

МЛЕЧНЫЙ ПУТЬ КАК ГАЛАКТИКА

В.П.РЕШЕТНИКОВ

Поступила 17 ноября 1999

Принята к печати 10 декабря 1999

На основе литературных данных, а также при предположении, что Млечный Путь удовлетворяет соотношению Талли-Фишера, суммируются основные фотометрические и кинематические характеристики Галактики. Показано, что по совокупности крупномасштабных свойств Млечный Путь является нормальной L^* - галактикой. Вклад скрытой массы в пределах оптического диска Млечного Пути, по-видимому, не превышает 30%. Среди относительно близких объектов отобрано 5 спиральных галактик, которые по своим характеристикам похожи на Млечный Путь.

1. Введение. Мы находимся в звездной системе, называемой Млечный Путь или Галактика. Галактика активно исследуется на протяжении уже, по крайней мере, двух столетий, однако во многих отношениях она изучена еще плохо (в качестве обзоров см., например, [1,2]). Основной проблемой является то, что Солнце расположено внутри Млечного Пути, вблизи его плоскости, и поэтому многие крупномасштабные характеристики (например, светимость, показатели цвета, кривая вращения и т.п.), легко определяемые у других галактик, для него известны недостаточно хорошо.

В данной заметке, руководствуясь предположением о том, что Млечный Путь является *типичной* спиральной галактикой, удовлетворяющей эмпирическим соотношениям, установленным по наблюдениям других галактик, мы суммируем его основные крупномасштабные фотометрические и кинематические характеристики. Будет показано, что современные наблюдательные данные не противоречат предположению о том, что Млечный Путь является вполне ординарной спиральной галактикой Sb-Sc типа.

2. Характеристики диска и балджа. 2.1. Диск Млечного Пути. Крупномасштабная структура звездного диска Галактики обычно моделируется в виде двойного экспоненциального диска, описываемого следующим распределением плотности:

$$\rho(R, z) = \rho_0 \times \exp\left(-\left(R/h_R + z/h_z\right)\right),$$

где ρ_0 - центральная плотность, h_R - масштаб распределения плотности вдоль радиуса, а h_z - масштаб распределения в направлении, перпендикулярном плоскости диска. Оценкам экспоненциальных масштабов h_R и h_z посвящено

множество статей. Наиболее часто для этих оценок используются звездные подсчеты в оптическом и инфракрасном диапазонах, поверхностная фотометрия Млечного Пути в разных цветовых полосах (как наземная, так и выполненная с помощью космических аппаратов), изучение кинематики звезд в окрестности Солнца, исследование толщины слоя нейтрального водорода. Мы не будем делать подробный анализ разных методов, а просто суммируем их основные результаты.

Большинство современных оценок вертикального масштаба h_z вблизи Солнца дают значения в диапазоне 0.2-0.3 кпк (например, [3,4]). Разброс значений h_R гораздо больше. Например, в приведенной Кентом и др. [3] подборке данных разных авторов значения h_R варьируются от 1.8 кпк до 6 кпк. Причин столь большого разброса - помимо ошибок используемых методов - несколько. Например, ван дер Круит [5] для определения радиального масштаба использует найденное им отношение h_R/h_z и величину $h_z = 0.325$ кпк. При принятом им завышенном значении h_z он получил и завышенное значение $h_R = 5.5 \pm 1.0$ кпк. Уменьшение величины h_z до 0.25кпк приводит и к уменьшению значения радиального масштаба - $h_R = 3.9 \pm 1.0$ кпк [6]. Дополнительный разброс вносит также использование в работах разных авторов отличающихся значений расстояния Солнца до центра Галактики - R_\odot (как правило, в пределах 7.5-9кпк). Кроме того, полученные в разных спектральных диапазонах масштабы могут систематически отличаться из-за существования радиальных градиентов возраста и металличности звездного населения диска Млечного Пути, а также влияния поглощения пылью. В других галактиках такое систематическое отличие действительно наблюдается. Например, для 22 спиральных галактик типа Sab и позднее де Гриз [7] нашел, что $h_R(B)/h_R(K) = 1.65 \pm 0.41$. Исследование 37 спиральных галактик Sb и Sc типов показало, $h_R(B)/h_R(K) = 1.49 \pm 0.29$ [8,9].

На рис.1 мы собрали более двух десятков независимых определений радиального масштаба Млечного Пути, упорядоченных в соответствии с годом публикации работы (большая часть соответствующих ссылок приведена в работах [3,6,10]). Там, где это было возможно, величины h_R приведены к $h_z = 0.25$ кпк и к принятому нами значению $R_\odot = 7.5$ кпк. Непрерывной прямой на рисунке показано арифметическое среднее всех измерений - $\langle h_R \rangle = 3.3 \pm 1.1(\sigma)$ кпк. Медианное значение (3.0кпк) мало отличается от среднего. Ограничиваясь данными только девятидесятых годов, мы получаем близкое среднее значение - $\langle h_R \rangle = 3.1 \pm 0.9(\sigma)$ кпк. Измерения в инфракрасном диапазоне в пределах разброса индивидуальных значений не показывают значимого отличия от данных в оптической области. Можно отметить также небольшой систематический тренд оценок h_R - в последние годы, в среднем, получаются меньшие значения радиального масштаба. Суммируя приведенные выше данные, можно заключить, что наиболее вероятным значением радиального масштаба звездного диска Млечного Пути является $h_R = 3 \pm 1$ кпк (см. также

