## НАЦІОНАЛЬНА АКАДЕМІЯ НАУК УКРАЇНИ

## ГОЛОВНА АСТРОНОМІЧНА ОБСЕРВАТОРІЯ

## 3 B I T

## ПРО РОБОТУ ВІДДІЛУ ФІЗИКИ ЗІР ТА ГАЛАКТИК

У 2022 РОЦІ

Завідувач відділу фізики зір та галактик уста – 62-те д.ф.-м.н. Берцик П.П.

Київ – 2022

## Співробітники відділу фізики зір та галактик

зав. від., д.ф.-м.н. Берцик П.П. зав. лаб., д.ф-м.н. Пілюгин Л.С. пров. н.с., д.ф-м.н. Харченко Н.В. с.н.с., к.ф-м.н. Зінченко І.А. с.н.с., к.ф-м.н. Іщенко М.В. н.с., к.ф-м.н. Никитюк Т.В. н.с., к.ф-м.н. Вовк К.Б. м.н.с. Соболенко М.О. м.н.с. Михайлицка Н.Г. с.н.с., к.ф-м.н. Захожай О.В. (по суміщенню) аспірант Білінський І.О. (по суміщенню) н.с. Плачинда С.І. (по суміщенню) н.с. Бутковська В.В. (по суміщенню)

## Реферовані публікації за 2022:

- Kamlah, A. W. H., Leveque, A., Spurzem, R., Arca Sedda, M., Askar, A., Banerjee, S., **Berczik, P.**, Giersz, M., Hurley, J., Belloni, D., Kühmichel, L., Wang, L.Preparing the next gravitational million-body simulations: evolution of single and binary stars in NBODY6++GPU, MOCCA, and MCLUSTER.Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 511, 4060-4089
- Gualandris, A., Khan, F. M., Bortolas, E., Bonetti, M., Sesana, A., Berczik, P., Holley-Bockelmann, K.Eccentricity evolution of massive black hole binaries from formation to coalescence. Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 511, 4753-4765
- 3. Zhong, S., Li, S., **Berczik, P.,** Spurzem, R. Revisit the Rate of Tidal Disruption Events: The Role of the Partial Tidal Disruption Event. The Astrophysical Journal, 933, 96
- Berczik, P., Arca Sedda, M., Sobolenko, M., Ishchenko, M., Sobodar, O., Spurzem, R. Merging of unequal mass binary black holes in nonaxisymmetric galactic nuclei. Astronomy & Astrophysics, 665, A86
- 5. Kamlah, A. W. H., Spurzem, R., **Berczik, P.,** Arca Sedda, M., Flammini Dotti, F., Neumayer, N., Pang, X., Shu, Q., Tanikawa, A., Giersz, M. The impact of stellar evolution on rotating star clusters: the gravothermal-

gravogyro catastrophe and the formation of a bar of black holes.Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 516, 3266-3283

- Sobolenko, M., Kompaniiets, O., Berczik, P., Marchenko, V., Vasylenko, A., Fedorova, E., Shukirgaliyev, B. NGC 6240 supermassive black hole binary dynamical evolution based on Chandra data. Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 517, 1791-1802
- Pilyugin L.S., Lara-Lopez M.A., Vilchez J.M., Duarte Puertas S., Zinchenko I., Dors O.L., Calibration-based abundances in the interstellar gas of galaxies from slit and IFU spectra, Astronomy and Astrophysics, v. 668, A5, pp. 1-13
- Climent J. B., Guirado J. C., Zapatero Osorio M. R., Zakhozhay O. V., Pérez-Torres M., Azulay R., Gauza B., Rebolo R., Béjar V. J. S., Martín-Pintado J., and Lefevre Ch. Radio emission in a nearby ultracool dwarf binary: a multifrequency study. Astronomy and Astrophysics, 660A, 65C
- Climent Oliver, J. B.; Guirado, J. C.; Perez Torres, M. Á.; Zapatero Osorio, M. R.; Zakhozhay, O. Uncovering the radio emission of lowmass systems. European VLBI Network Mini-Symposium and Users' Meeting 2021, 12-14 July, 2021.
- 10.**Plachinda S.**, Demidov M., **Butkovskaya V.**, Logvinov D. A New Approach to Multiwavelength Observations of the Sun-as-a-Star Magnetic Field // 44th COSPAR Scientific Assembly. Held 16-24 July, 2022.
- 11.Duarte Puertas S., Vilchez J.M., Iglesias-Paramo J., Molla M., Perez-Montero E., Kehrig C., Pilyugin L.S., Zinchenko I.A. Mass-metallicity and star formation rate in galaxies: A complex relation tuned to stellar age. Astronomy & Astrophysics 666, 186 (2022)
- 12.Oliveira C. B., Krabbe A. C., Hernandez-Jimenez J. A., Dors O. L., Zinchenko I. A., Hägele G. F., Cardaci, M. V., Monteiro, A. F. Chemical abundance of LINER galaxies – metallicity calibrations based on SDSS-IV MaNGA. Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 515, 6093-6108
- 13.Chemerynska I.V., M. V. Ishchenko, M. O. Sobolenko, S. A. Khoperskov, P. P. Berczik, Kinematic characteristics of the Milky Way

globular clusters based on Gaia DR-2 data, publication in Advances in Astronomy and Space Physic, Vol. 12, Is. 1-2

