

ЗАТВЕРДЖУЮ  
Директор ГАО НАН України  
Яцків Я.С.



**АНОТОВАНИЙ ЗВІТ**  
**про виконану роботу у 2020 році в рамках реалізації проєкту**  
**із виконання наукових досліджень і розробок**  
**«Астрофізичні Релятивістські Галактичні Об'єкти (АРГО): життєвий шлях активних ядер»**

**Назва конкурсу: «Підтримка досліджень провідних та молодих учених»**  
**Реєстраційний номер Проєкту: 2020.02/0346**

**Підстава для реалізації Проєкту з виконання наукових досліджень і розробок (реєстраційний номер та назва Проєкту) 2020.02/0346, «Астрофізичні Релятивістські Галактичні Об'єкти (АРГО): життєвий шлях активних ядер»**

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

## **1. ЗАГАЛЬНА ІНФОРМАЦІЯ ПРО ПРОЄКТ**

Тривалість виконання Проєкту  
Початок – 5 листопада 2020;  
Закінчення – 2022 рік.

Загальна вартість Проєкту, 12 600 000 грн. (дванадцять мільйонів шістьсот тисяч гривень 00 копійок).

Вартість Проєкту по роках, грн.:

- 1-й рік 2 600 000 грн. (два мільйони шістьсот тисяч гривень 00 копійок)
- 2-й рік 5 000 000 грн. (п'ять мільйонів гривень 00 копійок)
- 3-й рік 5 000 000 грн. (п'ять мільйонів гривень 00 копійок)

## **2. ІНФОРМАЦІЯ ПРО ВИКОНАВЦІВ ПРОЄКТУ**

до виконання Проєкту залучено 10 виконавців, з них:

- доктори наук 1;
- кандидати наук 5;
- інші працівники 4.

### **Інформація про виконавців (авторів) Проєкту :**

1. Керівник: Берцик Петер Петерович, завідувач відділу фізики зір та галактик, доктор фізико-математичних наук, Головна астрономічна обсерваторія НАН України;
2. Виконавець: Іщенко Марин Вікторівна, старший науковий співробітник, Головна астрономічна обсерваторія НАН України, науковий співробітник, кандидат фізико-математичних наук;
3. Виконавець: Василенко Анатолій Андрійович, старший науковий співробітник, Головна астрономічна обсерваторія НАН України, старший науковий співробітник, кандидат фізико-математичних наук;

4. Виконавець: Вовк Катерина Борисівна, науковий співробітник, Головна астрономічна обсерваторі НАН України, молодший науковий співробітник, кандидат фізико-математичних наук;
5. Виконавець: Соболенко Маргарита Олександрівна, молодший науковий співробітник, Головна астрономічна обсерваторі НАН України, старший науковий співробітник;
6. Допоміжний персонал: Сободар Олександр Олегович, провідний інженер, Головна астрономічна обсерваторі НАН України;
7. Виконавець: Баннікова Олена Юріївна, старший науковий співробітник, кандидат фізико-математичних наук, Радіоастрономічний Інститут НАН України;
8. Допоміжний персонал: Сколота Сергій Вікторович, студент, 1 курс освітньо-кваліфікаційного рівня «Магістр» кафедра астрономії та космічної інформатики, Фізичний факультет Харківського національного університету імені В.Н. Каразіна;
9. Виконавець: Ахметов Володимир Сабірджанович, провідний науковий співробітник, кандидат фізико-математичних наук, Харківський Національний Університет імені В.Н. Каразіна;
10. Допоміжний персонал: Сорока Кирило Олександрович, 3 курс освітньо-кваліфікаційного рівня «Бакалавр», кафедра Астрономії та космічної інформатики, фізичний факультет Харківського національного університету імені В.Н. Каразіна.

