

УДК 552

**А. В. Засов**

Московский государственный университет им. М. В. Ломоносова,  
Государственный астрономический институт им. П. К. Штернберга  
11992 Россия, Москва, Университетский пр. 13  
e-mail zasov@sai.msu.ru

### **Оценка масс «темной» материи в галактиках по измерениям скоростей «светлой»**

*Форма кривых вращения дисковых галактик, полученная по доплеровским измерениям, сама по себе не дает информации о наличии темного, небарионного вещества в галактиках. Однако анализ дисперсии скоростей старого звездного диска в сочетании с фотометрическими оценками позволяет оценить массу галактических дисков по отношению к массе гало и сделать вывод как о наличии большой несветящейся массы, так и об особенностях динамической эволюции звездных дисков.*

*ОЦІНКА МАС «ТЕМНОЇ» МАТЕРІЇ В ГАЛАКТИКАХ ЗА ВИМІРЮВАННЯМИ ШВИДКОСТЕЙ «СВІТЛОЇ», Засов А. В. — Форма кривих обертання дискових галактик, отримана за доплерівськими вимірюваннями, сама по собі не дає інформації про наявність темної, небарионної речовини у галактиках. Проте аналіз дисперсії швидкостей старого зоряного диска у поєднанні з фотометричними оцінками дозволяє оцінити масу галактичних дисків відносно маси гало і зробити висновок як про наявність великої несвітної маси, так і про особливості динамічної еволюції зоряних дисків.*

*AN ESTIMATION OF “DARK” MASS IN GALAXIES FROM MEASUREMENTS OF “LIGHT” MASS, by Zasov A. V. — Rotation curve shapes for discy galaxies which are obtained from the Doppler measurements give no information on the presence of dark non-baryonic matter in these objects. However, the velocity dispersion of old disc stars together with the photometric data enables one to estimate disc-to-halo mass ratios, which suggests a great deal of non-luminous mass in galaxies and provides a possibility to study the dynamical evolution of stellar discs.*

**Введение.** История открытия и исследования темной материи в галактиках и скоплениях галактик, насчитывающая уже несколько десятилетий, хорошо описана в целом ряде публикаций, и не является темой настоящей статьи, как и проблема природы темной массы. Здесь речь пойдет прежде всего о попытках измерения массы светлого и темного вещества внутри дисковых галактик на основе анализа спектров газа и звездного населения. Под словами «внутри галактик» будем подразумевать «внутри их наблюдаемых границ», т. е. там, где еще заметно излучение звезд или газа, оставляя в стороне нерешенный вопрос о физической протяженности галактик как гравитационно связанных систем.

Научный бум, породивший целую лавину работ по скрытой массе внутри галактик, начался с появлением наблюдательных данных о скоростях вращения  $V$  галактических дисков на достаточно большом расстоянии  $R$  от центра, то есть с получением достаточно длинных кривых вращения  $V(R)$ . Все кривые вращения строятся по измерениям эффекта Доплера путем анализа спектра отдельных областей галактик в оптическом или радиодиапазонах (в последнем случае, как правило, по линии водорода H I). Вопреки ожиданиям оказалось, что кривые вращения, как правило, не падают на больших расстояниях от центра галактик, а выходят на почти плоский участок — на плато, или даже продолжают расти с расстоянием (рис. 1).

Распространено заблуждение, что увеличение скорости вращения вдоль радиуса или выход кривой вращения на плато является если не доказательством, то по крайней мере решающим аргументом в пользу существования в галактиках темного гало с массой, сопоставимой или превосходящей массу видимого вещества. На самом деле это не так, и форма кривой вращения, какая бы она ни была, сама по себе ещё не говорит о «скрытой» массе. Во-первых, при определениях массы по кривой вращения обычно делается ряд предположений, выполняющихся лишь приблизительно, а иногда просто не выполняющихся. Так, обычно принимается, что диск галактики тонкий, распределение масс в галактике осесимметрично, а измеренная скорость вращения на любом расстоянии мало отличается от круговой скорости, спроектированной на луч зрения. Поэтому вывод о темной материи, заполняющей галактику, далеко не во всех случаях очевиден. Во-вторых, любая форма кривой вращения — растущая или падающая, и даже спадающая круче кеплеровского закона  $V(R) \sim R^{-1/2}$  (что теоретически возможно, хотя наблюдается очень редко), на самом деле ничего не говорит о наличии или отсутствии темного гало, и может быть объяснена одним только диском, форма кривой вращения которого отражает лишь особенность распределения массы в нем. Чем вещество, составляющее диск (т. е. звезды и газ), слабее концентрируется к центру, тем до больших расстояний от центра будет наблюдаться увеличение скорости вращения. Скорость вращения равновесного однородного диска в создаваемом им же самим гравитационном

