

УДК: 524.354.4

## РАСПРЕДЕЛЕНИЕ СВОБОДНЫХ ЭЛЕКТРОНОВ В ПЛОСКОСТИ ГАЛАКТИКИ

Р.Р.АНДРЕАСЯН, С.К.БАЛАЯН, В.Г.МОВСИСЯН

Поступила 22 сентября 2005

Принята к печати 17 февраля 2006

В работе предлагается метод построения карты распределения электронной концентрации в плоскости Галактики. Используются данные мер дисперсии  $DM$  для более чем 1500 пульсаров и их расстояния, найденные независимым путем. Независимые расстояния пульсаров оцениваются с использованием эмпирической зависимости радиосветимостей  $L$  пульсаров от их периодов  $P$ , временного изменения периодов  $\dot{P}$  и полуширины импульсов  $W$  в виде функции  $L = \gamma P^\alpha \dot{P}^\beta W^\delta$ . Приводится карта распределения электронной плотности в плоскости Галактики, в слое  $\pm 400$  пк.

1. *Введение.* Общепринято, что пульсары являются хорошими зондами межзвездной среды, поскольку для них из наблюдений определены многие данные разного рода, а их расстояния, определенные по мере дисперсий,

$$DM = \int n_e(R) dR \quad (1)$$

считаются более или менее надежными. Здесь  $DM$  - мера дисперсий пульсара,  $n_e(R)$  - электронная концентрация в среде по направлению данного пульсара, а интегрирование ведется до расстояния пульсара  $R$ . Из формулы (1) видно, что для определения расстояний пульсаров по  $DM$  нужно знать распределение электронной плотности в Галактике. Однако это распределение заранее не известно. Обычная, стандартная процедура нахождения модели распределения электронной плотности основана на использовании той же зависимости между  $DM$  и  $n_e$  для тех пульсаров, расстояния до которых заранее найдены каким-то независимым (от использования  $DM$ ) путем. Таких пульсаров известно чуть больше 70 [1]. Это те пульсары, которые расположены в остатках сверхновых с известными расстояниями, или находятся ближе или дальше некоторых облаков, тоже с известными расстояниями. Ясно, что расстояния этих пульсаров (всего их 73) часто определяются с достаточно большими ошибками, а во многих случаях известен только верхний или нижний предел расстояния данного пульсара, или оба из них, которые иногда отличаются друг от друга в несколько раз. Очевидно, что параметры модели распределения электронной плотности,

полученные с использованием этих расстояний, будут содержать определенные неточности. Расстояния остальных пульсаров, найденные по их  $DM$ , с использованием этой модели электронной плотности будут содержать некоторые систематические ошибки, иногда превышающие сами эти расстояния. Отметим, что все известные в настоящее время расстояния пульсаров получены по модели электронной плотности Галактики, предложенной в [2]. В упомянутой работе в основу модели распределения электронной плотности в плоскости Галактики принята модель галактических спиральных рукавов, предложенная в работе [3], с некоторыми изменениями в работах [4,5]. Отдельные параметры предложенной модели найдены с использованием вышеупомянутых 73 пульсаров и апробированы по данным межзвездной сцинтилляции около 200 пульсаров и по мерам дисперсий. Далее эта модель электронной плотности используется для нахождения расстояний пульсаров по их  $DM$  (см. формулу (1)). Ясно, что найденные этим путем (приведенные в каталогах) расстояния пульсаров с самого начала будут содержать в себе информацию о модели спиральных рукавов Галактики. Следовательно, использование этих расстояний в работах, в которых изучается корреляция разных физических параметров Галактики с ее спиральной структурой, не целесообразно. В частности, расстояния пульсаров вместе с данными фарадеевского вращения используются при изучении магнитного поля Галактики. Надо отметить, при изучении магнитных полей в таких направлениях, на которых, при изменении расстояний в достаточно больших пределах, пульсары все же остаются в определенном спиральном рукаве [6], неопределенности расстояний пульсаров большой роли не играют. Однако в недавних работах [7-9] изучаются тонкие структуры магнитных полей во внутренних спиральных рукавах Галактики. В этих направлениях излучение от пульсара проходит сквозь 2-3 рукава, и при малых ошибках в оценке расстояния используемого пульсара, не будет уверенности в принадлежности пульсара данному спиральному рукаву Галактики. Это, в свою очередь, понижает достоверность результатов таких работ.

