

О РАСПРЕДЕЛЕНИИ ПУЛЬСАРОВ РАЗЛИЧНЫХ ТИПОВ В ГАЛАКТИКЕ

Р.Р.АНДРЕАСЯН, А.Р.АНДРЕАСЯН, Г.М.ПАРОНЯН, А.Г.СУКИАСЯН

Поступила 30 июля 2025

Принята к печати 10 сентября 2025

Рассматриваются пространственное распределение и распределение по периодам пульсаров различных типов. В результате анализа наблюдательных данных для более чем 3800 пульсаров показано следующее: характеристическое расстояние нормальных радиопульсаров от плоскости Галактики увеличивается с ростом их характеристического возраста. Миллисекундные пульсары всех типов - включая пульсары, находящиеся в галактических шаровых скоплениях, миллисекундные пульсары, излучающие также в гамма- и рентгеновском диапазонах, и миллисекундные пульсары галактического поля, излучающие только в радиодиапазоне - являются очень старыми объектами со средними характеристическими возрастами в несколько млрд лет. Они распределены в широком слое около плоскости Галактики, с характеристическим расстоянием σ порядка 500 парсек. Группа GRS-пульсаров с относительно большими периодами значительно отличается от нормальных радиопульсаров. В то время как максимум распределения по периоду у нормальных радиопульсаров приходится на $\log(P_0) = -0.3$, у GRS-пульсаров он смещен в сторону меньших значений. Эти GRS-пульсары находятся в тонком слое вблизи плоскости Галактики, с характеристическим расстоянием σ порядка 160 парсек, а их средний возраст составляет порядка ста тысяч лет.

Ключевые слова: *пульсары:распределение пульсаров:рентгеновские пульсары*

1. Введение. Изучение галактического распределения пульсаров имеет большое значение для понимания и объяснения различных аспектов их происхождения в результате вспышек сверхновых звезд разных типов, а также их последующей эволюции. Наблюдаемое в настоящее время распределение пульсаров в Галактике является следствием как распределения исходных звезд типов О и В, вспыхивающих как сверхновые [1], так и пространственного распределения скоростей, приобретенных пульсарами при их рождении в результате асимметричных вспышек этих звезд.

В настоящее время известны данные более чем для 3800 пульсаров. Эти данные (77 различных параметров для каждого объекта) приведены в Австралийском каталоге пульсаров ATNF (ATNF Pulsar Catalogue) [2]. В каталоге ATNF собраны как чисто наблюдательные параметры пульсаров - такие как координаты, собственные движения, барицентрические периоды P_0 , временные производные этих периодов $\dot{P}$, полуширина импульса, средняя плотность потока излучения на различных длинах волн и др. - так и параметры, полученные на

основе наблюдений с использованием теоретических моделей. К последним, в частности, относится характеристический возраст пульсаров T ,

$$T = P_0/2P_1, \quad (1)$$

поверхностное магнитное поле пульсаров

$$B = 3.2 \cdot 10^{19} (P_0 P_1)^{1/2} \quad (2)$$

и др. Наблюдательные данные о поляризации излучения на нескольких длинах волн дают возможность определить так называемые меры фарадеевского вращения плоскости поляризации при прохождении излучения через магнитоионную среду.

$$RM = d\psi/d\lambda^2 = \alpha \int n_e B_L dL, \quad (\alpha = 8.1 \cdot 10^5), \quad (3)$$

где $d\psi$ - разность угла плоскости поляризации на разных длинах волн λ , B_L - индукция магнитного поля вдоль луча зрения, n_e - электронная концентрация в среде, а интегрирование проводится по всему пути L , пройденному излучением от пульсара до наблюдателя.

Очень важная информация получается из наблюдений запаздывания сигнала $t_2 - t_1$ одного и того же импульса пульсара на разных радиочастотах ω из-за различий в скорости распространения сигнала в ионизированной среде на разных частотах.

$$t_2 - t_1 = (2\pi e^2/m) (1/\omega_2^2 - 1/\omega_1^2) DM, \quad (4)$$

$$DM = \int n_e dL, \quad (5)$$

где DM - мера дисперсии.