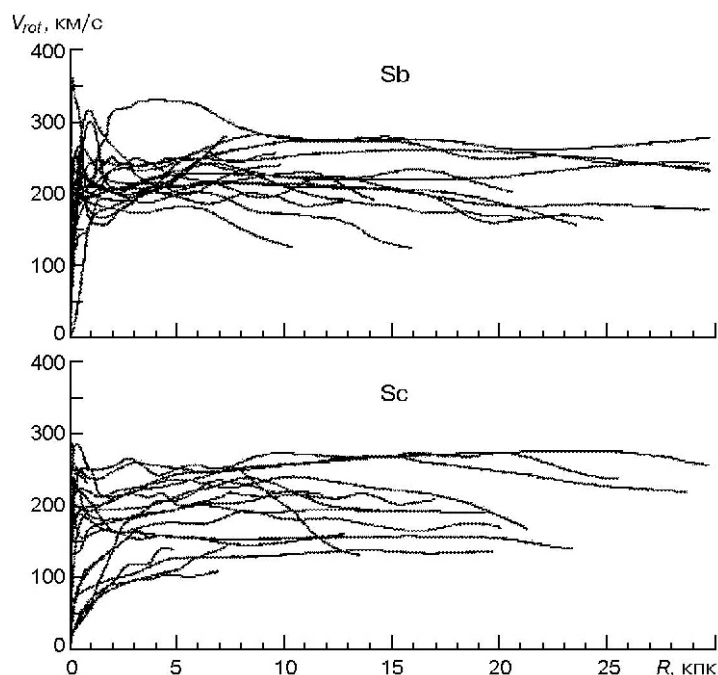


Рис. 1. Кривые вращения спиральных галактик [11]

поле линейно увеличивается с  $R$ . Конечно, диски реальных галактик заведомо не однородны, их плотность уменьшается с удалением от центра. Но и в этом случае с объяснением плато на кривой вращения тоже нет особой проблемы. Классический пример – так называемый диск Местеля. Это тонкий осесимметричный диск, поверхностная плотность  $\Sigma(R)$  которого уменьшается от центра к периферии как  $K/R$ , где  $K$  — константа. Теоретически можно показать, что круговая скорость, которая в общем случае определяется радиальным градиентом гравитационного потенциала

$$V^2(R) = R \frac{d\Phi}{dR},$$

в случае диска Местеля зависит только от значения  $K$ , т. е. не изменяется с расстоянием. Кривая вращения галактики, представляющей собой диск Местеля, будет описываться горизонтальной линией — от нуля до бесконечности — безо всякого темного гало! Масса такого диска в пределах любого заданного радиуса  $R$  будет определяться выражением  $M(R) = V^2 R / G$ , т. е. так же, как и в случае сферически-симметричного распределения плотности. Иными словами, по кривой вращения диск Местеля нельзя отличить от сферически-симметричной галактики.

Что же в таком случае действительно можно рассматривать как прямое указание на невидимую массу в дисковых галактиках, и в частности, на массивное темное гало? В первую очередь это расхождение между измеренной кривой вращения галактического диска и

ожидаемой в предположении, что галактика состоит только из «светлого вещества», т. е. из непосредственно наблюдаемых компонентов. К ним относятся звездное население диска и балджа плюс межзвездная газопылевая среда, причем вклад последней, как правило, мал по сравнению со звездными. Наличие такого расхождения выявляется при сопоставлении кривой, вычисленной по распределению яркости (плотности) звездных и газовых компонентов, с наблюдаемой кривой вращения  $V(R)$ .

Заметим, что предлагаются и радикальные теории для объяснения плоских кривых вращения без привлечения дополнительной массы. Так, рассматриваются, хотя и без особого успеха, предположения о негравитационной силе, например магнитной, действующей на дифференциально вращающийся газовый слой, или предполагается не-ньютонковский характер движения тел в области малых ускорений (теория MOND). Такие подходы, безусловно, имеют право на жизнь и должны проверяться, но они встречаются с большими сложностями при попытке придать им универсальный характер. Стремление обойти вывод о наличии темной материи в галактиках подчас похожа на попытку объяснить загадку с помощью чуда.

#### КРИВАЯ ВРАЩЕНИЯ И «ТЕМНАЯ» МАССА

В абсолютном большинстве спиральных галактик основная масса видимого вещества приходится на звездный диск. Но радиальные профили яркостей дисков падают с расстоянием от центра галактики круче, чем у диска Местеля. Чаще всего на большом интервале  $R$  профиль яркости описывается экспоненциальным законом

$$I(R) = I_0 \exp(-R/R_0),$$

где  $I_0$  — поверхностная яркость диска, экстраполированная на центр, а  $R_0$  — радиальная шкала диска. Теоретически можно показать, что кривая вращения такого экспоненциального диска должна проходить через максимум на  $R = 2.15R_0$ , и плавно снижаться на больших  $R$ , что почти никогда не наблюдается у галактик, и заведомо не совместимо с постоянной или почти постоянной скоростью вращения их внешних областей. Это и дает основание предположить наличие темной массы. На рис. 2 показана протяженная кривая вращения спиральной галактики М 33, полученная по наблюдениям нейтрального водорода, и ожидаемая кривая при отсутствии невидимой массы. От галактики к галактике ситуация может сильно изменяться, причем в некоторых случаях масса гало оказывается совсем небольшой по сравнению с массой звездного диска. Хорошим примером является спиральная галактика NGC 157, скорость вращения которой быстро уменьшается за пределами оптических границ [10].