В настоящей работе изучается возможность определения радиосветимостей пульсаров с использованием ее эмпирической зависимости от разных наблюдательных параметров, не зная заранее расстояния до них. Это дает возможность оценить расстояния пульсаров, не используя их меры дисперсии. Далее эти расстояния, вместе с мерами дисперсий пульсаров используются для нахождения распределения электронной плотности в плоскости Галактики методом решения обратной задачи, не используя при этом никакой модели спиральных рукавов. Найденное распределение электронной плотности может быть использовано для

нахождения расстояний отдельных пульсаров по их мерам дисперсий (см. формулу (1)). Очевидно, что определенные таким образом расстояния будут свободны от систематических вкладов заранее принятой модели спиральных рукавов Галактики, которые свойственны расстояниям, приведенным в каталогах.

В настоящее время, когда известны более 1500 пульсаров, для большинства которых определены основные наблюдательные характеристики, такие, как средний поток излучения на разных частотах, период пульсации, временное изменение периода пульсации, эквивалентная ширина импульса, мера дисперсии и многие другие, постановка такой задачи оправдана.

2. *Радиосветимость пульсаров.* Общепринято, что пульсары - это быстро вращающиеся нейтронные звезды, и что они излучают за счет потери их энергии вращения. Это приводит к замедлению вращения пульсара, т.е. к увеличению значения периода пульсации. В каталогах пульсаров, наряду с чисто наблюдательными данными, обычно приводятся также косвенные параметры, вычисленные на основе принятой теории образования и эволюции пульсаров. Такими параметрами являются характеристический возраст  $T$ ,

$$T = P/2\dot{P}, \quad (2)$$

и скорость потери энергии, или так называемый "spin-down luminosity"  $\dot{E}$ ,

$$\dot{E} = 4\pi^2 I \dot{P} P^{-3}, \quad (3)$$

где  $P$  - период,  $\dot{P}$  - временное изменение периода, а  $I = 10^{45}$  г см<sup>2</sup> - является принятым средним моментом инерции для пульсаров. Очевидно, что болометрическая светимость пульсаров должна зависеть от этих величин. Мы изучали зависимость радиосветимости  $L$  пульсаров

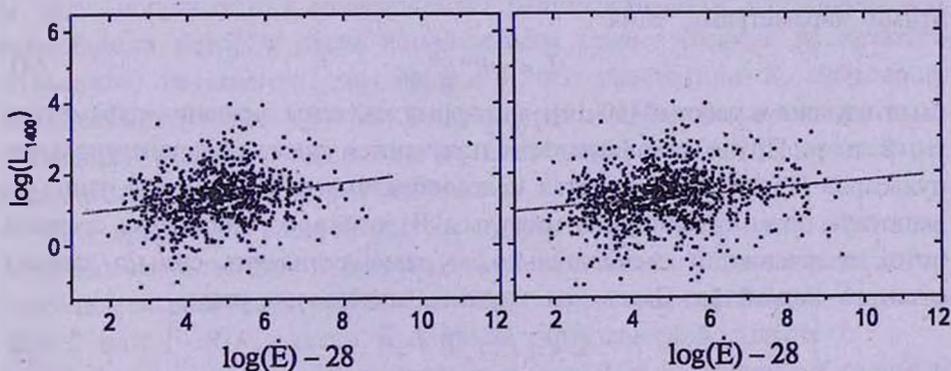


Рис.1. Зависимость радиосветимости  $L$  пульсаров на частоте 1400 МГц от скорости потери энергии  $\dot{E}$ . С левой стороны для пульсаров, возраст которых находится в пределах от  $10^6$  до  $10^8$  лет; с правой - для всех известных пульсаров.

