

УДК 524.7-327

О ФОРМЕ КРИВЫХ ВРАЩЕНИЯ ГАЛАКТИК, НАБЛЮДАЕМЫХ С РЕБРА

© 2003 г. А. В. Засов^{1*}, А. В. Хоперсков²¹Московский государственный университет²Волгоградский государственный университет

Поступила в редакцию 04.02.2003 г.

Рассматривается влияние эффектов проекции, внутреннего поглощения и дисперсии скоростей газа или звезд на измеряемую кривую вращения галактик, диски которых наблюдаются с ребра. Осесимметричные модели дисков наглядно демонстрируют сильную недооценку скорости вращения во внутренней области галактики, приводящую к появлению протяженного участка, имитирующего почти твердотельное вращение. На тех расстояниях от центра, где поглощение невелико (не более $0.3\text{--}0.5$ зв. вел. кпк^{-1}), профили спектральных линий могут иметь два максимума, и оценка положения максимума, соответствующего более высокой скорости вращения, позволяет получить кривую вращения с минимальными искажениями. Однако в областях с высоким поглощением “высокоскоростной” максимум исчезает, и оценки лучевых скоростей не позволяют воспроизвести действительную форму кривой вращения. В общем случае кривые вращения, получаемые по оптическим данным для галактик, наблюдаемых с ребра, мало пригодны для восстановления распределения массы во внутренних областях, особенно для галактик с крутым градиентом скорости в центральной области. При этом оценка скоростей вращения внешних (прозрачных) областей диска дает правильный результат.

Ключевые слова: галактики — вращение и внутреннее поглощение.

THE SHAPE OF THE ROTATION CURVES OF EDGE-ON GALAXIES, *by A. V. Zasov and A. V. Khoperskov*. We consider the effects of projection, internal extinction, and gas or stellar velocity dispersion on the measured rotation curves of galaxies with edge-on disks. Axisymmetric disk models clearly show that the rotation velocity in the inner galaxy is highly underestimated. As a result, an extended portion imitating almost rigid rotation appears. At galactocentric distances where the extinction is low (i.e., does not exceed $0.3\text{--}0.5^m \text{ kpc}^{-1}$), the line profiles can have two peaks and estimating the position of the peak that corresponds to a higher rotation velocity allows the rotation curve to be obtained with minimum distortions. However, the high-velocity peak disappears in high-extinction regions and the actual shape of the rotation curve cannot be reproduced using radial-velocity estimates. In general, optical rotation curves for edge-on galaxies are of little use in reconstructing the mass distribution in the inner regions, particularly for galaxies with steep velocity gradient in the central region. In this case, estimation of the rotation velocities yields correct results for the outer (transparent) disk regions.

Key words: galaxies — rotation and internal extinction.

1. ВВЕДЕНИЕ

Кривая вращения $V(r)$ является важнейшей характеристикой дисковых галактик, которая не только дает информацию о распределении массы, но и позволяет использовать эмпирические методы определения светимости (расстояния) по максимальной скорости вращения. Для спиральных галактик, диски которых наблюдаются с ребра, вопрос о построении кривой вращения является

нетривиальным из-за двух осложняющих факторов: эффекта проекции и эффекта внутреннего поглощения. Оба эффекта зависят как от формы кривой вращения, так и от распределения источников излучения и поглощающей среды в галактике.

Кривые вращения, а точнее — одномерные распределения лучевой скорости по диску, получены для многих галактик, наблюдаемых с ребра. Отличительной особенностью очень многих из них является протяженная область “твердотельного” вращения (монотонного роста скорости). Почти линейный рост лучевой скорости до больших рас-

*Электронный адрес: zasov@sai.msu.ru

стояний от центра отмечался еще в первых работах по определению кинематики галактик с тонкими дисками (Гоад, Робертс, 1981). Эти авторы, по-видимому, первыми обратили внимание на то, что твердотельная часть кривой вращения в галактиках, видимых с ребра, может являться артефактом, и что эффекты неоднородного распределения пыли требуют проведения огибающей линии, ограничивающей сверху положение точек на диаграмме “радиус—измеренная скорость вращения”. Влияние поглощения на форму кривой вращения было наглядно продемонстрировано в работе Босмы и др. (1992), где проведено сравнение кривых, полученных по оптическим и радиоданным, для двух галактик, видимых с ребра (NGC 801 и NGC 100). Как было продемонстрировано этими авторами на примере простых моделей дисков, содержащих пыль, именно поглощение, а не рассеяние света на пыли влияет на наблюдаемые оценки скорости вращения. При этом эффект поглощения существенно уменьшается лишь в том случае, если ориентация диска более чем на 5° отличается от ориентации “с ребра”.

Позднее проведенное для большого числа галактик сравнение формы кривой вращения во внутренней области со степенью наклона диска к лучу зрения подтвердило, что градиент измеряемой скорости вращения во внутренней области галактики действительно ниже у сильно наклоненных дисков, и этот эффект сильнее проявляется для галактик высокой светимости, обладающих в среднем более сильным внутренним поглощением (Джиованелли, Хайнес, 2002).

Любопытно, что влияние распределенной пылевой среды на оценку массы при достаточно высокой оптической толщине может оказаться существенным не только для дисковых, но и для медленно вращающихся (эллиптических) галактик (см. Баес, Дежонг, 2002 и ссылки в этой работе).

Более 300 кривых вращения для галактик, наблюдаемых с ребра (из каталога плоских галактик FGC, Караченцев и др., 1993), было получено на 6-м телескопе САО РАН (см. Макаров и др., 2000 и ссылки в этой работе). Результаты измерений подтвердили, что подавляющее большинство этих галактик имеют очень протяженный “твердотельный” участок, иногда простирающийся до внешней границы измеряемой кривой, хотя имеются и исключения (Макаров и др., 1997а, б, 1999). Как пример, на рис. 1а показано несколько достаточно типичных кривых вращения для галактик по работе Макарова и др. (1997а). Рис. 1б и 1в иллюстрируют более редко встречающиеся особенности кривых, которые обсуждаются ниже (в пунктах 3.2 и 3.3). В связи с интерпретацией кривых вращения возникает вопрос — как влияют различные эффекты на измеряемые скорости вращения таких галактик, и

можно ли непосредственно из наблюдений получить действительную кривую вращения галактики и оценку максимальной скорости вращения дисков?

В данной работе для осесимметричных моделей галактик с заданными кривыми вращения рассчитываются распределения лучевой скорости $V_s(x)$ вдоль большой оси диска, видимого с ребра, при различных предположениях о законах пространственного распределения плотности газа (звезд) — как при отсутствии, так и наличии внутреннего поглощения в галактике.

