

Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова  
Государственный астрономический институт им. П.К. Штернберга

На правах рукописи

Попова Мария Эриковна

**ИССЛЕДОВАНИЕ СПИРАЛЬНОЙ СТРУКТУРЫ  
ГАЛАКТИКИ ПО ДАННЫМ ОБ ОБЪЕКТАХ ПЛОСКОЙ  
СОСТАВЛЯЮЩЕЙ**

01.03.02 - Астрофизика и радиоастрономия

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата физико-математических наук

Москва - 2009

Работа выполнена в отделе звездной астрономии и астрофизики  
Астрономической обсерватории Уральского государственного университета  
им. А.М. Горького

Научный руководитель: кандидат физико-математических наук  
Локтин Александр Васильевич  
(Астрономическая обсерватория УрГУ)

Официальные оппоненты: доктор физико-математических наук  
Пискунов Анатолий Эдуардович  
(Институт Астрономии РАН)

кандидат физико-математических наук  
Мельник Анна Маратовна  
(Государственный Астрономический  
Институт им. П.К. Штернберга МГУ)

Ведущая организация: Главная (Пулковская) Астрономическая  
Обсерватория РАН

Защита состоится 1 октября 2009 г. в 14 часов на заседании  
диссертационного совета по астрономии Московского государственного  
университета им. М.В. Ломоносова, шифр Д 501.001.86

Адрес: 119992, Москва, Университетский проспект, 13, ГАИШ.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Государственного  
астрономического института им. П.К. Штернберга МГУ (Москва,  
Университетский проспект, 13).

Автореферат разослан 29 августа 2009 г.

Ученый секретарь

Диссертационного совета

С. О. Алексеев

## 1. ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

### 1.1. Актуальность темы

Спиральная структура является наиболее яркой чертой большинства галактик, содержащих диск. Большой массив наблюдательных данных говорит о том, что наша Галактика относится к спиральным. Распределение молодых объектов, таких как рассеянные звездные скопления (РЗС), OB-звезды, переменные типа  $\delta$  Цефея, области нейтрального и ионизованного водорода, в плоскости Галактики, несет в себе информацию об областях современного или недавнего звездообразования, связанного в масштабе Галактики с ее спиральной структурой. В настоящее время общепринятой является точка зрения, что спиральная структура нашей Галактики является проявлением волны плотности, распространяющейся по её диску. В свою очередь спиральная волна плотности, порождающая видимую спиральную структуру, действует как глобальный спусковой механизм процесса звездообразования. Таким образом, спиральная структура служит важным звеном, связывающим динамику Галактики со свойствами звездной и газовой составляющих галактического диска. При этом определение параметров спиральной структуры Галактики позволяет связать динамические характеристики Галактики с характеристиками идущего в ней звездообразовательного процесса.

Исследование свойств спиральной структуры нашей Галактики оказывается достаточно трудным делом. Данные радионаблюдений газовых облаков, вследствие больших случайных и систематических ошибок в оценках расстояний, должны подтверждаться данными об оптических объектах - звездах и звездных скоплениях. Получению данных в оптическом диапазоне мешает неравномерное поглощение света, в среднем растущее с увеличением расстояния от Солнца, поэтому далекие объекты в основном

наблюдаются в «окнах прозрачности». Изучение далеких РЗС серьезно затрудняется высокой видимой плотностью звезд поля. Кроме того, на видимое расположение объектов в плоскости Галактики существенно влияют случайные ошибки оценок их расстояний от Солнца. Это искажает наблюдаемое распределение объектов, в том числе видимую концентрацию молодых объектов в областях звездообразования.

Наиболее удобными оптическими объектами для изучения спиральной структуры диска Галактики являются РЗС. Среди других объектов диска Галактики РЗС выделяются уникальной возможностью одновременного определения положений и возрастов. При этом РЗС достаточно многочисленны. Кинематические данные могут быть получены из каталога *Tucho*, созданного на основе данных спутника *Hipparcos*, а также из последних версий каталога *Dias* и др. (2002), который на сегодняшний день содержит 1629 рассеянных скоплений, и многочисленных работ по определению лучевых скоростей РЗС.

