

УДК 524.63

О радиальном движении местной системы отсчета

Л. В. Юревич

Из сравнения угловых скоростей молекулярных облаков, расположенных в окрестностях Солнца, выявлено дополнительное движение местной системы отсчета в направлении к антицентру Галактики со скоростью $\Pi_0 = 6$ км/с. Рассматривались молекулярные облака, наблюдаемые в линиях поглощения молекулы гидроксидла на частотах 1665 и 1667 МГц. Анализировались два случая: чисто круговое движение облаков и круговое движение совместно с радиальным. В первом случае получено $\Pi_0 = 9$ км/с, во втором, более полно описывающем движение облаков в Галактике, — $\Pi_0 = 6$ км/с. Предлагается учитывать дополнительное движение местной системы отсчета в направлении к антицентру при кинематических исследованиях Галактики.

ON THE RADIAL MOTION OF LOCAL STANDARD OF REST, by Yurevich L. V. — An additional LSR radial motion with velocity $\Pi_0 = 6$ km·s⁻¹ towards the anticentre of the Galaxy has been revealed from comparison of rotational velocities of near-by molecular clouds. The molecular clouds observed at 1665 and 1667 MHz hydroxyl lines were considered. Two cases have been studied: pure circular cloud motion and circular cloud motion with radial one, the latter being more realistic case. Velocities of LSR radial motion Π_0 are found to be 9 and 6 km·s⁻¹, respectively. Additional LSR radial motion with velocity 6 km·s⁻¹ is suggested to be taken into account for galactic studies based on the radial velocities.

Введение. При исследованиях движения различных галактических объектов необходимо знать вектор скорости движения системы отсчета, в которой измеряются их лучевые скорости. Обычно лучевые скорости приводятся к местному стандарту покоя (LSR), определяемому движением Солнца со скоростью 19,5 км/с в направлении с галактическими координатами $L = 56^\circ$ и $B = 23^\circ$.

Анализ данных радионаблюдений, основанный на лучевых скоростях, приведенных к LSR, порой приводит к заметным расхождениям в кинематике и структуре Галактики в областях, расположенных по разные стороны относительно линии, соединяющей галактический центр и Солнце [8, 10, 11]. Такие расхождения могут быть устранены при соответствующем изменении вектора скорости местной системы отсчета, связанной с Солнцем (МСО).

Впервые на эффект неверного учета движения МСО, приводившего к расхождению кривых вращения системы галактического нейтрального водорода в I и IV галактических квадрантах и к асимметрии в расположении спиральных рукавов, обратил внимание Керр [10]. Для устранения отмеченных эффектов он ввел дополнительное движение МСО в направлении к антицентру Галактики со скоростью $\Pi_0 = 7$ км/с. Впоследствии задача уточнения этого движения рассматривалась многими исследователями, однако их результаты дают большой разброс значений дополнительного радиального движения — от 0 до 40 км/с [1, 8, 10, 13].

Кроме указаний на необходимость введения дополнительного радиального движения в некоторых работах [7, 11] предлагается учесть движение МСО в азимутальном направлении. Что касается дополнительного радиального движения, то в недавних исследованиях кинематики диффузных туманностей [1] и молекулярных облаков CO [7] оно не было выявлено.

Отметим, что в подобных исследованиях обычно рассматривается усредненное движение выборки галактических объектов без учета систематических некруговых движений. Так как компоненты лучевых скоростей таких движений могут быть сопоставимы с компонентами

круговых скоростей в определенных галактических направлениях, то их следует учитывать при точных анализах данной задачи.

В настоящей работе предлагается способ определения дополнительного радиального движения МСО по анализу кругового движения близлежащих галактических объектов, который позволяет учесть крупномасштабные радиальные движения [4]. Вначале рассматривается

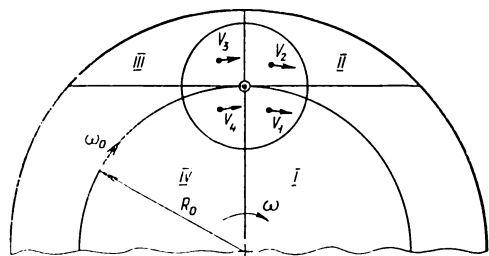
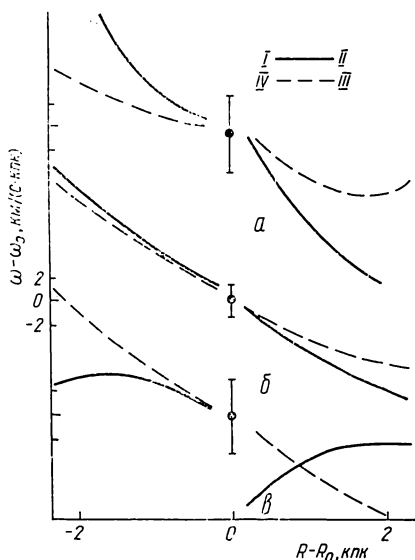


