АСТРОФИЗИКА

ТОМ 43 АВГУСТ, 2000 ВЫПУСК 3

УДК: 524.6-34

РАЗЛОЖЕНИЕ НА СОСТАВЛЯЮЩИЕ НАБЛЮДАЕМОЙ ДИСПЕРСИИ ЛУЧЕВЫХ СКОРОСТЕЙ ГАЛАКТИЧЕСКОЙ ПОДСИСТЕМЫ

И.И.НИКИФОРОВ

Поступила 28 февраля 2000
Принята к печати 20 марта 2000

Рассматриваются возможные подходы в задаче разложения наблюдаемой дисперсии лучевых скоростей однородных объектов Галактики на истинную дисперсию подсистемы и вклад случайных ошибок гелиоцентрических расстояний r. Из построенных методик удовлетворительные результаты может дать лишь совместное оценивание истинной дисперсии и средней относительной ошибки r. Этим способом для подсистемы облаков CO с наблюдаемой дисперсией 8.7 ± 0.4 км/с получена истинная дисперсия 8.0 ± 0.6 км/с и средняя ошибка модулей расстояния этих объектов $0.25^m \pm 0.085^m$.

1. *Введение.* Дисперсии лучевых скоростей галактических подсистем являются важными характеристиками для задач кинематического, динамического и эволюционного моделирования Галактики. Обычно дисперсию вычисляют непосредственно по отклонениям скоростей отдельных объектов от их средней скорости в данном месте Галактики (скорости центроида объектов). Однако такая "наблюдаемая" дисперсия в общем случае завышена за счет ошибок наблюдений. В близких окрестностях Солнца лишь ошибки измерений скоростей могут повлиять на результат. В этом случае для большинства подсистем искажения невелики, но околосолнечное значение дисперсии не обязательно хорошо описывает подсистему в масштабах Галактики. С другой стороны, при нахождении дисперсии по неблизким объектам необходим учет дифференциального галактического вращения, поэтому в наблюдаемую дисперсию вносят вклад и случайные ошибки измерений гелиоцентрических расстояний r до объектов.

В этой работе рассматриваются возможные подходы в задаче разложения наблюдаемой дисперсии с учетом ошибок в лучевых скоростях на "истинную" дисперсию подсистемы, не искаженную ошибками измерений, и вклад ошибок расстояний. Мы используем эти подходы при анализе остаточных скоростей облаков CO и показываем, что только один из них может дать удовлетворительное решение задачи. Методика, вытекающая из этого подхода, дает важный побочный результат - возможность назависимой оценки средней относительной ошибки расстояний в используемом каталоге.

2. *Постановка задачи, модели вращения и данные.* Наблюдаемой дисперсией лучевых скоростей назовем традиционную оценку дисперсии

$$(\sigma_v)^2_{\rm obs} = \frac{1}{N_{\rm free}} \min \sum_{j=1}^{N} v_j^2, \quad v \equiv V - V_{\rm mod}, \tag{1}$$

где V и $V_{\rm mod}$ - наблюдаемая и модельная лучевые скорости, соответственно; N - число объектов, для которых имеются измерения V и r, $N_{\rm free} = N - M$ - число степеней свободы, M - число параметров модели $V_{\rm mod}$, найденных по этим N объектам. "Истинной" дисперсией $(\sigma_v)_0$ подсистемы будем считать ту составляющую наблюдаемой дисперсии относительно среднего (модельного) закона движения, которая не вызвана случайными ошибками измерений.

Любые систематические ошибки модельного закона движения подсистемы увеличивают наблюдаемую дисперсию скоростей, и это завышение бывает очень существенным (см. [1]). Поэтому искать истинную дисперсию осмысленно лишь для модели, детально описывающей хотя бы дифференциальное вращение, которое является основной составляющей моделей движения по крайней мере для дисковых подсистем Галактики. Задача построения таких оптимально-сглаженных моделей вращения, которые адекватно воспроизводят наиболее значимые детали реального среднего закона вращения, была рассмотрена в [2], а в [1] эти модели были получены для облаков CO, связанных с областями HII или отражающими туманностями. Поэтому в данной работе мы анализируем остаточные скорости для подсистемы облаков CO, используя найденные в [1] модели для поля лучевых скоростей относительно Местного стандарта покоя (МСП). Эти осесимметричные модели имеют общий вид

$$V_{\rm mod} = \left[-2A\Delta R + \sum_{i=2}^{n} \theta_i (\Delta R)^i\right] \frac{R_0}{R} \sin l \cos b - \Pi_{\rm LSR} \cos l \cos b - \Theta_{\rm LSR} \sin l \cos b, \tag{2}$$