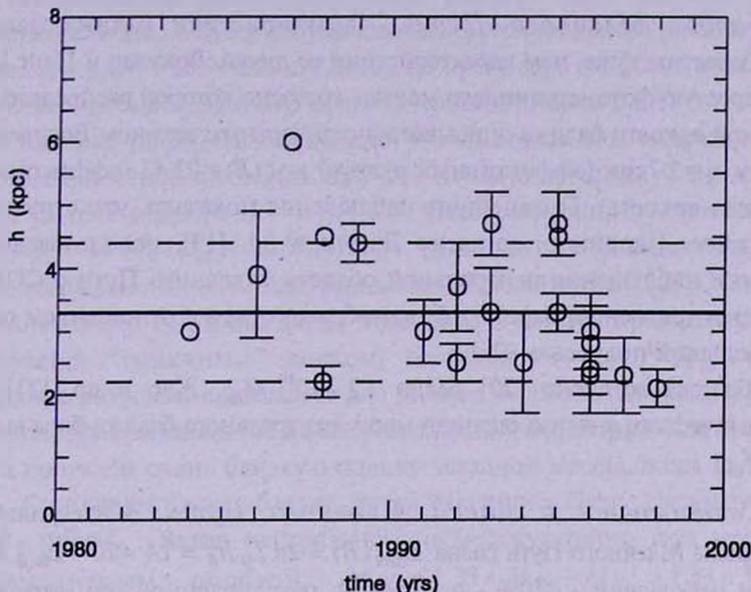


Рис.1. Величина радиального масштаба распределения плотности диска Млечного Пути по данным разных авторов в зависимости от года публикации работы. Непрерывная прямая линия - среднее значение. Пунктирными прямыми показаны $\pm 1\sigma$ границы среднего.

[10]). (Этот вывод относится к *тонкому* звездному диску Галактики. Кроме него существует еще *толстый* диск, обладающий гораздо меньшей плотностью и существенно большим вертикальным масштабом - $h_z \sim 1$ кпк).

Согласно данным, полученным на космическом аппарате Пионер-10, локальная поверхностная яркость Галактики в районе Солнца в полосе B равна $\mu_{R_0}(B) = 23.80 \pm 0.10$ [5]. (Кимесвенгер и др. [11] приводят очень близкое значение - 23.88). Приняв, что $R_0 = 7.5 \pm 1$ кпк [12,14] и $h_R = 3 \pm 1$ кпк, получаем следующую оценку центральной поверхностной яркости диска Галактики - $\mu_0(B) = 21.1 \pm 1.2$ (или, в светимостях Солнца на квадратный парсек, $L_0(B) = 240 L_{\odot, B} / \text{пк}^2$). Это значение в пределах ошибки близко к "каноническому" значению 21.65 для дисков ярких спиральных галактик [15].

Примечательно, что найденные простым усреднением доступных литературных данных характеристики диска Млечного Пути очень близки к "стандартной модели", построенной Кентом и др. [3], - $h_R = 3.0 \pm 0.5$ кпк, $L_0(K) = 978 L_{\odot, K} / \text{пк}^2$ ($\mu_0(K) = 17.5$ при $M_{\odot, K} = 3.41$). Приняв, что для диска Галактики $B-K = 3.5$ (средний показатель цвета для галактик Sab-Scd типов согласно [16]), получаем значение центральной поверхностной яркости диска $\mu_0(B) = 21.0$, почти совпадающее с приведенной выше оценкой.

Протяженность диска Млечного Пути согласно прямым звездным подсчетам Робин и др. [17] составляет $R_{\text{max}} = 12$ кпк (при $h_R = 3$ кпк и $R_0 = 7.5$ кпк). Следовательно, относительный размер диска $R_{\text{max}}/h = 4.0$. Диаметр Галактики в пределах стандартной изофоты $\mu(B) = 25.0$ равен 21.6кпк (при $\mu_0(B) = 21.1$).

2.2. *Балдж Млечного Пути.* Характеристики балджа нашей Галактики известны хуже, чем характеристики ее диска. Вокулер и Пенс [18] построили простую фотометрическую модель, согласно которой распределение поверхностной яркости балджа описывается стандартным законом Вокулера с параметрами $r_g = 2.7$ кпк (эффективный радиус) и $\mu_g(B) = 23.43$ (эффективная поверхностная яркость). Позднейшие наблюдения показали, что структура балджа сложнее. Например, согласно Бинни и др. [19], использовавших инфракрасные наблюдения центральной области Млечного Пути с СОВЕ, балдж является трехосным бароподобным образованием с отношением осей 1:0.6:0.4 и большой полуосью ~ 2 кпк.

Масса балджа согласно [20] равна $1.2 \times 10^{10} M_\odot$. Жао и др. [21] на основе динамического анализа оценили массу центрального балджа-бара выше $\sim 2 \times 10^{10} M_\odot$.

2.3. *Светимость и масса Млечного Пути.* Интегральная светимость диска Млечного Пути равна $L_{\text{disk}}(B) = 2\pi L_0 h_R^2 = 1.4 \times 10^{10} L_{\odot,B}$ (мы пренебрегли небольшой $\leq 10\%$ поправкой, обусловленной тем, что диск имеет конечные размеры). Абсолютная звездная величина диска составляет $M_{\text{disk},B} = \mu_0 - 5 \log h_R - 38.57 = -19.9$. В полосе K полная светимость диска согласно [3] равна $5.5 \times 10^{10} L_{\odot,K}$.

Кент и др. [3], аппроксимировав распределение плотности в балдже Галактики экспоненциальным законом, нашли, что его интегральная светимость в полосе K равна $1.2 \times 10^{10} L_{\odot,K}$. Следовательно, по данным Кента и др. отношение светимостей балджа и диска в полосе K составляет 0.22. Эта оценка близка к приведенной Оллингем и Меррифилдом [14] - 0.27. Среднее значение (≈ 0.25) хорошо согласуется с отношением B/D для галактик Sb-Sc типов [22]. В полосе B у галактик этого типа $B/D \approx 0.2$ [23,22]. Следовательно, оценка светимости балджа составляет $\sim 0.3 \times 10^{10} L_{\odot,B}$. Таким образом, в предположении, что Млечный Путь является типичной галактикой Sb-Sc типа, мы получаем, что его полная светимость в фильтре B равна $\sim 1.7 \times 10^{10} L_{\odot,B}$ (соответствующая абсолютная звездная величина $M_B = -20.1$).

