

МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
имени М.В. ЛОМОНОСОВА

На правах рукописи

Зайцева Наталия Александровна

**Скорости вращения галактических дисков:
связь со светимостью галактик и массой газа**

01.03.02 – Астрофизика и звездная астрономия

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Москва - 2018

Работа выполнена в Отделе внегалактической астрономии Государственного астрономического института имени П.К. Штернберга МГУ имени М.В. Ломоносова

Научные руководители:

- Засов Анатолий Владимирович, доктор физико-математических наук, профессор
- Макаров Дмитрий Игоревич, доктор физико-математических наук, профессор РАН

Официальные оппоненты:

- Расторгуев Алексей Сергеевич, доктор физико-математических наук, профессор, Физ. фак. МГУ, зав. кафедрой экспериментальной астрономии
- Решетников Владимир Петрович, доктор физико-математических наук, профессор, кафедра астрофизики СПбГУ
- Хоперсков Александр Валентинович, доктор физико-математических наук, профессор, ИМИТ ВолГУ, зав. кафедрой информационных систем и компьютерного моделирования

Защита диссертации 4 октября 2018 г. в 14⁰⁰ часов состоится на заседании диссертационного совета МГУ.01.02 Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова по адресу 119992, г. Москва, Университетский пр-т., д. 13.

E-mail: ederaraine@gmail.com

С диссертацией можно ознакомиться в отделе диссертаций научной библиотеки МГУ имени М.В. Ломоносова (Ломоносовский просп., д. 27) и на сайте ИАС «ИСТИНА»: <http://istina.msu.ru/dissertations/122364563>

Автореферат разослан 05 июля 2018 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета,
кандидат физ.-мат. наук

М.В. Пружинская

Общая характеристика работы

Данная работа направлена на изучение масштабных соотношений между интегральными параметрами галактик поздних типов, в первую очередь между скоростью вращения дисков, их фотометрическими характеристиками и содержанием нейтрального водорода (HI). Соотношение Талли-Фишера, построенное для галактик, видимых с ребра, позволяет связать скорость вращения дисков, не требующую корректировку за наклон к лучу зрения, со светимостью галактик, что дает возможность уточнить шкалу внегалактических расстояний. Взаимосвязь содержания нейтрального водорода в галактиках с их глобальными параметрами, такими как скорость вращения и линейный размер диска, позволяет получить информацию об особенностях эволюции галактик и их газовой составляющей.

Диссертация включает как работу с существующими каталогами, так и анализ и физическую интерпретацию полученных результатов.

Актуальность работы

Уточнение шкалы расстояний во Вселенной является важной задачей современной астрономии. Знание точного расстояния необходимо как для оценки современных характеристик галактик, так и для изучения их эволюции, а также эволюции Вселенной как целого. Если для ближайшей Вселенной есть возможность получать оценки расстояний исходя из наблюдений так называемых стандартных свечей в галактиках, то для более удаленных объектов ситуация менее определенная. Здесь на помощь приходят масштабные соотношения, известные как соотношения Фабера-Джексона и Талли-Фишера. Эти соотношения связывают наблюдаемые параметры галактик, такие как дисперсия скоростей и скорость вращения соответственно, с интегральной светимостью галактик. Но на современном уровне развития наблюдений, все еще остаются значительные ошибки, связанные с определением вышеперечисленных параметров. В частности, сохраняется проблема выборки галактик со сходными параметрами, неоднозначность

оценки внутреннего поглощения, а также неопределенность в измерении угла наклона диска, что приводит к значительным расхождениям в определении скорости вращения. В связи с этим, галактики, видимые с ребра, рассматриваемые в настоящей работе, как нельзя лучше подходят для уменьшения разброса точек на диаграмме Талли-Фишера, поскольку угол наклона диска, близкий к 90° , позволяет минимизировать ошибки в определении скорости вращения. Ввод дополнительных параметров (например, показателей цвета, потока в линии H β (21 см)), дополнительно уменьшает дисперсию соотношения Талли-Фишера, а также позволяет сделать косвенные оценки поглощения света для галактик, видимых с ребра.