Формула (5) при известном распределении электронной концентрации n_e в Галактике дает возможность вычислять расстояния до пульсаров, используя данные о мерах дисперсии DM . В каталоге пульсаров ATNF приведены расстояния практически для всех пульсаров, полученные этим методом. Эти расстояния, конечно, зависят от принятой модели галактического распределения электронной концентрации, но в настоящее время они считаются наиболее надежными и широко используются в различных исследованиях, в том числе и в настоящей работе.

Как видно из приведенных формул, используя данные мер вращения RM и мер дисперсии DM пульсаров, можно найти среднее значение проекции магнитной индукции $\langle B_L \rangle$ вдоль направления на данный пульсар.

$$\langle B_L \rangle = (1/\alpha)(RM/DM) = 1.23(RM/DM). \quad (6)$$

Эти данные были использованы для изучения магнитного поля Галактики во многих работах (см. [3,4]), а также в наших исследованиях (например, [5,6]).

В настоящей работе мы изучаем галактическое распределение пульсаров разных типов. Пульсары в основном сконцентрированы вблизи плоскости нашей Галактики. Небольшая часть (порядка 40 пульсаров) расположена в Магеллановых Облаках и других близлежащих галактиках. Естественно, эти пульсары исключены из рассмотрения. Довольно большая группа пульсаров (более 200 объектов) находится в галактических шаровых скоплениях и их распределение в Галактике известно.

Пульсары в основном классифицируются по периоду или частоте импульса. Выделяются миллисекундные и обычные пульсары. Разделение проводится по некоторому значению периода P_0 пульсара (в разных работах принимаются значения от 10 до 30 миллисекунд). Пульсары с периодом меньше этого значения называются миллисекундными, остальные - обычными пульсарами.

Миллисекундные пульсары представляют собой особый класс радио-пульсаров, которые отличаются высокой стабильностью вращения и малыми значениями магнитного поля ($\sim 10^8 - 10^9$ Гс) по сравнению с обычными пульсарами [7, 8]. Считается, что они формируются в результате перераскрутки нейтронной звезды в тесной двойной системе путем аккреции вещества от компаньона, что приводит к значительному сокращению периода вращения [9]. В настоящее время известно более 600 миллисекундных пульсаров [2, 10], большинство из которых находятся в двойных системах, часто с белыми карликами в качестве компаньонов, что подтверждает сценарий перераскрутки.

Кроме классификации по периоду, пульсары можно разделять и по диапазону электромагнитного излучения. Помимо пульсаров, наблюдаемых только в радиодиапазоне, существуют пульсары, регистрируемые также в рентгеновском (XRS-пульсары) и гамма-диапазоне (GRS-пульсары). Кроме того, имеется небольшая группа пульсаров, наблюдаемых в оптическом диапазоне.

В настоящей работе рассматриваются распределение по периодам и пространственное распределение пульсаров. В разделе 2 приведено распределение пульсаров по периоду импульсов, в разделе 3 изложены результаты исследования распределения пульсаров в зависимости от расстояния до плоскости Галактики, в разделе 4 обсуждаются полученные результаты.

2. Распределение пульсаров по периоду импульсов. В этом разделе представлено распределение пульсаров по периоду импульсов для разных групп пульсаров: пульсаров, находящихся в галактических шаровых скоплениях, рентгеновских пульсаров (XRS), гамма-пульсаров (GRS), а также обычных пульсаров.

На рис.1 приводится распределение всех галактических пульсаров по периоду импульсов. По оси абсцисс отложены значения $\log(P_0)$, по оси ординат - количество пульсаров.