2. МОДЕЛИ ГАЛАКТИК

2.1. Модели без поглощения

Случай с малым внутренним поглощением может реально относиться к измерениям скорости вращения в радиодиапазоне, либо в галактиках с очень низким содержанием межзвездной среды, либо же к измерениям скоростей внешней зоны с низкой оптической толщиной τ .

При отсутствии внутреннего поглощения максимальные значения доплеровского компонента скорости вращения относятся к областям, находящимся вблизи линии, перпендикулярной лучу зрения, которая пересекает галактику по диаметру (условно будем называть ее большой осью галактики). Поэтому оценки максимальной скорости источников на данном расстоянии от центра должны представлять собой (с точностью до значения дисперсии скоростей) действительную скорость кругового вращения. Однако это значение скорости в общем случае не обязательно будет соответствовать центру тяжести (барицентру) профиля линии, поскольку его положение зависит от распределения не только скорости, но и объемной светимости вдоль луча зрения.

Будем считать, что скорость вращения диска, как и его яркость в спектральной линии, используемой для измерения скоростей, распределены осесимметрично. Обозначим объемную светимость в линии через $S(r)$. Пусть ось x соответствует большой оси галактики, а ось y направлена вдоль луча зрения (рис. 2а). Тогда средняя скорость, взвешенная по удельной светимости вдоль луча зрения, определяется выражением

$$V_s(x) = \frac{\int_{-y_0}^{y_0} S(r) V_\varphi(r) \frac{x}{\sqrt{x^2 + y^2}} dy}{\int_{-y_0}^{y_0} S(r) dy}. \quad (1)$$

здесь R — радиус диска, $r = \sqrt{x^2 + y^2}$, а предел интегрирования $y_0 = \sqrt{R^2 - x^2}$.

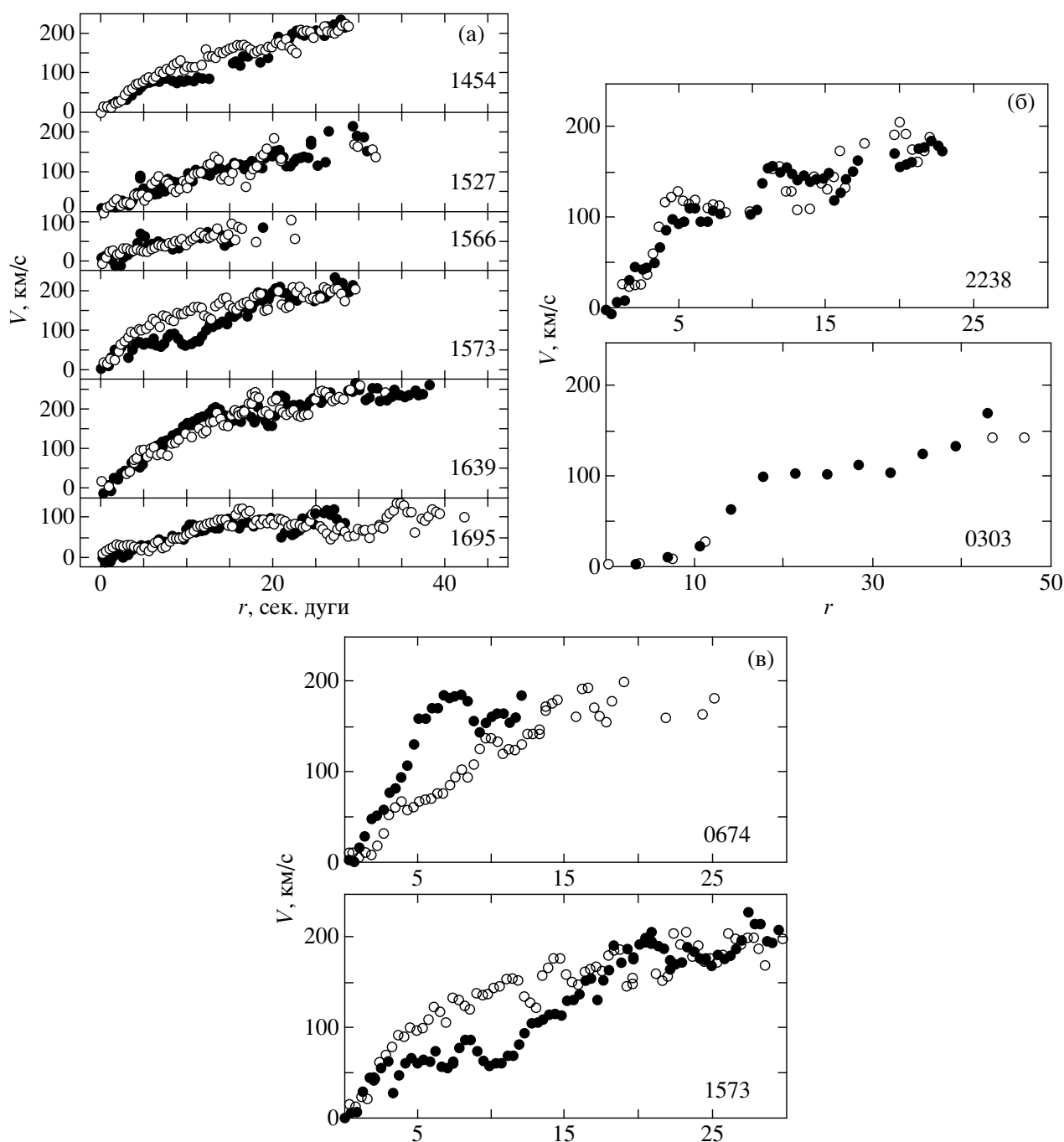


Рис. 1. Примеры наблюдаемых кривых вращения для галактик, видимых с ребра: (а) — типичный вид кривых вращения; (б) — примеры галактик со “ступенькой” на кривой вращения; (в) — примеры галактик с неодинаковым распределением измеренных скоростей по разные стороны от центра. Черные кружки соответствуют удаляющейся стороне галактики, светлые — приближающейся (по работам Макарова и др., 1997, 1999; Караченцева и Чжоу Шу, 1991). Указан номер галактики в каталоге FGC (Караченцев и др., 1993).

Ввиду осевой симметрии моделей ниже будем считать расстояние от центра диска в проекции x всегда положительным.

Рассмотрим, как действительная форма кривой вращения $V_\varphi(r)$ и особенности распределения

вещества в диске влияют на зависимость $V_s(x)$ (наблюдаемую кривую вращения).