Для независимого контроля найденной на основе простой фотометрической модели полной светимости мы оценили также светимость Млечного Пути по соотношению Талли-Фишера. Согласно Пирсу и Талли [24] галактика с максимальной скоростью вращения $V_{\text{max}} = 200 \pm 30$ км/с (см. п.3) должна иметь абсолютную светимость $M_B = -20.3 \pm 0.5$ ($L(B) = 2.05 \times 10^{10} L_{\odot,B}$), что почти совпадает с полученной выше величиной. Считая оценку по соотношению Талли-Фишера более надежной по сравнению с "фотометрической", мы принимаем ее в дальнейшем в качестве окончательной. При этом найденные ранее полные светимости диска и балджа Галактики должны быть немного увеличены: $L_{\text{disk}}(B) = 1.71 \times 10^{10} L_{\odot,B}$ и $L_{\text{bulge}}(B) = 0.34 \times 10^{10} L_{\odot,B}$. При

фиксированном радиальном масштабе $h_x = 3$ кпк увеличенной полной светимости диска будет соответствовать значению центральной поверхностной яркости $\mu_0(B) = 20.9$. Это значение не противоречит более корректной (хотя и очень неопределенной) оценке, приведенной в п.2.1.

Боттема [25,26] было показано, что звездный диск спиральной галактики с поверхностной яркостью, близкой к “каноническому” значению 21.65, и показателем цвета $B - V = 0.7$ имеет отношение масса-светимость $M/L_B = 1.8 M_\odot/L_\odot = 3.5 M_\odot/L_{\odot,B}$ (для диска Галактики это было подтверждено и непосредственными наблюдениями - [27]). Следовательно, полная масса звездного диска Млечного Пути при предположении, что он является “типичным” диском, составляет $\sim 6 \times 10^{10} M_\odot$. В полосе K отношение масса-светимость для дисков галактик близко к 1 [28]. Отсюда, используя приведенные выше результаты фотометрии Кента и др. [3] в K , мы получаем очень близкую оценку звездной массы диска Галактики.

Суммарная (диск+балдж) масса Млечного Пути, следовательно, равна $\sim 8 \times 10^{10} M_\odot$. Вклад нейтрального и молекулярного газа можно оценить стандартным образом $M_{\text{gas}} = 1.33 \times M_{\text{HI}} + M_{\text{H}_2} = 1.33 \times 3.6 \times 10^9 M_\odot + 2.5 \times 10^9 M_\odot = 7 \times 10^9 M_\odot$. Итоговая масса Галактики (звезды+газ) равна $8.7 \times 10^{10} M_\odot$. В предположении сферического распределения вещества полная динамическая масса Галактики в пределах оптического радиуса M (≤ 12 кпк) $\approx 11.6 \times 10^{10} M_\odot$ (скорость вращения при $R = 12$ кпк взята равной 200км/с). Следовательно, доля “темной” массы в пределах оптического диска Млечного Пути составляет лишь $\sim 1/3$ его “классической” массы (звезды+газ).

3. Кривая вращения. Определению кривой вращения и полной массы Галактики посвящено множество работ (см., например, [29]). Мы рассмотрим лишь вопрос о крупномасштабной форме кривой вращения и свидетельствах присутствия вне диска Галактики значительного количества невидимой - скрытой - массы. (Центральная область Галактики, где по массе доминирует трехосный балдж с не очень надежно установленными характеристиками, рассматриваться не будет).

На рис.2 толстой непрерывной кривой показана полиномиальная аппроксимация кривой вращения Млечного Пути в диапазоне 3.5-17.5кпк согласно [12]. Эта кривая вращения построена по подсистемам нейтрального и ионизованного водорода при $R_\odot = 7.5$ кпк и угловой скорости на расстоянии R_\odot $\omega_\odot = 26.4$ км/с/кпк. При этом наборе параметров линейная скорость вращения центроида Солнца получилась равной $V_\odot = 198 \pm 30$ км/с. Как видно на рисунке, кривая вращения Галактики демонстрирует крупномасштабные волнообразные колебания и слабый рост скорости вращения к периферии (локальный минимум при $R \approx 8-9$ кпк, возможно, связан с тем, что в этой области происходит усечение звездного диска Галактики [13]). У нормальных спиральных галактик со сравнимой с Млечным Путем скоростью вращения

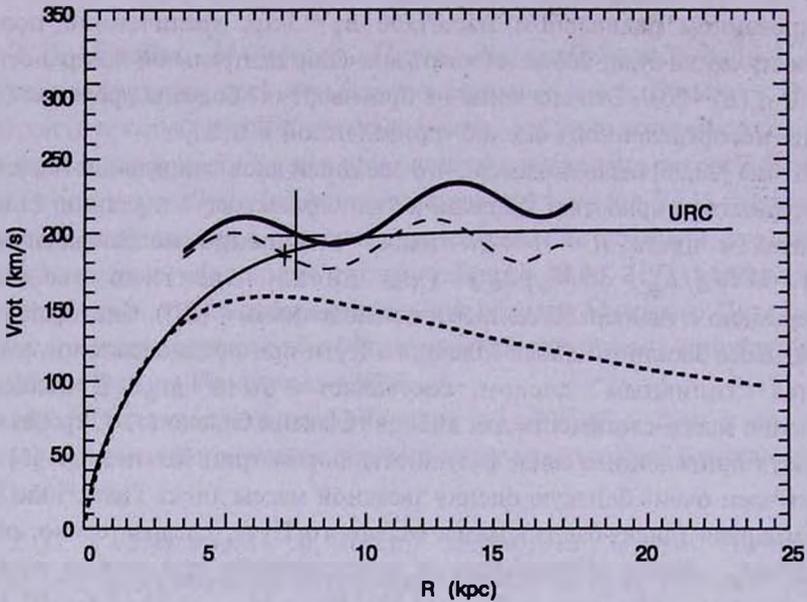


Рис.2. Кривая вращения Млечного Пути (см. текст).

