

УДК 524.74:520.82

МАССОВАЯ ДЕКОМПОЗИЦИЯ ГАЛАКТИК С ПОМОЩЬЮ ПАКЕТА ПРОГРАММ DECA

© 2014 А. В. Мосенков^{1,2*}

¹Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург, 199034 Россия

²Главная (Пулковская) Астрономическая Обсерватория РАН, Санкт-Петербург, 196140 Россия

Поступила в редакцию 8 августа 2013 года; принята в печать 21 октября 2013 года

Представлен новый программный пакет DECA, предназначенный для фотометрического исследования изображений дисковых и эллиптических галактик регулярной структуры. Пакет DECA написан на интерпретируемом языке программирования Python и объединяет возможности нескольких пространственных пакетов для обработки астрономических данных, таких как IRAF, SExtractor, а также программный код GALFIT, используемый для выполнения двумерного разложения изображений галактик на несколько фотометрических компонентов (балдж+диск). Преимуществом пакета является возможность его применения к большой выборке галактик разной пространственной ориентации к лучу зрения (в том числе галактик, видимых с ребра) с минимальным участием человека. Приводятся примеры использования пакета для исследования выборки смоделированных изображений галактик, а также выборки реальных объектов, что показывает надежность использования представляемого пакета для структурного исследования галактик.

Ключевые слова: галактики: фотометрия—методики: обработка изображений—методики: фотометрия

1. ВВЕДЕНИЕ

За последние два десятилетия произошли существенные изменения в методах и средствах изучения Вселенной. Совершенствование вычислительной техники, повсеместное использование ПЗС-матриц, новые технологии создания телескопов, применение адаптивной оптики, а также использование космических телескопов, работающих в разных диапазонах длин волн, — всё это с необходимостью сказалось на успехах современной астрономии, и особенно — внегалактической астрономии. Появление огромного количества наблюдательных данных, находящихся в свободном доступе в сети Интернет, стимулировало лавинообразный рост количества работ, посвященных исследованию галактик. Грандиозный проект Sloan Digital Sky Survey (SDSS) [1], результатом которого является картографирование уже более чем 35% всей небесной сферы в пяти фотометрических полосах оптического диапазона, призван существенно углубить наши представления о формировании и эволюции галактик. Достаточная глубина изображений позволяет детектировать удаленные объекты (до $z \sim 0.7$ для далеких ярких галактик и до $z \sim 5$ для квазаров), что крайне важно для

построения и уточнения космологической модели Вселенной. Исследования в оптической области спектра дают представления о характеристиках звездного населения галактик [2, 3], морфологическом типе (см., например, проект GalaxyZoo [4]), внутреннем поглощении в галактике [5]. Обзоры в ближней инфракрасной области спектра, такие как Two Micron All Sky Survey (2MASS) [6] и UKIRT Infrared Deep Sky Survey (UKIDSS) [7] важны в том смысле, что доминирующий вклад в общую светимость галактик в этом диапазоне дает звездная составляющая при минимальном внутреннем поглощении пыли. Инфракрасные проекты Wide-Field Infrared Survey Explorer (WISE) [8] и Spitzer Space Telescope (SST) [9] необходимы для исследования распределения звездной массы в полосах 3.6 и 4.5 мкм, что, как было показано в обзоре S⁴G [10], идеально подходит для исследования звездных компонентов галактик. И, несомненно, важнейшие открытия в астрономии за последние два десятилетия принес космический телескоп Хаббла (HST), заглянувший в самые дальние уголки Вселенной. Выявление мелких структурных особенностей галактик на подробных снимках HST позволяют детально исследовать галактики и наиболее точно выявлять происходящие в них процессы.

Увеличение количества наблюдательных дан-

*E-mail: mosenkovAV@gmail.com

ных потребовало создание специальных средств для их обработки. Так, появились системы программ MIDAS, IRAF, AIPS и многие другие. Эти программы призваны решать множество задач, которые ставятся как во время проведения первоначальной обработки изображений, так и при дальнейшем анализе наблюдательных данных. Выполнение фотометрических исследований для сравнительно небольших выборок галактик [11–13] впоследствии привело к повсеместному использованию разработанных методов. Моделирование изображений галактик стало одним из основных инструментов внегалактической астрономии. Например, в самом простом случае изображение галактики может быть представлено как сумма двух фотометрических компонентов: диска и балджа. Часто выделяются и другие компоненты, такие как бар, внутренний диск, линза, кольцо, спиральные ветви, активное ядро, которые, по возможности, также следует учитывать для получения надежных параметров главных компонентов.

За последние пятнадцать лет был разработан ряд алгоритмов для количественного описания характеристик галактик на основе методов поверхностной фотометрии [14–21]. На практике широко используются пакеты GIM2D [14, 15] и GALFIT [17, 18]. Оба пакета основаны на минимизации суммы квадратов невязок модели и изображения, но используют несколько разные алгоритмы минимизации. В GIM2D применяется алгоритм Метрополиса-Гастингса, в GALFIT — алгоритм Левенберга-Марквардта. Использование разных алгоритмов сказывается, помимо прочего, на скорости вычисления модели, что делает GALFIT предпочтительным выбором по этому критерию. В ряде работ было показано, что результаты работы обеих программ оказываются очень близкими [22, 23]. Благодаря большому количеству встроенных функций и хорошей поддержке разработчиков, многие авторы включили GALFIT как основное вычислительное ядро для своих программ по обработке большого количества галактик. В частности, система ASTRO-WISE [24, 25], использующая возможности интерпретируемого языка Python, включает процедуры для обработки наблюдательных данных, частью которых является создание входного файла и запуск GALFIT в автоматическом режиме. Программа GALAPAGOS [26], написанная на языке IDL, способна автоматически выделять источники и выполнять декомпозицию одновременно нескольких объектов, присутствующих на изображении. Пакет GAMA [27], написанный на языке R, также выполняет автоматическую декомпозицию объектов, используя простейшую модель Серсика для описания распределения поверхностной яркости всей галактики. Наконец, пакет PyMorph [28],

написанный на языке Python, помимо выполнения двумерной декомпозиции галактики на балдж и диск с помощью GALFIT проводит также и количественную морфологию объектов (индекс концентрации, коэффициент Джини и др.).

Несмотря на большое разнообразие появляющихся программ, их использование часто оказывается затруднительным, так как во многих случаях отсутствует хорошее описание, имеют место слабая поддержка авторами и отсутствие регулярного обновления.

Целью данной работы являлось создание пакета программ для выполнения массовой декомпозиции галактик довольно регулярной структуры без особенностей (диск+балдж). Особое внимание уделялось массовой обработке галактик, видимых с ребра, что нигде ранее в литературе автором замечено не было. Мы старались максимально освободить пользователя от управления работой программы, с сохранением высокого качества проводимой декомпозиции. В программе удалось реализовать возможность автоматического морфологического анализа, то есть на основании результатов декомпозиции судить о морфологическом типе галактики.

В этой статье описывается алгоритм работы программы и обсуждаются результаты ее применения к выборке модельных галактик, а также к выборке реальных галактик. В заключении сделаны краткие выводы о ее возможных астрофизических приложениях.

2. ПАКЕТ DECA

2.1. Описание алгоритма

DECA (DEComposition Analysis) представляет собой программный модуль (*wrapper*) для выполнения массовой декомпозиции галактик, использующий в качестве основных вычислительных программ уже упомянутые выше SExtractor [29] и GALFIT. Для выполнения операций с изображениями применяется система IRAF с установленным пакетом обработки и анализа наблюдательных данных STSDAS. Большинство программ написано на популярном (в том числе и в астрономическом сообществе) интерпретируемом языке Python, для чего используются возможности нескольких дополнительных библиотек, таких как SciPy (для осуществления высококачественных вычислений) и PyFits (для работы с FITS-файлами).

Будем рассматривать изображение галактики как сумму двух фотометрических компонентов — диска и балджа. В случае, если диск отсутствует, будем считать такую галактику эллиптической, в противном случае — дисковой. Здесь надо заметить, что по разным данным [30–32] по крайней мере

в половине близких галактик имеется бар. Гадотти [33] показал, что невключение бара в модель галактики с баром может серьезно сказаться на получаемых параметрах балджа, в частности, на переоценке отношения светимости балджа к общей светимости галактики B/T до двух раз. Тем не менее, идеальная модель “диск+балдж” может являться прекрасным начальным приближением для последующего усложнения модели путем внесения новых компонентов.