Другим важным вопросом является интерпретация известной корреляции между кинематическими параметрами дисков и содержанием газа в них и ее связь с гравитационной устойчивостью галактических дисков и особенностями их эволюции. Если во внутренних областях диска доминирующую роль в устойчивости, как правило, играет звездное население, то во внешних областях значительной становится гравитация газового слоя. Существует большое число процессов, определяющих содержание газа в диске, которые могли играть различную роль на разных этапах жизни галактики. Тем не менее, масса газа в диске коррелирует с медленно эволюционирующими параметрами, такими, как размер или удельный угловой момент диска, что говорит о существовании некоторого регулирующего механизма. Этот вопрос подробно обсуждается в диссертации.

Анализ содержания газа в дисках позволил также проверить гипотезу о связи темной материи с H β (гипотеза Bosma [1]), согласно которой с межзвездным газом связана не наблюдаемая непосредственно темная материя. Нами было показано, что для такого утверждения нет никаких оснований, а распределение газа в большинстве галактик отражает условие пороговой гравитационной устойчивости газового слоя в современную эпоху или установившееся при переходе к “спокойной” стадии формирования диска.

Цель работы

Главной целью работы является изучение масштабных соотношений между глобальными параметрами галактик (в основном – спиральных галактик поздних типов), как для уточнения шкалы расстояний до внегалактических объектов, так и для изучения содержания газа и особенностей эволюции галактических дисков.

Поставленная цель подразумевает решение следующих задач:

- Создание выборки галактик, видимых с ребра (на базе каталогов EGIS [2] и EDD [3]), для которых имеются высокоточные данные по фотометрии и структурным параметрам. Уточнение недостающих параметров из анализа литературных и каталожных данных.
- Построение численных алгоритмов для поиска и включения дополнительных параметров, обеспечивающих минимальную дисперсию финального многопараметрического соотношения Талли-Фишера.
- Проверка гипотезы Vosma [1] о пропорциональности между поверхностными плотностями темной материи и нейтрального водорода в галактиках на основе данных обзора THINGS [4].
- Сопоставление выборки плоских и изолированных галактик (AMIGA), построение соотношений между массой нейтрального водорода и структурными параметрами галактик.
- Анализ и интерпретация связи между содержанием водорода и удельным угловым моментом галактических дисков.

Новизна

- В данной работе создана выборка галактик поздних типов, видимых с ребра, с имеющейся высокоточной фотометрией по данным обзора SDSS [5], для которой построена “классическая” зависимость Талли-Фишера.
- Для уменьшения дисперсии зависимости Талли-Фишера, в неё были включены дополнительные параметры, значимость которых оценена

статистическими методами. Построено многопараметрическое соотношение Талли-Фишера.

- Выдвинута и подтверждена теория, согласно которой корреляция между поверхностными плотностями нейтрального водорода и темной материи может быть объяснена исходя из условия гравитационной устойчивости галактического диска в предположении примерного постоянства параметра устойчивости Тумре Q_T вдоль радиуса.

- Показано, что общее содержание HI в галактике отражает условие пороговой гравитационной устойчивости диска, которое непосредственно связано с глобальной эволюцией галактики.

Практическая и научная значимость работы

- Получено соотношение Талли-Фишера для трех SDSS фильтров g, r и i. Путем добавления дополнительных параметров получена более тесная зависимость, позволяющая повысить точность оценок расстояний до галактик. Показано, что наклон логарифмической зависимости “скорость-светимость” меняется при переходе через пороговое значение $V_{rot} \sim 90$ км/с, что может отражать как чисто статистические эффекты, так и различие в характере распределения пыли в галактиках разных масс. Сравнение итогового соотношения Талли-Фишера с литературными данными дало возможность получить косвенные оценки поглощения в галактиках, видимых с ребра.

- Показана несостоятельность гипотезы о том, что темная материя сосредоточена в диске, а не в массивном сфероидальном гало. Подобная форма темной материи приводила бы к нереалистично большим значениям толщин диска, что противоречит наблюдениям. При этом кажущаяся связь между темной материей и нейтральным водородом может быть объяснена приблизительно постоянным значением параметра устойчивости Тумре (Q_T) вдоль радиуса галактики.

- Построены масштабные соотношения между массой HI и линейным размером, скоростью вращения галактики и удельным моментом вращения диска (DV). Аргументирован вывод о том, что эти соотношения отражают роль гравитационной неустойчивости в эволюции дисковых галактик. Полученные зависимости также позволяют диагностировать галактики с аномально высоким содержанием водорода. Помимо этого, сравнение положения на общих зависимостях галактик, видимых с ребра, с изолированными галактиками (видимых под произвольными углами), позволили оценить поглощение в линии HI в сильно наклоненных дисках.

