

МАССОВАЯ ДЕКОМПОЗИЦИЯ ГАЛАКТИК С ПОМОЩЬЮ ПАКЕТА ПРОГРАММ DECA

А. В. Мосенков^{1, 2, *}

¹*Санкт-Петербургский государственный университет, Россия*

²*Главная (Пулковская) Астрономическая Обсерватория РАН, Россия*

Представлен новый программный пакет DECA, предназначенный для фотометрического исследования изображений дисковых и эллиптических галактик правильной, регулярной структуры. Пакет DECA написан на интерпретируемом языке программирования Python и объединяет возможности нескольких распространенных 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 при исследовании 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, морфология

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, привлечение активной и адаптивной оптики, а также использование космических телескопов, работающих в разных диапазонах длин волн, - всё это с необходимостью сказалось на успехах

* Electronic address: mosenkovAV@gmail.com

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 роста наблюдательных данных 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 са-

мом 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 отсутствуют регулярные 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. Пользователь программы должен быть максимально освобожден от управления работой программы, при этом качество проводимой декомпозиции должно оставаться достаточно высоким. В программе должна быть реализована возможность проводить автоматический морфологический анализ, то есть на основании результатов декомпозиции судить о морфологическом типе галактики. В этой статье описывается алгоритм работы программы, обсуждаются результаты ее применения к выборке модельных галактик, а также к выборке реальных галактик. В Заключение сделаны краткие выводы о ее возможных астрофизических приложениях.

2. ПАКЕТ DECA

2.1. Описание алгоритма

DECA (DEComposition Analysis) представляет собой программный модуль (по-английски, *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 научных 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 половина близких галактик проявляет наличие бара. Гадотти [33] показывает, что невключение бара в модель галактики с баром может серьезно сказаться на извлекаемых параметрах балджа, и 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]). 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 . 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 I_e — эффективная поверхностная яркость, n — положительное действительное число, называемое индексом, или показателем Серсика, ν_n выбирается так, чтобы в пределах эффективного радиуса r_e излучалась половина полной светимости. В работе [42] найдена следующая аппроксимация: $\nu_n \simeq 1.9992n - 0.3271$. 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 балджами считают $n \approx 2 - 4$ и псевдобалджами — $n \approx 0.5 - 2$ [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, недоучет или переучет которого может сильно сказаться на искомым параметрах, особенно на показателе Серсика n ([23]).
- Учет влияния атмосферы и оптической системы через функцию рассеяния точки PSF.
- 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. С другой стороны, 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 возрастет время обработки изображения, так как будет анализироваться большее количество данных.
- Подбор наиболее близких к реальным начальным приближений. Для выполнения декомпозиции требуется указать начальные приближения к каждому параметру модели. Из-за опасности попадания решения в локальный, а не глобальный минимум χ^2 при поиске наилучшей модели (известная проблема минимизации), ука-

знание 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 структура 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 пикселю (*weight image*). Более подробная информация содержится в [17], а также в описании к GALFIT¹.

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 часть всего изображения. 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.

