

СПЕКТРОСКОПИЯ И КИНЕМАТИКА V1117 Her - ВЫСОКОШИРОТНОЙ ЗВЕЗДЫ ТИПА UX Ori

И.С.ПОТРАВНОВ, М.В.ЕСЕЛЕВИЧ

Поступила 26 марта 2020

Принята к печати 26 августа 2020

В работе обсуждаются результаты, полученные на основе исследования спектров низкого разрешения и кинематики звезды V1117 Her, расположенной на высокой галактической широте $b = +33^\circ.8$. Показано, что звезда обладает фотосферным спектром класса A7 IV, светимостью $L \approx 26 L_\odot$ и спектральными признаками аккреционной активности. Это подтверждает ее прежнюю классификацию как молодой Ae звезды Хербига, демонстрирующей фотометрическую переменность типа UX Ori. Вместе с тем, параллакс V1117 Her в каталоге GAIA DR2 соответствует расстоянию до нее $D \approx 1.4$ кпк, что означает возвышение звезды над плоскостью Галактики $Z \approx 800$ пк. При этом кинематика звезды указывает на ее более вероятное формирование *in situ*, вне плоскости молодого диска. Кратко обсуждается возможный сценарий образования V1117 Her.

Ключевые слова: *V1117 Her: спектроскопия: кинематика: звезда типа UX Ori*

1. *Введение.* Фотометрическая переменность звезды V1117 Her была открыта Л.П.Церасской на Астрономической обсерватории Московского университета в мае 1929г., о чем в печати было сообщено директором обсерватории Блажко [1]. Характер переменности V1117 Her был установлен уже в наше время [2]. На основе архивной фотометрии, охватывающей промежуток времени порядка 14 лет, авторами [2] было показано, что звезда испытывает глубокие квазипериодические ослабления блеска с максимальной амплитудой $\Delta V \approx 2^m.78$. Цветовое поведение звезды во время ослаблений блеска указывает на то, что причиной фотометрической переменности V1117 Her являются затмения пылевыми структурами. Спектральный класс A8-A9, эмиссия в линии H α и инфракрасный избыток, свидетельствующий о наличии околозвездного диска, также послужили аргументами в пользу классификации V1117 Her как молодой переменной типа UX Ori [2].

Подгруппа звезд типа UX Ori (UXORы) включает в основном звезды Ae/Be Хербига и T Тельца, находящиеся на стадии эволюции до Главной Последовательности (ГП) и окруженные протопланетными дисками, которые наклонены под небольшими углами к лучу зрения (т.е. наблюдаются практически с ребра). Такая ориентация приводит к эффекту переменного экранирования звезды неоднородностями во внутреннем газопылевом диске,

что в свою очередь выражается в сильной фотометрической активности (см. [3,4] и ссылки там). Имея возраст в среднем менее 10 млн. лет, UXORы принадлежат к молодой популяции тонкого диска Галактики с вертикальным масштабом $Z_0 \approx 100$ пк в окрестности Солнца. Для земного наблюдателя это означает, что большинство звезд типа UX Ori будут располагаться в диапазоне галактических широт $|b| \leq 20^\circ$. Это подтверждается, например, статистикой распределения по небесной сфере родоначальников группы - звезд Ae/Be Хербига [5].

V1117 Her лежит на галактической широте $b = +33^\circ.8$, изолированно от активных в настоящий момент областей звездообразования и молодых ассоциаций. Такое положение звезды может быть объяснено в рамках трех возможностей: 1) ошибочной классификации V1117 Her как молодой звезды типа UX Ori; 2) текущее положение V1117 Her является следствием ее кинематической эволюции после рождения в какой-либо низкоширотной ассоциации; 3) звезда сформировалась *in situ*, высоко над плоскостью Галактики. Последний сценарий представляет особенный интерес, поскольку до сих пор нет достоверных наблюдательных подтверждений возможности звездообразования вне системы гигантских молекулярных облаков тонкого диска Галактики (см. обзор проблемы в [6]). В работе [2] авторы рассмотрели возможность происхождения V1117 Her в одной из близких низкоширотных областей звездообразования в созвездиях Змеи (Serpens) или Орла (Aquila). Однако они были ограничены отсутствием надежного расстояния до звезды. Мы использовали новые данные астрометрического каталога GAIA DR2 в сочетании с оригинальными спектральными наблюдениями и архивной фотометрией для нового подхода к вопросу о классификации V1117 Her, исследованию ее кинематики и происхождения.