Рис. 1. Схема кругового вращения Галактики и расположение галактических квадрантов

Рис. 2. Кривые вращения для системы пробных частиц в четырех квадрантах при различных значениях радиального движения P_0 системы отсчета, связанной с наблюдателем: а — $P_0=6$ км/с и направлена к центру вращения; б — $P_0=0$; в — $P_0=6$ км/с и направлена от центра вращения



моделирование движения частиц, вращающихся относительно общего центра, а затем приводятся результаты исследования движения молекулярных облаков, наблюдаемых в линиях поглощения молекулы гидроксила на частотах 1665 и 1667 МГц для двух видов движения: чисто кругового и кругового совместно с радиальным движением.

Модель. Постановка задачи. Определение движения системы отсчета, в которой находится наблюдатель, в простейшем случае заключается в измерении скоростей движения этой системы относительно другой инерциальной системы, либо относительно объектов с известным движением в инерциальной системе отсчета. Рассмотрим второй случай, когда система отсчета участвует в круговом движении совместно с близлежащими объектами относительно общего центра вращения.

В случае кругового движения объекты, располагающиеся на одинаковых расстояниях от центра вращения, должны вращаться с одинаковыми скоростями (рис. 1): $V_1(R_1) = V_4(R_4)$ и $V_2(R_2) = V_3(R_3)$, где $R_1 = R_4$ и $R_2 = R_3$. Это условие должно выполняться в случае кругового вращения и для нашей Галактики. В действительности кривые вращения в I и IV галактических квадрантах, определенные по лучевым скоростям в системе LSR, различаются между собой [3, 5, 10]. Эти различия могут быть устранены при учете дополнительного радиального движения МСО [10]. Такую зависимость кривых вращения от дополнительного движения системы отсчета можно использовать для выявления этого искомого движения.

Сначала мы выполнили моделирование движения системы частиц, вращающихся относительно общего центра совместно с системой отсчета. Помимо вращения системе отсчета задавалось дополнительное радиальное движение по прямой, соединяющей наблюдателя с центром вращения.

Движение частиц в системе отсчета, располагающейся от центра вращения на расстоянии R_0 и вращающейся относительно него с угловой

скоростью ω_0 , наблюдается как движение по лучу зрения со скоростью

$$V_r = R_0 [\omega(R) - \omega_0] \sin l, \quad (1)$$

где $\omega(R)$ — угловая скорость вращения системы на расстоянии R_0 от центра вращения; l — долгота частицы.

В результате дополнительного радиального движения системы отсчета со скоростью Π_0 в направлении центра вращения лучевые скорости частиц изменятся на величину $\Pi_0 \cos l$. При такой добавке угловая скорость $\omega(R)$ станет равной $\tilde{\omega}(R)$:

$$\tilde{\omega}(R) = \omega_0 + (V_r - \Pi_0 \cos l)/(R_0 \sin l). \quad (2)$$

Движение систем частиц в каждом квадранте опишем кривыми вращения $\tilde{\omega}_{pi}$ ($i=1, 2, 3, 4$), которые определим путем сглаживания значений $\tilde{\omega}(R)$ полиномами второй степени. Для количественной характеристики расхождения кривых вращения, которое вызвано дополнительным радиальным движением системы отсчета, введем величину

$$\Delta\omega = \sqrt{\left\{ \sum_1^n [\tilde{\omega}_{p1}(R_1) - \tilde{\omega}_{p4}(R_4)]^2 + \sum_1^n [\tilde{\omega}_{p2}(R_2) - \tilde{\omega}_{p3}(R_3)]^2 \right\} / (2n)}. \quad (3)$$

Здесь разности между угловыми скоростями кривых вращения $\tilde{\omega}_{pi}$ берутся на одинаковых расстояниях от центра ($R_1=R_4$ и $R_2=R_3$) в n точках.

Вычисление функций $\tilde{\omega}_{pi}$ при различных значениях Π_0 позволяет изучить влияние радиального движения системы отсчета на соответствующее поведение кривых вращения, что можно использовать для решения обратной задачи — нахождения искомого значения Π_0 по поведению кривых вращения.