Пусть объемная светимость диска в линии, по которой оценивается скорость, уменьшается с r по экспоненциальному закону:

$$S(r) = S_0 \exp(-r/L), \quad (2)$$

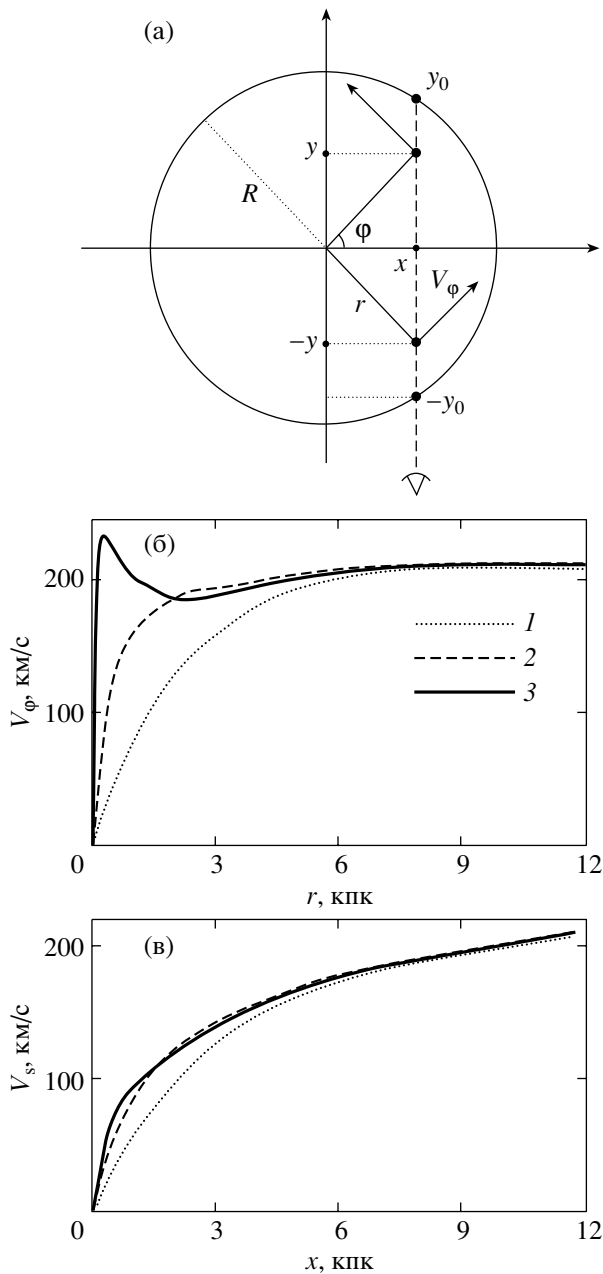


Рис. 2. (а) — К вопросу об определении скорости вращения диска с радиусом R , наблюдаемого с ребра. В точке (x, y) диск имеет скорость вращения V_ϕ . Интегрирование проводится от $-y_0$ до y_0 . (б) — Три типа кривых вращения V_ϕ , рассматриваемые в работе (см. также текст). (в) — Распределение лучевой скорости относительно центра галактики вдоль ее большой оси $V_s(x)$ для кривых вращения, показанных на рис. 2б, без учета внутреннего поглощения.

где L — радиальная шкала изменения яркости диска в эмиссионной линии, а в случае определения скоростей по абсорбционным линиям — радиальная шкала звездного диска. Примем для определенности $R = 4L$. На расстояниях $r > R$ вклад

диска в наблюдаемый профиль линии будем считать равным нулю. Для иллюстрации ограничимся рассмотрением трех типов кривых вращения, формы которых различаются во внутренней области диска ($r \lesssim 2L$) (рис. 2б):

1) кривая вращения $V_{\phi 1}$, характерная для галактик без массивного балджа (точечная линия на рис. 2б).

2) кривая второго типа $V_{\phi 2}$, реализующаяся в случае маломассивного балджа, ответственного за более крутой градиент скорости во внутренней области галактики (штриховая линия на рис. 2б).

3) кривая $V_{\phi 3}$ с околядерным максимумом скорости вращения (сплошная линия на рис. 2б), который отражает существование массивного концентрированного балджа.

Во всех случаях кривая вращения выходит на плато на больших r .

На рис. 2в изображены радиальные зависимости скорости диска вдоль луча зрения $V_s(x)$, вычисленные по формуле (1), для трех рассматриваемых типов кривых вращения при отсутствии поглощения. Как видим, во всех случаях во всем диске, особенно в центральной области $r \lesssim 2L$, наблюдается значительная недооценка скорости вращения. При этом различие между первым и вторым типами кривых практически исчезает, а недооценка скорости вращения оказывается наибольшей для кривой вращения $V_{\phi 3}$. Только на самом краю диска имеет место примерное равенство $V_s \simeq V_\phi$. Поскольку кривые изменения скорости $V_s(x)$ очень слабо зависят от реальной формы кривой вращения $V_\phi(r)$, они не позволяют восстановить распределение массы в галактике.

Для любой из принятых зависимостей $V_\phi(r)$ при уменьшении радиальной шкалы яркости в линии L скорость $V_s(x)$ быстрее возрастает, приближаясь к $V_\phi(r)$ (рис. 3а, б). Однако в целом, форма кривой $V_s(x)$ слабо зависит от величины L при любом типе кривой вращения.

Очень часто распределение эмиссионного газа заметно отличается от экспоненциального, особенно в центральной области. Газ во многих спиральных галактиках образует широкое кольцо: плотность экспоненциально спадает только на больших r , а в центральной области наблюдается дефицит газа (ван ден Бош и др., 2000):

$$S(r) \propto r^\beta \exp(-r/L_{\text{gas}}), \quad (3)$$

где значения параметра β лежат в широких пределах $\beta = 0.2-8$ (ван ден Бош и др., 2000).