2. Спектроскопия V1117 Her. V1117 Her наблюдалась нами дважды: 18.07.2017 и 03.04.2019 на Саянской солнечной обсерватории ИСЗФ СО РАН с помощью 1.6-м телескопа АЗТ 33-ИК и спектрографа низкого разрешения ADAM [7,8]. Технические детали наблюдений приводятся в табл.1.

Таблица 1

ЖУРНАЛ НАБЛЮДЕНИЙ V1117 Her НА САЯНСКОЙ СОЛНЕЧНОЙ ОБСЕРВАТОРИИ ИСЗФ СО РАН

Дата	Гризма	Спектральный диапазон, Å	Ширина щели угл. с	Разрешение $\lambda/\Delta\lambda$	Суммарная экспозиция, с
18.07.2017	VPHG600G	3900-7200	1.5	~1100	600
03.04.2019	VPHG600G	3900-7200	2.0	~900	1200

Каждую ночь получались калибровочные кадры нулевого тока (bias), кадры плоского поля и спектр сравнения Ne-Ag лампы для построения шкалы длин волн. В ночь 03.04.2019 с той же конфигурацией прибора и на близком зенитном расстоянии дополнительно были проведены наблюдения спектрофотометрического стандарта Feige 98. Первичная обработка изображений выполнялась с помощью стандартной методики и инструментов пакета IRAF. Экстракция одномерного спектра и его привязка к шкале длин волн были осуществлены с помощью процедур модуля *longslit*. Спектр Feige 98 был использован для калибровки спектра V1117 Her в единицах абсолютного потока. При осуществлении калибровки кривая спектральной чувствительности была также скорректирована за атмосферную экстинкцию.

При низком разрешении наиболее характерными деталями спектра V1117 Her являются линии бальмеровской серии водорода, указывающие на спектральный класс A. В отличие от остальных членов серии, в линии $H\alpha$ на фоне фотосферных крыльев наблюдается эмиссионное ядро. Его эквивалентная ширина составила согласно нашим измерениям $EW = -5.5 \text{ \AA}$ и $EW = -6.45 \text{ \AA}$ на спектрах за 18.07.2017 и 03.04.2019, соответственно. Примечательной особенностью спектра полученного 18.07.2017 стала слабая абсорбционная деталь с коротковолновой стороны от резонансного дублета NaI D, вероятно соответствующая линии HeI $5876 \text{ \AA}$.

Для прояснения этого вопроса мы дополнительно исследовали спектр несколько большего разрешения ($R \sim 1800$), полученный из архива DR4 обзора LAMOST [9,10] и охватывающий диапазон длин волн $\sim 3900\text{-}9000 \text{ \AA}$

