



Абстракт

Мы провели поиск кандидатов в черные дыры (ЧД) звездных масс в их предполагаемых областях рождения, вычисленных в предположении, что они с большой вероятностью могли образоваться в высокомассивных двойных системах, вторым компонентом в которых был радиопульсар. В этих областях были проанализировали источники с доступными спектральными или фотометрическими данными и измеренными собственными движениями и расстояниями. Среди них был проведен отбор объектов, чьи характеристики соответствуют теоретическим предсказаниям о наблюдательных проявлениях одиночных ЧД. Восемь объектов, подходящие по критериям отбора, были отмечены для дальнейшего исследования как кандидаты в ЧД.

Введение

Основным признаком ЧД является наличие горизонта событий. Для того чтобы утверждать, что исследуемый объект является ЧД, необходимо получать информацию из области, непосредственно к нему прилегающей [1]. В то же время, и двойные системы с компактными массивными объектами, и ядра галактик со сверхмассивными компактными объектами, окружены аккрецирующим веществом, которое экранирует горизонты событий из-за высокого темпа аккреции и плотности окружающего вещества. У изолированных же ЧД звездных масс темп аккреции достаточно низок ($10^{-6} - 10^{-9} \dot{M}_{Edd}$), что позволяет регистрировать фотоны генерируемые непосредственно вблизи горизонта событий [2].

Аккреция на такую ЧД имеет сферический характер в силу малой дисперсии скоростей и плотности в межзвездном газе [3]. Как показал Шварцман в 1971-м году [4], при сферической аккреции генерируется синхротронное излучение электронов в хаотических магнитных полях усиленных при падении плазмы на ЧД. Большая часть излучения рождается в областях близких к горизонту. С наблюдательной точки зрения, такие объекты обладают следующими характеристиками. Для типичных параметров межзвездной среды, эти источники

- ▶ излучают в диапазоне частот 10^{14} - 10^{20} Hz,
- ▶ обладают нетепловым континуумом без линий,
- ▶ имеют оптический блеск 16 - 25^m (для типичных расстояний до ЧД 100 - 300 пк),
- ▶ переменны на временах от часов до лет,
- ▶ обладают собственным движением.

Некоторые галактические источники обладают похожими свойствами: DC карлики, лацертиды, РОКОСы [5,6]. Но критическим экспериментом по выявлению горизонта событий является наличие коротких вспышек (10^{-6} - 10^{-3} с). В эксперименте МАНИЯ, начатом в 1972 году, объекты этих типов выделялись по всему северному небу и проводился поиск сверхбыстрой переменности у них с помощью специальной аппаратуры разработанной в CAO [7].

В настоящей работе мы выделяем области где вероятность обнаружения ЧД повышена (а именно, области распада массивных двойных систем) и проводим поиск объектов, обладающих вышеуказанными проявлениями, именно в них.

Литература

[1] Beskin, Karpov, A&A, 440(1):223–238, 2005
[2] Beskin et al., Adv. Space Res, 42(3):523–532, 2008
[3] Bondi, MNRAS, 112:195,1952.
[4] Shvartsman, Soviet Ast., 15:377, 1971
[5] Shvartsman et.al., Soviet Astronomy Letters, 15:145, 1989
[6] Shvartsman et.al., Astrofizika, 31:457–465, 1989
[7] Shvartsman, Soobshcheniya SAO, 19:5–38, 1977
[8] Wiktorowicz et.al., ApJ,885(1):1, 2019.
[9] Bethe, Brown, ApJ, 506(2):780–789, 1998
[10] Hobbs et al., MNRAS, 360(3):974–992, 2005
[11] Chmyreva et al., Astronomy Letters, 36(2):116–133, 2010

