А С Т Р О Ф И З И К А

ТОМ 37 МАЙ, 1994 ВЫПУСК 2

УДК: 524. 354

О РАСПРЕДЕЛЕНИИ ПРОСТРАНСТВЕННЫХ СКОРОСТЕЙ ПУЛЬСАРОВ

Т.Г.АРШАКЯН

Поступила 14 марта 1994
Принята к печати 12 апреля 1994

Используя естественные допущения, решена задача о выводе функции распределения пространственных скоростей пульсаров из распределения высот пульсаров над галактической плоскостью. Найдено, что для 137 пульсаров северного галактического полушария распределение пространственных скоростей дискретно и образует две отдельные группы. Оценены диапазон скоростей и средние скорости пульсаров в каждой группе.

1. *Введение.* Знание пространственных скоростей пульсаров имеет большое значение для понимания механизмов их образования, различий типов и нахождения областей формирования. Для определения пространственных скоростей звезд окрестности Солнца требуется знать расстояние до них, а также величины радиальных скоростей и собственных движений. Однако этот метод не годен для пульсаров из–за отсутствия в спектрах линий излучения, по которым и определяется радиальная скорость объекта. Поэтому использование распределения скоростей пульсаров в работах некоторых авторов сводится к тому, что принимается конкретный вид этого распределения (максвеловское или равномерное).

Таким образом, желательно найти функцию распределения пространственных скоростей пульсаров, не делая при этом никаких предположений о виде функции.

В настоящей работе получена формула, дающая возможность вычислить функцию распределения пространственных скоростей пульсаров, используя при этом наблюдаемое распределение высот пульсаров над галактической плоскостью. Проводится анализ наблюдательных данных и обсуждаются полученные результаты.

2. *Постановка задачи.* Из наблюдательных данных известно, что средняя высота возможных предшественников пульсаров (О– и В–звезды или остатки сверхновых) над плоскостью Галактики составляет приблизительно 60–80 пк [1,2], в то время как пульсары удаляются на расстояния вплоть до 1 кпк. Область образования пульсаров почти на порядок меньше расстояния, на которое он может удалиться, поэтому, допустим, что процесс "рождения" пульсаров происходит в галактической плоскости на нулевой высоте ($z = 0$) и стационарен во времени.

Допустим также, что для "рождающихся" пульсаров функция распределения по скоростям $F(v_o)$ не меняется со временем, а направления скоростей распределены в пространстве изотропно.

Среднее время жизни пульсаров (T) и функция распределения пульсаров по высоте над галактической плоскостью g (z)— известны. Найдем функцию распределения скоростей $F(v_o)$.

Пусть в момент $t = 0$, в галактической плоскости начался процесс стационарного "рождения" пульсаров, имеющих некоторое распределение скоростей $F(v_o)$. Тогда, за равные промежутки времени будет образовываться равное количество пульсаров

$$dN/dt = N_t/t \ , \qquad (1)$$

где N_t — число пульсаров в момент времени t. Количество пульсаров будет увеличиваться до тех пор, пока возраст пульсаров меньше среднего времени их жизни ($t \le T$). При $t > T$ число пульсаров dN появившихся за время dt скомпенсируется числом dN "угасших" пульсаров, возраст которых составляет от T до $T + dt$. Таким образом, по истечении времени $t = T$ будем иметь стационарную систему N_T пульсаров с функциями распределения высот $g(z)$ и скоростей $F(v_o)$.

Среднее время жизни пульсаров намного меньше возраста Галактики, поэтому в настоящее время реализуется вышеописанная ситуация.

Из допущения изотропности направлений скоростей пульсаров следует симметричность искомой функции $F(v_o)$ относительно плоскости Галактики. Поэтому для удобства решим задачу для северного галактического полушария (рис.1).

Полупериод осцилляций в направлении, перпендикулярном плоскости Галактики на два порядка больше [3] времени жизни пульсаров, поэтому скорость, приобретаемая пульсаром при "рождении", можно считать постоянной в течение всей жизни. Тогда пульсары, обладающие скоростью v_o пройдут за время t своего существования расстояния

$$h = v_o t \ . \tag{2}$$

Эта формула описывает кинематику процесса стационарного образования пульсаров. Запишем его в другом виде

$$h = v_o t = v_o \frac{t}{T} T = vT \ , \tag{3}$$

где T — среднее время жизни пульсаров.