от скорости потери энергии  $\dot{E}$  и от их характеристического возраста  $T$ . Были использованы радиосветимости пульсаров на 400 и 1400 МГц ( $L_{400}$  и  $L_{1400}$ ). На рис.1, для примера, приведены зависимости  $\log(L_{1400})$  от  $\log(\dot{E}) - 28$ .

На рис.2 приведена зависимость радиосветимости  $L$  пульсаров от их характеристического возраста  $T$ , также в логарифмической шкале.

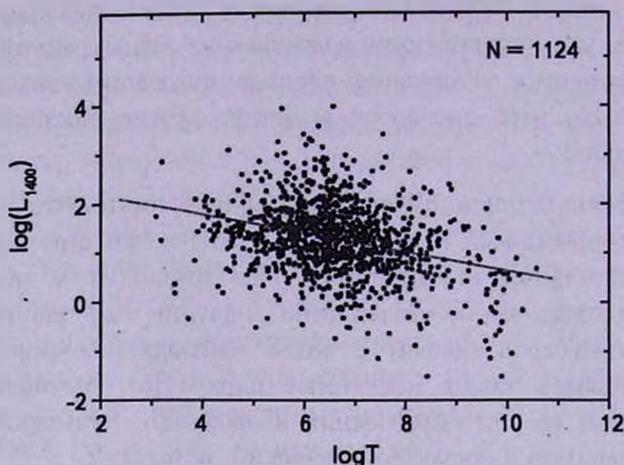


Рис.2. Зависимость радиосветимости  $L$  пульсаров на частоте 1400 МГц от их характеристического возраста  $T$ .

Как видно из рисунков и формул, радиосветимость пульсаров увеличивается по мере увеличения скорости потери энергии и уменьшается с увеличением характерного возраста. Похожие зависимости получаются и на 400 МГц, а также для отдельных подборок пульсаров, выбранных по различным параметрам (по возрастам, по галактическим направлениям и т.д.). Ясно, что эти зависимости являются зависимостями между радиосветимостью  $L$  и параметрами  $P$  и  $\dot{P}$ . Зависимость между этими параметрами типа

$$L = \gamma P^\alpha \dot{P}^\beta \quad (4)$$

была изучена в работах [10-14], в которых найдены значения параметров  $\alpha$ ,  $\beta$  и  $\gamma$ . Похожие зависимости получаются также для рентгеновских пульсаров [15,16]. Нам кажется целесообразным в зависимость типа (4) включить также полуширину импульса  $W$  пульсаров, поскольку средний поток излучения, а следовательно, и радиосветимость сильно зависят от этого параметра. Здесь мы изучаем зависимость типа

$$L = \gamma P^\alpha \dot{P}^\beta W^\delta \quad (5)$$

Формула (5) удобна тем, что, логарифмируя ее, получаем линейное уравнение относительно  $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\delta$  и  $\log \gamma$ . Такое уравнение можно

написать для каждого пульсара в отдельности в следующем виде:

$$\log L_i = \log \gamma + \alpha \log P_i + \beta \log \dot{P}_i + \delta \log W_i \quad (6)$$

где  $i = 1, 2, \dots, N$  ( $N$  - число использованных пульсаров). Таким образом, получается система из  $N$  линейных уравнений с четырьмя неизвестными,  $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\delta$  и  $\log \gamma$ , которая решается методом наименьших квадратов. Мы получили значения этих параметров для разных подвыборок пульсаров. В табл.1 приводятся значения этих параметров, для получения которых использованы данные всех пульсаров, без ограничений, наложенных на возраст, период пульсации или на какой-либо другой параметр.

