

УДК: 524.64—327

ОПРЕДЕЛЕНИЕ РАССТОЯНИЯ СОЛНЦА ДО ЦЕНТРА ГАЛАКТИКИ ПО КРИВОЙ ВРАЩЕНИЯ

Л. В. ЮРЕВИЧ

Поступила 17 января 1985

Принята к печати 3 июля 1985

Определено расстояние R_0 до центра вращения поля круговых скоростей облаков ОН в плоскости Галактики. Лучевые скорости облаков — данные обзора на частотах 1665 и 1667 МГц. Расстояния облаков от Солнца определены по зависимости параметров радиолиний поглощения гидроксила от гелиоцентрического расстояния. Из сравнения поведения круговых скоростей облаков в центральных областях Галактики с результатами численного моделирования кривой вращения получено значение $R_0 = 8.2^{+0.9}_{-0.7}$ кпс. Приведены кривые вращения Галактики для двух галактоцентрических квадрантов, которые хорошо согласуются с результатами, полученными другим методом по нейтральному водороду.

1. В работах [1, 2] была продемонстрирована возможность использования параметров радиолиний поглощения гидроксила на частотах 1665 и 1667 МГц для определения расстояний до молекулярных облачных комплексов и исследования кинематики Галактики.

Основу предложенной методики определили условия формирования линий поглощения в молекулярных облачных комплексах совместно с эффектом диаграммы направленности радиотелескопа. Вследствие турбулентной структуры комплексов, обладающих комковатой структурой, параметры радиолиний поглощения гидроксила — полуширина ΔV и глубина T_A образуют величину $D = (\Delta V^2/T_A)^{1/3}$, которая линейно возрастает с расстоянием r от Солнца. Применение данной зависимости для линий поглощения, наблюдаемых на частотах 1665 и 1667 МГц, позволяет определять расстояния до галактических молекулярных облачных комплексов с точностью 1—1.5 кпс в пределах гелиоцентрических расстояний 1—10 кпс.

На основании данных обзора плоскости Галактики в линиях ОН [3] с помощью зависимости $D(r)$ было вычислено поле лучевых скоростей облаков ОН в галактической плоскости и из него определена кривая вращения Галактики для солнечных галактических параметров $R_0 = 10$ кпс и

$V_0 = 230$ км/с [2, 4]. Полученные в последние годы результаты определения значений R_0 и V_0 свидетельствуют о меньших величинах, соответственно ~ 8.5 кпс и ~ 220 км/с [5—7].

В работе [2] отмечено, что при определении кривой вращения Галактики с использованием зависимости $D(r)$ вид кривой вращения в центральной области Галактики существенно зависит от принимаемого параметра R_0 . А именно, центральный пик кривых вращения, полученных при разных значениях R_0 , располагается на различных расстояниях относительно центра Галактики. Это связано с тем, что по зависимости $D(r)$ мы получаем гелиоцентрические расстояния облаков r , которые затем пересчитываются в галактоцентрические расстояния R при принятом расстоянии до центра вращения R_0 . Поэтому при больших r получаемые величины R , а также круговые скорости оказываются чувствительными к принимаемому значению R_0 . В отличие от этого, при определении кривой вращения по лучевым скоростям в тангенциальных точках [8] расстояния R облаков получаются непосредственно относительно центра вращения, а величина R_0 влияет только на масштаб кривой вращения.

Такую чувствительность кривой вращения Галактики, полученной с помощью зависимости $D(r)$, к величине R_0 можно использовать для определения расстояния до центра вращения облаков.

2. Пусть наблюдаемые лучевые скорости облаков обусловлены круговыми движениями относительно центра Галактики (ЦГ). В этом случае поле лучевых скоростей должно иметь вид, изображенный на рис. 1 [9]. При этом изменение скорости кругового движения $V(R)_B$ с расстоянием от центра для верхней половины диска В (на рисунке) должно быть зеркальным отображением изменения скорости $V(R)_A$ для нижней половины диска А.

При переносе центра вращения из точки ЦГ в другую точку, находящуюся на прямой ЦГ — Солнце (точка ЦГ'), галактоцентрические расстояния R облаков, наблюдаемых на тех же лучевых скоростях V_{rad} , изменятся ($R \rightarrow R'$). Вследствие этого кривые вращения новых половин диска $V(R')_A$ и $V(R')_B$ уже не будут симметричными. Считая R_0 свободным параметром, получим семейство кривых вращения, которые только при истинном расстоянии до центра Галактики дадут симметричную картину для областей А и В.