Области локализации ЧД

Многие одиночные ЧД и нейтронные звезды (НЗ) образовались в массивных двойных системах [8]. В парах ЧД+НЗ, ЧД образуется первой, при взрыве сверхновой в конце эволюции более массивной звезды. Примерно в 40% случаев, система остается гравитационно связанной. Второй взрыв сверхновой при рождении НЗ обычно ее разрушает [9] и НЗ (радиопульсары) приобретают высокие скорости [10]. Анализируя кинематику и характеристические возраста τ_{ch} этих пульсаров, можно определить места их рождения. ЧД в несколько раз массивнее НЗ и при распаде системы получит меньшую скорость, т.е. будет находится вблизи от области рождения НЗ [8]. Таким образом, вероятность локализации ЧД в таких областях повышена, что позволяет существенно сузить пространство поиска. Мы отобрали 16 молодых одиночных пульсаров из базы ATNF с известными собственными движениями и параллаксами. Моделируя их пространственные скорости и решая уравнение их движения в потенциале Галактики, мы симулировали для каждого из них по 100000 траекторий и прослеживали их в прошлое на время, равное τ_{ch} (см. нашу работу [11]). Распределение конечных точек траекторий определяло в пространстве область, где произошел распад системы и где может находится ЧД (пример такой области показан на Рис.1). Наиболее точные результаты были получены для самых молодых пульсаров (Таблица 1).

Пульсар	Собств. движение μ_α, μ_δ (mas yr ⁻¹)	Расст. (пк)	Возраст (лет)
J0139+5814	-19.11(0.07), -16.60(0.07)	2600(300)	403 000
J0922+0638	18.8(0.9), 86.4(0.7)	1100(200)	497 000
J0358+5413	9.20(0.18), 8.17(0.39)	1000(200)	564 000
J1935+1616	1.13(0.13), -16.09(0.15)	3700(1300)	947 000