14. Bannikova, E., Akerman, N., Capaccioli, M., Berczik, P., Akhmetov, V., Ishchenko, M., Apparent counter-rotation in the torus of NGC 1068: influence of an asymmetric wind., Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 518, 742.

## Тези конференцій за 2022:

- 1. **Butkovskaya V., Plachinda S**. On magnetic field of the hot evolved star HR 3042 // in abstract book of 22-nd Gamow International Astronomical Conference "ASTRONOMY AND BEYOND: ASTROPHYSICS, COSMOLOGYAND GRAVITATION, ASTROPARTICLE PHYSICS, RADIOASTRONOMY AND ASTROBIOLOGY", 2022, p. 10.
- Plachinda S., Demidov M., Butkovskaya V., Logvinov D. A New Approach to Multiwavelength Observations of the Sun-as-a-Star Magnetic Field // 44th COSPAR Scientific Assembly. Held 16-24 July, 2022. <u>https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/2022cosp...44.2459P/abstract</u>
- 3. **Пілюгін Л.С.** міжнародна конференція China Ukraine Forum: Astrophysics and Atmospheric Physics Held online 25 October 2022.
- 4. P. Berczik, M. Sobolenko, M. Ishchenko, O. Sobodar: Galaxy coevolution with SMBH. Dynamical history of SMBH evolution. EAS 2022 meeting. Valencia, Spain. June 27 July 1, 2022.
- 5. O. Sobodar, M. Sobolenko, M. Ishchenko, P. Berczik NGC6240: Numerical model of triple supermassive blackhole sand host galaxy complex co-evolution EAS 2022 meeting. Valencia, Spain. June 27 - July 1, 2022.

## Каталог:

## Публікації, що проходять рецензування:

- 1. **Butkovskaya V., Plachinda S**. On magnetic field of the hot evolved star HR3042 // Odessa Astronomical Publications, 2022
- M. Ishchenko, M. Sobolenko, P. Berczik, S. Khoperskov, C. Omarov, O. Sobodar, Makukov M. The evolution of Milky Way Globular Clusters system in cosmological timescale //Astronomy &Astrophysics, 2022
- 3. Nykytyuk T. The role of merger in a chemical evolution of the Local

dwarf galaxies //Advances in Space research, 2022

## Загалом:

Реферовані опубліковані статті (14): ApJ –2, A&A – 3, MNRAS – 6. Публікації, що проходять рецензування – (3) Тези конференцій – (5) Каталог – (0)

## Найважливіші результати за 2022 р.:

**Berczik,** P., ArcaSedda, M., **Sobolenko, M., Ishchenko, M.**, Sobodar, O., Spurzem, R., Merging of unequalmass binary black holes in non-axisymmetric galactic nuclei, (2022), Astronomy & Astrophysics, 665, A86.

https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/2022A%26A...665A..86B/abstract

**Pilyugin L.S.,** Lara-Lopez M.A., Vilchez J.M., DuartePuertas S., **Zinchenko I.,** Dors O.L., Calibration-based abundances in the interstellar gas of galaxies from slit and IFU spectra, 2022, Astronomy & Astrophysics, v. 668, A5, pp. 1-13

https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/2022A%26A...668A...5P/abstract

## **3MICT**

**1.3лиття подвійних чорних** дір різної маси в неосесиметричних ядрах галактик (Берцик П.П., Соболенко М.О., Іщенко М.В)

**2.Високоенергетичне випромінювання гравітаційних хвиль від** космологічного злиття в галактиках з масивними чорними дірами ( Соболенко М.О., Берцик П.П., Іщенко М.)

**3.Зоряні** кластери та їх взаємодія з Галактичною надмасивною чорною дірою на космологічній часовій шкалі (Берцик П.П., Іщенко М.)

4. Динамічна еволюція кулястих скупчень та їх взаємодія з галактичними структурами на космологічній часовій шкалі» Етап 2: Моделювання зоряної еволюції кулястих скупчень (*Іщенко М.,* Соболенко М.)

5.Використання паралельних методів розрахунків з використанням кластерних технологій в астрофізиці та супутниковій геодезії (Берцик П.П., ІщенкоМ.)

6.Визначення хімічного складу міжзоряного середовища галактик за спектрами панорамної (IFU) спектроскопії (Пілюгін Л.С., Зінченко І.А.) 7.Дослідження хімічної еволюції балджу галактики МЗ1 (Никитюк Т.В.)