Однако оценить количественно массу несветящегося вещества внутри дисковых галактик по кинематике газа или звезд оказалось

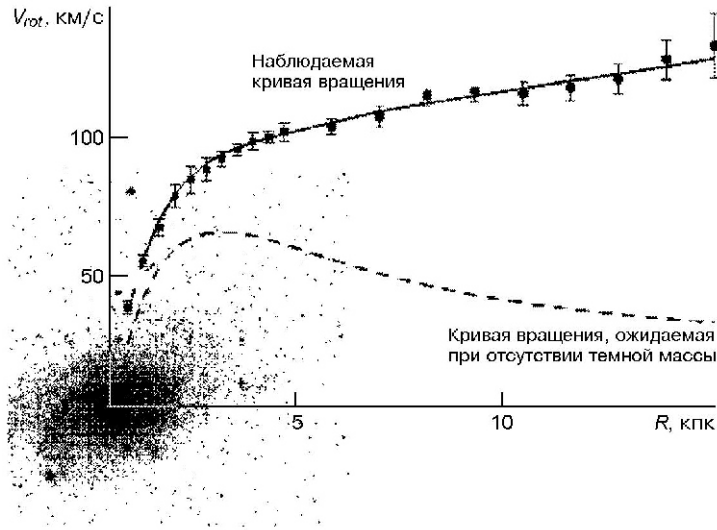


Рис. 2. Сравнение наблюдаемой кривой вращения для М 33 и кривой, ожидаемой при наличии только звездного компонента

задачей не просто сложной, но и подчас невыполнимой без дополнительных предположений. Для определенности, чтобы задача все же имела решение, приходится ограничить рассматриваемую область неким заранее оговоренным значением размера. В качестве такого размера может быть взят радиус, измеренный в единицах радиальной шкалы яркости  $R_0$ , поскольку он не зависит от средней поверхностной яркости галактики. Ниже условно будем принимать за оптическую границу диска предельный радиус  $R = 4R_0$ . Для нормальных галактик этот предел в среднем довольно близок к  $R_{25}$  — радиусу, который соответствует изофоте  $25^m/\square$ . Для оценки полной массы галактики в пределах выбранных границ в первом приближении достаточно знать скорость кругового вращения на данном расстоянии от центра. Сложнее определить, как распределена масса между отдельными компонентами галактики, и прежде всего между диском и гало.

Задача определения вклада различных компонентов галактики в общую кривую вращения по анализу распределения их суммарного гравитационного потенциала относится к числу некорректных задач. Круговая скорость определяется через производную гравитационного потенциала по радиусу. Потенциалы отдельных компонентов суммируются аддитивно, поэтому если  $\varphi_n(R)$  — распределение потенциала  $n$ -го компонента, то суммарный потенциал равен

$$\varphi(R) = \sum_n \varphi_n(R), \text{ или } \varphi(R)/R = \sum_n \varphi_n(R)/R.$$

Следовательно,

$$V(R) = \left( \sum_n V_n^2(R) \right)^{1/2}. \tag{1}$$

Иными словами, суммируются квадраты круговых скоростей, обусловленных отдельными компонентами, при этом наблюдаемая скорость вращения может быть представлена их самыми различными комбинациями. Поэтому без дополнительной информации о массах компонентов или распределении вещества в них задача не решается. Здесь на помощь приходит то обстоятельство, что вклад различных компонентов в общее гравитационное поле на разных расстояниях от центра галактики не одинаков. Так, балдж (если он есть в галактике вообще) доминирует во внутренней области галактики, диск — на расстоянии  $(2-3)R_0$  от центра, а гало — во внешней области. Анализируя форму кривых вращения в галактиках, где гало доминирует, можно заключить, что она лучше всего описывается псевдоизотермической моделью распределения плотности, в которой радиальный профиль плотности гало на больших  $R$  асимптотически приближается к закону  $(R) \sim R^{-2}$  (он очень удобен для вычислений, хотя вряд ли справедлив для всех  $R$ ). Это позволяет при достаточно длинной кривой вращения выделить составляющую, предположительно связанную с гало. Что касается других компонентов, то на практике при расчете их вклада в общий потенциал галактики делается предположение, что в первом приближении их плотность распределена в соответствии с наблюдаемым распределением яркости.

Но даже при таком подходе мы все равно не получим единственного решения задачи по декомпозиции наблюдаемой кривой вращения на составляющие. В качестве примера на рис. 3 приведена кривая вращения спиральной галактики NGC 6503 и ее возможные представления. Все три варианта решения хорошо описывают наблюдаемую кривую вращения, но приводят к сильно различающимся оценкам массы диска и гало, несмотря на то, что один из параметров модели — радиальная шкала диска  $R_0$  — здесь считается известным.