где $\Delta R \equiv R - R_0$; $R = \left(R_0^2 + r^2 \cos^2 b - 2 R_0 r \cos l \cos b\right)^{1/2}$ - расстояние от облака CO до оси Галактики; R_0 - расстояние от Солнца до центра Галактики; l и b - галактические координаты объекта; A - постоянная Оорта; θ_i - коэффициенты разложения линейной скорости вращения в ряд по ΔR; $\Pi_{\rm LSR}$, $\Theta_{\rm LSR}$ - компоненты пекулярной скорости МСП в направлениях $l = 0°$ и $l = 90°$, соответственно. Пекулярное движение МСП здесь рассматривается относительно системы координат с началом в окрестностях Солнца, вращающейся по круговой орбите со скоростью, равной средней скорости вращения подсистемы на $R = R_0$. Мотивация использования формы (2) для описания галактического вращения приведена в [2]. Найденные в [1] параметры R_0, A, $\theta_2,...,\theta_n$, $\Theta_{\rm LSR}$ и $\Pi_{\rm LSR}$, а также "допустимые" значения порядков разложения n, при которых модель можно считать оптимально-сглаженной, принимались в данной работе за известные величины.

Поскольку в [1] модели были найдены для двух выборок облаков CO, то и анализ остаточных скоростей здесь также выполнен для этих двух выборок. Одна из них (BFS2) включает в себя 107 облаков CO, связанных с областями HII, и охватывает долготы $-9° \leq l \leq 243°$. Данные для этой выборки взяты, в основном, из каталога BFS [3]. Другая выборка (BFS2/BBW) кроме объектов BFS2 содержит и южные облака CO из каталога BBW [4], связанные с областями HII или с отражающими туманностями; всего в выборке 209 объектов. Для южных облаков CO использованы данные [5]. Выборка BFS2/BBW менее однородна по типу объектов, чем BFS2, но покрывает больший промежуток долгот: $-9° \leq l \leq 305°$. При построении в [1] моделей вращения некоторые объекты были отброшены из-за больших невязок. Все данные подробно описаны в [1].

Заметим, что при определении истинной дисперсии относительно осесимметричной модели (2) подразумевается, по сути, что в качестве случайных отклонений от усредненного по радиусу закона вращения рассматриваются и отклонения, создаваемые локальными потоковыми движениями, в том числе и вызванными волнами плотности. Найденную так дисперсию можно назвать *глобальной*, противопоставляя ее *локальной* дисперсии, которая характеризует отклонения от среднего движения в локальном центроиде объектов в данном месте Галактики. В общем случае глобальная дисперсия превышает локальную. Очевидно, что ставить задачу о нахождении локальной дисперсии можно лишь при наличии кинематической модели, которая уверенно воспроизводит возмущения хотя бы от регулярной спиральной структуры Галактики. Мы не имеем пока такой модели, поэтому можем получить только глобальную истинную дисперсию.

Для упрощения задачи мы не пытаемся определить параметры эллипсоида скоростей, считая распределение остаточных скоростей сферическим. Помимо недостатка статистики это оправдано и тем, что для наиболее молодых и горячих звезд, с которыми связаны наши объекты, радиальная и азимутальная дисперсии мало отличаются друг от друга, по крайней мере в окрестности Солнца (см., например, [6]), а z-дисперсия практически не влияет на $(\sigma_V)_{obs}$ для плоской подсистемы, рассматриваемой на больших масштабах.

Ошибки l и b дают ничтожный вклад в наблюдаемую дисперсию, поэтому мы принимаем $\sigma_l = 0 = \sigma_b$. Ошибки измерений лучевых скоростей σ_V и истинную дисперсию нельзя разделить в данной постановке задачи, т.к. обе составляющие не зависят от положения в Галактике. Эти ошибки можно лишь учесть, используя оценки σ_V из каталогов данных.

