

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ИЗМЕНЕНИЯ СКОРОСТИ ВРАЩЕНИЯ
ГАЛАКТИКИ В Z-НАПРАВЛЕНИИ ПО ПРОФИЛЯМ ЛИНИЙ
НЕЙТРАЛЬНОГО ВОДОРОДА

Т. А. АГЕКЯН, И. В. ПЕТРОВСКАЯ, Б. И. ФЕСЕНКО

Поступила 24 ноября 1965

Предложен метод определения скорости вращения подсистемы нейтрального водорода во внешних областях Галактики вне галактической плоскости. Скорость вращения нейтрального водорода при удалении от галактической плоскости на расстоянии 0.01 убывает в среднем на 10 км/сек — 5 км/сек на расстояниях от центра Галактики 1.2 — 1.4 (расстояния выражены в единицах расстояния Солнца от центра Галактики). Уточнена кривая вращения подсистемы нейтрального водорода во внешних областях галактической плоскости.

Метод невязок уравнения интенсивности. В работе [1] было получено выражение для интенсивности излучения нейтрального водорода, в предположении, что его плотность M и угловая скорость ω зависят от R и z

$$I(\Omega, l, b) = \frac{kN(R, z)}{\left| \sin l \cos b \left(\frac{\partial \Omega}{\partial R} \cos b \sqrt{1 - R^{-2} \sin^2 l} + \frac{\partial \Omega}{\partial z} |\sin b| \right) \right|}, \quad (1)$$

где

$$\Omega(R, z) = [\omega(R, z) - \omega_0] R_0,$$

ω_0 — угловая скорость вращения Солнца. Расстояние R_0 от Солнца до центра Галактики принято равным единице, величина Ω измеряется в км/сек.

В настоящей работе выражение (1) используется для исследования изменения скорости обращения в Галактике в зависимости от координаты z .

Вводя обозначения

$$g(R, z) = \frac{1}{kN(R, z)} \frac{\partial \Omega}{\partial R},$$

$$h(R, z) = \frac{1}{kN(R, z)} \frac{\partial Q}{\partial z},$$

$$a = I(Q, l, b) \sin l \cos^2 b \sqrt{1 - R^{-2} \sin^2 l},$$

$$c = I(Q, l, b) \sin l |\sin b| \cos b,$$

приведем (1) к виду

$$a(Q, l, b) g(R, z) + c(Q, l, b) h(R, z) = 1. \quad (2)$$

Зададим и закрепим некоторые значения R и Q . Тогда, вследствие того, что Q зависит от R и z , закрепляется и z . Уравнение (2) при фиксированных Q , R и z можно написать для каждого направления, в котором имеются измерения, соответствующие выбранному Q . Вычислив для этих направлений коэффициенты $a(Q, l, b)$ и $c(Q, l, b)$, получаем избыточную систему уравнений с неизвестными g и h .

Между величинами R , z , l и b существует соотношение

$$z = (\cos l + \sqrt{R^2 - \sin^2 l}) \operatorname{tg} b.$$

Поэтому в нашем случае при фиксированных R и z для каждого l широта b определяется однозначным образом.

Так как для данного l может не быть контура с нужным b , в плоскости l, b были построены кривые $b(l, R, z)$ для различных пар значений R и z . На этот же чертеж были нанесены точки с координатами l и b , соответствующие направлениям, в которых выполнялись наблюдения. При фиксированных значениях R и z рассматривались все контуры, попадающие в плоскости l, b между кривыми

$$b(l, R, z - \Delta z) \text{ и } b(l, R, z + \Delta z). \quad (3)$$

Избыточная система n уравнений (2), полученная с фиксированными Q , R и z , решалась следующим образом. Вычислялись средние значения коэффициентов

$$\bar{a} = \frac{1}{n} \sum a(Q, l, b), \quad \bar{c} = \frac{1}{n} \sum c(Q, l, b)$$