## ДВА СПОСОБА УТОЧНЕНИЯ МАССЫ ДИСКА

Итак, чтобы понять, требуется ли наличие темной массы для объяснения кинематических характеристик галактики, необходимо найти метод независимой оценки массы диска, а затем сравнить полученное значение с интегральной динамической массой галактики и оценить таким образом количество недостающей — темной — массы. Таких методов известно несколько, но каждый из них базируется на своих предположениях, и поэтому не претендует на строгость и оставляет лазейку для сомнения. Здесь мы остановимся на двух наиболее универсальных подходах, которые могут быть применены к большому числу объектов.

**Метод 1 (фотометрический).** Метод базируется на измерении массы совокупности звезд галактики. Здесь основная проблема — в оценке коэффициента пропорциональности  $M_*/L$  между массой и

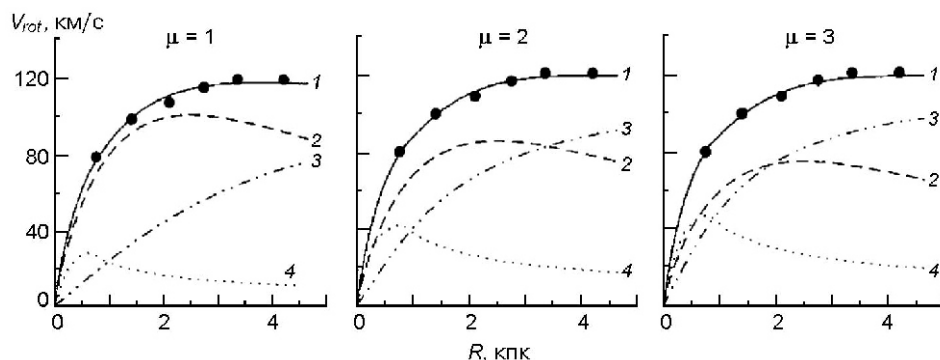


Рис. 3. Пример неоднозначности декомпозиции наблюдаемой кривой вращения NGC 6503 (точки) на составляющие, относящиеся к балджу, диску с фиксированной радиальной шкалой, и гало (тонкие линии). Здесь  $F$  — отношение массы недисковых компонент к массе диска. Первый рисунок соответствует случаю, когда масса диска равна сумме масс балджа и гало

светимостью: его величина зависит от вклада звезд различной массы и различного возраста в излучение галактики. С возрастанием относительного числа молодых звезд падает отношение  $M_*/L$ . Но одновременно уменьшаются и показатели цвета звездной системы, поэтому должно иметь место определенное соотношение между этими параметрами. Из теории звездной эволюции известно, как изменяется в течение жизни светимость и цвет звезд в зависимости от их массы и химического состава, поэтому модели эволюции звездного населения позволяют теоретически оценить  $M_*/L$  как функцию показателей цвета. Примечательно, что соотношение между этими параметрами очень слабо зависит от истории звездообразования в галактике [5].

Основным недостатком фотометрического метода является зависимость результата от принятой модели эволюции звездного населения, и особенно сильная зависимость — от того, каким задается распределение рождающихся звезд по массам, т. е. от принимаемой начальной функции масс (НФМ). Обычно НФМ считается одинаковой для разных галактик, что, конечно, является упрощением. Определенно известны галактики, показатели цвета которых явно не вписываются в стандартные схемы эволюции звездного населения и не согласуются с ожидаемым соотношением «цвет —  $M_*/L$ » [3].

**Метод 2 (динамический).** Метод основан на оценке верхнего предела локальных значений поверхностной плотности диска, который вытекает из условия его гравитационной устойчивости. К реальным галактикам при некоторых упрощающих предположениях он впервые был применен Боттема [6]. Вращающийся звездный диск, как и диск любой природы, состоящий из частиц, между которыми действует только сила тяготения, должен характеризоваться определенной дисперсией радиальных скоростей звезд, чтобы диск мог находиться в равновесном гравитационно устойчивом состоянии.

Звездный диск — это бесстолкновительная система, поскольку случайными сближениями звезд можно пренебречь из-за крайне ма-

лой вероятности таких событий. Но помимо парных сближений на движение звезд действуют коллективные процессы, когда каждая звезда ощущает изменение гравитационного потенциала, связанного с положением всех остальных звезд, составляющих диск, то есть реагирует на диск в целом. Если начальная дисперсия скоростей была мала, и звезды диска двигались по практически круговым орбитам, то за время, равное нескольким периодам вращения диска, произойдет перестройка орбит звезд благодаря коллективным эффектам. В результате динамического нагрева диск станет немного медленнее вращаться, а часть энергии вращения диска перейдет в энергию хаотичных движений, обеспечивающих его устойчивость. Динамический разогрев диска приведет к тому, что за время нескольких оборотов он станет устойчивым к малым возмущениям как в плоскости диска, так и в перпендикулярном направлении (изгибная неустойчивость).

