

ОБ ОПРЕДЕЛЕНИИ ШИРИНЫ СПИРАЛЬНЫХ ВЕТВЕЙ ДИСКОВЫХ ГАЛАКТИК

Савченко Сергей Сергеевич

канд. физ.-мат. наук, старший научный сотрудник, Санкт-Петербургский Государственный университет, – СПбГУ, РФ, г. Санкт-Петербург

On estimation of the width of spiral arms of disk galaxies

Sergey Savchenko

PhD, senior researcher, Saint Petersburg State University, Russia, Saint Petersburg

*Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ
18-32-00194 «мол_а».*

Аннотация. Теория формирования и эволюции дисковых галактик предлагает несколько механизмов возникновения в них спирального узора. Для проверки их на практике требуется измерение различных параметров спиральных ветвей у выборки реальных галактик. В этой работе описывается новый метод определения ширины спиральных ветвей дисковых галактик, основанный на анализе их изображений.

Abstract. The theory of the formation and evolution of disk galaxies suggests several mechanisms of the spiral structure generation. To test them in practice the measurement of various parameters of spiral arms of real galaxies is required. In this work, a new method of the measurement of the width of spiral arms of disk galaxies based on the analysis of their images is proposed.

Ключевые слова: дисковые галактики; спиральные галактики; анализ изображений; алгоритмы.

Keywords: disk galaxies; spiral galaxies; image analysis; algorithms.

Введение. Первые попытки определения параметров спирального узора по фотографиям дисковых галактик были предприняты еще до того, как стало известно о внегалактической природе этих объектов [5]. Основные измеряемые параметры включали в себя число спиральных рукавов, их форму (флоккулентные, многорукавные и, так называемые, grand design галактики), угол закрутки (определяющий степень закрученности спиральных ветвей), контраст [6].

Другим важным параметром, характеризующим спиральные ветви, является их ширина, а

также изменение ширины при движении вдоль спирали от центра галактики к периферии. В настоящее время существует лишь небольшое количество работ, посвященных измерению ширины спиральных ветвей, что связано с трудностью ее измерения. Так, в работах [1] и [4] предлагается оценивать ширину спиралей измеряя дисперсию координат расположенных в них областей III. Недостатком такого подхода является необходимость определения координат достаточно большого количества областей III, что является трудоемкой задачей и выполнимо только для самых близких галактик. Измерения ширины спирального узора для статистически значимой выборки галактик на данный момент отсутствуют.

В данной работе предлагается новый метод определения ширины спирального узора, основанный на анализе их изображений.

Подготовка изображений. Предварительным этапом, который необходимо выполнить перед применением предложенного в работе метода является первичная подготовка изображений. Ниже перечислены основные этапы подготовки изображений.

- Определение и вычитание присутствующего на изображении фона неба. Обычно, оценка фона производится путем аппроксимации свободных от объектов участков изображения двумерным полиномом заданной степени.
- Построение масок. Так как на изображении помимо исследуемой галактики, обычно, содержится ряд посторонних, “фоновых”, объектов (звезд и галактик), то необходимо исключить из дальнейшего рассмотрения участки изображения, занимаемые этими объектами. Для этого создается дополнительное изображение-маска с размером, равным размеру анализируемого изображения, где нулями обозначены свободные от посторонних объектов области изображения, а единицами – занятые фоновыми объектами области, которые нужно исключить.
- Исправление изображений за эффекты проекции. Галактики имеют произвольную ориентацию в пространстве (определяемую наклоном i и позиционным углом PA), и в результате проекции на небесную сферу они выглядят искаженными. Исправление этого эффекта производится путем поворота изображения галактики на угол PA и его последующим растяжением вдоль малой оси галактики на величину $1/\cos(i)$.
- Вычитание осесимметричной составляющей галактики. Так как спиральный узор в галактиках наблюдается на фоне подстилающего диска, то измерение его параметров может быть искажено вкладом подложки. Чтобы уменьшить вклад диска в анализ спирального узора можно аппроксимировать изображение галактики набором концентрических эллипсов, а затем вычесть из изображения полученную модель. Из-за того, что полученная модель может учитывать только осесимметричную составляющую галактики (то есть подстилающий диск), но не может учесть неосесимметричные компоненты (такие как спирали), то на разностном изображении контраст спирального узора возрастет. Построение такой эллиптической модели может быть произведено по методу, описанному в работе [2].

