

МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
имени М.В. ЛОМОНОСОВА

На правах рукописи

Киреева Екатерина Николаевна

Динамические модели эллиптических галактик

Специальность 01.03.01 — «Астрометрия и небесная механика»

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Москва – 2020

Работа выполнена на кафедре небесной механики, астрометрии и гравиметрии физического факультета МГУ имени М.В. Ломоносова

Научный руководитель — *Кондратьев Борис Петрович, доктор физико-математических наук, профессор*

Официальные оппоненты — *Расторгуев Алексей Сергеевич, доктор физико-математических наук, профессор, физический факультет МГУ, кафедра экспериментальной астрономии, заведующий кафедрой, ГАИШ МГУ, отдел изучения Галактики и переменных звезд, заведующий отделом*

Сотникова Наталья Яковлевна, доктор физико-математических наук, СПбГУ, математико-механический факультет, профессор

Лыскова Наталья Сергеевна, кандидат физико-математических наук, ИКИ РАН, отдел астрофизики высоких энергий, ведущий инженер, АКЦ ФИАН, отдел теоретической астрофизики, высококвалифицированный научный сотрудник

Защита диссертации состоится «17» декабря 2020 г. в 14 часов на заседании диссертационного совета МГУ.01.02 Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова по адресу: 119234, г. Москва, Университетский проспект, дом 13, конференц-зал.

E-mail: rfzn51@yandex.ru.

С диссертацией можно ознакомиться в отделе диссертаций научной библиотеки МГУ имени М.В. Ломоносова (Ломоносовский просп., д. 27). Со сведениями о регистрации участия в защите в удаленном интерактивном режиме и с диссертацией в электронном виде также можно ознакомиться на сайте ИАС «ИСТИНА»: <https://istina.msu.ru/dissertations/323579048/>

Автореферат разослан «5» октября 2020 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета,
кандидат физико-математических наук

М.В. Пружинская

Общая характеристика работы

Актуальность темы исследования и степень ее разработанности. В наше время наблюдается новый всплеск интереса к эллиптическим галактикам. Во-первых, это связано с тем, что лишь относительно недавно методы наблюдений развились настолько, что дали возможность детально изучать эти звездные системы. Спектрометры интегрального поля, широко применяющиеся после проекта SAURON [1], позволили измерить поля скоростей в Е-галактиках более тщательно, чем это делалось ранее с помощью длиннощелевых спектрографов. Сегодня этот метод наблюдений продолжает развиваться как экстенсивно (увеличиваются размеры исследуемых выборок), так и интенсивно (растет угловой размер изучаемых областей галактик). Вместе с тем, значительно продвинулись вперед и методы фотометрических исследований. Телескоп имени Хаббла впервые позволил ученым преодолеть атмосферное размытие и заглянуть в центры эллиптических галактик. Введенные в строй гигантские наземные телескопы, имеющие большое поле зрения и проникающую силу, сделали возможным получение очень глубоких и в то же время детальных профилей поверхностной яркости Е-галактик. Появился доступ к информации о форме изофот галактик как в центре, так и на периферии. Именно профили сжатия изофот являются ключевой морфологической характеристикой каждой индивидуальной Е-галактики, и полноценное исследование динамики этих систем без такой информации невозможно.

Во-вторых, подъем интереса к эллиптическим галактикам так же связан с нестыковками между космологическими представлениями об их формировании и наблюдательными данными. Концепция иерархического скучивания утверждает, что Е-галактики - это молодые объекты, образовавшиеся последними в наблюдаемой Вселенной в результате процессов слияния других систем [2]. Однако явное обнаружение зародышей массивных Е-галактик на больших красных смещениях [3],[4], а также особенности распределения металлов в звездах современных систем [5],[6] ставят под сомнение такую точку зрения космологов. Не дает покоя исследователям и распределение темной материи во внутренних областях галактик. Космологические симуляции предсказывают резкий пик плотности темной материи в центре гигантских звездных систем (т. н. "касп") [7],[8]. В дисковых галактиках он не наблюдается [9],[10], а с эллиптическими галактиками ситуация обстоит гораздо сложнее. В них отсутствуют протяженные газовые структуры, по вращению которых можно было бы выяснить распределение темной материи. Выявить каспы на основе кинематики одних лишь звезд оказывается так же пока невозможным из-за отсутствия знаний о точной пространственной форме галактик и анизотропии дисперсии скоростей звезд в них.

