

Отзыв

официального оппонента, с.н.с. ФИАН, к.ф.-м.н. Евгения Васильева
на диссертационную работу Натальи Лысковой
“Методы определения масс эллиптических галактик,
применимые для больших обзоров”,
представленной на соискание учёной степени кандидата физико-математических
наук по специальности 01.03.02 – Астрофизика и звёздная астрономия.

Работа Н.Лысковой посвящена всестороннему исследованию одного из методов оценки масс галактик, применимому для больших выборок и нетребовательному к качеству исходных данных. Этот метод относится к области динамического моделирования, т.е. восстановления распределения гравитирующей массы по данным кинематики разнообразных трейсеров – собственно звёзд, горячего газа в рентгеновском диапазоне, отдельных шаровых скоплений и галактик-спутников, с использованием разумных предположений о глобальных свойствах системы (например, о стационарности). В свою очередь, получение информации о полной массе и её распределении в пределах галактики важно для множества приложений – от определения масс сверхмассивных чёрных дыр по движению звёзд и газа в их окрестностях, до исследования глобального “баланса сил” во Вселенной (соотношения между тёмной материей, звёздным населением, газом в различных фазовых состояниях), т.е. для проверки и калибровки космологических моделей.

Само собой, разнообразие задач и исходных данных даёт простор для разработки многих методов, весьма отличающихся по требованиям к исходным данным, вычислительной сложности и надёжности результатов. Надо признать, что ни один из существующих и даже мыслимых методов не способен дать однозначный результат даже для идеальных входных данных без использования дополнительных предположений (по крайней мере для внегалактической астрономии, где мы в принципе имеем дело только с спроецированными на небесную сферу координатами и одной компонентой скорости вдоль луча зрения), из-за фундаментальных математических ограничений (размерность куба данных меньше размерности параметров модели). Более того, даже весьма продвинутые и затратные методы моделирования (например, метод Шварцшильда) также часто не могут дать адекватную оценку неопределённости параметров (точнее сказать, её систематической составляющей, связанной с модельными предположениями и ограничениями в интерпретации наблюдаемых величин), что наглядно подтверждается регулярными несоответствиями между результатами разных работ, отличающимися на несколько формальных среднеквадратичных отклонений. Иными словами, сложность метода не может служить гарантией его точности. В связи с этим, весьма ценной представляется альтернатива в виде достаточно простых в формулировке и нетребовательных к исходным данным методов, которые,

тем не менее, способны дать в среднем корректный результат с умеренным разбросом относительно истинных значений параметров.

Рассматриваемый в работе метод принадлежит как раз к этой категории. К его достоинствам можно отнести, с одной стороны, использование непосредственно измеряемых величин (профиля поверхностной яркости и дисперсии скоростей) без необходимости их параметризации какой-либо функциональной зависимостью, с другой стороны, отсутствие формальных свободных (подгоночных) параметров. То есть результат даётся в виде одного числа – значения полной гравитирующей массы в пределах некоторого радиуса (его выбор диктуется условием минимизации зависимости результата от неизвестных параметров). Само собой, это куда скромнее, чем способны дать более сложные методы, но с другой стороны, часто этого достаточно для статистических целей – усреднения по большой выборке галактик, в которой данных по каждому отдельному объекту недостаточно для подробной модели. Чтобы убедиться в пригодности метода для широкого класса задач, следует прокалибровать его на наборе данных с известным ответом и сравнить с другими методами – из той же серии или более изощрёнными. Этому и посвящена диссертационная работа Натальи Лысковой.

После краткого введения, в главе 2 представлен обзор основных методов определения масс галактик и приведены основные сведения о методе, изучаемом в деталях в данной диссертации. Обзор выполнен на хорошем и доступном уровне; конечно, невозможно рассмотреть всё разнообразие подходов (так, например, не упомянуты методы, основанные на контролируемых N -body симуляциях, такие как *made-to-measure*), но в целом он даёт представление о доступных вариантах и их ограничениях. Также приведены основные используемые в дальнейшем выражения для определения круговой скорости (которая является индикатором массы в пределах заданного радиуса для сфероидальных систем) по наблюдаемым величинам – профилям поверхностной яркости и дисперсии скоростей в зависимости от радиуса. Основное внимание в работе уделено т.н. “локальному подходу” (Чуразов и др.2010), в котором требуется знать поведение этих величин в ограниченном диапазоне радиусов; также даны краткие сведения о “глобальном подходе” (Вольф и др.2010), более подробно рассмотренном в последней главе. Из недостатков можно отметить довольно краткое математическое описание метода и обсуждение предположений, лежащих в его основе: несмотря на “локальность” исходных данных, отражённых в названии, при выводе уравнений используются предположения о глобальной структуре галактики (в частности, функциональная форма потенциала) – по-другому быть и не может, т.к. динамика звёзд в эллиптических галактиках принципиально глобальна. Впрочем, недостаточно подробное теоретическое обоснование компенсируется доказательством практической применимости в остальной части работы.