Обладая подробным описанием скорости вращения в центральной области Галактики, можно применить описанную процедуру для определения искомого расстояния R_0 . Тем не менее, непосредственное применение этой методики к полю скоростей облаков ОН [2] затрудняется следующими обстоятельствами: 1) Обзор галактической плоскости [3], использованный для определения поля скоростей облаков, не выполнялся в на-

правлении центральных долгот ($-2.3^\circ < l < +2^\circ$). Вследствие этого в поле скоростей облаков ОН отсутствуют данные для центральной области Галактики размером ~ 0.6 кпс (при $R_0 = 8.5$ кпс). 2) Имеющиеся немногочисленные значения скорости в центральной области на расстояниях $R \approx 0.3$ кпс не позволяют непосредственно выявить положение центрального пика кривой вращения, находящегося на $R_p \sim 0.6$ кпс относительно центра Галактики. 3) Ошибки определения расстояний до облаков ОН по зависимости $D(r)$ на гелиоцентрических расстояниях $r \sim R_0$ сравнимы по величине с характерными размерами области, в которой наблюдается

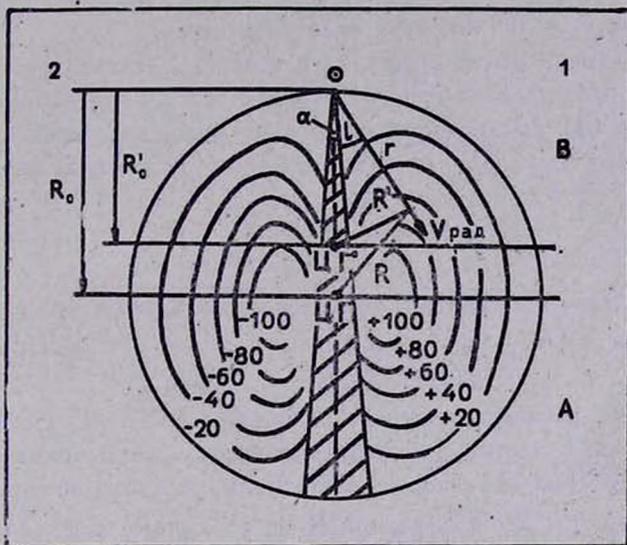


Рис. 1. Поле лучевых скоростей $V_{\text{рад}}$ вращения Галактики. Цифры указывают лучевые скорости для наблюдателя, находящегося в точке \odot (Солнце). СГ — истинное положение центра вращения, $\text{СГ}'$ — предполагаемое положение центра вращения Галактики. Заштрихована «ненаблюдаемая» центральная область внутри угла $\alpha = 2l$. 1 и 2 — галактоцентрические квадранты.

большой градиент скорости. Исходя из этого, для определения расстояния R_0 до центра вращения поля скоростей облаков ОН был проведен дополнительный анализ, связанный с моделированием кривой вращения Галактики.

3. В плоскости Галактики было задано 400 пробных частиц, размещенных равномерно в квадрате со стороной 8 кпс. При этом центр квадрата был совмещен с центром Галактики и пространственная плотность частиц близка к плотности распределения облаков ОН. Круговые скорости

частиц задавались согласно кривой вращения Галактики [10], которая аппроксимировалась полиномом 8-й степени. Через коэффициенты этого полинома вычислялись угловые скорости вращения $\omega(R)$ частиц. Исследовавшиеся полиномы более низких степеней значительно хуже описывали скорости вращения в центральной области с большим градиентом скорости. Для наблюдателя, находящегося на расстоянии R_0 от центра вращения и вращающегося с угловой скоростью ω_0 , лучевые скорости частиц равны

$$V_{\text{rad}} = R_0[\omega(R) - \omega_0] \cdot \sin l, \quad (1)$$

где l — галактическая долгота пробной частицы. При расчетах использовались значения $R_0 = 8.5$ кпс и $\omega_0 = 26$ км/с кпс.

