

О РАСПРЕДЕЛЕНИИ РАДИОПУЛЬСАРОВ НАД ПЛОСКОСТЬЮ ГАЛАКТИКИ

А. А. Логинов, И. Ф. Малов

Предлагается механизм накопления пульсаров над плоскостью Галактики, связанный с торможением в поле тяготения и остановкой на некотором расстоянии z от плоскости. Для пульсаров, чьи скорости близки к средней наблюдаемой скорости около 300 км/сек, рассмотрение кинематики такого движения даёт оценки возраста остановившихся пульсаров порядка десятка миллионов лет и среднего расстояния от плоскости Галактики около 2 кпк. Обнаружено соответствие по долготе распределения пульсаров при $|z| = 0.45\text{--}4.5$ кпк и распределения областей образования массивных звёзд в диске Галактики.

Ключевые слова: пульсары, Галактика, скорости пульсаров, области звездообразования.

Введение. Одним из важнейших направлений в исследованиях пульсаров, позволяющих судить о происхождении и эволюции этих объектов, можно считать изучение их распределения по высоте над плоскостью Галактики (z -координате) с обеих сторон от неё и анализ движения перпендикулярно галактическому диску. Разумно предполагать, что подавляющее большинство пульсаров образуется в плоскости Галактики ($z = 0$) (шаровые скопления мы не рассматриваем) и затем удаляется от нее за счет высоких скоростей, приобретаемых при рождении. Поскольку в пульсарах не наблюдаются спектральные линии, их радиальные скорости нам не известны. По измеренным собственным движениям можно определить их скорость в картинной плоскости V_t . Если распределение составляющих скорости изотропно, можно считать, что ее компоненты одинаковы во всех направлениях, в том числе и перпендикулярно плоскости Галактики. В этом случае скорость удаления от диска $V_z = V_t/2^{1/2}$. Наблюдаемое распределение

Пушчинская радиоастрономическая обсерватория, АКЦ ФИАН, 119991 Россия, Москва, Ленинский пр-т, 53; e-mail: loginof.a@gmail.com, malov@prao.ru.

поперечных скоростей в км/сек по данным каталога [1] представлено на рис. 1. При построении этой гистограммы не учтены 9 пульсаров со скоростями, превышающими 1000 км/сек. Совокупность объектов на рис. 1 лучше всего описывается суммой двух гауссиан:

$$N = 17 \exp \left[- \left(\frac{V - 120}{190} \right)^2 \right] + 7 \exp \left[- \left(\frac{V - 400}{300} \right)^2 \right]. \quad (1)$$

На рис. 1 эта сумма представлена черными квадратиками, штриховыми ступеньками – наблюдаемое распределение, а точками – каждая из гауссиан.

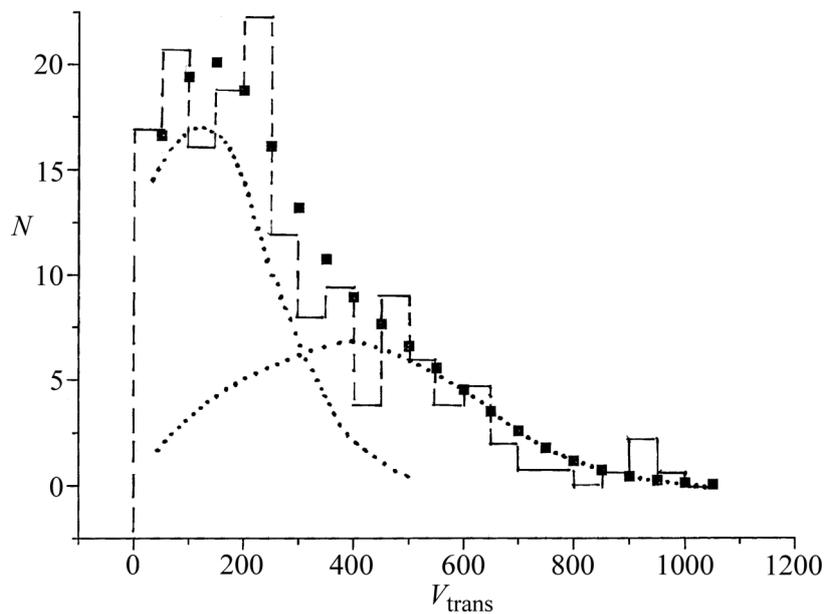


Рис. 1: Распределение поперечных скоростей пульсаров.

Среднее значение скорости для всей выборки, включающей 295 пульсаров из каталога [1], равно $\langle V \rangle = 295$ км/сек. Предполагая, что среднее значение компонент скорости по всем координатам одинаково, получим его, равным 209 км/сек.

