

Санкт-Петербургский государственный университет

На правах рукописи

Савченко Сергей Сергеевич

УГЛЫ ЗАКРУТКИ СПИРАЛЬНЫХ
ВЕТВЕЙ ГАЛАКТИК

Специальность 01.03.02 – астрофизика и звездная астрономия

Автореферат диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Санкт-Петербург – 2013

Работа выполнена в Санкт-Петербургском государственном университете.

Научный руководитель:

доктор физико-математических наук, профессор Решетников
Владимир Петрович.

Официальные оппоненты:

Моисеев Алексей Валерьевич,
доктор физико-математических наук,
Специальная астрофизическая обсерватория РАН, ведущий научный
сотрудник;

Бобылев Вадим Вадимович,
доктор физико-математических наук,
Главная (Пулковская) астрономическая обсерватория РАН, заведующий
лабораторией динамики Галактики.

Ведущая организация:

Волгоградский государственный университет

Защита состоится «17» декабря 2013 г. в 17 ч. 00 м. на заседании диссертационного совета Д 212.232.15 при Санкт-Петербургском государственном университете по адресу: 198504, Санкт-Петербург, Старый Петергоф, Университетский пр., д. 28, ауд. 2143 (математичко-механический факультет).

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке СПбГУ.

Автореферат разослан «_____» _____ 2013 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета

Орлов В.В.

Общая характеристика работы

Спиральные ветви представляют собой длинные узкие образования повышенной яркости, расположенные в диске галактики. Повышенная яркость спирального узора объясняется протекающим в нем процессом звездообразования, и, соответственно, повышенной относительно средней по диску плотностью молодых ярких голубых звезд.

Впервые на наличие у некоторых туманностей спирального узора обратил внимание лорд Росс (Уильям Парсонс) в 1845 году, то есть еще в дофотографическую эпоху. Первые работы по математическому описанию формы спирального узора были выполнены в первой четверти двадцатого века, когда внегалактическая природа этих туманностей еще не была установлена.

В настоящее время общепринятым параметром, описывающим форму спирального узора, является *угол закрутки*. Угол закрутки определяется как угол между касательной к спиральному рукаву и перпендикуляром к радиус-вектору, проведенному из центра галактики в данную точку. В литературе также встречается полностью аналогичное этому определение угла закрутки как угла между двумя касательными, к спиральному рукаву и к окружности с центром в ядре галактики и с соответствующим радиусом. Таким образом, галактики с туго закрученными вокруг центра спиральями имеют малый угол закрутки, галактики со свободно развернутыми рукавами – большой. Характерные значения углов закрутки ветвей нормальных спиральных галактик попадают в диапазон от $\sim 5^\circ$ до $\sim 30^\circ$ [1–4].

Первые работы, посвященные исследованию формы спирального узора, были выполнены в двадцатых годах прошлого века ван дер Пахленом [5] и Гроотом [6]. Разработанный ими подход применялся позднее Дэнвером (1942) и Кенникаттом (1981). С развитием вычислительной техники в конце семидесятых годов 20 века начали выходить работы, в которых для определения формы спирального узора использовался Фурье-анализ. Несмотря на довольно большое время,

прошедшее после выхода первых работ по исследованию спирального узора, общее их число пока невелико.

Данная работа посвящена изучению формы спиральных ветвей дисковых галактик, в частности, методам определения величины угла закрутки, измерению углов закрутки у галактик различных выборок и анализу полученных при этих измерениях результатов.