Поместим теперь центр вращения в точку $\square\Gamma'$, находящуюся на расстоянии R_0' от наблюдателя (рис. 1). Считая теперь, что наблюдаемые лучевые скорости (1) по-прежнему описывают вращение, однако уже относительно нового центра $\square\Gamma'$, рассчитаем новые скорости вращения частиц

$$V(R') = \left(\omega_0 + \frac{V_{\text{rad}}}{R_0 \cdot \sin l} \right) \cdot R'. \quad (2)$$

Из этого выражения рассчитывалось семейство кривых вращения Галактики $V(R')_A$ и $V(R')_B$ при различных положениях центра вращения $\square\Gamma'$.

Результаты расчетов приведены на рис. 2. Точками представлены скорости отдельных частиц, жирными кривыми — аппроксимирующие полиномы восьмой степени, которые наилучшим образом описывают вариации скорости. Видно, что только при $R_0' = R_0$ кривые вращения V_A и V_B симметричны. В этом случае дисперсия скоростей σ_0 , которая характеризует отклонение точек относительно полинома во всем диске, минимальна. В остальных случаях, когда максимальные скорости вращения оказываются по одну или другую сторону диаметра, проходящего через точку $\square\Gamma'$, наблюдается асимметрия, которая возрастает с увеличением модуля разности $\Delta R_0 = R_0' - R_0$, соответственно увеличивается и дисперсия σ_0 . При этом центральный пик кривой вращения, находящийся при $R_0 = 8.5$ кпс на $R_0 = 0.6$ кпс, смещается от центра Галактики до 1.2 кпс при $\Delta R_0 = 1.0$ кпс.

Для того, чтобы приблизить эту модель к имеющемуся полю скоростей облаков ОН в галактической плоскости с неполной информацией о скоростях в центральной области, на следующем этапе моделирования из рассмотрения были отброшены частицы, которые попадают в центральный угол с раствором $\alpha = 2l$ (заштрихованная область на рис. 1). Результаты расчетов новых семейств кривых вращения пробных частиц при

$l = 3$ и 5° также приведены на рис. 2. Показаны только аппроксимирующие полиномы, соответствующие тонкими и пунктирными линиями. Видно, что с отсутствием больших скоростей в центральной области уменьшилась

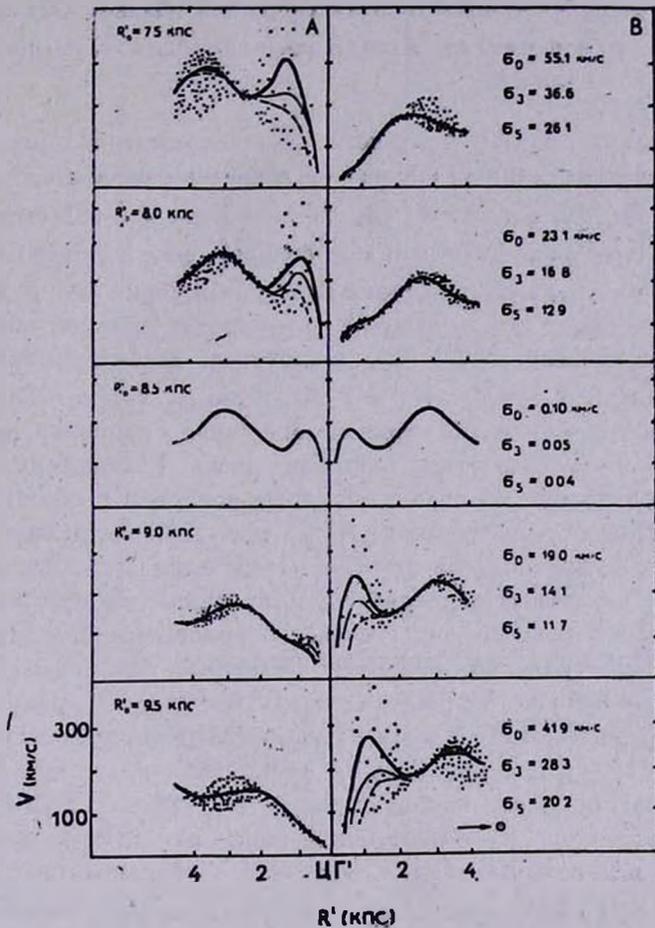


Рис. 2. Семейство кривых вращения системы пробных частиц, вращающихся в плоскости Галактики согласно кривой вращения НИ [10] при различных положениях центра вращения ЦГ'. Плавные кривые — полиномы восьмой степени, аппроксимирующие скорости вращения частиц (представлены точками). σ_0 — дисперсия круговых скоростей всего массива частиц, σ_3 и σ_5 — дисперсии круговых скоростей массива частиц, находящихся вне заштрихованной области рис. 1 соответственно, с интервалом долгот 3 и 5° . Стрелкой указано направление на Солнце.