Необходимость исследования свойств спиральной структуры нашей Галактики, а также наличие большого количества публикаций по теме за последнее время, говорит об актуальности поставленной задачи.

## **1.2. Цели работы**

В данной работе были поставлены следующие основные цели:

- Исследовать распределение молодых объектов (РЗС, классических цефеид, ОВ-звезд, областей HI и HII) в проекции на плоскость Галактики.
- Определить ряд параметров спиральной структуры Галактики (угол наклона спиральных ветвей, угловую скорость вращения спирального узора, начальную фазу спиралей). Определить положения радиуса коротации, а также внутреннего и внешнего линдбладовских резонансов.
- На основе распределения возрастов рассеянных звездных скоплений,

относимых к трем отрезкам спиральных ветвей Галактики, исследовать возможность интерпретации изменений в темпе образования скоплений как следствий прохождений волн плотности, а также изучить зависимость от времени темпа образования скоплений в диске Галактики.

### **1.3. Научная новизна работы**

- Показано, что для рукавов Киля-Стрельца и Ориона наблюдается смещение объектов разного возраста в согласии с направлением распространения волн плотности, а следы концентрации объектов к спиральным ветвям Галактики могут быть прослежены до значений возраста 1 млрд. лет.

- Выявлено, что внешний вид спиральной структуры в основном определяется чередованием вдоль отрезков спиральных ветвей молодых и более старых звездных комплексов.

- Путем измерения сдвигов положений объектов разного возраста по данным о РЗС и переменных типа  $\delta$  Цефея получена оценка угловой скорости вращения спирального узора.

- На основе наблюдательных данных выявлено усложнение спиральной структуры при переходе от внутренних областей Галактики к внешним.

### **1.4. Научная и практическая ценность работы**

- Показано, что применение процедуры сглаживания позволяет успешно исследовать крупномасштабную структуру распределения молодых объектов по диску Галактики.

- Разработана методика определения угловой скорости вращения спирального узора путем измерения сдвигов положений объектов разного возраста в диске Галактики.

- Получены надежные оценки параметров спиральной структуры Галактики: угла закрутки, угловой скорости вращения спирального узора, начальных фаз видимых отрезков спиральных ветвей. Также оценены положения внешнего и внутреннего Линдбладовских резонансов и радиуса коротации.

### **1.5. Апробация работы**

Основные результаты, представленные в работе, докладывались на семинарах кафедры астрономии и геодезии и астрономической обсерватории УрГУ, а также на следующих научных конференциях:

1. Всероссийская астрономическая конференция ВАК-2004 «Горизонты Вселенной», МГУ, ГАИШ, 3-10 июня 2004 г.
2. 34-ая Международная студенческая научная конференция «Физика Космоса», Екатеринбург, 31 января-4 февраля 2005 г.
3. Международный симпозиум «Астрономия-2005: состояние и перспективы развития», Москва, 2005 г.
4. 35-ая Международная студенческая научная конференция «Физика Космоса», Екатеринбург, 30 января-3 февраля 2006 г.
5. Всероссийская астрономическая конференция к 100-летию П.П.Паренаго «Звездные системы», Москва, 24-26 мая 2006 г.
6. Всероссийская астрономическая конференция ВАК-2007, Казань, 3-10 сентября 2007 г.

### **1.6. Структура и объем диссертации**

Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, заключения и списка цитируемой литературы (198 наименований), организованного в алфавитном порядке. Работа изложена на 117 страницах, включает 32 рисунка и 7 таблиц.

### 1.7. Основные результаты, выносимые на защиту

- Распределение объектов (РЗС, переменных типа  $\delta$  Цефея, областей НI и НII) в плоскости Галактики представляет собой «мозаику» из почти не перекрывающихся областей звездообразования разных возрастов, следующих, чередуясь по возрасту, вдоль каждого из отрезков спиральных ветвей.

- Величина угла закрутки спиральных рукавов для нашей Галактики, полученная по данным о РЗС и цефеидах, равна  $i = 21.2^\circ \pm 0.5^\circ$ . Средневзвешенное значение угловой скорости спирального узора  $\Omega_p = 20.9 \pm 0.4$  км/с/кпк. Радиус коротации расположен между ветвями Ориона и Персея. Внешний линдбладовский резонанс находится вне области с  $R = 12$  кпк. Положение внутреннего резонанса зависит от количества рукавов, принятых в модели, и точности определения кривой вращения.