Актуальность работы

Хотя работы, в которых изучаются характеристики спирального узора и разрабатываются методы их определения, появляются регулярно с восьмидесятых годов прошлого века, интерес к этой теме в последние годы только возрастает. Причин этому несколько. Во-первых, астрофизика в настоящее время переживает эпоху обзоров: в рамках проекта SDSS (Sloan Digital Sky Survey) получены карты почти трети поверхности небесной сферы в оптическом диапазоне, в ближней инфракрасной области спектра обзор 2MASS (Two Micron All Sky Survey) содержит изображения всей небесной сферы. Помимо множества обзоров, покрывающих большие площади, существует также и ряд так называемых «проколов» – изображений небольших площадок неба, выполненных с длительными экспозициями и, соответственно, имеющих большую фотометрическую глубину. Среди таких «проколов» широкую известность получили проекты HDF-N (Hubble Deep Field North), HDF-S (Hubble Deep Field South) и HUDF (Hubble Ultra Deep Field). Результатом осуществления всех этих проектов является накопление большого количества наблюдательных данных, в том числе изображений спиральных галактик, число которых сейчас составляет порядка 10^6 . Это делает возможным решение поставленных в данной работе задач.

Вторым важным моментом является постоянный рост производительности вычислительной техники, которая к настоящему времени достигла уровня, позволяющего выполнять значительную часть задач по обработке больших объ-

емов наблюдательных данных на обычном настольном компьютере. Вместе с первым пунктом это делает работы, связанные с алгоритмами обработки изображений галактик, особенно актуальными сегодня.

Что касается непосредственно исследования углов закрутки спиральных ветвей галактик, то на настоящее время выполненные в данном направлении работы в некотором смысле похожи друг на друга. Во-первых, общим для многих работ допущением является предположение о постоянстве величины угла закрутки на всех участках спирального узора исследуемой галактики, то есть форма спирального узора описывается единственным значением угла закрутки. Такое предположение существенно упрощает задачу определения формы спиралей, однако является только первым, грубым приближением. В действительности, спирали галактик способны демонстрировать более сложное поведение [7], и такое предположение оказывается не всегда оправданным. Более детальное описание спирального узора можно получить предположив, что различные области спирального узора имеют разные значения угла закрутки. Данный вопрос подробно обсуждается в главах 1 и 3 данной диссертации.

Вторая общая черта многих работ – это стремление исследовать параметры спирального узора, по возможности, у более близких галактик. Это естественный подход, так как изображения близких галактик имеют бóльшую детализацию и соотношение сигнал/шум, и их анализ проводить проще, однако спиральная структура далеких галактик оказывается неисследованной. Изучение параметров спирального узора далеких галактик представляет интерес, так как исследуемые объекты являются существенно более молодыми, чем близкие галактики, то есть оказывается затронута тема эволюции спиральных галактик. Этому вопросу посвящена глава 2 диссертации.

Таким образом, данная работа позволяет расширить сложившуюся общую картину исследования морфологических параметров спирального узора.

Еще один важный вопрос – это влияние спирального узора на двумерную декомпозицию изображений галактик на вклады балджа и диска. Двумерная

декомпозиция является распространенным методом анализа изображений спиральных галактик. Стандартным подходом является аппроксимация спиральных галактик осесимметричными моделями балджа и диска, а вклад спирального узора не учитывается. В главе 4 показано, что такой подход может привести к появлению систематических ошибок в параметрах декомпозиции, и предлагается способ решения данной проблемы.

Цели работы

Основной целью работы является исследование параметров спирального узора дисковых галактик и поиск их связей с фотометрическими и кинематическими характеристиками галактик. Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие частные задачи:

1. исследование углов закрутки спиральных ветвей далеких галактик;
2. разработка нового алгоритма, позволяющего найти вариации углов закрутки спиральной структуры галактик;
3. применение этого алгоритма для поиска вариаций углов закрутки у спиральных ветвей большой выборки галактик, поиск корреляций величин углов закрутки и их вариаций с другими параметрами галактик;
4. исследование влияния спирального узора на двумерную декомпозицию спиральных галактик и разработка алгоритма, позволяющего проводить его учет.

