

УДК 524.316.7.082:524.3-126:52-17+520.82

ПОИСК КОРИЧНЕВЫХ КАРЛИКОВ В БОЛЬШИХ ФОТОМЕТРИЧЕСКИХ ОБЗОРАХ: WISE, 2MASS, DES

© 2023 А. С. Авдеева^{1,2*}, С. В. Карпов^{3,4}, О. Ю. Малков¹

¹Институт астрономии РАН, Москва, 119017 Россия

²Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики», Москва, 101000 Россия

³Специальная астрофизическая обсерватория РАН, Нижний Архыз, 369167 Россия

⁴Центральноевропейский институт космологии и фундаментальной физики, Институт физики, Чешская академия наук, Прага, 18221 Республика Чехия

Поступила в редакцию 15 декабря 2022 года; после доработки 25 января 2023 года; принята к публикации 27 января 2023 года

Однородные и полные выборки коричневых карликов необходимы для разного рода исследований: кинематических исследований Галактики, исследований двойных звезд с коричневыми карликами, уточнения маломассивного конца начальной функции масс и др. По разным оценкам коричневые карлики могут составлять до 25% населения Галактики, тем не менее, открытие коричневых карликов спектроскопическими методами крайне трудоемко. В данной работе мы представляем кросс-идентификацию известных близких коричневых карликов из списка 2021 года с оптическим обзором DES и создание на основе получившихся результатов фотометрических правил для обнаружения коричневых карликов в трех обзорах: WISE, 2MASS и DES. Более того, мы представляем различные фотометрические правила для каждого из трех семейств коричневых карликов: ярких, транзитных и слабых. Ранее такого разделения не делалось.

Ключевые слова: (звезды): *коричневые карлики — обзоры — метод: анализ данных*

1. ВВЕДЕНИЕ

Коричневые карлики — это субзвездные объекты, по массам находящиеся в промежутке между красными M-карликами и большими планетами. Однако их массы еще недостаточно для того, чтобы зажечь и поддерживать горение водорода в ядре, поэтому со временем они остывают, так и не выходя на главную последовательность.

Коричневые карлики были предсказаны теоретически (Hayashi and Nakano, 1963; Kumar, 1963) и затем, 30 лет спустя, обнаружены (Rebolo et al., 1995). С тех пор поиск (Burningham et al., 2013; Luhman, 2013; Carnero Rosell et al., 2019) и систематическое исследование известных коричневых карликов (Skrzypczek et al., 2016; Kirkpatrick et al., 2021) не прекращаются. Обнаружение новых коричневых карликов помогает лучше определить их распространенность в окрестностях Солнца и за их пределами. Знание пространственной плотности и распределения коричневых карликов дает ключевую информацию о распределении массы во Вселенной и о механизме образования коричневых карликов. Несмотря на то что за прошедшие

два десятилетия были найдены тысячи коричневых карликов, их количество в солнечной окрестности все еще остается под вопросом (Robert et al., 2016).

Данная работа посвящена поиску близких коричневых карликов, обладающих большим собственным движением. В нашем исследовании мы опираемся на «перепись» коричневых карликов в радиусе 20 пк от Солнца, составленную Kirkpatrick et al. (2021), далее K2021. Этот список содержит фотометрические данные (звездные величины 2MASS (Skrutskie et al., 2006) и AllWISE (Cutri et al., 2021)), астрометрические сведения (CatWISE (Marocco et al., 2021)) и информацию о спектральной классификации для 496 коричневых карликов. Мы также проводим кросс-идентификацию объектов из K2021 с обзором DES DR1 (Abbott et al., 2018). Кривые пропускания фильтров трех обзоров представлены на рис. 1.

На основе результатов кросс-идентификации нами выработаны правила, которые представляют собой описание границ областей в пространстве параметров (показателей цвета), характерных для исследуемых объектов, и осуществлен пробный поиск объектов, удовлетворяющих разработанным

