

КЛИМАНОВ
Сергей Александрович

**ДЕТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ
ГАЛАКТИК ТИПА M 51**

Специальность 01.03.02 -
астрофизика и радиоастрономия



А В Т О Р Е Ф Е Р А Т
диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Работа выполнена в Санкт-Петербургском государственном университете

Научный руководитель:

доктор физико-математических наук Решетников Владимир Петрович

Официальные оппоненты:

доктор физико-математических наук Сильченко Ольга Касьяновна
кандидат физико-математических наук Тихонов Антон Валерьевич

Ведущая организация:

Астрокосмический центр Физического института им. П.Н. Лебедева РАН

Защита диссертации состоится 24 июня 2003 г. в 16 часов 30 минут на заседании диссертационного совета Д 212.232.15 по защите диссертаций на соискание ученой степени доктора наук при Санкт-Петербургском государственном университете по адресу: 198504, Санкт-Петербург, Старый Петергоф, Университетский пр., д. 28, ауд. 2143 (математико-механический факультет).

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке СПбГУ

Автореферат разослан " 18 " МАЯ 2003 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета



Орлов В.В.

Общая характеристика работы

Актуальность проблемы

Двойные системы, похожие на эффектную галактику М51 в созвездии Гончих Псов, представляют собой отдельный и очень интересный тип объектов. Такие системы состоят из главной спиральной галактики и относительно небольшого спутника, который находится вблизи конца одной из спиральных ветвей основного компонента.

Впервые на эти объекты как на разновидность двойных галактик обратили внимание Воронцов-Вельяминов [1] и Арп [2]. В [1] Воронцов-Вельяминов впервые употребил термин "двойные галактики типа М 51", основываясь на изображениях нескольких систем со слабыми спутниками на конце спиральных ветвей, сходных по виду с М 51. В "Морфологическом каталоге галактик" Воронцов-Вельяминов отметил объекты, которые, по его мнению, можно отнести к этому типу. Всего им было отобрано и изучено около 160 систем типа М 51 [3]. Главный вывод Воронцова-Вельяминова о происхождении этих объектов был следующий - внутри крупных галактик образуются более мелкие, которые впоследствии отделяются и удаляются от центральной галактики [3]. Однако, наблюдательный материал, которым располагал автор, был очень неполным. Кроме того, его выборка оказалась очень неоднородной из-за отсутствия четких критериев для отбора галактик типа М 51.

Похожие недостатки характеризуют и выборку Арпа, который отметил 54 отобранных им системы типа М 51 в "Атласе пекулярных галактик" [2]. На основании спектрального изучения нескольких объектов он высказал гипотезу о происхождении спутников в системах типа М 51, согласно которой они могли быть выброшены из центральных галактик $10^7 - 10^8$ лет назад.

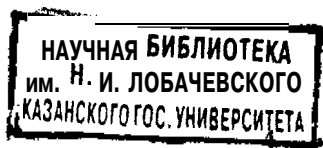
Отчасти выводам Воронцова-Вельяминова и Арпа о происхождении рассматриваемых объектов, вероятно, способствовало преобладающее в те годы мнение о том, что гравитационное возмущение не способно объяснить многие из наблюдаемых форм взаимодействующих галактик. Однако, в своей пионерской работе братья Гумре [4] убедительно продемонстрировали, что даже относительно простая гравитационная модель может удовлетворительно воспроизвести многие из их наблюдаемых особенностей. В частности, они построили модель прототипа рассматриваемых здесь систем - галактики М 51. Используя метод моделирования пробными части-

цами и подобрав соответствующим образом начальные параметры, авторы добились того, чтобы спутник, движущийся по вытянутой орбите почти перпендикулярно к плоскости главной галактики, в проекции казался лежащим на конце спиральной ветви. Численное моделирование как самой галактики М 51, так и других подобных систем впоследствии производилось неоднократно разными авторами.