Подготовленные таким образом изображения галактик далее могут быть использованы для определения параметров спирального узора.

Описание метода. Основная идея метода заключается в том, что для набора точек, расположенных на спиральном рукаве производится фотометрический срез поперек рукава, а затем выполняется аппроксимация этого среза аналитической функцией. Ширина спиральной ветви извлекается из значений оптимальных параметров аппроксимирующей функции.

В качестве нулевого приближения для алгоритма требуется несколько точек (около 10), расставленных вдоль спирального рукава. Эти точки могут быть расставлены пользователем вручную, так как точность их положения не влияет на работу метода.

Далее эти точки используются для того, чтобы построить сглаженную спираль и автоматически выставить на ней большее число (порядка 100) точек, в которых будут делаться срезы. Для этого расставленные вручную точки соединяются попарно отрезками логарифмической спирали:

$$r(\phi) = r_0 \cdot e^{\tan \mu (\phi - \phi_0)},$$

где: r и ϕ - координаты точек в полярной системе координат, а μ --угол закрутки. Новые точки равномерно выставляются вдоль этой интерполирующей логарифмической спирали.

На следующем этапе для каждой точки на спиральном узоре вычисляется перпендикуляр к спирали, вдоль которого вычисляется срез. Угловой коэффициент перпендикуляра к логарифмической спирали с углом закрутки μ в точке с позиционным углом ϕ может быть найден по формуле

$$\zeta = -\frac{\tan \mu \cos \phi - \sin \phi}{\tan \mu \sin \phi + \cos \phi}.$$

Результат этого этапа для галактики PGC2182 показан на Рис. 1: слева показано положение точек, выставленных пользователем (синим и зеленым показаны точки, принадлежащие разным рукавам), в центре - интерполированные при помощи логарифмических спиралей точки, справа - набор перпендикуляров к спиральям в каждой точке, вдоль которых будут выполняться фотометрические срезы. Представленное изображение получено из базы данных Slon Digital Sky Survey (фильтр r).