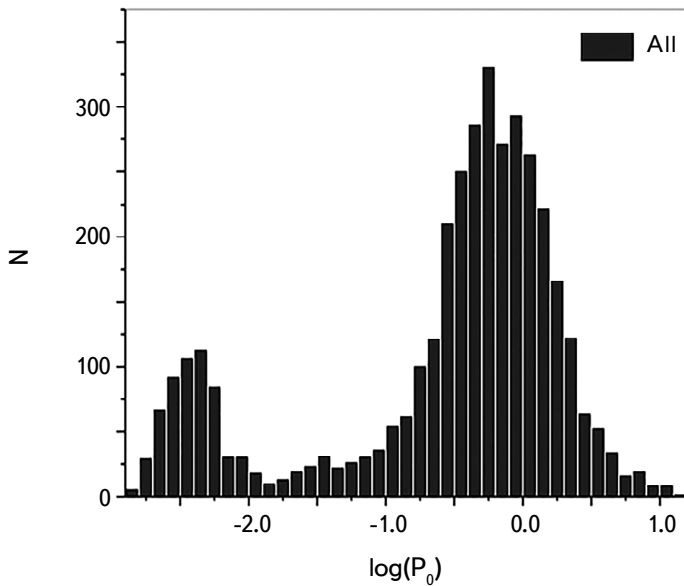


Рис.1. Распределение всех галактических пульсаров по периоду импульсов.

Из рисунка видно, что четко выделяются две многочисленные группы пульсаров с максимумами распределения по значению $\log(P_0)$ в районе -2.3 - так называемые миллисекундные пульсары - и в районе -0.3 - обычные пульсары.

Также наблюдается менее многочисленная группа пульсаров с максимумом при $\log(P_0) = -1.5$. Вероятно, наличие такой промежуточной группы является причиной нечеткого разграничения между миллисекундными и обычными пульсарами.

В настоящей работе, как и в нашей статье [11], граница между миллисекундными и обычными пульсарами принимается при $\log(P_0) = -1.7$, что соответствует периоду $P_0 = 20$ миллисекунд.

На рис.2 представлены распределения по периоду пульсаров, находящихся в шаровых скоплениях (Gl. Clas.), пульсаров, испускающих гамма-излучение (гамма-пульсары - GRS), и рентгеновских пульсаров (XRS), находящихся в поле Галактики, соответственно.

На рис.2 видны существенные отличия в распределении отдельных групп пульсаров как между собой, так и по сравнению с распределением всех пульсаров, представленным на рис.1.

Распределение пульсаров с гамма-излучением (GRS) по периоду импульсов сильно отличается от остальных. На рисунке четко выделяются две группы: миллисекундные пульсары (157 из 301 так называемых GRS-пульсаров) с максимумом распределения при $\log(P_0) = -2.6$, и группа пульсаров с более

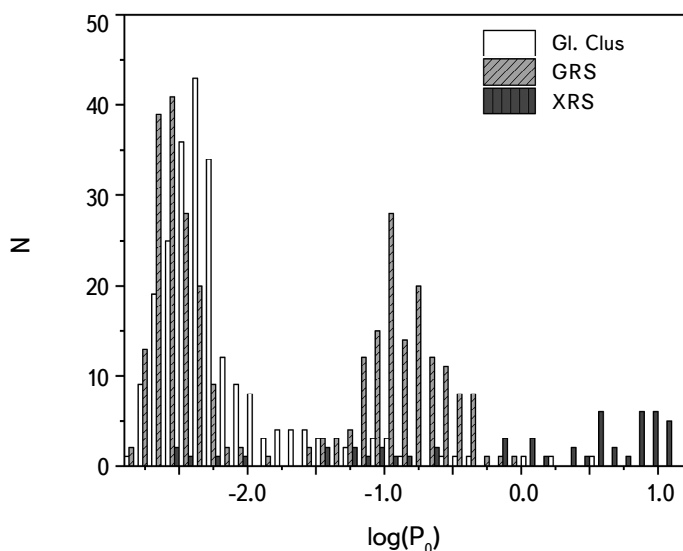


Рис.2. Распределение пульсаров разных типов по периоду импульсов.

длинными периодами с максимумом при $\log(P_0) = -1.0$.

Следует отметить, что распределение миллисекундных GRS-пульсаров значительно смещено в сторону меньших значений P_0 по сравнению с миллисекундными пульсарами, находящимися в шаровых скоплениях, и обычными миллисекундными пульсарами. Распределение GRS-пульсаров с большими периодами также существенно отличается от распределения нормальных пульсаров (рис.1). Достаточно сказать, что максимум распределения этих GRS-пульсаров приходится на $\log(P_0) = -1.0$, тогда как максимум нормальных пульсаров - на $\log(P_0) = -0.3$, и среди GRS-пульсаров практически нет объектов со значениями $\log(P_0) > -0.3$. Такое отличие распределения этих объектов трудно объяснить в рамках известных теорий образования пульсаров, но, несомненно, это связано с механизмом излучения в гамма-диапазоне. Отметим также, что в нашем списке содержится немного GRS-пульсаров, находящихся в шаровых скоплениях.