Изучались и другие характеристики галактик. Например, Лаурикайнен и Сало [5] провели фотометрическое изучение нескольких систем, отмеченных ими к типу М 51. Авторы отмечают, что во многих рассмотренных объектах спутники демонстрируют признаки усиленного темпа звездообразования, что может ожидать в случае переноса вещества от главной галактики к спутнику. Найдено, что взаимодействие в системах типа М 51 может сильно исказить профили поверхностной яркости галактик. Авторы делают вывод, что даже взаимодействия с относительно небольшими спутниками могут играть важную роль в эволюции галактик.

Хотя к настоящему времени накопились большое количество новых данных о галактиках, которые можно отнести к типу М 51, они, тем не менее, остаются одним из наименее изученных типов объектов как с наблюдательной, так и с теоретической точек зрения. Например, для многих главных галактик отсутствуют данные об их кинематических характеристиках, знание которых важно для исследования взаимодействующих систем. Это относится и к спутникам, которые представляют собой трудные объекты для изучения (ввиду своей слабости, вплоть до 19^m). Их звездные величины, лучевые скорости и морфологические типы известны лишь для небольшого числа галактик. Кроме того, системы типа М 51 в качестве отдельного класса двойных галактик в течение более двух десятилетий практически не исследовались. Отсутствовала даже хорошо определенная, однородная выборка этих объектов.

Между тем, системы типа М 51 представляют собой удобные объекты для изучения влияния маломассивных спутников на структуру спиральных галактик. Согласно численным расчетам, даже относительно маломассивные спутники могут производить значительные возмущения центральных галактик, формируя при этом длинные хвосты, мосты, перемычки и сами спиральные ветви. Кроме того, изучение близких тесных пар, какими являются галактики типа М 51, может помочь лучше понять эволюцию галактик на больших z , где их слияния происходят гораздо чаще.



Цели и задачи работы

Основной целью настоящей работы является детальное изучение галактик типа М51. Это подразумевает составление новой выборки систем этого типа и решение на основе ее изучения следующих задач: статистический анализ выборки, построение оптической функции светимости галактик, исследование их кинематики и структуры, а также рассмотрение вопроса об их происхождении и возможных путях эволюции.

Научная новизна

Построена новая, хорошо определенная выборка галактик типа М51, состоящая из 32 систем, что позволило сформулировать количественные критерии для отнесения системы к типу М51. Впервые построена оптическая функция светимости галактик типа М51 и сделана оценка их распространенности в локальном объеме Вселенной. Получены кривые вращения 12 главных галактик в линиях $H\alpha$ и $[NII]$, из них для 7 - впервые, а также определены лучевые скорости их спутников, из них для 6 - впервые. На основании этих данных сделано заключение, что соотношение Талли-Фишера для галактик типа М51 может отличаться от того, которое существует для галактик поля. Произведен поиск систем типа М51 в глубоких полях Хаббла и впервые сделан вывод о том, что пространственная плотность этих объектов может возрастать с z .

Научная и практическая ценность

Сформулированы критерии для отнесения галактик к типу М51, которые могут использоваться для дальнейшего поиска кандидатов в эти системы. Создан пакет программ, который может использоваться для вычисления функции оптической светимости галактик двумя часто применяемыми в современной практике методами. Наблюдательный материал, полученный в работе (кривые вращения), может использоваться для изучения кинематики взаимодействующих галактик.

Апробация работы

Основные результаты данной работы представлялись на всероссийской конференции "Актуальные проблемы внегалактической астрономии" (Пущино, Россия, 25-27 апреля, 2002), а также на семинарах кафедры астрофизики СПбГУ.

Структура и краткое содержание работы

Диссертация состоит из введения, трех глав, заключения, списка цитируемой литературы, содержащего 116 наименований и двух приложений, содержит 22 рисунка и 13 таблиц. Общий объем диссертации 115 страниц.

Во **Введении** отражена краткая история проблемы, ее актуальность, цели исследования, основные положения, выносимые на защиту, показана их научная новизна, кратко представлено содержание диссертации.