Рассмотрим модели диска и балджа (более подробно с методами поверхностной фотометрии можно ознакомиться в [34]). Здесь будем обозначать поверхностную яркость I , выраженную в единицах интенсивности, и μ — поверхностную яркость, заданную в звездных величинах на квадратную секунду дуги (mag/\square'').

Для описания распределения поверхностной яркости диска используется уже давно установленный эмпирический закон [35–37]:

$$I_d(r) = I_{0,d} e^{-r/h}, \quad (1)$$

где h — экспоненциальный масштаб диска, $I_{0,d}$ — центральная поверхностная яркость диска, r — большая полуось изофоты эллиптичности ε_d (под эллиптичностью будем понимать параметр эллипса, определяемый как $1 - b/a$, где b/a — отношение длин малой и большой полуосей эллипса). Если экспоненциальный диск виден с ребра и является прозрачным для собственного излучения, то, как показано в работе ван дер Круита и др. [38], распределение поверхностной яркости вдоль большой оси выражается следующим образом:

$$I_d(r) = I_0 \frac{r}{h} K_1 \left(\frac{r}{h} \right), \quad (2)$$

где I_0 — центральная поверхностная яркость диска; K_1 — модифицированная функция Бесселя первого порядка.

Для описания распределения яркости в дисках галактик, видимых с ребра, в направлении, перпендикулярном плоскости диска, применяют модель самогравитирующего изотермического слоя [38, 39]:

$$I_d(z) = I_0 \operatorname{sech}^2(z/z_0), \quad (3)$$

где z_0 — вертикальная шкала диска.

Распределение поверхностной яркости эллиптических галактик и балджей спиральных галактик описывают законом Серсика [40, 41]:

$$I(r) = I_e \exp \left[-\nu_n \left(\left(\frac{r}{r_e} \right)^{1/n} - 1 \right) \right], \quad (4)$$

где r_e — эффективный радиус круга (в случае круговых изофот), внутри которого излучается половина полной светимости балджа или эллиптической галактики; I_e — эффективная поверхностная яркость на радиусе r_e ; n — положительное действительное число, называемое индексом или показателем Серсика; ν_n — некоторая функция от n . В работе [42] найдена следующая аппроксимация: $\nu_n \simeq 1.9992 n - 0.3271$. Во многих статьях (напр., [43, 44]) можно найти, что показатель Серсика n , определяющий форму профиля поверхностной яркости, для гигантских эллиптических галактик $n \geq 4$, для эллиптических галактик промежуточной светимости $n \approx 2-4$ и для карликовых эллиптических галактик $n \approx 1-2$. Балджи галактик имеют $n \approx 0.5-4$, при этом классическими считаются балджи с $n \approx 2-4$ и псевдобалджами — с $n \approx 0.5-2$ [45–47].

Как отмечалось выше, DECA объединяет в себе множество различных процедур, которые выполняются последовательно, подключая, где требуется, более сложные и объемные программы для выполнения определенных задач. Данная методика широко распространена, и многие программы пишутся таким образом, чтобы оптимизировать уже созданные коды и встроить их в единую систему (например, PyMorph). Фактически это означает, что выполняется целая цепочка процедур, связанных между собой и служащих достижению общей цели программы. В нашем случае производится декомпозиция галактики на несколько компонентов — балдж и диск — с определением параметров этих компонентов. Однако для получения надежных параметров декомпозиции необходимо учитывать следующие факторы.

- Удаление или маскирование объектов, не относящихся к исследуемой галактике (звезды, другие галактики, артефакты и пр.).
- Правильный учет фона неба, недооценка или переоценка которого может сильно сказаться на исковых параметрах, особенно на показателе Серсика n [23].
- Учет влияния атмосферы и оптической системы с помощью PSF (Point Spread Function).
- Аккуратное выделение (вырезание) изображения галактики, которое затем будет анализироваться. В случае, когда рассматривается изображение, меньшее по размерам, чем сама галактика, возникает серьезная опасность получить сильно искаженные параметры модели. Превышение размеров вырезанного изображения над размерами галактики не приведет к серьезным последствиям в том случае, если удалены или исключены из рассмотрения все другие объекты, находящиеся на этом изображении. Однако в этом случае

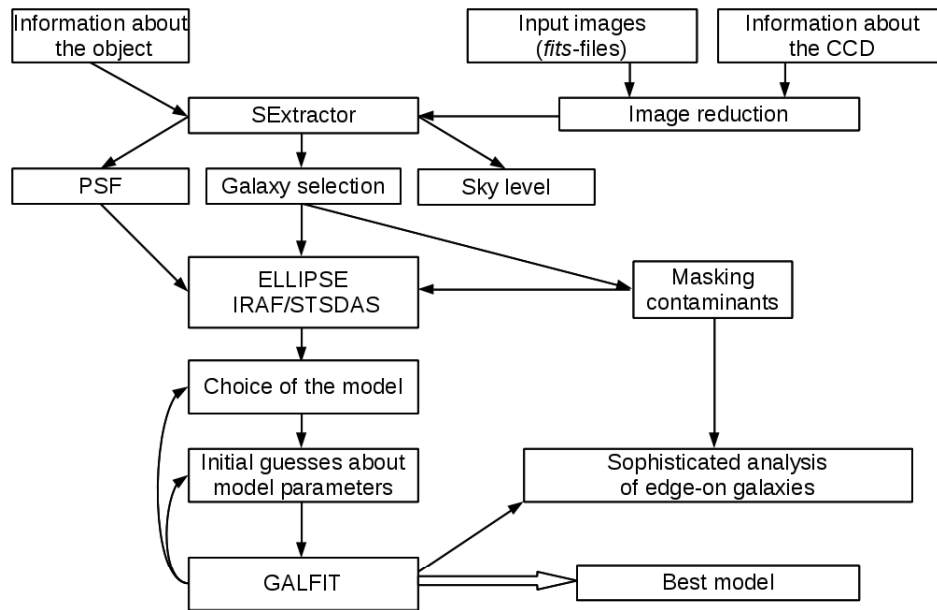


Рис. 1. Алгоритм работы программы DECA.

возрастет время обработки изображения, так как будет анализироваться большее количество данных.

- Подбор наиболее близких к реальным начальных приближений. Для выполнения декомпозиции требуется указать начальные приближения для каждого параметра модели. Из-за опасности попадания решения в локальный, а не глобальный минимум χ^2 при поиске наилучшей модели (известная проблема минимизации), указание наиболее точных начальных приближений должно с большей вероятностью привести к искомому решению задачи.

Алгоритм выполнения программы был разработан с учетом перечисленных выше условий. На Рис. 1 показана краткая схема работы программы. Во входных файлах к программе указываются некоторые параметры изображения и ПЗС-матрицы (отклик, время экспозиции, количество кадров, FWHM PSF), координаты объекта (RA, DEC), цветовая полоса изображения, показатель цвета и красное смещение или расстояние до галактики (если известно). Также задаются изображение объекта и, если заданы, PSF-изображение и карта стандартных отклонений данных изображения для придания относительного веса каждому отдельно взятому пикселу (*weight image*). Более подробная информация содержится в [17], а также в описании к GALFIT¹

¹<http://users.obs.carnegiescience.edu/peng/work/galfit/README.pdf>

Для отождествления галактики, координаты которой указаны во входном файле, производится занесение в каталог всех объектов, присутствующих на изображении. Это осуществляется с помощью программы SExtractor, которая вычисляет некоторые важные фотометрические параметры объектов. Далее с помощью специальных алгоритмов определяется фон неба, а также создается PSF-изображение. Изучаемая галактика выделяется из всего каталога и, если необходимо, изображение с галактикой и маской для других объектов вырезается из исходного так, чтобы галактика располагалась в центре нового изображения и занимала значительную его часть. После этого изображение разворачивается таким образом, чтобы большая ось галактики располагалась горизонтально.