Кинематика движения пульсаров. Для оценок рассмотрим упрощённую модель гравитационного потенциала Галактики. Движение тела в поле тяжести может быть описано уравнением Пуассона [2], которое в предположении о том, что гравитационный потенциал Φ зависит только от z -координаты, можно записать в виде:

$$d^2\Phi/dz^2 = -4\pi G\rho(z), \quad (2)$$

где G – гравитационная постоянная, ρ – плотность вещества.

Большая часть пульсаров с измеренными скоростями находится вблизи Солнца и далеко от Центра Галактики. Следовательно, их движение в основном определяется притяжением диска. Детальный анализ шести моделей гравитационного потенциала Галактики [3] показал, что все модели дают приблизительно одинаковые физические характеристики на расстояниях вплоть до 50 кпс от Центра Галактики. Это даёт основание использовать уравнение (2). Из этого уравнения можно оценить ускорение

$$g_z = d\Phi/dz = -4\pi G \int_0^{z^*} \rho(z) dz, \quad (3)$$

где z^* – некая фиксированная высота над плоскостью Галактики.

Будем считать распределение плотности экспоненциальным:

$$\rho(z) = \rho_0 \exp(-z/h). \quad (4)$$

Плотность в плоскости Галактики ($z = 0$) можно вычислить, приняв массу диска, равной 2×10^{11} масс Солнца, а сам диск, считая цилиндром с радиусом 10 кпк и толщиной $2h = 200$ пк. При этих предположениях получим $\rho_0 = 2.2 \times 10^{-22}$ г/см³. Соответствующее значение для ускорения

$$g_z = -4\pi G \rho_0 h [1 - \exp(-z^*/h)]. \quad (5)$$

Принимая, что всё гравитирующее вещество сосредоточено в диске указанных размеров и что $z^* = h$, получим $g_z = -3.6 \times 10^{-8}$ см/сек².

Проанализируем кинематику движения пульсара перпендикулярно плоскости Галактики. Если нет дополнительных механизмов ускорения (а наблюдения свидетельствуют о том, что скорость пульсара со временем уменьшается, как показано в [4]), то для свободного движения в рассматриваемом случае

$$V = V_0 - g_z t. \quad (6)$$

В качестве V_0 примем указанную выше среднюю скорость, равную приблизительно 200 км/сек. Через время $t^* = V_0/g_z$ пульсар остановится. Для принятых нами параметров это время равно 1.8×10^7 лет.

Все пульсары будут накапливаться в некотором слое, после чего они, вероятно, начнут движение к плоскости Галактики, а указанный слой будет пополняться новыми

остановившимися “бегунами”. Оценим то расстояние, на которое успеют удалиться рассматриваемые пульсары за найденное время. При равноускоренном движении (с отрицательным ускорением) это расстояние равно

$$z = V_0^2/2g_z. \quad (7)$$

Соответствующее наблюдаемым величинам поперечных скоростей V_{trans} распределение квадратов начальных скоростей $V_0^2 = V_{\text{trans}}^2/2$ представлено на рис. 2. Как следует из этого рисунка, V_0^2 для большей части пульсаров сосредоточено вблизи максимума с $\lg V_0^2$ ($\text{км}^2/\text{сек}^2$) = 4.6. В нашем случае это приводит к $z = 1.8$ кпк. Рис. 2 показывает, что более 70% квадратов скоростей распределено в интервале от 10^4 до 10^5 ($\text{км}/\text{сек}$)². Пульсары с такими скоростями достигают высот z от 450 пс до 4.5 кпс. Можно ожидать заметного числа пульсаров при таких z .