Научная новизна

Впервые получены значения углов закрутки у далеких ($\langle z \rangle \sim 0.7$) спиральных галактик. При помощи соотношения «угол закрутки – максимальная скорость вращения» были получены оценки скоростей вращения этих галактик, построено соотношение Талли-Фишера.

Разработан оригинальный алгоритм, позволяющий определять не только среднее значение угла закрутки спиральных ветвей галактик, но и его вариации в пределах спиральной структуры. Показано, что у $2/3$ спиральных галактик величина относительной вариации угла закрутки превышает 20%, и эти вариации, возможно, связаны с внутренними процессами в галактиках. Впервые проведен анализ связей между углами закрутки и их вариациями и структурными параметрами галактик, полученными при декомпозиции их изображений по модели «балдж+диск».

Показано, что спиральный узор может оказать существенное влияние на параметры декомпозиции галактик, и предложен алгоритм, позволяющий учесть это влияние.

Научная и практическая ценность работы

В ходе работы получен и опубликован значительный объем данных (углы закрутки и их вариации, надежные параметры ориентации галактик, параметры декомпозиции) для нескольких выборок двухрукавных спиральных галактик с хорошо просматриваемым спиральным узором. Эти данные могут быть использованы для проведения работ по схожей тематике.

Разнообразные зависимости, как обнаруженные в ходе выполнения данной работы, так и уже известные, но дополненные благодаря новым данным, являются хорошим наблюдательным тестом и основой для теории формирования и эволюции (морфологической и фотометрической) спиральных галактик. Успешная теория формирования дисковых галактик и, в особенности, возникновения у них спиральной структуры должна объяснять или, по крайней мере, не противоречить полученным в данной работе результатам.

Опубликованный в данной работе оригинальный метод исследования формы спирального узора дополняет существующий инструментарий для анализа изображений галактик и может быть использован другими исследователями. Его реализация опубликована в свободном доступе.

Результаты, выносимые на защиту

1. Результаты измерения углов закрутки у далеких ($\langle z \rangle \sim 0.7$) галактик. Определенные при помощи зависимости «угол закрутки – скорость вращения» оценки скоростей вращения этих галактик.
2. Метод, позволяющий оценивать вариации углов закрутки спиральных галактик. Вывод, что 2/3 спиральных галактик имеют величину относительной вариации угла закрутки, превышающую 20%, то есть спиральные ветви большинства галактик не могут описываться простой логарифмической моделью.
3. Установлено существование значимой корреляции между формой спиральных ветвей и параметрами балджа галактики (его поверхностной яркостью и полной светимостью).
4. Вывод, что наличие спирального узора может существенно сказаться на результатах декомпозиции изображений галактик на балдж и диск. На выборке близких галактик продемонстрирован алгоритм, позволяющий производить декомпозицию галактик с учетом спирального узора.
5. Программное обеспечение, реализующее используемые в работе методы исследования (определение угла наклона галактик и величины угла закрутки спиральных ветвей), опубликованное в свободном доступе.

Апробация работы

Основные результаты работы докладывались на следующих конференциях:

1. Всероссийская конференция «Актуальные проблемы внегалактической астрономии», Пущино, 17-19 апреля, 2012;

2. Всероссийская конференция «Актуальные проблемы внегалактической астрономии», Пущино, 8-11 апреля, 2013;
3. Международная студенческая конференция «Science and progress», Санкт-Петербург, 30 сентября – 4 октября, 2013.