*E-mail: avdeeva@inasan.ru

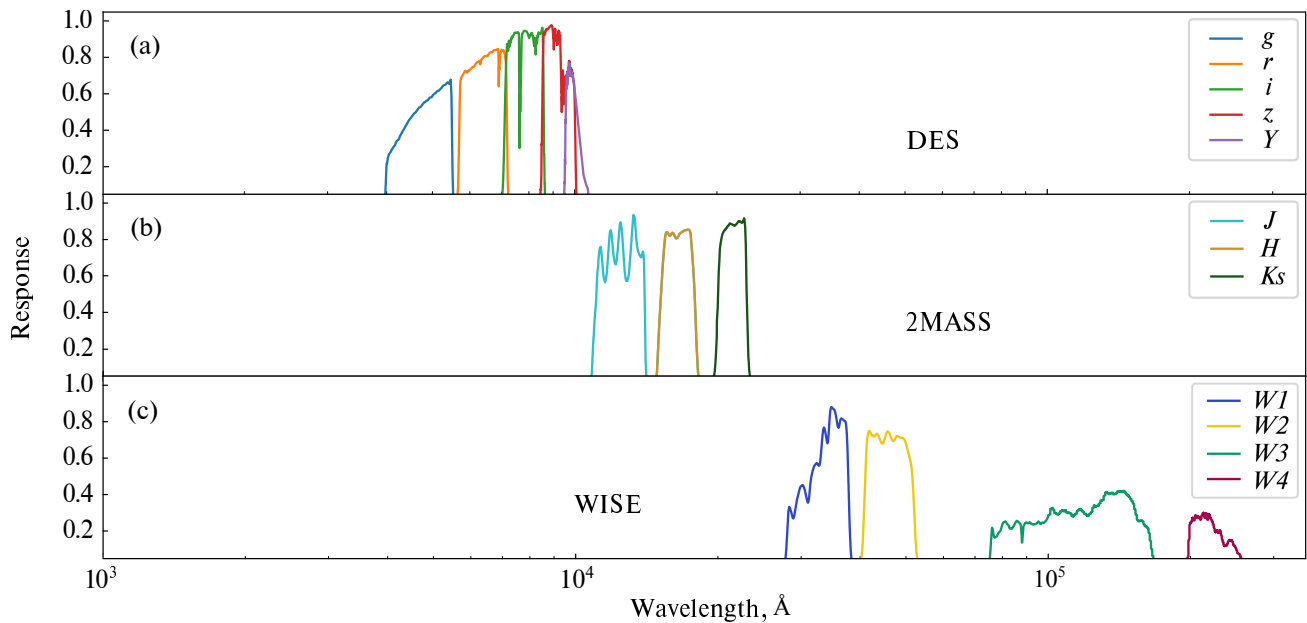


Рис. 1. Кривые пропускания различных обзоров.

правилам, в обзорах 2MASS, AllWISE и DES. Проверено, имеется ли для найденных объектов информация в каталоге Gaia DR3, и сделан вывод о возможности миссии Gaia обнаружить все близкие коричневые карлики.

2. ТРИ СЕМЕЙСТВА КОРИЧНЕВЫХ КАРЛИКОВ

Согласно Vos et al. (2019), можно ожидать, что коричневые карлики будут проявлять себя в пространстве параметров (блесков и цветов) тремя разными способами. Все дело в явлении, называемом L/T -переходом: из-за сложной структуры атмосфер холодных карликов их фотометрические свойства меняются с изменением температуры (или спектрального класса) нелинейно.

На рис. 2 представлены диаграммы «температура – спектральный класс» (панель (a)) и «цвет – спектральный класс» (панель (b)) для 496 коричневых карликов из K2021. Спектральный класс здесь закодирован числом: $SpAd = 0-9$ для $L0-L9$, $SpAd = 10-19$ для $T0-T9$, $SpAd = 20-24$ для $Y0-Y4$. На диаграмме «цвет – спектральный класс» наблюдается два излома: между $L8$ и $L9$, и следующий между $T3$ и $T4$. По мере уменьшения эффективной температуры коричневые карлики сначала становятся более красными (что соотносится со смещением максимума функции Планка при уменьшении температуры), а затем, после первого излома, их показатель цвета $Ks - W1$ начинает смещаться в сторону более голубого цвета.

Найти границу следующего излома — не самая простая задача, так как в этом диапазоне дисперсия показателей цвета становится довольно значительной. Однако, совмещая эту диаграмму с диаграммой «спектральный класс – температура», мы определяем, что коричневые карлики после $T3$ также демонстрируют поведение, отличающееся от карликов более ранних спектральных классов. Таким образом, мы делим наши объекты на три группы на основе величины $SpAd$: объекты с $SpAd < 9$ мы называем яркими, с $9 \leq SpAd < 14$ — транзитными и с $SpAd \geq 14$ — слабыми.

Для каждого из трех семейств мы определяем фотометрические правила для кросс-идентификации и поиска в обзорах независимо друг от друга, так как объекты разных семейств зачастую имеют разные типичные показатели цвета и разные взаимозависимости показателей цвета, что подтверждается в нашей работе. Кроме того, поиск объектов по семействам позволяет нам сделать первичную грубую спектральную классификацию, так как каждому семейству соответствует определенный диапазон спектральных классов.