и их отношение \bar{a}/\bar{c} . Затем все уравнения разбивались на две группы. К первой группе были отнесены уравнения, в которых отношение коэффициентов больше отношения их средних значений

$$\frac{a(Q, l, b)}{c(Q, l, b)} > \frac{\bar{a}}{\bar{c}},$$

а ко второй группе те уравнения, в которых выполняется условие

$$\frac{a(Q, l, b)}{c(Q, l, b)} < \frac{\bar{a}}{\bar{c}}.$$

Уравнения каждой группы суммировались и получалась нормальная система для определения неизвестных g и h

$$\Sigma_1 a(\Omega, l, b) g + \Sigma_1 c(\Omega, l, b) h = 1,$$

$$\Sigma_2 a(\Omega, l, b) g + \Sigma_2 c(\Omega, l, b) h = 1.$$

Для определения зависимости Ω от R и z для каждой пары Ω и R решалось несколько избыточных систем с различными z . За истинное значение z , соответствующее выбранным Ω и R , принималось то значение, при котором сумма абсолютных величин невязок, поделенная на число уравнений (невязка на одно уравнение), принимает наименьшее значение.

Были использованы наблюдения Мюллера и Вестерхаута [2], для которых методом, использовавшимся ранее в [1], были выполнены редукции за самопоглощение и остаточные скорости.

Зависимость функции Ω от z была рассмотрена при двух значениях R , равных 1.2 и 1.4. В табл. 1 приводятся невязки на одно уравнение, полученные для $R=1.2$, где в (3) Δz принято равным 0.005. Таблица показывает, что для всех Ω от -70 до -100 получены сравнительно уверенные минимумы невязок. Положения минимумов, определенные по плавной кривой, соединяющей три соседние точки на графике зависимости невязок от Ω , представлены крестиками на рис. 1 и обнаруживают уменьшение угловой скорости с удалением от галактической плоскости.

Таблица 1

$z \backslash \Omega$	-60	-70	-80	-90	-100	n
0.00	0.52	0.44	0.90	1.22		34
0.01	0.66	0.61	0.46	1.00		70
0.02	0.60	0.80	0.65	1.00	0.91	58
0.03	0.70	0.79	0.80	0.77	0.95	56
0.04				0.80	0.69	52
0.05				0.87	0.95	50
0.06					1.18	29

Те же вычисления выполнены после отбрасывания внутренних направлений ($270^\circ < l'' < 360^\circ$, $0 < l'' < 90^\circ$). Эти направления были отброшены для уменьшения эффекта сглаживания за ширину диаграммы направленности, о котором говорилось в работе [1]. Результаты вычислений невязок для внешних направлений представлены в табл. 2. При этом, для выявления возможных различий в зависи-

мости Ω от z по разные стороны от галактической плоскости, для $R=1.2$ вычисления были выполнены отдельно для $b > 0$ и $b < 0$ (табл. 2, рис. 1).

Таблица 2

$z \backslash \Omega$	-70	-80	-90	-100	n
0.06					
0.15			0.77	0.82	19
0.04			0.54	1.12	18
0.03	0.85	0.58	0.48	0.88	26
0.02	0.48	0.58	1.09	0.48	26
0.01	0.43	0.38	0.80	0.55	25
0.00	0.32	0.96	1.27	0.79	29
-0.01	0.75	0.71	0.82	0.71	23
-0.02	0.75	0.96	1.19	1.23	27
-0.03		0.79	0.92	0.46	21
-0.04			0.96	0.66	27
-0.05			1.59	0.81	20
-0.06					

При $R=1.4$, ввиду сильных флуктуаций в числе уравнений с изменением z , после отбрасывания внутренних направлений, был

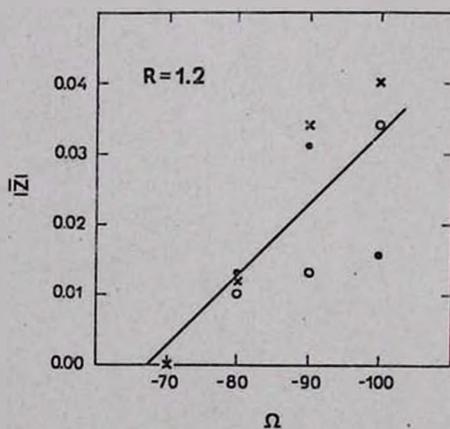


Рис. 1. крестики — все направления; черные кружки — внешние направления с $b > 0$; светлые кружки — внешние направления с $b < 0$.