### **3. ІНФОРМАЦІЯ ПРО ГРАНТООТРИМУВАЧА ТА ОРГАНІЗАЦІЇ СУБВИКОНАВЦІВ ПРОЄКТУ**

#### *1. Головна астрономічна обсерваторія*

Код ЄДРПОУ: 05417360 ;

Код(и) КВЕД: 72.19;

Відомча підпорядкованість: Національна академія наук України;

Технічне оснащення: інститут оснащений обчислювальним кластером – «GOLOWOOD». Дана система складається з 8 обчислювальних вузлів кожен з яких містить по два графічних процесора (GF GTX 660);

#### *2. Радіоастрономічний Інститут*

Код ЄДРПОУ: 02772020;

Код(и) КВЕД: 72.19;

Відомча підпорядкованість: Національна академія наук України;

Технічне оснащення: інститут оснащений обчислювальним кластером з продуктивністю 680ГФлопс, який включено в логічну інфраструктуру інституту, грид-мережі НАНУ і мережі Інтернет. Для проведення моделювання задачі N тіл відділ інституту оснащений графічним прискорювачем Nvidia GForce 660;

#### *2. Харківський Національний Університет імені В.Н. Каразіна*

Код ЄДРПОУ: 02071205;

Код(и) КВЕД: 85.42;

Відомча підпорядкованість: Міністерство Освіти і Науки України;

Технічне оснащення: університет має у своєму розпорядженні Дослідницький науково-технічний симулятор (КНР) Intel Core i7-7700, Дослідницький науково-технічний симулятор (КНР) Intel Core i5-8400 та Core i7-9600 з графічним прискорювачем GTX1060;

### **4. ОПИС ПРОЄКТУ**

#### **4.1. Мета Проєкту**

Побудова самоузгодженої моделі центральних областей активних ядер галактик, яка задовольняє низці спостережних даних. Вивчення таких об'єктів в момент злиття дасть змогу дослідити енергетичні характеристики гравітаційних хвиль і дозволить прямим методом перевірити загальну теорію відносності Ейнштейна.

#### 4.2. Основні завдання Проєкту

Моделювання життєвого циклу та побудова реалістичної моделі та співзв'язування зі спостереженнями систем чорних дір в ядрах галактик. Створення нейронних мереж для класифікації позагалактичних об'єктів. Пошук подвійних активних ядер галактик та аналіз їх випромінювання. Поширення наукових знань серед громадськості та науково-навчальних закладів через Веб-портал «АРГО».

#### 4.3. Детальний зміст Проєкту:

##### - Сучасний стан проблеми

Фізику Всесвіту можна описати двома фундаментальними теоріями – загальною теорією відносності та квантовою теорією поля. Чорні діри є об'єктами де ці теорії поєднуються, тому їх вивчення зможе дати відповіді на ключові питання: з чого починався Всесвіт і чим він закінчиться.

Розуміння виникнення і еволюції чорних дір в ядрах галактик є однією з основних завдань сучасної теоретичної астрофізики. Вплив центрального джерела (чорної діри) на глобальну зоряну еволюцію галактик так само як і на зореутворення навколо центрального району галактик є фундаментальним. В цьому сенсі можна говорити про так звану «со»-еволюцію галактик та їх чорних дір.

##### - Новизна Проєкту

Полягає у повному аналізі активних ядер галактик, створенні каталогу позагалактичних джерел та проведенні їх класифікації на квазари, галактики та АЯГ різних типів. Дослідження еволюції (в першу чергу динамічну), як галактичного центру, так і чорної діри та її оточення (подвійна система чорних дір, акреційний диск навколо чорної діри, припливне руйнування зірок в поле тяжіння чорної діри, ядерне зоряне скупчення). У нову еру гравітаційно-хвильової астрономії (з урахуванням майбутньої місії «LISA» Європейського Космічного Агентства) такі параметричні розрахунки є ключовими для передбачення частотно-часових гравітаційних спостережень.

##### - Методологія дослідження

*Моделювання* еволюції центральної подвійної чорної діри у тісному зоряному середовищі буде проведено на основі наявних спостережних даних за допомогою чисельного моделювання з використанням добре відомого в світі власного динамічного *N-тільного коду  $\phi$ -GPU* з пост-ньютонівськими поправками до членів порядку  $\sim 1/c^7$ . Даний код успішно тестований і адаптований для запуску на GPU-кластері ГАО НАН України та на інших GPU системах по всьому світу (Німеччина, Швейцарія, Китай та США).

Для класифікації позагалактичних об'єктів будуть створені нейронні мережі різної архітектури з використанням добре відомими алгоритмами «LDA», «KNN», «RF», «SVM» та виконане їх навчання з «вчителем».

Для отримання значень характеристик високоенергетичного випромінювання АЯГ буде проведений спектральний аналіз рентгенівського випромінювання галактик вибірки з використанням стандартних феноменологічних моделей, простих та складних аналітичних моделей та табличних моделей, які створені на основі чисельного фізичного моделювання акреційних дисків або газопилових торів.