Модель, включающая газовое кольцо на радиусе $r = L_{\text{gas}}$ при $\beta = 1$, приводит к наблюдаемой кривой вращения $V_s(x)$, показанной на рис. 3а, б

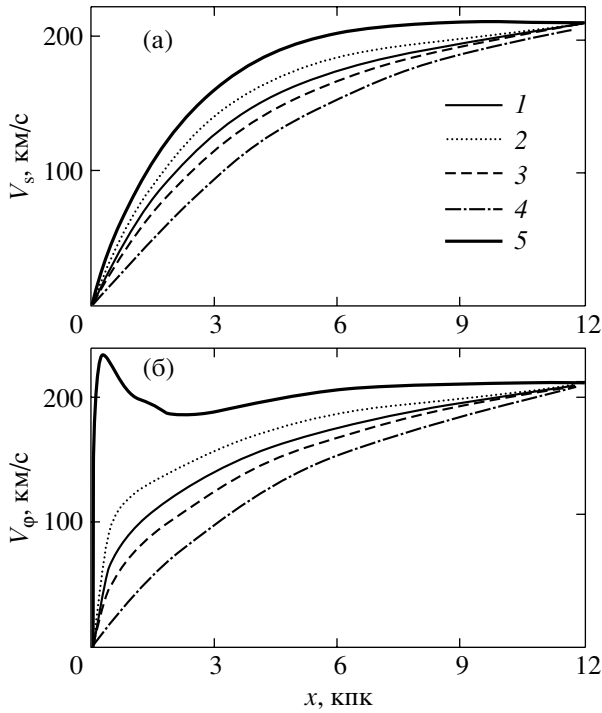


Рис. 3. Распределения лучевой скорости $V_s(x)$ для газового диска с выбранной кривой вращения (толстые линии). Модели различаются значениями радиальной шкалы эмиссионного газа L : 1 — $L = 3$ кпк, 2 — $L = 1.5$ кпк, 3 — $L = 6$ кпк, 4 — $L = 6$ кпк с учетом центрального “кольца”; (а) — для кривой вращения V_φ первого типа (линия 1 на рис. 2б), (б) — для кривой вращения V_φ третьего типа (линия 3 на рис. 2б).

(линия 4). Спад яркости в центральной части галактики вызывает еще более значительное уменьшение измеряемой величины $V_s(x)$. Этот эффект усиливается с ростом параметра β . В результате можно получить практически линейную зависимость скорости вдоль луча зрения для большей части диска.

2.2. Модели с поглощением света

При прохождении излучения сквозь вещество диска вклад от более далеких областей галактики оказывается меньшим, чем от расположенных ближе к наблюдателю. На рис. 4 для иллюстрации показаны линии равной оптической толщины τ . Для света, распространяющегося в диске под малым углом к его плоскости, галактики, содержащие пыль, практически непрозрачны. Поэтому можно считать, что от наиболее удаленной зоны излучение не доходит до наблюдателя. Излучение средней области, на которую приходятся максимальные значения проекции скорости вращения на луч зрения, существенно ослаблено, причем, чем ближе к центру системы, тем сильнее влияние поглощения. В результате в центральной области

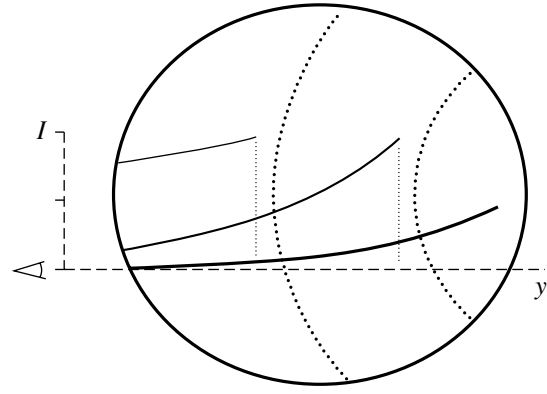


Рис. 4. Схема, демонстрирующая влияние внутреннего поглощения в галактике на измеряемую скорость вращения: пунктир — линии $\tau \approx 1$, сплошные линии — рост τ вдоль луча зрения.

галактики $r \lesssim R/2$ основной вклад в излучение дает ближайшая зона, в которой скорость вдоль луча зрения невелика. С учетом поглощения выражение (1) принимает вид:

$$V_s(x) = \frac{\int_{-y_0}^{y_0} S(r) \exp(-\tau(x, y)) V_\varphi(r) \frac{x}{\sqrt{x^2 + y^2}} dy}{\int_{-y_0}^{y_0} S(r) \exp(-\tau(x, y)) dy}, \quad (4)$$

где величина $\tau(x, y)$, характеризующая оптическую толщину в расчете на отрезок единичной длины в плоскости диска, определяется функцией распределения пыли $f_{\text{dust}}(x, y)$:

$$\tau = \int_{y_0}^y f_{\text{dust}}(x, \xi) d\xi. \quad (5)$$

Для простоты ограничимся осесимметричным экспоненциальным распределением пыли

$$f_{\text{dust}}(x, y) = \alpha_d \exp\left(-\frac{\sqrt{x^2 + \xi^2}}{L_d}\right), \quad (6)$$

где L_d — радиальная шкала распределения поглощающей среды, а α_d — нормировочный параметр. Следуя распределению плотности газа, функция $\tau(x)$ убывает с расстоянием от центра и обращается в ноль на $r = R$. Определим параметр $\tau_0(x)$ как оптическую толщину в расчете на единицу длины (1 кпк) на большой оси галактики на расстоянии $r = x$ от центра. Эта величина, будучи пропорциональной f_{dust} , отражает плотность поглощающей среды на данном расстоянии x . При построении модельных зависимостей лучевой скорости вдоль диска галактики параметр α_d варьировался в пределах от 0 до 6, что соответствует изменению

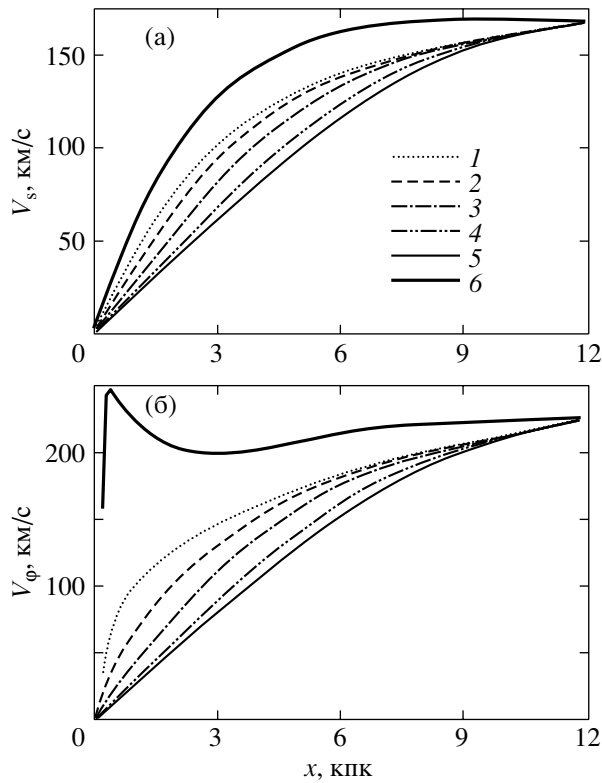


Рис. 5. Распределения лучевой скорости $V_s(x)$ с учетом поглощения для радиальной шкалы распределения пыли $L = L_d = 3$ кпк. (а) — Зависимости $V_\phi(r)$ (модель без балджа) и $V_s(x)$ при различных значениях оптической толщины на $r = 3$ кпк: 1 — $\tau_0 = 0$, 2 — $\tau_0 = 0.37$ кпк $^{-1}$, 3 — $\tau_0 = 0.73$ кпк $^{-1}$, 4 — $\tau_0 = 1.46$ кпк $^{-1}$, 5 — $\tau_0 = 2.2$ кпк $^{-1}$. (б) — То же для кривой вращения третьего типа (см. рис. 2б).