Основное содержание диссертации представлено в главах 3, 4 и 5, где данный метод последовательно применяется для определения масс систем с заранее известным ответом (космологических N -body расчётов, глава 3), реальных галактик, на-

блюдаемых в оптическом и рентгеновском диапазонах (глава 4), и галактик, которые уже были изучены другими, более изощрёнными методами (глава 5, где также сравниваются локальный и глобальный подходы). Подробно рассмотрены все детали процесса, например, очистка, сглаживание и прочая обработка исходных данных, тонкости, связанные с возможным наличием вращения в галактике, а также особенности извлечения информации о скоростях газа из рентгеновских спектров. На основании проведённого анализа можно сделать вывод, что простые методы хорошо подходят для получения оценки массы на некотором радиусе, в среднем не имеющей заметного систематического сдвига и обладающей умеренным разбросом (5 – 10% для круговой скорости, вдвое больше для массы). При сравнении с профилями массы, полученными из рентгеновских наблюдений, даны ограничения на возможный вклад нетепловых движений газа, а при сравнении с массой звёздного населения, полученной из популяционного синтеза на основе спектральных наблюдений в оптическом диапазоне, сделана оценка доли тёмной материи в полной массе галактики. В обоих случаях искомые величины получаются вычитанием двух профилей массы, т.о. увеличивая относительную погрешность; тем не менее, оказывается возможным получить конструктивные ограничения и в этих случаях.

В целом проведённые исследования ясно показывают, что предлагаемый метод хорошо справляется с поставленной задачей – а именно, получением достаточно надёжной оценки массы галактики в пределах некоторого радиуса, слабо чувствительной к неопределённостям структуры (за исключением вращения, влияние которого может исказить оценку на 15–20%; впрочем, предложен эмпирический способ внести корректирующие поправки) и применимой даже при достаточно скудных исходных данных. Надо отметить, что наличие такого уверенно работающего метода само по себе является примечательным, т.к. простые оценки массы и даже более продвинутые схемы сильно страдают от вырождения по параметрам модели, а используемый подход направлен на минимизацию неопределённости при специально подобранном (но при этом вполне практически мотивированном) значении радиуса. Основное ограничение метода связано с этим же, т.е. он не даёт оценку *полной* массы галактики (которая, вообще говоря, плохо определена сама по себе в условиях иерархической космологии), а лишь оценку в пределах некоторого радиуса. Впрочем, как показано в работе, этот радиус близок к часто используемому в наблюдениях “эффективному радиусу” (включающему половину полной светимости галактики), т.е. актуален с практической точки зрения; кроме того, для галактик с медленно спадающей поверхностной яркостью, оценка массы хорошо применима в широком диапазоне радиусов.

Таким образом, данная работа имеет большую практическую значимость, особенно в современных условиях, когда объём наблюдательных данных с имеющихся и планируемых широкомасштабных обзоров неба (например, LSST) растёт в геометрической прогрессии. Наличие простого в применении, надёжного и нетребовательного метода оценки массы открывает дорогу к удобным статистическим исследованиям эволюции космологической популяции галактик. Работа выполнена на высоком науч-

ном уровне, а приведённые замечания не влияют на общую её оценку. Автореферат хорошо резюмирует содержание диссертации, её основные результаты опубликованы в ведущих астрономических журналах и представлены на многочисленных конференциях. Работа Натальи Лысковой удовлетворяет всем требованиям, предъявляемым к кандидатским диссертациям, а её автор заслуживает присвоения степени кандидата наук по специальности 01.03.02 – Астрофизика и звёздная астрономия.

Официальный оппонент,
старший научный сотрудник ФИАН, к.ф.-м.н.



Е.А.Васильев

7 декабря 2015 г

Физический институт им.П.Н.Лебедева РАН,
119991, Москва, Ленинский проспект, 53, тел. (499)132-6172, e-mail: eugvas@lpi.ru

Подпись Е.А.Васильева заверяю
и.о. учёного секретаря ФИАН, к.ф.-м.н.



М.М.Цвентух

119991, Москва, Ленинский проспект, 53, тел. (499)132-6846, e-mail: elley@list.ru