Таблица 1

### ЗНАЧЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТОВ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ РАССТОЯНИЙ

Частота	$\alpha$	$\beta$	$\delta$	$\log \gamma$
400 МГц	-4.396E-01	1.59E-01	4.80E-01	2.90
1400 МГц	-4.65E-01	1.77E-01	4.82E-01	3.16

После определения вышеупомянутых параметров для отдельных подвыборок, мы предполагаем, что радиосветимость каждого отдельного пульсара из данной подвыборки определяется формулой (5) с уже известными параметрами  $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\delta$  и  $\gamma$ . Затем используется формула

$$R_T = (L_T/S)^{1/2}, \quad (7)$$

для нахождения, так называемого, теоретического расстояния пульсара  $R_T$ , где  $L_T$  - теоретическая (эмпирическая) радиосветимость, найденная по формуле (5), а  $S$  - наблюдаемый средний поток излучения на той же частоте, что и  $L_T$ . Конечно, при нахождении параметров  $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\delta$  и  $\log \gamma$  используются наблюдаемые радиосветимости пульсаров, для нахождения которых были использованы старые (взятые из каталога пульсаров) расстояния, но очевидно, что расстояния  $R_T$  пульсаров, определенные только по этим 4 параметрам и наблюдательным данным, в большей степени независимы от каких-либо моделей распределения свободных электронов в Галактике.

Для сравнения расстояний  $R_T$ , полученных в результате вышеупомянутых вычислений, и расстояний  $R$ , взятых из каталогов, на рис.3 приводится распределение относительных расстояний ( $R_T/R - 1$ , когда  $R_T > R$  или  $1 - R/R_T$ , когда  $R_T < R$ ) по галактической долготе  $l$ .

Из рис.3 видно, что расстояния пульсара  $R_T$  и  $R$ , найденные разными методами, более или менее коррелируют друг с другом (в большинстве случаев они отличаются друг от друга не более чем в 2 раза). Однако

иногда они отличаются в несколько раз. Такое расхождение частично можно объяснить неточностями старых расстояний, которые, как это утверждается в работе [2], хотя в большей части и имеют точность в пределах  $\sim 25\%$ , в отдельных случаях (в основном в направлениях внутренних рукавов Галактики  $0^\circ < l < 60^\circ$  и  $300^\circ < l < 360^\circ$ ) могут иметь неопределенности на фактор 2 или больше. Однако расхождения на рис.3, вероятно, большей частью обусловлены неточностями в определении  $R_T$ , связанными с применением эмпирической формулы (5). Это означает, что расстояния  $R_T$ , в общем случае при применении для отдельных пульсаров, могут оказаться не достаточно хорошими относительно прежних. Однако они могут оказаться лучше в статистическом смысле. Это связано с тем, что они все-таки коррелируют с известными расстояниями, независимыми от моделей распределения свободных электронов в Галактике, и практически могут быть определены для всех пульсаров. То, что расстояния  $R_T$  могут содержать информацию в статистическом смысле, видно также из того, что на рис.3 для большинства пульсаров, находящихся вне радиуса расстояния Солнца ( $90^\circ < l < 270^\circ$ ),  $R_T < R$ . Недооценку электронной концентрации в направлении антицентра Галактики при определении расстояний методом, использованным в работе [2], предположительно можно считать одним из возможных объяснений этого факта. На распределении рис.3 видны также другие детали (при  $l = 300^\circ$   $R_T > R$ ;  $l = 330^\circ$   $R_T < R$  и др.), вероятно, связанные с моделью спиральных рукавов (см. рис.4 из [2]), использованной при нахождении каталожных расстояний  $R$ .

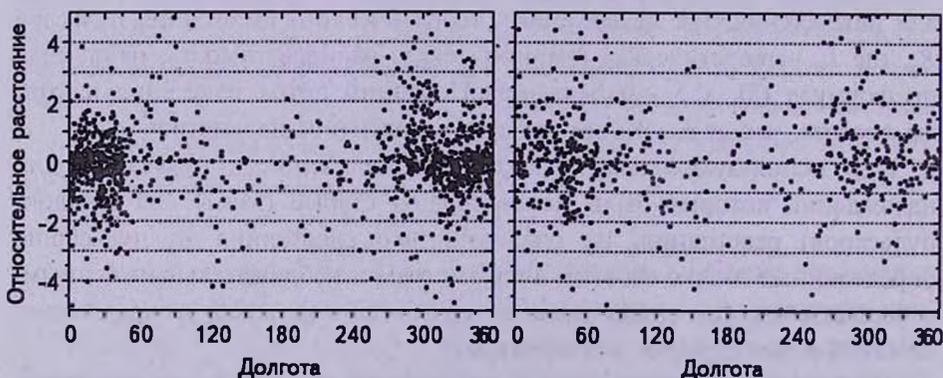


Рис.3. Распределение относительных расстояний по галактической долготе для выборок: слева на 1400 МГц ( $N=1089$ ), справа на 400 МГц ( $N=542$ ).