амплитуда пиков, которые располагаются в окрестностях реального центра вращения, при $R'_0 \neq R_0$. Вследствие этого уменьшились и дисперсии σ_3 и σ_5 . Тем не менее, даже при пробеле в центральной области с $\alpha = 10^\circ$

изменение скорости вращения в центральной области, описываемое полиномом, в точности повторяет ход скорости при полном поле скоростей для значения $R_0' = R_0$. Исходя из этих результатов, получается, что небольшой пробел в центральной области поля скоростей облаков ОН с углом $\alpha = 4,3^\circ$, не должен повлиять на определение расстояния R_0 по предлагаемой методике.

4. Воспользуемся данной методикой для определения расстояния Солнца до центра вращения Галактики на основании поля скоростей облаков ОН. Так же, как и в работе [2], по зависимости $D(r)$ были определены гелиоцентрические расстояния r облаков, наблюдаемые лучевые скорости которых $V_{\text{рад}}$ и параметры линий поглощения ΔV и T_A приведены в обзоре [3]. Угловые скорости вращения облаков определялись на основании выражения (2), в котором галактоцентрические расстояния облаков $R' = (R_0'^2 + r^2 - 2 \cdot R_0' \cdot r \cdot \cos l)^{1/2}$ и $r = r(D)$. Таким образом получалось семейство кривых вращения Галактики при различных значениях R_0' для двух половин диска Галактики А и В. Рассматривались только те облака, которые попадали в область с галактоцентрическими расстояниями $R < 3$ кпс. При вычислениях скорости вращения R_0' изменялось от 7 до 10 кпс через 0.5 кпс, а в пределах наиболее вероятных значений R_0 , полученных на этом этапе, — от 7.5 до 9.0 кпс через 0.1 кпс. На рис. 3 приведены три пары кривых вращения центральных областей Галактики при значениях R_0' , равных 7.6, 8.2 и 8.8 кпс. Точки представляют скорости вращения облаков, кривые — полиномы восьмой степени. Параметры центральных пиков кривых с R_0' в интервале от 8.0 до 8.5 кпс помещены в табл. 1. В ней N — число облаков, находящихся в половинах диска А и В с радиусом $R = 3$ кпс, R_p — расстояние пика от центра вращения, V_p — скорость в максимуме, $\sigma_{\text{ОН}}$ — дисперсия скорости, характеризующая, как и раньше, отклонение скорости вращения облаков относительно полинома.

Как видно из табл. 1, наиболее симметричные пики имеют кривые с R_0' в интервале 8.2—8.4 кпс. При этом расстояния этих пиков заключены в пределах 0.6—0.8 кпс. Из этих трех кривых близкими по амплитуде пиками, равными 192 и 170 км/с и 119 и 228 км/с характеризуются, соответственно кривые вращения с $R_0' = 8.2$ и 8.4 кпс. Минимальное расстояние центрального пика $R_p = 0.6$ кпс имеют кривые вращения половин диска В с $R_0' = 8.2$ и 8.3 кпс. На таком же расстоянии от центра Галактики расположен и пик кривой вращения Н1 [10]. Поскольку в кривой вращения Н1, полученной по тангенциальным скоростям, величина R_p не так критична к вариациям R_0 в рассматриваемом интервале изменений рас-

стоянии до центра вращения, значение $R_p = 0.6$ кпс можно принять в качестве реального расстояния пика. Как видно из таблицы, дисперсия скоростей σ_{OH} для зацентральной половины диска А больше дисперсии ско-