Космология предъявляет все более высокие требования к динамическим моделям Е-галактик. Исследователи спешат включить темное гало и сверхмассивные черные дыры, в знаниях о свойствах которых еще нет полной уверенности. В то же время зачастую без внимания остаются вопросы о пространственной форме этих систем и их внутренней структуре, хотя они имеют ключевое значение при

исследовании динамики галактик. До сих пор для гигантских звездных систем часто используются сферически-симметричные модели или, в лучшем случае, осесимметричные, или модели со слоями постоянной сплюснутости [11],[12],[13],[14]. При этом, естественно, игнорируются как современные представления о трехосной форме этих систем, так и широко известный наблюдательный факт: сплюснутость эллиптических галактик меняется от изофоты к изофоте. Как следствие, при столь грубом подходе исследователи пренебрегают тем, что динамические свойства сферы или сжатого сфероида довольно сильно отличаются от таковых для трехосного эллипсоида. В добавок к этому, если сплюснутость слоев постоянна, то такая ключевая характеристика модели, как отношение энергии вращения к гравитационной, оказывается не зависящей от распределения плотности [15]. Таким образом, при применении чрезмерно упрощенных моделей пропадает возможность учета индивидуальных детальных профилей поверхностной яркости и сплюснутости изофот, которые в некотором роде являются летописью формирования каждой конкретной системы.

Немаловажной проблемой является так же чрезмерная концентрация исследований на одних лишь небольших, близких к центру областях галактик. Это связано с тем, что пока только для этих участков можно уверенно получать поля скоростей с помощью спектрометров интегрального поля. Однако, как показывают наблюдения, полные размеры гигантских галактик, принадлежащих, например, скоплению в Деве, могут быть в 10 раз больше, чем поле зрения таких спектрометров. Накапливается все больше свидетельств в силу двухфазного сценария ("изнутри-наружу") образования гигантских галактик [16], а, значит, характеристики во внутренней и внешней частях таких систем могут сильно отличаться. В то же время, моделируя маломассивные и гигантские галактики, исследователи зачастую используют одни и те же методы, особенно это видно на примере недавнего крупного проекта *ATLAS^{3D}* [11].

Как уже было сказано, продолжаются дебаты и по поводу содержания темной материи во внутренних областях E-галактик. Хотя ее присутствие во внешней части систем доказано с помощью рентгеновских наблюдений [17],[18], динамическое влияние такой внешней оболочки на галактику изучено недостаточно глубоко. Особенно это важно в случае с галактиками ранних типов, которые значительную долю своей массы получают в результате захвата вещества из других систем.

Еще со времен Хаббла известно, что максимальная сплюснутость среди всех наблюдаемых эллиптических галактик $\varepsilon \sim 0.7$. Считалось, что форма сильно сплюснутых галактик поддерживается быстрым вращением, но, оказалось, это не всегда верно. Начиная с 80-х годов прошлого века исследователи находят все больше галактик ранних типов, у которых сильно сжатая форма наблюдается и при слабом вращении [19],[20]. К сожалению, привлечение одной только анизотропии дисперсии скоростей для объяснения такой картины не всегда достаточно, так как система с сильно вытянутым эллипсоидом скоростей скорее всего будет неустойчива. Разгадка тайны существования некоторых галактик типа E7 может крыться в динамическом воздействии темного гало на их фигуру равновесия.

Цели работы:

Основной целью, поставленной в данной работе, является изучение глобальной динамики эллиптических галактик с помощью тензорной теоремы вириала и наложение ограничений на параметры моделей этих звездных систем. Вторая из целей работы - изучить фигуры равновесия звездных систем, окруженных массивным тором из темной материи, и с помощью созданной модели попытаться объяснить существование сильно сплюснутых, медленно вращающихся эллиптических галактик.