### 5. ОТРИМАНІ НАУКОВІ АБО НАУКОВО-ТЕХНІЧНІ РЕЗУЛЬТАТИ 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)

1. Створено базу даних сучасних спектроскопічних, фотометричних та астрометричних каталогів, що містить дані для декількох мільярдів об'єктів. Створено програмне забезпечення для швидкого об'єднання даних різних каталогів, що містять сотні мільйонів та мільярди об'єктів. Створено «супер каталог», що об'єднує фотометричні та астрометричні дані з каталогів «Gaia»,

«PanSTARRS DR1», «ALLWISE», «2MASS». Цей каталог буде основою для подальшого пошуку та вивченню АЯГ.

2. На базі 12-го випуску даних Цифрового огляду неба Слоана було створено вибірку галактик, спектри яких містять лінії із подвійними піками. До вибірки увійшло 385 галактик. Всі галактики вибірки згідно класифікаційної діаграми відносяться до АЯГ.

3. В рамках задачі багатьох тіл промодельювали тор для набору числа хмар в ньому 8, 16, 32, 64 та 128 тисяч хмар. На підставі результатів чисельного моделювання, побудували стабільну динамічну модель для NGC1068. Детально досліджено початковий період виходу на рівноважний розв'язок чисельного тору. Показано, що незалежно від початкової кількості хмар, вихід на рівноважний стан (віріальна рівновага) виконується за один і той же проміжок часу. Для аналізу стабільності чисельного розв'язку було проведено інтегрування руху хмар з п'ятьма різними параметрами інтегрування (0.02, 0.01, 0.007, 0.005, 0.002 та 0.001). В залежності від цього безрозмірного параметру інтегрування ми показали, що точність інтегрування виходить на стабільний рівень при значеннях від 0.007 і менше.

4. Створено найбільш надійну навчальну вибірку АЯГ по даним сучасних спектроскопічних оглядів неба, що включають данні з радіо, оптичного та рентгенівського діапазону довжин хвиль. Надійність вибірки даного каталогу дозволить використовувати його при використанні методів машинного навчання. Виконано порівняння даних створеної навчальної вибірки АЯГ з аналогічними даними каталогу «ALLWISE AGN». Дослідженні різні критерії класифікації АЯГ з використанням фотометричної інформації.

5. З метою пошуку АЯГ з подвійними піками в рентгенівському діапазоні електромагнітного випромінювання на базі великих оглядів «SDSS» в оптиці та «Swift-BAT» в рентгені, було створено вибірку «GABRIELLE», до якої увійшло 49 АЯГ першого і другого типів.

В рамках 1 Етапу 2020 р. створено наукову продукцію у вигляді статей, надрукованих у провідних міжнародних реферованих виданнях (рівня Q1):

*Опубліковані:*

1. Francesco R. P., Thorsten N., Rainer S., Mirek G., Ostriker J. P., Stone, N. C., Long W., Peter B., Rampp, M. Intermediate Mass Black Hole Formation in compact Young Massive Star Clusters // Monthly Notices of the Royal Astronomical Society. – 2020. – 10.1093/mnras/staa3634
2. Khoperskov S., Zinchenko I., Avramov B., Khrapov S., Berczik P., Saburova A., Ishchenko M., Khoperskov A., Pulsoni C., Venichenko Y., Bizyaev D., Moiseev A. Extreme kinematic misalignment in IllustrisTNG galaxies: the origin, structure and internal dynamics of galaxies with a large-scale counterrotation // Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, staa3330. – 2020. – 10.1093/mnras/staa3330.

*На етапі рецензування:*

3. Bannikova E.Yu., Sergeyev A.V., Akerman N.A., Berczik P.P., Ishchenko M.V., Capaccioli M., Akhmetov V.S. Dynamical model of an obscuring clumpy torus in AGNs:I. Velocity and velocity dispersion maps for interpretation of ALMA observations // Submitted to Monthly Notices of the Royal Astronomical Society. – 2020.
4. Berczik P., Arca Sedda M., Sobolenko M., Ishchenko M., Sobodar O., Spurzem R. Merging of Unequal Mass Binary Black Holes in Non-Axisymmetric Galactic Nuclei // Submitted to ApJ. – 2020.
5. Avramov B., Berczik P., Meiron Y., Acharya A., Just A. Properties of loss cone stars in a cosmological galaxy merger remnant // Submitted to A&A. – 2020.