Результаты моделирования. Рассмотрено 140 частиц в круге радиусом 2 кпк с центром у наблюдателя. Угловые скорости частиц задавались согласно кривой вращения $\omega(R)$ Галактики [9]. Для приближения модели к наблюдаемому галактическим объектам (расстояния до которых определяются с ошибками), участвующим в хаотических движениях, введем в лучевые скорости и расстояния от наблюдателя отклонения, распределенные по нормальному закону с дисперсиями соответственно σ_{V_r} и σ_r . Их значения задавались от 0 до 5 км/с и от 0 до 1 кпк. Значение R_0 принималось равным 8.5 кпк [6]. В качестве исходного значения скорости Π_0 радиального движения наблюдателя к центру вращения принято 6 км/с.

Результаты определения кривых вращения при трех значениях скорости радиального движения системы отсчета приведены на рис. 2: *a* — лучевые скорости частиц измерены в системе отсчета, движущейся к центру вращения со скоростью $\Pi_0=6$ км/с; *б* — лучевые скорости исправлены с учетом первоначального радиального движения системы отсчета (случай неподвижной в радиальном направлении системы отсчета); *в* — лучевые скорости измерены в системе отсчета, движущейся со скоростью $\Pi_0=6$ км/с от центра вращения (первоначальное радиальное движение к центру со скоростью 6 км/с исправлено дополнительным движением от центра со скоростью 12 км/с). Данные результаты получены при значениях $\sigma_r=0.2$ кпк и $\sigma_{V_r}=2$ км/с. Вертикальными отрезками обозначены расхождения $\Delta\omega$ кривых вращения, которые определены по формуле (3) при $n=20$.

Как видно из рис. 2, *б*, кривые вращения в четырех квадрантах совпадают лишь в случае, когда лучевые скорости частиц измерены в системе отсчета, участвующей только в круговом движении. При наличии дополнительного радиального движения (рис. 2, *a*, *в*) кривые

вращения расходятся, и значение расхождения увеличивается при увеличении скорости радиального движения. Таким образом, по сходимости кривых вращения в окрестностях наблюдателя можно выявить наличие радиального движения системы отсчета, связанной с этим наблюдателем, и оценить его величину.

Движение молекулярных облаков. Применим изложенную схему выявления радиального движения системы отсчета к массиву молекулярных облаков, наблюдаемых в линиях поглощения молекулы гидроксидила на частотах 1665 и 1667 МГц [12]. Гелиоцентрические расстояния облаков определим по зависимости $D = (\Delta v^2 / T_A)^{1/3}$ от расстояния, где Δv и T_A — параметры линии поглощения ОН [2, 3].

Из обзора [12], выполненного в диапазоне галактических долгот $337\text{—}270^\circ$, в окрестностях Солнца радиусом 2 кпк выявлено 164 облака, которые расположились по четырем галактическим квадрантам следующим образом: $N_1/N_2/N_3/N_4 = 92/9/10/53$. Сопоставление кривых вращения систем облаков мы выполнили для двух случаев: 1 — чисто кругового движения; 2 — кругового движения совместно с радиальными движениями облаков.

Круговые движения. Вначале исправим наблюдаемые лучевые скорости молекулярных облаков \tilde{V}_r , приведенные в системе LSR, за дополнительное радиальное движение со скоростью Π_0 . По новым лучевым скоростям определим угловые скорости облаков и кривые вращения ω_{pi} в каждом квадранте, одновременно вычисляя значение $\Delta\omega$. Скорость Π_0 направлена от центра Галактики (при противоположном направлении расхождение кривых вращения увеличивалось еще больше) и варьировалась с приращением 1 км/с от нулевого значения до тех пор, пока расхождение между кривыми достигало минимума и начинало затем снова увеличиваться.

Результаты вычислений для шести значений Π_0 : 0, 3, 6, 9, 12 и 15 км/с приводятся на рис. 3. Вертикальными отрезками показаны расхождения $\Delta\omega$ между кривыми. Как видно из рис. 3, при скорости радиального движения $\Pi_0 = 9$ км/с кривые вращения молекулярных облаков в окрестностях Солнца лучше всего согласуются между собой. При этом расхождение имеет минимальное значение, равное 3.4 км/(с·кпк). В случае с $\Pi_0 = 0$ (скорости вращения определены по лучевым скоростям, измеренным в системе LSR) расхождение составляет 7.3 км/(с·кпк).