оптической толщины τ_0 на расстоянии $x = 3$ кпк от 0 до 2.2 кпк $^{-1}$.¹

На рис. 5 показаны результаты расчетов по формуле (4) с учетом (2), (5), (6) для радиальных шкал распределения яркости эмиссии и плотности пыли $L = 3$ кпк и $L_d = 3$ кпк, соответственно, при различных значениях параметра τ_0 . Во всех случаях поглощение сильно уменьшает скорость $V_s(x)$ за исключением внешней, относительно прозрачной, области галактики. Вследствие этого происходит “спрямление” наблюдаемой кривой вращения, так что в сильно запыленном диске практически линейный рост $V_s(x)$ может прослеживаться вплоть до внешней границы диска независимо от реальной формы кривой вращения (см. рис. 5). Наличие “кольца” и центральной “дыры” (см. (3)) в распределении газа еще более усиливают указанную

¹Степень непрозрачности, выраженная в единицах τ кпк $^{-1}$, примерно соответствует ослаблению в зв. величинах на 1 кпк.

особенность хода кривой $V_s(x)$ в моделях с поглощением.

3. ВЛИЯНИЕ ХАОТИЧЕСКИХ ДВИЖЕНИЙ

3.1. Модель

В рассмотренных выше моделях считалось, что дисперсия скоростей источников излучения равна нулю и имеется только регулярное вращение. Учтем теперь остаточные скорости, которые будем характеризовать значениями дисперсии радиальных c_r и азимутальных c_ϕ скоростей. Если кривая вращения оценивается по звездным спектрам, то в соответствии с наблюдениями (см., например, Боттема, 1993) можно считать, что как c_r , так и c_ϕ уменьшаются с удалением от центра. Для c_r примем простое выражение

$$c_r = c_{r0} \exp(-r/L_c). \quad (7)$$

Радиальная шкала дисперсии скоростей L_c , как правило, в несколько раз превышает шкалу изменения плотности L . Функцию распределения по скоростям выберем в виде

$$F = F_0 \exp \left\{ -\frac{(V_\phi - v_\phi)^2}{2c_\phi^2} - \frac{v_r^2}{2c_r^2} \right\}, \quad (8)$$

где c_r , c_ϕ — дисперсии скоростей соответственно для случайных компонент скорости v_r и v_ϕ . Профиль спектральной линии, отражающий изменение скорости вдоль луча зрения, при фиксированном значении наблюдаемого расстояния от центра диска галактики x будет определяться выражением:

$$I(v_y, x) = I_0 \int_{-y_0}^{y_0} S(x, y) \exp(-\tau) F(x, y, v_y) dy, \quad (9)$$

где I_0 — нормировочная постоянная, а τ определяется интегралом (5).

3.2. Наблюдаемые кривые вращения для газовых и звездных дисков

Рассмотрим отдельно влияние описанных выше факторов на наблюдаемые кривые вращения динамически горячей (звездный диск) и холодной (газовый диск) подсистемы для галактик, наблюдаемых с ребра. Для газового диска $c_r/V_{\max} \ll 1$ (где V_{\max} — максимальная скорость вращения), и распределение скоростей является изотропным ($c_r = c_\phi$). На рис. 6 показаны профили скорости (доплеровские профили линии) $I(V) = I(v_y, x)$ на различных расстояниях x от центра диска. В отсутствии пыли (рис. 6а) профили сильно различаются для различных значений x . При этом характерной особенностью профилей является их асимметрия,

