримент одночасно на кількох мішенях, реалізуючи очевидну фізичну та економічну ефективність; тощо.
7. Результати досліджень ретельно узагальнити для 5-7 публікацій в наукових виданнях світового рівня та представлення на міжнародних конференціях, а також 2 кандидатських дисертаціях та 2 магістерських роботах.

### 4.3. Детальний зміст Проєкту:

- Сучасний стан проблеми (до 400 знаків)

Процеси утворення різних станів кварконіїв досліджуються у відомих експериментах в ЦЕРН (ALICE, ATLAS, CMS, LHCb) при енергіях зіткнення до  $\sqrt{s_{NN}} = 13$  TeV. Міжнародні Колаборації STAR та PHENIX вивчають зіткнення протонів з протонами, протонів з-ядрами та ядер з ядрами при енергіях до 200 GeV / нуклон на прискорювачі RHIC (Брукхейвен, США). Ці експерименти, націлені, зокрема, на пошук сигналів кварк-глюонної плазми, вивчаючи модифікацію поперечних перерізів генерації дивних та чарівних адронів. Повідомляється, що Колаборації LHCb та ALICE (ЦЕРН) виявили докази проявів «холодної» ядерної матерії при зіткненнях p-208Pb при енергіях

$\sqrt{s_{NN}} = 5 \text{ TeV}$ , а також при  $\sqrt{s_{NN}} = 8 \text{ TeV}$ . Однак брак статистики вимагає додаткового вивчення цього ефекту.

- Новизна Проєкту (до 400 знаків)

Плануються дослідження протон-протонних, протон-ядерних та ядроядерних зіткнень спрямовані на визначення закономірностей в поперечних перерізах генерації важких адронів, які обумовлені ефектами «холодної» ядерної матерії або кварк-глюонної плазми. Автори проєкту мають намір розширити та поглибити цей напрямок досліджень як новими результатами з аналізу даних експерименту LHCb при енергіях біля 0.1, 5, 8, 13 та 14 TeV, так і розробкою унікального для ВАК режиму фіксованої мішені з використанням металевих мікростріпових детекторів, розроблених в ІЯД НАНУ. Застосування металевих мішеней суттєво збагатить фронт таких робіт, надаючи, зокрема, можливість вивчення залежності характеристик взаємодій від таких факторів як деформація ядер, нейтронне гало, високі спіни основного стану, тощо. Реалізація пропонованого багатомішенного комплексу дозволить суттєво підвищити фізичну та економічну ефективність виконання досліджень на ВАК, оскільки дані можна буде одержувати одночасно на 8-ми мішенях

- Методологія дослідження (до 400 знаків)

Методологія досліджень базується як на теренах нових теоретичних розрахунків так і на безпосередньо вимірюваних залежностях різних спостережуваних величин в експерименті LHCb. Будуть розраховані та порівняні з новими теоретичними передбаченнями залежності поперечних диференціальних перерізів утворення дивних та чарівних адронів від таких кінематичних змінних як поперечний імпульс, швидкісність, енергія та тип зіткнень (від центральних до ультрапериферичних), множинності подій, тощо.

Розробку багатомішенного комплексу для режиму фіксованої металеві мішені буде здійснено за методологією, розвинутої авторами проєкту для експерименту HERA-B. На першому етапі будуть виконані ретельні Монте-Карло симуляції по генерації фізичних подій в металевій тонкій мішені, введеної в гало пучка ядер, що циркулюють на ВАК.

## **5. ОТРИМАНІ НАУКОВІ АБО НАУКОВО-ТЕХНІЧНІ РЕЗУЛЬТАТИ (до 2 сторінок) в поточному році/ в рамках реалізації Проєкту, зокрема:**

### **5.1. Опис наукових або науково-технічних результатів, отриманих в рамках виконання Проєкту (із зазначенням їх якісних та кількісних (технічних) характеристик)**

В центральних процесах дифракційної дисоціації протонів реалізується “глюонна фабрика” завдяки домінуючій ролі обміну траєкторіями померона та оддерона, що сприяє експериментальному підтвердженню їх існування. Виконано обрахунки властивості нових частинок – мас та ширин розпаду оддболів – що можуть народжуватися в таких реакціях.