- Для интерпретации положений локальных экстремумов распределений возрастов в рукаве Киля - Стрельца достаточно двухрукавной структуры. Для рукава Ориона требуется как минимум четырехрукавная структура. Наблюдается усложнение спиральной структуры при переходе от внутренних областей Галактики к внешним.

- Темп образования РЗС со временем не равномерен (в последний 1 млрд. лет он снижается) и качественно совпадает с изменением темпа звездообразования.

## 2. КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **Введении** проводится обосновывание актуальности и научной новизны исследования. Формулируются цели работы, описывается ее практическая и научная значимость. Приведены результаты, выносимые на защиту, список публикаций и апробация работы.

В главе 1 представлены современное состояние изучаемой проблемы, история исследования спиральной структуры нашей Галактики и полученные в этой области результаты.

В разделе 1.1 даны современные представления о структуре Галактики в целом, а также о спиральной структуре, которая является наиболее яркой чертой большинства дисковых галактик.

Раздел 1.2 посвящен волновой теории спиральной структуры Галактики. Наряду с современными представлениями о спиральных ветвях Галактики как о волнах плотности, распространяющихся по галактическому диску (Lin, Shu, 1964), рассматривается ряд альтернативных взглядов на природу спиральной структуры, которые не связывают спиральные рукава с возмущениями плотности вещества в диске Галактики.

История исследования кривой вращения, которая является фундаментальной зависимостью для изучения структуры и кинематики нашей Галактики, описана в разделе 1.3.

Раздел 1.4 посвящен вопросу о параметрах спиральной структуры Галактики, полученных разными авторами. Показано, что до сих пор не достигнуто четкого понимания геометрии спиральной структуры Галактики. Представление галактического узора простым 2-х- или 4-х-рукавным слишком идеализировано (Lepine, Mishurov, Dedikov, 2001). Величина угла закрутки спиральной структуры диска Галактики лежит в интервале от  $5^\circ$  (Rastorguev, Glushkova, Zabolotskikh, Baumgardt, 2001) до  $21^\circ$  (Alfaro, Cabrera-Cano, Delgado, 1992). Оценка величины угловой скорости вращения спирального узора  $\Omega_p$  колеблется в интервале от 11 км/с/кпк (Gordon, 1978) до 35 км/с/кпк (Fernandez, Figueras, Torra, 2001). В заключение раздела обсуждаются вопросы, связанные с положением радиуса коротации, а также внутреннего и внешнего линдбладовских резонансов.

Завершающая часть Главы 1 (раздел 1.5) посвящена проблеме изучения истории звездообразования в Галактике. Большинство исследований

приводит к выводу о немонотонности звездообразования со временем. Оценки недавней истории звездообразования в окрестностях Солнца дают периодичность, которая совпадает с периодом прохождения волны плотности по диску Галактики (De la Fuente Marcos R., de la Fuente Marcos C., 2004).

В **Главе 2** с использованием вейвлет-анализа исследуется распределение молодых объектов (рассеянных звездных скоплений, классических цефеид, ОВ-звезд, областей HI и HII) в проекции на плоскость Галактики.

В разделе **2.1** описывается метод вейвлет-сглаживания, который позволяет перейти от точечного распределения объектов к сглаженному распределению их плотности. Данные о параметрах РЗС взяты из текущей версии «Однородного каталога параметров РЗС» (Loktin, Gerasimenko, Malysheva, 2001). Данные о параметрах переменных типа  $\delta$  Цефея были любезно предоставлены профессором ГАИШ А.С. Расторгуевым. Данные для областей HI приведены в работе Kavars et al., (2005). Данные для областей HII взяты из работы Russeil (2003), данные для областей HI приведены в работе Russeil (2003).