и диаметром такой рост наблюдается очень редко (см., например, [30]). Форма кривой вращения, однако, очень чувствительна к значениям параметров R_0 и ω_0 . В работе [14] было показано, что значения параметров $R_0 = 7.1 \pm 0.4$ кпк, $\omega_0 = 25.92$ км/с/кпк и $V_0 = 184 \pm 8$ км/с лучше согласуются с совокупностью наблюдательных данных о Млечном Пути. Тонкой пунктирной линией на рис.2 показана кривая вращения Никифорова и Петровской [12], пересчитанная к $R_0 = 7.1$ кпк и $\omega_0 = 25.92$ км/с/кпк. При этих значениях параметров кривая вращения Млечного Пути на всем протяжении стала практически плоской, что согласуется с наблюдениями других галактик.

Персик и др. [31] на основе статистического анализа более 1000 кривых вращения спиральных галактик показали, что форма и амплитуда кривой вращения определяются одним параметром - оптической светимостью галактики. Персик и др. приводят выражение для "универсальной" кривой вращения, которая статистически описывает нормальные спиральные галактики в зависимости от их светимости в фильтре I . Приняв, что для Млечного Пути абсолютная звездная величина равна $M_I = -21.8$ (по соотношению Талли-Фишера согласно [24]), мы построили соответствующую реализацию "универсальной" кривой вращения (тонкая непрерывная линия на рис.2). Построенная "универсальная" кривая вращения является практически плоской с $V_{\text{max}} = 200$ км/с. Как видно на рис.2, она хорошо описывает кривую вращения Млечного Пути с $R_0 = 7.1$ кпк и $\omega_0 = 25.92$ км/с/кпк, при $R \geq 5$ кпк.

Пунктирной линией из коротких штрихов на рис.2 показана кривая вращения экспоненциального диска с параметрами, соответствующими характеристикам Млечного Пути, - $h_R = 3$ кпк, $\mu_0(B) = 21.1$, $M/L_{\odot,B} = 3.5$ -

и сжатием 0.1 [32]. (Любопытно, что в области $R \leq 4$ кпк она почти совпала с “универсальной” кривой вращения). Кривая вращения достигает максимума при $R = 2.18h$. Солнце, как видно на рис.2, находится относительно близко к этому максимуму ($R_{\odot} = 2.5 \pm 0.3h$). Для двух показанных на рис.2 положений Солнца вклад вращения диска (≈ 157 км/с) в суммарную скорость вращения достигает 80-85%. Известно, что для дисков спиральных галактик Sb-Sc типов вклад вращения “максимальных” дисков в кривую вращения при $R = 2.2h$ составляет $85 \pm 10\%$ (см. обсуждение в работе [10]). Следовательно, диск нашей Галактики, вероятно, является “максимальным”, то есть во внутренней области Млечного Пути его вклад по массе доминирует над вкладом “темного” вещества.

Остается ли вообще место для какой-либо неизвестной, “скрытой” массы в окрестностях Солнца? Как было показано ранее, вклад диска в скорость вращения при R_{\odot} составляет ≈ 157 км/с. Вклад балджа с массой $1 - 2 \times 10^{10} M_{\odot}$ и разумным масштабом распределения плотности достигает 85-105 км/с. Суммарная скорость вращения - 178-188 км/с - сравнима с наблюдаемой. Следовательно, “скрытой” массы при $R = R_{\odot}$ либо нет, либо ее очень мало. Этот вывод подтверждается и прямыми наблюдательными оценками [33,34].

Кривая вращения Галактики известна лишь до $R \leq 20$ кпк и в этих пределах она, по-видимому, остается плоской. Кривые вращения других галактик, прослеженные до гораздо больших расстояний от центра, как правило, либо слегка “спадают”, либо демонстрируют примерно постоянные скорости вращения (см. примеры на рис.3). Этот факт обычно интерпретируется как

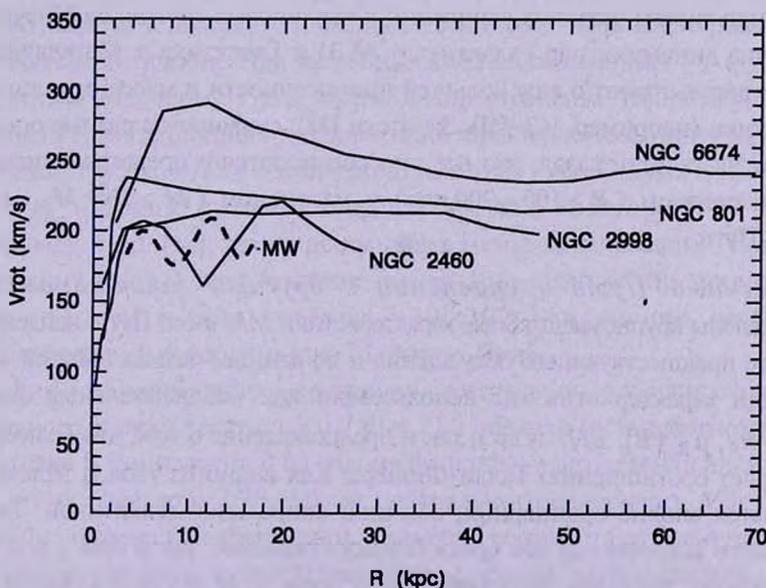


Рис.3. Кривая вращения Млечного Пути (пунктир) в сравнении с другими галактиками (непрерывные линии). Кривые вращения галактик NGC 801, NGC 2460, NGC 2998 и NGC 6674 взяты из диссертации Броилса [56].