Для пошуку сигналів оддерона запропоновано та обґрунтовано нову можливість експериментальної верифікації цього об’єкту. Зокрема, в рамках оригінальної моделі для екстраполяції ефективного перерізу пружної дифракції протонів та антипротонів в проєкті отримано оцінки на внесок оддерона при енергії прискорювача RHIC (Брукхейвен, США) 0.5 TeV при квадратах переданого імпульса порядку  $1 \text{ GeV}^2$  (область дифракційного мінімуму), особливо чутливої до оддерона.

Виконано систематичний аналіз двох класів дифракційних процесів: дифракційної дисоціації протонів та ультрапериферичних зіткнень протонів та атомних ядер. Основним теоретичним інструментом бали методи аналітичної теорії S-матриці в поєднанні з ідеями дуальності та експериментальними даними. При цьому була відкрито новий науковий напрямок, пов’язаний з народженням резонансів в прямому каналі реакції, а також можливість ідентифікації нової частинки – глюбола.

У рамках триваючої модернізації експерименту LHCb (Upgrade I) в частині діяльності робочої групи “Beam & Background” з моніторингу стабільності умов протікання експерименту, до ЦЕРНу поставлено систему радіаційного моніторингу RMS-R3. Система RMS-R3 виготовлена в ІЯД НАН України за оригінальною технологією металевих фольгових детекторів. Відповідно до розробленої та затвердженої в ЦЕРН специфікації системи RMS-R3 виконано виробничо-підготовчі та монтажні роботи з інсталяції детекторної системи RMS-R3 у номінальне робоче положення в експериментальній зоні LHCb приблизно на 2,2 м від точки взаємодії IP8. Дані системи включаються в загальну систему накопичення фізичних даних та відображення на пульті управління експерименту.

Під час тестування пучків ВАК (жовтень-листопад 2021 року) у рамках підготовки до старту вимірювальної кампанії Run 3 було виконано роботи з підключення та налаштування системи радіаційного моніторингу RMS-R3, яка призначена для відстеження та вимірювання умов зіткнення пучків ВАК та генерованого фону в експерименті LHCb у безпосередній близькості від області світності колайдерних пучків. Результатом роботи є включення системи RMS-R3 в центральну систему зчитування із виведенням сигналів із детекторів RMS-R3 на панель моніторингу “Beam and Background” в режимі реального часу та архівуванням даних до бази даних, а також перше успішне тестування функціональності системи в реальних умовах.

В рамках розробки режиму фіксованої мішені (LHCb Upgrade II, Run 4, 5) система RMS-R3 є прототипом елементного забезпечення управління динамічним положенням мікромішеней у гало пучка ВАК для забезпечення стабільної частоти ядерних взаємодій пучка ВАК та ядер мішеней.

Розроблено концепцію та дизайн прототипу мішенного вузла із декількома незалежними мікромішенями. Вперше обґрунтовано застосування MEMS (мікроелектронно-механічна система) технології для управління положенням мікростріпових мішеней товщиною та шириною 1 мікрометр і довжиною до 1 сантиметра. Надтонкі мікростріпові мішені базуються на технології ММД (металевих мікростріпових детекторів), створеної в ІЯД НАН України. Створено тестове програмне забезпечення для управління кроковими мікродвигунами. Розглядається встановлення компактної установки з декількома фіксованими мішенями та вперше представлено такий пристрій, як інтегральний елемент іонопроводу ВАК або його продовження у вакуумній камері вершинного детектора LHCb-VELO на виході накопичувальної циліндричної комірки газової фіксованої мішені (SMOG2). Виконано комп'ютерне проектування монітора потоків заряджених частинок на основі сегментованих фольгових сенсорів, що є невід'ємним елементом у схемі управління мішенню. З метою експериментальної перевірки та дослідження техніки точного позиціонування та моніторингу заряду/потoku від прототипу твердотільної мішені на основі технології MEMS на лінії тестового пучка протонів з SPS/PS (ЦЕРН) підготовлено запит на виконання експерименту та подано заявку для резервування робочого часу пучка у 2022 році.