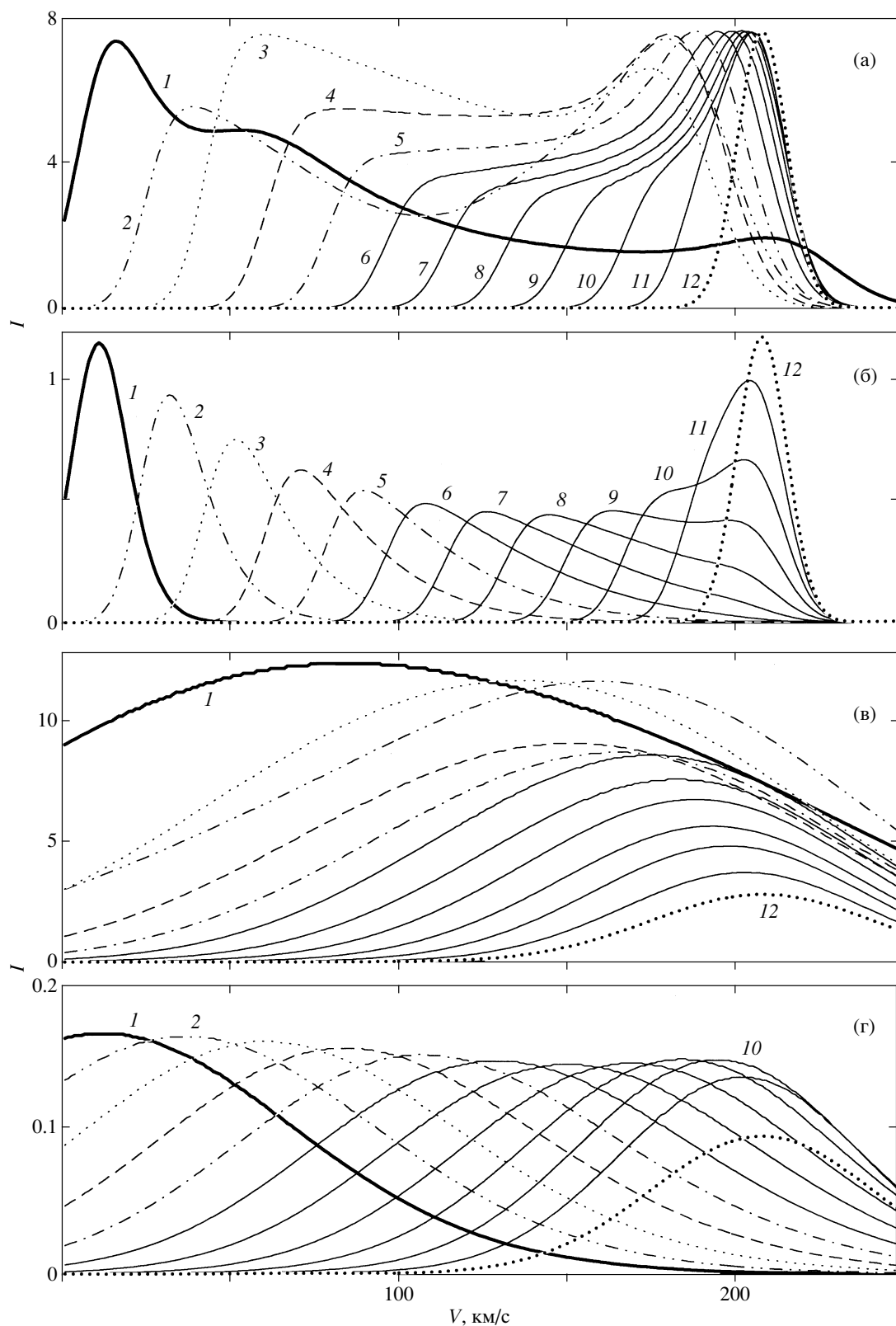


Рис. 6. (а) — Профили спектральной линии $I(V)$ для различных расстояний от центра галактики для модели *газового* диска с дисперсией скоростей $c_r(0) = 15$ км/с и радиальной шкалой $L_c = 9$ кпк (без учета поглощения). Функции $I(V)$ нормированы произвольно. Диск разбит на 12 зон, и числа указывают номер зоны в порядке удаления от центра диска. (б) — То же для модели *сильно запыленного* диска с $\tau_0 = 2.2$ кпк $^{-1}$. (в) — То же для модели *звездного* диска с $c_r(0) = 100$ км/с, $L_c = 3$ кпк без поглощения. (г) — То же для модели *сильно запыленного звездного* диска с $\tau_0 = 2.2$ кпк $^{-1}$.

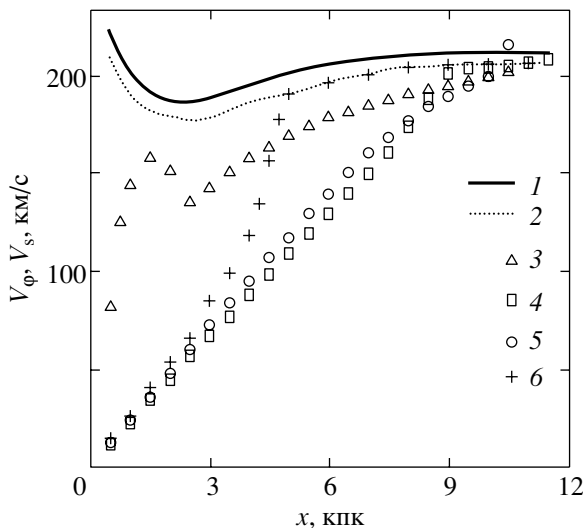


Рис. 7. Заданная кривая вращения галактики ($V_\varphi(r)$, кривая 1) в сравнении с "измеряемыми" скоростями вращения $V_s(x)$, построенными по максимумам функции $I(V)$ (см. текст) для следующих моделей: 2 — модель газового диска без поглощения, 3 — модель звездного диска без поглощения, 4 — модель газового диска с сильным поглощением ($\tau_0 = 2.2$ кпк $^{-1}$), 5 — модель звездного диска с сильным поглощением ($\tau_0 = 2.2$ кпк $^{-1}$), 6 — модель газового диска со слабым поглощением ($\tau_0 = 0.73$ кпк $^{-1}$). Во всех случаях радиальная шкала распределения газа и пыли принята равной 3 кпк, а величина τ_0 относится к 3 кпк.

а для центральной области (кривые 1–3 на рис. 6а) — наличие двух максимумов или длинного крыла со "ступенькой" вместо второго максимума (кривые 4–7). Первый максимум (на больших скоростях) обусловлен быстрым вращением вещества в области $|\varphi| \ll 1$ вблизи "большой оси" (см. рис. 2а). Второй максимум или "ступенька" (в области меньших скоростей) связаны с двумя факторами: с наличием остаточных скоростей и в большей степени с сильным уменьшением проекции V_φ на луч зрения при $|\varphi| > \pi/4$.

В сильно запыленном диске ситуация качественно меняется (рис. 6б). Все профили $I(V)$ в центральной области обладают только одним максимумом (из двух максимумов, имевших место в предыдущем случае, остается лишь соответствующий более низкой скорости). Максимум на более высокой скорости возникает лишь в том случае, когда поглощение достаточно мало, чтобы позволить наблюдать области вблизи большой оси на данном расстоянии x .

Для звездного диска дисперсия скоростей выше, чем для газа. Для осесимметричной модели справедливо соотношение $c_\varphi = \frac{\alpha}{2\Omega} c_r$, где эпитцилическая частота α и угловая скорость Ω вычисляются по зависимости $V_\varphi(r)$. В случае звездного

диска с дисперсией радиальных скоростей звезд в центре $c_r(0)/V_{\max} = 0.5$ распределения $I(V)$ (где $I(V)$ берется по модулю, поскольку речь идет об абсорбционных линиях) приведены на рис. 6в, г. И в этом случае, как и в случае эмиссионного газа, при наличии поглощения максимальные значения $I(V)$ смещаются в область меньших скоростей.

Сложная форма профилей линии приводит к различию в оценках лучевой скорости по измерению длин волн, соответствующих максимуму интенсивности, и длин волн "барицентра" линии. На рис. 7 показаны зависимости $V_\varphi(r)$ и $V_s(x)$, построенные по положению максимумов у профилей $I(V)$, приведенных на рис. 6а, б, в, г. В соответствии со сказанным выше, при наличии двух максимумов выбирался тот, который связан с более высокой скоростью. В модели для газового диска без поглощения (рис. 6а) при таком способе оценки скорости различие между реальной скоростью вращения V_φ и $V_s(x)$ (кривая 1 и 2 на рис. 7) оказывается малой и для рассматриваемого случая не превышает 7% (см. рис. 7)

Для звездного населения с большой дисперсией скоростей $c_r(0)/V_{\max} = 0.5$ разность $V_\varphi - V_s(x)$ существенно выше, однако и в этом случае наличие внутреннего максимума на кривой вращения хорошо прослеживается (кривая 3), хотя его амплитуда заметно меньше.