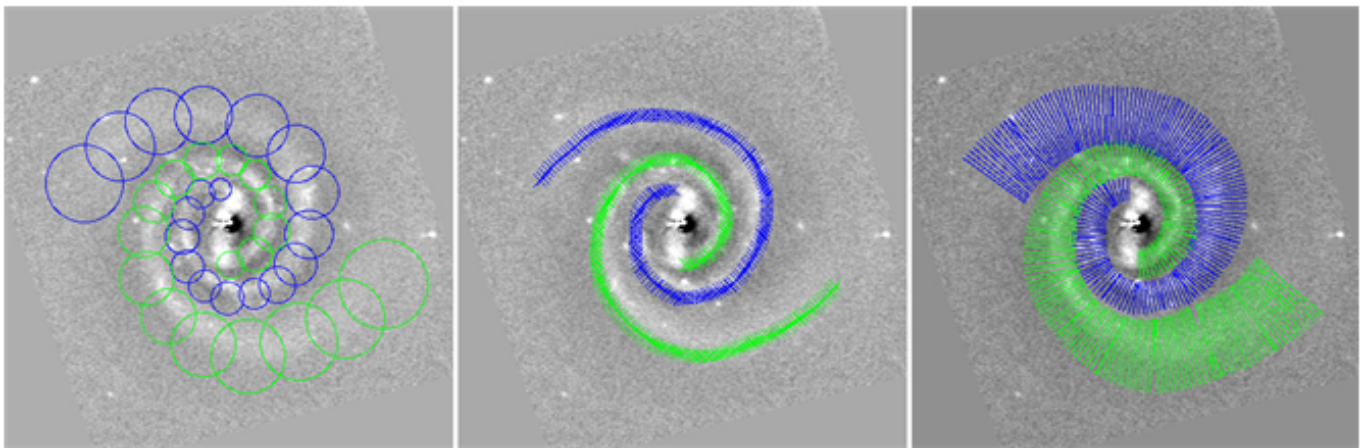
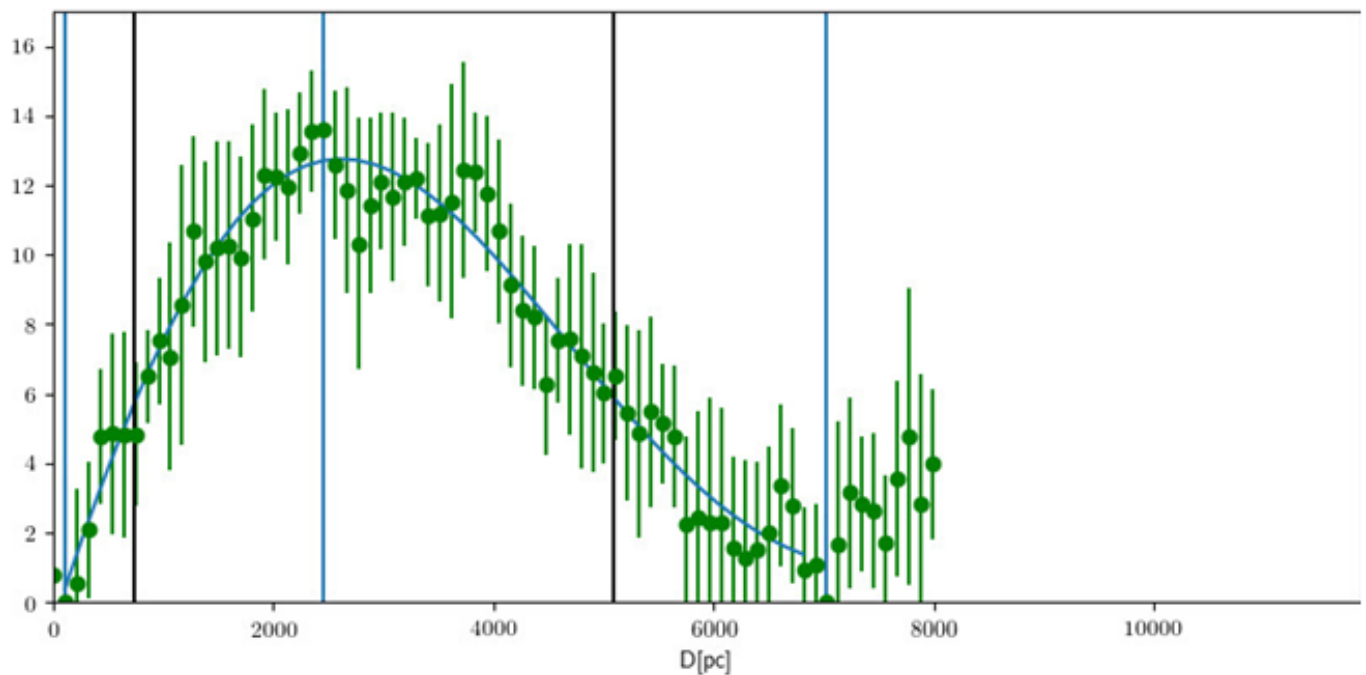