В галактических шаровых скоплениях (рис.2, Gl. Clus) преимущественно находятся миллисекундные пульсары. Из 229 пульсаров, находящихся в шаровых скоплениях, у 203 значение $\log(P_0) < -1.7$, т.е. $P_0 < 20$ миллисекунд. Максимум распределения соответствует $\log(P_0) = -2.3$, как и у миллисекундных пульсаров на рис.1. Надо отметить, что в последнее время появились новые свидетельства, показывающие, что упомянутая во *Введении* стандартная модель эволюции миллисекундных пульсаров не в состоянии объяснить происхождение всех этих объектов, находящихся в шаровых скоплениях и в более разреженных областях галактического поля.

На рис.2 также представлено распределение по $\log(P_0)$ для 52 рентгеновских пульсаров, находящихся в поле Галактики (рис.2, XRS). Из рисунка видно, что такие пульсары в основном имеют большие значения $\log(P_0)$: лишь 5 из 52 являются миллисекундными. В отличие от GRS-пульсаров (рис.2), среди которых практически нет объектов со значениями $\log(P_0) > -0.3$, у большинства рентгеновских пульсаров (35 из 52) $\log(P_0) > -0.3$. Следует отметить, что помимо упомянутых рентгеновских пульсаров, в шаровых скоплениях также обнаружены рентгеновские пульсары, почти все из которых (47 из 48) являются миллисекундными. Также среди GRS-пульсаров имеются 45 рентгеновских пульсаров. Из них 15 являются миллисекундными ($\log(P_0) < -1.7$), у остальных значения $\log(P_0)$ лежат в интервале от -1.32 до -0.33 . Таким образом, в используемом нами каталоге содержится в общей сложности 145 рентгеновских пульсаров, для которых также построено распределение по периоду импульсов (рис.3).

Из рисунка видно, что выделяется большая группа миллисекундных пульсаров, состоящая в основном из пульсаров шаровых скоплений и миллисекундных GRS-пульсаров. Распределение остальных пульсаров не демонстрирует ярко выраженных особенностей.

Следует обратить внимание на отсутствие пульсаров в интервале $-1.9 < \log(P_0) < -1.5$.

3. Распределение пульсаров в зависимости от расстояния от плоскости Галактики. В работе [11] показано, что распределение расстояний нормальных радиопулсаров от плоскости Галактики хорошо описывается

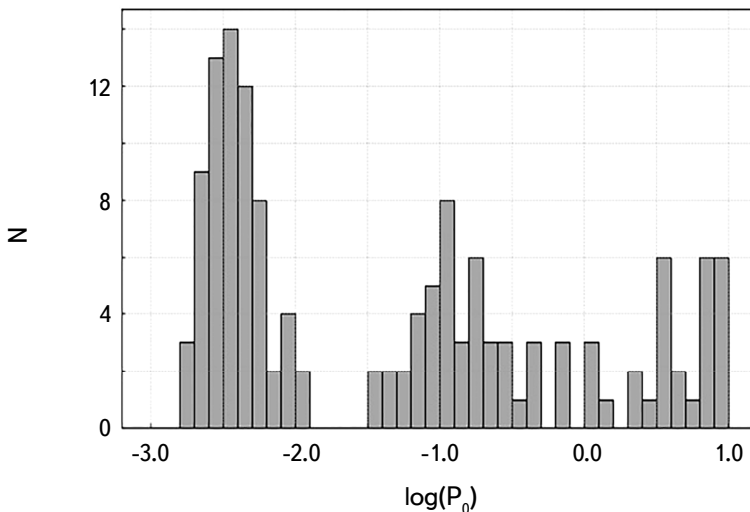


Рис.3. Распределение всех рентгеновских пульсаров по периоду импульсов.