Вышесказанное дает уверенность в правомочности использования расстояний  $R_T$  для изучения галактического распределения свободных электронов.

### 3. Распределение свободных электронов. Изучение распределения

свободных электронов в Галактике имеет очень важное как теоретическое (например, в теории турбулентного динамо в Галактике), так и практическое значение (определение расстояний пульсаров по мерам дисперсий, изучение магнитного поля и т.д.). Известно, что свободные электроны в Галактике распределены очень неравномерно. Это, в основном, связано с наличием в Галактике HI и HII областей, остатков сверхновых, очагов звездообразования, звездных ветров и т.д. Однако, несмотря на эти неоднородности, в распределении электронов в Галактике, вероятно, существуют более крупные структурные детали, изучению которых и посвящается этот раздел.

Как было сказано во *Введении*, распределение электронной плотности в Галактике можно изучать, используя независимо определенные расстояния пульсаров и их меры дисперсии  $DM$ , которые связаны с электронной плотностью  $n_e$  и расстоянием  $R$  формулой (1). Величина  $DM$  определяется из наблюдений момента прихода сигнала от пульсара на разных частотах и является постоянной величиной для определенного пульсара. Используя данные  $DM$  и  $R$  пульсаров на данном направлении, можно построить зависимость функции  $DM(R)$  от расстояния  $R$ . Из формулы (1) видно, что  $DM$  является интегралом с переменным верхним пределом по  $R$ . Из этой формулы следует, что электронная концентрация  $n_e(R)$  на данном направлении (как функция от  $R$ ) является производной  $DM(R)$  от  $R$ .

$$n_e(R) = dDM(R)/dR. \quad (8)$$

Формула (8) дает возможность найти плотность электронов в любой точке Галактики, если в данном направлении по наблюдательным данным пульсаров построена достаточно плавная функция  $DM(R)$ . При этом не надо заранее делать какие-либо предположения о распределении электронной плотности. Такие задачи, в которых по информации, выходящей из данной области, находятся ее детальные внутренние характеристики, без использования каких-либо моделей для него, принято называть обратными задачами.

Таким образом, для решения вышеупомянутой (обратной) задачи, необходимо иметь хорошо определенную функцию  $DM(R)$  на всех галактических направлениях. Для нахождения этой функции вычисляется зависимость среднего значения  $DM$  от среднего значения  $R$ . В настоящее время известны чуть более 1500 пульсаров, для которых определены значения  $DM$ . Независимые теоретические расстояния  $R_T$  можно найти, практически, для всех пульсаров, используя формулы (7) и (5) и вычисленные по формуле (6) параметры  $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\delta$  и  $\log \gamma$ . Конечно, наблюдательные данные для 1500 пульсаров могут быть недостаточны для нахождения плавных функций  $DM(R)$  на всех галактических