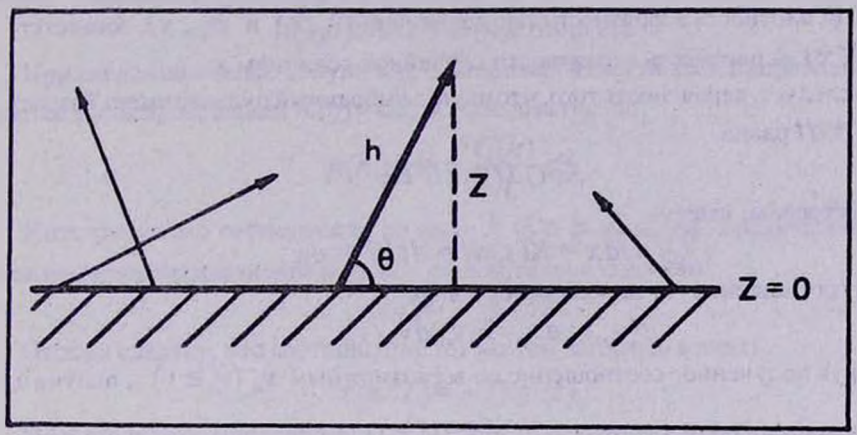

Рис.1. h — расстояние, пройденное пульсаром под углом θ к плоскости Галактики $(0 \le \theta \le \pi/2)$, $z = h \sin\theta$ — высота пульсара над галактической плоскостью.

Из соотношения (3) следует, что пульсары пройдут те же расстояния h за фиксированное время T со скоростями

$$v = v_o \frac{t}{T} \ , \tag{4}$$

причем $v \le v_o$. Следовательно, соотношение (3) описывает кинематику мгновенного или взрывного образования всех пульсаров.

Итак, используя инвариантность пройденных расстояний h, получаем зависимость между параметрами процессов стационарного и взрывного образования пульсаров.

Пусть при стационарном процессе образования пульсаров, за время T, для N_t пульсаров, имеющих распределение скоростей $F(v_o)$, установилось некоторое распределение по пройденным расстояниям $G(h)$. Представим, что все N_t пульсаров "родились" одновременно в галактической плоскости. Нас интересует, какое распределение скоростей $\tilde{F}(v)$ при этом должны иметь пульсары, чтобы по прошествии времени T установилось то же распределение по пройденным расстояниям $G(h)$?

Запишем формулу (4) в виде $v=v_o x$, где $x=t/T$ $(0 \le x \le 1)$. Тогда вероятность того, что пульсар. имеющий скорость в интервале от v_o до v_o+dv_o при стационарном процессе. будет иметь скорость от v до $v+dv$ при взрывном процессе, равна вероятности того, что скорости от v_o до v_o+dv_o уменьшатся от x до $x+dx$ раз

$$\varphi(v_o,v)\,dv_o\,dv=\psi(v_o,x)\,dv_o\,dx=F(v_o)dv_o\,Q(x)dx\ , \qquad (5)$$

где φ и ψ плотность вероятности пары величин (v_o,v) и (v_o,x), соответственно, $Q(x)$ — плотность вероятности случайной величины x.

Из (1) следует: вероятность того, что наугад выбранный пульсар имеет возраст от t до $t+dt$ равна

$$K(t)dt=dt/T\ .$$

С другой стороны, имеем

$$Q(x)dx=K(t)dt=dt/T=dx\ .$$

Поэтому соотношение (5) перепишется в виде

$$\varphi(v_o,v)\,dv_o=F(v_o)dv_o/v_o\ .$$

Интегрируя полученное соотношение по всевозможным v_o $(v_o \ge v)$, получим

$$\tilde{F}(v)=\int_v^{v_{max}} \frac{F(v_o)}{v_o}\,dv_o \qquad (6)$$

или

$$F(v)=-v\,\tilde{F}'(v)\ . \qquad (7)$$

Уравнение (6) и есть ответ на наш вопрос. Таким образом, используя инвариантность функции распределения $G(h)$, получим уравнения (6–7), связывающие функции распределения скоростей двух различных процессов.