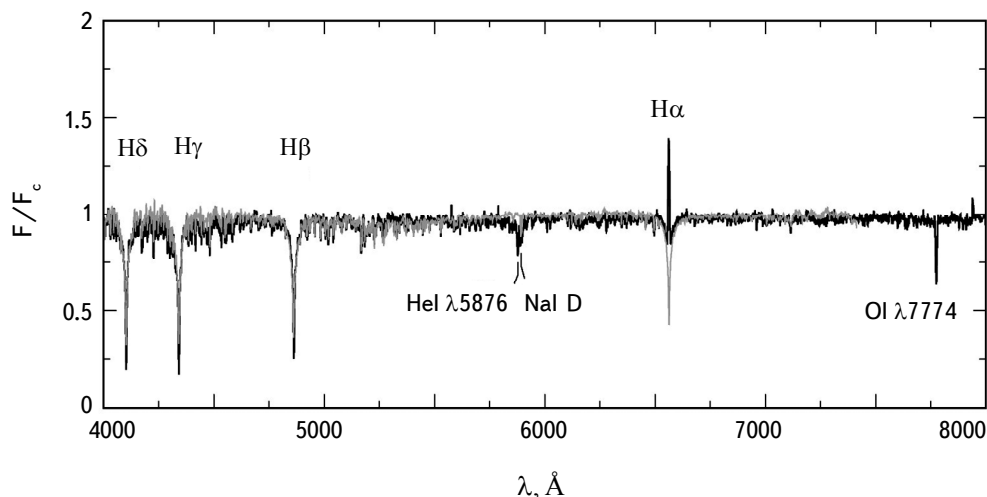


Рис.1. Участок спектра V1117 Her низкого разрешения по данным LAMOST DR4 [9,10]. Серой линией показан спектр звезды A7V из библиотеки MILES [12]. На рисунке отмечена идентификация основных линий.

(рис.1). Сравнение его со спектрами стандартов из атласа Пиклса [11] и библиотеки MILES [12] позволило точнее определить спектральный класс V1117 Her как $\sim A7$, в согласии с предыдущей температурной классификацией [2]. Такие индикаторы светимости [13], как: 1) крылья водородных линий, 2) интенсивность FeII-TiII "леса" в области 4400-4600 Å и 3) форма спектра в районе высших членов серии Пашена явно указывают на принадлежность V1117 Her к IV классу светимости. Заподозренная нами линия поглощения HeI 5876 Å отчетливо наблюдается на данном спектре, также как и заметная абсорбция OI 7774 Å, принадлежащая неразрешаемому триплету кислорода. Обе эти линии не характерны для A звезд ГП, вместе с тем они часто наблюдаются в спектрах Ae звезд Хербига и являются индикаторами аккреционной активности молодых звезд [14,15].

Гелиоцентрическая лучевая скорость V1117 Her была измерена кросс-корреляцией наблюдаемых спектров со спектром стандарта в диапазоне 4000-5500 Å. Среднее значение по двум Саянским спектрам составило $RV = -7 \pm 4$ км/с и в пределах ошибки совпадает с величиной $RV = -8.2$ км/с, приводимой в каталоге LAMOST DR4 [9,10].

3. Спектральное распределение энергии и параметры V1117 Her.

С учетом известного расстояния до звезды (см. разд.4) можно получить оценку ее светимости из спектрального распределения энергии (SED). Оно было построено нами (рис.2) в диапазоне 0.15-22 μm на основе архивных данных фотометрии и воспроизводит аналогичный график в работе Кун и др. [2]. Согласно трехмерной карте распределения поглощающей материи в Галактике [16], межзвездное покраснение в направлении V1117 Her невелико: $E(B-V) = 0.06$. В этом случае поглощение составляет $A_v = 0^m.19$ при использовании стандартного закона $R_v = 3.1$. Наблюдаемые точки SED были скорректированы на основе этого значения, используя кривую межзвездной экстинкции [17]. Как видно из рис.2, в ближнем ультрафиолетовом и оптическом диапазонах наблюдаемые точки хорошо аппроксимируются фотосферным спектром из сетки моделей MARCS [18] с параметрами $T_{eff} = 7250$ K, $\log g = 4.0$ и солнечным химическим составом. Небольшие остаточные различия могут быть объяснены фотометрической переменностью звезды и несинхронностью наблюдений, использованных при построении SED. На длинах волн $\lambda > 1.5 \mu m$ характерной деталью SED является ИК избыток, который прослеживается до доступной нам границы - полосы W4 (22 μm). Интегрирование SED в диапазоне 0.15-22 μm дает значение полного наблюдаемого потока $F_{obs} = 4.13 \cdot 10^{-10}$ эрг см⁻² с⁻¹, что с учетом расстояния в 1417 пк приводит к полной светимости системы "звезда+диск" $L_{tot} \approx 25.8 L_{\odot}$. Вклад инфракрасного избытка в полную светимость составляет $L_{IR}/L_{tot} = 0.3$,

т.е. порядка 30%. Полученное значение светимости подтверждает спектральную классификацию V1117 Her как субгиганта. Светимость звезды, как и величина ее ИК избытка типичны для молодых звезд Ae Херbiga с аккреционными дисками [19,20].