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

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 пикселя в сек. дуги, время экспозиции и др.) будет извлечена из заголовков *fits*-файлов.
- Возможность гибкой настройки DECA под нужды пользователя. Так, например, возможно оптимизировать программу для работы с галактиками, видимыми с ребра. Планируется включить в работу программы анализ спиральной структуры, описанный в [54].
- Возможность задания начальных параметров галактики в отдельном входном файле, что может быть удобно при исследовании галактик в нескольких фильтрах.
- Удобный вывод результатов работы программы, как к текстовому формату, 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 обрыва диска, закон распределения поверхностной яркости в направлении, перпендикулярном плоскости галактик, а также параметры изгибов.
- Возможность задания нескольких режимов работы программы, например, нахождение единственного 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 координаты (X_IMAGE, Y_IMAGE), эффективный радиус (FLUX_RADIUS), 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 различение близких объектов. Несмотря на то, что 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 присутствует заметная 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 значение фона неба, которое вычисляется в программе SExtractor, может быть завышенным или заниженным, так как действительная протяженность объектов может существенно отличаться от той, которая определяется в программе. Поэтому рекомендуется определять фон неба наиболее точным способом. Будем считать, что на изображении нет существенных градиентов фона, то есть его значение будет постоянным 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. [48]. 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 тыс. подобных испытаний. В итоге для всего массива испытаний определяется среднее значение интенсивности и стандартного отклонения, которое характеризует шум на изображении. Полученные таким образом параметры фона неба и шумовой компоненты оказались наиболее надежными. Для сравнения на Рис. 2 показаны результаты определения фона неба для 100 модельных изображений, созданных программой SIGAL (см. раздел 4), размером 2048×1361 пикселей с присутствием небольшого количества звезд и галактик, занимающих сравнительно малую площадь изображения (таким образом мы симитировали SDSS поля). Результаты определения фона неба для описанного алгоритма сравнимы с результатами, полученными с помощью SExtractor. Хорошо видно, что ошибка его определения оказалась $\approx 0.001 \text{ mag}/\square''$, 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 соотношением сигнал/шум, тогда в качестве аналитической реализации PSF будет использована функция Гаусса или Моффата [49] с заданным $FWHM$. Если же на изображении присутствует достаточное количество “хороших” звезд, то есть с наилучшим соотношением 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 соотношением 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, по возможности предпочтительнее использовать экспериментальную реализацию PSF.

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

2.5. Выделение объекта

Для поиска искомого объекта на изображении в программе предложено два варианта. В первом случае из каталога выбирается объект наибольшего углового диаметра. 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. В некоторых работах (см., например, [50, 51]) 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 $r_{e,b} > FWHM$. Пара-

метры 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 начальных 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. Так, например, рассмотрение галактики, видимой под углом $i \sim 70^\circ - 80^\circ$, как галактики 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 (выбор конкретного зависит от модели галактики):

- 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.
- 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 перпендикулярно плоскости галактики.
- 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 ($CI = R50/R90$, где $R50$ и $R90$ - радиусы изофот, содержащие 50% и 90% светимости галактики соответственно). Зная эти величины в дополнении к `FLUX_RADIUS`, `MAG_AUTO`, мы можем очень грубо задать начальные параметры для каждого компонента.

В методах 1 и 2 начальные параметры диска определяются следующим образом, следуя схеме, примененной в [11]. Отрезок на профиле, построенный в зв. величинах с кв. секунды дуги в области доминирования диска (от $r = 3/4 a$ до $r = a$, где a - радиус внешней изофоты) аппроксимируется линейной функцией вида $\mu(r) = \mu_{0,d} + 1.0857 r/h$. 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. 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 точки на профиле, где светимость $L = L_{\text{tot}}/2$ (L_{tot} - полная светимость балджа). Полученные точки будем считать эффективной поверхностной яркостью балджа $\mu_{e,b}$ и эффективным радиусом балджа $r_{e,b}$. Выберем теперь начальное значение показателя Серсика $n = 2.5$. После этого с помощью пакета `0dr.pack` из библиотеки `SciPy` выполняется аппроксимация профиля законом Серсика с начальными параметрами, найденными выше, после чего весь профиль галактики 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 зв. величина $m_d \approx \text{MAG_AUTO} + 2.5 \lg(2)$, $\varepsilon_d \approx \text{ELLIPTICITY}$. Для диска, видимого с ребра: $z_0 \approx h/4$. Для балджа: $r_{e,b} \approx h/3.5$ (согласно, например, [52]), видимая зв. величина $m_b \approx \text{MAG_AUTO} + 2.5 \lg(2)$, $\varepsilon_b \approx 0$, $n \approx 2.0$ (для $CI < 3.0$) или $n \approx 3.5$ (для $CI \geq 3.0$). 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 , значения центральной поверхностной яркости диска $\mu_{0,d}$ и эффективной поверхностной яркости балджа $\mu_{e,b}$ можно найти через стандартные формулы поверхностной фотометрии (см., например, [34]).