Таким образом, подход, основанный на определении максимума $I(V)$, дает более правильный результат при построении кривой вращения, чем рассмотренный в разделе 2 способ средневзвешенного значения лучевой скорости, определяемой по "барицентру" спектральной линии. К сожалению, изменение формы профиля линии с точностью, достаточной для детального сопоставления с представленными модельными профилями, требует трудно реализуемого спектрального разрешения. К тому же в реальных галактиках профили линии обычно искажены неоднородным распределением эмиссионных областей и поглощающей среды. Однако асимметрия профиля, если таковая присутствует, вполне может быть измерена и принята во внимание при оценке скорости.

В сильно запыленном диске и для газового и для звездного населения зависимости $V_s(x)$, найденные двумя методами, мало различаются (кривые 4 и 5 на рис. 7). В обоих случаях получаемая кривая $V_s(x)$ не дает правильного представления о форме действительной кривой вращения во внутренней области диска.

Наиболее интересен промежуточный случай, когда в центральной области галактики поглощение сильно (профиль линии имеет только один максимум — на малых скоростях), а, начиная с некоторого значения x , существенный вклад в

излучение дают области вблизи большой оси, ответственные за появление максимума с высоким значением лучевой скорости. В этом случае кривая вращения, построенная по положению максимумов в профилях линии, обнаруживает резкий “скачок” — от скоростей, существенно меньших скорости вращения, к скоростям, близким к последней (кривая 6 на рис. 7). Чем меньше поглощение в галактике, тем ближе к центру осуществляется этот переход. Варьируя значения τ_0 , мы получили для рассматриваемых моделей, что подъем измеряемой скорости вращения происходит на таком радиусе r , на котором поглощение падает ниже 0.3–0.5 зв. величины на кпк. Заметим, что подобная ступенька на кривой вращения действительно наблюдается у ряда галактик, видимых с ребра (см. пример на рис. 16)

Расчеты, описанные в пунктах 3.2, 3.3, относятся к кривой вращения $V_{\varphi,3}$ (см. рис. 26). Для случаев $V_{\varphi,2}$ или $V_{\varphi,1}$ основные выводы сохраняют свою силу.

3.3. Модели с неоднородным распределением пыли

Как показывают наблюдения, распределение пыли по диску галактик часто носит сильно несимметричный и неоднородный характер на мелких масштабах ($\ll L$). Для иллюстрации, рассмотрим модель, в которой поглощающие области распределены “пятнами”, раскиданными случайным образом по диску. Концентрация пыли в i -ом облаке ($i = 1, \dots, m$) с координатами центра $(x_d^{(i)}, y_d^{(i)})$ будем характеризовать величиной $\tau^{(i)}$, которая подчиняется закону (6). Размеры облаков $l_d^{(i)}$ в рассматриваемой модели задавались случайно из интервала $0.1L \leq l_d^{(i)} \leq 0.5L$.

На рис. 8 показана радиальная зависимость скорости $V_s(x)$ в модели с $m = 50$, $\tau_0 = 2.2$ (символы 3 и 4). Очевидно, что разброс точек или неровная форма кривой $V_s(x)$, несимметричной относительно центра галактики, является результатом существования случайно расположенных коридоров прозрачности, позволяющих на некоторых направлениях наблюдать области в глубине диска. Амплитуда вариации скорости может быть значительной, и как было предложено в работе Гоада и Робертса (1981), для получения кривой вращения следует провести верхнюю огибающую точек на диаграмме $V_s(x)$, но и в этом случае форма кривой может быть прослежена лишь приблизительно. Если средняя плотность пыли достаточно мала, так что мы наблюдаем на различных расстояниях x области, лежащие вблизи большой оси, то такая процедура действительно дает возможность получить кривую вращения. Однако это скорее относится ко внешним областям галактики, где τ_0 мало.

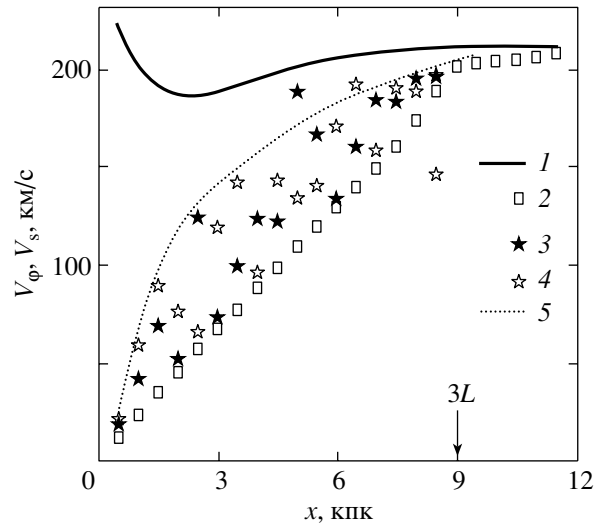


Рис. 8. Радиальная зависимость действительной скорости вращения для модельной галактики (V_φ , кривая 1) и “измеряемых” значений скорости для галактики, видимой “с ребра” (то же, что и на рис. 7) для следующих моделей: 2 — газовый диск с сильным поглощением и “гладким” распределением пыли, 3 и 4 — диск с теми же параметрами и хаотическим распределением поглощающих областей (заполненные и незаполненные символы относятся к двум половинкам диска), 5 — аппроксимационная кривая.

В рассматриваемой модели даже огибающая точек на диаграмме $V_s - r$ (точечная линия на рис. 8) оказывается далекой от заданной формы кривой вращения.

Другой эффект, создаваемый неоднородностью в распределении пыли, естественно ожидать для галактик с развитой спиральной структурой. Определенная ориентация спиральных ветвей, к которым концентрируется межзвездная среда, приводит к различной прозрачности диска по разные стороны от центра. Там, где спиральная ветвь находится на стороне галактики, обращенной к наблюдателю, луч зрения проникает в диск на меньшую глубину, что уменьшает оценку скорости вращения. Это приводит к тому, что измеряемые кривые $V_s(x)$ оказываются несимметричными относительно центра. Подобные случаи действительно наблюдаются (см. рис. 1в). Более близкой к действительной кривой вращения следует считать кривую, проведенную по более высоким значениям измеренных скоростей.

Заметим, что все наблюдаемые кривые вращения (зависимости $V_s(x)$) в моделях, рассмотренных как в данном, так и в предыдущих разделах, на больших x выходят на “плато”, соответствующее заданной скорости вращения модельной галактики. Следовательно, измеряемые максимальные скорости вращения дисков, наблюдаемых с ребра, должны мало отличаться от действительных.