Для получения распределения усредненной интенсивности, позиционного угла и эллиптичности в зависимости от радиуса изофоты применяется процедура ELLIPSE из пакета IRAF/STSDAS. Далее анализируется азимутальный профиль и/или фотометрический разрез галактики, проведенный вдоль большой оси. В случае изучения галактики, видимой с ребра, анализируется помимо прочего и вертикальная структура диска. Используя стандартную технику 1D декомпозиции, мы получаем начальные параметры балджа и диска. Затем создаются входные файлы к GALFIT, и программа находит наилучшую модель галактики, после чего создается ее модельное изображение. Полученные результаты записываются в выходные файлы.

Здесь необходимо отметить следующие особенности DECA.

- Возможность исследования как единичной галактики, так и большой выборки галактик в автоматическом режиме. Требуется лишь ввести основную информацию об объекте и изображении во входной файл и указать FITS-файлы.
- Если входное изображение галактики взято из следующих обзоров: SDSS, UKIDSS, WISE, 2MASS, — то большая часть входных параметров (таких как размер пиксела в секундах дуги, время экспозиции и др.) будет извлечена из заголовков FITS-файлов.
- Возможность гибкой настройки DECA под нужды пользователя. Например, возможно оптимизировать программу для работы с галактиками, видимыми с ребра. Планируется включить в работу программы анализ спиральной структуры, описанный в [48].
- Возможность задания начальных параметров галактики в отдельном входном файле, что может быть удобно при исследовании галактик в нескольких фильмах.
- Удобный вывод результатов работы программы, как в текстовом формате, так и в формате PDF, где собраны параметры вычисленной модели и приведены рисунки галактики, модели и разностного изображения, а также много другой полезной информации.
- Для галактик, видимых с ребра, имеется возможность определить форму балджа, радиус края диска (расстояние, обычно равное $3-4h$, на котором поверхностная яркость сильно падает по сравнению с моделью бесконечно протяженного диска), закон распределения поверхностной яркости в направлении, перпендикулярном плоскости галактики, а также параметры изгибов.
- Возможность задания нескольких режимов работы программы, например, нахождение только фона неба, создание PSF-изображения, поиск начальных параметров с использованием быстрой 1D-аппроксимации.

2.2. Каталог SExtractor

Для отождествления объекта на заданном изображении используется программа SExtractor, которая позволяет по некоторым условиям выделить объекты и определить их фотометрические параметры, такие как эффективный радиус (FLUX_RADIUS), координаты (X_IMAGE, Y_IMAGE), видимую звездную величину (MAG_AUTO), большую и малую полуоси (A_IMAGE, B_IMAGE), позиционный угол (THETA_IMAGE), эллиптичность

(ELLIPTICITY), фон неба (BACKGROUND) и параметр CLASS_STAR, характеризующий объект как звезду (CLASS_STAR = 1) или галактику (CLASS_STAR = 0). Во входном файле к SExtractor приводятся различные параметры, отвечающие за отождествление объектов, поиск основных фотометрических параметров, а также разделение близких объектов. Так как SExtractor работает даже с довольно грубыми значениями входных параметров, результаты проведенного таким образом отождествления могут сильно отличаться от желаемых. Например, для галактик, видимых с ребра, в оптической области спектра в большинстве случаев заметна пылевая полоса. При неправильном задании некоторых параметров программа может разделить галактику на несколько частей, посчитав пылевую полосу промежуточной областью между разными объектами. В DECA задан входной файл к SExtractor, который, основываясь на опыте, мы посчитали наиболее приемлемым для работы с изображениями, взятыми из обзора SDSS. Тем не менее разные астрофизические объекты могут требовать разную “настройку” входных параметров к SExtractor, поэтому мы оставляем пользователю возможность самостоятельного выбора оптимальных параметров в случае необходимости.

2.3. Определение фона неба

В работах Хойслера и др. [23] было показано, что величина фона неба, которая вычисляется в программе SExtractor, может быть завышена или занижена, так как действительная протяженность объектов может существенно отличаться от той, которая определяется программой. Поэтому рекомендуется определять фон неба наиболее точным способом. Будем считать, что на изображении нет существенных градиентов фона, то есть его величина будет постоянна для всего изображения (очевидно, что для изображений большого размера это условие может нарушаться). В противном случае рекомендуется определить фон неба вручную, используя возможности систем IRAF или MIDAS.

Для более точного определения фона неба мы применили алгоритм подобный тому, что описан в работе Наварро и др. [49]. Используя разностное изображение, на котором удалены все объекты, отождествленные ранее, вычисляется средняя величина фона. Это делается следующим образом. В произвольном месте на изображении выделяется квадрат определенного размера (например, 10×10 пикселей). Вычисляется средняя интенсивность и стандартное отклонение для этой области изображения. Выполняется 10 000 подобных испытаний в разных листах изображения. В итоге для всего массива испытаний определяется среднее

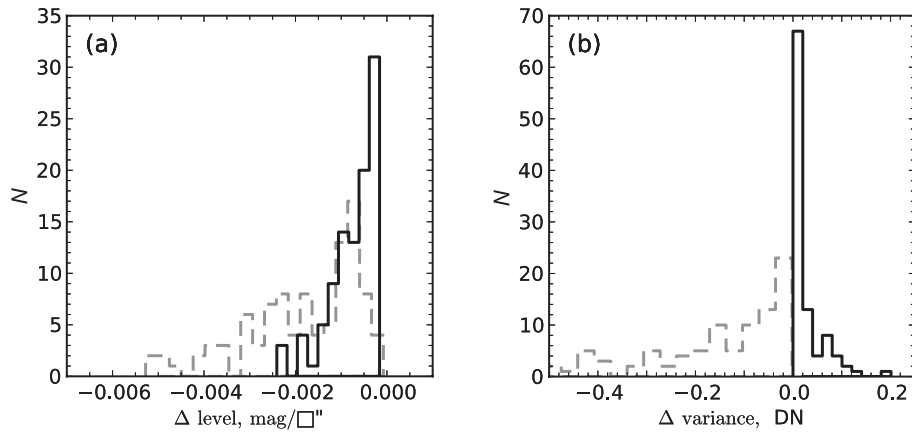


Рис. 2. Результат работы программы DECA по определению уровня фона неба (а), и его стандартного отклонения (б) для модельных изображений. Штриховой линией показаны результаты определения этих значений с использованием программы SExtractor, сплошной линией — с помощью алгоритма, описанного в тексте.

значение интенсивности и стандартного отклонения, которое характеризует шум на изображении. Полученные таким образом параметры фона неба и шумовой компоненты оказались наиболее надежными. Для примера на Рис. 2 показаны результаты определения фона неба для ста модельных изображений, созданных программой SIGAL (см. Раздел 4), размером 2048×1361 пиксел с присутствием небольшого количества звезд и галактик, занимающих сравнительно малую площадь изображения (таким образом мы имитировали SDSS поля). Результаты определения фона неба для описанного алгоритма сравнимы с результатами, полученными с помощью SExtractor. Хорошо видно, что ошибка его определения оказалась приблизительно $0.001 \text{ mag/arcsec}^2$, что более чем достаточно для надежной декомпозиции. Здесь нужно заметить, что фон неба можно достоверно определить для тех изображений, где присутствует значительная площадь неба, свободного от любых объектов. Поэтому для тех изображений, где исследуемая галактика занимает большую площадь, определение фона неба может оказаться существенно менее точным.

2.4. Построение PSF

В том случае, когда PSF-изображение не задано, в программе DECA реализована возможность его автоматического создания. В программе описано несколько путей построения PSF. Если на анализируемом изображении недостаточно звезд с большим отношением сигнал/шум, тогда в качестве аналитической реализации PSF будет использована функция Гаусса или Моффата [50] с заданным FWHM.

Если же на изображении присутствует достаточное количество “хороших” звезд, то есть с наилучшим отношением сигнал/шум (при этом фон неба и другие объекты должны быть удалены), то можно вырезать изображение такой звезды и использовать его в качестве экспериментальной реализации PSF.

Кроме описанных способов построения PSF существует возможность аппроксимировать звезды с большим отношением сигнал/шум, описав распределение поверхностной яркости для них функцией Гаусса или Моффата. Далее, взяв средние значения найденных параметров, можно построить модель PSF. Эти действия выполняются с помощью программы GALFIT.