выбран интервал $\Delta z = 0.01$. Увеличение интервала Δz в два раза было сделано для исключения влияния числа уравнений на величину средней невязки. Результаты вычислений приводятся в табл. 3 и на рис. 2.

Таблица 3

$z \backslash \Omega$	-80	-90	-100	n
0.008	0.58	0.88	0.85	66
0.025	0.67	0.61	0.98	48
0.045	0.73	0.76	0.81	51

Все результаты указывают на уменьшение скорости вращения нейтрального водорода при удалении от плоскости Галактики, но, разумеется, вследствие различных причин количественно не совпадают.

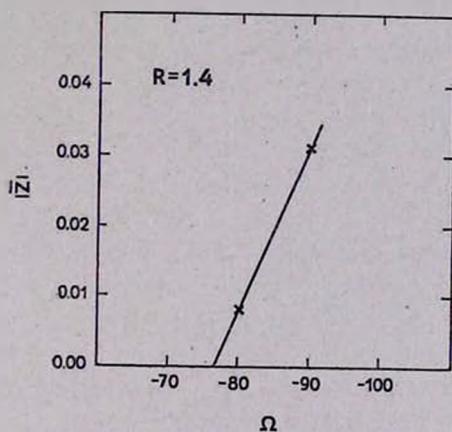


Рис. 2.

ют. Можно считать, что в настоящее время для направления z реально лишь определение среднего градиента скорости вращения нейтрального водорода. По точкам на рис. 1 проведены средние кривые (на рис. 2 точки соответствующие внешним направлениям имеют больший вес), которые позволяют дать следующие оценки:

1) На расстоянии 1.2 от центра Галактики скорость вращения нейтрального водорода при удалении от плоскости Галактики на расстояние 0.01 убывает в среднем на 10 км/сек,

2) на расстоянии 1.4 от центра Галактики та же величина составляет — 5 км/сек на расстояние 0.01.

Улучшение определения закона вращения Галактики для ее плоскости. Определенный нами [1] закон вращения Галактики впервые включал данные и для внешней ее области. Однако три точки, полученные в этой области, обнаруживают большой разброс и потому кривая угловых скоростей для внешней области проводится неуверенно. Положение точек во внешней области сильно влияет и на участок кривой около $R=1$, то есть в окрестностях Солнца, так как независимо определенных точек для этого района нет.

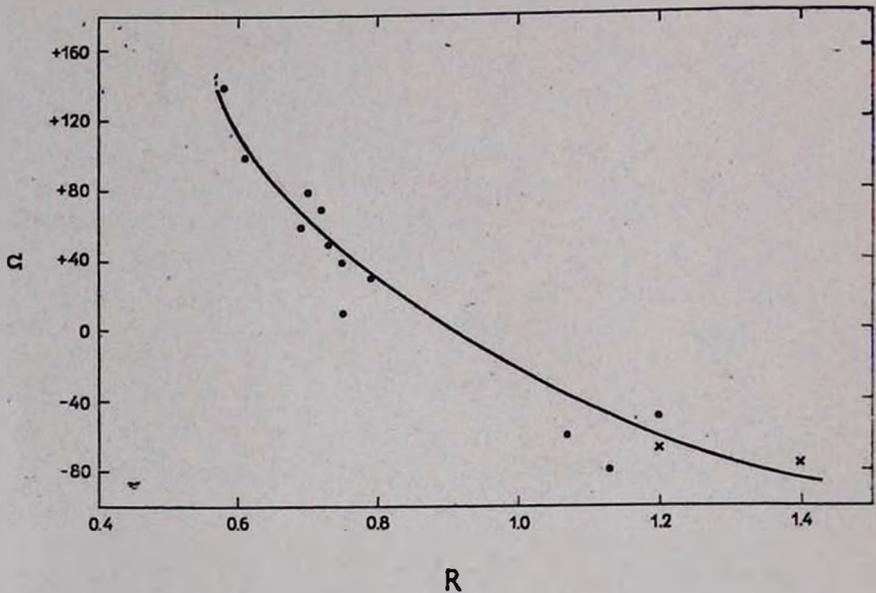


Рис. 3.