Таблица 1:Пульсары, в местах рождения которых проводился поиск ЧД

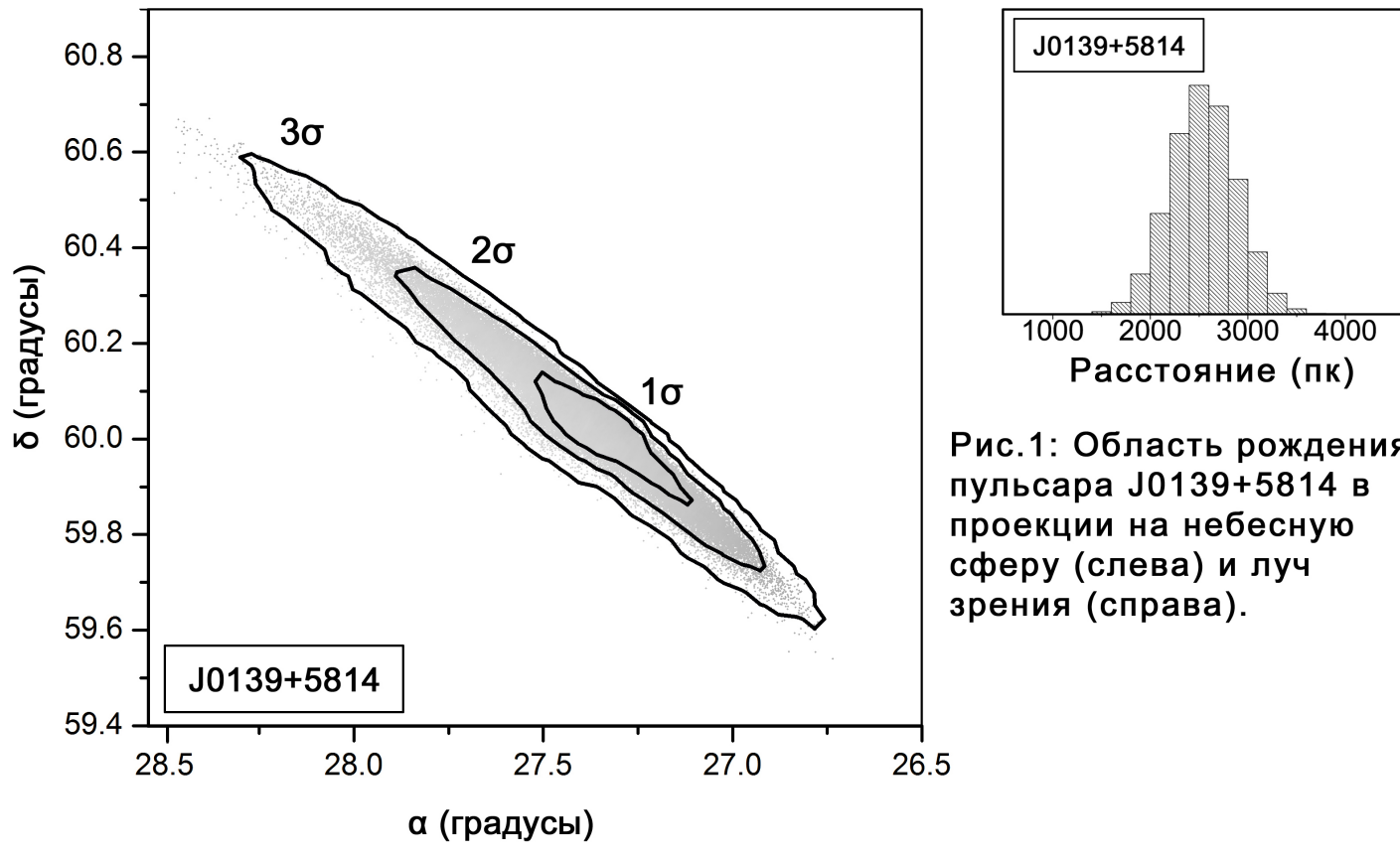


Рис.1: Область рождения пульсара J0139+5814 в проекции на небесную сферу (слева) и луч зрения (справа).

Выделение кандидатов в ЧД

В выделенных областях мы отобрали источники в гамма, рентгеновском и радио диапазонах (ROSAT, FERMI, XMM-Newton, FIRST). Области суммарно содержали 5 гамма, 258 рентгеновских и 1896 радио источников. Их кросс-отождествление в пределах эллипсов позиционных ошибок дало 57 совпадений рентгеновских и радио объектов. Из них 45 - подтвержденные квазары, звезды, или галактики (SIMBAD). Для оставшихся 12 отождествлений мы провели поиск оптических компонентов (SDSS, DSS); в сумме их получилось 35. Помимо источников с жесткой спектральной составляющей, мы включили в выборку 59 объектов, классифицированных как DC карлики и голубые объекты. Таким образом, в итоговую выборку попали 94 оптических источника. Из них мы исключили: 5 артефактов, 4 объекта с линейчатыми спектрами, 10 объектов, не подходящих по расстоянию (GAIA); 6 объектов у которых собственное движение не обнаружено; 57 звезд. У оставшихся 12 объектов данные о переменности отсутствуют. У трех из них также отсутствуют данные о расстоянии. Оставшиеся 9 кандидатов – слабые источники 19 - 21^m , находящиеся на расстоянии до ~ 500 пк. Мы использовали значения их собственных движений и расстояний, а также плотности межзвездной среды в их окрестностях для расчета теоретической видимой величины ЧД и последующего сравнения ее с "наблюдаемой". Расчет производился для масс 3 - $15M_\odot$ и скоростей в интервале V_{tr} - 100 км с⁻¹, где V_{tr} – поперечная скорость. Светимости рассчитывались по формуле [1]:

$$L = 9.6 \times 10^{33} M_{10}^3 n_1^2 (V^2 + c_s^2)_{16}^{-3} \text{ erg/s}, \quad (1)$$

где M_{10} – масса ЧД в единицах $10M_\odot$, n_1 – плотность среды на 1 cm^{-1} , V – скорость ЧД, нормированная на 16 км/с , а c_s – скорость звука. Для одного объекта, наблюдаемая величина не соответствовала теоретической ни при одном наборе параметров; он был исключен из дальнейшего рассмотрения. Для восьми оставшихся объектов модельные и наблюдаемые величины хорошо согласуются (Таблица 2)