Как было неоднократно показано ([18, 50] и ссылки внутри), 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 найденными, 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: $n = 0.5 \div 8$, $c_b = 0 \div 2$. 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 морфологических типов, то с помощью специального режима поиска оптимальной модели можно определить тип галактики и ее параметры. В данном случае на основе эллиптичности галактики ELLIPTICITY, индекса концентрации CI и наличия центральной области на фотометрическом профиле с нелинейной зависимостью поверхностной яркости от радиуса (что говорит о присутствии балджа) можно сделать предположительный вывод о типе галактики и ее ориентации. В Таблице 1 приводится список возможных моделей, которые рассматриваются в DECA. 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 (согласно 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 $\chi^2 < 2$, то решение задачи найдено, и вычисленные параметры модели будут конечными. Описанный здесь алгоритм - не единственный, который встроен 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 являлось прежде всего проверка работы кода на большом материале с разным соотношением сигнал/шум в достаточно 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 в своем большинстве являются довольно сложными структурами, поэтому ошибки декомпозиции для них будут выше. Тем не менее проведенное моделирование поможет, по крайней мере, указать нижние пределы ошибок получаемых при декомпозиции параметров.

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. [53] 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, полученному у 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 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 значений 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 пикселя равный $0.''396/\text{пиксель}$, пуассонов и гауссов шум считывания, примененный к каждому пикселю 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 (заведомо неизвестно, эллиптическая ли это, например, галактика, или видимая с ребра). Программа должна определить 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:

$$\Delta\mu_{0,d} = -0.003 \pm 0.408 \text{ mag}/\square'',$$

$$\Delta h = -0.''036 \pm 3.''894,$$

$$\Delta\mu_{e,b} = -0.012 \pm 0.552 \text{ mag}/\square'',$$

$$\Delta r_{e,b} = -0.''030 \pm 5.''643,$$

$$\Delta n = -0.01 \pm 0.562,$$

$$\Delta\varepsilon = 0.0 \pm 0.018,$$

$$\Delta z_0 = 0.''0 \pm 0.''015.$$

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

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, близком к 1. 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 [52]. Эта 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 представлены результаты декомпозиции, выполненной с помощью программ DECA и GASP2D, использованной в упомянутой работе. Сравнение результатов декомпозиции говорит о статистической сопоставимости результатов обеих работ, однако наблюдается сильно выраженный разброс значений параметров балджа. Представленные в выборке галактики являются преимущественно галактиками раннего типа, и, следовательно, обладают ярким массивным балджем (или гало). Часто диск полностью погружен в такой балдж, и параметры обоих компонентов модели находятся менее однозначно. Возможно, наблюдаемый разброс значений параметров декомпозиции вызван именно этой причиной. И все же в статистическом плане результаты декомпозиции оказываются сравнительно верными. На Рис. 6 и 7 приводится пример декомпозиции галактики из выборки.

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе описана новая программа DECA для выполнения массовой декомпозиции галактик на 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 (вместе со сравнением результатов с выборкой из [52]) 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 ([54]). Кроме того, особый интерес представляет собой 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>).