Следует отметить, что соотношения (6–7) верны при более общих допущениях: стационарность образования объектов, произвольное распределение их в пространстве и произвольное распределение направлений скоростей в момент "рождения".

Найдем связь между функциями $\tilde{F}(v)$ и $g(z)$ (наблюдаемое распределение высот пульсаров).

Из (3) следует: вероятность того, что пульсар за время T пройдет расстояние h, $h+dh$, равна вероятности, что пульсар имеет скорость в интервале v, $v+dv$

$$G(h)dh=\tilde{F}(v)dv\ .$$

Значит

$$\tilde{F}(h/T)=G(h)T\ . \qquad (8)$$

Выразим функцию распределения расстояний $G(h)$ пройденных пульсарами за время T через $g(z)$ — функцию распределения высот. Обозначим через θ — угол между направлением скорости и плоскостью Галактики, тогда (рис.1)

$$z = h \sin\theta \quad (0 \le \theta \le \pi/2) \tag{9}$$

Пусть μ есть плотность вероятности пары случайных чисел (h, z), а $K(\theta)$ — плотность величины угла θ, тогда

$$\mu(h,z)dhdz = G(h)dhK(\theta)d\theta \ .$$

При сделанном выше допущении о равновероятности всех направлений скоростей пульсаров, имеем $K(\theta) = \cos\theta$, следовательно,

$$\mu(h,z)dh = \frac{G(h)}{h}dh \ .$$

Интегрируя это соотношение по всем h $(h \ge z)$ и, затем, дифференцируя по нижнему переменному пределу (z), окончательно получим

$$G(z) = -zg'(z) \ . \tag{10}$$

Отсюда следует, что соотношение (8) можем записать в виде:

$$\widetilde{F}(z/T) = -Tzg'(z) \ . \tag{11}$$

Подставляя соотношение (11) в (7), после некоторых преобразований, получим

$$F(z/T) = Tz\,(g'(z) + zg''(z)) \ . \tag{12}$$

Уравнение (12) и есть решение поставленной задачи.

Таким образом, получая из наблюдений функцию распределения высот $g(z)$ и оценивая среднее время жизни (T) пульсаров, найдем распределение пространственных скоростей пульсаров $F(v_o)$.

Выведем формулу, которая понадобится нам для последующих расчетов. Умножим обе части уравнения (12) на Ndz (N – общее количество пульсаров), тогда

$$NF(z/T)d(z/T) = Nz\,(g'(z) + zg''(z))dz \ .$$

Проинтегрируем обе части этого соотношения в пределах $(z_1/T = v_1$, $z_2/T = v_2)$ и (z_1, z_2), соответственно,

$$N\int_{v_1}^{v_2} F(v)dv = N\int_{z_1}^{z_2} zdg(z) + N\int_{z_1}^{z_2} z^2 dg'(z) \ .$$

Интегрируя последний член правой части два раза по частям и введя обозначения

$$n_v = N\int_{v_1}^{v_2} F(v)dv \ , \quad n_v = N\int_{z_1}^{z_2} g(z)dz \ ,$$

$$k_1=z_2g(z_2)-z_1g(z_1)\ ,\quad k_2=z_2^2g'(z_2)-z_1^2g'(z_1)\ ,$$

получим

$$n_v=n_z+N\,(k_2-k_1)\ . \tag{13}$$

Имея наблюдаемые параметры N,k_1,k_2 и n_z — число пульсаров в слое толщиной (z_1-z_2), вычислим величину n_v — количество пульсаров со скоростями от v_1 до v_2.

3. *Анализ наблюдательных данных и обсуждение результатов.* Для определения функции распределения высот $g(z)$ нами использовались данные 330 пульсаров, взятые из работы Манчестера и Тейлора [4].