Для достижения поставленных целей необходимо было решить следующие **задачи**:

- найти тензорные характеристики (компоненты тензора инерции и тензора гравитационной энергии) слоисто-неоднородных эллипсоидов и, в частности, найти в конечной аналитической форме гравитационный потенциал слоисто-неоднородного сфероида с обобщенным степенным законом распределения плотности;
- развить метод индивидуального моделирования эллиптических галактик с учетом их пространственной формы, кинематических особенностей, наблюдаемой поверхностной яркости и структуры изофот, а также градиента отношения "масса-светимость";
- используя модернизированный метод, провести расчеты анизотропии дисперсии скоростей для эллиптических галактик различных типов и сравнить полученные показатели с результатами других авторов и космологических симуляций;
- с помощью методов теории потенциала изучить общие динамические свойства эллипсоидальных фигур равновесия внутри гравитирующих колец, найти при каких условиях такие системы могут существовать без вращения.

Объект и предмет исследования. Диссертационная работа посвящена исследованию эллиптических галактик с помощью различных методов динамического моделирования. Особое внимание уделяется эффекту анизотропии дисперсии скоростей звезд в галактиках (главы 2 и 3), а также влиянию темного гало на устойчивость этих систем (глава 4).

Методология исследования. Теоретико-методологической базой данного исследования послужили работы российских и зарубежных авторов в области звездной динамики, теории потенциала и фигур равновесия, а также работы по изучению эволюции Е-галактик, их динамики и устойчивости.

Для решения задач, поставленных в работе, применялись как общенаучные (анализ, идеализация, индукция, дедукция и др.), так и специальные методы (программирование на языке Fortan, численное интегрирование и дифференцирование, методы математической статистики). Были использованы программные пакеты Maple и Microsoft Excel.

Научная новизна:

- Создан новый алгоритм для моделирования динамики эллиптических галактик на базе тензорной теоремы вириала, сравнимый по эффективности с методами Джинса и Шварцшильда.
- Получены показатели анизотропии дисперсии скоростей звезд для 22 эллиптических галактик различных типов с использованием новейших наблюдательных данных.
- Впервые показано, что применение градиентного профиля звездного отношения "масса-светимость" уменьшает на 21% величину анизотропии в модели галактики.
- Впервые найдена корреляция между анизотропией дисперсии скоростей звезд гигантских E-галактик и сплюснутостью их внешних изофот.
- Предложено новое объяснение существования медленно вращающихся эллиптических галактик с предельной сплюснутостью за счет влияния на них гало из темной материи.

Теоретическая и практическая значимость. В настоящей работе было доказано, что вириальный метод моделирования эллиптических галактик в нашем модернизированном виде может успешно конкурировать с популярными ныне методами Джинса [21] и Шварцшильда [22]. Таким образом, он может быть использован в дальнейшем в других исследованиях, например, для изучения зависимости анизотропии E-галактик от их окружения или изменения анизотропии по телу отдельных систем. Во вторых, в главе 4 данной работы было показано, как с помощью динамического влияния темного гало можно объяснить существование критически сплюснутых, слабо вращающихся E-галактик. Это говорит о том, насколько важно сегодня исследовать динамику взаимодействия галактик и окружающих их гало из темной материи.

Положения, выносимые на защиту:

- Полученная аналитическая формула для гравитационного потенциала слоисто-неоднородного сфероида с обобщенным степенным законом распределения плотности, необходимая для расчетов динамики эллиптических галактик в сфероидальном случае, хорошо описывает распределение потенциала.
- Разработанный метод моделирования E-галактик на основе тензорной теоремы вириала, учитывающий пространственную форму и слоисто-неоднородную структуру каждой галактики, позволяет изучать анизотропию дисперсии скоростей звезд как небольших, так и гигантских эллиптических галактик. Для галактики M87 метод позволяет включить в модель градиентный профиль звездного отношения "масса-светимость", что уменьшает анизотропию дисперсии скоростей в модели на 21%.

- Проведенные расчеты анизотропии дисперсии скоростей для выборки из 18 гигантских эллиптических галактик показали, что анизотропия является важным формообразующим фактором этих систем на большом удалении от центра.
- Изучение общих динамических свойств эллипсоидальных фигур равновесия внутри гравитирующих колец показало, что при массе кольца, соответствующей массе темного гало небольших эллиптических галактик, внутренняя фигура в модели может иметь сплюснутость E7 даже при отсутствии вращения.

Достоверность. Результаты работы являются обоснованными и достоверными и были опубликованы в рецензируемых журналах, а также докладывались на всероссийских конференциях.