экспоненциальной функцией, а характеристическое расстояние от плоскости увеличивается с возрастом пульсаров. Это объясняется тем, что, как предполагается, пульсары рождаются вблизи плоскости Галактики и удаляются от нее из-за скорости, полученной пульсаром при несимметричной вспышке сверхновой, в результате которой он образуется [12-14]. Изучение пространственного распределения пульсаров и их кинематических характеристик дает важную информацию об эволюции галактического населения пульсаров [15].

В настоящей работе этот вопрос рассматривается более детально - отдельно для вышеупомянутых групп пульсаров. Распределение расстояний пульсаров от плоскости Галактики Z представляется в виде функции Гаусса с параметрами среднего значения Z_0 и дисперсией σ , характеризующей ширину распределения пульсаров относительно плоскости Галактики. В дальнейшем σ будет называться характеристическим расстоянием от плоскости Галактики.

$$\sigma^2 = (\Sigma(Z - Z_0)^2) / (N - 1), \quad (7)$$

где Z_0 - среднее значение Z , а N - число использованных пульсаров.

На рис.4 и 5 приведены распределения расстояний пульсаров от плоскости Галактики Z в зависимости от возраста пульсаров $\log(\text{Age})$ для разных групп.

Из рис.4 видно, что расстояния нормальных радиопульсаров от плоскости Галактики увеличиваются с возрастом пульсаров до $\log(\text{Age}) = 8$, т.е. до возраста около 100 млн лет. Также видно, что при $\log(\text{Age})$, близком к 8, имеется некоторое количество пульсаров, которые, в отличие от большинства, находятся на довольно больших расстояниях от плоскости Галактики (для 90 пульсаров $|Z| > 3$ кпк).

Поведение распределения пульсаров на рис.4 в области больших значений возраста $\log(\text{Age}) > 8$ также трудно объяснить (характеристическое расстояние от плоскости Галактики начинает уменьшаться). Детальному изучению этих старых пульсаров и объектов с аномальными расстояниями от плоскости будет посвящена отдельная работа.

В табл.1 приведены значения характеристических расстояний у нормальных радиопульсаров от плоскости Галактики. При вычислении σ из рассмотрения были исключены пульсары, у которых расстояния от плоскости Галактики превышают 2 кпк, поскольку такие аномально большие значения, как уже отмечалось, в основном встречаются только у пульсаров с возрастом в несколько сотен млн лет и эти пульсары будут изучены отдельно. Среднее значение расстояний пульсаров от плоскости Галактики Z_0 составило 20 пк, т.е. пульсары распределены довольно симметрично относительно плоскости. При вычислении σ , приведенных в табл.1, использовалось это значение Z_0 .

Из табл.1 видно, что характеристические расстояния нормальных радиопульсаров от плоскости Галактики σ увеличиваются с возрастом пульсаров