Основная масса звездного диска почти всегда приходится на звезды, которые имеют возраст в несколько миллиардов лет. Дисперсия их скоростей составляет несколько десятков км/с, уменьшаясь от центральной области диска к периферии. Чем выше масса недисковых компонентов галактики — и в первую очередь темного гало — по сравнению с массой диска, тем слабее влияние собственного гравитационного поля диска на движение составляющих его звезд, и тем меньшая дисперсия скоростей звезд (при данном значении круговой скорости и поверхностной плотности диска) обеспечивает его устойчивость.

К сожалению, критерий устойчивости диска в общем виде не выводится аналитически из теории малых возмущений. Строгое решение для предела устойчивости получено только для упрощенной модели тонкого вращающегося диска с медленно изменяющимися вдоль радиуса параметрами, и только для радиальных возмущений плотности. Гравитационная неустойчивость для вращающегося диска отличается от «классической» джинсовской неустойчивости для бесконечной однородной среды, где все направления равноправны, а возмущения с длиной волны больше джинсовской всегда неустойчивы. Критическое значение радиальной дисперсии скоростей, стабилизирующей радиальные возмущения плотности с любой длиной волны для диска с поверхностной плотностью на данном расстоянии от центра, составляет (по Тоомре)

$$C_{cr} = \frac{3.3G}{\Omega^2 R^3}, \quad (2)$$

где  $\Omega$  — эпициклическая частота, определяемая через угловую скорость вращения диска  $\Omega$  и ее радиальную производную (обычно в 1.5—2 раза превышает  $\Omega$ ). Диск устойчив к радиальным возмущениям, если параметр Тоомре  $Q_T = C_r/C_{cr} > 1$ . Положив  $Q_T = 1$  и зная  $C_r(R)$ , можно оценить предельную локальную плотность диска как функцию радиуса, при которой он может быть устойчивым.



Более сложные, но более близкие к реальности модели несколько меняют выражение для критической дисперсии скоростей. Так, учет конечной толщины диска делает его более устойчивым, а учет нерадиальных возмущений в плоскости диска, наоборот, понижает порог устойчивости. Хотя простого аналитического выражения для критерия устойчивости в общем случае нет, численные модели  $N$  тел позволяют нащупать этот предел в зависимости от различных параметров галактики. Многочисленные модели предельно, или, как принято говорить, маргинально устойчивых дисков, показали, что предел устойчивости дисков достигается при значении  $Q_T$ , равном не единице, а чуть выше единицы в области, где доминирует диск, и 2—3 на его периферии, где доминирует гало [4].

Рассмотрим теперь, к каким выводам приводят оба описанных выше метода. Начнем с интегральных оценок отношения  $M_*/L$  для звездных дисков и интегрального отношения  $M/L$  для галактик в пределах их оптических границ. Массовые оценки отношения  $M/L$  можно получить, если использовать для оценки  $M$  интегральную ширину радиолинии  $W_{\text{H I}}$  нейтрального водорода. Пусть известна ширина радиолинии  $W_{\text{H I}}$  и угол наклона  $i$  оси диска к лучу зрения. Тогда можно записать:

$$M / L \approx W_{\text{H I}}^2 R_0 / (L \sin^2 i).$$

Коэффициент слабо зависит от модели распределения вещества в галактике, и примерно равен единице. Если массу оценивать в единицах массы Солнца, а светимость — в единицах светимости Солнца, то отношения массы к светимости в диапазоне  $B$  для абсолютного большинства галактик окажутся заключенными в пределах от 1 до 10. Более высокие значения  $M/L_B > 10$  в пределах оптических границ встречаются очень редко и почти исключительно среди карликовых галактик или галактик низкой поверхностной яркости, где они изредка достигают нескольких десятков единиц, что говорит о преобладании темного гало в них. Так, в каталоге близких галактик Караченцева и др. [8] среди примерно сотни галактик со светимостью не ниже  $M_B = -16^m$ , т. е. не относящихся к предельно слабым карликам, содержится всего две (!) галактики с  $M/L_B > 10$ .

На рис. 4 для большого числа (около 1300) галактик сопоставлены отношения  $M/L_B$ , полученные по приведенной выше формуле, с интегральными исправленными за поглощение показателями цвета галактик  $(B - V)_0$  (см. [3]). Жирной линией на рис. 4 показана зависимость, которая следует из эволюционного моделирования звездных систем согласно работе [5]. Верхний конец линии соответствует галактикам, содержащим лишь старые звезды, нижний — галактикам с интенсивным звездообразованием.