В **Главе 1** рассмотрены составление и статистический анализ новой выборки галактик типа М 51. В разделе 1.1 описана процедура составления выборки, сформированной на основе списка объектов, представленного **Воронцовым–Вельяминовым** [3]. При изучении изображений систем, входящих в этот список, было установлено, что он по своему составу очень неоднороден. Для достижения большей однородности часть объектов была исключена, в результате чего была получена новая, хорошо определенная выборка галактик типа М 51, содержащая 32 объекта.

В разделе 1.2 производится статистическое изучение этой выборки, которое позволило получить ряд новых характеристик галактик. В частности, на основе специально построенной эмпирической зависимости была получена оценка видимых звездных величин 24 спутников с точностью $\leq 0.5^m$ для которых, ввиду их слабости, такие данные отсутствовали. Обсуждается влияние эффектов селекции на различные свойства выборки. Найдено, что главные компоненты в системах типа М 51 являются яркими галактиками со средней светимостью, близкой к светимости Млечного Пути ($\sim -20.^m0$), а отношение светимостей компонентов для большинства рассматриваемых систем находится в диапазоне $1/30-1/3$ (в фильтре *B*).

Предполагается, что гравитационное возмущение во взаимодействующих системах может приводить к образованию бара и генерации крупномасштабного двухрукавного узора в дисках галактик. Изучение морфологии систем типа М 51 показало, что среди главных компонентов преобладают галактики с барами и хорошо выраженной двухрукавной структурой. Таким образом, повышенная доля таких галактик в выборке может служить свидетельством в пользу указанного предположения. Также отмечается, что среди главных компонентов преобладают галактики поздних хаббловских типов, что может быть результатом селекции, так как в выборку, как правило, отбирались галактики с ясно видимой спиральной структурой.

Измерение угловых расстояний между компонентами позволило установить, что спутники в системах типа М 51 находятся вблизи границ звезд-

ных дисков главных галактик. Эти измерения вместе с предыдущими результатами позволили сформулировать формальный критерий для отнесения системы к типу М51 - это двойная система, в которой: 1) отношение светимостей компонентов в полосе B заключено в пределах 1/30-1/3, 2) спутник находится вблизи конца спиральной ветви главной галактики на расстоянии, не превышающем двух ее оптических диаметров.

На основе данных космической обсерватории IRAS был оценен темп звездообразования в системах типа М51. Он оказался довольно высоким, $\sim 9M_{\odot}/\text{год}$, что в несколько раз превышает средний темп звездообразования в изолированных галактиках. Был сделан вывод о том, что усиление звездообразования может быть следствием взаимодействия между компонентами систем. Был найден ряд корреляций между скоростью звездообразования и различными характеристиками галактик. Однако, ввиду небольшого количества данных, они нуждаются в дальнейшем подтверждении.

Глава 2 посвящена построению оптической функции светимости (Φ_C) рассматриваемого типа галактик. Особое внимание уделено увеличению объема изучаемой выборки путем включения в нее новых кандидатов, отобранных из существующих каталогов двойных галактик на основании уже полученных критериев отбора систем типа М51. Процедура составления расширенной выборки, насчитывающей 46 систем, приводится в разделе 2.1. Именно эта выборка использовалась для нахождения Φ_C галактик типа М51.

Процесс построения Φ_C описан в разделе 2.2. Вначале приводится краткий обзор и сравнение существующих способов ее вычисления. В работе были использованы два из них. Первый способ (SWML-метод, [6]) основан на применении принципа максимального правдоподобия. Он позволяет получить Φ_C без использования предположения о какой-либо ее функциональной форме. Его преимуществом является независимость результатов от случайных флуктуации плотности галактик. Вследствие этого, однако, нахождение формы и нормализацию Φ_C приходится производить независимо друг от друга. В этом способе сначала составляется функция правдоподобия, характеризующая вероятность попадания галактик в рассматриваемую выборку, и производится параметризация непрерывной Φ_C в виде конечного числа параметров. Оценки этих параметров находятся посредством решения системы уравнений правдоподобия.