3. КРОСС-ИДЕНТИФИКАЦИЯ ОБЪЕКТОВ С КАТАЛОГОМ ОБЗОРА DES

Кросс-идентификация объектов в нескольких обзорах — это процесс установления взаимно однозначного соответствия между наблюдениями одних и тех же объектов в разных обзорах. Зачастую самым важным в процессе кросс-идентификации

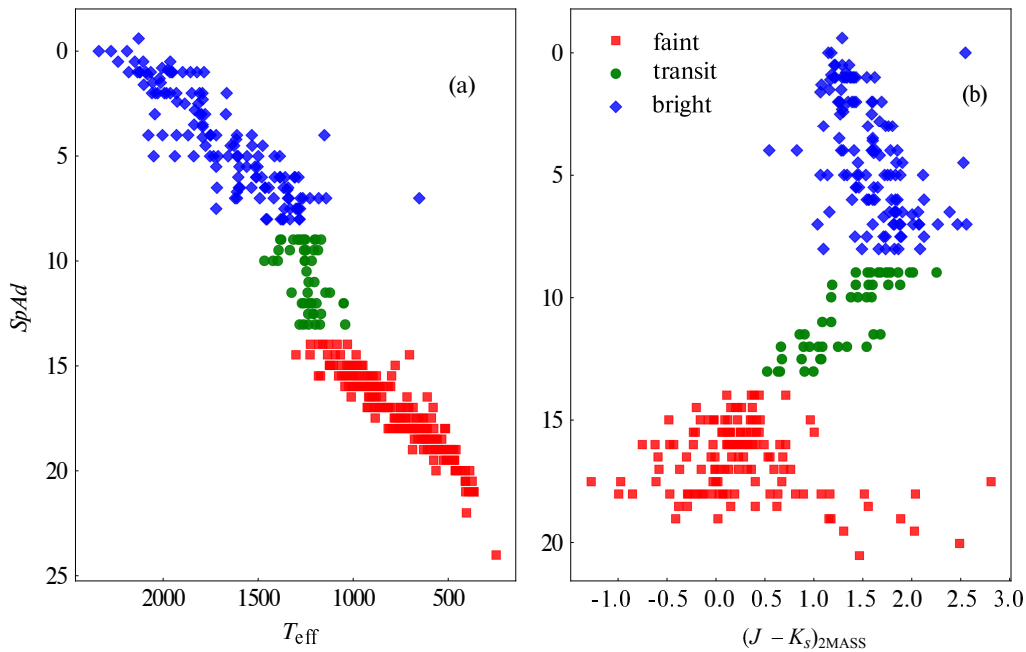


Рис. 2. Фотометрические, цветовые и спектральные характеристики объектов трех групп. Яркие объекты обозначены синим цветом, транзитные — зеленым, слабые — красным. Описание см. в тексте.

является определение так называемого радиуса кросс-идентификации — углового расстояния, типичного для одних и тех же объектов в данной паре обзоров. Однако изучаемые нами объекты, являясь близкими к Солнцу относительно большинства объектов в обзорах¹, обладают большими собственными движениями и за время между эпохами наблюдений разных обзоров, используемых в данной работе, могут изменять свое видимое положение на десятки угловых секунд.

Для кросс-идентификации объектов K2021 с обзором DES мы провели поиск в радиусе $10''$ по координатам из Kirkpatrick et al. (2021), приведенным на эпоху MJD 57170.5. При этом нас интересовали все объекты, попавшие в область заданного радиуса, так как мы исходим из предположения, что в случае больших собственных движений ближайший объект из интересующего нас обзора обязательно окажется правильным сопоставлением. Таким образом, каждому объекту из списка K2021, для которого в радиусе $10''$ нашлось какое-то сопоставление из каталога DES, может в этом каталоге соответствовать несколько записей, из которых нам предстоит определить верное сопоставление.

Особенностью каталога DES является невозможность точно установить, когда было проведено

¹Список K2021 включает в себя объекты, расстояние до которых не превышает 20 пк.

наблюдение конкретного объекта или записи, поэтому нельзя с уверенностью сказать, правильно ли соотносятся по координатам, эпохам наблюдения и величине собственного движения записи из двух каталогов: списка K2021 и DES. В то же время, зная эпоху начала и конца наблюдений миссии DES (MJD 56519 и MJD 58492), можно вычислить, где на небесной сфере объект должен был находиться на начало и конец наблюдений. В первом приближении мы сравниваем отклонение (далее Δ) трех получившихся точек («истинные» положения объекта на начало и конец наблюдений миссии, вычисленные по собственным движениям из K2021, и положение объекта, попадающего в радиус $10''$ нашего поиска) от прямой. Чем больше отклонение, тем менее вероятно, что это сопоставление является верным.

На рис. 3 представлен график зависимости показателя цвета $Y - J$ от Δ (панель a) и диаграмма «цвет — цвет» ($z - Y, Y - J$) (панель b). Мы проводим отсечку $\Delta < 4.2$ для всех объектов, среди которых ищем правильные сопоставления, таким образом, чтобы плотная группа на диаграмме ($z - Y, Y - J$) однозначно «проходила» этот фильтр. Мы считаем в данном случае, что повышенная плотность объектов в области, попадающей в выделенную область на диаграмме ($z - Y, Y - J$), свидетельствует о том, что эти объекты с большей вероятностью идентифицированы верно.

