АННОТАЦИЯ

диссертации на соискание степени «доктора философии» (PhD) по специальности «6D061100 – Физика и астрономия»

ҚАЛАМБАЙ МУХАҒАЛИ ТОҚТАРБАЙҰЛЫ

ЗВЕЗДНАЯ ДИНАМИКА В КЛАСТЕРАХ С ЧЕРНЫМИ ДЫРАМИ

Общая характеристика работы. Данная диссертация фокусируется на исследовании орбитальных траекторий звездных шаровых скоплений в галактике Млечный Путь, их взаимодействии как между собой, так и с центральной сверхмассивной черной дырой, а также на изучении динамической эволюции звездных скоплений, которые сформировались из газопылевых облаков с повышающейся к центру эффективностью звездообразования. В работе представлен анализ частоты близких взаимодействия и столкновения между шаровыми скоплениями и центральной черной дырой. Кроме того, диссертация включает в себя изучение влияния черных дыр на внутреннюю эволюцию звездных кластеров после их бурной релаксации.

Актуальность темы

Звезды играют важную роль в эволюции наблюдаемой Вселенной. Звезды в свою очередь формируются не по одиночке, а образуются в гиганских молекулярных облаках, создавая так называемые звездные скопления, изначально состоящие из тысячи и более звезд. Особую роль играют шаровые звездные скопления, которые можно считать самыми древними объектами в нашей галактике, их возраст может достигать 10-12 миллиардов лет. Эти скопления представляют собой гравитационно связанные объекты, сформировавшиеся на ранних этапах развития Вселенной. Более 160 шаровых скоплений обнаружены внутри нашей Галактики, и сведения об этих скоплениях доступны в астрометрической базе данных Gaia DR3.

Изучение этих шаровых скоплений обогащает наше понимание процесса формирования Галактики. При этом анализ траекторий этих скоплений позволяет исследовать события, происходившие вблизи центральных областей Млечного Пути. Взаимодействие между этими скоплениями и центральной черной дырой должно помочь объяснить происхождение центрального компактного звездного кластера.

Кроме того, если звездный кластер, пройдя бурную релаксацию, сохраняет свою структуру, то в соответствии с современной теорией эволюции звезд, внутри него должны находиться черные дыры. Однако в молодых скоплениях Галактики, находящихся в ее диске, эффекты, связанные с черными дырами, часто не обнаруживаются, что может

привести к предположению об их отсутствии в этих кластерах. Однако данное исследование показывает, что на ранних стадиях эволюции кластеров эффекты, связанные с черными дырами, могут быть не наблюдаемыми, независимо от наличия самих черных дыр в кластерах.

Актуальность данной диссертации проявляется в создании численной модели, охватывающей все этапы эволюции кластеров и учитывающюю разнообразные условия их формирования в широком диапазоне пространственных параметров. Исследование рассматривает также практические задачи и пути их решения с использованием данной новой модель.

Цель работы

Исследование траекторий орбит звездных скоплений и анализ воздействия черных дыр на динамическую эволюцию звездных кластеров в галактике Млечный Путь.

Задачи исследования:

1. Определение орбит звездных кластеров с использованием астрометрических сведении из базы данных Gaia DR2 и DR3, а также оценка частоты близких взаимодействий и столкновений между скоплениями в потенциальном поле Галактики с использованием моделирования задачи N-тел;
2. Исследование воздействия центральной сверхмассивной черной дыры на движение шаровых скоплении с использованием численного моделирования;
3. Анализа воздействия черных дыр на общую динамику материнского скопления на основе численного моделирования;

Объекты исследования: Звездные скопления в галактике Млечный Путь.

Предметом исследования является динамическая эволюция и движения различных звездных скоплений и влияние на нее различных параметров скопления и различных потенциалов Галактики.

Методы исследования. Численное решение дифференциальных уравнений, численное интегрирование задачи N-тел методом Хермита четвертой степени, параллельные вычисление с помощью кода на основе законов классической физики phi-GRAPE/GPU с использованием технологий CUDA/C, MPI, OpenMP, обработка больших данных в Python с использованием пакетов NumPy, SciPy, и Pandas.

Основные положения, выносимые на защиту

1. В случае изменяющегося потенциала галактики сильные сближения шаровых скоплений в галактиках типа Млечного Пути на расстояния меньше 50 пк происходят в среднем 10 раз в миллиард лет.
2. Согласно результатам численного моделирования, тесные сближения шаровых скоплений с центральной сверхмассивной черной дырой происходят в среднем один раз в миллион лет, при этом большинство

скоплений, претерпевающих такие столкновения, сформировались в балдже галактики.

3. Черные дыры в скоплении, пережившем бурную релаксацию из-за мгновенного выдувания газа, не влияют на динамику этого скопления в молодом возрасте, но по истечении около 500 миллион лет это влияние растет и приводит к изменению времени жизни кластера.

Научная новизна работы заключается в том, что впервые:

1. Для определения орбитальных траекторий наблюдаемых скоплений использовались модели галактик, аналогичных Млечному Пути, взятые из современной космологической численной модели Illustris-TNG 100.

2. Был создан каталог траекторий 147 звездных кластеров в Млечном Пути.