8.Дослідження навколозоряного середовища систем VHS1256 та G196за допомогою радіотелескопів VLA та ALMA (*Захожай О.В.*)

9. Дослідження зоряних магнітних полів (Плачинда С.І., Бутковська В.В.)

I. Новий підхід до обчислення магнітного поля Сонця як зірки по багатохвильовим спектрополяриметричним спостереженням II. Магнітне поле яскравого гіганта HR 3042

III. Вивчення змінності магнітного поля з ефективною глибиною формування спектральних ліній в атмосфері зорі

## **1.** Злиття подвійних чорних дір різної маси в неосесиметричних ядрах галактик (Берцик П.П., Соболенко М.О., Іщенко М.В)

Було вивчено динамічне «затвердіння» (hardening) подвійних систем надмасивних чорних дір (ПНЧД) за рахунок зірок. Досліджувались ЧД неоднакової маси в центральній області галактичних ядер, які зливаються. Основна частина існуючих робіт,які зосереджені на повному чисельному моделюванні утворення подвійної системи та еволюції НЧД, не повністю охоплюють простір важливих фізичних параметрів систем.

параметрів Для покриття широкого спектру системи ΜИ сконструювали набір із 68 N-тільних моделювань, що складаються зN =25k, 50k, 100k, 200k, 400k, 1М частинок. Щоб відтворити типове середовище внутрішніх регіонів галактики після злиття, еволюція ПНЧД відбувалась в галактичному ядрі, що обертається. Ми представляємо повний набір прямих *N*-тільних моделювань, варіюючи як загальну масу системи так і відношення мас НЧД . Моделювання виконувалось за допомогою ф-GPU N-тільного коду, який дозволив нам повністю використовувати суперкомп'ютери, оснащені графічними процесорами (GPU).

Ми не виявили «проблеми останнього парсеку» для усього набору модельних систем, оскільки наші НЧД мають тенденцію до об'єднання у систему та скорочення відносних відстаней, не виявляючи значних ознак гальмування цих процесів. Затвердіння подвійних систем за рахунок зірок в наших модельних ПНЧД є достатньо ефективним для злиття компонентів за короткий проміжок часу близько 1 млрд років. Це підтверджує попередні результати та поширює їх на великі числа кількості частинок у системі та на системи, що обертаються.

Для фіксованої маси першої НЧД, яка більш масивна, ми знайшли значне збільшення темпу затвердіння для менш масивної другої (легшої) НЧД. З іншого боку, для фіксованої маси другої НЧД ми знайшли, що темп затвердіння повинен бути пропорційний масі першої ЧД. Також ми знайшли тісний зв'язок між швидкістю затвердіння та повною масою подвійної системи  $M_{12}$ та зведеною масою  $\mu$ , що передбачає що процес зменшення відстані у ПНЧД можна описати двохпараметричним відношенням. Менші значення  $M_{12}$ та  $\mu$  призводять до збільшення швидкості затвердіння. Величини затвердіння в наших моделях підтримують прогнози експериментів з трьох тільним розсіюванням, що передбачають масштабування між темпом затвердіння та відношенням мас компонентів (Рис. 1).

Важливість цієї роботи лежить в площині пошуку джерел наногерцевих гравітаційних хвиль. Питання полягало в тому, чи достатньо швидко зливаються ПНЧД в ядрах галактик, щоб остаточне злиття відбулося за час менший ніж час Хаббла. Наше дослідження показало, що у широкому діапазоні фізичних параметрів існує велика кількість систем ПНЧД, які потенційно можуть бути джерелами гравітаційних хвиль у наногерцовому діапазоні (Рис.1).



Рис. 1 — Ліворуч: Час злиття ПНЧД  $T_{merge}$  як функція параметру  $\mu/[M_b(1+q)]$ , масштабованого до маси галактичного ядра  $M_b$ . Колір відповідає за відношення мас подвійної системи *q. Праворуч:* Час злиття ПНЧД  $T_{merge}$  як функція маси першої ЧД  $m_1$ , де кольором позначено масу другої ЧД  $m_2$ .

## **2.** Високоенергетичне випромінювання гравітаційних хвиль від космологічного злиття в галактиках з масивними чорними дірами ( Соболенко М.О., Берцик П.П., Іщенко М.)