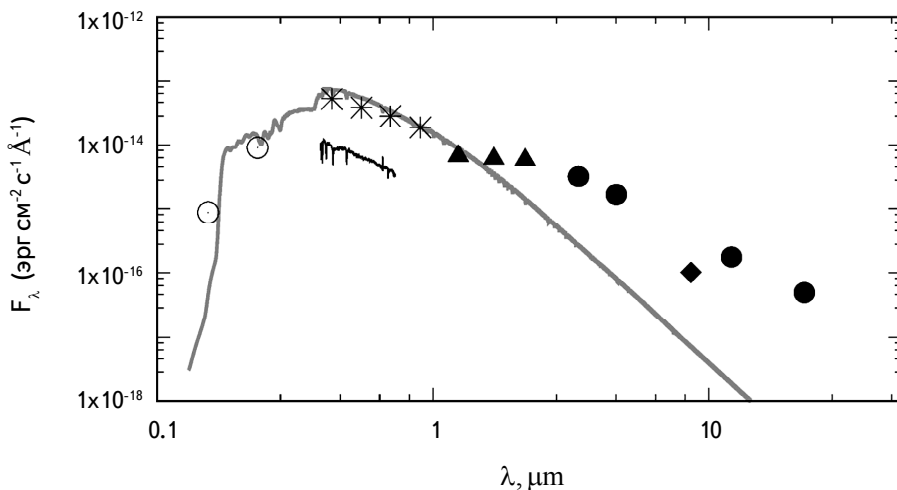


Рис.2. Спектральное распределение энергии V1117 Her. Символами показаны данные фотометрии: в FUV и NUV фильтрах GALEX (открытые кружки) [21], *BVRI* (звездочки) по данным [2], *JHK* 2MASS (треугольники) [22], WISE 3.4, 4.6, 12, 22 μm (черные кружки) [23], AKARI S9W (ромбик) [24]. Серой линией показан модельный спектр $T_{\text{eff}} = 7250 \text{ K}$, $\log g = 4.0$, приведенный к расстоянию 1417 пк. Черная линия соответствует оптическому спектру, полученному на Саянской обсерватории 03.04.2019 во время фотометрического минимума звезды и скорректированному за межзвездное поглощение $A_v = 0^{\text{m}}.19$. Оси приводятся в логарифмическом масштабе.

Обращает на себя внимание то обстоятельство, что прокалиброванный в абсолютных потоках оптический спектр V1117 Her за 03.04.2019 на рис.2 лежит заметно ниже *BVRI* фотометрии, полученной вблизи яркого состояния звезды. Отношение потоков на центральной длине волны фильтра *V* (5500 $\text{\AA}$) составляет $F_{\text{phot}}/F_{\text{spec}} = 5.96$, что соответствует разности звездных величин $\Delta m = 1^{\text{m}}.9$. Отсюда легко определить, что спектральные наблюдения звезды были получены при блеске $V \approx 14^{\text{m}}.4$, т.е. вблизи минимума. Это подтверждается фотометрией AAVSO, согласно которой в ночь 29.03.2019, ближайшую в архиве к дате наших спектральных наблюдений, блеск V1117 Her составлял $V \approx 14^{\text{m}}.8$. Таким образом, рост эмиссии в линии $\text{H}\alpha$ наблюдавшийся 03.04.2019 можно объяснить т.н. коронографическим эффектом, характерным для звезд типа UX Ori [25]. Примечательно также, что для приведения спектра, полученного в минимуме блеска, к яркому состоянию требуется нейтральный сдвиг, т.е. без дополнительной коррекции за околозвездное покраснение. Возможное объяснение состоит в том, что затмение было вызвано достаточно крупной пылью.

Хотя данные о цветовом поведении звезды во время затмений ограничены, и этот вопрос заслуживает более полного исследования с помощью многоцветного фотометрического мониторинга.