Несмотря на разброс точек на диаграмме, большая часть галактик образует четко выраженную последовательность, расположенную над теоретически рассчитанной зависимостью под углом к ней. Значительный «отскок» некоторых точек от общей зависимости во многих

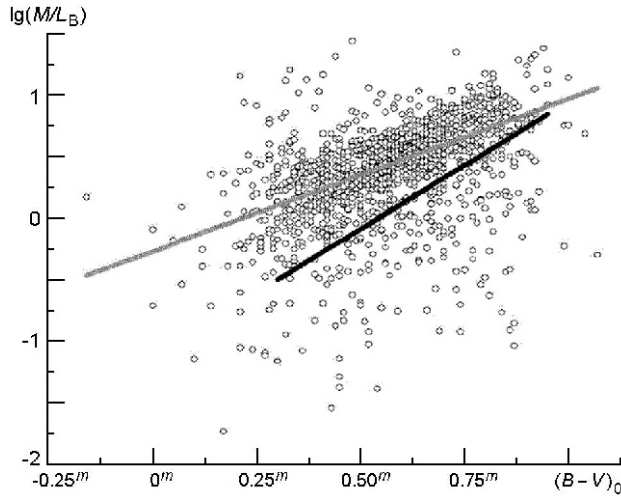


Рис. 4. Зависимость между интегральным показателем цвета галактик и отношением «масса/светимость» в пределах оптического радиуса  $R_{25}$ . Жирная линия — модельная зависимость для звездных систем с различным темпом затухания звездообразования согласно [3]

случаях может быть реальным, но часто он связан с ошибкой оценки массы по ширине линии, например из-за сильных некруговых движений газа. Различие двух зависимостей — наблюдаемой и модельной — естественно объяснить наличием темной массы в галактиках, которая увеличивает  $M/L_B$  (для небольшой части карликовых галактик существенную роль может также играть масса газа). Из сравнения наклона двух прямых на диаграмме следует, что доля темной массы по отношению к массе звездного населения в пределах радиуса  $R_{25}$  систематически уменьшается от  $M_{\text{dark}}/M_*$  3...5 для голубых галактик, имеющих показатели цвета  $(B - V)_0$  0.3...0.5, до 1.5 и менее для наиболее красных галактик, практически не содержащих молодых звезд.

Остается вопрос — как распределена темная масса внутри галактик? Массы дисков, определенные фотометрическим методом, свидетельствуют о том, что они не содержат такого большого количества «светлого» вещества, которое требуется для объяснения скорости вращения на больших  $R$ . Но достаточно в моделях звездного населения изменить нижний предел масс звезд, как отношение  $M_*/L$ , а следовательно, и модельная оценка массы диска изменятся — ведь маломассивные звезды дают большой вклад в общую массу и совсем небольшой — в светимость. Здесь на помощь приходит второй, динамический метод, базирующийся на оценках дисперсии скоростей звезд диска, поскольку он мало чувствителен к фотометрическим параметрам диска.

Получение радиального профиля дисперсии скоростей — задача несравненно более сложная, чем измерение кривой вращения, и это связано с целым рядом причин. Во-первых, дисперсия скоростей звезд высока лишь для ядра галактики, а в диске она, как правило, в несколько раз меньше, и уже поэтому ее трудно измерить с хорошей точностью. Во-вторых, если скорость вращения оценивается по доплеровскому сдвигу линий, то дисперсия скоростей — по ширине про-

филя звездных линий, которую труднее измерить. Наконец, доплеровское уширение линий определяется не по эмиссиям, что проще, а по совокупности слабых абсорбционных линий в выбранном участке спектра путем их сравнения со спектром старых звезд или с модельными спектрами звездного населения галактик.

По указанным причинам исследовано не так много галактик, где дисперсии скоростей звезд удалось проследить до достаточно больших расстояний от центра. В России такие работы ведутся на 6-метровом телескопе БТА (САО РАН). Использование современной наблюдательной техники позволяет за время накопления света около двух часов получить спектр, по которому можно проследить радиальное изменение скорости вращения и дисперсии скоростей до расстояния в несколько радиальных шкал диска, хотя точность оценки для больших  $R$ , конечно, падает. Как пример на рис. 5 показаны распределения скорости вращения и дисперсии скоростей диска вдоль большой оси линзовидной галактики NGC 1167 с тонкой псевдоспиральной структурой, полученные на БТА с помощью спектрографа с длинной щелью [1]. При наличии не одного, а двух или нескольких спектральных разрезов галактики с высоким отношением сигнал/шум появляется возможность определить отдельно дисперсию скоростей звезд по каждой из трех осей:  $C_r(R)$ ,  $C_\theta(R)$ ,  $C_z(R)$ . А сравнение с модельными спектрами звездного населения позволяет оценить не только скорость вращения и дисперсию скоростей звездного диска, но и такие параметры, как характерный возраст и химический состав звезд [7]. К сожалению, эта процедура до сих пор выполнена лишь для очень небольшого числа галактик.