В разделе **2.2** (подразделы **2.2.1** - **2.2.4**) исследованы распределения вейвлет-коэффициентов для выбранных классов объектов. При этом РЗС и цефеиды были разделены на две возрастные группы с возрастными  $\lg t < 7.8$  и более старые. Практически все объекты показали однотипную картину спиральной структуры. Это позволило отождествить три известных отрезка спиральных ветвей: Киля-Стрельца, Ориона и Персея. Максимумы вейвлет-коэффициентов фактически соответствуют центрам областей звездообразования.

Раздел **2.3** посвящен исследованию распределения вейвлет-коэффициентов объединенной выборки РЗС и цефеид двух возрастных групп. К молодой группе были добавлены области HI и HII. По распределению вейвлет-коэффициентов для молодых и более старых объектов сделан вывод о том, что распределение объектов в плоскости

Галактики представляет собой «мозаику» из почти не перекрывающихся областей звездообразования разных возрастов, следующих, чередуясь по возрасту, вдоль каждой спиральной ветви. По градиенту возрастов, направленному в одну сторону за счет движения спиральных волн плотности для рукавов Киля-Стрельца и Ориона, сделан вывод о том, что радиус коротации в Галактике не находится непосредственно вблизи Солнца и, вероятно, расположен между ветвями Ориона и Персея.

**Глава 3** посвящена оцениванию параметров спиральной структуры Галактики на основе данных о положениях и возрастах РЗС и звезд типа  $\delta$  Цефея. В разделе **3.1** показана важность поставленной задачи, а также обоснован выбор объектов исследования.

Раздел **3.2** посвящен получению кривой вращения Галактики по данным об имеющихся выборках молодых РЗС, ОБ-звезд и цефеид. Описана методика получения гладкой кривой вращения Галактики. Зависимость угловой скорости  $\omega$  от расстояния от оси вращения Галактики  $R$  приближалась полиномом по обратным степеням расстояния от оси вращения Галактики. Наряду с лучевыми скоростями объектов были использованы и собственные движения, взятые из каталогов Tycho-2 и UCAC-2. Проведено сравнение результатов, полученных по данным для разных классов объектов, а также сравнение с кривыми вращения из работ Fich, Blitz, Stark (1989) и Brand, Blitz (1993).

Раздел **3.3** посвящен описанию метода определения угла закрутки рукавов, угловой скорости вращения спиральной структуры  $\Omega_r$ , а также начальных фаз для отрезков спиральных ветвей. Все РЗС и цефеиды выборки разделены на несколько возрастных интервалов. В качестве критерия для определения положения отрезков спиральных ветвей выбрано среднеквадратичное отклонение  $S$  объектов от сканирующей прямой, параллельной отрезкам спиральных ветвей на графике  $\ln R - \theta$ , где  $\theta$  - галактоцентрический угол объектов. Угол закрутки рукавов спиральной

структуры определялся варьированием наклона сканирующей прямой до получения наиболее глубокого минимума функции  $S$ . Зависимость положений минимумов от времени (среднего возраста групп объектов), исправленных за разницу скорости вращения Галактики на разных расстояниях от ее центра, позволяет вычислить угловую скорость вращения спиральной структуры. Учитывая, что спиральные ветви галактик хорошо описываются отрезками логарифмической спирали, вычислены начальные фазы для каждого из отрезков спиральных ветвей исходя из их положений и угла наклона. Кривая вращения и оценка угловой скорости спирального узора позволяют определить положения областей, характеризующих свойства спиральной структуры: радиуса коротации, внешнего и внутреннего линдбладовских резонансов.

В разделе **3.4** показано, что положения выделенных спиральных ветвей в зависимости от времени хорошо ложатся на отрезки параллельных прямых, так что спиральный узор действительно вращается твердотельно, и за последний миллиард лет угловая скорость спирального узора заметно не изменилась. Значение угла наклона спиралей в Галактике равно  $i = 21.2^\circ \pm 0.5^\circ$ . Средневзвешенное значение угловой скорости спирального узора получилось равным  $\Omega_p = 20.9 \pm 0.4$  км/с/кпк.