Неуверенное определение электронной концентрации в центральных областях Галактики может привести к большим ошибкам при оценке расстояний до далеких пульсаров. Поэтому мы ограничились выборкой пульсаров, расстояние до которых не превышает 6 кпк.

На рис.2 представлена функция $g(z)$, полученная для 264 пульсаров плавным перемещением интервала высот $dz=0.2$ кпк вдоль оси z–высоты пульсара в перпендикулярном от галактической плоскости направлении.

Из рисунка видно, что функция $g(z)$ несимметрична относительно плоскости Галактики. Эта функция исследовалась для различных выборок пульсаров по расстояниям (в пределах 6 кпк). Оказалось, что поведение функции $g(z)$ для пульсаров северного галактического полушария $(z>0)$ качественно не меняется, в то время как для пульсаров южного полушария $(z<0)$ — претерпевает

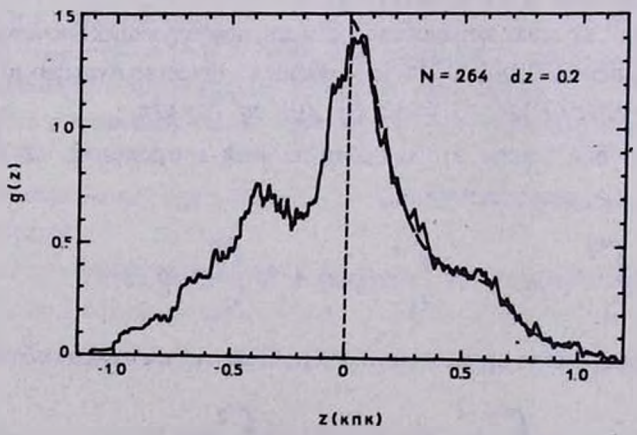

Рис.2. Наблюдаемая функция распределения высот $g(z)$ пульсаров (непрерывная линия) и ее аппроксимация аналитической функцией в области $z\geq 0$ (пунктирная).

качественные изменения. Так, для пульсаров находящихся в пределах 1.5–6 кпк функция $g(z)$ симметрична. Несимметричное поведение этой функции для пульсаров с $z<0$ и расположенных в окрестности Солнца, может быть обусловлено существованием концентрации пульсаров на высотах $z\sim-0.3$ кпк или же тем, что в оценках расстояний, возможно, присутствует систематическая ошибка.

Поскольку это тема отдельного исследования, в настоящей работе мы будем рассматривать функцию $g(z)$ для $z\geq 0$. Мы удовлетворимся тем, что поведение функции в этой области не меняется для разных выборок пульсаров по расстояниям.

Следует отметить, что случайный характер ошибок в расстояниях пульсаров с $z>0$ не оказывает систематического влияния на их распределение по высотам, поэтому в пределах статистических ошибок мы получаем истинное распределение $g(z)$.

Использование формулы (12) для численных расчетов неудобно, поскольку в ней содержится вторая производная от наблюдаемой функции. Поэтому попробуем аппроксимировать наблюдаемую функцию аналитической функцией вида

$$g(z)=a\cdot\exp\left(-b\,|z-z_o|^c\right)+d\ . \tag{14}$$

Экспоненциальная функция с постоянной составляющей (14) выбрана не из физических соображений, а как наиболее удобная формула, позволяющая получить удовлетворительное приближение.

Соотношение (12) в этом случае запишется в виде

$$F(z/T)=-abcz\cdot\exp\left(-z_1\right)|z-z_o|^{c-1}\left(1+z\,|z-z_o|^{-1}\left(c-1-cz_1\right)\right)\ , \tag{15}$$

где $z_1=b\,|z-z_o|^c$.

Логарифмируя функцию $g(z)-d$ (см. (14)), получим линейную связь между искомыми параметрами a и b. Варьируя постоянными величинами c и d определим методом наименьших квадратов наивероятные значения для a и b. Выбираются те постоянные, при которых достигается наибольший коэффициент корреляции ρ.