Апробация работы. Приведем список семинаров и конференций, на которых были озвучены основные результаты работы:

- Потенциал неоднородного слабосжатого сфероида со степенным распределением плотности. **Кондратьев Б.П.**, Киреева Е.Н. "Астрономия от ближнего космоса до космологических далей". ГАИШ, МГУ, Москва, Россия, 25-30 мая 2015 г.
- Фигуры равновесия внутри гравитирующего кольца и предельная сплюснутость эллиптических галактик. **Кондратьев Б.П.**, Киреева Е.Н. "Астрономия от ближнего космоса до космологических далей". ГАИШ, МГУ, Москва, Россия, 25-30 мая 2015 г.
- Влияние анизотропии дисперсии скоростей на динамику эллиптических галактик. **Киреева Е.Н.** Общественный семинар по небесной механике №2635. ГАИШ, МГУ, Москва, Россия, 27 марта 2018 г.
- Анизотропия дисперсии скоростей в эллиптических галактиках. **Кондратьев Б.П.**, **Киреева Е.Н.** XXXVI Всероссийская конференция "Актуальные проблемы внегалактической астрономии". Пушинская радиоастрономическая обсерватория им. В.В. Виткевича АКЦ ФИАН, Россия, 24 апреля 2019 г.

Публикации по теме диссертации.

Основные результаты были опубликованы в 5 рецензируемых научных изданиях, индексируемых в базе данных Web of Science, рекомендованных для защиты в диссертационном совете МГУ по специальности:

1. Kondratyev B. P., **Kireeva E. N.** Potential of a spheroid with generalized exponential density distribution // Baltic Astronomy. — 2015. — Vol. 24, no. 4. — P. 403–407. — Импакт-фактор: 0.439.

2. Kondratyev B. P., Trubitsyna N. G., **Kireeva E. N.** Equilibrium figures inside the dark-matter ring and the shapes of elliptical galaxies // *Baltic Astronomy*. — 2015. — Vol. 24. — P. 408–420. — Импакт-фактор: 0.439.
3. Кондратьев Б. П., Трубицына Н. Г., **Киреева Е. Н.** Фигуры равновесия внутри гравитирующего кольца и предельная сплюснутость эллиптических галактик // *Астрономический журнал*. — 2016. — Т. 93, № 5. — С. 504–511. — Импакт-фактор: 1.235.
4. **Киреева Е. Н.**, Кондратьев Б. П. Динамические модели и анизотропия дисперсии скоростей в эллиптических галактиках // *Астрономический журнал*. — 2019. — Т. 96, № 9. — С. 707–720. — Импакт-фактор: 1.235.
5. Kondratyev B. P., **Kireeva E. N.** Virial models and anisotropy of velocity dispersion in E-galaxies// *Astrophysics and Space Science*. — 2020. — Vol. 365, no. 1. — id. 15. — Импакт-фактор: 1.681.

Личный вклад автора. На этапе получения новой аналитической формулы для потенциала сфероида с обобщенным степенным законом распределения плотности автор принимал участие в проведении математических расчетов, а также произвел проверку полученной формулы с использованием написанных им программ. Основные результаты, полученные соискателем совместно с соавторами, изложены в работе 1 из списка публикаций по теме диссертации. В работе об изучении фигур равновесия внутри гравитирующего кольца автором были написаны необходимые программы и проведены все расчеты, а также произведено сравнение полученных результатов с наблюдательными данными. Основные результаты этой работы, полученные соискателем вместе с соавторами, отражены в публикациях 2 и 3 из списка работ по теме диссертации. На этапе создания и апробации нового алгоритма расчета показателей анизотропии эллиптических галактик вклад автора диссертации имел решающее значение. Соискателем были непосредственно предложены и реализованы следующие идеи: подбор метода моделирования для конкретной галактики на основе наблюдательных тестов на трехосность [23], включение в модель градиентного профиля отношения "масса-светимость", сравнение результатов с выходными данными проекта *ATLAS^{3D}* и космологических симуляций. Отбор исследуемых систем, обработка данных наблюдений и расчеты для всех галактик проведены автором с использованием разработанных им оригинальных программ. Основные результаты этого исследования, полученные автором, содержатся в публикациях 4 и 5 из списка работ по теме диссертации. Обсуждение полученных результатов и подготовка всех публикаций также проводилась совместно с соавторами.

Содержание работы.