направлениях. Однако, как известно, пульсары распределены неравномерно по галактической широте. Они сильно сконцентрированы к плоскости Галактики. Следовательно, используя наблюдательные данные пульсаров, вышеупомянутым методом можно попытаться построить функцию  $DM(R)$  только в направлениях вблизи плоскости Галактики. Для этой цели мы использовали пульсары, которые находятся у плоскости Галактики в слое  $|z| < z_0$ , где  $z$  - расстояние пульсара от плоскости Галактики, а  $z_0$  - полутолщина слоя, которую можно варировать во время конкретных вычислений. При построении функции  $DM(R)$  для направления галактической долготы  $l_0$ , берется сектор с достаточным числом пульсаров, в направлении  $l_0$ , с полушириной  $\Delta l$  и с вершиной на Солнце. Для усреднения величин  $DM$  и  $R$  пульсаров, в этом секторе берется область с центром  $R_0$  и полудлиной  $\Delta R$ . Далее координата центра усреднения  $R_0$  плавно меняется по направлению  $l_0$ , в результате чего находятся средние значения  $DM$  и  $R$  в точках усреднения  $(R; l_0)$ , то есть функция  $DM(R)$  в данном направлении  $l_0$ . Эту функцию впоследствии можно численно проинтегрировать и получить значения  $n_e(R)$  в любой точке в данном направлении  $l_0$ . Направление  $l_0$  тоже можно плавно поменять от значения  $0^\circ$  до  $360^\circ$ . Таким образом, можно получить функцию  $DM(R)$  в любом направлении, а по формуле (8) и концентрацию электронов  $n_e(R; l)$  в любой точке галактической плоскости. Численные расчеты показали, что когда число пульсаров в каждой области усреднения превосходит 5-6, то уже можно получить достаточно гладкую функцию  $DM(R)$  для численного дифференцирования и получения уверенных результатов для  $n_e(R; l)$ . При вычислениях это условие соблюдалось для большей части исследуемой области Галактики. Отметим, что аналогичная процедура уже была использована в работе [6] для детального изучения магнитного поля в направлении рукава Стрельца.

Вышеизложенная процедура полностью была протестирована с использованием каталожных данных  $DM$  и  $R$ . Была получена карта распределения электронной плотности в плоскости Галактики. Поскольку использованные каталожные расстояния пульсаров вычислены с использованием модели распределения  $n_e$ , приведенного в работе [2], то после обратной процедуры должна была получиться картина, схожая с приведенной в упомянутой работе галактического распределения  $n_e$ . Сравнение наших рисунков показало довольно хорошее совпадение основных деталей распределения  $n_e$ . Это свидетельствует в пользу предложенной нами процедуры и полной программы вычислений. Для получения карт распределения электронной концентрации в плоскости Галактики были использованы теоретические расстояния  $R_T$ , найденные по разным выборкам пульсаров, ограниченных по их возрасту и другим

параметрам. При вычислении были также сделаны разные ограничения на толщину слоя около плоскости Галактики.

На рис.4, как пример, приводится одна из карт распределения электронной плотности в плоскости Галактики, полученная в результате вычислений с использованием данных  $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\delta$  и  $\log \gamma$  из табл.1. При построении этой карты мы ограничились использованием пульсаров, расположенных в слое  $-400 \text{ пк} < z < 400 \text{ пк}$ . В центре окружностей расположено Солнце, а центр Галактики обозначен малым кружком. Расстояние от Солнца до центра Галактики принято 8.5 кпк. Галактическая долгота растет от направления к центру Галактики против часовой стрелки. Надо отметить, что при разных вариантах вычислений полученные карты в общих чертах похожи друг на друга. Распределение электронной плотности на рис.4 можно считать уверенным до расстояний от Солнца порядка 7-8 кпк. Дальше этого расстояния число

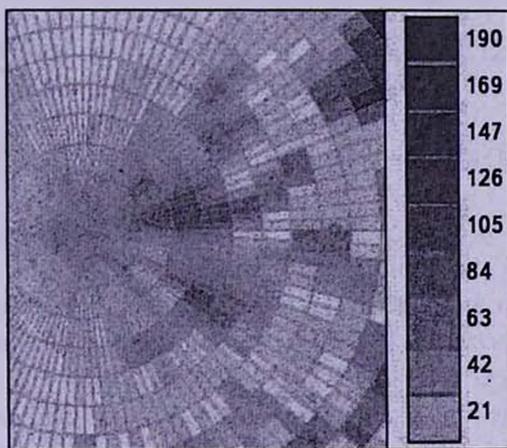


Рис.4. Карта распределения электронной плотности в плоскости Галактики. Электронная плотность на шкале приведена в единицах  $10^{-3}$  частиц в  $\text{см}^3$ .

пульсаров в областях усреднения уменьшается, из-за чего увеличивается влияние одного пульсара на результаты вычислений. Как следствие этого, ухудшается качество зависимости  $DM(R)$ , следовательно, и качество зависимости  $n_e(R)$ .