В настоящем исследовании для внешних областей получены еще две точки кривой скоростей, относящейся к плоскости Галактики. Они определяются при пересечении сглаживающих прямых с прямой $z=0$ на рис. 1 и 2. Мы получаем $R=1.2$, $\Omega=-66$ и $R=1.4$, $\Omega=-76$. Две новые точки получены на основании более обширного материала, включающего профили линий с $b \neq 0$, поэтому вес каждой из них больше веса точек, определявшихся в работе [1]. На рис. 3 черными кружками показаны точки, определенные в работе [1], а крестиками две новые точки, определившиеся в настоящей работе. Совокупность всех полученных точек позволяет провести новую кривую скоростей, основанную на большем наблюдательном материале. Кривая проведена с учетом того, что вес двух новых точек больше веса прежних трех точек для внешней области Галактики.

Приводим вновь полученный закон вращения Галактики в табличной форме.

Таблица 4

z	R	Ω	R	Ω	R
+140	0.57	+40	0.77	-30	1.04
+120	0.59	+30	0.80	-40	1.09
+100	0.62	+20	0.83	-50	1.14
+ 80	0.66	+10	0.87	-60	1.19
+ 70	0.69	0	0.92	-70	1.26
+ 60	0.71	-10	0.95	-80	1.36
+ 50	0.74	-20	0.99	-85	1.42

Метод сдвига максимумов в профилях линий. Как известно, профили линий нейтрального водорода показывают значительные отклонения от того рисунка, который предсказывается теорией в предположении, что плотность водорода постоянна, или же монотонно убывает с увеличением R и z . Для внешних направлений, например, при сделанных предположениях в профилях не должно быть максимумов интенсивностей. Между тем, локальные максимумы интенсивности наблюдаются в большом числе внешних направлений. Обычно у целой группы соседних по l и b профилей наблюдаются локальные максимумы интенсивности, находящиеся приблизительно на одинаковых местах. Это свидетельствует об общности происхождения максимумов и показывает, что участок водорода повышенной плотности, их вызывающий, имеет значительную протяженность. Водород, вызывающий локальные максимумы интенсивности в профилях линий, по-видимому, связан со спиральными ветвями Галактики.

Изучение положений максимумов интенсивностей в группе соседних по l и b профилей позволяет сделать некоторые выводы о распределении скоростей вращения в Галактике. Обзор профилей линий для внешних направлений показывает, что в тех случаях, когда в целой группе соседних профилей имеются схожие локальные максимумы интенсивности, наблюдается тенденция сдвига положений максимумов в сторону меньших лучевых скоростей при увеличении $|b''|$, когда l'' постоянно. Это явление естественно объяснить уменьшением скорости обращения в уплотненной области водорода по мере увеличения z .

Характерным примером является группа профилей в области $135^\circ \leq l'' \leq 152^\circ.5$, которую мы воспроизводим по каталогу Кви, Мюллера и Вестерхаута [2] на рис. 4. Во всех профилях этой группы, имеющих положительное b'' , наблюдаются локальные максимумы интенсивности около значений лучевых скоростей $-30 \div -50$ км/сек. В профилях с отрицательными b'' аналогичные максимумы не наблюдаются, или почти не наблюдаются. Для положительных же b'' связь упомянутых максимумов (мы снабдили их вертикальными отметками) не вызывает сомнений. По-видимому, в рассматриваемом направлении находится значительное количество нейтрального водорода повышенной плотности, расположенного главным образом в области положительных z .