4. *Кинематика.* Астрометрические параметры V1117 Her были получены нами из каталога GAIA DR2 [26,27]. Согласно этим данным параллакс звезды равняется $\pi = 0.706 \pm 0.035$ мсд, что соответствует расстоянию $D = 1416.5^{+74}_{-67}$ пк. Собственные движения V1117 Her по прямому восхождению и склонению составляют $\mu_\alpha = -5.73 \pm 0.046$ мсд/год и $\mu_\delta = -6.82 \pm 0.040$ мсд/год, соответственно. Использование данных GAIA для определения расстояний до индивидуальных объектов требует критического подхода и анализа достоверности имеющегося астрометрического решения. В частности, молодые звезды зачастую обладают комплексным околозвездным окружением, влияющим на их фотометрический профиль и, как следствие, точность позиционирования при астрометрических наблюдениях. Способ, рекомендованный научной группой GAIA, состоит в использовании критерия RUWE, характеризующего качество аппроксимации наблюдательных данных принятой астрометрической моделью [28]. Значение $RUWE < 1.4$ говорит о надежности решения. Для V1117 Her $RUWE = 1.1$, что подтверждает значимость приводимой в каталоге величины параллакса.

На основе шести астрометрических параметров: координат, собственных движений, параллакса и лучевой скорости можно вычислить UVW компоненты вектора скорости звезды, обычно используемые для анализа звездной кинематики. Компоненты скорости рассчитываются в гелиоцентрической прямоугольной системе координат, где ось U направлена на центр Галактики, ось V положительна в направлении галактического вращения, а ось W направлена на северный галактический полюс. Поскольку V1117 Her находится не в ближайшей околосолнечной окрестности, а удалена на расстояние порядка 1.5 кпк, то для приведения скоростей к местному стандарту покоя (LSR) помимо пекулярного движения Солнца необходимо учитывать также и дифференциальное вращение Галактики. Для этого мы воспользовались линейной моделью Оорта. Соответственно, лучевая скорость и собственные движения, предварительно переведенные в галактические координаты, корректировались согласно следующим формулам (см., например [29]):

$$\begin{aligned} RV &= RV_{obs} - AD \sin 2l \cos^2 b \\ \mu_l &= \mu_{l_{obs}} - (A \cos 2l + B) \cos b / k \\ \mu_b &= \mu_{b_{obs}} - A \sin 2b \sin 2l / 2k. \end{aligned}$$

Здесь l и b - галактические долгота и широта, соответственно; D - расстояние до звезды, $A = 16.29$ км с⁻¹ кпк⁻¹ и $B = -11.9$ км с⁻¹ кпк⁻¹ - постоянные Оорта,

значения которых приводятся согласно [30]; $k=4.74$ - множитель перехода от углового перемещения к линейной скорости. Нижний индекс *obs* означает наблюдаемое значение параметра.

UVW компоненты вектора скорости вычисляются согласно формулам, известным в звездной астрономии:

$$U = RV \cos l \cos b - V_l \sin l - V_b \cos l \sin b$$

$$V = RV \sin l \cos b + V_l \cos l - V_b \sin l \sin b$$

$$W = RV \sin b + V_b \cos b,$$

где $V_l = kD\mu_l$ и $V_b = kD\mu_b$, а D имеет размерность кпк. Ошибки могут быть оценены согласно методике [31]. Полученные значения необходимо также скорректировать за пекулярную скорость Солнца $(U, V, W)_\odot = (11.1, 12.2, 7.3)$ км/с [32].

В результате, компоненты скорости V1117 Her составляют $(U, V, W)_{\text{LSR}} = (10 \pm 2.4, -50.5 \pm 3.8, 15.4 \pm 2.1)$ км/с. Как видно, в скорости звезды относительно местного центроида доминирует вращательная V компонента, что характерно для населения диска. При этом, величина полной скорости $V_{\text{tot}} = (U^2 + V^2 + W^2)^{1/2} = 53.7$ км/с согласно статистическому критерию [33] является пограничной между тонким и толстым диском. Это согласуется с текущим удалением V1117 Her от плоскости Млечного Пути, которое составляет $Z = D \sin b + Z_\odot = 804$ пк, где $Z_\odot = 16$ пк [34] - возвышение Солнца к северу от галактической плоскости. Текущее значение V_{tot} также заведомо меньше пекулярной скорости в несколько сотен км/с, которая позволила бы отнести V1117 Her к т.н. "звездам-беглецам" [35].