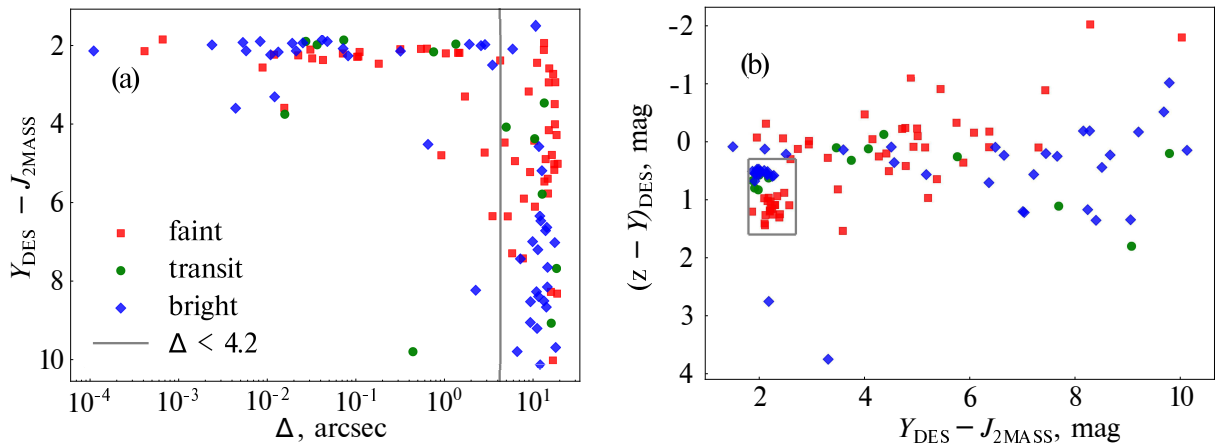


Рис. 3. Первичная фильтрация всех объектов, попавших в радиус поиска в обзоре DES. Отсечка $\Delta < 4.2$ на графике слева проводится таким образом, чтобы все объекты из отмеченной области на диаграмме $(z - Y, Y - J)$ справа удовлетворяли этому критерию фильтрации.

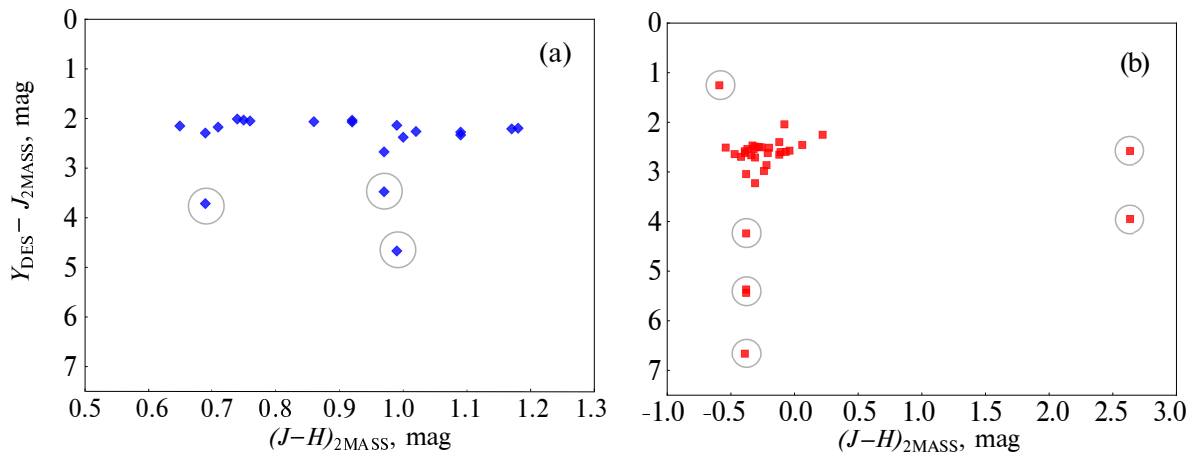


Рис. 4. Пример выбросов на диаграммах для случая ярких (а) и слабых (б) семейств. Объекты, которые обведены кружками, мы считаем «подозрительными» (вероятнее всего, неправдоподобными) сопоставлениями и отмечаем их специальными флагами.

Мы проанализировали положения объектов, оставшихся после первой фильтрации, на пяти диаграммах «цвет – цвет»: $(z - Y, Y - J)$, $(r - i, Y - J)$, $(Y - J, J - H)$, $(r - i, i - z)$, $(i - z, z - Y)$ на предмет выбросов для каждого семейства по отдельности.

На рис. 4 представлен пример таких выбросов на диаграмме $(Y - J, J - H)$ для объектов яркого и слабого семейств. Кружками выделены объекты, которые мы считаем выбросами и, следовательно, неправильными отождествлениями. Каждый объект, отнесенный к выбросам на какой-либо диаграмме, получил соответствующий флаг (для каждой диаграммы свой)². Список, размеченный

²По числу диаграмм максимальное количество флагов равно 5.