Если известны кривая вращения звезд и/или газа, а также профили дисперсии скоростей, то методом  $N$  тел можно построить динамическую модель галактики и выяснить, насколько далеко состояние звездного диска от предельно (маргинально) устойчивого для гравитационных и изгибных возмущений, и какова должна быть минимальная масса темного гало для обеспечения устойчивого равновесного состояния на всех  $R$  [2]. Однако если не ставить целью создание динамической модели всей галактики, имеет смысл упростить задачу и рассмотреть условия устойчивости только для зоны вблизи  $R \approx 2R_0$ , где вклад диска в радиальный градиент гравитационного потенциала максимален. Для этого расстояния, как показывают численные эксперименты, параметр  $Q_T$  в уравнении (2), требуемый для устойчивости диска конечной толщины, слабо зависит от принятой модели и составляет 1.2—1.5 [4]. В предположении маргинальной устойчивости из (2) можно оценить максимальную поверхностную плотность диска на данном расстоянии, и, зная из фотометрии или анализа кривой вращения значение радиальной шкалы  $R_0$ , определить верхний предел массы диска, решив тем самым задачу о возможном вкладе темного гало в кривую вращения. При этом, если диск динамически не перегрет, и действительно близок к маргинально устойчивому состоянию

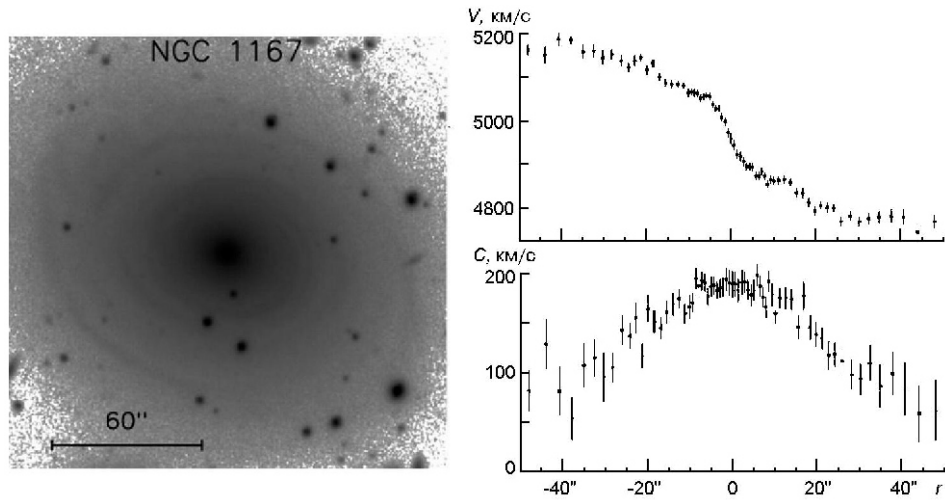
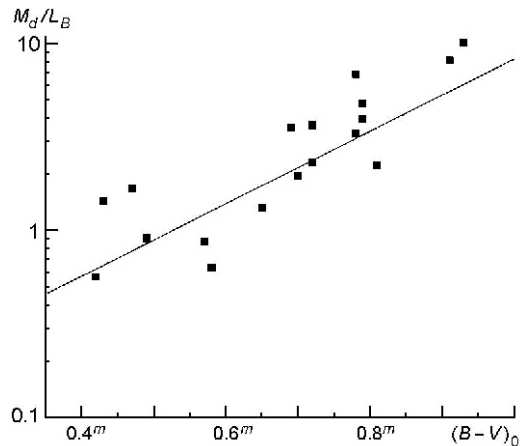


Рис. 5. Изображение NGC 1167 (контраст деталей усилен) и радиальный профиль скорости вращения  $V$  и дисперсии скорости  $C$  звезд вдоль большой оси по наблюдениям на БТА [1]

(кстати, наиболее благоприятному для распространения в нем спиральных волн плотности), то полученная масса диска должна быть близка к массе, оцененной из фотометрической модели, т. е. соответствовать светимости и цвету галактики.

На рис. 6 на основе опубликованных данных по дисперсии скоростей звезд спиральных галактик представлена диаграмма «цвет — отношение массы диска к светимости», где масса диска  $M_d$  найдена описанным выше способом — в предположении маргинальной устойчивости диска, т. е. по сути является верхним пределом массы  $M_*$  его звездной составляющей. Показатели цвета и светимости исправлены за селективное ослабление света в Галактике и за наклон галактических дисков к лучу зрения. Диаграмма построена согласно работе [2] с добавлением новых данных. Прямая линия — модельная зависимость для звездного населения с различным относительным содержанием звезд различного возраста по [5]. Точность определения интегральной массы  $M_m$  не очень высока и составляет в среднем 30—40 % (0.1—0.2 в логарифмической шкале), с чем в значительной мере связан разброс точек на зависимости. Тем не менее, общее согласие между модельной зависимостью и полученными оценками очевидно: найденная масса дисков галактик соответствует ожидаемой, то есть согласуется с ее фотометрическим определением. Отсюда можно сделать вывод о том, что диски рассматриваемых спиральных галактик не содержат больших масс темной материи (иначе для их устойчивости потребовалась бы более высокая дисперсия скоростей), и действительно близки к состоянию маргинальной устойчивости. Последнее означает, что за миллиарды лет жизни галактик механизмы динамического нагрева, связанные, например, с неизбежным погло-