При работе с SDSS-изображениями возможно загрузить дополнительный файл psField для заданного цветового фильтра и координат, из которого можно извлечь PSF-изображение звезды. Для этого с сервера SDSS должна быть установлена специальная программа readPSF. Как указано в описании к GALFIT, предпочтительнее использовать экспериментальную реализацию PSF.

В ходе тестирования программы на разных изображениях галактик было установлено, что для компактных балджей (если эффективный радиус балджа $r_{e,b}$ едва превышает несколько пикселов) ошибка FWHM в несколько десятых пиксела может существенно исказить искомую модель. В том случае, если значение FWHM известно очень неточно (например, для SDSS среднее значение $\text{FWHM} \approx 1''.4$), то перед поиском модели галактики нужно сначала построить модель PSF, а затем запустить программу для выполнения декомпозиции. На Рис. 3 представлены результаты определения PSF для 100 модельных полей, где

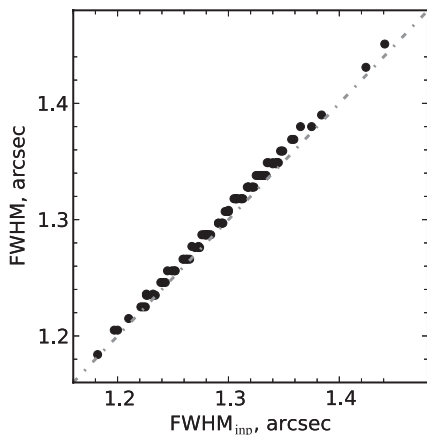


Рис. 3. Сравнение PSF для построенных модельных изображений (абсцисса) и определенных программой (ордината). Профиль звезд аппроксимировался гауссианой.

PSF была найдена с помощью аппроксимации профилей звезд гауссианой.

2.5. Выделение объекта

Для поиска искомого объекта на изображении в программе предложено два варианта, которые пользователь может задать в файле настройки работы программы. В первом варианте из каталога выбирается объект наибольшего углового диаметра, если заведомо известно, что искомым объектом является самый большой на изображении. Во втором случае — по сопоставлению координат галактики с отождествленными объектами из каталога (ищется ближайший объект в окрестностях некоторого радиуса). Обязательным условием отождествления является превышение большей полуоси объекта определенной величины, чтобы в рассмотрение не попали, например, звезды или яркие области звездообразования.

Следует добавить, что объект исследования должен иметь достаточное угловое разрешение. В некоторых работах (см., например, [51, 52]) было установлено, что для получения надежной декомпозиции (особенно параметров балджа), диаметр галактики (например, диаметр d_{25} в базе данных LEDA) должен быть не меньше 30 пикселей, и при этом эффективный радиус балджа $r_{e,b} > \text{FWHM}$. Параметры объектов достаточно низкой поверхностной яркости, с сильным наклоном к лучу зрения i , а также очень малым или очень большим отношением светимостей балджа и диска B/D будут обладать большими ошибками декомпозиции, и, соответственно, статистически могут искажать картины корреляций между структурными параметрами галактик.

2.6. Поиск начальных приближений

Одним из ключевых этапов работы является поиск наиболее близких к действительным начальным приближений. Как было замечено во многих статьях [22, 23], попадание решения в локальный, а не глобальный минимум будет означать, что мы получим модель, отличающуюся от искомой, и это различие может быть достаточно серьезным, иногда полностью меняющим физическую картину. Например, рассмотрение галактики, видимой под углом $i \sim 70^\circ - 80^\circ$, как галактики, видимой с ребра, может дать неправильное представление о вертикальном масштабе z_0 , значительно преувеличив его, и соответственно повлиять на другие параметры декомпозиции.

Для поиска начальных приближений было решено использовать следующие способы (конкретный выбор зависит от типа галактики).

1. Анализ азимутального профиля, который возможно построить по результатам работы процедуры ELLIPSE в пакете IRAF/STSDAS. В данном случае профиль оказывается достаточно сглаженным без резких пиков и падений даже для галактик с яркими неосесимметричными компонентами.
2. Анализ профиля распределения поверхностной яркости, построенного по фотометрическому разрезу вдоль большой оси галактики. Недостатком этого метода является его зависимость от выбора положения разреза. На профиле могут сильно выделяться другие компоненты помимо балджа и диска. Профиль выглядит существенно менее гладким. Для галактик, видимых с ребра, проводятся также разрезы вдоль малой оси галактики, чтобы описать распределение в направлении, перпендикулярном плоскости галактики.
3. Задание начальных приближений основывается на результатах работы программы SExtractor, при этом учитывается эллиптичность (что может говорить об ориентации галактики в пространстве по отношению к наблюдателю — галактика ли это, видимая плашмя, или же, например, с ребра) и индекс концентрации ($CI = R_{50}/R_{90}$, где R_{50} и R_{90} — радиусы изофот, содержащие 50% и 90% светимости галактики соответственно). Зная эти величины в дополнение к FLUX_RADIUS и MAG_AUTO, мы можем очень грубо задать начальные параметры для каждого компонента.

В методах 1 и 2 начальные параметры диска определяются, следуя схеме, примененной в [11]. Отрезок на профиле поверхностной яркости $\mu(r)$, построенный в звездных величинах с кв. секунды дуги в области доминирования диска (от $r = 3/4a$ до $r = a$, где a — радиус внешней

изофоты), аппроксимируется линейной функцией вида $\mu(r) = \mu_{0,d} + 1.0857r/h$. Таким образом, мы получаем начальные параметры диска $\mu_{0,d}$ и h . Затем модель диска вычитается из изображения галактики. Будем считать, что разностное изображение представляет собой балдж с профилем поверхностной яркости $\mu_b(r)$. Исключим из рассмотрения центральные пиксели этого изображения, где градиент интенсивности слишком велик. Определив теперь общую светимость разностного изображения балджа и затем отходя от центра к периферии (считая при этом балдж осесимметричным), найдем точку на профиле $\mu_b(r)$, где светимость $L = L_{\text{tot}}/2$ (L_{tot} — полная светимость балджа). Координаты этой точки будут, в первом приближении, эффективным радиусом балджа $r_{e,b}$ (абсцисса) и эффективной поверхностной яркостью балджа $\mu_{e,b}$ (ордината). Выберем теперь начальное значение показателя Серсика $n = 2.5$. После этого с помощью пакета `Odr.pack` из библиотеки `SciPy` выполняется аппроксимация профиля $\mu_b(r)$ законом Серсика с начальными параметрами, найденными выше, после чего весь профиль галактики $\mu(r)$ аппроксимируется суммой двух функций: (1) (или (2) для диска с ребра) и (4) для описания балджа. Полученные параметры и будут являться результатами 1D декомпозиции, которые можно затем подставить в качестве начальных во входной файл к `GALFIT`.

В методе 3 в самом грубом приближении можно считать, что светимости балджа и диска одинаковы. Тогда для диска будет выполнено: $h \approx a/4$, видимая звездная величина $m_d \approx \text{MAG_AUTO} + 2.5 \log 2$, $\varepsilon_d \approx \text{ELLIPTICITY}$. Для диска, видимого с ребра: $z_0 \approx h/4$. Для балджа: $r_{e,b} \approx h/3.5$ (согласно, например, [53]), видимая звездная величина $m_b \approx \text{MAG_AUTO} + 2.5 \log 2$, $\varepsilon_b \approx 0$, $n \approx 2.0$ (для $\text{CI} < 3.0$) или $n \approx 3.5$ (для $\text{CI} \geq 3.0$). Показатели эллиптичности изофот для галактики, видимой не с ребра: $c_b = 0$, $c_d = 0$ (обычный эллипс). Для диска, видимого с ребра, изофоты будут “дископодобными”: $c_d = -1$. Зная теперь m_d и m_b , можно найти через стандартные формулы поверхностной фотометрии (см., например, [34]) значения центральной поверхностная яркости диска $\mu_{0,d}$ и эффективной поверхностной яркости балджа $\mu_{e,b}$.

Как было неоднократно показано ([18, 51] и ссылки в них), результаты 1D анализа могут сильно зависеть от выбора анализируемого профиля. Нередко случается, что значения параметров балджа и диска, определенные первыми двумя способами, сильно отличаются друг от друга. Это различие может быть тем больше, чем более сложную структуру представляет собой галактика.