флагами, в дальнейшем может стать основой отдельного исследования, например, в тех случаях, когда объект является выбросом только на одной из диаграмм, а на остальных проявляет себя так же, как другие коричневые карлики. Исследование таких объектов мы выносим за рамки данной работы.

Таким образом, сопоставление, отмеченное хотя бы одним флагом, считалось на данный момент неудачным и не учитывалось в дальнейшей работе. Всего после анализа пяти цветковых диаграмм у нас осталось 56 объектов из обзора DES, соответствующих объектам из K2021, из которых 33 слабых, 18 ярких и 5 транзитных.

4. ФОТОМЕТРИЧЕСКИЕ ПРАВИЛА

Мы исключили выпадающие точки на всех диаграммах и, чтобы получить фотометрические

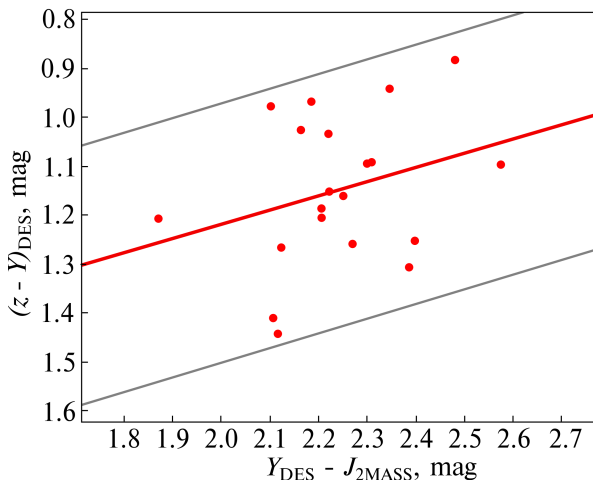


Рис. 5. Пример фотометрического правила для поиска коричневых карликов слабого семейства в данных DES и 2MASS. Прямыми определяется область с «надежными» кандидатами (подробнее см. в тексте).

правила для поиска коричневых карликов в трех обзорах, описали все области в пространстве параметров «цвет — цвет»: $(J - H, H - K)$, $(H - K, K - W1)$, $(K - W1, W1 - W2)$, $(r - i, i - z)$, $(i - z, z - Y)$, $(z - Y, Y - J)$, $(r - i, Y - J)$, $(Y - J, J - H)$. Каждое правило представляет из себя набор прямых (вертикальных, горизонтальных и наклонных), ограничивающих область, в которой на диаграмме находятся объекты.

На рис. 5 показан пример такого фотометрического правила. Так как на предыдущем этапе мы убрали все объекты, которые посчитали ненадежными, то прямые проводятся таким образом, чтобы все объекты, для которых можно вычислить соответствующие показатели цвета, попадали внутрь области. Угол наклона границ области определяется линейной аппроксимацией показателей цвета. Если угол наклона $k < 0.1$, то мы считаем, что линейную аппроксимацию проводить нецелесообразно, и ограничиваем область только горизонтальными и вертикальными линиями. В таблице 1 приведен весь список полученных правил.

5. ПОИСК КОРИЧНЕВЫХ КАРЛИКОВ И СРАВНЕНИЕ С GAIADR3

Мы провели пробный поиск коричневых карликов в обзорах AllWISE, 2MASS и DES DR1. Сопоставив записи в обзорах в пределах радиуса $50''$, мы выбрали только те из них, которые подходят под разработанные нами правила.

Первичный поиск дал нам 174 записи, удовлетворяющие нашим условиям. Затем мы проверили координаты предположительно одного и того же

объекта в разных обзорах на предмет их соответствия собственному движению этого объекта. Было определено расстояние положений по координатам AllWISE от большого круга, проведенного через положения в DES и 2MASS, и отброшены все объекты, где это расстояние больше $1''$. Осталось 137 из 174 объектов. Затем мы сравнили расстояния точки DES от AllWISE и 2MASS. Расстояние до положения в AllWISE должно составлять от 0.2 до 0.35 расстояния от 2MASS (поскольку индивидуальные эпохи наблюдений в DES мы не знаем). Мы посмотрели, попадает ли положение AllWISE в этот интервал, взяв для позиционной точности 2MASS и AllWISE $1''$, а DES посчитав условно абсолютно точным. Это отбросило еще два объекта. В итоге — у нас 135 кандидатов, которые позиционно не противоречат гипотезе о собственном движении.