Для оцінки функціонування пропонованого мішенного вузла в умовах високих інтенсивностей пучків ВАК та характеристик модернізованого LHCb детектора виконано Монте Карло симуляції для моделювання відгуку детектора на взаємодію пучка ВАК із прототипом твердотільної мікромішені. Запропонована методика забезпечення стабільної інтенсивності зіткнень пучка з ядрами фіксованої твердотільної мішені шляхом корекції положення мішені в гало пучка мікрокроковим двигуном. Напрацьовано формалізм для опису зменшення інтенсивності пучка під впливом різних факторів. Для кращого розуміння різних аспектів роботи фіксованої мішені нами проведено аналітичні розрахунки та моделювання методами Монте-Карло впливу роботи внутрішньої мішені на час життя протонного пучка ВАК. Досліджено вплив роботи внутрішньої мішені на час життя протонного пучка в ВАК.

Здійснено аналіз фізичних даних по генерації нейтральних дивних адронів в p-Pb зіткненнях при енергії 8,16 TeV в с.с.м. пари нуклонів. З використанням розробленого програмного забезпечення виміряні ефективності ідентифікації досліджуваних подій та подвійні диференційні

поперечні перерізи як функції рапідиті “у”, множинності та поперечного імпульсу  $p_T$  для  $K_s^0$ ,  $\Lambda$  та  $\Lambda^-$ . Розроблені програми дозволяють здійснювати відбір даних паралельно у багато потоків, на багатьох обчислювальних машинах. Таке багатопотокове виконання дозволяє значно зменшити час, необхідний на обробку даних. Планується розширити ці дослідження, зокрема шляхом порівняння одержаних експериментальних даних із сучасними теоретичними моделями.

Досліджено властивості протонного пучка LHC з метою вибору оптимального положення мішені в гало пучка. Проведено Монте-Карло симуляції подій в детекторі для реконструкції первинних вершин і треків. Одержано контрольні розподіли фізичних величин, які дозволяють оцінити правильність моделювання подій в детекторі. Генерування подій проводилось із урахуванням роботи тригерної системи усіх рівнів. Для протон-протонних зіткнень на Великому Адронному Колайдері досліджувались події при енергії в системі центра мас 14 TeV, тоді як використання фіксованої нікелевої мішені відповідає енергії в системі центра мас 114 GeV. Нікелева мішень бралась у вигляді смужки розмірами 1 мм×2 мкм×2 мкм. Проведено розрахунки відповідних світимостей.

Додатково до планових завдань запропоновано принципову конструкцію механічної системи введення мішені в гало пучка. Конструкція передбачає використання крокового двигуна із мікронною точністю. Точні розміри опорного фланця мають бути остаточно визначені в залежності від місця тестування системи в ЦЕРН.

## **5.2. За наявності науково-технічної продукції обґрунтування її переваг у порівнянні з існуючими аналогами**

-

## **5.3. Практична цінність отриманих результатів реалізації Проєкту для економіки та суспільства (стосується проєктів, що передбачають проведення прикладних наукових досліджень і науково-технічних розробок)**

-

## **5.4. Опис шляхів та способів подальшого використання результатів виконання Проєкту в суспільній практиці.**

Розроблене програмне забезпечення для вимірювання ефективності ідентифікації досліджуваних подій та подвійних диференційних поперечних перерізів як функції рапідиті у, множинності та поперечного імпульсу  $p_T$  для  $K_s^0$ ,  $\Lambda$  та  $\Lambda^-$ , яке може бути використано в подібних дослідженнях вчених з CERN'у.

Проаналізовані фізичні дані по генерації нейтральних дивних адронів в p-Pb зіткненнях при енергії 8,16 TeV в с.ц.м. пари нуклонів можуть бути використані вченими для різноманітних досліджень з галузі фізики високих енергій.

Монте-Карло симуляції подій в детекторі для реконструкції первинних вершин і треків можуть бути використані в дослідженнях вченими з експерименту LHCb.

Аналіз даних, отриманих від системи RMS-R3, що є прототипом елементного забезпечення управління динамічним положенням мікромішеней у гало пучка ВАК для забезпечення стабільної частоти ядерних взаємодій пучка ВАК та ядер мішеней для розробки високоточної системи управління положенням мікромішені.

Примітка: Анотований звіт не повинен містити відомостей, заборонених до відкритого опублікування

### **Науковий керівник Проєкту**

Провідний науковий співробітник

Єнковські Л.Л.

  
\_\_\_\_\_  
(підпис)