Работа состоит из введения, 4 глав, заключения и списка используемой литературы. Диссертация содержит 131 страницу, 19 рисунков, 6 таблиц и библиографию из 123 наименований.

В первой главе рассмотрены результаты современных исследований эллиптических галактик, ставшие основой данной работы. Подробно рассмотрены такие аспекты, как исследования особенностей фотометрии и кинематики Е-галактик, а также прогресс и современные проблемы в области их динамического моделирования.

Во второй главе излагается метод определения анизотропии дисперсии скоростей галактики на основе модели слоисто-неоднородного эллипсоида с переменной сплюснутостью. Затронута также важная тема слоисто-неоднородных эллипсоидов со степенным законом распределения плотности. Описана методика обработки профилей поверхностной яркости и особенности использования информации о кинематике моделируемой системы.

В третьей главе рассматривается выборка исследуемых галактик, результаты наблюдательных тестов по определению подходящей для них модели и полученные в ходе моделирования показатели анизотропии. Приводятся так же результаты использования модели с градиентным профилем масса-светимость для галактики М87. Здесь же можно найти сравнение полученных показателей анизотропии с результатами других авторов и данными космологических симуляций. В конце приведены итоги изучения статистического распределения гигантских Е-галактик по анизотропии.

В четвертой главе излагается построение динамической модели Е-галактики, окруженной массивным тором из темной материи. Рассматривается случай сфероидальной и эллипсоидальной галактики, получены семейства новых фигур равновесия и найдены критические значения сплюснутости и параметра, характеризующего темное гало, при которых система остается стабильной даже при отсутствии вращения. Проведены оценки, показывающие, что масса темного гало, необходимая для существования такой галактики, находится в согласии с результатами наблюдений.

Основные выводы.

Несмотря на кажущуюся внешнюю простоту, эллиптические галактики таят в себе много нерешенных вопросов. Особенно это касается гигантских Е-галактик, которые, являясь наиболее массивными звездными системами в ближайшей вселенной, представляют отдельный интерес в силу своей редкости и необычных особенностей. Сложная история формирования таких систем, находящихся в плотных скоплениях, накладывает отпечаток на их внутреннюю структуру, и, как следствие, в гигантских Е-галактиках наблюдается нерегулярное поле скоростей, выделенные кинематические структуры, необычные отклонения от типичных распределений поверхностной яркости и - самое главное - слабое вращение. Динамически этот факт очень важен и означает, что для поддержания таких систем в равновесном состоянии необходимы другие факторы, например, анизотропия дисперсии скоростей звезд и, возможно, темная материя.

Наличие анизотропии дисперсии скоростей хорошо согласуется с общей теорией описания бесстолкновительных звездных систем, а также предсказывается

теорией образования крупномасштабной структуры Вселенной [24]. Однако, это динамически определяемая величина, и точность данных о ней зависит от того, насколько близка используемая модель к реальной исследуемой системе. В последнее время многие авторы концентрируются лишь на исследовании кинематики одних лишь центральных частей гигантских Е-галактик, зачастую упуская из поля внимания их более далекие области. Современные представления о трехосной форме таких систем так же часто игнорируются.

Первая цель, достигнутая в данной работе, - обобщить, развить и апробировать на новых наблюдательных данных вириальный метод построения моделей Е-галактик на основе модели эллипсоида с переменной сплюснутостью. В отличие от популярного ныне метода на базе уравнений Джинса, наш подход разработан в двух модификациях: для быстрых и для медленных ротаторов, что позволяет динамически учесть особенности пространственной формы последних. Тип используемой модели определяется на основе наблюдательных тестов на трехосность. Для моделирования используются индивидуальные детальные профили поверхностной яркости и сплюснутости, причем в рассмотрение включены даже периферийные области крупнейших звездных систем. Метод также позволяет учесть изменение звездного отношения "масса-светимость" по телу гигантских галактик, а, значит, и комплексную историю их формирования. В будущем, когда появятся более точные сведения о содержании темной материи в центральных областях Е-галактик, можно будет таким же образом интегрировать в модель ее профиль плотности.