Итак, если наблюдаемые лучевые скорости молекулярных облаков в галактической плоскости определяются одними круговыми движениями относительно галактического центра, то для согласования таких движений в окрестностях Солнца необходимо МСО (в дополнение к стандартному движению Солнца) приписать дополнительное движение в направлении к антицентру Галактики со скоростью $\Pi_0 = 9$ км/с.

Круговые и радиальные движения. В некоторых направлениях в Галактике проекция скорости вращения на луч зрения сопоставима с проекцией на луч зрения радиальной скорости или даже меньше ее [9]. Это может внести ошибки в скорости вращения облаков гидроксидила, определяемые в модели чисто кругового вращения, которые в нашей выборке неравномерно распределены по квадрантам. Поэтому важен учет их радиальных движений.

Для определения радиальных движений облаков воспользуемся методикой, предложенной в [4]. По этой методике радиальные движения $\Pi(R)$ определяются по лучевым скоростям облаков, симметричных относительно линии, соединяющей центр Галактики и Солнце. Полученные при соответствующих значениях Π_0 , которые, как и в предыдущем разделе, варьировались через 1 км/с, значения $\Pi(R)$ сглаживались сплайном, и сглаженные радиальные скорости учитывались в лучевых скоростях. По остаточным лучевым скоростям, которые пред-

ставляют собой проекции только круговых движений, определялись кривые вращения в четырех галактических квадрантах и вычислялась величина $\Delta\omega$.

На рис. 4 приведены результаты вычислений с учетом радиальных движений для шести значений скорости Π_0 : 0, 2, 4, 6, 8 и 10 км/с. Из этого рисунка видно, что наилучшее согласие скоростей вращения в

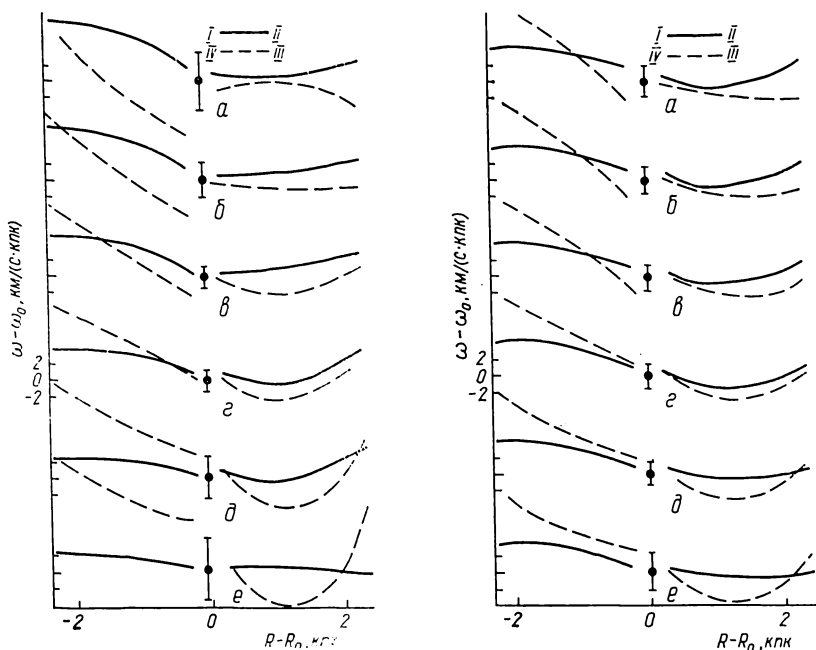


Рис. 3. Кривые вращения системы молекулярных облаков в четырех галактических квадрантах в схеме чисто кругового вращения при различных значениях радиального движения МСО, направленного к антицентру Галактики (в км/с): а — 0; б — 3; в — 6; г — 9; д — 12; е — 15

Рис. 4. Кривые вращения системы молекулярных облаков в четырех галактических квадрантах в схеме кругового вращения с учетом радиальных движений при различных значениях радиального движения МСО, направленного к антицентру Галактики (в км/с): а — 0; б — 2; в — 4; г — 6; д — 8; е — 10

соответствующих квадрантах и минимальное расхождение между кривыми наблюдаются при $\Pi_0 = 6$ км/с. Соответствующее значение $\Delta\omega$ несколько меньше, чем при учете одних круговых движений, и составляет 3.1 км/с.

Таким образом, учет радиальных движений, в которых участвуют молекулярные облака, приводит к меньшему значению дополнительной радиальной скорости МСО по сравнению со случаем, когда рассматриваются одни радиальные движения.