Из рис.4 видно, что электронная концентрация увеличивается к центру Галактики. Есть некоторые направления, где, в среднем, электронная плотность больше окружающих, но эти направления очень хорошо коррелируют с направлениями известных спиральных рукавов Галактики. Такой результат, конечно, не является неожиданным, если иметь в виду результаты недавних исследований [9, 17], в которых показывается, что магнитные поля и поляризация радиоизлучения нашей Галактики и некоторых других галактик коррелируют не со спиральными

рукавами, а с межрукавными областями галактик.

Надо отметить, что настоящая работа носит, в большей степени, методологический характер и не является завершенным этапом данного исследования. Метод можно постоянно совершенствовать в процессе повышения точности определения независимых расстояний и с увеличением числа пульсаров.

Работа выполнена в рамках ANSEF программы No. 04-ps-astroth 812-73.

Бюраканская астрофизическая обсерватория им. В.А.Амбарцумяна,  
Армения, e-mail: randrasy@bao.sci.am

## THE DISTRIBUTION OF FREE ELECTRONS IN THE PLANE OF THE GALAXY

R.R.ANDREASYAN, S.K.BALAYAN, V.H.MOVSIYAN

The method of construction of the map for distribution of free electrons in the plane of the Galaxy is proposed. We use the data of dispersion measures  $DM$  for more than 1500 pulsars and their distances, found independently from  $DM$ . The independent distances of pulsars are estimated using the empirical relation  $L = \gamma P^\alpha \dot{P}^\beta W^\delta$  between the radio luminosity  $L$  of pulsars and their period  $P$ , period derivative  $\dot{P}$  and the equivalent width of pulse  $W$ . We give the map of distribution of free electrons near the plane of the Galaxy, in the layer of  $\pm 400$  pc.

Key words: *Galaxy: free electrons: distribution*

## ЛИТЕРАТУРА

1. D.A.Frail, J.M.Weisberg, *Astron. J.*, **100**, 743, 1990.
2. J.H.Taylor, J.M.Cordes, *Astrophys. J.*, **411**, 674, 1993.
3. Y.M.Georgelin, Y.P.Georgelin, *Astron. Astrophys.*, **49**, 57, 1976.
4. D.Downes, T.L.Wilson, J.Biegging, J.Wink, *Astron. Astrophys. Suppl. Ser.*, **40**, 379, 1980.
5. J.L.Caswell, R.F.Haynes, *Astron. Astrophys.*, **171**, 261, 1987.

6. *P.P. Андреесян, М. Оганнисян, М.Р. Андреесян*, *Астрофизика*, **46**, 423, 2003.
7. *J.L. Han, R.N. Manchester, E.M. Berkhuijsen, R. Beck*, *Astron. Astrophys.*, **322**, 98, 1997.
8. *J.L. Han, R. Wielebinski*, *Chin. J. Astron. Astrophys.*, **2**, 293, 2002.
9. *C. Indrani, A.A. Deshpande*, *New Astronomy*, **4**, 33, 1998.
10. *M. Vivekanand, R.J. Narayan*, *Astron. Astrophys.*, **102**, 315, 1981.
11. *G.M. Stollman*, *Astron. Astrophys*, **172**, 152, 1987.
12. *P.P. Андреесян, Т.Г. Аршакян*, *Астрофизика*, **36**, 375, 1993.
13. *R. Andreevyan, T. Arshakian*, *Astrophys. Space Sci.*, **278**, 175, 2001.
14. *M. Proszynski, D. Przybycien*, *Proceedings of the Workshop on "Millisecond Pulsars"*, Held at NRAO, Green Bank, W. Virg., **7**, 1984.
15. *A. Possenti, R. Cerutti, M. Colpi, S. Mereghetti*, *Astron. Astrophys.*, **387**, 993, 2002.
16. *O.H. Guseinov, A. Ankaý, S.O. Tagieva, M.O. Taskin*, *Inter. J. Mod. Phys. D*, **13**, 197, 2004.
17. *R. Beck, P. Hoernes*, *Nature*, **379**, 47, 1996.