Если результаты 1D декомпозиции конкретного профиля (при поиске начальных приближений) оказались неудовлетворительными (например, показатель Серсика $n > 8$ или $h > a$) или же вообще не найдены, тогда начальные параметры определяются другим методом.

Таким образом, в модель входят следующие свободные параметры: для диска — $\mu_{0,d}$, h , e_d , z_0 (если рассматривается галактика с ребра) и PA_d ; для балджа — $\mu_{e,b}$, $r_{e,b}$, n , e_b , c_b , PA_b . Кроме того, координаты центров диска и балджа могут варьироваться в небольших пределах. В ходе декомпозиции на параметры наложены следующие ограничения, которые записаны во входном файле с ограничениями: $n = 0.5-8$, $c_b = 0-2$. Также задается маска с указанием пикселей, которые не должны учитываться при декомпозиции.

2.7. Выбор оптимальной модели

DECA позволяет исследовать разные типы галактик. Если, например, рассматривается выборка галактик различной ориентации в пространстве и различных морфологических типов, то с помощью специального режима поиска оптимальной модели можно определить тип галактики и ее параметры. В данном случае по эллиптичности галактики `ELLIPTICITY`, индексу концентрации `CI` и наличию центральной области на фотометрическом профиле с нелинейной зависимостью поверхностной яркости от радиуса (что говорит о присутствии балджа) можно сделать предположение о типе галактики и ее ориентации.

В Таблице 1 приводится список возможных моделей, которые рассматриваются в DECA. Параметр `bump = 0` характеризует наличие достаточно заметного отклонения от наклонной прямой $\mu_d(r) = \mu_{0,d} + 1.0857r/h$ в центральной области галактики: $|\mu(0) - \mu_{0,d}| > \mu_{\text{noise}}$ (μ_{noise} характеризуется значением отношения $S/N = 3$), что свидетельствует о возможном присутствии балджа. `bump = 1` говорит о том, что балдж, вероятно, не проявляется на профиле. Модель `exp+ser` соответствует модели балдж+диск, `ser` — модели эллиптической галактики, `exp` — модели дисковой галактики без балджа, `edge+ser` — модели дисковой галактики, видимой с ребра, `edge` — модели дисковой галактики, видимой с ребра (с балджем).

На первом шаге проверяется модель, стоящая первой в ряду возможных моделей. Если `GALFIT` не может найти параметры для данной модели (программа “падает”) или результаты декомпозиции оказываются плохими (по критерию $\chi^2 > 2$), то на втором шаге `GALFIT` выполняется для следующей модели и т.д. Если же на каком-то шаге полученная модель галактики удовлетворяет критерию

Таблица 1. Рассматриваемые в программе модели в зависимости от фотометрических параметров

Parameters	Models
$\text{ELLIPTICITY} \leq 0.6, \text{bump} = 0$	exp+ser, ser, exp
$\text{ELLIPTICITY} \leq 0.6, \text{bump} = 1$	ser, exp+ser, exp
$\text{ELLIPTICITY} > 0.6, \text{ELLIPTICITY} < 0.7, \text{bump} = 0$	exp+ser, exp, ser, edge+ser
$\text{ELLIPTICITY} \geq 0.7, \text{bump} = 0$	edge+ser, edge, exp+ser, exp
$\text{ELLIPTICITY} \geq 0.7, \text{bump} = 1$	edge, edge+ser, exp+ser, exp

$\chi^2 < 2$, то решение задачи найдено и вычисленные параметры модели будут конечными. Описанный здесь алгоритм не единственный, который встроено в DECA. При необходимости возможно вычисление с проверкой всех возможных моделей из списка. Наилучшей моделью будет являться модель с минимальным значением χ^2 .

Также существует возможность задания режима, при котором для галактики выполняется несколько итераций с начальными условиями, найденными несколькими методами. Если программа “падает” с начальными условиями, полученными одним способом, она запускается повторно, но с начальными параметрами, вычисленными другим способом. Если модель галактики при всех начальных условиях не находится (или оказывается плохой), то берется следующая модель из списка моделей и снова выполняется такой же алгоритм поиска модели.

Для быстрого вычисления модели, когда тип галактики известен (например, достоверно известно, что у данной галактики наблюдаются диск и балдж), DECA может выполняться в режиме однократного вычисления модели. В этом случае, если результаты одного запуска GALFIT оказываются неудовлетворительными (например, $\chi^2 > 2$), выполнение программы для данной галактики завершается со статусом “модель не найдена.”

3. ТЕСТИРОВАНИЕ ПРОГРАММЫ

3.1. Модельная выборка

Для того, чтобы показать качество работы программы DECA, мы создали выборку модельных галактик. Целью моделирования являлась прежде всего проверка работы кода на большом материале с разным отношением сигнал/шум в больших интервалах структурных параметров балджа и диска. Во время тестирования проводилась “тонкая настройка” программы, чтобы получать наиболее надежные результаты декомпозиции. Особенно важным фактором, влияющим на получаемые результаты, как и ожидалось, оказалось задание

начальных приближений. Кроме того, моделирование крайне важно для получения представления об ошибках декомпозиции. Вычисляемые в GALFIT ошибки оказываются существенно заниженными, о чем упоминается в нескольких работах [22, 23], поэтому, чтобы судить о реальных границах ошибок, необходимо исследовать достаточно большую выборку объектов. Здесь нужно заметить, что для реальных галактик ошибки декомпозиции будут больше, так как модели галактик являются идеализированными объектами (балдж, описывающийся точно законом Серсика, и экспоненциальный диск). Наблюдаемые галактики, как правило, являются довольно сложными структурами, поэтому ошибки декомпозиции для них будут выше. Тем не менее проведенное моделирование поможет, по крайней мере, указать нижние пределы ошибок параметров, получаемых при декомпозиции.

Для того, чтобы построить модели галактик, мы создали выборку со следующими характеристиками. В нее вошли эллиптические галактики (модель Серсика), дисковые галактики (экспоненциальный профиль + модель Серсика), ориентированные под произвольными углами к лучу зрения, и галактики, видимые с ребра (диск с ребра + модель Серсика). За основу были взяты работа Гадотти [47], в которой произведена декомпозиция почти 1000 галактик разной морфологии (в основном галактики, видимые почти плашмя с баром и без него, а также эллиптические галактики), и работа Мосенкова и др. [54] по исследованию структурных параметров галактик, видимых с ребра. Для построения выборки были использованы распределения параметров, приведенные в обеих работах (см. Таблицу 2). Почти для всех параметров брались нормальные распределения с некоторым средним значением и дисперсией. Кроме того, на основе разделения галактик, полученного Гадотти, были воспроизведены две подсистемы балджей — классические балджи и псевдобалджи. Таким образом, была создана выборка, наиболее точно воспроизводящая структурные свойства наблюдаемых галактик. Нами не учитывались некоторые наблюдаемые типы галактик, например, галактики низкой поверхностной

Таблица 2. Распределение параметров для моделей галактики, построенных с помощью программы SIGAL

Объект	Среднее значение/интервал	Дисперсия
Эллиптические галактики	$\mu_{e,b} = 20.8 \text{ mag}/\square''$	$\sigma = 0.4 \text{ mag}/\square''$
	$r_{e,b} = 3 \text{ kpc}$	$\sigma = 1 \text{ kpc}$
	$n = 3.8$	$\sigma = 0.9$
Диски	$\mu_{0,d} = 20.0 \text{ mag}/\square''$	$\sigma = 0.6 \text{ mag}/\square''$
	$h = 2.8 \text{ kpc}$	$\sigma = 1.2 \text{ kpc}$
	$z_0 = 0.8 \text{ kpc}$	$\sigma = 0.3 \text{ kpc}$
Классические балджи	$\mu_{e,b} = 19.6 \text{ mag}/\square''$	$\sigma = 0.4 \text{ mag}/\square''$
	$r_{e,b} = 1 \text{ kpc}$	$\sigma = 0.4 \text{ kpc}$
	$n = 3.4$	$\sigma = 1.3$
Псевдобалджи	$\mu_{e,b} = 20.5 \text{ mag}/\square''$	$\sigma = 0.5 \text{ mag}/\square''$
	$r_{e,b} = 0.7 \text{ kpc}$	$\sigma = 0.3 \text{ kpc}$
	$n = 1.5$	$\sigma = 0.9$
Эллиптичность балджа или эллиптичность галактики	$\varepsilon_b = 0-0.55$	—
Угол наклона галактики	$i = 0^\circ-60^\circ, i = 90^\circ$	—
Масштаб изображения	$0.1-0.3 \text{ kpc}/''$	—

яркости и карликовые эллиптические (вероятно, изучение таких галактик требует более рафинированного подхода).