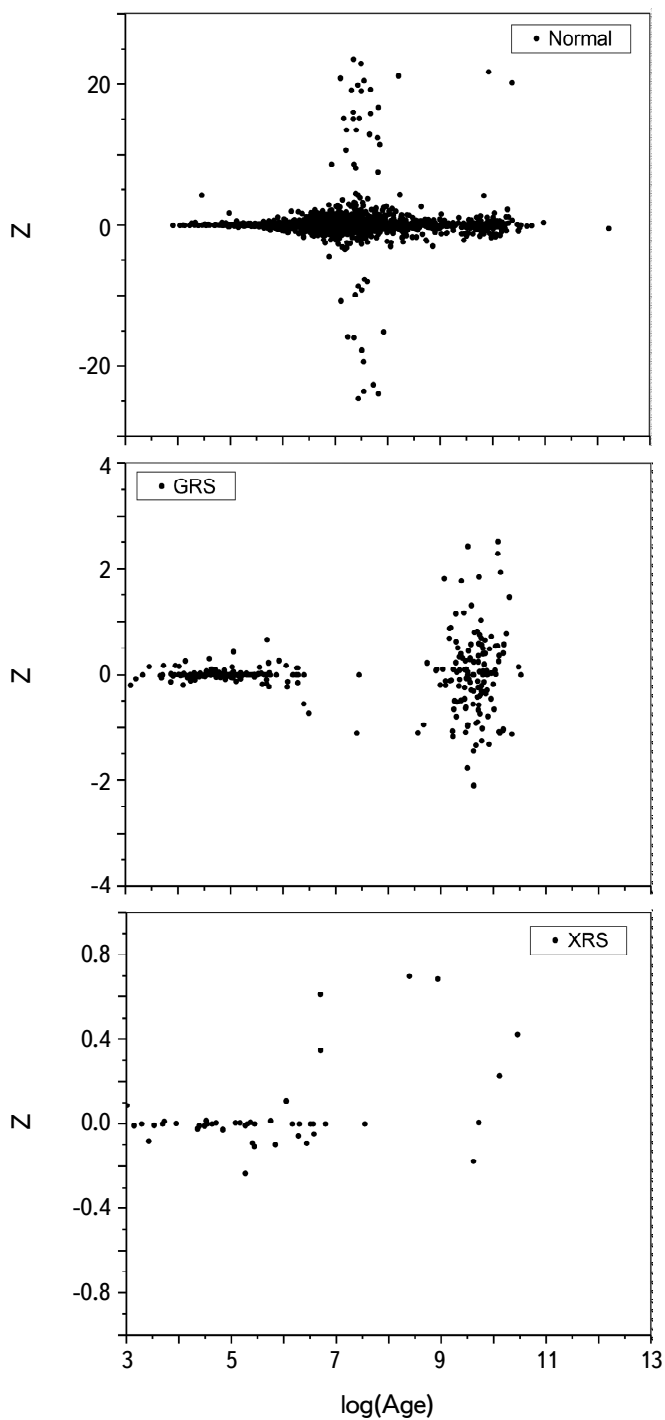


Рис.4. Распределение расстояний пульсаров от плоскости Галактики Z в зависимости от возраста $\log(\text{Age})$ для пульсаров разных типов.

Таблица 1

$T = \log(\text{Age})$	$0 < T \leq 6$	$6 < T \leq 7$	$7 < T \leq 8$	$8 < T \leq 9$	$9 < T$
Число N	349	789	589	229	87
Значение σ	0.203	0.497	0.679	0.536	0.592

до возрастов порядка 100 млн лет, что также подтверждается рис.4. Этот результат соответствует предположению, что пульсары рождаются вблизи плоскости Галактики и затем удаляются от нее из-за скорости, полученной при рождении в результате вспышки сверхновой звезды. Значения σ при возрастах свыше 100 млн лет не согласуются с этим предположением и, как уже было отмечено, данный вопрос требует отдельного изучения.

На рис.4 также представлено распределение расстояний GRS-пульсаров от плоскости Галактики в зависимости от возраста, как и на соответствующем распределении этих объектов по периоду (рис.2), выделяются две группы пульсаров с совершенно разными характеристиками. Следует отметить, что эти две группы, выделенные на рис.2 и 4, включают одни и те же пульсары.

Однако миллисекундные GRS-пульсары из левой части рис.2 - это старые пульсары, находящиеся в правой части рис.4, со средним значением $\log(\text{Age}) \approx 9.55$. Эти пульсары распределены в широком слое около плоскости Галактики толщиной порядка несколько килопарсек. Характеристическое расстояние у этих пульсаров от плоскости составляет около 600 парсек.

Группа же GRS-пульсаров с более длинными периодами (максимум распределения при $\log(P_0) = -1.0$, правая часть рис.2) представляет собой молодые пульсары (левая часть рис.4) со средним значением $\log(\text{Age}) \approx 5$. Эти пульсары находятся в тонком слое вблизи плоскости Галактики, и их характеристическое расстояние σ составляет около 130 пк.

Отметим, что при вычислении σ для GRS-пульсаров, а также для значений σ , приводимых далее, из рассмотрения исключались пульсары с $Z^2 > 3$, а в качестве среднего значения расстояния от плоскости Галактики принималось $Z_0 = 0$ пк, исходя из симметричного распределения пульсаров относительно плоскости.

Из рис.4 также видно, что рентгеновские XRS пульсары, находящиеся в поле Галактики, в большинстве своем являются относительно молодыми - их возраст менее 10 млн лет. Они сконцентрированы в очень тонком слое у плоскости Галактики. Пять миллисекундных рентгеновских пульсаров, находящихся в поле Галактики (правая часть рис.4 для XRS пульсаров), являются очень старыми. Среднее значение $\log(\text{Age})$ этих пульсаров - 9.77, т.е. почти 6 млрд лет.