Рисунок 1. Точки на рукавах галактики PGC2182

Далее, вдоль каждого перпендикуляра к спирали находится фотометрический срез, то есть зависимость значения интенсивности от положения на срезе. Внешний вид данного среза представляет собой колоколообразную кривую, пик которой соответствует самой яркой точке в центре спирального рукава, по обе стороны от которой наблюдается постепенный спад интенсивности. Кривую такой формы можно аппроксимировать кривой Гаусса. По теории спиральных волн плотности [3] ожидается, что профиль спиральной ветви может быть асимметричным (форма переднего фронта движущейся по диску спиральной волны плотности определяется процессом звездообразования в сжатом ударной волной газе, форма внутренней стороны спирали определяется постепенным затуханием и дисперсией скоростей родившихся в рукаве звезд) [7]. В связи с этим, в работе предлагается аппроксимировать срез асимметричной кривой Гаусса, с разным значением полуширины по обе стороны от пика:

$$f(r) = \begin{cases} A \cdot e^{-\frac{(r-b)^2}{w_1^2}}, & r < b \\ A \cdot e^{-\frac{(r-b)^2}{w_2^2}}, & r \geq b, \end{cases}$$



где A – амплитуда пика, характеризующая максимальную интенсивность рукава в данном срезе, b – положение пика, w_1 и w_2 – характеризуют ширину кривой соответственно слева и справа от пика. Поиск оптимальных параметров модели производится методом градиентного спуска. Для увеличения соотношения сигнал/шум при аппроксимации применяется осреднение нескольких расположенных рядом срезов (предполагается, что форма спирального рукава не изменится значительно на таком малом масштабе).

Рисунок 2. Пример аппроксимации фотометрического среза спирального рукава

Пример аппроксимации фотометрического среза спирального рукава показан на Рис. 2. Зелеными кружками показано наблюдаемое изменение интенсивности вдоль спирального рукава, непрерывной синей кривой – аппроксимация наблюдаемой интенсивности предложенной моделью. Вертикальные черные линии показывают положение, где интенсивность достигает половины от максимума слева и справа от пика. Это значение и является конечным параметром, измерение которого производится предложенным методом. Стоит отметить, что на данном срезе хорошо просматривается асимметричность распределения интенсивности поперек спиральной ветви.

Если применить данный метод поочередно ко всем точкам вдоль спирального рукава, то можно проследить, как меняется ширина спиральной ветви по мере удаления от центра галактики. Пример такого анализа приведен на Рис. 3. На этом рисунке показано измерение ширины одного из рукавов галактики PGC2182. Красными точками показаны положения пиков интенсивности спирального узора, фиолетовой и синими кривыми – положение линий половинной интенсивности, определяющих ширину спирального узора. Красные стрелки показывают направление и ширину последнего (самого далекого от центра галактики) среза. Хорошо видно, что для данной галактики ширина спирального рукава увеличивается по мере удаления от ее центра.

Заключение. Предложен метод измерения ширины спиральных ветвей дисковых галактик, работающий на основе их изображений. Метод позволяет определить не только значение ширины спирали, но и наличие возможной асимметрии распределения интенсивности в спиральном рукаве. Применение описанного метода к разным участкам спирального узора позволяет проследить, как изменяется ширина спирали по мере удаления ее от центра галактики.

Дальнейшая работа. В качестве развития данной работы предлагается применить описанный метод для оценки параметров спирального узора для большой выборки близких спиральных галактик. Кроме того, из результатов работы метода предлагается извлечь дополнительные параметры спирального узора, такие как угол закрутки и изменение интенсивности при движении вдоль спирального рукава (эти величины могут быть легко получены из анализа положения пиков интенсивности на спиральной ветви, показанных красными точками на Рис. 3).