4. ОБСУЖДЕНИЕ И ВЫВОДЫ

Простые осесимметричные модели дисков для галактик, видимых с ребра, наглядно демонстрируют, что геометрические эффекты проекции, внутреннее поглощение и дисперсия скоростей являются факторами, которые могут непоправимо исказить наблюдаемую форму кривой вращения, особенно во внутренней области галактики, приближая ее к форме, имитирующей твердотельное вращение. По этой причине наибольшему искажению подвергаются кривые вращения с большим градиентом скорости в центральной области, а наименьшему — галактики низкой массы, у которых кривая вращения обычно монотонно растет до оптических границ диска. Это объясняет, почему во многих случаях получаемые из наблюдений кривые вращения галактик, видимых с ребра, растут почти линейно до периферийных областей диска.

При измерении скорости звездного диска (по абсорбционным линиям) погрешность оценок заметно увеличивается из-за более высокой (по сравнению с газом) дисперсии скоростей звезд диска, и для центральной области галактики ошибка в оценке скорости может составлять 20–50% даже в отсутствие поглощения.

Эффект проекции, также как и эффект поглощения, стремится “спрямить” наблюдаемую кривую вращения, но его роль можно значительно уменьшить, если скорость на данном расстоянии от центра измерять по положению “высокоскоростного” максимума (или “высокоскоростного” обрыва) профиля спектральной линии, а не по ее центру тяжести. В таком случае при отсутствии поглощения действительная форма кривой вращения галактики воспроизводится из наблюдений с хорошей точностью даже для внутренней области диска. Этот способ измерения может быть отнесен к линзовидным галактикам, содержащим мало пыли, и к галактикам, кривые вращения которых строятся по радионаблюдениям.²

К сожалению, низкая яркость эмиссии, неоднородность в распределении эмиссионных областей и поглощающей среды затрудняют измерения формы профилей оптических линий реальных галактик, видимых с ребра, с таким спектральным и пространственным разрешением, которое позволило бы провести детальные сопоставления с модельными профилями. Однако вытекающая из моделей асимметрия или двугорбый характер профилей для областей с умеренным поглощением могут быть обнаружены и приняты во внимание при анализе наблюдаемой кривой вращения (см. пункт 3.2).

²Такой подход близок к методу построения кривой вращения путем проведения огибающей на диаграмме “положение–скорость”, которая строится по радионаблюдениям (envelope-tracing method) (Софю, 1996).

Сильное внутреннее поглощение в диске качественно меняет ситуацию. Как показывают модели, при обоих методах измерения скорости (по положению максимума линии и центра тяжести линии) получается монотонный (почти линейный) рост кривой $V_s(x)$ до расстояний в несколько радиальных шкал изменения яркости L . Двугорбый характер профилей линий пропадает. Эффект только усиливается в случае дефицита газа в центральной зоне галактики. Без использования дополнительных данных реальную форму кривой вращения в области непрозрачности диска уже невозможно восстановить из наблюдений. Переход от заниженных к реальным оценкам скоростей вращения происходит на том расстоянии от центра, где поглощение составляет несколько десятых долей зв. величины на кпк. При этом на наблюдаемой кривой вращения может возникнуть “ступенька”, действительно наблюдаемая в некоторых галактиках (см. пункт 3.2).

Любопытно, что в некоторых галактиках, наблюдаемых с ребра, кривые изменения лучевых скоростей $V_s(x)$ в отличие от ожидаемого, не демонстрируют твердотельного вращения. В этих галактиках центральная область отличается высоким градиентом лучевой скорости (рис. 1в). Такое поведение указывает либо на очень низкое содержание пыли в галактике, либо (что более вероятно) на существенное отличие угла наклона диска от $i = 90^\circ$. Отличия на несколько градусов может быть достаточно, чтобы эффекты проекции и внутреннего поглощения стали несущественными (точная оценка угла, при котором это имеет место, зависит от толщины диска и пространственного распределения как источников, так и поглощающей среды). Заметим, что влияние эффекта проекции зависит не только от угла наклона диска i , но и от ширины щели спектрографа. Так если щель ориентирована вдоль большой оси галактики и ее ширина сопоставима с видимой толщиной диска (точнее — с размером малой оси эллипса, который ограничивает измеряемую область диска), то диск будет восприниматься как наблюдаемый с ребра, даже если угол его наклона отличается от 90° .

Резюмируя, отметим, что хотя формы кривых вращения галактик, наблюдаемых с ребра, оказываются в общем случае мало пригодными для оценки масс отдельных компонент (особенно для галактик с крутым градиентом скорости вращения в центральной области), их анализ не препятствует получению правильной оценки скорости вращения внешних областей диска, а, следовательно, и грубой оценки интегральной массы в пределах достаточно большого радиуса. При этом в некоторых случаях анализ наблюдаемой кривой вращения позволяет получить информацию о распределении поглощающей среды в галактике.

Авторы благодарны Д.И. Макарову за полезные дискуссии и помощь в подборе иллюстраций кривых вращения галактик.

Работа выполнена в рамках гранта Российского фонда фундаментальных исследований (грант № 01-02-17597) и частично финансировалась ФЦНТП “Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития науки и техники” (контракт № 40.022.1.1.1101).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Баес, Дежонг (M. Baes and H. Dejonghe), MNRAS **335**, 441 (2002).
2. Босма и др. (A. Bosma, K.C. Freeman, and E. Athamassoula), Astrophys. J. **400**, L21 (1992).
3. Боттема (R. Bottema), Astron. Astrophys. **275**, 16 (1993).
4. Ван ден Бош и др. (F.C. van den Bosch, B.E. Robertson, and J.J. Dalcanton), Astron. J. **119**, 1579 (2000).
5. Гoad, Робертс (J.W. Goad and M.S. Roberts), Astrophys. J. **250**, 79 (1981).
6. Джиованелли, Хайнес (R. Giovanelli and M.P. Haynes), Astrophys. J. **571**, L107 (2002).
7. Караченцев И.Д., Чжоу Шу, Письма в Астрон. журн. **17**, 321 (1991).
8. Караченцев и др. (I.D. Karachentsev, V.E. Karachentseva, and S.L. Parnovsky), Astron. Nachr. **313**, 97 (1993).
9. Макаров Д.И., Караченцев И.Д., Буренков А.Н., Тюрина Н.В., Короткова Г.Г., Письма в Астрон. журн. **23**, 734 (1997a).
10. Макаров Д.И., Караченцев И.Д., Тюрина Н.В., Кайсин С.С., Письма в Астрон. журн. **23**, 509 (1997b).
11. Макаров Д.И., Буренков А.Н., Тюрина Н.В., Письма в Астрон. журн. **25**, 813 (1999).
12. Макаров и др. (D. I. Makarov, I. D. Karachentsev, and A. N. Burenkov), astro-ph/0006158 (2000).
13. Софю (Y. Sofue), Astrophys. J. **458**, 120 (1996).