По определенной выше кривой вращения Галактики и угловой скорости спирального узора получено, что радиус коротации расположен в области приблизительно от 9.1 до 9.7 кпк от центра Галактики для принятого значения расстояния Солнца от оси вращения Галактики  $R_0 = 8.3$  кпк (Gillessen, Eisenhauer, Trippe et al., 2009). Вероятнее всего, радиус коротации в нашей Галактике расположен между ветвями Ориона и Персея. По кривым  $\omega \pm \kappa/m$ , где  $\kappa$  - эпициклическая частота,  $m$  - число ветвей в структуре, определено положения внешнего и внутреннего линдбладовских резонансов. Для данного значения  $\Omega_p = 20.9$  км/с/кпк внутренний резонанс Линдблада при  $m = 2$  лежит на расстоянии  $R \leq 6$  кпк от центра Галактики, а при

предположении о 4-рукавной структуре - на расстоянии около  $R = 7.4$  кпк, что не согласуется с полученным положением ветви Киля - Стрельца. Таким образом, на этом этапе работы результаты приводят к необходимости предпочтения 2-рукавной структуры. О положении внешнего линдбладовского резонанса по используемым данным можно лишь утверждать, что он находится вне области  $R = 12$  кпк.

Разности начальных фаз между приближающимися ветви логарифмическими спиралями составляют  $\approx 30^\circ$  для ветвей Киля-Стрельца, Ориона и Персея. Спиральная структура согласно полученным значениям разностей начальных фаз оказывается 12-рукавной. Однако это входит в явное противоречие с интервалом расстояний до центра Галактики, в котором наблюдается спиральная структура, исходя из положений линдбладовских резонансов. Получающееся несоответствие можно разрешить, если начала приближающихся логарифмических спиралей связывать не с центром Галактики, а с достаточно протяженным баром и/или предположить усложнение спиральной структуры с увеличением расстояния от оси вращения Галактики.

В **Главе 4** с использованием вейвлет-анализа более подробно исследуются распределения возрастов РЗС в объемах видимых отрезков спиральных ветвей. В разделе **4.1** дано описание метода, при помощи которого изучаются распределения скоплений каждого рукава в отдельности на плоскости  $\theta - \lg t$ . Так как разность угловых скоростей вращения диска Галактики и спиральной структуры в окрестностях Солнца оказывается небольшой, то скопления с логарифмами возрастов от 6 до 9 нетрудно приписать конкретному спиральному рукаву. Для выделения областей повышенной плотности РЗС к распределению скоплений в плоскости  $\theta - \lg t$  применялась процедура полосовой фильтрации, использующая вейвлет-сглаживание.

В разделе **4.2** (подразделы **4.2.1** - **4.2.3**) рассмотрены распределения

положений и логарифмов возрастов РЗС в областях рукавов Киля - Стрельца, Ориона и Персея и результаты сглаживания этих распределений. Рисунки показывают явную неоднородность распределений РЗС по возрастам в отдельных областях диска Галактики, что позволяет выделить отдельные поколения РЗС с очень незначительной дисперсией возрастов.

В разделе **4.3** исследуются частотные распределения возрастов скоплений в выделенных областях, исправленные за эффекты наблюдательной селекции и конечное время жизни скоплений (Wielen, 1971). Эти распределения представляют собой фактически темп образования скоплений в зависимости от времени, отсчитываемого назад от настоящего момента. На распределениях возрастов выделяются несколько максимумов плотности РЗС. Для рассматриваемых областей диска были вычислены времена между последовательными прохождением спиральной волны через эти области. Проанализировано положение локальных максимумов распределений в зависимости от геометрии спиральной структуры.

Для области рукава Киля - Стрельца период прохождений получился равным 600 млн. лет. После отождествления периода с максимумами плотности, сделан вывод, что распределению плотности скоплений по возрастам в области современного рукава Киля - Стрельца соответствует 2-рукавная модель спиральной структуры. Для рукава Ориона период прохождения одиночной спиральной волны равен 2.5 млрд. лет, что соответствует 4-рукавной спиральной структуре. Таким образом, сделан вывод об усложнении спиральной структуры с увеличением расстояния от оси вращения Галактики.