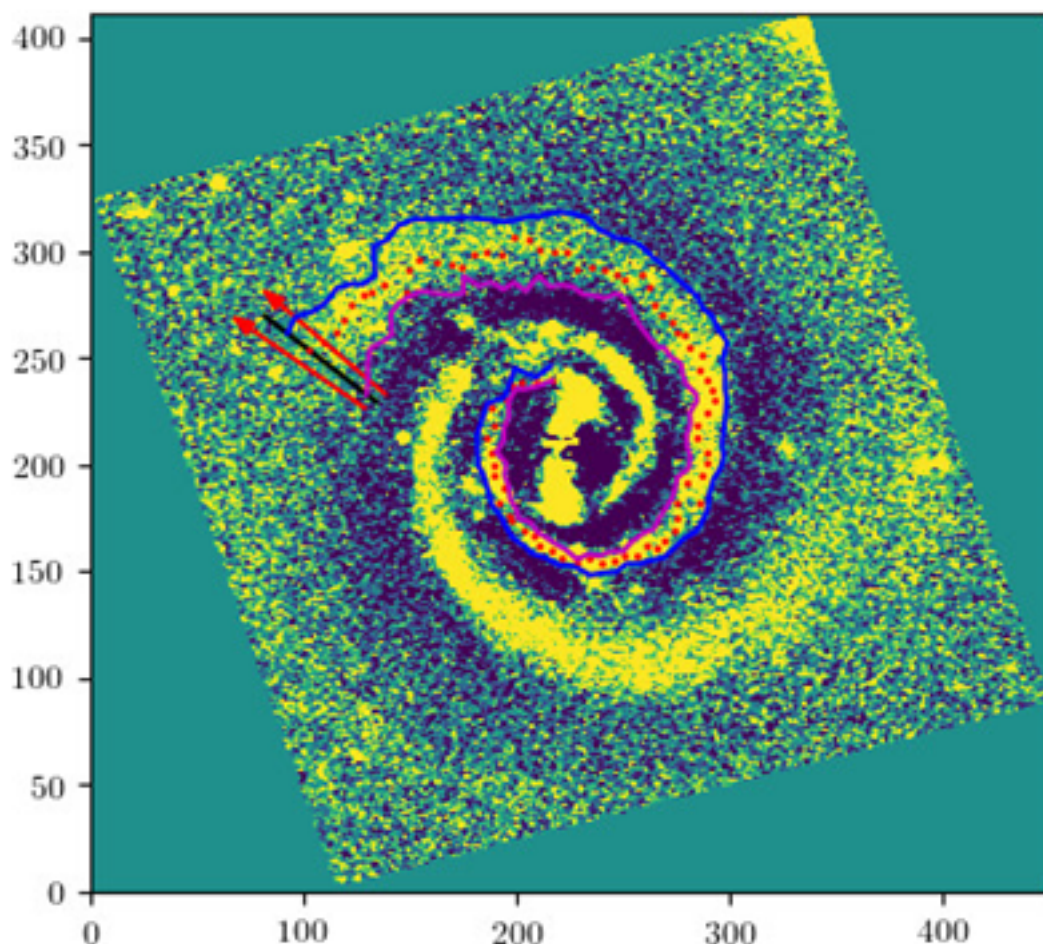


Рисунок. 2: Изменение ширины спирального рукава галактики PGC2182

Список литературы:

1. Honig Z.N., Reid M.J., Characteristics of Spiral Arms in Late-type Galaxies // The Astrophysical Journal – 2015, Vol. 800, Issue 1, p 53.
2. Jedrzejewski R., I., CCD surface photometry of elliptical galaxies – I. Observations, reduction and results // Mon. Not.R. astr. Soc – 1987, Vol 226, Issue 1, p. 747.
3. Lin C.C., Shu F.H., On the spiral structure of disk galaxies // Astrophysical Journal – 1964, vol

140, p 646.

4. Ried M. et al., Trigonometric Parallaxes of High Mass Star Forming Regions: The Structure and Kinematics of the Milky Way // The Astrophysical Journal – 2014, Vol. 783, Issue 2, p. 130.

5. Von der Pahlen E. Über die Gestalten einiger Spiralnebel // Astron. J. – 1911, Vol. 188, Issue 15, p. 249.

6. Yu S., et al., The Carnegie-Irvine Galaxy Survey. VI. Quantifying Spiral Structure // The Astrophysical Journal – 2018, Vol. 862, Issue 1, p. 13.

7. Yuan C., Grosbol P., Surface photometry of spiral galaxies. I. Theoretical color variation and surface brightness across spiral arms // The Astrophysical Journal – 1981, Vol 243, p. 432.