Используя новые наблюдательные данные, мы получили показатели анизотропии дисперсии скоростей звезд для 22 эллиптических галактик разных подклассов. Для 10 из них подобные величины найдены впервые. Обнаружена корреляция между сплюснутостью внешних слоев гигантских Е-галактик и их анизотропией дисперсии скоростей звезд, что подтверждает предположение о формировании протяженных окраин сD галактик в процессе бездиссипативного малого мерджинга. Для галактики M87 показатель анизотропии был также рассчитан по модели с градиентным отношением "масса-светимость", и было найдено, что в этом случае его величина оказывается на 21% ниже, чем в случае с постоянным по объему отношением M/L .

Сравнивая наши показатели анизотропии с результатами других исследователей, а также с выходными данными космологических гидродинамических симуляций, мы доказали адекватность нашего метода. Мы также показали, что для построения реалистичной динамической модели недостаточно использовать данные только о центральной части системы, как это сделано, например, в проекте *ATLAS^{3D}* [11].

Устойчивость эллиптических галактик является другой важной нерешенной проблемой. Известно немало звездных систем ранних типов с очень высокой сплюснутостью ($\epsilon \approx 0.7$) и очень слабым вращением. Как мы показываем в разделе 4, такая конфигурация, поддерживаемая лишь анизотропией, будет неустойчива. Однако наблюдаемая звездная составляющая галактики непрерывно взаимодей-

ствуется с огромными массами темной материи на периферии, и они не могут не вносить вклад в наблюдаемую фигуру равновесия системы и ее устойчивость.

В разделе 4 мы предлагаем новый метод учета влияния темной материи на основе модели жидкого эллипсоида, окруженного массивным кольцом или тором. Важно отметить, что в модели возникает несколько последовательностей фигур равновесия, сплюснутость которых зависит как от вращения, так от параметра α , характеризующего внешнюю структуру из темной материи. Для сфероидальных фигур существует критическая последовательность с $\alpha = \alpha_{max}$, состоящая из одной невращающейся фигуры со сплюснутостью $\varepsilon_{cr} \approx 0.7$, соответствующей предельной сплюснутости эллиптических галактик. В случае эллипсоидальных фигур $\varepsilon_{cr} \approx 0.5$, что так же примерно соответствует предельной сплюснутости гигантских трехосных галактик. В сфероидальном случае масса тора из темной материи, которая необходима для достижения параметром α своего максимального значения, $M_{dm} \approx 4 \times 10^{12} M_{\odot}$, что согласуется с оценками масс гало для небольших эллиптических галактик [25], демонстрирующих предельную сплюснутость. Таким образом, наша работа указывает, что изучение динамического влияния темной материи важно для понимания устойчивости эллиптических галактик.

Несомненно, было бы очень интересно объединить методы из разделов 2, 3 и 4 данной работы и создать обобщенную модель, учитывающую как детальную структуру звездной материи, так и влияние темного гало, однако серьезным препятствием для такой работы станет усложнение математического аппарата.

Список литературы

- [1] de Zeeuw P. T., Bureau M., Emsellem E. et al. The SAURON project - II. Sample and early results// Monthly Notices of the Royal Astron. Society.-2002.- Vol. 329-p. 513-530.
- [2] Kauffmann G., Charlot S. Chemical enrichment and the origin of the colour-magnitude relation of elliptical galaxies in a hierarchical merger model// Monthly Notices of the Royal Astron. Society.-1998.- Vol. 294-p. 705-717.
- [3] Daddi E., Renzini A., Pirzkal N. et al. Passively Evolving Early-Type Galaxies at $1.4 \leq z \leq 2.5$ in the Hubble Ultra Deep Field// Astrophys. J.-2005.- Vol. 626-p. 680-697.
- [4] Zirm A. W., van der Wel A., Franx M. et al. NICMOS Imaging of DRGs in the HDF-S: A Relation between Star Formation and Size at $z \sim 2.5$ // Astrophys. J.-2007.- Vol. 656-p. 66-72.
- [5] Thomas D., Greggio L., Bender R. Constraints on galaxy formation from alpha-enhancement in luminous elliptical galaxies// Monthly Notices of the Royal Astron. Society.-1999.- Vol. 302-p. 537-548.