свидетельство массивных, протяженных, невидимых гало, окружающих галактики [35]. Кроме формы кривых вращения, существует еще много других аргументов в пользу окружающих спиральные галактики массивных гало (см. обзоры [36,37]). Похож ли Млечный Путь в этом отношении на другие галактики? Далее мы коротко суммируем некоторые наблюдательные свидетельства в пользу того, что вне диска Галактики присутствует значительное количество вещества (см., например, [38,39]).

Одним из наиболее простых *локальных* аргументов в пользу большой протяженности распределения массы в Галактике является значительная скорость убегания звезд в окрестности Солнца - v_e [40]. Масса, заключенная в пределах $R < R_c$, в рамках простой модели со сферическим распределением вещества равна $M(R) = V_c^2 R/G$, где R_c - максимальное расстояние, в пределах которого распределена масса, V_c - скорость вращения (предполагается постоянной) и G - гравитационная постоянная. Тогда скорость убегания при $R < R_c$ будет равна $V_e = V_c \sqrt{2[1 + \ln(R_c/R)]}$. По данным, полученным на HIPPARCOS, $v_e = 400-550$ км/с [41]. Используя среднее значение этой скорости - $V_e = 475$ км/с и $V_c = 200$ км/с, получаем, что гало Галактики простирается, по крайней мере, до $R = 6.2 R_\odot = 46$ кпк, то есть до Магеллановых Облаков. Масса, заключенная в этих пределах, составляет $\sim 4.3 \times 10^{11} M_\odot$, что почти в 4 раза превышает массу, сосредоточенную в пределах оптического диска ($R \leq 12$ кпк). Любопытно, что эти простые оценки протяженности и массы гало Галактики очень близки к результатам гораздо более точного и детального анализа (см., например, [42]).

Динамика систем шаровых скоплений и карликовых спутников Млечного Пути, анализ динамики пар Галактика + М 31 и Галактика + Магеллановы Облака свидетельствуют о еще большей протяженности и массе невидимого гало Галактики (например, [43-45]). Заритски [38], суммировав разные оценки характеристик гало, показал, что все они согласуются с представлением об очень протяженном ($R \geq 100 - 200$ кпк) и массивном ($M \geq 10^{12} M_\odot$) гало Млечного Пути.

4. *Млечный Путь в сравнении с другими галактиками.* В табл.1 приведены крупномасштабные характеристики Млечного Пути, найденные в результате предшествующего обсуждения и по данным разных авторов. При определении характеристик мы использовали как наблюдательные факты (значения h_R , $\mu_{R_c}(B)$, B/D и др.), так и предположение о том, что Галактика удовлетворяет соотношению Талли-Фишера. Как видно из табл.1, Млечный Путь является вполне ординарной, обычной спиральной галактикой. Такие объекты часто встречаются как среди близких галактик, так и при $z \geq 0.5$.

Абсолютная звездная величина Галактики - $M_B = -20.3$ - близка к характеристической абсолютной звездной величине (M^*) в функции Шехтера, аппроксимирующей функцию светимости нормальных галактик (при $H_0 = 60-75$

Таблица 1

ОСНОВНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ МЛЕЧНОГО ПУТИ

Характеристика	Млечный Путь	Литература
Морфологический тип	Sbc	[18]
Абсолютная звездная величина M_v	-20.3 ± 0.5	
Интегральная светимость, B	$2.05 \times 10^{10} L_{\odot, B}$	
Максимальная скорость вращения, V_{\max}	$200 \pm 30 \text{ км/с}$	
M/L_v ($R \leq 12$ кпк)	$5.7 M_{\odot}/L_{\odot, B}$	
$M(\text{HI})$	$3.6 \times 10^9 M_{\odot}$	[61]
$M(\text{H}_2)$	$2.5 \times 10^9 M_{\odot}$	[62]
<i>Звездный диск:</i>		
Радиус, R_{\max}	12 кпк	[17]
$\mu_0(B)$	21.1:	
h	3 ± 1 кпк	
R_{\max}/h	4.0	
Светимость, B	$1.71 \times 10^{10} L_{\odot, B}$	
K	$5.5 \times 10^{10} L_{\odot, K}$	[3]
Масса	$6 \times 10^{10} M_{\odot}$	
<i>Балдж:</i>		
Светимость, B	$0.34 \times 10^{10} L_{\odot, B}$	
K	$1.2 \times 10^{10} L_{\odot, K}$	[3]
Масса	$(1-2) \times 10^{10} M_{\odot}$	[20], [21]
Центральная дисперсия скоростей, σ_c	125 км/с	[63]

км/с/Мпк) - см., например, подборку параметров функции светимости в статье Фукужиты и др. [46]. Тем самым, Млечный Путь является L^* -галактикой, то есть объектом, светимость которого стала своего рода стандартом измерения светимости. При умеренных красных смещениях ($z \geq 0.5$) галактики, подобные Млечному Пути, очень распространены. Например, найденные методом гравитационного линзирования характеристики типичных галактик в северном Глубоком Поле космического телескопа имени Хаббла имеют светимость $\sim L^*$, $V_{\max} \approx 200 \text{ км/с}$ и массу в пределах 20-30 кпк от центра $\gg 10^{11} M_{\odot}$ [47, 48]. Брейнерд и др. [49], также используя метод линзирования, показали, что типичные темные гало галактик имеют $V_{\max} \sim 200 \text{ км/с}$, протяженность > 100 кпк и массу в этих пределах $\sim 10^{12} M_{\odot}$. Эти оценки согласуются с характеристиками темного гало Млечного Пути.

Как уже упоминалось, значение центральной поверхностной яркости звездного диска Галактики ($\mu_0(B) = 21.1$) близко к стандартному значению Фримана [15] и находится на изломе функции распределения дисков галактик по этому параметру [50]. Масса нейтрального водорода в Млечном Пути, подобно оптической светимости, примерно соответствует характеристической величине ($M^*(\text{HI})$) в аппроксимации функции распределения $M(\text{HI})$ для спиральных галактик функцией Шехтера [51]. Кроме того, характеристики Млечного Пути удовлетворяют зависимостям масса-светимость и $M(\text{HI})$ -светимость, установленным для нормальных спиральных галактик [52].