Для первичного анализа получившихся у нас объектов мы взяли кросс-сопоставление по координатам с радиусом $1''5$, представленное в архиве NOIRLab’s Astro Data Lab³. Такое сопоставление присутствует для 96 объектов из 135. Так как простое кросс-сопоставление по координатам может не дать хорошего результата, мы сравнили блески объектов в DES и их сопоставлений в Gaia (рис. 6a). Большинство объектов показывает хорошее согласие в блесках i_{DES} и G_{Gaia} . Видно, что расхождение тем больше, чем меньше блеск объекта в обоих обзорах. На рис. 6b представлено сопоставление расстояний между положениями объектов в DES и 2MASS и собственных движений из Gaia. Сравнимые величины в основном совпадают качественно, а с учетом средней разницы эпох обзоров, и количественно.

Мы также сравнили объекты, для которых нашлись и не нашлись сопоставления в Gaia, по величине собственного движения и блескам (рис. 7). Собственные движения в данном случае вычислены условно, исходя из расстояния положений в обзорах DES и 2MASS и средней разницы эпох в 15 лет. Как видно из распределения собственных движений, большие собственные движения не являются причиной, по которой для 39 объектов не нашлось данных в архиве Gaia. В отличие от собственных движений, блески объектов, для которых получено сопоставление в Gaia и такого сопоставления не найдено, значительно отличаются. Несмотря на некоторые исключения, блески «найденных» объектов в среднем ярче блесков остальных объектов. На этом основании мы делаем вывод о том, что глубины обзора Gaia может быть недостаточно для идентификации, по крайней мере, трети коричневых карликов.

³<https://datalab.noirlab.edu/gaia.php>

Таблица 1. Сводная таблица фотометрических правил для поиска коричневых карликов

Диаграмма	Яркие	Транзитные	Слабые
<i>JHK</i>	$-0.01 < (J - H) - (H - K) < 0.75$ $0.56 < (J - H) < 1.62$ $0.2 < (H - K) < 1.05$	$0.28 < (J - H) - 0.9(H - K) < 1.03$ $0.4 < (J - H) < 1.6$ $0 < (H - K) < 0.84$	$-0.9 < (J - H) < 1$ $-1.4 < (H - K) < 2.7$
<i>HKW1</i>	$0.05 < (H - K) - 0.42(K - W1) < 0.6$ $0.56 < (J - H) < 1.62$ $0.2 < (H - K) < 1.05$	$-0.42 < (H - K) - 0.78(K - W1) < 0.16$ $0.4 < (J - H) < 1.6$ $0 < (H - K) < 0.84$	$0.55 < (H - K) + 0.83(K - W1) < 2.15$ $-0.9 < (J - H) < 1$ $-1.4 < (H - K) < 2.7$
<i>KW1W2</i>	$-0.3 < (K - W1) - 1.62(W1 - W2) < 0.45$ $0.26 < (K - W1) < 1.24$ $0.17 < (W1 - W2) < 0.67$	$0.7 < (K - W1) + 0.44(W1 - W2) < 1.4$ $0.35 < (K - W1) < 1.15$ $0.33 < (W1 - W2) < 1.32$	$-0.75 < (K - W1) + 0.29(W1 - W2) < 3$ $-1.7 < (K - W1) < 2$ $0.7 < (W1 - W2) < 4.4$
<i>W1W2W3</i>	$0.18 < (W1 - W2) < 0.67$ $-0.44 < (W2 - W3) < 1.29$	$0.3 < (W1 - W2) < 1.32$ $0.54 < (W2 - W3) < 1.68$	$0.3 < (W1 - W2) - 0.46(W2 - W3) < 3.9$ $1.1 < (W1 - W2) < 4.7$ $0.7 < (W2 - W3) < 3.5$
<i>riz</i>	$0.01 < (r - i) - 0.69(i - z) < 1.4$ $1 < (r - i) < 2.65$ $1.2 < (i - z) < 2.25$	$2.05 < (r - i) < 4.45$ $2.15 < (i - z) < 3.05$	$-2.8 < (r - i) - 0.6(i - z) < 5.2$ $-0.2 < (r - i) < 7.4$ $0.3 < (i - z) < 4.45$
<i>izY</i>	$1.2 < (i - z) < 2.25$ $0.45 < (z - Y) < 0.7$	$2.15 < (i - z) < 3.05$ $0.57 < (z - Y) < 0.84$	$0.3 < (i - z) < 4.45$ $0.7 < (z - Y) < 1.55$
<i>zYJ</i>	$0.45 < (z - Y) < 0.7$ $1.86 < (Y - J) < 2.3$	$0.57 < (z - Y) < 0.84$ $1.85 < (Y - J) < 2.2$	$1.57 < (z - Y) + 0.29(Y - J) < 2.07$ $0.7 < (z - Y) < 1.55$ $1.8 < (Y - J) < 2.6$
<i>riYJ</i>	$1 < (r - i) < 2.65$ $1.86 < (Y - J) < 2.3$	$2.05 < (r - i) < 4.45$ $1.85 < (Y - J) < 2.2$	$-0.2 < (r - i) < 7.4$ $1.8 < (Y - J) < 2.6$
<i>YJH</i>	$1.4 < (Y - J) - 0.46(J - H) < 1.8$ $1.86 < (Y - J) < 2.3$ $0.56 < (J - H) < 1.62$	$1.85 < (Y - J) < 2.2$ $0.4 < (J - H) < 1.6$	$2 < (Y - J) + 0.31(J - H) < 2.55$ $1.8 < (Y - J) < 2.6$ $-0.9 < (J - H) < 1$