Публикации по теме диссертации

Основные результаты диссертации опубликованы в следующих работах:

1. Савченко С.С., Решетников В.П., «Углы закрутки далеких спиральных галактик», Письма в АЖ, т.37, с.883-891, 2011 г.
2. Савченко С.С., «Об оценке угла закрутки спиральных ветвей галактик», Астрофизический Бюллетень, т.67, с.324-331, 2012 г.
3. Savchenko S.S; Reshetnikov V.P., «Pitch angle variations in spiral galaxies», Monthly Notices of Royal Astronomical Society, v.436, issue 2, pp. 1074-1083, 2013.
4. Savchenko S.S., Mosenkov A.V. Spiral structure and bulge/disc decomposition analysis // Conference abstracts. International Student Conference «Science and Progress», held 30 Sep – 4 Oct 2013, in St. Petersburg, – Russia, – 2013., SOLO, – p. 136

Личный вклад автора

В статье 1 создание программного обеспечения и проведение измерений принадлежат автору, вклад соавторов в постановку задачи и обсуждение одинаков; в статье 3 создание программного обеспечения и проведение измерений принадлежат автору, вклад соавторов в постановку задачи и обсуждение результатов одинаков; в работе 4 вклад соавторов одинаков.

Объем и структура диссертации

Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, библиографии и приложений. Общий объем диссертации 132 страницы, из них 101 страница текста и 23 страницы приложений. Библиография включает 59 наименований на 7 страницах.

Содержание диссертации

Во **введении** обосновывается актуальность работы, описывается постановка целей и задач диссертации, аргументируется научная новизна, а также научная и практическая ценность исследования. Сформулированы результаты, выносимые на защиту, приводится список конференций и работ, где были представлены результаты данного исследования, указан личный вклад автора.

Глава 1 диссертации содержит описание общих методов, используемых в последующих главах. В пункте 1.1 описывается метод монотонности спиральных рукавов, используемый для определения ориентации галактических дисков в пространстве. В пункте 1.2 описывается метод декомпозиции изображений галактик по модели «балдж+диск». В параграфе 1.3.1 приводится обзор существующих методов определения углов закрутки рукавов спиральных галактик. Параграф 1.3.2 содержит подробное описание основанного на Фурье-анализе метода определения величины угла закрутки, используемого в данной работе. В параграфе 1.3.3 описывается оригинальный метод, основанный на оконном Фурье-преобразовании изображения, позволяющий определить не только среднее значение угла закрутки, но и его вариацию. Работа использующихся в других главах методов продемонстрирована на реальных либо искусственных изображениях галактик.

В **главе 2** описано измерение углов закрутки у далеких галактик (для которых среднее значение красного смещения равно 0.7). Введение и постановка задачи содержатся в пункте 2.1. В пункте 2.2 описывается проведение изме-

рений на спиральных галактиках локальной выборки. Описывается создание выборки близких спиральных галактик и ее свойства. Происходит определение параметров ориентации галактик. Производится измерение величин углов закрутки у галактик этой выборки двумя различными способами, результаты сравниваются. Соотношение «угол закрутки – максимальная скорость вращения» калибруется по близким галактикам. Пункт 2.3 посвящен непосредственно исследованию далеких галактик. Описывается создание выборки далеких спиральных галактик и проведение измерений аналогичных тем, что были произведены для выборки близких галактик. Обсуждаются результаты измерений, по прокалиброванной по близким галактикам зависимости «угол закрутки – максимальная скорость вращения» и измеренным углам закрутки получают оценки скоростей вращения далеких галактик, строится соотношение Галли-Фишера. В пункте 2.4 перечислены основные выводы главы.

Глава 3 посвящена изучению вариаций углов закрутки. Пункт 3.1 содержит введение и постановку задачи. В пункте 3.2 описывается создание выборки галактик для исследования. Далее в п. 3.3 кратко описаны методы, а также процесс измерений: декомпозиции галактик и измерения углов закрутки и их вариаций. Результаты декомпозиции и измерений углов закрутки обсуждаются в параграфах 3.4.1 – 3.4.6:

- 3.4.1 обсуждаются результаты декомпозиции галактик на балдж и диск, качество декомпозиции. Приводится ряд известных распределений и корреляций, связанных с параметрами декомпозиции;
- 3.4.2 приводится статистика полученных углов закрутки и их вариаций, проводится сравнение с литературными данными;
- 3.4.3 приводятся корреляции углов закрутки с основными параметрами галактик: типом, цветом, отношением «светимость балджа/общая светимость», скоростью вращения галактик;