Основна ідея нашого дослідження полягає в оцінці фізичного часу злиття системи подвійної надмасивної чорної діри (ПНЧД) у центрі взаємодіючої галактики NGC 6240. Для оцінки відстані між компонентами та маси ЧД використовувались рентгенівських спостережень космічної обсерваторії Чандра у діапазоні 0,5–7,5 кеВ. На основі отриманих оцінок було виконано динамічне моделювання системи за допомогою прямого *N*-тільного коду з високою роздільною здатністю. Моделювання проводилось з ньютонівською та пост-ньютонівською (до 2.5PN членів) динамікою для цієї конкретної подвійної системи НЧД. Основні результати дослідження можна підсумувати таким чином:

- i. Було виконано рентгенівський аналіз комбінованого спектру чотирьох спостережень Чандра NGC 6240 з результуючою експозицією 480 кс для кожного з двох активних ядер. Ці спектри демонструють окремі лінії випромінювання вузької компоненти Fe Ка із спостережуваними енергіями  $E_{\rm S}$ =6,39 $^{+0,01}_{-0,02}$  кеВ та  $E_{\rm N}$ =6,41 $^{+0,01}_{-0,02}$  $\sigma_{S}=0.05^{+0.04}_{-0.03}$  keB кеВ ліній відповідними 3 ширинами та  $\sigma_N = 0.05^{+0.01}_{-0.02}$  кеВ для південного та північного ядер відповідно.
- іі. Ми оцінили динамічну масу цих ядер як  $M_{\rm dyn}\approx 2,04\times 10^{11}$  М $_{\odot}$  з рентгенівського аналізу, припускаючи, що отриманий зсув енергії спричинений відносним рухом двох ядер на пізній стадії злиття галактик. Прийнявши, що ця маса являє собою масу балджу, ми оцінили масу ПНЧД як  $M_{\rm BH12}\approx 2,04\times 10^{11}$  М $_{\odot}$ . Це значення узгоджується з оцінками інших авторів.
- ііі. На основі оціненої маси балджу та максимальної спроєктованої відстані R = 1 кпк для компонент центральної ПНЧД, ми побудували фізичну модель системи, що зливається. Використовуючи цю фізичну модель, ми зробили 12 реалізацій базових чисельних моделей з різною кількістю частинок N = 100, 200 і 500k. Щоб отримати час злиття, ми використовували ньютонівські та постньютонівські *N*-тільні моделі (до 2,5 PN члена). В якості основного коду ми використали наш власний прямий *N*-тільний код  $\phi$ -GPU зі

схемою інтеграції Ерміта четвертого порядку та індивідуальними часовими кроками для частинок.

- iv. Усі базові ньютонівські моделювання показали дуже хороше узгодження в еволюції зворотної великої піввісь (1/а). З цих моделювань ми дійшли висновку про незалежність наших результатів «затвердіння» (hardening) ПНЧД від початкової кількості частинок (100, 200 i 500k) і рандомізації для позицій і швидкостей частинок. Ексцентриситет не виявив жодної систематичної залежності ні від кількості частинок, ні від початкового числа рандомізації через його дуже «стохастичний» характер.
- v. Щоб зробити наші висновки більш статистично значущими, ми виконали додаткові ньютонівські *N*-тільні моделювання для *N* = 100, 200 і 500k з різними початковими числами рандомізації. Для додаткових моделювань, ексцентриситет також не показав будь-якої суттєвої залежності від кількості частинок *N*. Наш незалежний від *N* широкий діапазон ексцентриситету (0,40–0,99) для подвійних систем не підтверджує передбачення інших авторів про більш вузький діапазон ексцентриситету зі збільшенням кількості N-тільних частинок.
- vi. Щоб оцінити час злиття для центральної ПНЧД, ми об'єднали базові ньютонівські та пост-ньютонівські чисельні моделі. Отримані часи злиття лежать в діапазоні від 15 до 57 млн років, що досить добре узгоджується з нашими попередніми результатами. Додаткові 10 ньютонівських та пост-ньютонівських моделей з N=500k і різними початковими числами рандомізації для розподілу частинок також показують досить подібні результати. Базуючись на чисельному наближенні часу злиття як функції ексцентриситету ПНЧД, ми можемо зробити висновок, що навіть для, можливо, дуже малого початкового ексцентриситету, час злиття все одно має верхню межу близько ≈70 млн років (Рис. 2).
- vii. Реалізація релятивістської пост-ньютонівської апроксимації до 2.5PN членів дозволили нам прослідкувати еволюцію ПНЧД до масштабу мпк. Ми отримали форми хвиль і амплітудно-частотні карти за останні 50 і 10 років для системи ПНЧД у взаємодіючій галактиці NGC 6240 (Рис. 3). Такі події злиття SMBHB можна спостерігати за допомогою поточних і майбутніх проєктів масиву синхронізації пульсарів (PulsarTimingArray; PTA).



Рис. 2 – Час злиття ПНМЧД як функція ексцентриситету в момент часу t = 10,4 млн років (10,0 NB), коли включались пост-ньютонівські додаткові члени. Кольором відображено моделі із різними початковими значеннями рандомізації RAND, числа показують значення ексцентриситету. Сіра пунктирна лінія – апроксимаційна формула  $t_{merge} = A \times [1 - (ecc_{10})^2]^B$ , де коефіцієнти A=71,98±7,89 та B=0,46±0,07.