Благодаря симметричным формам кривых около максимумов, в этой группе профилей нет необходимости учета влияния остаточных скоростей водорода, самопоглощения и других эффектов. Эти редукции не изменяют положения максимумов.

В профилях с положительными b'' отчетливо виден систематический сдвиг в сторону меньших лучевых скоростей положений максимумов по мере увеличения b'' .

В табл. 4 приведены значения

$$v_r \text{ и } \Omega(R, z) = \omega(R, z) - \omega_0 = \frac{v_r}{\sin l'' \cos b''},$$

вычисленные для положений локальных максимумов. Так как значе-

Таблица 5

l'' b''	134°.9		137°.4		139°.9		142°.4		147°.4		152°.4	
	v_r	Ω										
+9°.1	—	—	-52.9	-7.92	—	—	—	—	-45.6	-85.7	-43.3	-94.7
+6.6	-56.0	-79.7	-52.6	-78.3	-48.3	-75.6	-43.2	-71.3	-42.5	-79.4	-39.5	-85.9
+4.1	-55.2	-78.2	-48.4	-71.7	-46.2	-72.0	-42.7	-70.2	-39.3	-73.2	-37.1	-80.5
+1.6	-51.7	-73.0	-43.6	-64.4	-42.7	-66.3	-39.3	-64.4	-34.8	-64.6	-34.0	-73.4
-0.9	-45.4	-64.1	-42.1	-62.2	-41.4	-64.3	-39.3	-64.4	-32.1	-59.6	-27.1	-58.5
-3.2	-46.5	-65.8	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—

ния b'' в соседних по l'' контурах хотя и близки, но не совпадают, в таблице указаны \bar{b}'' , равные средним значениям b'' , близких по значениям этой координаты, профилей для всех рассматриваемых значений l'' . Отклонения соответствующих значений b'' от \bar{b}'' , как