После всех упрощений задача об интерпретации наблюдаемой дисперсии скоростей фактически сводится к разделению вкладов истинной дисперсии подсистемы $(\sigma_v)_0$ и ошибок расстояний σ_r.

3. *Методы анализа остаточных скоростей.* В предположениях, сформулированных выше, индивидуальная дисперсия (неопределенность) остаточной скорости j-ого объекта имеет вид

$$\sigma_{v_j}^2 = \sigma_{V_j}^2 + (\sigma_v)_0^2 + \sigma_{r_j}^2 \left(\frac{\partial V_{\text{mod}}}{\partial r}\right)_j^2, \quad j = 1, 2, \cdots, N; \tag{3}$$

здесь N - число объектов в выборке. Можно предложить по крайней мере три способа использования этого уравнения. Рассмотрим их.

Первый метод. Суммируем уравнения (3), делим результат на N и заменим индивидуальные дисперсии на среднюю дисперсию:

$$\sigma_{v_j}^2 = (\sigma_v)_{\text{obs}}^2 . \tag{4}$$

Тогда получим следующую оценку истинной дисперсии:

$$(\sigma_v)_0^2 = (\sigma_v)_{\text{obs}}^2 - \frac{1}{N}\sum_j^N \left[\sigma_{V_j}^2 + \sigma_{r_j}^2 \left(\frac{\partial V_{\text{mod}}}{\partial r}\right)_j^2\right]. \tag{5}$$

При таком “интегральном” подходе мы вынуждены принять за известные величины оценки σ_r, приведенные авторами наблюдений, и можем найти только $(\sigma_v)_0$. Этот метод применим, если авторские σ_r известны надежно. Предположение (4) не является слишком сильным, т.к. оно фактически сводится к тому, что в качестве оценки средней величины дисперсий $\sigma_{v_j}^2$ берется известный средний квадрат остаточной скорости $(\sigma_v)_{\text{obs}}^2$. Эти две величины относятся друг к другу как математическое ожидание среднего к выборочному среднему.

Второй метод. Воспользуемся в качестве оценки индивидуальной дисперсии остаточной скорости объекта значением этой скорости, т.е. положим

$$\sigma_{v_j}^2 = v_j^2. \tag{6}$$

Этот прием применяется при определении эллипсоида скоростей по лучевым скоростям локальных объектов (см., например, [7,8]). Конечно, замена (6) верна лишь в среднем и может быть оправдана только при достаточно большой статистике. Используя (6) и предполагая, что относительная ошибка расстояния одинакова для всех объектов, получаем из (3) следующее условное уравнение:

$$v_j^2 - \sigma_{V_j}^2 = (\sigma_v)_0^2 + \delta_r^2 r_j^2 \left(\frac{\partial V_{\text{mod}}}{\partial r}\right)_j^2, \quad \delta_r \equiv \left\langle \frac{\sigma_r}{r} \right\rangle. \tag{7}$$

Таким образом, авторские величины ошибок расстояний, приведенные в каталогах, здесь игнорируются. Систему (7) можно решить методом наименьших квадратов относительно $(\sigma_v)_0^2$ и квадрата относительной ошибки расстояний δ_r^2. Таким образом, этот метод позволяет дополнительно оценивать среднюю случайную ошибку расстояний в каталоге, независимо от начальных представлений об их точности.

Третий метод. Если, используя (6), мы представим ошибки расстояний в виде

$$\sigma_{r_j} = s_r \tilde{\sigma}_{r_j}, \tag{8}$$

где $\tilde{\sigma}_{r_j}$ - авторское значение ошибки, а s_r - поправочный множитель, одинаковый для всех объектов, то выражение (3) можно записать так:

$$v_j^2 - \sigma_{V_j}^2 = (\sigma_v)_0^2 + s_r^2\, \tilde{\sigma}_{r_j}^2 \left(\frac{\partial V_{\mathrm{mod}}}{\partial r}\right)_j^2 . \tag{9}$$

Систему этих условных уравнений можно решить методом наименьших квадратов относительно $(\sigma_v)_0^2$ и s_r^2. При таком подходе дополнительно определяется средний поправочный множитель для величин ошибок расстояний, приведенных в каталоге.