Тем не менее, необходимо рассмотреть возможность того, что звезда, движущаяся по баллистической траектории после выброса из низкоширотной ассоциации, находится вблизи апоцентра своей орбиты и потеряла значительную часть начальной скорости V_{init} . Для этого мы выполнили расчет движения V1117 Her в гравитационном потенциале Галактики с помощью интегратора *GalPy* [36], используя в качестве начальных параметров текущие значения координат и скорости звезды. Его результат показывает, что пересечение орбиты V1117 Her с галактическим экватором ($b=0^\circ$) произошло 18.5 млн. лет назад. Если предположить рождение звезды где-то в плоскости Галактики, то приводимая выше величина является оценкой ее кинематического возраста. Начальное значение полной скорости в этом случае составляло бы $V_{\text{init}} = 148$ км/с.

5. Обсуждение и заключительные замечания. Согласно новым данным GAIA DR2, V1117 Her удалена от Солнца на 1.4 кпк, что означает ее возвышение над плоскостью Галактики на 804 пк - величину не характерную в окрестностях Солнца для звезд на стадии эволюции до ГП. Вместе с тем, наша оценка полной светимости системы "звезда+диск" $L_{\text{tot}} \approx 25.8 L_\odot$, величина

ИК избытка $L_{\text{IR}}/L_{\text{tot}} = 0.3$, а также дополнительно обнаруженные спектральные признаки аккреции подтверждают прежнюю классификацию [2] V1117 Her как Ae звезды Хербига. Эти два результата вступают в противоречие в рамках современной парадигмы звездообразования исключительно в низкоширотных молекулярных облаках, ассоциированных с плоскостью Млечного Пути или Поясом Гулда.

Исходя из кинематики V1117 Her, одно из возможных объяснений состоит в том, что после рождения где-то в галактической плоскости звезда получила достаточно большую начальную скорость $V_{\text{init}} = 148 \text{ км/с}$. Эта скорость позволила бы ей за время порядка 18.5 млн. лет добраться до своего текущего местоположения. Два основных механизма приобретения больших начальных скоростей звездами-беглецами состоят в их выбросе из двойной системы либо в результате взрыва одного из компонентов как сверхновой [35], либо динамического взаимодействия в плотном окружении молодого скопления [37]. В рамках сценария со сверхновой практически невозможно объяснить существование вокруг V1117 Her аккреционного диска, который в случае близкой вспышки должен был бы практически сразу исчезнуть в результате фотоиспарения. К тому же, начальная скорость компонента, покидающего в этом случае систему, составляет порядка 300–400 км/с [38], что превосходит полученную нами для V1117 Her оценку V_{init} . В сценарии динамического выброса ограничения на начальные скорости мягче: $\sim 100\text{--}200 \text{ км/с}$ [39]. Однако достаточно эффективен этот механизм лишь в плотных центральных областях молодых скоплений, состоящих из нескольких десятков звезд ранних спектральных классов, включая двойные и кратные системы. Исходя из этого, местом рождения V1117 Her могло бы быть гравитационно-связанное звездное скопление возрастом порядка 20 млн. лет. Однако безотносительно механизма начального ускорения и вопроса выживаемости диска, сама по себе оценка кинематического возраста звезды почти в два раза превосходит характерное время затухания активной аккреции у Ae/Be звезд Хербига [40]. В то же время аккреционные признаки отчетливо наблюдаются в спектре V1117 Her. Это служит весомым аргументом против предположения о рождении V1117 Her в плоскости Галактики и, как следствие, оценки ее кинематического возраста, приводимой выше. Более естественным предположением является то, что звезда сформировалась *in situ*, высоко над плоскостью диска, несколько миллионов лет назад, а ее текущая кинематика отражает кинематику родительского облака изначально находившегося вне молодого тонкого диска.