- [6] Thomas D., Maraston C., Bender R., Mendes de Oliveira C. The Epochs of Early-Type Galaxy Formation as a Function of Environment// *Astrophys. J.*-2005.- Vol. 621-p. 637-694.
- [7] Navarro J. F., Frenk C. S., White S. D. M. A Universal Density Profile from Hierarchical Clustering// *Astrophys. J.*-1997.- Vol. 490-p. 493-508.
- [8] Klypin A., Kravtsov A. V., Bullock J. S., Primack J. R. Resolving the Structure of Cold Dark Matter Halos // *Astrophys. J.*-2001.- Vol. 554-p. 903-915.
- [9] Salucci P. The constant-density region of the dark haloes of spiral galaxies// *Monthly Notices of the Royal Astron. Society.*-2001.- Vol. 320-p. L1-L5.
- [10] Marchesini D., D'Onghia E., Chincarini G. et al. $H\alpha$ rotation curves: the soft core question// *Astrophys. J.*-2002.- Vol. 575-p. 801-813.
- [11] Cappellari M., Scott N., Alatalo K. The *ATLAS^{3D}* project - XV. Benchmark for early-type galaxies scaling relations from 260 dynamical models: mass-to-light ratio, dark matter, Fundamental Plane and Mass Plane // *Monthly Notices of the Royal Astron. Society.*-2013.- Vol. 432-p. 1709-1741.
- [12] Pota V., Romanowsky A.J., Brodie J.P. et al. The SLUGGS survey: multipopulation dynamical modelling of the elliptical galaxy NGC 1407 from stars and globular clusters// *Monthly Notices of the Royal Astron. Society.*-2015- Vol. 450-p. 3345-3358.
- [13] Poci A., Cappellari M., McDermid R.M. Systematic trends in total-mass profiles from dynamical models of early-type galaxies// *Monthly Notices of the Royal Astron. Society.*-2017- V. 467.
- [14] van den Bosch R.C.E., van de Ven G. Recovering the intrinsic shape of early-type galaxies// *Monthly Notices of the Royal Astron. Society.* -2009.-Vol. 398- p. 1117-1128.
- [15] Кондратьев Б.П. Ньютоновы потенциалы и динамика слоисто-неоднородного эллипсоида// *Астрон. журн.* - 1982. - Т.59. - С.458.
- [16] Naab T., Johansson P. H., Ostriker J. P. Minor Mergers and the Size Evolution of Elliptical Galaxies// *Astrophys. J. Letters.*-2009.- Vol. 699, N 2.- p. L178-L182.
- [17] O'Sullivan E., Ponman T. J. The isolated elliptical NGC 4555 observed with Chandra// *Monthly Notices of the Royal Astron. Society.*-2004- Vol. 354-p. 935-944.
- [18] Fukazawa Y. et al. Scaling Mass Profiles around Elliptical Galaxies Observed with Chandra and XMM-Newton// *Astrophys. J.*-2006.- Vol. 636-p. 698-711.

- [19] Davies R.L., Efstathiou G., Fall S.M. et al. The kinematic properties of faint elliptical galaxies// *Astrophys. J.*-1983- Part 1, Vol. 266- p. 41-57.
- [20] Emsellem E., Cappellari M., Krajnović D. et al. The *ATLAS^{3D}* project - III. A census of the stellar angular momentum within the effective radius of early-type galaxies: unveiling the distribution of fast and slow rotators// *Monthly Notices of the Royal Astron. Society.*-2011.- Vol. 414. -p. 888-912.
- [21] Cappellari M. The *ATLAS^{3D}* project - VII. A new look at the morphology of nearby galaxies: the kinematic morphology-density relation // *Monthly Notices of the Royal Astron. Society.*-2008.- Vol. 390- p. 71-86.
- [22] Schwarzschild M. A numerical model for a triaxial stellar system in dynamical equilibrium.// *Astrophys. J.*, Part 1-1979.- Vol. 232- p. 236.
- [23] Кондратьев Б.П., Озерной Л.М. Какую пространственную форму имеют эллиптические галактики?// *Письма в Астрон. журн.* - 1979. - Т.5. - С.67.
- [24] Sunyaev R.A., Zeldovich Ya.B. Formation of Clusters of Galaxies; Protocluster Fragmentation and Intergalactic Gas Heating// *Astron. Astrophys.* -1972 - Vol. 20. - p. 189.
- [25] Alabi A.B., Forbes D.A., Romanowsky A.J. et al. The SLUGGS survey: dark matter fractions at large radii and assembly epochs of early-type galaxies from globular cluster kinematics// *Monthly Notices of the Royal Astron. Society.*-2017.- Vol. 468-p. 3949-3964.