Обсуждение результатов. Предложенная методика определения дополнительного радиального движения МСО, в которой используется неразрывность кривых вращения различных галактических секторов в окрестностях Солнца, применена к движению молекулярных облаков гидроксила. В отличие от других исследований в ней учитываются как скорости вращения относительно общего центра, так и конкретный вид систематических радиальных движений.

Получено, что в случае пренебрежения радиальными движениями неразрывность кривых вращения требует введения дополнительного радиального движения МСО к антицентру Галактики со скоростью 9 км/с. Это значение близко к скорости 10 км/с, найденной из анализа радиального движения молодых объектов диска относительно старых

объектов диска Галактики [13], в котором также не учитывался конкретный ход радиальных движений.

В результате учета радиальных движений облаков дополнительная скорость МСО уменьшилась до 6 км/с и приблизилась к значению 7 км/с, которое получено [10] из сравнения тангенциальных лучевых скоростей нейтрального водорода в I и IV квадрантах. Исследование [10] тангенциальных областей способствовало отделению радиальных движений, что, очевидно, обусловило сходство с нашим результатом.

Оценим точность определения Π_0 по дисперсии скоростей молекулярных облаков, которая находится после вычитания составляющих скоростей кругового и радиального движений и равна $\sigma_v = 13.6$ км/с. Тогда ошибка $\Delta\Pi_0 = \sigma_v / (\sqrt{N} t_{\alpha/2; N})$, где N — число облаков; $t_{\alpha/2; N}$ — коэффициент Стьюдента. При уровне значимости $\alpha = 0.05$ ошибка $\Delta\Pi_0 = 2.1$ км/с. Таким образом, $\Pi_0 = 6 \pm 2$ км/с.

Дополнительное радиальное движение местной системы отсчета, выявленное по облакам гидроксила и по другим галактическим системам, следует учитывать при кинематических исследованиях Галактики. Отметим, что изложенная методика может также применяться к другим галактическим объектам: звездам с малой дисперсией скоростей, областям II и др.

Автор благодарен И. Г. Колеснику за обсуждение результатов работы и И. П. Веденичевой за помощь в организации вычислений.

1. *Аведисова В. С.* Спиральная структура Галактики в окрестностях Солнца по диффузным туманностям // Письма в Астрон. журн.—1985.—11, № 6.—С. 448—454.
2. *Колесник И. Г., Юревич Л. В.* Определение расстояний до межзвездных облаков по линиям поглощения ОН // Астрофизика.—1983.—19, вып. 4.—С. 761—777.
3. *Колесник И. Г., Юревич Л. В.* Кривая вращения Галактики по наблюдениям гидроксила // Там же.—1985.—22, вып. 3.—С. 461—472.
4. *Колесник И. Г., Юревич Л. В.* Радиальные движения в Галактике // Кинематика и физика небес. тел.—1987.—3, № 3.—С. 72—75.
5. *Петровская И. В.* Кривая вращения подсистемы нейтрального водорода в Галактике // Письма в Астрон. журн.—1979.—5, № 12.—С. 632—635.
6. *Юревич Л. В.* Определение расстояния Солнца от центра Галактики по кривой вращения // Астрофизика.—1985.—23, вып. 2.—С. 265—275.
7. *Clemens D. P.* Massachusetts — Stony Brook galactic plane CO survey: the galactic disk rotation curve // *Astrophys. J.*—1985.—295, N 2.—P. 422—436.
8. *Clube S. V. M.* Does our Galaxy have a violent history? // *Vistas Astron.*—1978.—22.—P. 77—118.
9. *Haud U.* Rotation curve of our Galaxy for $R > R_0$ // *Astrophys. and Space Sci.*—1984.—104, N 4.—P. 337—345.
10. *Kerr F. J.* Galactic velocity models and the interpretation of 21 cm surveys // *Mon. Notic. Roy. Astron. Soc.*—1962.—123, N 4.—P. 327—345.
11. *Shuter W. L. H.* A rotation standard of rest // *Ibid.*—1982.—199, N 2.—P. 109—113.
12. *Turner B. E.* A survey of ОН near the galactic plane // *Astron. and Astrophys. Suppl. Ser.*—1979.—37, N 1.—P. 1—332.
13. *Uppgreen A. R.* The motions of K and M dwarf stars of different ages // *Astron. J.*—1978.—83, N 6.—P. 626—635.

Глав. астрон. обсерватория АН УССР,
Киев

Поступила в редакцию 24.04.87,
после доработки 01.02.88