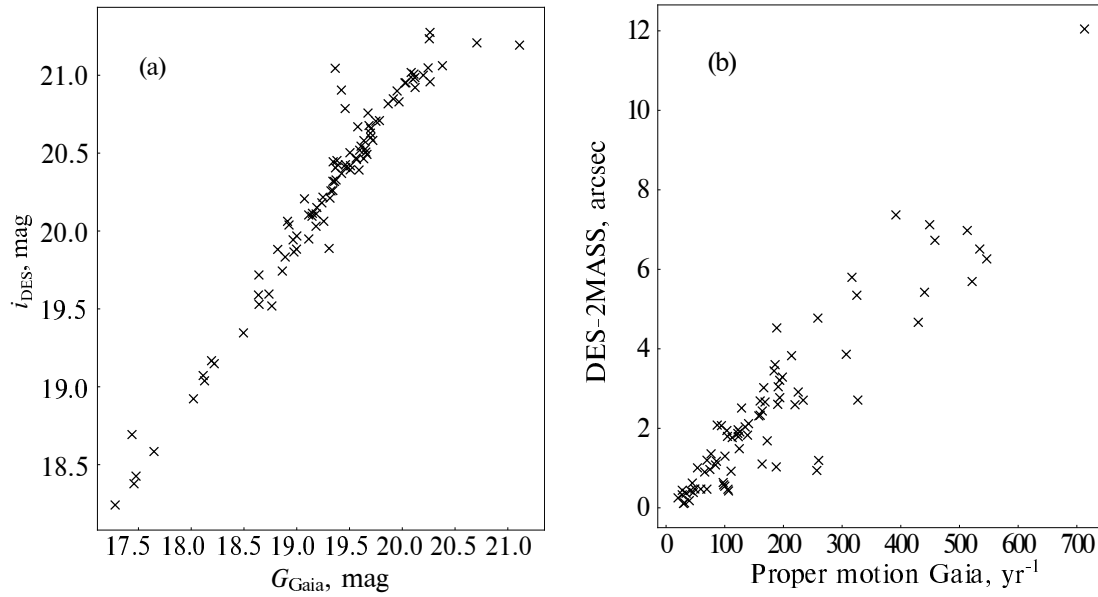


Рис. 6. Сравнение данных потенциальных коричневых карликов и отождествления с Gaia: фотометрия (a) и собственное движение (b).

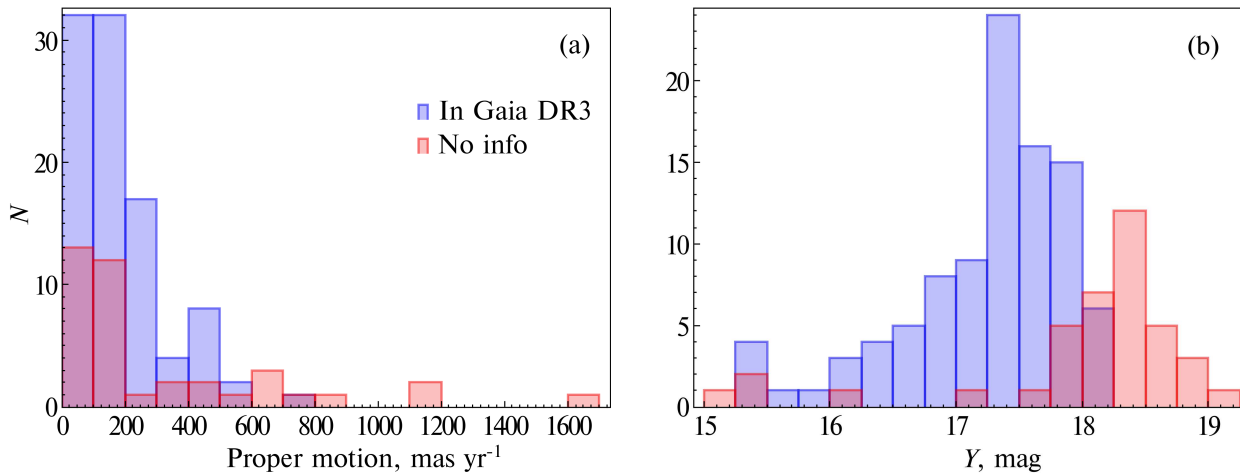


Рис. 7. Распределения для объектов, имеющих и отсутствующих в архиве Gaia: по собственным движениям, вычисленным по расстоянию между положениями в обзорах DES и 2MASS, и блескам согласно данным DES, панели (a) и (b) соответственно.

6. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данной статье представлены разработка фотометрических правил для поиска коричневых карликов в обзорах WISE, 2MASS и DES и первичный поиск, основанный на этих правилах. Для того чтобы разработать фотометрические правила, предварительно было проведено кросс-отождествление переписи коричневых карликов в ближайших 20 пк (K2021) с обзором DES. Фотометрические правила были разработаны для трех семейств коричневых карликов: слабых, транзитных и ярких, в соответствии с их фотометрическими проявлениями.

По разработанным правилам был проведен пробный поиск коричневых карликов в трех обзорах с учетом выполнения всех правил. Для 96 из 135 объектов, удовлетворяющих нашим критериям, в радиусе $1''5$ нашлось сопоставление из каталога Gaia DR3. Собственные движения наших объектов, вычисленные исходя из разности положений в обзорах 2MASS и DES, качественно и количественно совпадают с измерениями Gaia. Еще 39 объектов, для которых не нашлось сопоставления в Gaia, по-видимому, являются слишком слабыми для этого обзора. Таким образом, данных только одной миссии Gaia не будет достаточно для

того, чтобы обнаружить все близкие коричневые карлики.

БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы благодарны рецензенту за внимательное прочтение работы и сделанные замечания.

ФИНАНСИРОВАНИЕ

Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации в рамках гранта № 075-15-2022-1228 (13.2251.21.0177).

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. T. M. C. Abbott, F. B. Abdalla, S. Allam, et al., *Astrophys. J. Suppl.* **239** (2), article id. 18 (2018).
2. B. Burningham, C. V. Cardoso, L. Smith, et al., *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **433** (1), 457 (2013).
3. A. Carnero Rosell, B. Santiago, M. dal Ponte, et al., *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **489** (4), 5301 (2019).
4. R. M. Cutri, E. L. Wright, T. Conrow, et al., *VizieR Online Data Catalog II/328* (2021).
5. C. Hayashi and T. Nakano, *Progress of Theoretical Physics* **30** (4), 460 (1963).
6. J. D. Kirkpatrick, C. R. Gelino, J. K. Faherty, et al., *Astrophys. J. Suppl.* **253** (1), id. 7 (2021).
7. S. S. Kumar, *Astrophys. J.* **137**, 1121 (1963).
8. K. L. Luhman, *Astrophys. J.* **767** (1), article id. L1 (2013).
9. F. Marocco, P. R. M. Eisenhardt, J. W. Fowler, et al., *Astrophys. J. Suppl.* **253** (1), id. 8 (2021).
10. R. Rebolo, M. R. Zapatero Osorio, and E. L. Martín, *Nature* **377** (6545), 129 (1995).
11. J. Robert, J. Gagné, É. Artigau, et al., *Astrophys. J.* **830** (2), article id. 144 (2016).
12. M. F. Skrutskie, R. M. Cutri, R. Stiening, et al., *Astron. J.* **131** (2), 1163 (2006).
13. N. Skrzypek, S. J. Warren, and J. K. Faherty, *Astron. and Astrophys.* **589**, id. A49 (2016).
14. J. M. Vos, K. Allers, D. Apai, et al., *Bull. Amer. Astron. Soc.* **51** (3), id. 253 (2019).

Searching for Brown Dwarfs in Large Photometric Surveys: WISE, 2MASS, and DES

A. S. Avdeeva^{1,2}, S. V. Karpov^{3,4} and O. Yu. Malkov¹

¹Institute of Astronomy Russian Academy of Sciences, Moscow, 119017 Russia

²National Research University "Higher School of Economics", Moscow, 101000 Russia

³Special Astrophysical Observatory, Russian Academy of Sciences, Nizhnij Arkhyz, 369167 Russia

⁴Central European Institute for Cosmology and Fundamental Physics, Institute of Physics, Czech Academy of Sciences, Prague, 18221 Czech Republic

Homogeneous and complete samples of brown dwarfs are needed for various kinds of studies: kinematic studies of the Galaxy, studies of binary stars with brown dwarfs, refinement of the low-mass end of the initial mass function, etc. According to various estimates, brown dwarfs can make up to 25% of the population of the Galaxy; however, the discovery of brown dwarfs with spectroscopic methods is extremely labor-intensive. In this paper, we present the cross-identification of the known nearest brown dwarfs from the 2021 list with the DES optical survey and the creation of photometric rules based on the detection of brown dwarfs in three surveys: WISE, 2MASS, and DES. Moreover, we present different photometric rules for each of the three families of brown dwarfs: bright, transit, and faint. No such division has been made yet.

Keywords: (*stars*): *brown dwarfs—surveys—methods: data analysis*