4. ***Результаты и их обсуждение***. Табл.1 содержит результаты разложения наблюдаемой дисперсии, полученные тремя методами для двух выборок облаков CO. Величины, найденные по данным выборки BFS2/BBW, приведены для всех допустимых порядков n сглаженной модели. В случае выборки BFS2 результаты даны только для модели оптимального порядка, т.е. наилучшего из допустимых (см. [1,2]), т.к. для других n они получились ненадежными.

Таблица 1

РЕЗУЛЬТАТЫ РАЗЛОЖЕНИЯ НАБЛЮДАЕМОЙ ДИСПЕРСИИ ЛУЧЕВЫХ СКОРОСТЕЙ ДЛЯ СИСТЕМЫ ОБЛАКОВ CO

n	$(\sigma_v)_{obs}$, км/с	Метод 1	Метод 2		Метод 3	
		$(\sigma_v)_0$, км/с	$(\sigma_v)_{obs}$, км/с	δ_r	$(\sigma_v)_0$, км/с	s_r
Выборка BFS2 (N = 105-1, -9° ≤ l ≤ 243°)						
5	8.08	5.81 ± 0.42	7.33 ± 0.60	0.109 ± 0.038	7.42 ± 0.57	0.36± 0.12
Выборка BFS2/BBW (N = 204-1, -9° ≤ l ≤ 305°)						
4	8.68	6.82 ± 0.34	8.06 ± 0.58	0.119 ± 0.038	8.32 ± 0.53	0.29± 0.17
5	8.68	6.93 ± 0.35	8.06 ± 0.58	0.117 ± 0.039	8.32 ± 0.53	0.28 ± 0.19
6	8.64	6.87 ± 0.35	7.93 ± 0.60	0.124 ± 0.039	8.20 ± 0.54	0.34 ± 0.16

Модельная кривая вращения, задаваемая в полиномиальном виде (см. уравнение (2)), может иметь большой наклон вблизи края области, охваченной данными, в нашем случае - на больших R. Такой по сути фиктивный наклон, вызванный недостатком данных, приводит к очень большой по модулю формальной величине производной $\partial V_{mod} / \partial r$ для объектов в этом месте Галактики и к существенной недооценке ошибок расстояний в целом. Поэтому при разложении наблюдаемой дисперсии следует выявлять и отбрасывать те объекты, для которых значение этой производной явно выбивается из общего ряда. Для обеих выборок такой объект (S209) оказался единственным. В табл.1 вычитание единицы при указании результирующего объема выборки N обозначает исключение этого облака.

Как показывает табл.1, реальные случайные ошибки r облаков CO меньше их каталожных оценок, поэтому величины истинной дисперсии больше по результатам второго и третьего методов, чем по результатам первого. При использовании первого метода всегда есть опасность получить заметно смещенный результат, если каталожные ошибки r систематически недооценены или переоценены.

Любой добавочный случайный "шум", вызванный неучтенными ошибками, при решении уравнений (7) или (9) фактически интерпретируется как часть истинной дисперсии, и, следовательно, приводит к ее завышению и к занижению вклада ошибок расстояний. В третьем методе используются каталожные величины ошибок расстояний $\tilde{\sigma}_r$, которые известны много хуже, чем сами расстояния, как и ошибки любой измеряемой величины. Так как во втором методе используются оценки расстояний, а не их ошибок, эффект "шума" для него должен быть значительно меньше. Это объясняет, почему третий метод по сравнению со вторым дает завышенную оценку истинной дисперсии и заниженный поправочный множитель для ошибок расстояний (см. табл.1).

Полученные результаты и приведенные выше соображения позволяют заключить, что для решения поставленной задачи предпочтительнее использовать второй метод. Основываясь на его результатах, сформулируем основные выводы о подсистеме облаков CO и о точности расстояний до этих объектов.

1. Истинная дисперсия лучевых скоростей подсистемы облаков CO составляет 8.0±0.6км/с (выбран результат по более представительной выборке BFS2/BBW).

2. Средняя случайная ошибка расстояний в использованных каталогах - 12% ±4%. Это соответствует средней ошибке модулей расстояния $\sigma_r = 0.25^m \pm 0.085^m$.