-
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 Roy. 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 Roy. 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 et al., *Astrophys. J. Suppl.* **154**, 1 (2004).
10. K. Sheth, M. Regan, J.L. Hinz, et al., *Publ. Astron. Soc. Pac.*, **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, in *Proceedings of the conference on Astronomical Data Analysis Software and Systems, San Francisco, 1998*, Ed. by R. Albrecht, R.N. Hook, & G.A. Bushouse (VII ASP Conference Series, 1998), p. 108.
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. *AJ.* **122**, 38 (2001).
17. C.Y. Peng, L.C. Ho, C.D. Impey, R. Hans-Walter, *Astronom. J.* **124**, 266 (2002).
18. C.Y. Peng, L.C. Ho, C.D. Impey, 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 Roy. Astronom. Soc.* **411**, 2439 (2011).
23. B. Häussler, D.H. McIntosh, M. Barden, *Astrophys. J. Suppl.* **172**, 615 (2007).
24. E.A. Valentijn, J.P. McFarland, J. Snigula, et al., in *Proceedings of the conference on Astronomical Data Analysis Software and Systems, Tucson, Arizona, USA, 2006*, Ed. by R. A. Shaw, F. Hill and D.J. Bell (XVI ASP Conference Series, 2007), p. 491.
25. J.P. McFarland, G. Verdoes-Kleijn, G. Sikkema, et al., *Experimental Astronom.* **35**, 45 (2013).
26. M. Barden, B. Häussler, C.Y. Peng, et al., *Monthly Notices Roy. Astronom. Soc.* **422**, 449 (2012).
27. L.S. Kelvin, S.P. Driver, A.S.G. Robotham, et al., *Monthly Notices Roy. Astronom. Soc.* **421**, 1007 (2012).
28. V. Vikram, Y. Wadadekar, A.K. Kembhavi, et al., *Monthly Notices Roy. 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, E.M. Corsini, *Astronom. and Astrophys.* **495**, 491 (2009).
33. D.A. Gadotti, *Monthly Notices Roy. Astronom. Soc.* **384**, 420 (2008).
34. V.P. Reshetnikov, *Surface Photometry of Galaxies* (St. Petersburg State Univ. Typography, 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. H. G. Corwin, L. Bottinelli (Springer, Berlin, 1989), p. 208.
43. N. Caon, M. Capaccioli, and M. D'Onofrio, *Monthly Notices Roy. 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 Roy. Astronom. Soc.* **393**, 1531 (2009).
48. I. Martin-Navarro, J. Bakos, I. Trujillo, et al., *Monthly Notices Roy. Astronom. Soc.* **427**, 1102 (2012).
49. A.W.J. Moffat, *Astronom. and Astrophys.* **3**, 445 (1969).
50. Y.I. Byun, K.C. Freeman, *Astrophys. J.* **448**, 563 (1995).
51. E. Tempel, A. Tamm, R. Kipper, P. Tenjes, arXiv:1205.6319
52. J. Mendez-Abreu, J.A.L. Aguerri, E.M. Corsini, E. Simmoneau, *Astronom. and Astrophys.* **478**, 353 (2008).
53. A.V. Mosenkov, N.Ya. Sotnikova, V.P. Reshetnikov, *Monthly Notices Roy. Astronom. Soc.* **401**, 559 (2010).

- 54. S.S. Savchenko, *Astrophysical Bulletin*. **67**, 310 (2012).
- 55. D.V. Bizyaev, S.J. Kautsch, A.V. Mosenkov, et al. (in press).

MASS DECOMPOSITION OF GALAXIES USING THE DECA PACKAGE

A.V. Mosenkov

New wrapper DECA designed to perform disk and elliptical galaxies' images photometric investigation is presented. DECA code is written in Python script programming language and incorporates features of some widespread packages for performing astronomy data reduction such as IRAF, SExtractor and programming GALFIT code which is used to perform two-dimensional galaxy image decomposition into several components (bulge+disk). The advantage of this code is its applicability to analysis of a large sample of galaxies of different orientation to the line of sight (including galaxies viewed edge-on) with a minimum human interaction. Some examples of using the package for studying a sample of modeled galaxy images as well as a sample of real objects are presented which shows the reliability of using the presented package for further galaxy structure investigation.

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

Параметр $bump = 0$ характеризует наличие достаточно заметного отклонения от наклонной прямой

$$\mu(r) = \mu_{0,d} + 1.0857 r/h \text{ в центральной области галактики, что свидетельствует о возможном}$$

присутствии балджа.

ELLIPTICITY ≤ 0.6 & bump=0:

exp+ser, ser, exp

ELLIPTICITY ≤ 0.6 & bump=1:

ser, exp+ser, exp

ELLIPTICITY > 0.6 & ELLIPTICITY < 0.7 & bump=0:

exp+ser, exp, ser, edge+ser

ELLIPTICITY ≥ 0.7 & bump=0:

edge+ser, edge, exp+ser, exp

ELLIPTICITY ≥ 0.7 & bump=1:

edge, edge+ser, exp+ser, exp

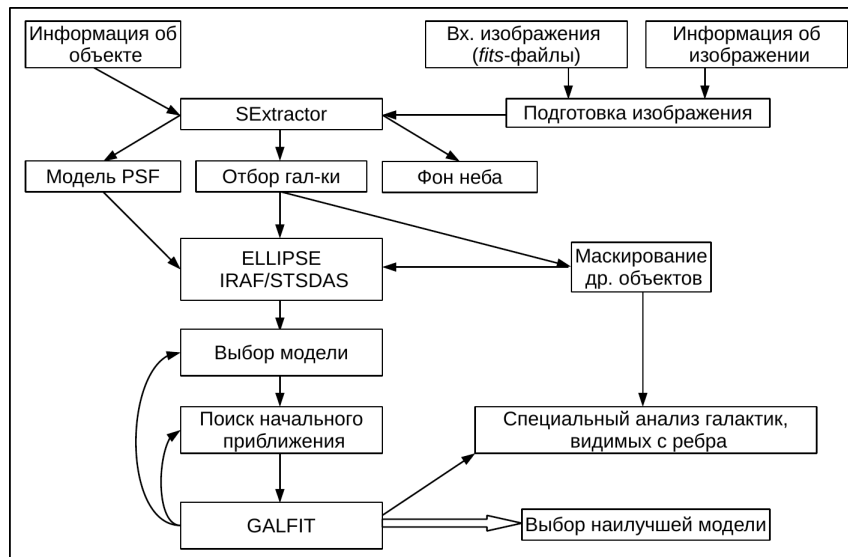


Рис. 1. Алгоритм работы программы DECA.

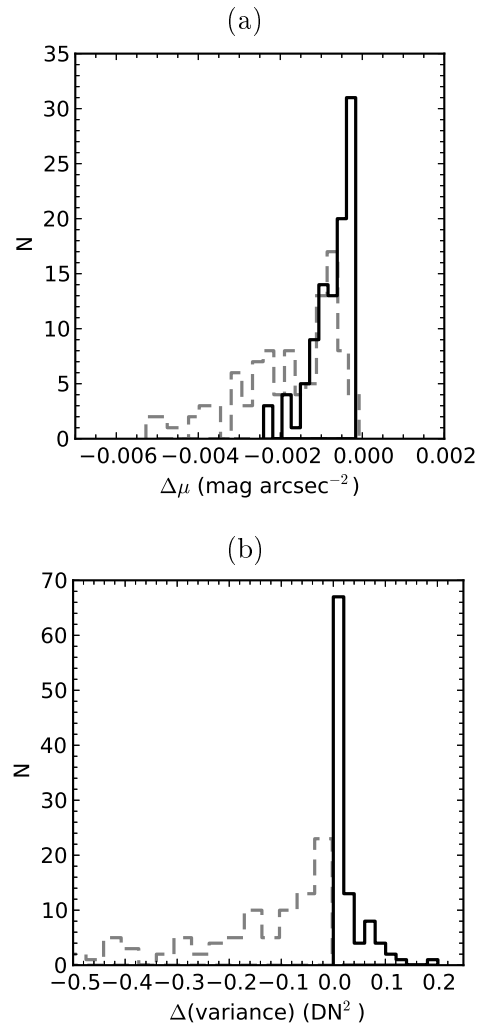


Рис. 2. Результат работы программы DECA по определению уровня фона неба (a), и его стандартного отклонения (b) для модельных изображений. Штриховой прямой показаны результаты определения этих значений с использованием программы SExtractor, сплошной линией — с помощью алгоритма, описанного в тексте.

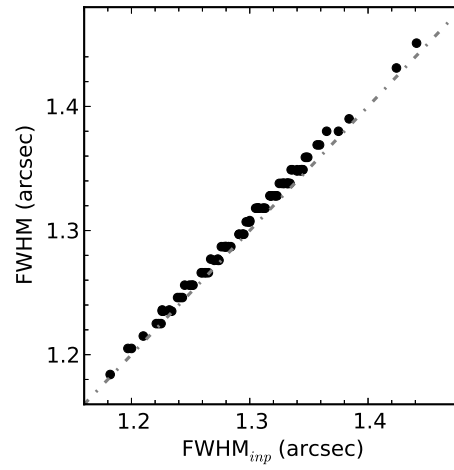


Рис. 3. Результаты определения PSF для модельных изображений с помощью аппроксимации звездного профиля гауссианой.