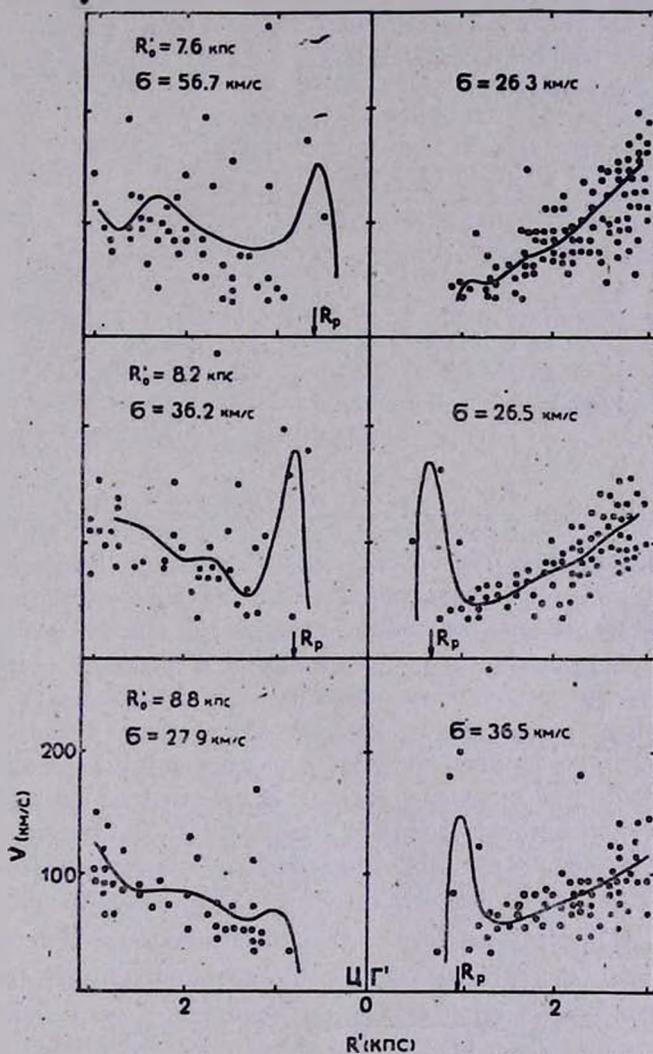


Рис. 3. Ход круговых скоростей облаков ОН в центральных областях Галактики для трех значений расстояния R'_0 Солнца до центра вращения ЦГ'. Точки — скорости отдельных облаков, кривые — полномы восьмой степени. σ_{OH} — дисперсия скоростей, R_p — галактоцентрическое расстояние пика скорости.

ростей для половины диска В. Такое различие объясняется увеличением погрешности определения расстояний по зависимости $D(r)$ с ростом гелиоцентрических расстояний. Поэтому расстояние пика от центра в половине

диска В следует считать более весомым, чем в половине А. К тому же кривая вращения [10] получена для тангенциальных точек первого галактического квадранта, находящихся в половине В. Тогда, приняв во внимание, что более симметричными пиками, имеющими близкие амплитуды и находящимися на минимальном расстоянии относительно центра вращения, характеризуются кривые вращения с $R_0' = 8.2$ кпс, примем данное значение в качестве искомого расстояния R_0 .

Таблица 1

R_0' (кпс)	А				В			
	N	R_p (кпс)	V_p (км/с)	$\sigma_{ОН}$ (км/с)	N	R_p (кпс)	V_p (км/с)	$\sigma_{ОН}$ (км/с)
8.0	55	1.0	126	43.3	113	0.3	304	25.6
8.1	52	0.9	125	41.7	113	—	—	25.7
8.2	52	0.8	192	36.2	103	0.6	170	26.5
8.3	55	0.8	186	34.4	102	0.6	119	27.6
8.4	55	0.8	119	32.7	105	0.7	228	28.4
8.5	53	—	—	30.7	98	0.7	111	31.0

5. Для оценки точности определения величины R_0 воспользуемся результатами численного моделирования. При получении семейств кривых вращения для различных положений центра ЦГ' систематический сдвиг величины R_0' приводит к различным смещениям значений галактоцентрических расстояний частиц, в зависимости от их положения относительно точки ЦГ'. При этом величина $\Delta R = R' - R$ в целом для всего массива частиц имеет распределение, близкое к нормальному, со средним значением 0—0.2 кпс (в зависимости от R_0'). В этом случае дисперсия круговых скоростей частиц, порождаемая сдвигом ΔR_0 , аналогична дисперсии круговых скоростей облаков ОН, обусловленной влиянием случайных ошибок галактоцентрических расстояний облаков, определенных на основании зависимости $D(r)$. Поскольку дисперсия круговых скоростей частиц растет пропорционально ΔR_0 (см. рис. 2), можно принять зависимость σ от ΔR_0 для оценки ошибки определения расстояния до центра вращения облаков ОН.