3. Определена доля черных дыр, оставшихся в кластерах после бурной релаксации.

4. Разработан метод для проецирования кластеров на небесную сферу и проведения мнимых наблюдений с использованием результатов численного моделирования.

Теоретическая и практическая значимость работы

Результаты этой диссертации предоставляют нам глубокое понимание процессов формирования и эволюции звездных скоплений, что, в свою очередь, более полно раскрывает историю формирования галактик и эволюцию Вселенной в целом. Кроме того, методы массовых параллельных вычислений, разработанные в рамках исследования, обладают потенциалом для применения в разнообразных областях научных и промышленных исследований. Технологии обработки больших данных, разработанные при анализе результатов компьютерного моделирования, могут быть успешно адаптированы и применены в исследованиях не только в астрономии, но и в различных других сферах, где работа с обширными объемами данных является критической.

Личный вклад автора.

Автор активно участвовал в исследовании в рамках диссертации на всех этапах проведения. Подготовка начальных условий и обработка результатов компьютерного моделирования были осуществлены самим соискателем. В связи с большим объемом работы, связанной с компьютерным моделированием, выполнение этого этапа было распределено между соискателем и другими членами лаборатории. Постановка задач и обсуждение полученных результатов проводились в сотрудничестве с научными консультантами и зарубежными коллегами.

Достоверность результатов

Полученные в ходе исследования результаты и выводы, отражают содержание всех разделов диссертации и подтверждены публикациями

основных научных результатов в рецензируемых научных изданиях, как на международном, так и на отечественном уровне. Эти публикации включают в себя статьи, опубликованные в журналах с высоким рейтингом, включенных в 1-й квартиль (Q1) баз данных Web of Science и Scopus.

Апробация работы

Основные результаты, содержащиеся в диссертации, были опубликованы в 9 научных работах, из них:

Статьи с высоким импакт-фактором в базе данных Clarivate (Web of Science) и публикации, включенные в международную научную базу данных Scopus:

Ishchenco, M., Sobolenko, M., Berczik,P., Omarov, Ch., Sobodar, O., **Kalambay, M.,** Yurin, D. MW GC on cosmological timescale III. Interaction rates. Astronomy & Astrophysics. – 2023. – Vol. 678. – P. A69 [**Q1**]

Статьи в изданиях, рекомендованных Контрольным комитетом образования и науки МОН РК:

Ishchenco, M., Sobolenko, M., **Kalambay, M.,** Shukirgaliyev, B., Berczik,P. MW GC:close encounter rates with each other and with the Central Supermassive Black Hole. Reports of National academy of sciences of the Republic of Kazakhstan; Vol 6, N 340

Kalambay, M. T., Naurzbayeva, A. Z., Otebay, A. B., Abdinassilim, A. T., Kuvatova, D., Assilkhan, A. D., Panamarev, T., Shukirgaliyev, B. T., & Berczik, P. P. Mock observations of simulated star cluster on solar orbit. // Recent Contributions to Physics. – 2022.

Публикации в сборниках тезисов докладов:

Қаламбай М.Т., Өтебай А.Б., Жумахметова М.Д., Сапарәлі Ә.Қ. Звездная динамика в центре активных ядер галактик. // Сборник тезисов международной научной конференции «Мир Фараби» - Алматы, 2020.-299с.

Қаламбай М.Т., Өтебай А.Б., Сапарәлі Ә.Қ., Абдраманова А.Е., Шукиргалиев Б.Т. Белсенді ядролы галактика орталығындағы жұлдызды дисктің пайда болуына аккрециялы диск пен шоғырдың өздік айналысының әсері. // Сборник тезисов международной научной конференции «Мир Фараби» - Алматы, 2021.-201 с.

Қаламбай М.Т., Әлеи Ұ., Панамарев Т.П. Жұлдызды дискісі бар белсенді ядролы галактикаларды сандық модельдеу. // Сборник тезисов международной научной конференции «Мир Фараби» – Алматы, 2022. – 198 с.

Тлеубек А.Н., Есимжанова Д.А., Ұзанқұл Г.Е., **Қаламбай М.Т.** Мнимое наблюдение рассеянных звездных скоплении в разных галактических долготах. // Сборник тезисов международной научной конференции «Мир Фараби» – Алматы, 2022. – 221 с.

Связь темы диссертации с планами научных работ

Результаты и методы, полученные в ходе работы над диссертацией в соответствии с планом НИР были использованы в реализации проектов AP14869395 «Триединая модель динамической эволюции центра Галактики на космологических временных масштабах» по программе МОН РК «Грантовое финансирование научных и (или) научно-технических проектов на 36 месяцев на 2022-2024 гг.» и AP13067834 «Понимание свойств звездных скоплении с помощью искусственного интеллекта» по программе «Грантовое финансирование для молодых ученых по научным и (или) научно-техническим проектам на 2022-2024 годы Министерства образования и науки Республики Казахстан».

Структура и объем диссертации

Диссертационная работа состоит из введения, 4 разделов, заключения и списка использованных источников из 247 наименований, содержит 121 страниц основного компьютерного текста, включая 35 рисунков, 64 формулы и 10 таблицу.