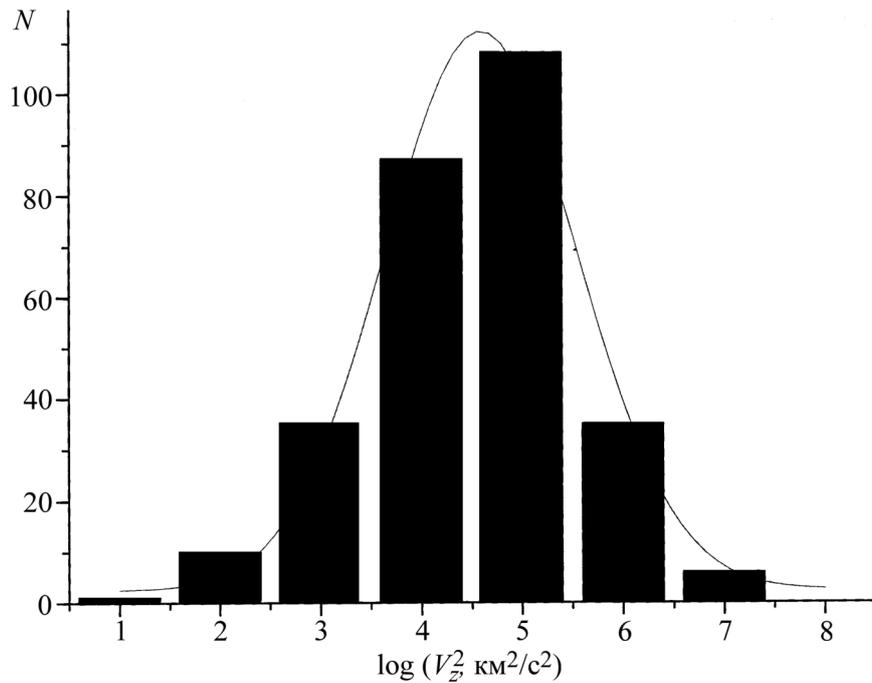


Рис. 2: Распределение квадратов скоростей, характеризующих движение пульсаров от плоскости Галактики.

Что касается возрастов пульсаров, находящихся на высотах $|z| = 0.45 - 4.5$ кпс, то их можно грубо сравнить с характеристическими возрастaми из каталога [1]. Оказалось, что эти возрастa находятся в интервале от 1 миллиона до нескольких миллиардов лет при среднем значении порядка нескольких десятков миллионов лет.

Не считая пульсары, входящие в шаровые скопления (все они находятся на расстояниях $|z| > 2$ кпк), существует несколько одиночных пульсаров на больших расстояниях. Они, по-видимому, имели скорости, превышающие среднюю скорость, и достигли больших высот над плоскостью. Как уже указывалось, скорости 9 известных пульсаров оказываются больше 1000 км/сек, и они могут вообще убежать из Галактики.

Общая картина распределения по z -координате зашумляется наличием пульсаров, остановившихся при $|z| = 0.45\text{--}4.5$ кпс, и источниками, начавшими падение на плоскость Галактики под действием ее тяготения. Объекты, скорости которых ограничены первой гауссианой на рис. 2, остановятся на расстояниях от диска порядка 300 пк. Только пульсары со скоростями второй группы достигнут высот порядка 2 кпк. Ранее нами было обнаружено [5], что долгопериодические пульсары обладают в несколько раз более высокими пространственными скоростями, чем пульсары с короткими периодами P . Для источников с $P > 0.1$ сек средняя скорость равна 334 км/сек, для более коротких периодов – 106 км/сек. Это означает, что на большие расстояния уйдут, в основном, пульсары с длинными периодами. Распределение числа пульсаров по периодам действительно подтверждает это ожидание, а средний период пульсара при $|z| = 0.45\text{--}4.5$ кпк оказывается порядка 1 сек.

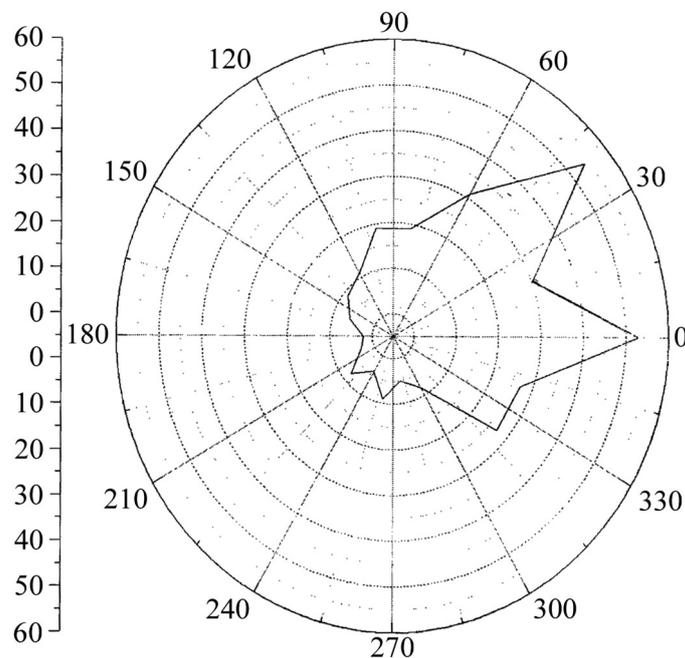


Рис. 3: Распределение пульсаров с $|z| = 0.45\text{--}4.5$ кпк по долготе.