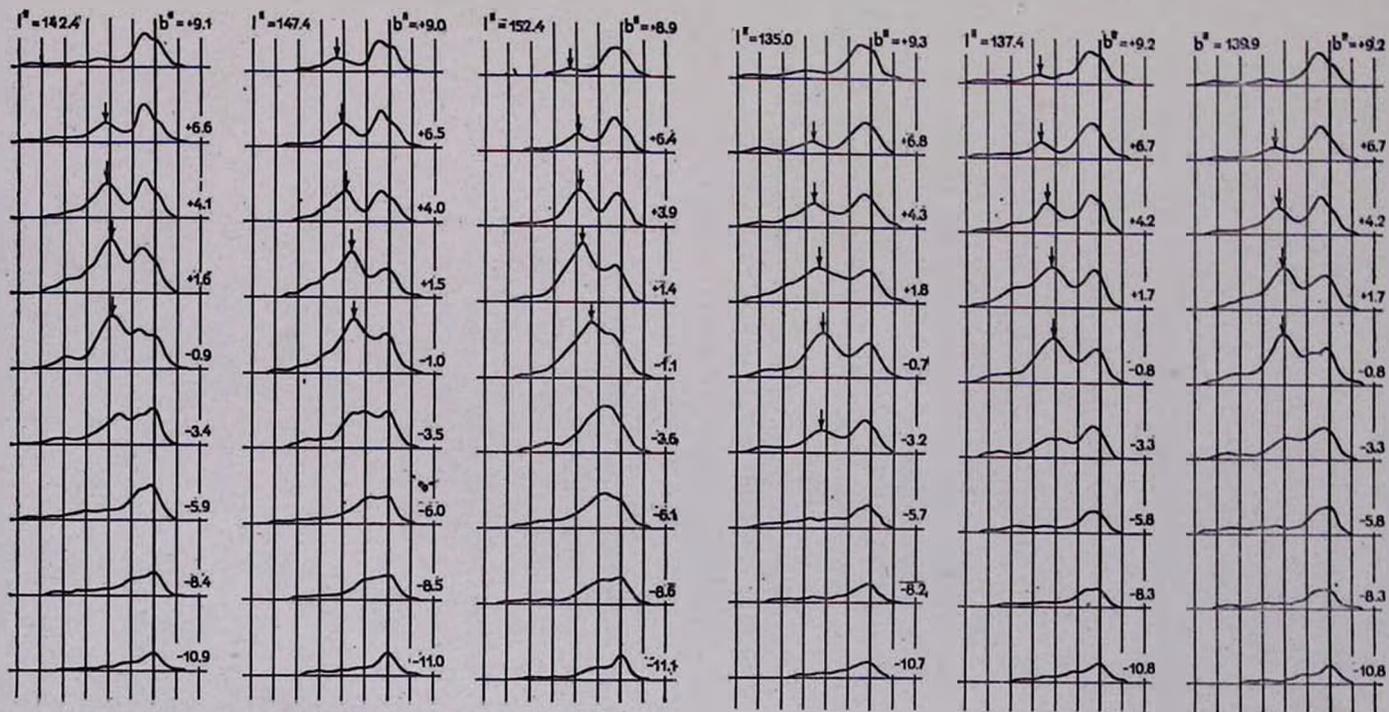


Рис. 4.

это легко видеть по данным рис. 1, весьма малы и не могут играть существенной роли.

В табл. 6 приведены средние величины Ω для шести различных значений l , фигурирующих в табл. 5.

Таблица 6

\bar{b}''	$-0^{\circ}.9$	$+1^{\circ}.6$	$+4^{\circ}.1$	$+6^{\circ}.6$	$+9^{\circ}.1$
Ω	-62.2	-67.7	-74.3	-78.2	-86.5
z	-0.004	0.008	0.020	0.034	0.045

Налицо систематическое со сравнительно равномерным ходом уменьшение Ω при увеличении \bar{b}'' . Чтобы определить градиент изменения угловой скорости в направлении z , необходимо оценить расстояние до водородных масс, вызывающих максимумы в профилях линий.

Интерполирование в табл. 5 дало бы для $\bar{b}'' = 0$ значение $\Omega = -64.2$. Однако, из соображений симметрии надо полагать, что у Ω при $\bar{b}'' = 0$ имеется максимум. Поэтому более подходящим является значение $\Omega = -62$. К сожалению, кривая скорости вращения Галактики для внешних областей известна неуверенно. На основании данных рис. 3 расстояние от центра Галактики водородной массы, вызывающей максимумы в профилях линий, нужно оценить в 1.2. Это означает, что расстояние ее от Солнца составляет 0.28. Тогда, согласно табл. 5, градиент скорости обращения водородных масс в направлении z составит в среднем -5 км/сек на 0.01.

Этот результат, полученный по сдвигам максимумов в профилях линий, подтверждает результаты, полученные методом невязок уравнения интенсивности.

Авторы благодарят О. А. Морину и Т. И. Подунову за помощь при выполнении вычислений.

Ленинградский государственный
университет

THE DETERMINATION OF VARIATION OF THE GALAXY ROTATION VELOCITY AT Z-DIRECTION FROM THE NEUTRAL HYDROGEN LINE PROFILES

T. A. AGEKIAN, I. V. PETROVSKAYA, B. I. FESSENKO

A method is proposed for the determination of the variation of Galaxy rotation velocity of the neutral hydrogen subsystem for outer Ga-

laxy regions outside the galactic plane. The rotation velocity of neutral hydrogen decreases at an average of $10 \text{ km/sec} - 5 \text{ km/sec}$ at the distances of galactic centre 1.2—1.4 with the recession from the galactic plane on 0.01 (the distances are expressed in the units of the distance of the Sun from the galactic centre). The rotation curve for neutral hydrogen subsystem in the outer regions of galactic plane is made more exact.

Л И Т Е Р А Т У Р А

1. Т. А. Агекян, И. В. Петровская, Б. И. Фесенко, Астрон. ж., 41, 1027, 1964.
2. С. Muller, G. Westerhout, Bull. Astron. Inst. Netherl., 13, 151, 1957.