Анализ выборки кандидатов

Объект	μ_α, μ_δ mas yr ⁻¹	d pc	n cm ⁻³	V_{tr} km s ⁻¹	m
J035738.16+525934.4	2.56(0.88), 6.58(0.69)	392(70)	7.59(1.36)	13(3)	~ 19.3
J035757.63+525928.7	-12.5(1.5), 2.6(1.1)	377(100)	7.89(2.09)	23(7)	~ 19.6
J035717.10+511525.4	0.88(0.51), -1.8(0.35)	571(70)	4.76(0.58)	5(1)	~ 18.6
J035239.08+513344.1	18.9(0.5), -26.1(0.4)	210(10)	13.01(0.62)	32(2)	~ 18.7
J193559.98+205305.7	7.4(0.7), 2.7(0.8)	466(120)	8.62(2.22)	17(5)	~ 19.7
J193433.81+203117.1	15.7(0.3), -36.1(0.4)	290(20)	13.74(0.95)	54(4)	~ 18.8
J193415.78+190004.2	0.5(1.2), -41.7(1.7)	305(100)	12.54(4.11)	60(20)	~ 20.5
J034803.12+505358.7	-1.97(1.13), -7.59(0.92)	448(200)	6.11(2.72)	17(8)	~ 20.5

Таблица 2:Параметры восьми объектов, которые показали хорошее согласие наблюдаемых и модельных величин.

При формировании ЧД или НЗ, на ее нынешнее движение будет влиять импульс, полученный при коллапсе и/или распаде двойной системы. Распределение скоростей двойственного вида [8] хорошо описывает наблюдаемые данные: медленные ЧД, сформировавшиеся без начального импульса, и быстрые, с более широким крылом на высоких скоростях. Распределение масс в имеет основной пик на $\sim 7 - 8M_\odot$ и менее выраженные пики на $15M_\odot$ и $22M_\odot$. Конвертируя эти независимые распределения масс и скоростей в вероятности и перемножая их, получаем двумерное поле, показывающее области наиболее вероятных значений M и V для одиночных ЧД, образовавшихся в двойных системах (Рис.2). Основной пик приходится на $V \sim 10 \text{ км с}^{-1}$ при массе $\sim 7.5M_\odot$, с менее выраженными "крыльями" на тех же значениях и практически нулевыми значениями по остальному полю.