Рис. 6. Зависимость отношения массы диска  $M_d$  к светимости  $L_B$  от интегрального показателя цвета галактики, где масса  $M_d$  оценена для модели диска, маргинально устойчивого на  $R \approx 2R_0$  (согласно [2])



щением небольших галактик или со взаимодействием с соседними системами, для многих галактик не были настолько эффективными, чтобы привести к сильному динамическому нагреву звездного диска. Предположение о маргинальной устойчивости диска дает возможность оценить, хотя и грубо, вклад диска в массу галактики. Так, у рассматриваемых на рис. 6 галактик диск включает в себя от 30 % до более чем 80 % полной массы в пределах оптических границ, остальное приходится на темное гало.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, измерения дисперсии скоростей звезд в дисках галактик приводят к выводу о том, что диски, как правило, близки к маргинально устойчивому состоянию, что позволяет разделить вклад звезд и темного гало в интегральную массу галактики. Однако этот вывод применим далеко не ко всем дисковым галактикам. Например, он не подходит к некоторым галактикам, диски которых уже давно сформировались и почти не содержат молодых звезд. Прежде всего имеются в виду линзовидные галактики — бывшие спиральные галактики, по тем или иным причинам потерявшие запасы межзвездного газа. Анализ их абсорбционных спектров показал во многих (но не во всех!) случаях существенное превышение дисперсии скоростей звезд диска над минимальным значением, требующимся для их устойчивости. Это прямое свидетельство внешних воздействий или слияний галактики с более мелкими спутниками, при которых звездный диск «нагревался» и одновременно лишался основных запасов межзвездного газа. По данным Ноордермеера [9], исследовавшего вращение дисковых галактик ранних типов по движению звезд и газа, доля темной массы для них в пределах оптического радиуса может быть самой различной — от 10 до 90 %, составляя в среднем 30–50 %, т. е. соотношение «темной» и «светлой» массы практически такое же, как и для спиральных галактик. Впрочем, линзовидные галактики не

образуют однородной по свойствам группы, и сильно отличаются друг от друга как по физическим параметрам, так и по причинам потери основной массы холодного газа.

Таким образом, анализ кривых вращения с использованием данных фотометрии и критерия гравитационной устойчивости диска позволяет сделать определенные выводы как об особенностях эволюции галактик, так и о массе их темного гало. Подтверждается существование «темной» среды, на долю которой приходится существенная часть массы галактики. Она сосредоточена в основном за пределами звездного диска, в протяженном гало галактики. При этом относительная масса темного вещества в пределах нескольких фотометрических шкал диска не одинакова даже для галактик одного типа, и в среднем выше у маломассивных галактик и галактик с большой долей молодого звездного населения.

1. Засов А. В., Моисеев А. В., Хоперсков А. В., Сидорова Е. А. Дискосые галактики ранних типов: структура и кинематика // *Астрон. журн.*—2008. **85**, № 2.— С. 99—114.
2. Засов А. В., Хоперсков А. В., Тюрина Н. В. Дисперсия скоростей звезд и оценка массы галактических дисков // *Письма в Астрон. журн.*—2004.—**30**, № 9.— С. 653—662.
3. Сабурова А. С., Шалденкова Е. С., Засов А. В. Спиральные галактики с «нетипичными» значениями отношения массы к светимости // *Астрон. журн.*—2009.—**86**, № 9.—С. 861—863.
4. Хоперсков А. В., Засов А. В., Тюрина Н. В. Минимальная дисперсия скоростей в устойчивых звездных дисках. Численные эксперименты // *Астрон. журн.*—2003.—**80**, № 2.—С. 387—408.
5. Bell E. F., de Jong R. S. Stellar mass-to-light ratios and the Tully-Fisher relation // *Astrophys. J.*—2001.—**550**, N 1.—P. 212—229.
6. Bottema R. The stellar kinematics of galactic disks // *Astron. and Astrophys.*—1993.—**275**, N. 1.—P. 16—36.
7. Chilingarian I. V., Novikova A. P., Cayatte V., et al. NGC 6340: an old S0 galaxy with a young polar disc // *Mon. Notic. Roy. Astron. Soc.* — 2009.—(a-ph 0904.4606).
8. Karachentsev I. D., Karachentseva V. E., Huchtmeier W. K., Makarov D. I. A catalog of neighboring galaxies // *Astron. J.*—2004.—**127**, N 4.—P. 2031—2068.
9. Noordermeer E. The distribution of gas, stars and dark matter in early-type disk galaxies // Thesis. — Rijksuniversiteit Groningen, 2006.
10. Ryder S. D., Zasov A. V., McIntyre V. L., et al. The peculiar rotation curve of NGC 157 // *Mon. Notic. Roy. Astron. Soc.*—1998.—**293**, N 2.—P. 411—436.
11. Sofue Y., Tutui T., Honma M., et al. Central rotation curves of spiral galaxies // *Astrophys. J.*—1999. **523**, N 1.—P. 136—146.

Поступила в редакцию 01.10.09