Аппроксимация наблюдаемого распределения $g(z)$ для всех z функцией вида (14) дает плохое приближение. Поэтому мы разделили всю область изменения z на два интервала (0–0.57) кпк и (0.57–1) кпк. Аппроксимация функции $g(z)$ (аналитической функцией того же вида) проводилась для каждого интервала в отдельности (см. рис.2). Для них получены следующие результаты:

	Δz	a	b	z_o	c	d	ρ
I	0–0.57	1.13	12.03	0	1.6	0.35	0.9
II	0.57–1	0.3	19.3	0.57	1.7	0.065	0.9 .

При восстановлении функции $F(v)$ (12) трудно обеспечить непрерывность производных двух аппроксимированных функций в точке сшивки. Поэтому место сшивки выбиралось в области (0.4–0.6) кпк, где изменение функции $g(z)$ незначительно и, следовательно, разрыв производных не может иметь существенного значения при качественном анализе искомой функции $F(v)$.

Существует небольшой эффект наблюдательной селекции, уменьшающий число пульсаров с малыми $|z|$, поскольку излучение фона вблизи галактической плоскости сильнее. Учитывая это можно считать, что аппроксимированная функция и при малых $|z|$ (рис.2) является хорошим приближением к наблюдаемому распределению высот.

Найдем среднее время жизни пульсаров, равное $T=h/v_o$, где h — расстояние, пройденное ими в течение всей жизни со скоростью v_o.

Из наблюдений можем определить z_m — среднее максимальное расстояние, пройденное пульсарами в направлении, перпендикулярном плоскости Галактики. Очевидно, что эти пульсары должны обладать в среднем наибольшими скоростями (v_m).

При допущении изотропности направлений скоростей пульсаров, максимальные скорости будут иметь и пульсары ближайшей окрестности Солнца. Для той доли пульсаров, направление движения которых составляет с плоскостью Галактики малый угол, величины максимальных скоростей будут равны измеренным тангенциальным скоростям ($v_m \sim v_t$). Следовательно, измерив среднюю величину максимальной тангенциальной скорости, получим среднюю максимальную скорость пульсаров v_m.

В работах [5] и [6] получены значения тангенциальных скоростей для 26 и 71 пульсара по собственным движениям и из наблюдений межзвездных мерцаний, соответственно.

Распределения скоростей обеих выборок пульсаров в основном отличаются друг от друга [6]. Что касается высокоскоростных пульсаров, то для 3 пульсаров (11%) первой выборки и 4 — второй (с наибольшими тангенциальными скоростями), получена приблизительно равная средняя скорость $v_t \sim 300$ км /с.

Из 264 пульсаров для 29 (11%), имеющих наибольшие высоты (PSR 1 620–08, имеющий чрезмерную высоту $z = 1.3$ кпк, отброшен), получена средняя высота $z_m \sim 0.77$ кпк. Оцененное по этим данным среднее время жизни пульсаров составляет $T = z_m/v_t \sim 2.5 \cdot 10^6$ лет.

Найденная по формуле (15) функция распределения пространственных скоростей пульсаров представлена на рис.3. Заметим, что нет пульсаров со скоростями меньше ~80 км/с. Скорости пульсаров сосредоточены, в основном, в двух

интервалах: первый — от 80 до 220 км/с, второй — (280–400) км/с. Дискретность распределения скоростей свидетельствует о независимости двух групп, а также существовании "родственных" связей пульсаров внутри групп. Вычисления по формуле (13) показали, что все пульсары северного галактического полушария сосредоточены в этих двух группах и распределены в них приблизительно поровну (60 и 77 пульсаров, соответственно). Средняя скорость в группах приблизительно равна 150 км/с и 320 км/с.

Сразу отметим, что дискретность функции $F(v)$ проявляется даже при грубом приближении наблюдаемого распределения линейной функцией вида $g(z) = Az + B$. Имея для трех областей (0–0.4), (0.4–0.6) и (0.6–1) кпк аппроксимированные функции $g_1(z)=A_1z+B_1$, $g_2(z)=A_2$ и $g_3(z)=A_3z+B_3$, соответственно, мы получим искомые функции $F_1(z/T)=TA_1z$, $F_2(z/T)=0$ и $F_3(z/T)=TA_3z$. Последнее соответствует двухкомпонентной структуре пространственного распределения скоростей пульсаров.