Рис. 3 – Частотно-часові представлення (зверху) деформації (знизу) для прогнозованих форм гравітаційної хвилі з *h*<sub>+</sub> поляризацією від ПНЧД, що зливається в NGC 6240 (D<sub>L</sub> = 111,2 Мпк) за останні 50 років (ліворуч) і останні 10 років (праворуч). Злиття відбувається у подвійній системі з  $1.36 \times 10^{9}$ 6,8×10<sup>8</sup> M<sub>☉</sub> i компонент Mo та масами відповідним співвідношення мас 2:1. Кінцева відстань між компонентами (згідно постньютонівській процедурі) становить 0,75 мпк. Суцільна вертикальна лінія на лівій панелі вказує на останні 10 років злиття. Пунктирні вертикальні лінії зліва направо вказують на відстань між компонентами в 15, 10 і 5 радіусів Шварцшильда відповідно.

# **3.**Зоряні кластери та їх взаємодія з Галактичною надмасивною чорною дірою на космологічній часовій шкалі -2-й етап(Берцик П.П., Іщенко М., Соболенко М.)

Ми проаналізували всі показники взаємодії із загальних 4000 (4 × 1000) зразків, використовуючи наведені вище критерії, і знайшли ~24 КС, які мають принаймні один індивідуальний близький прохід (перицентр < 100 пк) поблизу ГЦ у кожному з чотирьох TNG-TVPs. Далі ми оцінили всі ці показники взаємодії як функцію відносної відстані між КС та ГЦ. Ми маємо ~3-4 взаємодії КС з центром Галактики на млрд. років на відстані менше ніж 50 пк і, наприклад, ~5-6 КС на -80 пк, для кожного зовнішнього TNG-TVP потенціалу.

Також ми проаналізували однакові показники взаємодії окремо з групуванням проміжку часу 1 млрд років. Ми виявили, що для кожного з різних TNG-TVP на часовому інтервалі 1–8 млрд років ми отримали досить постійні значення темпів взаємодії, які починають зменшуватися (коефіцієнт 2) лише через ~8 млрд років назад у часі. Така поведінка пояснюється суттєвими змінами мас компонентів диску та гало разом з їх масштабними параметрами. У цей проміжок часу скупчення стають гравітаційно менш зв'язаними з Галактикою, що, призводить до більш розширених траєкторій, більш віддалених від Галактичного центру.

Ми дослідили ймовірність близьких проходів поблизу центру Галактики у всіх наших чотирьох TNG-TVP, загалом для ~24 GC. Ми виявили 10 KC: NGC 6401, Pal 6, NGC 6681, NGC 6712, NGC 6287, NGC 6642, NGC 6981, HP 1, NGC 1904 і NGC 362, які відповідають вибраним критеріям (відносна відстань менше ніж 100 пк між КС і ГЦ) у всіх чотирьох змінних у часі потенціалах TNG. Для перших шість КС ми також отримали дуже високу статистично значущу ймовірність взаємодії з ГЦ близько 100%. Інші чотири КС також мають ймовірність взаємодії в діапазоні від 90% до 20%. Ці результати, знову ж таки, однакові для всіх наших чотирьох зовнішніх потенціалів TNG-TVP.

На основі наших основних результатів ми можемо оцінити максимальну частоту взаємодії КС з ГЦ у нашому МШ на рівні максимум кількох десятків проходів на млрд. років всередині центральної зони 100 пк. Така низька частота взаємодії не може повністю пояснити відносно високу масу (порядку 10<sup>7</sup> М) нашого МШЦЗС, якщо ми обмежимо наше дослідження лише періодичним захопленням зірок з КС, що проходять

близько. Отже, нам однозначно потрібно припустити й інший сценарій. А саме можливе повне припливне руйнування деяких ранніх КС під час взаємодії з формуючими ЦЗС та ГЦ.

# 4. Динамічна еволюція кулястих скупчень та їх взаємодія з галактичними структурами на космологічній часовій шкалі» Етап 2: Моделювання зоряної еволюції кулястих скупчень (*Іщенко М.,* Соболенко М.)

За даними роботи у 2021 р. було знайдено кулясті скупчення, що задовольняють умову близького проходження на відстані у 100 пк від Галактичного центру. Найбільш «цікавим» виявилось скупчення NGC 6121. КС NGC 6121 ще знане як Messier 4, має близьке з мінімальним значенням dR<9 пк та часте проходження. Швидкість відносно  $4J - dV \approx 380$  км/с. Маса приблизно за даними Gaia DR-2 –  $9,29 \times 10^4$  M<sub> $\odot$ </sub>. Вік зоряного населення скупчення становить 11,5-13,3 млрд років

Підбір початкових параметрів на 8 млрд років: маса, радіус напівмаси та параметр концентрації. Пряме інтегрування виконувалось за допомогою N-тільногоф-GPU коду у змінному з часом потенціалі IllustrisTNG-100 #411321.