В разделе **4.4** исследован глобальный темп рождения РЗС. Рассмотрен процесс образования РЗС во всей исследуемой области в целом. Проведено сравнение темпа образования скоплений с темпом звездообразования из работы Vergely, Koppen, Egret, Vienaume (2002), полученным методом синтеза звездных населений для ближайших окрестностей Солнца. Показано,

что в среднем темп рождения РЗС со временем падает. Выделен ряд максимумов на фоне общего спада.

В **Заключении** резюмируются основные результаты и выводы диссертации, касающиеся свойств спиральной структуры нашей Галактики.

## **2.1. Список публикаций автора по теме диссертации**

Основное содержание диссертации изложено в следующих публикациях

1. Попова М.Э., Локтин А.В. Параметры спиральной структуры Галактики по данным о рассеянных звездных скоплениях // Письма в АЖ 2005, т.31, №3, с.171-178.
2. Попова М.Э., Локтин А.В. Кинематические параметры спиральной структуры Галактики по данным о рассеянных звездных скоплениях и OB-звездах // Письма в АЖ, 2005, т.31, №10, с.743-748.
3. Попова М.Э. Параметры спиральной структуры Галактики по данным о звездах типа Дельта Цефея // Письма в АЖ, 2006, т.32, №4, с.274-282.
4. Локтин А.В., Попова М.Э. Анализ распределения молодых звездных объектов в плоскости Галактики с применением вейвлет-сглаживания // АЖ, 2007, т.84, №5, с.409-417.
5. Попова М.Э., Локтин А.В. Рассеянные звездные скопления в спиральных ветвях Галактики // Письма в АЖ, 2008, т.34, №8, с.609-616.

## **2.2. Личный вклад автора**

В совместных работах 1 и 2 списка, приведенного выше, автором выполнена работа по подготовке выборки данных, проведены все расчеты, написаны тексты статей. Работа 3 выполнена автором полностью самостоятельно. В работах 4 и 5 вклад автора 50%.

**Список литературы**

1. *Alfaro E.J., Cabrera-Cano J., Delgado A.J.* // *Astrophys. J.* - 1992. - Vol. 399. - P. 576.
2. *Brand J., Blitz L.* // *Astron. Astrophys.* - 1993. - Vol. 275. - P. 67.
3. *De la Fuente Marcos R., De la Fuente Marcos C.* // *New Astron.* - 2004. - Vol. 9. - P. 475.
4. *Dias W.S., Alessi B.S., Moitinho A., Lepine J.R.D.* // *Astron. Astrophys.* - 2002. - Vol. 389. - P. 871.
5. *Fernandez D., Figueras F., Torra J.* // *Astron. Astrophys.* - 2001. - Vol. 372. - P. 833.
6. *Fich M., Blitz L., Stark A.A.* // *Astrophys. J.* - 1989. - Vol. 342. - P. 272.
7. *Gillessen, Eisenhauer, Trippe et al.* // *Astrophys. J.* - 2009. - Vol. 692. - P. 1075.
8. *Gordon M.A.* // *Astrophys. J.* - 1978. - Vol. 222. - P. 100.
9. *Kavars D.W., Dickey J.M., McClure-Griffiths N.M. et al.* // *Astrophys. J.* - 2005. - Vol. 626. - P. 887.
10. *Lepine J.R.D., Mishurov Yu.N., Dedikov S.Yu.* // *Astrophys. J.* - 2001. - Vol. 546. - P. 234.
11. *Lin C.C., Shu F.H.* // *Astrophys. J.* - 1964. - Vol. 140. - P. 646.
12. *Loktin A.V., Gerasimenko T.P., Malysheva L.K.* // *Astron. Astrophys. Trans.* - 2001. - Vol. 20. - P. 607.
13. *Rastorguev A.S., Glushkova E.V., Zabolotskikh M.V., Baumgardt H.* // *Astron. Astrophys. Transact.* - 2001. - Vol. 20. - P. 103.
14. *Russeil D.* // *Astron. Astrophys.* - 2003. - Vol. 397. - P. 133.
15. *Vergely J.L., Koppen J., Egret D., Bienayme O.* // *Astron. Astrophys.* - 2002. - Vol. 390. - P. 917.
16. *Wielen R.* // *Astron. Astrophys.* - 1971. - Vol. 13. - P. 309.