*В рамках 1 Етапу 2020 р. представлено три доповіді на наступних Міжнародних конференціях:*

1. Берцик П., Іщенко М., Соболєнко М., Катерина В., Василенко А., Баннікова О., Ахметов В. Астрофізичні релятивістські галактичні об'єкти (АРГО): життєвий шлях активних ядер. Конференція «Астрономія в Україні: від археоастрономії до астрофізики високих енергій», Київ, Україна. 27 листопада 2020 р.
2. Іщенко М.В., Соболєнко М.О., Берцик П.П. Прояв ефекту Лідов-Козая при злитті системи потрійних надмасивних чорних дір в галактиці NGC 6240. XXII Міжнародна наукова конференція Астрономічна школа молодих вчених. Україна, Київ, 11–12 грудня 2020 р.

3. Sobolenko M., Ischenko M., Berczik P. Triple Supermassive Black Hole evolution in NGC 6240. XI Conference of Young Scientists PROBLEMS OF THEORETICAL PHYSICS. Київ, Україна, 21-23 грудня 2020 р.

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

В рамках проекту представлення публічної презентації N-тільного коду з постньютонівською апроксимацією. Унікальною особливістю даного коду є ефективне використання високошвидкісних графічних прискорювачів для розрахунків динамічної взаємодії між об'єктами. Відповідні програми створені на новітній мові програмування «CUDA». Використання цієї мови та сучасних графічних прискорювачів дозволило у порівнянні з звичайними процесорами пришвидшити розрахунки у 1000 разів. Результати розрахунків та графічне представлення отриманих результатів буде викладено веб-сторінці «АРГО» в наступному році.

Іншою отриманою продукцією (прикладний результат) є моделювання тора в рамках N-тільного завдання з подальшим застосуванням результатів до моделювання карт швидкостей. Оригінальної і подібної моделі на даний момент в світі не існує. Крім того, дані результати є одними з перших, здатних пояснити спостережувані карти затінюючих торів в АЯГ, що отримані інтерферометром «ALMA».

Наступною отриманою продукцією (каталог спостережень) є вибірка, яка є найбільшою на даний момент вибіркою АЯГ із емісійними лініями з подвійними піками в оптичному діапазоні. Вибірка є достатньо великою і однорідною для статичної достовірності закономірностей, отриманих на її основі. Створений найбільш повний каталог АЯГ за даними сучасних спектроскопічних, фотометричних та астрометричних оглядів неба буде основою для проведення подальшої класифікації АЯГ.

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

Незважаючи на те, що проєкт є фундаментальним дослідженням, прикладні результати проєкту є суспільно значущими для загального розуміння еволюції Всесвіту. З точки зору світогляду загальні астрофізичні результати будуть основоположними в розумінні еволюції людства та нашого місця Всесвіті. При вивченні високоенергетичних процесів злиття чорних дір та процесів акреції, енергія що вивільняється під час випромінення, може мати також значний вплив на процеси людської життєдіяльності на Землі.

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

Отримані результати дослідження мають значний внесок у міжнародну науку та сприятиме отриманню нових знань, зокрема:

1. Наукові статті з результатами дослідження слугуватимуть платформою для планування подальших розрахунків і перевірки теорій еволюції АЯГ та чорних дір.
2. Урахування самогравітації тора та отримані модельні карти швидкостей сумісно з спостережними даними «ALMA» дозволять знайти більш точні оцінки мас надмасивних чорних дір в найближчих сейфертівських галактиках.
3. Створені вибірки і каталоги АЯГ, що будуть містити отримані оцінки їхніх фізичних параметрів, будуть включені у міжнародні наукові бази даних і стануть відкритими для користування міжнародною астрономічною спільнотою.
4. Верифікація методів машинного навчання для встановлення морфологічної автоматизованої класифікації ядер галактик дозволить оптимально створювати вибірки об'єктів за критерієм ієрархічного сценарію злиття.

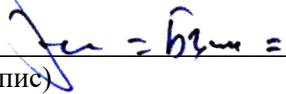
Анотований звіт не містить відомостей, заборонених до відкритого опублікування

**Науковий керівник Проєкту**

**Берцик Петер Петерович,**

старший науковий співробітник,

завідувач відділу фізики зір та галактик Головної астрономічної обсерваторії НАНУ

  
\_\_\_\_\_

(підпис)