Звездный и газовый диски Млечного Пути демонстрируют крупномасштабные искривления своих плоскостей, подобные наблюдаемым у значительного числа спиральных галактик поля (например, [53]).

Глобальный темп звездообразования в пределах звездного диска Галактики в настоящее время составляет, согласно эмпирической зависимости Кенниката [54], $4-5 M_{\odot}/\text{уг}$. Это значение типично для нормальных спиральных галактик [54]. Отношение звездной массы Млечного Пути к возрасту Вселенной ($t_0 \approx 14 \text{ Гуг}$) равно $\sim 6 M_{\odot}/\text{уг}$. Близость этого отношения к значению текущего темпа звездообразования свидетельствует о том, что на протяжении космологической эволюции Галактики ее глобальный темп звездообразования оставался примерно постоянным. Этот вывод согласуется и с данными для нормальных спиральных галактик поздних морфологических типов [55].

На рис.4 показано положение характеристик Млечного Пути на разного

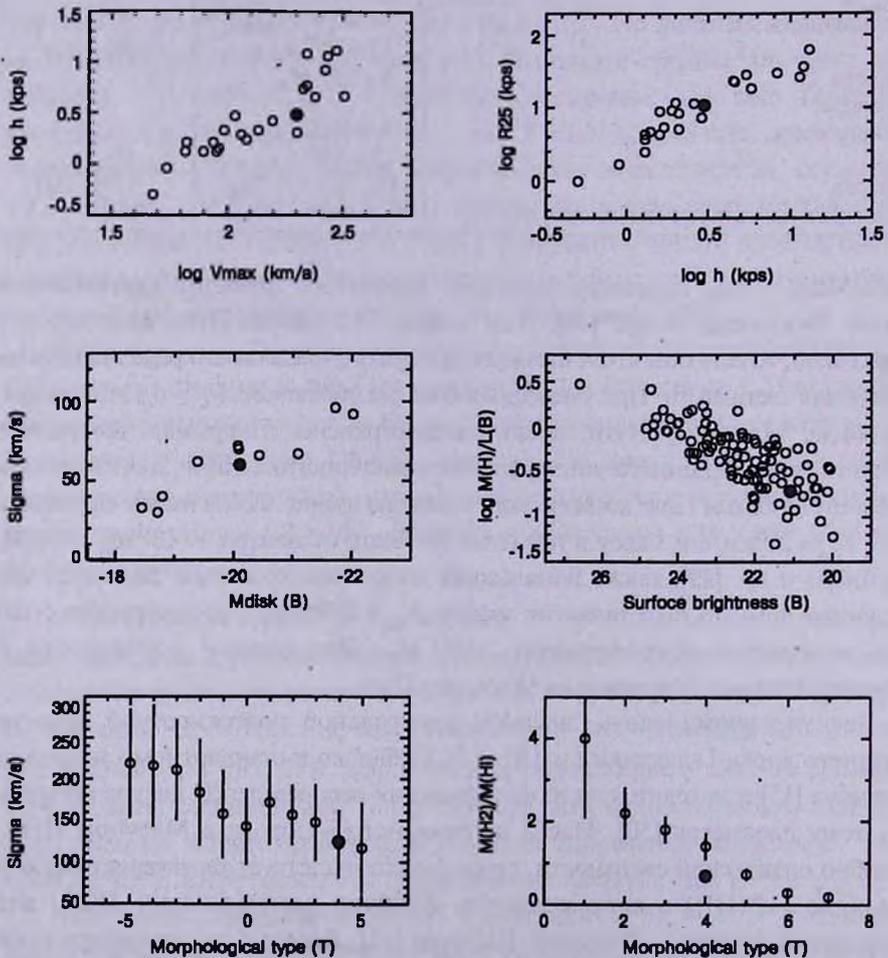


Рис.4. Эмпирические зависимости между различными характеристиками галактик. Черным кружком показаны характеристики Млечного Пути, кружки - данные для нормальных галактик.

рода эмпирических зависимостей для спиральных галактик. Верхний ряд: слева - зависимость между радиальным масштабом распределения светимости (h_R) и максимальной скоростью вращения, справа - соотношение между линейным радиусом галактики, измеренным в пределах изофоты $\mu(B) = 25.0$ и h_R для галактик типа Sab и позднее согласно данным Броилса [56]. Средний ряд: слева - зависимость между абсолютной звездной величиной диска галактики и величиной радиальной дисперсии скоростей звезд в диске для Sb-Sc галактик [25]; справа - корреляция между центральной поверхностной яркостью диска ($\mu_0(B)$) и относительным содержанием нейтрального водорода ($M(\text{HI})/L(B)$) согласно [57]. Нижний ряд: слева - зависимость между морфологическим типом галактики и центральной дисперсией скоростей звезд по [58] (отметим, что балдж Млечного Пути удовлетворяет полученному в этой работе среднему соотношению Фабер-Джексона); справа - зависимость между типом галактики и отношением масс молекулярного и атомарного водорода [59]. Очевидно, что интегральные характеристики Млечного Пути хорошо согласуются с эмпирическими трендами, установленными для нормальных галактик.