Положения, выносимые на защиту

- **Работа с базой данных HYPERLEDA и каталогом расстояний:** Проанализированы и занесены в базу данных HYPERLEDA [6] полученные результаты обработки имеющихся литературных данных по измерению расстояний до галактик различными методами. Проведено сравнение систематических различий в определении расстояний до объектов, полученных разными способами.

- **Соотношение Талли-Фишера для плоских галактик в оптическом диапазоне:** На основе каталогов EDD [3], RFGC [7] и EGIS [2] создана выборка галактик, видимых с ребра, для которой построено классическое соотношение Талли-Фишера с использованием SDSS фотометрии в фильтрах g, r, i и данных о потоке в линии HI. Проведено сравнение полученных соотношений с данными других авторов, на основании которого оценена величина поглощения в галактиках, видимых с ребра.

- **Построение многопараметрического соотношения Талли-Фишера для галактик, видимых с ребра:** Построено многопараметрическое соотношение Талли-Фишера с использованием показателей цвета и содержания водорода в качестве дополнительных параметров. Показано, что, вопреки ожиданиям, учет относительной толщины “плоских” галактик не влияет на разброс точек на диаграмме Талли-Фишера. Применение многопараметрического

соотношения Талли-Фишера позволяет получить более точные оценки расстояний.

- Оценка Постоянной Хаббла для выборки плоских галактик:

Основываясь на итоговых соотношениях Талли-Фишера для галактик, видимых с ребра, уточнено значение Постоянной Хаббла $H_0 = 73.9 \pm 0.6$ км/с/Мпк в интервале лучевых скоростей $1000 \text{ км/с} \leq V_{СМВ} \leq 14000 \text{ км/с}$, с использованием в качестве опорных объектов 5 “плоских” галактик с известным модулем расстояния по TRGB-методу. Путем статистического анализа были выбраны оптимальные корректировки для учета движения совокупности галактик относительно космологического фона.

- Проверка гипотезы о связи темной материи с нейтральным водородом в спиральных галактиках:

На основе данных из каталога THINGS [4] была проведена проверка гипотезы о том, что темная материя в галактиках связана с холодным газом в диске. Хотя эта гипотеза может давать удовлетворительное объяснение наблюдаемым кривым вращения, диски, содержащие темную материю, будут иметь толщину, намного превышающую наблюдаемую. Показано, что связь между поверхностными плотностями темной материи и нейтрального водорода может быть объяснена, если принять примерное постоянство параметра гравитационной устойчивости Тумре Q_T на большом интервале радиальных расстояний.

- Связь массы газа с угловым моментом диска:

Для рассмотренных в работе выборок галактик поздних типов предложена интерпретация зависимости между массой HI и удельным угловым моментом галактического диска и показано, что она соответствует параметру устойчивости газового слоя $Q_T \gtrsim 2$. Предложены два возможных объяснения: либо гравитационная устойчивость соответствует более высоким значениям параметра Тумре, чем это обычно принимается, либо современные газовые диски обладают запасом устойчивости, а пороговый уровень устойчивости для большинства галактик имел место в прошлом, когда масса газа в дисках была в 2–4 раза выше, чем в настоящее время. Из последнего варианта следует, что расход массы газа на

звездообразование последние миллиарды лет не компенсировался аккрецией газа на диск.

Апробация работы

- Доклады на международных конференциях

1) Life-cycle of gas in galaxies: A Local Perspective, Dwingeloo, Нидерланды, *Total mass of HI and dynamical parameters of starforming galaxies* (Стендовый), 31 августа - 4 сентября 2015

- Доклады на всероссийских конференциях

2) Актуальные проблемы внегалактической астрономии, Пушчинская радиоастрономическая обсерватория АКЦ ФИАН, Россия, *Содержание HI в дисках галактик: роль гравитационной неустойчивости*. (Устный), 18-21 апреля 2017

3) Актуальные проблемы внегалактической астрономии, Пушчинская радиоастрономическая обсерватория АКЦ ФИАН, Россия, *Соотношение Талли-Фишера для галактик, видимых с ребра*. (Устный), 18-21 апреля 2017

4) Звездообразование и планетообразование. Наблюдения, теория, численный эксперимент, Москва, Россия, *Содержание HI в спиральных галактиках и звездообразование*. (Устный), 13-15 ноября 2017