Динаміка втрати маси скупченням

Еволюція радіусу напівмаси

Найбільш «вдалими» початковими параметрами є (жовта лінія), що збігаються зі спостережувальними даними на сьогодні: N-частинок  $\approx$ 1 050 000, M $\approx$  605 000 M $_{\odot}$ , R– 15 пк. Підбір початкових параметрів на 8 млрд років: маса, радіус напівмаси та параметр концентрації. Пряме інтегрування виконувалось за допомогою N-тільногоф-GPU коду у змінному з часом потенціалі IllustrisTNG-100 #411321 та з додаванням до потенціалу Центрального зоряного скупчення масою  $4 \times 10^7 M_{\odot}$ .



Динаміка втрати маси скупченням



Найбільш «вдалими» початковими параметрами є (зелена лінія), що збігаються зі спостережувальними даними на сьогодні з урахуванням Центрального зоряного скупчення:

N-частинок  ${\approx}1$  300 000,  $~M \approx 700$  000  $M_{\odot}, R{-}$  13,5пк.

Таким чином, різниця втрати маси скупченням з урахуванням Центрального зоряного скупчення є більшою на 30%.

Динаміка втрати скупченням зір під час своєї еволюції на прикладі 8, 4 млрд років назад та на сьогодні з урахуванням впливу Центрального зоряного скупчення.

Глобальний план (центр відліку – Галактичний центр)

Локальний план (центр відліку – центр скупчення)



на 8 млрл років назад у часі



Розподіл внутрішньої кумулятивної маси та розподіл щільності в різні проміжки часу (на 8, 4 млрд років назад на сьогодні) з урахуванням Центрального зоряного скупчення





# 5.Використання паралельних методів розрахунків з використанням кластерних технологій в астрофізиці та супутниковій геодезії (Берцик П.П., ІщенкоМ.)

Затінюючий тор є однією з ключових особливостей активних ядер галактик (АЯГ). Він забезпечує речовиною акреційний диск і підтримує високий рівень випромінювання в центральних областях АЯГ. Чисельні моделювання задачі N тіл для тора, що складається із 128000 хмар, у гравітаційному полі НМЧД з початковими умовами, що відповідають початку активної стадії показують, що тор досягає стану рівноваги. Розподіл хмар у поперечному перетині тору в рівноважному стані є гауссовим з товстою вертикальною структурою, як вимагає уніфікована схема АЯГ. Результати моделювань демонструють осциляції центральної області перетину тора. Вони існують протягом усього часу еволюції тора, зменшуючись за амплітудою. На основі нового виразу гравітаційного потенціалу тора з еліптичним перетином показано, що ці коливання пов'язані з коробчатими орбітами у згладженому потенціалі тора.

В Центрі аналізу ГНСС-даних Головної астрономічної обсерваторії Національної академії наук України було проведено обробку спостережень ГНСС-супутників, зареєстрованих на українських та східноєвропейських перманентних станціях. В результаті проведеного аналізу ГНСС-даних було отримано високоточні оцінки координат українських перманентних станцій в системі відліку IGb14 та значень зенітної тропосферної рефракції на цих станціях для GPS-тижнів 2168-2227. Середні значення повторюваності компонент координат станцій — 0,99 мм, 1,09 мм та 3,93 мм для північної, східної та висотної компонент відповідно. Файли результатів виконаного аналізу спостережень ГНССсупутників у форматах SINEX (координати ГНСС-станцій, нормальні рівняння або коваріаційна матриця) та SINEX TRO (значення зенітної тропосферної затримки на ГНСС-станціях) розміщено на ftp-сервері ГАО України HAH адресою: за ftp://ftp.mao.kiev.ua/pub/gnss/products/IGb14/www/, де *wwww* — номер GPS-тижня. В результаті проведеного повторного аналізу ГНСС-даних було отримано високоточні оцінки координат українських перманентних станцій в системі відліку IGS14 та значень зенітної тропосферної рефракції на цих станціях для GPS-тижнів 1934–2105. Середні значення

повторюваності компонент координат станцій — 0,93 мм, 1,00 мм та 3,51 мм для північної, східної та висотної компонент відповідно.

Отримані розв'язки використовуються в рамках міжнародного проєкту EPN Densification.

Проведено дослідження залежності часу, необхідного на отримання тижневого розв'язку, від кількості ядер процесора, що використовуються при обробці. За результатами представленого дослідження рекомендується використовувати при обробці тижневої сесії ГНСС-спостережень за допомогою програмного комплексу «Bernese GNSS Softwarever. 5.2» не більше шести–восьми ядер процесора (у залежності від кількості станцій спостережень).