В работах [7,8] по данным ближайших 26 пульсаров найдена эмпирическая связь между тангенциальной скоростью пульсаров и их магнитным моментом, по которой пульсары с большей скоростью имеют большой магнитный момент. Авторы работы [9] на основе анализа результатов вышеуказанных работ пришли к заключению, что, возможно, пульсары образуют две группы, в первой из которых пульсары имеют высокие скорости и сильные магнитные поля, а во второй — малые скорости и слабые магнитные поля.

Дискретность скоростей пульсаров, полученная нами для объектов с $z \geq 0$, указывает, что, возможно, вышеописанная эмпирическая связь верна для всех пульсаров. Исследованию этой задачи будет посвящена отдельная работа.

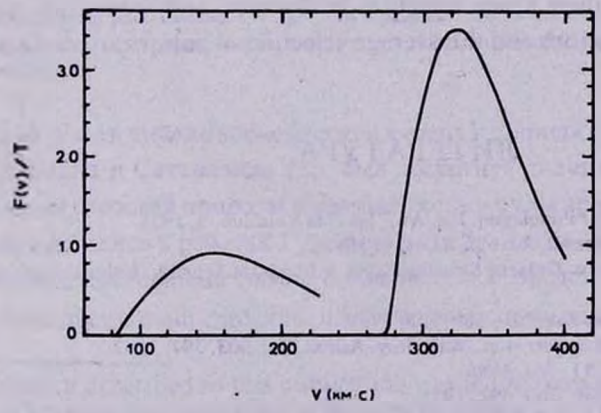

Рис.3. Распределение пространственных скоростей пульсаров, нормированное на величину среднего времени жизни $T \sim 2.5 \cdot 10^6$ лет.

В заключение отметим, что от величины среднего времени жизни пульсаров зависят граничные значения скоростей группы, но не зависит вид (дискретность) функции распределения пространственных скоростей (см. (12)).

Перечислим основные результаты, полученные в работе:

1. Получена формула, позволяющая восстановить функцию распределения пространственных скоростей пульсаров, используя при этом наблюдаемую функцию распределения высот пульсаров.

2. Оценен диапазон скоростей пульсаров (50–400) км/с и выявлена двухкомпонентная структура пространственных скоростей (средняя скорость в группах 150 км/с и 320 км/с, соответственно).

3. Дана оценка среднего времени жизни пульсаров, равная $2.5 \cdot 10^6$ лет.

Автор благодарен Р.Р.Андреасяну за внимание, проявленное к работе и ценные замечания.

Бюраканская астрофизическая обсерватория

ON THE DISTRIBUTION OF SPACE VELOCITIES OF PULSARS

T.G.ARSHAKIAN

Using the natural assumptions and the distribution of the pulsar's heights over the galactic plane, the problem on the derivation of the distribution function of their space velocities is solved. For the 137 pulsars of the Northern galactic hemisphere it's found that the distribution of their space velocities is discrete, and forms two separate groups. The limits of velocities and the average velocities of pulsars are evaluated for two groups.

ЛИТЕРАТУРА

1. *D.J.K.O'Konnel*, (ed). Stellar Population, Ric. Astr. Specola Vaticana, 5, 1958.
2. *K.Henning, H.J.Wendker*, Astron. Astrophys., 44, 91, 1975.
3. *J.H.Oort*, Stellar Dynamics. In "Galactic Structure.", ed. A.Blauw, M.Schmidt, University of Chicago Press., 455, 1965.
4. *R.N.Manchester, J.H.Taylor*, Astron.J., 86, 1953, 1981.
5. *A.G.Lyne, B.Anderson, M.J.Salter*, Mon. Notic. Roy. Astron. Soc. 303, 597, 1982.
6. *J.M.Cordes*, Astrophys. J., 311, 183, 1986.
7. *B.Anderson, A.G.Lyne*, Nature, 303, 597, 1983.
8. *J.M.Cordes*, (preprint), 1985.
9. *J.M.Stolman, E.P.J. van den Heuvel*, Astron. Astrophys., 162, 87, 1986.