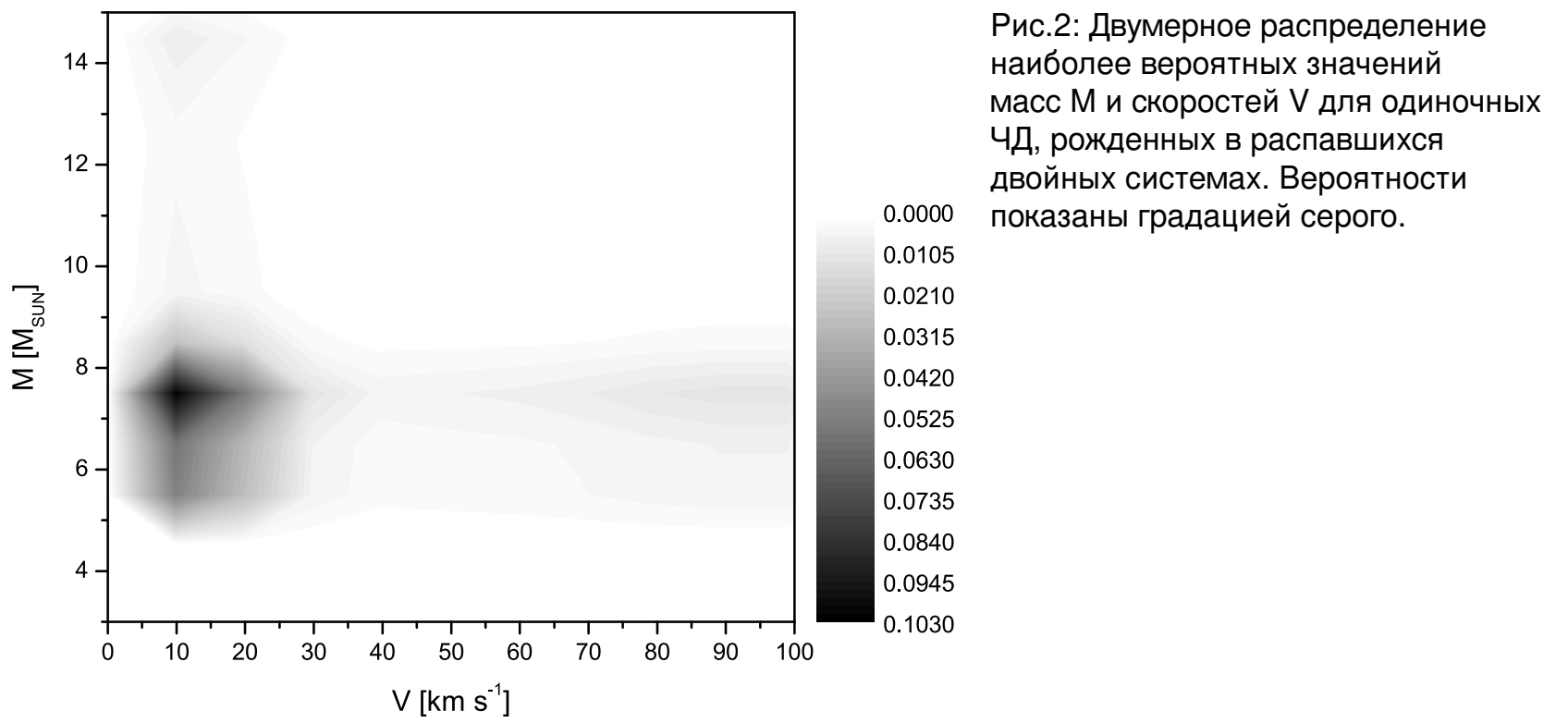


Рис.2: Двумерное распределение наиболее вероятных значений масс M и скоростей V для одиночных ЧД, рожденных в распадавшихся двойных системах. Вероятности показаны градацией серого.

Это двумерное распределение было использовано для оценки полной вероятности того, что отобранные кандидаты являются ЧД. Для каждого кандидата мы построили графики (Рис.3), показывающие пространство значений масс M и скоростей V , дающих наблюдаемую величину m (область между двумя кривыми). Совмещая эти графики с двумерным распределением вероятности на Рис.2, получаем для каждого кандидата наглядное отображение наиболее вероятных для ЧД значений масс и скоростей. Интегрируя плотность вероятности в области между кривыми, получаем полную вероятность P того, что объект является ЧД.