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

Объект	ср. знач./интервал	дисперсия
Эллиптические галактики	$\mu_{e,b} = 20.8 \text{ mag}/\square''$	$\sigma = 0.4 \text{ mag}/\square''$
	$r_{e,b} = 3 \text{ кпк}$	$\sigma = 1 \text{ кпк}$
	$n = 3.8$	$\sigma = 0.9$
Диски	$\mu_{0,d} = 20.0 \text{ mag}/\square''$	$\sigma = 0.6 \text{ mag}/\square''$,
	$h = 2.8 \text{ кпк}$	$\sigma = 1.2 \text{ кпк}$
	$z_0 = 0.8 \text{ кпк}$	$\sigma = 0.3 \text{ кпк}$
Классические балджи	$\mu_{e,b} = 19.6 \text{ mag}/\square''$	$\sigma = 0.4 \text{ mag}/\square''$
	$r_{e,b} = 1 \text{ кпк}$	$\sigma = 0.4 \text{ кпк}$
	$n = 3.4$	$\sigma = 1.3$
Псевдо-балджи	$\mu_{e,b} = 20.5 \text{ mag}/\square''$	$\sigma = 0.5 \text{ mag}/\square''$
	$r_{e,b} = 0.7 \text{ кпк}$	$\sigma = 0.3 \text{ кпк}$
	$n = 1.5$	$\sigma = 0.9$
Другие параметры:		
Эллиптичность балджа или эллипт. галактики	$\varepsilon_b = 0 - 0.55$	—
Угол наклона галактики	$i = 0^\circ - 60^\circ, i = 90^\circ$	—
Масштаб	$0.1 - 0.3 \text{ кпк}/''$	—