V1117 Her располагается в проекции на центральную область Галактики, за пределами ближайших к Солнцу и хорошо изученных областей звездообразования. Согласно "Новому списку ОВ ассоциаций" Мельник и Ефремова [41] по галактической долготе V1117 Her граничит с ОВ ассоциациями

в созвездиях Щита и Змеи: Sct OB3 и Ser OB2, располагающимися, однако, вблизи плоскости Млечного Пути на расстоянии в 1.3 кпк и 1.6 кпк, соответственно [42]. Пространственно V1117 Her оказывается сравнительно близка к ним, хотя сценарий непосредственного выброса звезды из низкоширотной ассоциации был выше оценен нами как маловероятный. Тем не менее, можно предположить, что активные процессы в этих ОБ ассоциациях, такие как вспышки сверхновых и интенсивные ветра от массивных звезд, все же могли оказать влияние на формирование V1117 Her. Примечательно, что в ассоциации Ser OB2 известен так называемый "дымоход" (chimney, spur), свидетельствующий о выбросе горячего ионизованного газа перпендикулярно к галактической плоскости на расстояние как минимум в 200 пк [43]. Такие "дымоходы" играют важную роль в поставке газа на большие высоты над молодым диском [44]. Возможно, что их энергетика и охлаждающийся газ могут порождать локальные эпизоды звездообразования, примером которого может быть и V1117 Her. Однако детальное обсуждение подобного сценария находится за рамками настоящей статьи.

Дальнейшее исследование вопроса происхождения V1117 Her является важным для лучшего понимания возможных форм и мест звездообразования в Галактике. В первую очередь необходимо получение спектров звезды высокого разрешения, что, учитывая блеск звезды, требует применения крупных телескопов. Также представляет большой интерес дополнительное исследование ассоциаций Ser OB2 и Sct OB3 с целью изучения влияния активных процессов в них на внешнее окружение и возможное стимулирование звездообразования на далекой периферии.

Работа выполнена при поддержке Гранта РФФИ №18-32-00501. Наблюдения на Саянской солнечной обсерватории осуществлены с использованием оборудования ЦКП "Ангара" и при поддержке базового финансирования программы ФНИ П.16.

Авторы благодарят рецензента О.Ю.Барсунову за внимательное прочтение рукописи и замечания, позволившие улучшить ее текст.

Институт солнечно-земной физики СО РАН, Иркутск,
e-mail: ilya.astro@gmail.com

SPECTROSCOPY AND KINEMATICS OF V1117 Her -
THE HIGH-LATITUDE UX Ori TYPE STAR

I.S.POTRAVNOV, M.V.ESELEVICH

We present results based on our studies of low-resolution spectra and kinematics of the star V1117 Her, which is located at the high galactic latitude $b=+33^{\circ}.8$. It was shown, that the star possesses A7 IV photospheric spectrum, luminosity $L \approx 26 L_{\odot}$ and spectral signatures of the accretion activity. This confirms its previous classification as young Ae Herbig star with UX Ori type photometric variability. However, the parallax of V1117 Her in GAIA DR2 catalogue corresponds to the distance of $D \approx 1.4$ kpc and its height above the Galactic plane is of about $Z \approx 800$ pc. The kinematics of the star indicates the most probable formation *in situ*, outside the plane of the young disk. Possible scenario of V1117 Her formation is briefly discussed.

Keywords: *V1117 Her: spectroscopy: kinematics: UX Ori type stars*

ЛИТЕРАТУРА

1. S.Blažko, Astron. Nachr., **236**, 279, 1929.
2. M.Kun, M.Racz, L.Szabados, IBVS, **6089**, 1, 2014.
3. V.P.Grinin, A&AT, **3**, 17, 1992.
4. V.Grinin, ASPC, **510**, 32, 2017.
5. S.L.A.Vieira, W.G.B.Corradi, S.H.P.Alencar et al., Astron. J., **126**, 2971, 2003.
6. P.M.McGehee, in: "Handbook of Star Forming Regions, Volume II: The Southern Sky", ed. B.Reipurth, ASP MP, 2008.
7. В.Л.Афанасьев, С.Н.Додонов, В.Р.Амирханян и др., Астрофиз. Бюлл., **71**, 514, 2016.
8. Р.А.Буренин, А.Л.Амвросов, М.В.Еселевич и др., Письма в Астрон. ж., **42**, 333, 2016.
9. G.Zhao, Y.-H.Zhao, Y.-Q.Chu et al., RAA, **12**, 723, 2012.
10. X.-Q.Cui, Y.-H.Zhao, Y.-Q.Chu et al., RAA, **12**, 1197, 2012.
11. A.J.Pickles, Publ. Astron. Soc. Pacif., **110**, 863, 1998.
12. J.Falcon-Barroso, P.Sanchez-Blazques, A.Vazdekis et al., Astron. Astrophys., **532**, 95F, 2011.
13. R.O.Gray, C.J.Corbally, "Stellar Spectral Classification", Princeton University Press, 2009.
14. J.Muzerolle, P.D'Alecio, N.Calvet et al., Astron. J., **617**, 406, 2004.