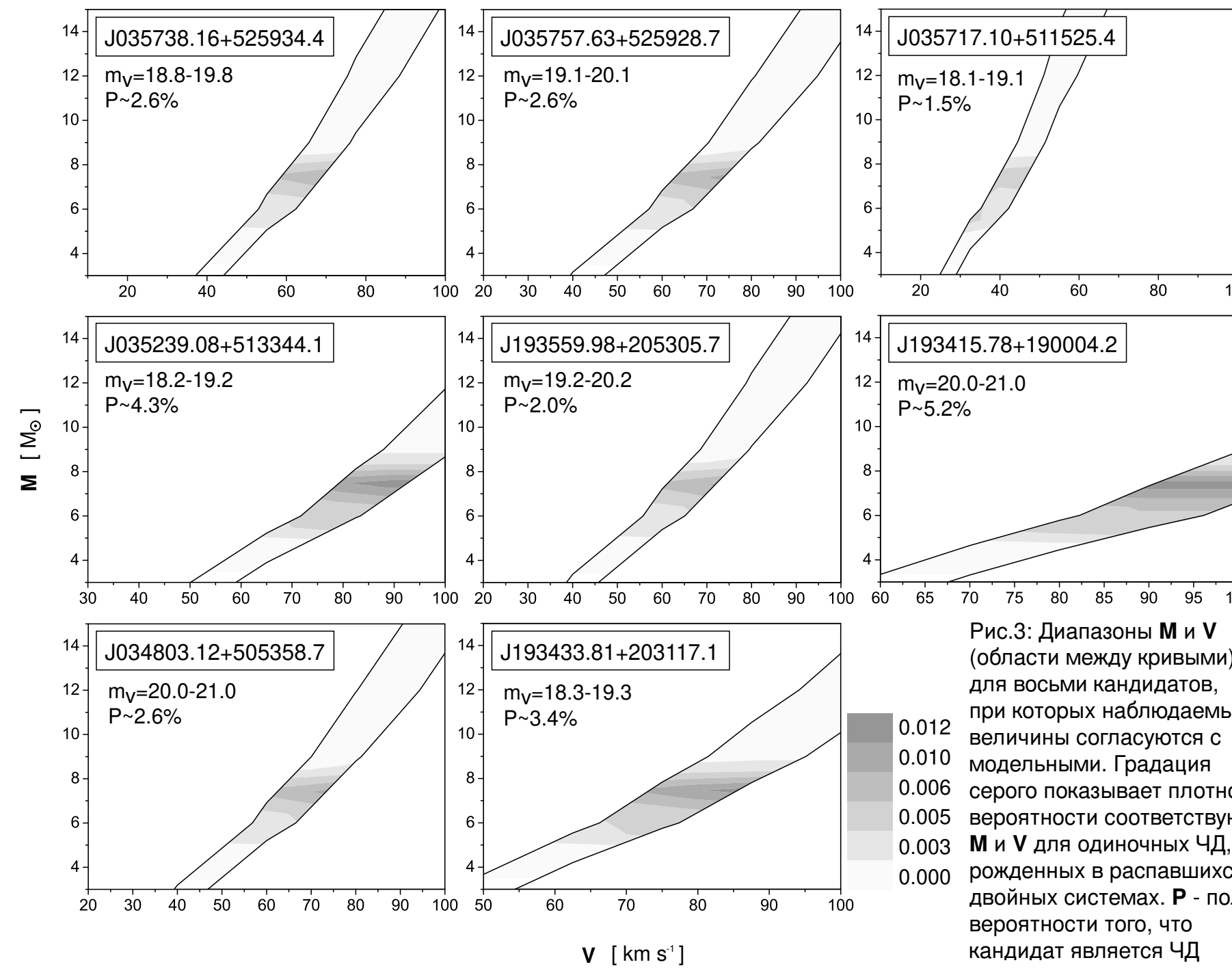


Рис.3: Диапазоны M и V (области между кривыми) для восьми кандидатов, при которых наблюдаемые величины согласуются с модельными. Градация серого показывает плотность вероятности соответствующих M и V для одиночных ЧД, рожденных в распадавшихся двойных системах. P – полные вероятности того, что кандидат является ЧД

Все приведенные 8 кандидатов находятся в областях рождения двух пульсаров: J0358+5413 и J1935+1616. Кандидатов в областях рождения двух других пульсаров не осталось в процессе отбора. Поперечные скорости этих пульсаров составляют 58 ± 12 и $283 \pm 99 \text{ км с}^{-1}$ соответственно. Диапазон поперечных скоростей кандидатов, находящихся в месте рождения J0358+5413 – от 5 до 32 км с^{-1} , а для кандидатов у J1935+1616 – от 17 до 60 км с^{-1} . Эти значения согласуются с ожидаемыми меньшими импульсами, полученными ЧД при разрушении системы по сравнению с НЗ, согласно модели распада. Наиболее высокие вероятности получены для J193415.78+190004.2 (5.1%), J035239.08+513344.1 (4.3%) и J193433.81+203117.1 (3.4%). Эти объекты были выделены для дальнейшего исследования: долгосрочные наблюдения для получения их спектров, а также данных по их возможной фотометрической переменности позволят сузить список кандидатов и получить свидетельства о том, что один или более из этих источников может, действительно, быть ЧД