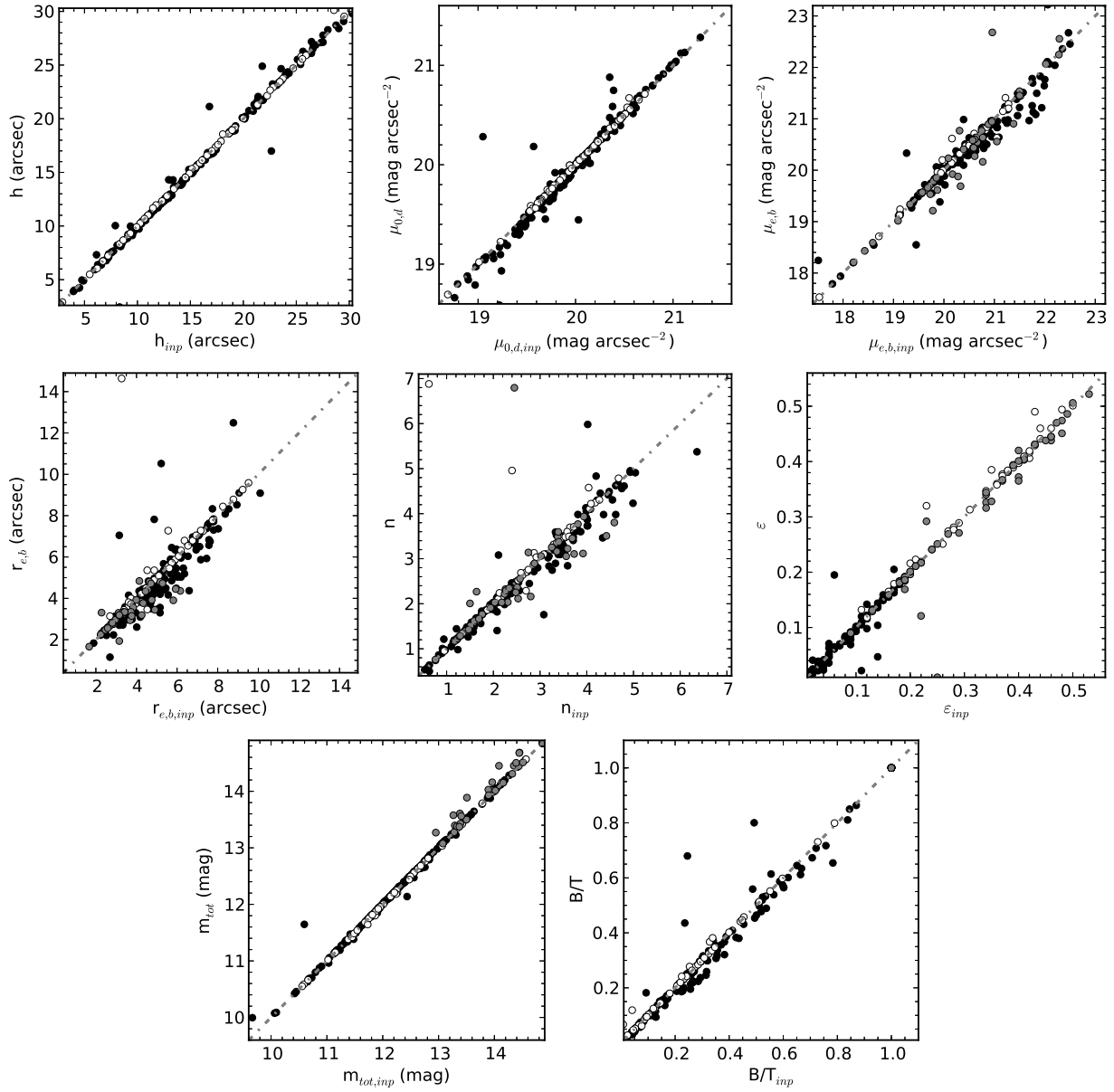


Рис. 4. Сравнение результатов декомпозиции выборки модельных галактик с заданными параметрами моделей (отложены по оси абсцисс с обозначением *inp*). Белыми кружками отмечены модельные галактики, видимые с ребра, серыми кружками – модельные эллиптические галактики, черными кружками – все остальные.