Основные публикации по теме диссертации

- Статьи, опубликованные в списке журналов Web of Science:

1) Makarov D., Prugniel Ph., Terekhova (Zaitseva) N., Courtois H., Vauglin I., *HyperLEDA. III. The catalogue of extragalactic distances*, 2014, **Astronomy&Astrophysics**, Vol. 570, id. A13 // импакт-фактор 5.014

- 2) Терехова (Зайцева) Н.А., *О связи темной материи с нейтральным водородом в спиральных галактиках*, **Астрономический Журнал**, 2012, том 89, №7, с. 560-567 // импакт-фактор 0.592
- 3) Засов А.В., Терехова (Зайцева) Н.А., *О связи распределения нейтрального водорода с темной массой в галактиках*, **Письма в Астрономический Журнал**, 2013, том 39, №5, с.323-331 // импакт-фактор 0.873
- 4) Засов А.В., Зайцева Н.А., *Содержание HI в дисках галактик: роль гравитационной неустойчивости*, **Письма в Астрономический Журнал**, 2017, том 43, №7, с. 485-499 // импакт-фактор 0.873
- 5) Makarov D.I., Zaitseva N.A., Bizyaev D.V. *The Tully-Fisher relation for flat galaxies*, 2018, **Monthly Notices of the Royal Astronomical Society**, sty1629, <https://doi.org/10.1093/mnras/sty1629> // импакт-фактор 4.961

- Статьи в сборниках трудов конференций:

- 1) Засов А.В., Зайцева Н.А., *Содержание HI в дисках галактик: роль гравитационной неустойчивости*, Тезисы докладов XXXIV Всероссийской конференции “Актуальные проблемы внегалактической астрономии”, Пущино, Россия, 18-21 апреля 2017, с. 38
- 2) Макаров Д.И., Зайцева Н.А., Бизяев Д.В., *Соотношение Талли-Фишера для галактик, видимых с ребра*, Тезисы докладов XXXIV Всероссийской конференции “Актуальные проблемы внегалактической астрономии”, Пущино, Россия, 18-21 апреля 2017, с. 39

Вклад автора в совместных работах

Соискатель принимал равное участие с соавторами в формулировке выводов из проделанных и опубликованных работ. Автором диссертации был проведен статистический анализ характеристик выборки галактик, видимых с ребра, и изолированных галактик, а также анализ литературных данных по кривым вращения. Автор произвел построение модельных кривых вращения в

предположении о пропорциональности между поверхностными плотностями темной материи и нейтрального водорода. Соискателем также была выполнена оценка параметров дисков галактик при различных предположениях о содержании темной материи в пределах звездного диска. Идея о возможном объяснении связи содержания HI с темной материей, как и с удельным угловым моментом диска, была ранее предложена А.В. Засовым, работа над доказательной базой и приведенные в диссертации оценки сделаны совместно. Соискателем самостоятельно проведены численный анализ и построение моделей для вычисления классического и многопараметрического соотношения Талли-Фишера для выборки плоских галактик и выполнено сравнение с имеющимися работами других авторов. Подготовка к публикации полученных результатов в виде статей проводилась совместно с соавторами.

Структура и объем диссертации

Диссертация состоит из Введения, 3 глав, Заключения и Библиографии. Общий объем диссертации 122 страницы, включая 30 рисунков и 12 таблиц. Библиография включает 226 наименований на 15 страницах.

Во Введении приведен обзор литературы по рассматриваемой проблеме, обсуждается актуальность работы, цели и задачи исследования, научная новизна, научная и практическая ценность полученных результатов. Также формулируются основные результаты и положения, выносимые на защиту, и приводится список работ, в которых опубликованы основные результаты диссертации.

Глава 1 посвящена вопросу важности астрофизических баз данных на примере базы данных HYPERLEDA [6]. В современной литературе существует огромное число данных по расстояниям до внегалактических объектов, однако для построения однородной шкалы расстояний во Вселенной необходимо иметь измерения, проведенные сходными или согласованными между собой методами. Сбор и упорядочивание подобных астрофизических данных предоставляет возможность более эффективно формировать выборки

объектов и их характеристик (таких, как линейные размеры, космологические скорости и скорости вращения, потоки в различных диапазонах) для дальнейших исследований.