15. *J.Kwan, W.Fisher*, Mon. Not. Roy. Astron. Soc., **411**, 2383, 2011.
16. *G.M.Green, E.F.Schlafly, D.Finkbeiner et al.*, Mon. Not. Roy. Astron. Soc., **478**, 651, 2018.
17. *E.L.Fitzpatrick*, Publ. Astron. Soc. Pacif., **111**, 63, 1999.
18. *B.Gustaffson, B.Edwardsson, K.Eriksson et al.*, Astron. Astrophys., **486**, 951, 2008.
19. *F.Hamann, S.E.Persson*, Astron. J., **394**, 628, 1992.
20. *J.Hernandez, N.Calvet, C.Briceno et al.*, Astron. J., **127**, 1628, 2004.
21. *L.Bianchi, J.Herald, B.Efremova et al.*, Astrophys. J. Suppl. Ser., **335**, 161, 2011.
22. *R.M.Cutri, M.F.Skrutskie, S. van Dyc et al.*, 2MASS All-Sky Catalog of Point Sources, VizieR On-line Data Catalog: II/246, 2003.
23. *R.M.Cutri et al.*, VizieR Online Data Catalog: AllWISE Data Release, VizieR On-line Data Catalog: II/328, 2014.
24. *D.Ishihara, T.Onaka, H.Kataza et al.*, Astron. Astrophys., **514**, A1, 2010.
25. *V.P.Grinin, P.S.The, D. de Winter et al.*, Astron. Astrophys., **292**, 165, 1994.
26. *GAIA collaboration*, Astron. Astrophys., **595**, 36, 2016.
27. *GAIA collaboration*, Astron. Astrophys., **616**, 22, 2018.
28. *L.Lindgren*, Lund Observatory technical note, (<https://www.cosmos.esa.int/web/gaia/public-dpac-documents>), 2018.
29. *П.П.Паренаго*, "Курс звездной астрономии", ОГИЗ Гостехиздат, М., 1946.
30. *В.В.Вутязев, А.В.Попов, А.С.Цветков и др.*, Письма в Астрон. ж., **44**, 265, 2018.
31. *D.R.H.Johnson, D.Soderblom*, Astron. J., **93**, 864, 1987.
32. *R.Shonrich, J.Binney, W.Dehnen*, Mon. Not. Roy. Astron. Soc., **403**, 1829, 2010.
33. *P.E.Nissen*, in: "Origin and Evolution of the Elements, from the Carnegie Observatories Centennial Symposia", Eds. A.McWilliam, M.Rauch, p.154, 2004.
34. *В.В.Бобылев, А.Т.Байкова*, Письма в Астрон. ж., **42**, 3, 2016.
35. *A.Blaauw*, BAN, **15**, 265, 1961.
36. *J.Bovy*, Astrophys. J. Suppl., **216**, 29, 2015.
37. *A.Poveda, J.Ruiz, C.Allen*, BOTT, **4**, 86, 1967.
38. *R.Hoogerwerf, J.H.J. de Bruijne, P.T. de Zeeuw*, Astron. Astrophys., **365**, 49, 2001.
39. *P.J.T.Leonard, M.J.Duncan*, Astron. J., **99**, 608, 1990.
40. *I.Mendigutia, A.Mora, B.Montesinos et al.*, Astron. Astrophys., **543**, A59, 2012.
41. *А.М.Мельник, Ю.Н.Ефремов*, Письма в Астрон. ж., **21**, 13, 1996.
42. *А.М.Melnik, A.K.Dambis*, Mon. Not. Roy. Astron. Soc., **472**, 3887, 2017.
43. *D.Forbes*, Astron. J., **120**, 2594, 2000.
44. *M.A. de Avillez, D.L. Berry*, Mon. Not. Roy. Astron. Soc., **328**, 708, 2001.