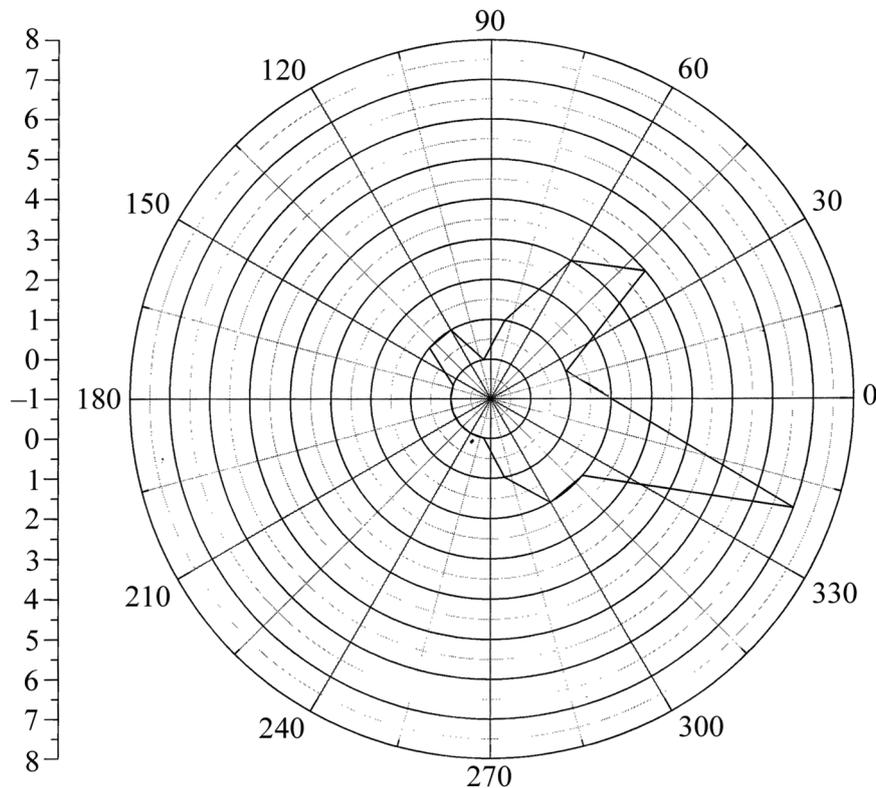


Рис. 4: Распределение областей образования массивных звезд в нашей Галактике по долготе (по данным работы [6]).

Распределение пульсаров по галактической долготе. Представляет интерес проанализировать, насколько равномерно распределены по долготе исследуемые пульсары. Оказалось, что есть две-три выделенные области (рис. 3), где, в основном, сосредоточены эти объекты. Детальное исследование расположения областей образования массивных звёзд в Галактике [6] выявило концентрацию таких областей в районе приблизительно тех же долгот ($l = 30^\circ - 60^\circ$ и $l \sim 300^\circ$) (рис. 4). Поскольку исследуемые нами пульсары имеют возраст порядка 10 млн лет, это означает, что области звездообразования в диске Галактики, где происходят вспышки сверхновых и образуются нейтронные звезды, существуют довольно продолжительное время (в течение нескольких миллионов лет).

Выводы. 1. Компонента скорости пульсаров, перпендикулярная плоскости Галактики, составляет, в среднем ~ 200 км/сек, т.е. меньше скорости убегания, которая равна в районе Центра Галактики 700 км/сек [7]. Они тормозятся в поле тяжести и должны останавливаться на некотором расстоянии от нее.

2. Рассмотрение кинематики такого движения приводит к оценке возраста остановившихся объектов около 18 миллионов лет. При этом пульсары достигают высоты над плоскостью от 0.45 до 4.5 кпк.

3. Оказалось, что на указанных расстояниях пульсары распределены неоднородно, существует две выделенные по долготе области их концентрации ($l \sim 30^\circ\text{--}60^\circ$ и $\sim 300^\circ\text{--}360^\circ$). Эти области находятся в хорошем соответствии с распределением областей образования массивных звезд в диске Галактики. Возрасты исследуемых пульсаров и рассмотренных областей звездообразования сильно различаются. Чтобы объяснить наблюдаемое соответствие, необходимо предполагать, что звездообразование в указанных областях диска происходит в течение миллионов лет.

Работа выполнена при финансовой поддержке Программы фундаментальных исследований Президиума РАН “Переходные и взрывные процессы в астрофизике” (П41) и гранта РФФИ (проект № 16–02–00954).

ЛИТЕРАТУРА

- [1] R. N. Manchester, G. B. Hobbs, A. Teoh, and M. Hobbs, *Astron. J.* **129**(4), 1993 (2005).
- [2] Л. Д. Ландау, Е. М. Лифшиц, *Теория поля* (М., Физматлит, 1960).
- [3] A. Vajkova and V. Bobylev, *ArXiv: astro-ph/1801.08875*.
- [4] А. А. Логинов, Е. Б. Никитина, И. Ф. Малов, *Астрон. Ж.* **93**(2), 149 (2016).
- [5] А. А. Логинов, И. Ф. Малов, *Астрон. Ж.* **91**(1), 57 (2014).
- [6] J. S. Urquhart, C. C. Figura, T. J. T. Moore, et al., *Mon. Not. Roy. Astron. Soc.* **437**(2), 1791 (2014).
- [7] К. У. Аллен, *Астрофизические величины* (М., Мир, 1977).

Поступила в редакцию 14 мая 2018 г.