В качестве дисперсии скоростей вращения примем дисперсию σ_0 для доцентральной половины Галактики (дисперсия $\sigma_{ОН}$ для зацентральной области Галактики фактически характеризует ошибки расстояний до более далеких объектов). Дисперсия скоростей $\sigma_{ОН}$ для кривой вращения с $R_0' = 8.2$ кпс равна 26.5 км/с (см. табл. 1). В эту величину, помимо дисперсии σ_R , обусловленной ошибками определения расстояний до облаков,

входит собственная дисперсия скоростей облаков в Галактике $\sigma_i: \sigma_{\text{ОН}}^2 = \sigma_R^2 + \sigma_i^2$. При $\sigma_i = 10$ км/с величина $\sigma_R = 24.5$ км/с. Воспользовавшись зависимостью дисперсии круговых скоростей частиц от смещения ΔR_0 для массива с пробелом в центральной области $\alpha = 6^\circ$, получим интервал возможных значений R_0 — 0.7 кпс и + 0.9 кпс.

Можно было бы сузить полученный интервал ошибок, исходя из значений R_0' , при которых кривые вращения в центральной области еще сохраняют форму с двумя подобными пиками. Однако, учитывая то, что ошибки одиночных определений расстояний до молекулярных облаков по зависимости $D(r)$ вблизи центра Галактики не лучше, чем 1.5 кпс, а также относясь с осторожностью к результатам аппроксимации полиномом довольно высокой степени, в данном случае это нельзя считать целесообразным.

Заметим, что полученное расстояние Солнца до центра вращения Галактики, равное $8.2 \begin{smallmatrix} +0.9 \\ -0.7 \end{smallmatrix}$ кпс, совпадает со значением R_0 , определенным по переменным звездам типа RR Лиры, которое долгое время принималось в качестве расстояния до центра Галактики [9].

6. Определенное нами значение R_0 можно рассматривать как приведение к центру поля скоростей молекулярных облаков ОН. В этом случае результаты численного моделирования (рис. 2) объясняют ход круговых скоростей в центральных областях Галактики, а также большую дисперсию кривой вращения, полученной в работе [2]. Эта кривая вращения получена из поля скоростей, расстояние до центра которого отличается на 1.8 кпс от реального. Новая кривая вращения Галактики, полученная при $R_0 = 8.2$ кпс и $\omega_0 = 26$ км/с·кпс, изображена на рис. 4. На нем точками представлены круговые скорости облаков ОН в первом галактоцентрическом квадранте (рис. 1) и кружками — круговые скорости во втором галактоцентрическом квадранте. Так же, как и в работе [2], представлены взвешенно-средние значения скоростей в кольцевых секторах шириной по радиусу 150 пс. Для сравнения на этом же рисунке показаны кривые вращения аналогичных областей Галактики, полученные по всему профилю радиолинии нейтрального водорода [11] с такими же значениями R_0 и ω_0 . Кривая вращения HI для первой галактической четверти изображена косыми крестиками, а кривая вращения для IV галактической четверти — прямыми крестиками.

Сравнение кривых вращения Галактики, полученных по разным молекулярным облакам различными методами, показывает хорошее согласие независимых результатов. При этом близкое соответствие скоростей кривых ОН и HI на рис. 4а наблюдается в интервале галактоцентрических расстояний 4—9 кпс и на рис. 4б — в интервале 3.5—11 кпс. Можно по-

казать, что учет расширения газовой составляющей в кривой вращения HI приводит к еще лучшему согласию скоростей OH и HI, которое отмечается на большем интервале расстояний. Остающиеся расхождения (в особенности на больших R) могут отчасти быть объяснены влиянием ошибок расстояний до облаков, определенных по зависимости $D(r)$. Это подтверждается результатами численного моделирования кривой вращения, из которых следует возрастание в подобном случае скоростей вращения по сравнению с реальными.