## 6.Визначення хімічного складу міжзоряного середовища галактик за спектрами панорамної (IFU) спектроскопії (Пілюгін Л.С., Зінченко І.А.)

Існуючі емпіричні R та S калібрування для визначення вмісту кисню та азоту у міжзоряному газі галактик за виміряними потоками в емісійних лініях були побудовані на основі колекції спектрів областей HII у близьких галактиках, отриманих з вузькою щілиною. В даний час широкого поширення набула панорамна спектроскопія, яка забезпечує отримання спектрів у кожній точці (спакселі - майданчику вибраного зображення галактики мультифіберної розміру) 3 використанням технології (integral field unit (IFU) spectroscopy). Поряд з областями НІІ випромінювання дифузного іонізованого газу може робити внесок в емісійні лінії спектрів спакселів. Вклад випромінювання дифузного іонізованого газу в емісійні лінії в спектрах спакселів залежить від розміру фібера, що використовується для спектральних спостережень. Ми досліджували застосування існуючих калібрувань для визначення хімічного складу за спектрами спакселів. Розглянуто вісім близьких галактик, для яких є щілинні спектри окремих областей НІІ і панорамна спектроскопія. Для кожної галактики знайдено радіальний розподіл вмісту кисню, отриманого по потоках у щілинних спектрах, і радіальний розподіл вмістів, знайдених за потоками у спектрах спакселів.

Порівняння та аналіз отриманих розподілів дозволяє зробити такі висновки. Вміст кисню, знайдений з використанням R калібрування за щілинними спектрами та спектрами спакселів, добре узгоджуються один з одним. Вміст кисню, знайдений з використанням S калібрування за спектрами спакселів, злегка нижче (до 0.05 dex), ніж вміст кисню, знайдені за щілинними спектрами, при високих вмістах кисню. Радіальний розподіл вмісту кисню в даній галактиці не залежить від розміру фібера, що використовується для спектральних спостережень. Це свідчить про те, що внесок випромінювання дифузного іонізованого газу в емісійні

лінії в спектрах спакселів не відіграє суттєвої ролі для визначення хімічного складу.

# **7.Дослідження хімічної еволюції балджу галактики М31** (Никитюк Т.В.)

Розраховано хімічну еволюцію балджу масивної спіральної галактики М31 в рамках монолітного сценарію та сценарію ієрархічного злиття. Для фрагменту перед злиттям розрахунку розподілу зір за металічністю еволюції. побудовано відкриту модель хімічної Виявлено, ЩО спостережувана функція розподілу металічності балджу цієї галактики 3 фрагментів з високою відтворюється шляхом злиття щонайменш металічністю. Показано, що впродовж еволюції фрагменту до злиття відбувалась акреція незбагаченого газу, темп якої змінювався з часом.

## 8.Дослідження навколозоряного середовища систем VHS1256 та G196-З за допомогою радіотелескопів VLA та ALMA (*Захожай О.В.*)

У 2022 році було продовжено дослідження систем VHS1256 та G196-3, спостереження яких проводилось на системах радіотелескопів VLA у 2018 році (керівник спостережної програми Клімент Х.Б.), NOEMA у 2019 році (керівник спостережної програми Захожай О.) та ALMA у 2019 році (керівник спостережної програми Запатеро-Осоріо М.Р.). Основною метою радіо-спостережень було дослідити навколозоряне середовище цих та з'ясувати наявність навколопланетних дисків об'єктів навколо субзоряних супутників що існують в обох системах. На жаль, наші спостереження не дозволили нам знайти навколопланетні диски в цих системах. Спираючись на наші спостереження, було розраховано та досліджено верхню межу маси пилу, яка досі можливо існує навколо субзоряних супутників систем VHS1256b та G196-3B. Розподіли енергії в спектрі від таких ще можливо існуючих холодних дисків показані на Рис. 4.



Рис. 4: Спостережні розподіли енергії в спектрі супутників VHSJ1256-1257b (а) та G196-3B (b) показані синіми кружечками (виміряні фотометрично), трикутниками (верхні межі потоку) та чорними лініями (спостережені в оптичному та ближньому інфрачервоному спектрах). Нові верхні межі 3- $\sigma$  потоку за даними NOEMA, ALMA та VLA, що наводяться тут, показані червоним кольором. Теоретичний фотосферний спектр BT-Settl, що відповідає  $T_{\rm eff}$  кожного об'єкта, показано сірою безперервною лінією (Аллард та ін. 2003, 2012). На правій панелі також показано пунктирною лінією найкращу модель (фотосфера та гаряче кільце) отриману для G196-3B в роботі Захожай та ін. (2017). Червоною безперервною лінією показано розподіли енергії в спектрі від холодних пилових дисків, які ще можуть існувати навколо але за межами чутливості вимірування.