Второй способ получения Φ_C ($(1/V_{max})$ - метод, [7]) достаточно прост в вычислениях и позволяет получить форму и плотность Φ_C одновременно,

однако при этом используется предположение об однородном распределении объектов в пространстве. Нахождение ФС производится посредством вычисления максимального объема V_{max} , который характеризует максимальное расстояние, на котором галактика данной светимости может попасть в выборку, ограниченную по видимой звездной величине.

Сравнение результатов обоих методов показало, что ФС галактик типа М51 можно описать функцией Шехтера со параметрами $\phi_* = 1.4 \times 10^{-5} \text{ Мпк}^{-3}$, $a = -1.3$, $M_* = -20. \text{m}3$. При этом доля галактик типа М51 среди двойных галактик может составлять 4%, среди спиральных 0.7% и среди всех галактик поля 0.3%. Однако, вследствие относительно небольшого статистического объема выборки, эти результаты следует рассматривать в качестве предварительных.

В Главе 3 рассматриваются кинематика и структура галактик типа М51, а также затрагиваются вопросы о возможном происхождении этих систем и их эволюции.

В разделе 3.1 обсуждается глобальная кинематика галактик типа М51, для изучения которой на 6-м телескопе САО РАН были проведены спектральные наблюдения 12 систем. По результатам обработки спектров этих объектов были получены кривые вращения главных галактик в линиях $\text{H}\alpha$ и $[\text{NII}]$, а также определены лучевые скорости спутников (для многих объектов это было сделано впервые) с точностью ~ 20 км/с. На основании сравнения наших данных с ранее опубликованными было сделано заключение о том, что наши результаты не содержат значительных систематических ошибок.

В разделе 3.2 рассматривается структура галактик типа М51 и обсуждаются возможные сценарии их происхождения. В частности, на основании полученных данных установлено, что среднее отношение орбитальной массы системы к суммарной массе компонентов составляет величину 1.6-2.4. Был сделан вывод о существовании в системах типа М51 умеренно массивных темных гало в пределах 1.5-2.0 стандартных оптических радиусов $25^m/\text{кв.сек}$. Найдено также, что спутники в целом удовлетворяют приливному ограничению на свои размеры.

Данные о кинематике 20 объектов позволили установить, что соотношение Талли-Фишера для систем типа М51 может отличаться от того, которое существует для относительно изолированных галактик. Для рассматриваемых систем оно имеет вид: $L(B) \propto V_{max}^{-(2.7+n)}$ (для изолированных $L(B) \propto V_{max}^{-3.2}$, [8]). Это соотношение находится в хорошем согласии с тем, которое найдено для членов тесных двойных пар галактик и далеких

спиральных галактик, находящихся на $z \sim 0.5$. Было сделано предположение, что причиной более пологого соотношения Талли–Фишера для систем типа М 51 является индуцированное взаимодействием активное звездообразование в галактиках.

Для изучения эволюции встречаемости галактик типа М 51 были исследованы кадры глубоких полей Космического телескопа Хаббла и отобрано 7 кандидатов в рассматриваемые системы в диапазоне красного смещения $z = 0.2 - 1.1$. На основании этих данных было найдено, что пространственное обилие галактик типа М 51 может возрасти с увеличением красного смещения. Показатель степени в функции $n(z) = n_0 (1 + z)^m$ ($n_0 = n(z = 0)$), характеризующей темп эволюции пространственной плотности, составляет $m = 3.6_{-0.8}^{+0.5}$. Эта величина примерно соответствует росту числа двойных и взаимодействующих галактик.