Как уже отмечалось, рентгеновские пульсары также входят в состав галактических шаровых скоплений и в список GRS-пульсаров. В общей сложности в нашем списке 145 рентгеновских пульсаров, из которых 72 являются миллисекундными. Распределение миллисекундных рентгеновских пульсаров относительно плоскости Галактики в значительной степени определяется распределением шаровых скоплений, поскольку 46 из 72 таких пульсаров находятся в шаровых скоплениях.

Для остальных рентгеновских пульсаров с относительно большими периодами характеристическое расстояние σ составляет около 160 пк, а средний возраст - порядка 100 тысяч лет.

Из рис.5 видно, что пульсары, находящиеся в галактических шаровых скоплениях, в основном являются старыми - их возраст варьируется от 100 млн до нескольких млрд лет. Это соответствует сделанному выше выводу о старости миллисекундных GRS-пульсаров, поскольку пульсары в шаровых скоплениях также преимущественно являются миллисекундными.

Распределение пульсаров шаровых скоплений относительно плоскости Галактики здесь не рассматривается, так как оно определяется известным распределением самих шаровых скоплений в Галактике.

Следует также отметить, что в используемом нами списке пульсаров содержится 224 миллисекундных пульсара галактического поля, которые не излучают в гамма- или рентгеновском диапазонах, то есть не являются GRS-или XRS-пульсарами и не входят в шаровые скопления. Для них характеристическое расстояние σ составляет около 480 пк, а средний возраст -

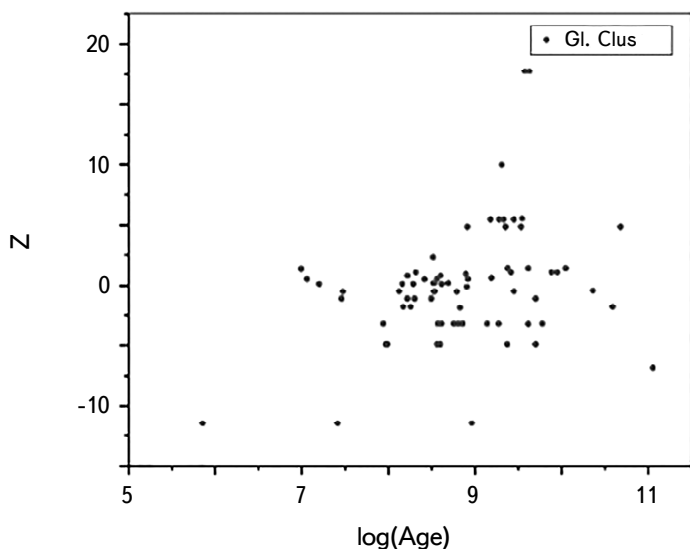


Рис.5. Распределение расстояний пульсаров от плоскости Галактики Z в зависимости от возраста для пульсаров, находящихся в шаровых скоплениях.

порядка 6 млрд лет, что сопоставимо со значениями для миллисекундных GRS- и XRS-пульсаров, а также пульсаров шаровых скоплений.

4. Заключение. В заключение приведем несколько важных результатов, полученных в настоящей работе.

Используя новые, более обширные данные, был подтвержден ранее полученный нами результат [11] о том, что характеристическое расстояние нормальных радиопульсаров от плоскости Галактики увеличивается с ростом их характеристического возраста.

Миллисекундные пульсары всех типов - включая пульсары, находящиеся в галактических шаровых скоплениях, миллисекундные пульсары, излучающие также в гамма- и рентгеновском диапазонах, и миллисекундные пульсары галактического поля, излучающие только в радиодиапазоне - являются очень старыми объектами со средними возрастами в несколько млрд лет. Они расположены в широком слое у плоскости Галактики, с характеристическим расстоянием у порядка 500 пк.