3. Полученная оценка ошибок r и вычисленные средние отношения $\tilde{\sigma}_r / r$ дают поправочные множители для каталожных ошибок расстояний: $s_r = 0.55 \pm 0.18$ для выборки BFS2 и 0.69 ± 0.23 для выборки BFS2/BBW.

В соответствии с этими результатами, наблюдаемая дисперсия лучевых скоростей CO-облаков 8.67 ± 0.44 км/с (средняя величина для BFS2/BBW по трем допустимым порядкам), следующим образом распадается на вклады истинной дисперсии, ошибок измерений лучевых скоростей и случайных ошибок расстояний:

$$(8.7)^2 = (8.0)^2 + (1.3)^2 + (3.1)^2.$$

Несмотря на большие формальные ошибки, полученные здесь оценки неопределенности расстояний хорошо согласуются с результатами прямого сравнения величин r, найденных независимо разными авторами для одних и тех же облаков CO. Такие сравнения, выполненные в [1], дают сходные значения $s_r \sim 0.6$ и $\sigma_d \leq 0.3^m$.

Последнее говорит в пользу того, что второй метод, построенный в этой работе, дает удовлетворительные результаты. Остальные два метода, как было показано, в общем случае приводят к смещенным оценкам параметров. Второй метод позволяет определять по остаточным лучевым скоростям глобальную истинную дисперсию подсистемы и среднюю ошибку расстояний до объектов. Величины дисперсий для различных подсистем Галактики могут быть использованы для ее динамического моделирования. Кроме того, способность оценивать по невязкам лучевых скоростей истинную дисперсию и неопределенность расстояний важна для нахождения модели вращения подсистемы путем минимизации отклонений как по лучевым скоростям, так и по расстояниям (см., например, [8]). Эта математически более корректная двумерная оптимизация требует знания соотношения между неопределенностями лучевых скоростей и расстояний. Задание неверного соотношения может привести к смещенным результатам и лишить двумерный метод преимущества перед стандартной минимизацией отклонений лишь по скоростям (например, [1]).

В дальнейшем подход, использованный во втором методе, можно применить для решения более сложной задачи - определения глобального эллипсоида скоростей, в том числе и его ориентации. При этом в случае существенно несферического распределения остаточных скоростей можно попытаться выделить не только вклад ошибок расстояний, но и вклад ошибок измерений лучевых скоростей.

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (грант №96-02-19636) и ГКНТП "Астрономия" (проблема 1.2.4.5)

Астрономический институт им. В.В.Соболева
Санкт-Петербургского государственного
университета, Россия

DECOMPOSITION OF OBSERVED DISPERSION OF RADIAL VELOCITIES FOR A SUBSYSTEM OF THE GALAXY

I.I.NIKIFOROV

Possible approaches to the problem of decomposing the observed dispersion of radial velocities of homogeneous Galactic objects into the intrinsic dispersion of the subsystem and the contribution of errors in heliocentric distances r are considered. Of the techniques constructed, only the simultaneous estimation both of the intrinsic dispersion and of the average relative error in r can give reasonable results. For the subsystem of CO clouds with the observed dispersion of 8.7 ± 0.4 km/s, the intrinsic dispersion of 8.0 ± 0.6 km/s and the average error in clouds' distance moduli of 0.25 ± 0.085 mag were arrived at in this manner.

ЛИТЕРАТУРА

1. *И.И.Никифоров*, Астрон. ж., 76, 403, 1999.
2. *И.И.Никифоров*, Астрофизика, 42, 399, 1999.
3. *L.Blitz*, *M.Fich*, *A.A.Stark*, Astrophys. J. Suppl. Ser., 49, 183, 1982.
4. *J.Brand*, *L.Blitz*, *J.G.A.Wouterloot*, Astron. Astrophys. Suppl. Ser., 65, 537, 1986.
5. *J.Brand*, *L.Blitz*, Astron. Astrophys., 275, 67, 1993.
6. *J.Binney*, *M.Merrifield*, Galactic Astronomy, Princeton, New Jersey, 1998.
7. *K.M.Cudworth*, Astron. J., 79, 1384, 1974.
8. *A.Asker*, Astron. Astrophys., 89, 33, 1980.
9. *F.Pont*, *M.Mayor*, *G.Burki*, Astron. Astrophys., 285, 415, 1994.