Модельные изображения были созданы с помощью написанной нами программы SIGAL (Simulations of GALaxies). Во входном файле для этой программы указываются различные параметры компонентов. Также возможно задать некоторые особенности модели (например, добавить гауссов и пуассонов шум, спиральный узор, пылевую полосу, изгибы диска для галактик, видимых с ребра). Диапазон изменения параметров балджа и диска задается пользователем.

Программа SIGAL написана на языке Python и использует GALFIT для построения фотометрических моделей галактик (то есть создает их изображения по входным параметрам модели).

Созданные с помощью этой программы изображения содержали одну исследуемую галактику и фон неба. Экспозиция, отклик ПЗС-матрицы, размер пиксела (один пиксел равен $0''.396$), пуассонов и гауссов шум считывания, примененный к каждому пикселу изображения, а также “размытие” PSF (в реализации гауссианы) соответствуют характерным для SDSS в полосе i значениям.

Для декомпозиции построенной выборки мы применили программу DECA в режиме поиска

оптимальной модели. В этом случае конкретная модель галактики не задана (заранее неизвестно, что за галактика: эллиптическая или видимая с ребра). Программа должна найти наилучшую модель, согласно заложенному в нее алгоритму. Результаты декомпозиции представлены на Рис. 4. Ниже приводятся средние значения и стандартные отклонения разности параметров модели и изображения:

$$\begin{aligned}
 \Delta\mu_{0,d} &= -0.003 \pm 0.408 \text{ mag}/\square'', \\
 \Delta h &= -0''.036 \pm 3''.894, \\
 \Delta\mu_{e,b} &= -0.012 \pm 0.552 \text{ mag}/\square'', \\
 \Delta r_{e,b} &= -0''.030 \pm 5''.643, \\
 \Delta n &= -0.01 \pm 0.562, \\
 \Delta\varepsilon &= 0.0 \pm 0.018, \\
 \Delta z_0 &= 0''.0 \pm 0''.015.
 \end{aligned}
 \tag{5}$$

Приведенные результаты свидетельствуют о том, что модели, найденные программой, очень хорошо соответствуют входным изображениям, что говорит о надежности выдаваемых программой результатов.

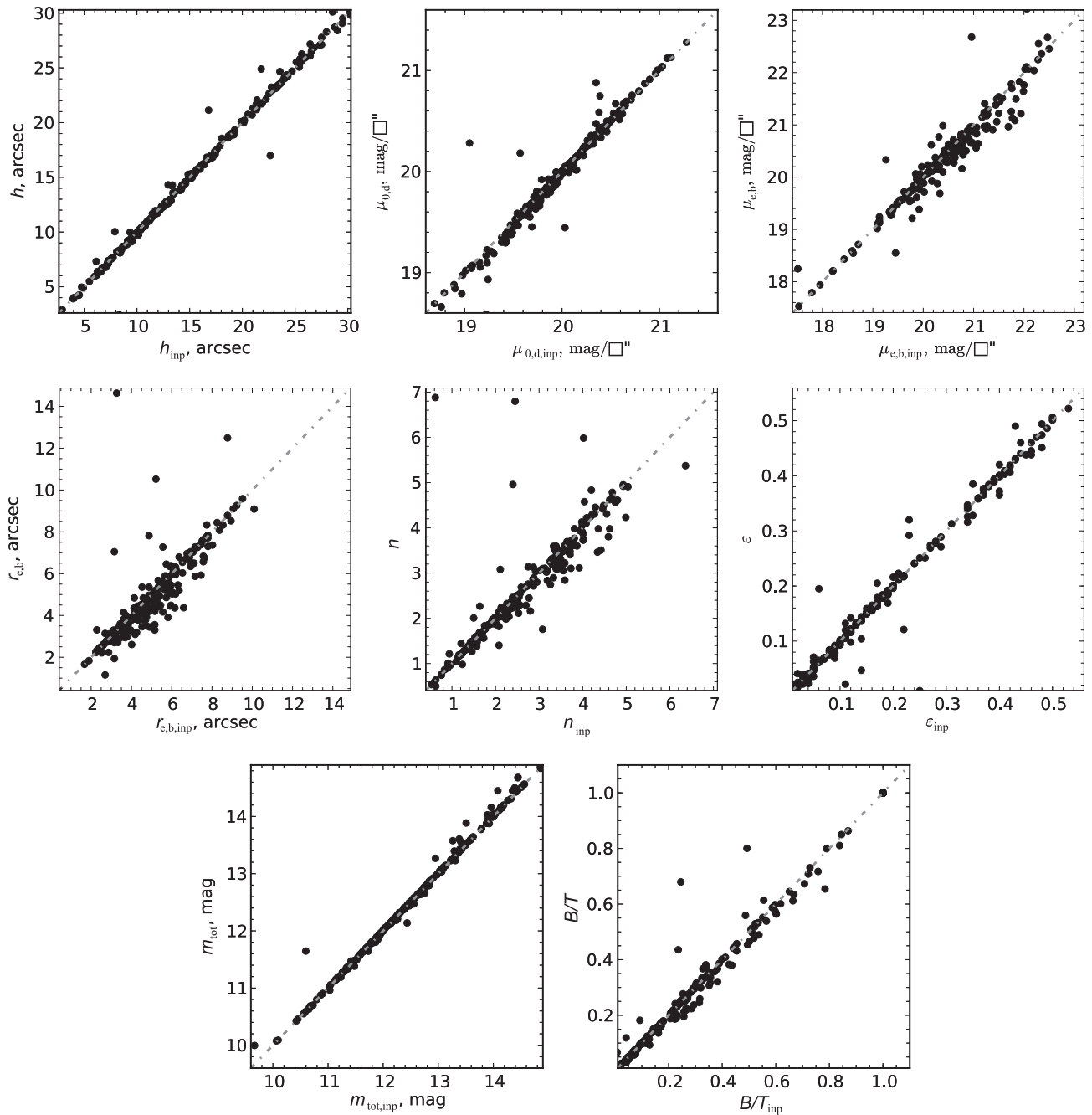


Рис. 4. Сравнение результатов декомпозиции выборки модельных галактик. По оси ординат отложены выдаваемые программой значения, по оси абсцисс — известные параметры модельных изображений (с обозначением *inp*). Модельные галактики нанесены без разделения по типам (эллиптические, видимые с ребра и пр.), так как они следуют одним и тем же трендам.

По итогам анализа этой выборки для 93% всех галактик был правильно определен их морфологический тип. Оставшиеся 7% галактик оказались галактиками с очень компактными балджами, параметры которых трудно определились программой (часто галактики с едва заметным балджем программа аппроксимировала одним диском). Малую долю неправильно классифицированных галактик

составили эллиптические галактики с показателем Серсика, близким к единице. Такие галактики программа определила как чисто дисковые.