При рассмотрении вопроса о происхождении систем типа М 51 было сделано предположение о двух возможных основных путях их формирования и эволюции. Во-первых, спутники в этих системах могут иметь "космологическое" происхождение, при котором они являются галактиками, образовавшимися из маломассивных "субгало", которые в рамках моделей с холодной скрытой массой должны во множестве образовываться внутри гало массивных галактик. При определенных условиях (вытянутость орбиты и потеря значительного количества массы при сближениях) такие галактики могут избежать слияния с главными компонентами к $z = 0$ и наблюдаться вместе с ними в настоящее время как системы типа М 51. Во-вторых, спутники могут быть захвачены основной галактикой при случайном сближении. Поскольку темп взаимодействий между галактиками растет с z , такое событие в прошлом могло быть вполне вероятным. Полученное выше указание на рост пространственного обилия галактик типа М 51 свидетельствует в пользу второго сценария. В любом случае, рассматриваемые варианты, конечно, являются упрощением реальной картины и должны быть протестированы численными расчетами.

В Заключение произведено краткое обсуждение результатов детального изучения галактик типа М 51 и перечислены основные выводы диссертационной работы.

В Приложении А приведены таблицы, содержащие главные наблюдаемые характеристики галактик выборки, а также характеристики, полученные в настоящей работе.

В Приложении В представлены изображения систем, входящих в рассматриваемую выборку.

На защиту выносятся:

- 1) Новая выборка галактик типа М 51, содержащая 32 системы.
- 2) Результаты построения оптической функции светимости галактик типа М 51 и оценка их распространенности в локальном объеме Вселенной.
- 3) Результаты спектральных наблюдений 12 систем типа М 51.
- 4) Результаты поиска галактик типа М 51 в глубоких полях Космического телескопа Хаббла.

Основное содержание диссертации изложено в следующих работах:

1. S.A. Klimanov, V.P. Reshetnikov, "Statistical study of M51 type galaxies", Astronomy and Astrophysics, 2001, V.378, P.428-440.
2. С.А. Климанов, В.П. Решетников, А.Н. Буренков, "Кинематическое исследование галактик типа М 51", Письма в Астрон. журн., 2002, Т.28, С.643-652.
3. В.П. Решетников, С.А. Климанов, "О структуре и эволюции галактик типа М 51", Письма в Астрон. журн., 2003, Т.29, С.488-496.
4. С.А. Климанов, "Оптическая функция светимости галактик типа М 51", Астрофизика, 2003, Т.46, С.191-206.

Личный вклад автора:

В работе [1] автором выполнен сбор наблюдательный данных, интерпретация результатов произведена совместно. В работе [2] автором произведена обработка наблюдательного материала, интерпретация осуществлена совместно. В работе [3] вклад соавторов одинаков.

Список литературы

- [1] *Воронцов-Вельяминов Б.А.*, Астрон. журн., 1957, Т.34, С.8.
- [2] *Арп Я*, Astrophys. J. Suppl. Ser., 1966, V.14, P.1.
- [3] *Воронцов-Вельяминов Б.А.*, Астрон. журн., 1975, Т.52, С.692.
- [4] *Toomre A., Toomre J.*, Astrophys. J., 1972, V.178, P.623.
- [5] *Laurikainen E., Salo Я*, Mon. Notic. Roy. Astron Soc., 2001, V.324, P.685.
- [6] *Efstathiou G., Ellis R.S., Peterson B.A.*, Mon. Notic. Roy. Astron. Soc., 1988, V.232, P.431.
- [7] *Huchra J., Sargent W.L.W.*, Astrophys. J., 1973, V.186, P.433.
- [8] *Sakai S., Mould J.R., Hughes S.M.G. et al.*, Astrophys. J., 2000, V.529, P.698.

ЛР № 040815 от 22.05.97.

Подписано к печати 13.05.2003 г. Формат бумаги 60X84 1/16. Бумага офсетная.

Печать ризографическая. Объем 1 п.л. Тираж 100 экз. Заказ 2927.

Отпечатано в отделе оперативной полиграфии НИИХ СПбГУ
с оригинал-макета заказчика.

198504, Санкт-Петербург, Старый Петергоф, Университетский пр., 26.