Далее в **Главе 1** приводится краткий обзор методик определения расстояний в ближней и дальней Вселенной. Рассматриваются плюсы и минусы каждого из методов и границы их применимости. Особую роль во внегалактической астрономии играет эмпирическое соотношение Талли-Фишера (связь между светимостью дисковой галактики и скоростью вращения, обычно измеряемой по полуширине линии нейтрального водорода), которое рассматривается в диссертации в связи с возможностью его использования для оценки шкалы расстояний.

Результаты проведенной работы были отражены в базе данных HYPERLEDA [6] для уточнения параметров, зависящих от принятого расстояния. Оценки, собранные в HYPERLEDA [6], изначально представляют собой неоднородный набор данных, где каждый отдельный источник использует свою шкалу расстояний и имеют свои ошибки, что подразумевает сложный процесс “гомогенизации” данных. В **Главе 1** приводится описание проведенных нами процедур усреднения и упорядочивания данных о расстояниях до галактик.

Отдельно рассматривается вопрос об оценке поглощения в линии H I 21 см для сильно наклоненных дисков. Показано, что для “плоских” галактик в HYPERLEDA [6] имеет место существенный переучет степени поглощения, что ведет к завышенной оценке полной массы водорода для них.

Глава 2 посвящена исследованию соотношения Талли-Фишера (см. подробнее Makarov, Zaitseva & Bizyaev, 2018). В работах многих авторов рассматривается построение и уточнение данного соотношения с целью увеличить точность внегалактической шкалы расстояний. За основу нашей выборки были взяты сверхтонкие галактики из каталога плоских галактик Караченцева RFGC (Revised Flat Galaxy Catalog, [7]), для которых имеется

фотометрия в SDSS фильтрах g, r и i, проведенная Бизяевым [2] (данные по фотометрии представлены в каталоге EGIS) и данные по ширине линии H α из каталога All Digital H α [8].

Первая часть главы отводится под обзор истории получения и использования соотношения Талли-Фишера и описание формирования начальной выборки “плоских” галактик, используемой в данной работе. Аргументируется выбор галактик, видимых с ребра, как объектов исследования. Для этих галактик ошибки в определении угла наклона минимальны, что приводит к минимальным же ошибкам в определении скорости вращения диска. Однако, появляется проблема адекватного учета поглощения света в таких объектах, хотя имеющиеся исследования показали, что влияние поглощения на полную светимость “плоских” галактик плавно меняется в зависимости от характеристик галактик и не приводят к значительному увеличению дисперсии точек на диаграмме.

Вторая часть **Главы 2** посвящена работе с литературными и каталожными данными по созданию однородной выборки галактик. Приводится описание основных каталогов, которые предоставили большую часть данных для исследования (каталоги RFGC [7], EGIS [2], EDD[3]). Здесь же приводится окончательная выборка объектов для построения соотношения Талли-Фишера, из числа которых были исключены галактики с разногласиями в определении параметров, а также очень близкие галактики ($V_{CMB} \leq 1000$ км/с), галактики-члены групп и скоплений, взаимодействующие галактики.

В третьей части **Главы 2** описывается непосредственно процедура построения соотношения Талли-Фишера, как классического (связь между светимостью галактики и ее скоростью вращения), так и многопраметрического, что позволило увеличить точность измерения расстояния. Приводится краткое описание численных методов, использовавшихся для выбора параметров в качестве дополнительных. Мы обнаружили присутствие “излома” на зависимости на значении скорости

вращения $V_{rot} \sim 90$ км/с. Данный излом может иметь чисто статистический характер, вызванный тем, что галактик-карликов в финальной выборке присутствует в несколько раз меньше, чем галактик-гигантов. Однако, более вероятно другая причина: как было показано в более ранних работах, имеет место различное распределение пыли в карликовых и гигантских галактиках, что неизбежно сказывается на оценках их светимости. Поэтому детальный учет поглощения для галактик-карликов и галактик-гигантов может привести к исчезновению данного излома.

В конце главы мы приводим финальные многопараметрические соотношения Талли-Фишера, построенные как по всей выборке целиком, так и по выборке галактик-гигантов с учетом экстраполяции зависимости в область карликов.

Глава 3 посвящена вопросу о содержании нейтрального водорода и его связи с кинематическими характеристиками галактик и их эволюцией.