3.2. Выборка галактик из обзора 2MASS

Программа DECA была также применена к вычислению моделей реальных галактик. Были проанализированы галактики из выборки [53]. Эта

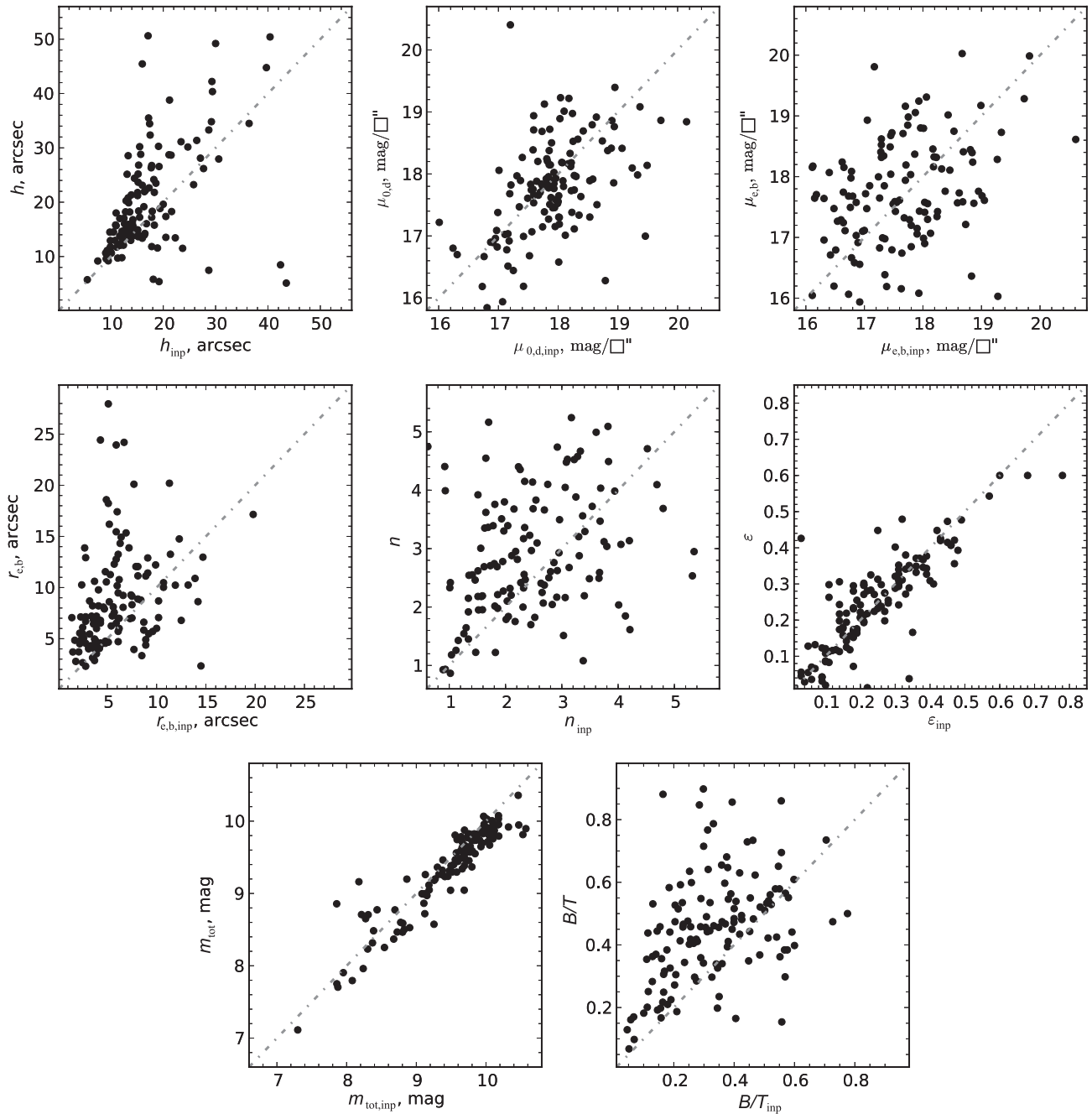


Рис. 5. Сравнение результатов декомпозиции, полученных программой DECA, выборки галактик, описываемой в Разделе 3.2 (отложены по оси ординат), с результатами декомпозиции, приведенными в [53] (отложены по оси абсцисс с обозначением inp).

выборка содержит 148 ярких галактик разной морфологической структуры, включая галактики с активными ядрами, пекулярные и взаимодействующие галактики, — с большим диапазоном угла наклона к лучу зрения i (от галактик, видимых почти плашмя, до галактик, видимых под углом $i \approx 70^\circ - 75^\circ$). Изображения галактик были получены из базы данных 2MASS. На Рис. 5 сопоставлены результаты декомпозиции, выполненной

с помощью программы DECA, и GASP2D, использованной в [53]. Сравнение результатов декомпозиции говорит о статистической сопоставимости результатов обеих работ, однако наблюдается сильный разброс значений параметров балджа. Представленные в выборке галактики являются преимущественно галактиками раннего типа (большинство галактик имеют $0.2 < B/T < 0.6$) и, следовательно, обладают ярким массивным бал-

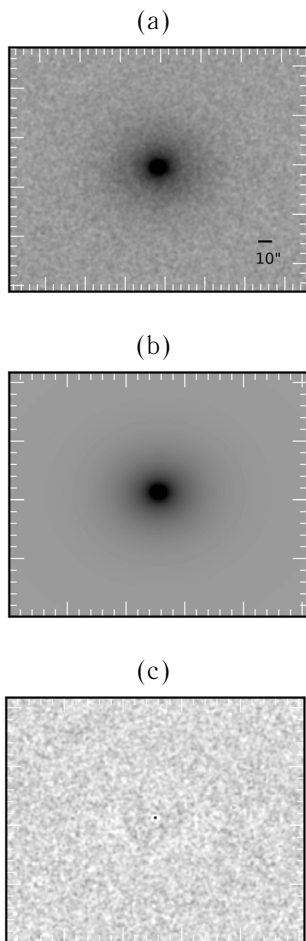


Рис. 6. Пример декомпозиции галактики NGC 5273. Представлены изображения галактики (a), модели (b) и разностное изображение (c).

джем (или гало). Часто диск полностью погружен в такой балдж, и параметры обоих компонентов модели находятся не однозначно (что неоднократно отмечалось во многих работах, например, в [51]). Кроме того, большие ошибки декомпозиции в данном случае могут свидетельствовать о неправильном автоматическом выборе начальных параметров для галактик с большим отношением B/T (как для программы DECA, так и для программы GASP2D). Это следует учитывать при массовой декомпозиции галактик типа ранних спиралей. Тем не менее, в статистическом плане результаты декомпозиции оказываются сравнительно верными, как следует из наблюдаемых на Рис. 5 трендов. На Рис. 6 и 7 приводится пример декомпозиции галактики NGC 5273 из выборки.

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе описана новая программа DECA для выполнения массовой декомпозиции галактик на

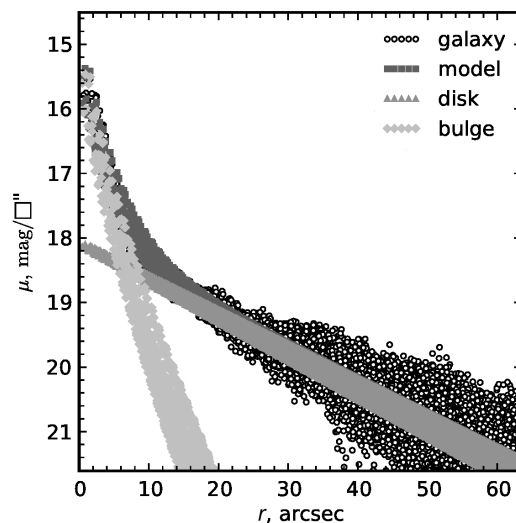


Рис. 7. Пример декомпозиции галактики NGC 5273. Показаны профили поверхностной яркости галактики и моделей, как указано в обозначениях. Каждая точка соответствует одному пикселу. Результаты декомпозиции: параметры диска $\mu_{0,d} = 18.19 \text{ mag}/\square''$, $h = 21''.8$; параметры балджа $\mu_{e,b} = 18.0 \text{ mag}/\square''$, $r_{e,b} = 5''.45$, $n = 3.23$.

балдж и диск с предварительной подготовкой входного изображения. Преимуществом программы является, по мнению автора, ее гибкость в использовании и возможность выполнять исследования галактик разного морфологического типа, видимых под различными углами к лучу зрения.

Алгоритм реализован в виде набора программ на языке программирования Python, которые могут быть применены для массового определения параметров компонентов галактик.

Тестирование программы на модельной выборке галактик, а также на выборке реальных галактик доказывает пригодность DECA для выполнения массовой декомпозиции галактик. Особенно важно отметить, что программа адаптирована к работе с известными обзорами неба. В дальнейшем планируется увеличить список поддерживаемых обзоров.

В последующих работах при проведении массовой декомпозиции предполагается учитывать спиральную структуру галактик, используя программу для определения параметров спирального узора [48]. Кроме того, особый интерес представляет изучение большой полной выборки галактик, видимых с ребра [55]. Возможности программы DECA позволят всесторонне исследовать фотометрические и структурные свойства таких галактик, что, как можно надеяться, увеличит наши знания о структуре и свойствах галактик.