Существует также другая группа GRS-пульсаров с относительно большими периодами, которая значительно отличается от нормальных радиопульсаров. В то время как у нормальных радиопульсаров максимум распределения по периоду наблюдается при $\log(P_0) = -0.3$, у GRS-пульсаров с большими периодами максимум приходится на значительно меньшие значения - около при значении $\log(P_0) = -1.0$. В этой группе отсутствуют GRS-пульсары со значениями $\log(P_0) > -0.3$. Эти GRS-пульсары расположены в тонком слое вблизи плоскости Галактики, с характеристическим расстоянием у порядка 160 пк и средним возрастом около 100 тысяч лет.

Следует отметить, что с точки зрения понимания процессов образования и эволюции пульсаров крайне важно изучать различия (если таковые имеются) в распределении пульсаров различных типов в плоскости Галактики, а также их пространственные связи с галактическими рукавами и шаровыми скоплениями. Изучению этих вопросов будет посвящена отдельная работа.

Advanced Research Grant 21AG-1C053: Revelation of Early Stages of Galaxy Evolution by Means of MW Study of Active Galaxies.

Бюраканская астрофизическая обсерватория им. Амбарцумяна НАН РА,
e-mail: randreasyan@gmail.com

ON THE DISTRIBUTION OF DIFFERENT TYPES OF PULSARS IN THE GALAXY

R.R.ANDREASYAN, H.R.ANDREASYAN, G.M.PARONYAN,
A.G.SUKIASYAN

This work considers the spatial and period distributions of various types of pulsars. Based on the analysis of observational data for more than 3.800 pulsars, the following key results were obtained: The characteristic distance of normal radio pulsars from the Galactic plane increases with their characteristic age. Millisecond pulsars of all types - including those located in Galactic globular clusters, those emitting in the gamma-ray and X-ray ranges, and those in the Galactic field that emit only in the radio band - are found to be very old objects, with average characteristic ages of several billion years. These pulsars are distributed within a broad layer near the Galactic plane, with a characteristic distance σ of approximately 500 parsecs. A distinct group of GRS pulsars with relatively long periods significantly differs from normal radio pulsars. While the peak of the period distribution for normal radio pulsars lies around $\log(P_0) = -0.3$, the peak for GRS pulsars is shifted substantially to the left. These GRS pulsars are located in a thin layer close to the Galactic plane, with a characteristic distance σ of about 160 parsecs, and have an average age of roughly one hundred thousand years.

Keywords: *pulsars: pulsar distribution: x-ray pulsars*

ЛИТЕРАТУРА

1. *M.Kramer et al.*, Mon. Not. Roy. Astron. Soc., **342**, 1299, 2003.
2. *R.N.Manchester, G.B.Hobbs, A.Teoh et al.*, Astron. J., **129**, 1993, 2005.
3. *J.Xu, J.L.Han*, Mon. Not. Roy. Astron. Soc., **486**, 4275, 2019.
4. *J.Xu, J.L.Han*, Astrophys. J., **966**, 240, 2024.
5. *R.R.Andreasyan, A.N.Makarov*, Astrophysics, **30**, 101, 1989.
6. *R.R.Andreasyan, E.A.Mikhailov, H.R.Andreasyan*, Astron. Rep., **64**, 189, 2020.
7. *D.Bhattacharya, E.P.J. van den Heuvel*, Phys. Rep., **203**(1-2), 1-124, 1991.
8. *D.R.Lorimer*, Living Reviews in Relativity, **11**, 8, 2008.
9. *M.A.Alpar, A.F.Cheng, M.A.Ruderman et al.*, Nature, **300**, 728, 1982.
10. *R.N.Manchester*, International Journal of Modern Physics D, **26**(03), 1730001, 2017.
11. *H.A.Andreasyan, R.R.Andreasyan, G.M.Paronyan*, Astrophysics, **59**, 57, 2016

12. *Z.Arzoumanian, D.F.Chernoff, J.M.Cordes*, *Astrophys. J.*, **568**, 289, 2002.
13. *V.Kapil, I.Mande, E.Berti et al.*, *Mon. Not. Roy. Astron. Soc.*, **519**, 5893, 2023.
14. *T.G.Arshakyan*, *Astrophysics*, **37**, 143, 1994.
15. *D.R.Lorimer*, *IAU Symposium*, **291**, 237, 2013.