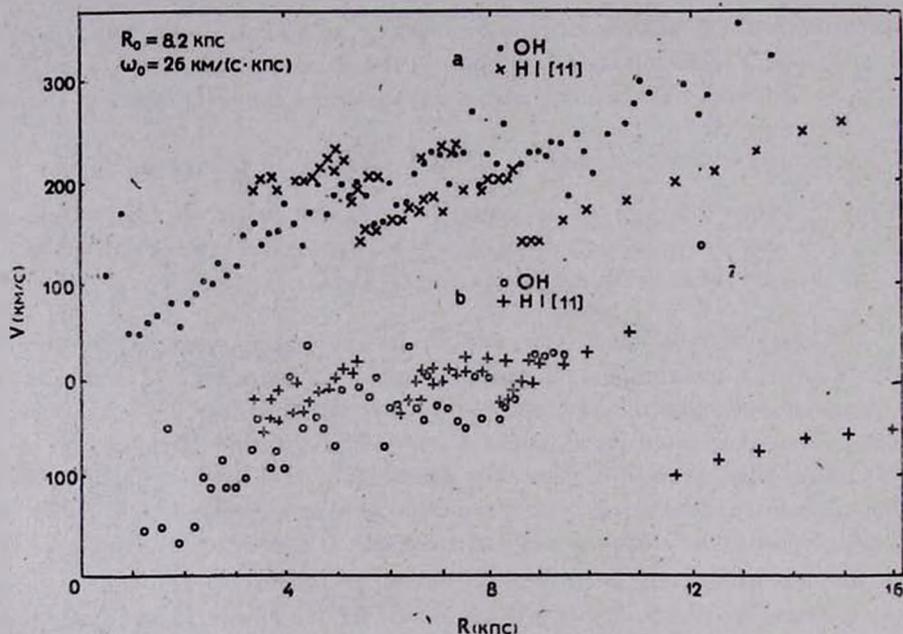


Рис. 4. Кривые вращения Галактики для 1(a) и 2(b) галактоцентрического квадрантов (см. рис. 1), полученные из поля лучевых скоростей облаков OH, соответственно точки и кружки. Крестиками изображены кривые вращения Галактики, полученные на основании полного профиля радиолинии нейтрального водорода [11]. Соответственно косые крестики—I и прямые крестики—IV галактические секторы. Для всех кривых принято $R_0 = 8.2$ кпс, $\omega_0 = 26$ км/с кпс.

Отметим характерное для обеих кривых вращения OH и HI наличие участков с линейным ростом скорости вращения, свидетельствующее о твердотельном характере вращения отдельных областей Галактики.

Автор выражает благодарность И. Г. Колеснику за постоянное внимание к работе и полезные замечания.

THE DISTANCE TO THE GALACTIC CENTRE ON THE
ROTATION CURVE

L. V. YUREVICH

The distance R_0 to the centre of circular velocity field of hydroxyl clouds in the galactic plane has been determined. Radial velocities of clouds are 1665 and 1667 MHz survey data. Cloud distances from the Sun were calculated from a relation between hydroxyl absorption feature parameters and heliocentric distance. A comparison of the behaviour of cloud circular velocities in the central part of the Galaxy with that of simulated rotation curve inferred a value $R_0 = 8.2_{-0.7}^{+0.9}$ kpc. The rotation curves presented for two galactocentric quadrants are in good agreement with those of neutral hydrogen obtained by the use of another technique.

ЛИТЕРАТУРА

1. И. Г. Колесник, Л. В. Юревич, *Астрофизика*, 19, 761, 1983.
2. I. G. Kolesnik, L. V. Yurevich, in Abstracts of the XVIII Young European Radio Astronomers Conference, September, 16–22, Zelenchukskaya, Leningrad, 1984, p. 42.
3. B. E. Turner, *Astron. Astrophys. Suppl. ser.*, 37, No. 1, 1, 1979.
4. Л. В. Юревич, Тезисы докладов всесоюзной конференции «Структура галактик и звездообразование», Киев, 1983, стр. 20.
5. J. E. Gunn, G. R. Knapp, S. D. Trematn, *A. J.*, 84, 1181, 1979.
6. J. A. Graham, *IAU Symp. No. 84, The Large-Scale Characteristics of the Galaxy*, ed. W. B. Burton, Dordrecht, Reidel, 1979, p. 195.
7. J. Einasto, *IAU Symp. No. 84, The Large-Scale Characteristics of the Galaxy*, ed. W. B. Burton, Dordrecht, Reidel, 1979, p. 451.
8. W. B. Burton, M. A. Gordon, *Astron. Astrophys.*, 63, 7, 1978.
9. F. J. Kerr, G. Westerhout, in "Stars and Stellar Systems", V, ed. A. Blaauw and M. Schmidt, Chicago, The University of Chicago Press, 1965, p. 513.
10. У. А. Хауд, *Письма АЖ*, 5, № 3, 124, 1979.
11. И. В. Петровская, *Письма АЖ*, 5, № 12, 632, 1979.