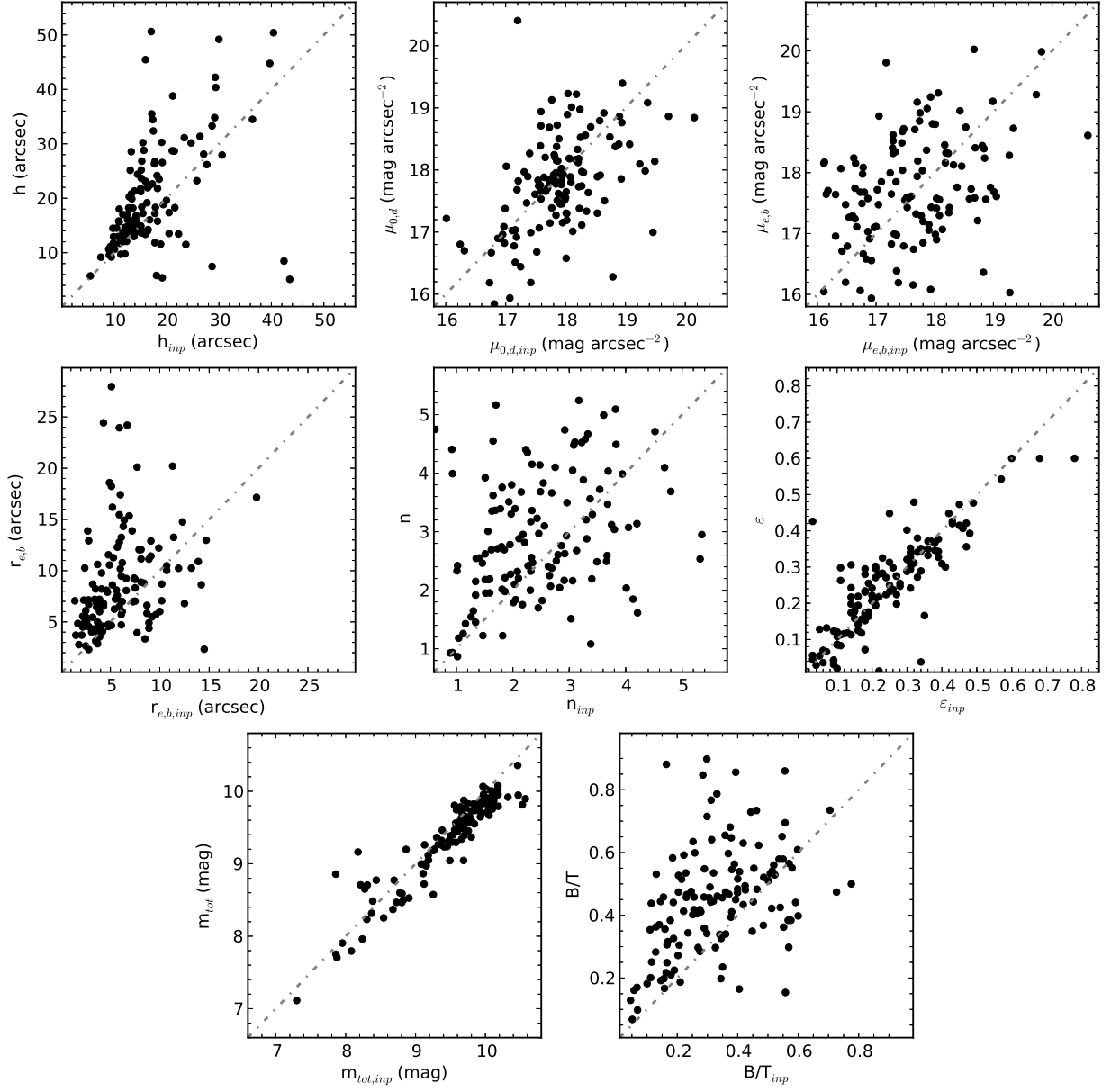


Рис. 5. Сравнение результатов декомпозиции, полученных программой DECA для выборки галактик, описываемой в разделе 3.2, с результатами декомпозиции, приведенными в [52] (отложены по оси абсцисс с обозначением *inp*).

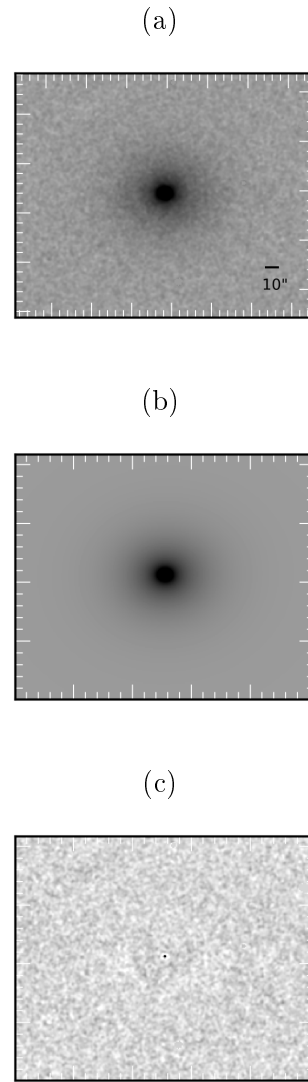


Рис. 6. Пример декомпозиции галактики NGC 5273. Представлены изображения галактики (a), модели (b) и разностного изображения (c).

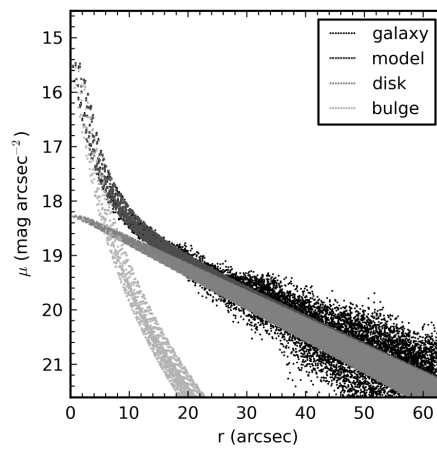


Рис. 7. Пример декомпозиции галактики NGC 5273. Построена зависимость поверхностной яркости от радиуса в каждом пикселе изображения. Результаты декомпозиции: параметры диска $\mu_{0,d} = 18.19 \text{ mag}/\square''$, $h = 21.''8$; параметры балджа $\mu_{e,b} = 18.0 \text{ mag}/\square''$, $r_{e,b} = 5.''45$, $n = 3.23$.