В первой части главы речь идет о гипотезе, предложенной Bosma [1] и рассмотренной также рядом других авторов, о существовании связи между нейтральным водородом и темной материей в галактиках. Эта гипотеза базируется на сходном характере распределения колонковых плотностей темной материи и HI, и предполагает, что темная материя может быть представлена не в виде массивного темного гало, окружающего галактику, а заключена в диск, вероятно, в форме небольших газовых облаков, слишком холодных, чтобы быть заметными при наблюдениях. На базе обзора THINGS [4] были проанализированы кривые вращения галактик и показано, что наблюдаемые кривые вращения действительно могут быть объяснены и при отсутствии темного гало (см. подробнее Терехова, 2012). Однако, если считать, что “холодная” темная материя сосредоточена в диске, то расчетная толщина диска, исходя из условия его гравитационной устойчивости, оказывается чрезмерно велика, и противоречит наблюдениям реальных объектов. Далее показано, что наблюдаемая пропорциональность

поверхностной плотности темной материи и нейтрального водорода может быть объяснена в предположении того, что параметр гравитационной устойчивости Тумре для газового Q_T на большом интервале радиальных расстояний остается примерно постоянным (см. подробнее Засов, Терехова, 2013).

Вторая часть **Главы 3** посвящена связи нейтрального водорода с такими глобальными параметрами галактики, как линейный размер, скорость вращения и удельный момент вращения. Уточнена корреляция между M_{HI} и удельным моментом вращения, который считался пропорциональным произведению скорости вращения диска на его линейный размер (D_{25} или радиальная шкала R_0). Полученная корреляция позволяет диагностировать галактики с аномально высоким содержанием водорода, газовые диски которых, по-видимому, близки к состоянию пороговой устойчивости. Указанные выше зависимости согласуются с примерным постоянством параметра устойчивости Тумре Q_T для газового слоя на значительном интервале радиальных расстояний, в пределах которого содержится основная масса HI. Однако значение Q_T для большинства галактик при этом должно превышать фактор 2, то есть, газовый слой, по-видимому, обладает запасом устойчивости. Рассмотрены два варианта, объясняющие высокое значение Q_T : либо его критическое значение, определяющее устойчивость газового слоя для азимутально усредненной плотности газа в несколько раз превышает обычно принимаемое значение $Q_T \approx 1 - 2$, либо рассматриваемая зависимость возникла в ту эпоху, когда “бурная” фаза формирования звездного диска завершилась, и плотность газового диска оказалась близкой к пороговому значению для дисперсии скоростей газа около 10 км/с (см. подробнее Засов, Зайцева, 2017).

В заключении **Главы 3** обсуждаются основные выводы.

Цитированная литература

1. Bosma A., *21-cm line studies of spiral galaxies. II. The distribution and kinematics of neutral hydrogen in spiral galaxies of various morphological types* // *Astronomical Journal*, 1981, Vol. 86, pp. 1825 - 1846
2. Bizyaev D.V., Kautsch S.J., Mosenkov A. V. et al., *The Catalog of Edge-on Disk Galaxies from SDSS. I. The Catalog and the Structural Parameters of Stellar Disks* // *Astrophysical Journal*, 2014, Vol. 787, id. 24
3. Tully R.B., Rizzi L., Shaya E.J. et al., *The Extragalactic Distance Database* // *The Astronomical Journal*, 2009, Vol. 138, pp. 323-331
4. Walter F., Brinks E., de Blok W.J.G. et al., *THINGS: The H I Nearby Galaxy Survey* // *The Astronomical Journal*, 2008, Vol. 136, pp. 2563-2647
5. Abazajian K.N., Adelman-McCarthy J.K., Agüeros M.A. et al., *The Seventh Data Release of the Sloan Digital Sky Survey* // *The Astrophysical Journal Supplement*, 2009, Vol. 182, pp. 543-558
6. Makarov D., Prugniel P., Terekhova (Zaitseva) N. et al., *HyperLEDA. III. The catalogue of extragalactic distances* // *Astronomy&Astrophysics*, 2014, Vol. 570, id. A13
7. Karachentsev I.D., Karachentseva V.E., Kudrya Y.N. et al., *The revised Flat Galaxy Catalogue* // *Bulletin of the Special Astrophysics Observatory*, 1999, Vol. 47, p. 5
8. Courtois H.M., Tully R.B., Fisher J.R. et al., *The Extragalactic Distance Database: All Digital H I Profile Catalog* // *The Astronomical Journal*, 2009, Vol. 138, pp. 1938-1956