Как выглядит наша Галактика для внешнего наблюдателя? В качестве галактик, на которые похож Млечный Путь, часто ссылаются на изображения M31 и M81. Эти галактики, однако, относятся к более ранним подтипам (Sab-Sb) и имеют большие светимости и скорости вращения по сравнению с Млечным Путем. Рассмотрев собранную Казертано и ван Горком [30] выборку спиральных галактик с протяженными кривыми вращения, мы выбрали 5 объектов, имеющих значения V_{max} и M_B ($H_0 = 75$ км/с/Мпк), близкие к таковым у Млечного Пути (см. табл.2). Морфологические типы галактик в табл.2 взяты из базы данных NED*, остальные характеристики (абсолютная звездная величина, диаметр в пределах стандартной изофоты $\mu(B) = 25.0$, а также значения h_R , $\mu_0(B)$, V_{max}) - из статьи [30]. Любопытно, что 4 из 5 галактик оказались Sbc-типа, то есть типа, к которому традиционно относят и Млечный Путь. Помимо светимостей и скоростей вращения (по этим параметрам галактики были отобраны), предположительные двойники Млечного Пути, как оказалось,

Таблица 2

ГАЛАКТИКИ, ПОХОЖИЕ НА МЛЕЧНЫЙ ПУТЬ

Галактика	Тип	M_B	D_{25} (кпк)	h_R (кпк)	$\mu_0(B)$	V_{max} (км/с)
NGC 2903	Sbc	-19.98	20.9	2.0	20.1	203
NGC 3521	Sbc	-20.49	22.0	2.4	20.0	210
NGC 4258	Sbc	-20.65	30.4	5.2	21.5	216
NGC 5033	Sc	-20.20	33.1	5.4	22.0	222
NGC 5055	Sbc	-20.59	26.7	4.0	21.0	214

* База внегалактических данных NASA/IPAC (NED) работает под управлением Jet Propulsion Laboratory, Калтех, согласно контракту с Национальным управлением авиации и космических исследований (США).

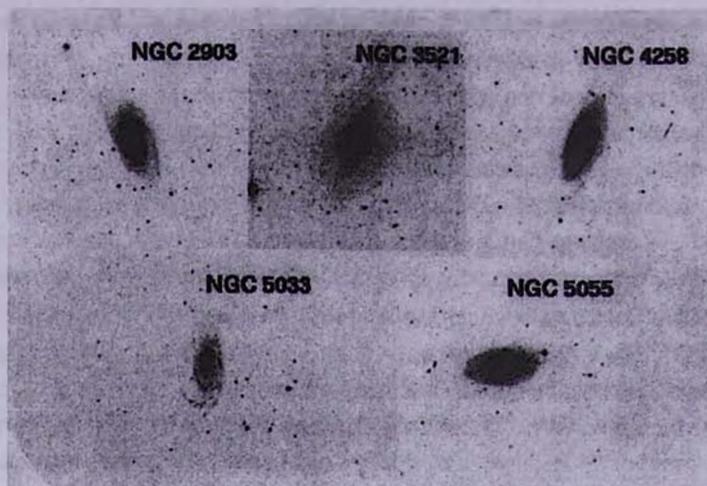


Рис.5. Галактики, похожие на Млечный Путь. Размер каждого изображения $20' \times 20'$; север вверху, восток слева.

как оказалось, имеют сходные с Галактикой значения радиального масштаба ($\langle h_r \rangle = 3.8 \pm 1.4$ кпк) и центральной поверхностной яркости ($\langle \mu_0(B) \rangle = 20.9 \pm 0.8$). (Отметим, что галактика NGC 5033 ранее уже рассматривалась ван дер Круитом [60] в качестве объекта, сходного с Млечным Путем). Репродукции пяти объектов, возможно, похожих на Галактику, приведены на рис.5 (изображения скопированы из Цифрового Обзора Неба*).

Работа выполнена в рамках программы “Интеграция” (проект N 578), а также при финансовой поддержке Конкурсного центра фундаментального естествознания Министерства общего и профессионального образования и Российского фонда фундаментальных исследований (грант N 98-02-18178).

Санкт-Петербургский государственный
университет, Россия

THE MILKY WAY AS A GALAXY

V.P.RESHETNIKOV

On the base of the literature data and under assumption that the Milky Way satisfies the Tully-Fisher relation, we summarize large-scale photometric and

* The Digitized Sky Surveys were produced at the Space Telescope Science Institute under the U.S.Government grant NAG W-2166.

kinematical characteristics of the Galaxy. It is shown that the Milky Way is a typical L^* - galaxy. The dark matter contribution is probably no more than 30% within the stellar disk of the Galaxy. We discuss the properties of 5 spiral galaxies closely resembling the Milky Way.

ЛИТРАТУРА

1. *J.С.Марочник, А.А.Сучков*, Галактика, Наука, М., 1984.
2. *G.Gilmore, I.King, P.C. van der Kruit*, in "The Milky Way as a Galaxy" SAAS-FEE, 1989.
3. *S.M.Kent, T.M.Dame, G.Fazio*, *Astrophys. J.*, **378**, 131, 1991.
4. *M.Haywood, A.C.Robin, M.Creze*, *Astron. Astrophys.*, **320**, 428, 1997.
5. *P.C. van der Kruit*, *Astron. Astrophys.*, **157**, 230, 1986.
6. *S.Ruphy, A.C.Robin, N.Epchtein et al.*, *Astron. Astrophys.*, **313**, 21L, 1996.
7. *R. de Grijs*, Edge-on Disk Galaxies. A Structure Analysis in the Optical and Near-Infrared, Thesis, Groningen, 1997.
8. *R.F.Peletier, E.A.Valentijn, A.F.M.Moorwood, W.Freuding*, *Astron. Astrophys. Suppl. Ser.*, **108**, 621, 1994.
9. *R.F.Peletier, E.A.Valentijn, A.F.M.Moorwood, W.Freuding*, in "The Opacity of Spiral Disks", NATO Workshop, ed. Davies J., **243**, 1995.
10. *P.D.Sackett*, *Astrophys. J.*, **483**, 103, 1997.
11. *S.Kimeswenger, B.Hoffman, W.Schlosser, Th.Schmidt-Kaler*, *Astron. Astrophys. Suppl. Ser.*, **97**, 517, 1993.
12. *И.И.Нукифоров, И.В.Петровская*, *Астрон. ж.*, **71**, 725, 1994.
13. *I.V.Petrovskaya*, *Astron. Astrophys. Trans.*, **3**, 87, 1992.
14. *R.P.Olling, M.R.Merrifield*, *Mon. Notic. Roy. Astron. Soc.*, **297**, 943, 1998.
15. *K.C.Freeman*, *Astrophys. J.*, **160**, 811, 1970.
16. *R.S. de Jong*, *Astron. Astrophys.*, **313**, 377, 1996.
17. *A.C.Robin, M.Creze, V.Mohan*, *Astrophys. J.*, **400**, 25L, 1993.
18. *G. de Vaucouleurs, W.D.Pence*, *Astron. J.*, **83**, 1163, 1978.
19. *J.Binney, O.Gerhard, D.Spergel*, *Mon. Notic. Roy. Astron. Soc.*, **288**, 365, 1997.
20. *S.M.Kent*, *Astrophys. J.*, **387**, 181, 1992.
21. *H.Zhao, R.M.Rich, D.N.Spergel*, *Mon. Notic. Roy. Astron. Soc.*, **282**, 175, 1996.
22. *R.S. de Jong*, *Astron. Astrophys.*, **313**, 45, 1996.
23. *F.Simien, G. de Vaucouleurs*, *Astrophys. J.*, **302**, 564, 1986.
24. *M.J.Pierce, R.B.Tully*, *Astrophys. J.*, **387**, 47, 1992.
25. *R.Bottema*, *Astron. Astrophys.*, **275**, 16, 1993.
26. *R.Bottema*, *Astron. Astrophys.*, **328**, 517, 1997.
27. *K.Kuijken, G.Gilmore*, *Mon. Notic. Roy. Astron. Soc.*, **239**, 605, 1989.
28. *Ph.Heraudeau, F.Simien*, *Astron. Astrophys.*, **326**, 897, 1997.
29. *M.Fich, S.Tremaine*, *Ann. Rev. Astron. Astrophys.*, **29**, 409, 1991.