### 9. Дослідження зоряних магнітних полів

# **I.** Новий підхід до обчислення магнітного поля Сонця як зірки по багатохвильовим спектрополяриметричним спостереженням (Плачинда С.І., Бутковська В.В.)

Основним критерієм попадання екзопланети в зону існування біологічних форм життя є її перебування на орбіті материнської зірки, де можливий стан рідкої фази води. Другий важливий критерій – достатньо низька магнітна активність материнської зірки. За аналогією із Сонцем, потенційний рівень екстремальної активності зірки з конвективною оболонкою може бути оцінено згідно характеристикам неоднорідності як по поверхні так і з глибиною великомасштабних магнітних полів та згідно характеристикам локальних магнітних полів (магнітних трубок).



**Рис.5**. Зліва: загальне магнітне поле Сонця-як-зірки для різних частин контурів спектральних ліній, що відповідають різним ефективним глибинам формування в атмосфері зорі. *Праворуч*: спостережені поляризовані профілі Fe I 525.02 нм, прямими позначені елементи профілів, за якими обчислювалося магнітне поле (*верхня панель*); усереднений V-параметр Стокса (*нижня панель*).

Вперше, за допомогою методики вимірювання магнітних полів зірок по центрам тяжіння окремих спектральних ліній, було розраховано загальне магнітне поле Сонця-як-зірки по спектрополяриметричним спостереженням певного спектрального діапазону, що були отримані в Саянській сонячній обсерваторії 28 червня 2015 року (див. Рис. 5). Такі спостереження не виконуються в жодній обсерваторії світу окрім названої. Є тільки магнітометричні спостереження, з яких найбільш відомі є спостереження в КрАО та Стенфорді (США).

Встановлено, що магнітне поле, розраховане по лінії Fe I 525,02 нм ( $B_1$ 0.17 ± 0.01 Γc). добре узгоджується магнітометричними 3 вимірюваннями в сонячній обсерваторії ім. Вілкокса (Стенфорд), виконаними в ту ж дату по тій же лінії ( $B_1 = 0.20 \pm 0.05$  Гс). Виявлено значущу відмінність магнітного поля, статистично виміряного 3 різних спектральних ліній залежність використанням показано та поздовжнього компонента магнітного поля від ефективної глибини формування спектральної лінії. Результат дослідження свідчить про те, що цієї дати магнітне поле Сонця є неоднорідним не тільки по поверхні, але й з глибиною фотосфери. На додаток, це є перший приклад тестування,

успішного, методики обчислень магнітних полів зірок по спектрополяриметричним спостереженням Сонця-як-зірки.

#### II. Магнітне поле яскравого гіганта HR 3042

Отримано попередні результати дослідження магнітного поля бідного гелієм яскравого гіганта HR 3042 (В8/9 ІІ). Раніше, за результатами спостережень протягом однієї ночі 2016 року, у зірки зареєстровано магнітне поле з повздовжнім компонентом близько -230 Гс.

З метою детального дослідження магнітного поля HR 3042 опрацьовано ешельні спектрополяриметричні спостереження HR 3042, отримані протягом 16 ночей у 2016 – 2018 роках на 3,6-м Канадо-Франко-Гавайському телескопі. Магнітне поле зірки розраховано за допомогою авторського методу SL (Single Line). Методом Фур'є-аналізу отриманих вимірювань магнітного поля вперше встановлено період обертання цієї зірки, що дорівнює HJD = 2457736,030 + n × 4,0437 ± 0,0018 дня. Також, вперше встановлено, що магнітне поле HR 3042 змінюється з періодом обертання з амплітудою 267 ± 23 Гс навколо середнього значення 4 ± 16 Гс.

Результати роботи були представлені на 22-nd Gamow International Astronomical Conference. За результатами роботи здана до друку стаття в Odessa Astronomical Publications та готується розширена публікація.

## III. Вивчення змінності магнітного поля з ефективною глибиною формування спектральних ліній в атмосфері зорі

Вперше розроблена методика та створено програмне забезпечення (Intel Fortran, Python) для обчислення по спектрополяриметричним спостереженням змінності магнітного поля зорі з ефективною глибиною формування спектральних ліній. Приклад отриманого результату наведено на Рис. 6. Готується до друку стаття.



Рис. 6. Змінність повздовжнього компонента магнітного поля, Ве (G), в залежності від центральної залишкової інтенсивності, Rc, (відповідає ефективній глибині формування спектральної лінії) для трьох червоних гігантів. На верхній лівій панелі наведено результат, який є обчисленим по синтетичному спектру для центру півсфери Сонця з повздовжнім компонентом магнітного поля Be = 102.37 гаус. Це значення поля віднято від усіх значень для різних Rc для збереження однакового масштабу і демонстрування похибки методики (червона крива). Для зірок різним кольором показано залежності, які отримані по різним датам спостережень.