- 3.4.4 обсуждаются связи между величинами углов закрутки галактик и параметрами декомпозиции (плотностью светимости и показателем Серсика балджа, эффективной поверхностной яркостью и светимостью балджа и диска);
- 3.4.5 исследуются взаимосвязи между вариациями углов закрутки и такими параметрами диска, как величина экспоненциального излома и градиент цвета;
- 3.4.6 обсуждается возможность влияния на величину вариации угла закрутки в спиральных рукавах галактики ее окружения. Делается вывод, что в случае галактик данной выборки вариации углов закрутки возникают не из-за приливного взаимодействия со спутниками.

Выводы главы 3 приведены в пункте 3.5.

В **Главе 4** обсуждается влияние спирального узора на результаты декомпозиции изображений галактик. В пункте 4.1 содержится введение и постановка задачи. В пункте 4.2 описывается создание выборки искусственных изображений дисковых галактик с хорошо различимой спиральной структурой. Производится декомпозиция изображений галактик по модели «балдж+диск». Показано, что если не учитывать наличие у галактик спирального узора, то некоторые параметры декомпозиции имеют существенные систематические ошибки. В пункте 4.3 обсуждается возможность учета спирального узора при декомпозиции изображений галактик. Приводится соответствующий алгоритм. В пункте 4.4 описывается тестирование алгоритма на выборке искусственных галактик. Показано, что при учете спирального узора качество декомпозиции значительно улучшается: уменьшаются систематические и случайные ошибки. В пункте 4.5 происходит декомпозиция изображений реальных галактик на балдж и диск с учетом спирального узора. В параграфе 4.5.1 описывается созданная для данной задачи выборка спиральных галактик. В параграфе 4.5.2 обсуждаются

результаты декомпозиции. Делается вывод, что возможно проводить в автоматическом режиме декомпозицию изображения спиральной галактики на балдж и диск с учетом спирального узора. Однако только четверть галактик выборки удалось удовлетворительно описать простой моделью логарифмических спиралей. Выводы к главе приводятся в пункте 4.6.

В **Заключении** суммированы основные результаты работы.

В **Приложении А** представлено описание программы для определения параметров ориентации спиральных галактик методом монотонности спиральных рукавов.

Приложение Б содержит таблицы с результатами измерений углов закрутки спиральных ветвей для близких и далеких галактик, проведенных в Главе 2.

Приложение В содержит таблицу с результатами измерений, проведенных в Главе 3, изображения с результатами декомпозиции и изображения с вариациями углов закрутки у галактик выборки.

Литература

1. Kennicutt R. C., Jr. The shapes of spiral arms along the Hubble sequence // [AJ](#). 1981. Vol. 86. P. 1847–1858.
2. Seigar M. S., James P. A. The structure of spiral galaxies - II. Near-infrared properties of spiral arms // [MNRAS](#). 1998. Vol. 299. P. 685–698. [arXiv:astro-ph/9803254](#).
3. Ma J. A Method of Obtaining the Pitch Angle of Spiral Arms and the Inclination of Galactic Discs // [Chin. J. Astron. Astrophys.](#) 2001. Vol. 1. P. 395.
4. Ma J., Peng Q.-H., Gu Q.-S. The thicknesses and inclinations of 71 northern spiral galaxies // [A&AS](#). 1998. Vol. 130. P. 449–454.
5. von der Pahlen E. // [Astron. J.](#) 1911. Vol. 188. P. 249.
6. Groot H. Nebulae, On the true shape of some spiral // [MNRAS](#). 1925. Vol. 85. P. 535–541.
7. Savchenko S. S., Reshetnikov V. P. Pitch angle variations in spiral galaxies // [MNRAS](#). 2013. [arXiv:astro-ph.CO/1309.4308](#).