30. *S.Casertano, J.H. van Gorkom*, *Astron. J.*, **101**, 1231, 1991.
31. *M.Persic, P.Salucci, F.Stel*, *Mon. Notic Roy. Astron. Soc.*, **281**, 27, 1996.
32. *G.Monnet, F.Simien*, *Astron. Astrophys.*, **56**, 173, 1977.
33. *K.Kuijken, G.Gilmore*, *Astrophys. J.*, **367**, 9L, 1991.
34. *M.Creze, E.Chereul, O.Bienayme, C.Pichon*, *Astron. Astrophys.*, **329**, 920, 1998.
35. *K.C.Freeman*, *Astrophys. J.*, **160**, 881, 1970.
36. *K.M.Ashman*, *Publ. Astron. Soc. Pacif.*, **104**, 1109, 1992.
37. *A.Bosma*, *Prepr. astro-ph/9812015*, 1998.
38. *D.Zaritsky*, *Prepr. astro-ph/9810069*, 1998.
39. *C.S.Kochanek*, *Astrophys. J.*, **457**, 228, 1996.
40. *J.Binney, S.Tremaine*, *Galactic Dynamics*, Princeton Univ. Press, Princeton, 1987.
41. *L.Meillon, F.Ciffo, A.Gomez et al.*, in "HIPPARCOS Venice 97", ESA SP-402, **591**, 1997.
42. *M.I.Wilkinson, N.W.Evans*, *Prepr. astro-ph/9906197*.
43. *F.D.Kahn, L.Woltjer*, *Astrophys. J.*, **130**, 705, 1959.
44. *A.S.Kulesa, D.Linden-Bell*, *Mon. Notic Roy. Astron. Soc.*, **255**, 105, 1992.
45. *D.N.C.Lin, B.F.Jones, A.R.Klemola*, *Astrophys. J.*, **439**, 652, 1995.
46. *M.Fukugita, C.J.Hogan, P.J.E.Peebles*, *Astrophys. J.*, **503**, 518, 1998.
47. *I.P.Dell'Antonio, J.A.Tyson*, *Astrophys. J.*, **473**, 17L, 1996.
48. *M.J.Hudson, D.J.Gwyn, H.Dahle, N.Kaiser*, *Astrophys. J.*, **503**, 531, 1998.
49. *T.G.Breinerd, R.D.Blandford, I.Smail*, *Astrophys. J.*, **466**, 623, 1996.
50. *S.McGaugh*, *Prepr. astro-ph/9810363*, 1998.
51. *M.Zwaan*, *Proc. XVIII Moriond conference "Dwarf Galaxies and Cosmology"*, eds. T.X.Thuan, C.Balkowski, 1998.
52. *P.Salucci, M.Persik*, *Prepr. astro-ph/9806215*, 1998.
53. *V.Reshetnikov, F.Combes*, *Astron. Astrophys.*, **337**, 9, 1997.
54. *R.C.Kennicutt*, *Astrophys. J.*, **498**, 541, 1998.
55. *R.C.Kennicutt*, *Ann. Rev. Astron. Astrophys.*, **36**, 189, 1998.
56. *A.Brueis*, *Dark and Visible Matter in Spiral Galaxies*, Thesis, Groningen, 1992.
57. *S.S.McGaugh, W.J.G. de Blok*, *Astrophys. J.*, **481**, 689, 1997.
58. *D.B.McElroy*, *Astrophys. J. Suppl. Ser.*, **100**, 105, 1995.
59. *I.S.Young, P.M.Knezek*, *Astrophys. J.*, **347**, 55L, 1989.
60. *P. van der Kruit*, in "The Milky Way as a Galaxy", SAAS-FEE, 331, 1989.
61. *H.J.Habing*, in "Evolution of Galaxies. Astronomical Observations", eds. Appenzeller I., H.J.Habing, P.Lena, Springer-Verlag, 181, 1989.
62. *F.Combes*, *Ann. Rev. Astron. Astrophys.*, **29**, 195, 1991.
63. *K.Sellgren, M.T.McGinn, E.E.Becklin, D.N.Hall*, *Astrophys. J.*, **359**, 112, 1990.