Программа, описание и тестовые примеры с результатами работы доступны по адресу: <http://lacerta.astro.spbu.ru/?q=node/96>.

БЛАГОДАРНОСТИ

Автор выражает благодарность В. П. Решетникову за полезные замечания и рекомендации, способствовавшие улучшению статьи, а также Ч. Пенгу, одному из авторов программы GALFIT, давшему ценные указания по работе с программой. В работе использовалась база данных VizieR (<http://vizier.u-strasbg.fr/viz-bin/VizieR>).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. A. P. Christopher, A. Rachael, A. C. Prieto, et al., *Astrophys. J. Suppl.* **203**, 13 (2012).
2. R. S. de Jong, *Astronom. and Astrophys. Suppl.* **118**, 557 (1996).
3. R. S. de Jong, *Astronom. and Astrophys.* **313**, 45 (1996).
4. C. Lintott, K. Schawinski, S. Bamford, et al., *Monthly Notices Royal Astronom. Soc.* **410**, 166 (2011).
5. E. A. Valentijn, *Nature* **346**, 153 (1990).
6. M. F. Skrutskie, R. M. Cutri, R. Stiening, et al., *Astronom. J.* **131**, 1163 (2006).
7. A. Lawrence, S. J. Warren, O. Almaini, et al., *Monthly Notices Royal Astronom. Soc.* **379**, 1599 (2007).
8. E. L. Wright, P. R. M. Eisenhardt, A. K. Mainzer, et al., *Astronom. J.* **140**, 1868 (2010).
9. M. W. Werner, T. L. Roellig, F. J. Low, et al., *Astrophys. J. Suppl.* **154**, 1 (2004).
10. K. Sheth, M. Regan, J. L. Hinz, et al., *Publ. Astronom. Soc. Pacific* **122**, 1397 (2010).
11. J. Kormendy, *Astrophys. J.* **217**, 406 (1977).
12. D. Burstein, *Astrophys. J.* **234**, 435 (1979).
13. T. Boroson, *Astrophys. J. Suppl.* **46**, 177 (1981).
14. L. Simard, *ASP Conf. Ser.* **145**, 108 (1998).
15. L. Simard, C. N. A. Willmer, N. P. Vogt, et al., *Astrophys. J. Suppl.* **142**, 1 (2002).
16. I. Trujillo, J. A. L. Aguerri, C. M. Gittirrez, and J. Cepa, *Astronom. J.* **122**, 38 (2001).
17. C. Y. Peng, L. C. Ho, C. D. Impey, and R. Hans-Walter, *Astronom. J.* **124**, 266 (2002).
18. C. Y. Peng, L. C. Ho, C. D. Impey, and R. Hans-Walter, *Astronom. J.* **139**, 2097 (2010).
19. R. E. de Souza, D. A. Gadotti, and S. dos Anjos, *Astrophys. J. Suppl.* **153**, 2004 (2004).
20. J. M. Lotz, J. Primack, and P. Madau, *Astronom. J.* **128**, 163 (2004).
21. E. Pignatelli, G. Fasano, and P. Cassata, *Astronom. and Astrophys.* **446**, 373 (2006).
22. C. Hoyos, M. den Brok, G. K. Verdoes, et al., *Monthly Notices Royal Astronom. Soc.* **411**, 2439 (2011).
23. B. Häussler, D. H. McIntosh, and M. Barden, *Astrophys. J. Suppl.* **172**, 615 (2007).
24. E. A. Valentijn, J. P. McFarland, J. Snigula, et al., *ASP Conf. Ser.* **376**, 491 (2007).
25. J. P. McFarland, G. Verdoes-Kleijn, G. Sikkema, et al., *Experimental Astronomy* **35**, 45 (2013).
26. M. Barden, B. Häussler, C. Y. Peng, et al., *Monthly Notices Royal Astronom. Soc.* **422**, 449 (2012).
27. L. S. Kelvin, S. P. Driver, A. S. G. Robotham, et al., *Monthly Notices Royal Astronom. Soc.* **421**, 1007 (2012).
28. V. Vikram, Y. Wadadekar, A. K. Kembhavi, et al., *Monthly Notices Royal Astronom. Soc.* **409**, 1379 (2010).
29. E. Bertin and S. Arnouts, *Astronom. and Astrophys. Suppl.* **117**, 393 (1996).
30. I. Marinova and S. Jogee, *Astrophys. J.* **659**, 1176 (2007).
31. K. Menéndez-Delmestre, K. Sheth, E. Schinnerer, et al., *Astrophys. J.* **657**, 790 (2007).
32. J. A. L. Aguerri, J. Mendez-Abreu, and E. M. Corsini, *Astronom. and Astrophys.* **495**, 491 (2009).
33. D. A. Gadotti, *Monthly Notices Royal Astronom. Soc.* **384**, 420 (2008).
34. V. P. Reshetnikov, *Surface Photometry of Galaxies* (St. Petersburg State Univ., St. Petersburg, 2003) [in Russian].
35. F. S. Patterson, *Harvard College Observatory Bulletin* **914**, 9 (1940).
36. G. de Vaucouleurs, *Astronom. J.* **62**, 69 (1957).
37. K. C. Freeman, *Astrophys. J.* **160**, 811 (1970).
38. P. C. van der Kruit and L. Searle, *Astronom. and Astrophys.* **95**, 105 (1981).
39. L. Spitzer, *Astrophys. J.* **95**, 329 (1942).
40. *Atlas de Galaxias Australes*, Ed. by J. L. Sèrsic (Observatorio Astronomico, Cordoba, 1968).
41. J. L. Sèrsic, *Bolet'in de la Asociacion Argentina de Astronomia* **6**, 41 (1963).
42. M. Capaccioli, in *The World of Galaxies*, Ed. by H. G. Corwin and L. Bottinelli (Springer, Berlin, 1989), p. 208.
43. N. Caon, M. Capaccioli, and M. D'Onofrio, *Monthly Notices Royal Astronom. Soc.* **265**, 1013, (1993).
44. A. W. Graham and R. Guzman, *Astronom. J.* **125**, 2936 (2003).
45. D. B. Fisher and N. Drory, *Astronom. J.* **136**, 773 (2008).
46. D. B. Fisher and N. Drory, *Astronom. J.* **716**, 942 (2010).
47. D. A. Gadotti, *Monthly Notices Royal Astronom. Soc.* **393**, 1531 (2009).
48. S. S. Savchenko, *Astrophysical Bulletin* **67**, 310 (2012).
49. I. Martin-Navarro, J. Bakos, I. Trujillo, et al., *Monthly Notices Royal Astronom. Soc.* **427**, 1102 (2012).
50. A. W. J. Moffat, *Astronom. and Astrophys.* **3**, 445 (1969).
51. Y. I. Byun, K. C. Freeman, *Astrophys. J.* **448**, 563 (1995).
52. E. Tempel, A. Tamm, R. Kipper, and P. Tenjes, [arXiv:1205.6319](https://arxiv.org/abs/1205.6319).
53. J. Mendez-Abreu, J. A. L. Aguerri, E. M. Corsini, and E. Simmoneau, *Astronom. and Astrophys.* **478**, 353 (2008).
54. A. V. Mosenkov, N. Ya. Sotnikova, and V. P. Reshetnikov, *Monthly Notices Royal Astronom. Soc.* **401**, 559 (2010).
55. D. V. Bizyaev, S. J. Kautsch, A. V. Mosenkov, et al. (in press).

Mass Decomposition of Galaxies Using DECA Software Package

A. V. Mosenkov

The new DECA software package, which is designed to perform photometric analysis of the images of disk and elliptical galaxies having a regular structure, is presented. DECA is written in Python interpreted language and combines the capabilities of several widely used packages for astronomical data processing such as IRAF, SExtractor, and the GALFIT code used to perform two-dimensional decomposition of galaxy images into several photometric components (bulge+disk). DECA has the advantage that it can be applied to large samples of galaxies with different orientations with respect to the line of sight (including edge-on galaxies) and requires minimum human intervention. Examples of using the package to study a sample of simulated galaxy images and a sample of real objects are shown to demonstrate that DECA can be a reliable tool for the study of the structure of galaxies.

Keywords: galaxies: photometry—techniques: image processing—techniques: photometric