

УДК 524.38-14:[520.82+520.84+520.872]

ИССЛЕДОВАНИЕ ДВОЙНОЙ СИСТЕМЫ μ СЕТ СПЕКЛ-ИНТЕРФЕРОМЕТРИЧЕСКИМИ, ФОТОМЕТРИЧЕСКИМИ И СПЕКТРОСКОПИЧЕСКИМИ МЕТОДАМИ

© 2024 В. В. Дьяченко^{1*}, И. А. Якунин^{1**}, Р. М. Баязитов²,
С. А. Григорьев², Т. А. Рябчикова³, Ю. В. Пахомов³, Е. А. Семенко⁴,
А. С. Бескакотов¹, А. А. Митрофанова¹, А. Ф. Максимов¹, Ю. Ю. Балегга¹

¹Специальная астрофизическая обсерватория РАН, Нижний Архыз, 369167 Россия

²Казанский (Приволжский) федеральный университет, Казань, 420008 Россия

³Институт астрономии РАН, Москва, 119017 Россия

⁴Национальный институт астрономических исследований Таиланда, Чиангамай, 50180 Таиланд

Поступила в редакцию 31 марта 2024; после доработки 25 мая 2024; принята к публикации 13 июня 2024

В представленной работе на основе данных, полученных на 6-м телескопе САО РАН, уточнена спекл-интерферометрическая орбита двойной системы μ Сет, а также на основе анализа фотометрических и спектроскопических данных исследован главный компонент. Изначально объект классифицировался как гигант с аномалиями химического состава. В результате проведенного анализа нами сделан вывод о принадлежности звезды к главной последовательности (ГП), к классу непекулярных звезд. Анализ фотометрических данных миссии TESS свидетельствует о принадлежности главного компонента системы к пульсаторам типа γ Дог.

Ключевые слова: методики: высокое угловое разрешение — звезды: фундаментальные параметры — звезды: двойные и кратные — звезды: индивидуальные: HD 17094

1. ВВЕДЕНИЕ

Двойные звезды — естественный инструмент исследования физической эволюции звезд и измерения их масс как важнейшего из фундаментальных параметров. Системы, включающие объекты с выраженными особенностями — переменные, пекулярные, эволюционирующие, — уникальная лаборатория для надежного определения физического состояния, обуславливающего наблюдаемые проявления этих объектов. Среди близких пар нами был выделен ряд объектов, пригодных для исследования методом спекл-интерферометрии на 6-м телескопе САО РАН. Одним из них стала система μ Сет (HD 17094) — спекл-интерферометрическая двойная звезда, главный компонент которой заподозрен Науск (1971) в принадлежности к переменным типа δ Щита. При этом поздняя (Gray et al., 2003) классификация относит яркий компонент к гигантам спектрального класса A9 с усиленными линиями металлов.

Система μ Сет известна как спектрально-двойная типа SB1. Спектроскопическое орбитальное решение было опубликовано Abt (1965). Его период составляет 1202.2 дня или 3.29 года. Было отмечено, что полученная кривая может быть неверной. Позже Abt and Levy (1974) сообщили о вероятной постоянной лучевой скорости. Тем не менее эта звезда включена в 9-й Каталог спектроскопических двойных орбит SB9 (Pourbaix et al., 2004) с решением низкой достоверности.

Интерферометрически впервые она разрешена в 1982 году и получила обозначение TOK1 (Tokovinin, 1985). Ранее нами была построена предварительная орбита спекл-интерферометрической пары μ Сет (Dyachenko et al., 2019).

По оценке Gaia Collab. (2020), расстояние до звезды составляет 26 пк, звездная величина — $m_V = 4^m3$ (ESA, 1997). Близость звезды и ее яркость создают все условия для точного фотометрического и спектроскопического анализа, поскольку можно пренебречь межзвездным поглощением (Lallement et al., 2022) и получить спектры с высоким отношением S/N на спектрографах с

*E-mail: dyachenko@sao.ru

**E-mail: elias@sao.ru

высокой разрешающей силой $R = \lambda/\Delta\lambda$ (см. раздел 2.2). Однако в архивах спектральных наблюдений найден только один спектр высокого разрешения (спектр Elodie, $R = 42\,000$), но с низким $S/N = 88$.

В представленной работе мы построили орбиту двойной звезды μ Cet. Был оценен вклад вторичного (В) компонента в фотометрические наблюдения. Параметры атмосферы главного (А) компонента системы μ Cet — T_{eff} , $\lg g$, микротурбулентная скорость ξ_t , металличность $[M/H]$ и проекция скорости вращения на луч зрения $v \sin i$ — были уточнены по совместному анализу фотометрических и спектроскопических наблюдений. Получен верхний предел магнитного поля по поляризационным наблюдениям. В процессе детального спектроскопического анализа мы определили содержания 14 химических элементов, включая такие элементы, как Si, Cr, Sr, Eu, которые показывают аномалии содержания в пекулярных звездах. Получены оценки возраста μ Cet и масс компонентов системы.

2. НАБЛЮДЕНИЯ И ОБРАБОТКА ДАННЫХ

2.1. Спекл-интерферометрические наблюдения

Наблюдения методом спекл-интерферометрии (Labeuŕie, 1970) проводились на 6-м телескопе САО РАН в 2011–2023 годах. Мы использовали спекл-интерферометр (Maksimov et al., 2009) на базе EMCCD Andor iXon Ultra 897. Изображения записаны сериями по 2000 кадров с экспозициями по 20 мс. Применялись интерференционные фильтры (центральная длина волны/полуширина): 550/20, 550/50, 694/10 и 800/100 нм. Настоящая работа содержит неопубликованные ранее 19 серий, охватывающие 16 эпох наблюдений 2018–2023 годов.

Предварительная обработка и анализ серий выполнены методом подбора параметров в кольцевых областях спектра мощности (Balega et al., 2002; Pluzhnik, 2005; Obolentseva et al., 2021). Для каждой серии был получен набор позиционных параметров ρ , θ и определена разность блеска между компонентами Δm .

Изображения восстановлены методом биспектрального анализа (Lohmann et al., 1983). Пример восстановленного изображения приведен на рис. 1.

Предварительные оценки орбитальных параметров рассчитаны по методу Моне (Monet, 1977). Результирующие параметры получены программным пакетом на основе ORBIT (Tokovinin, 1992).

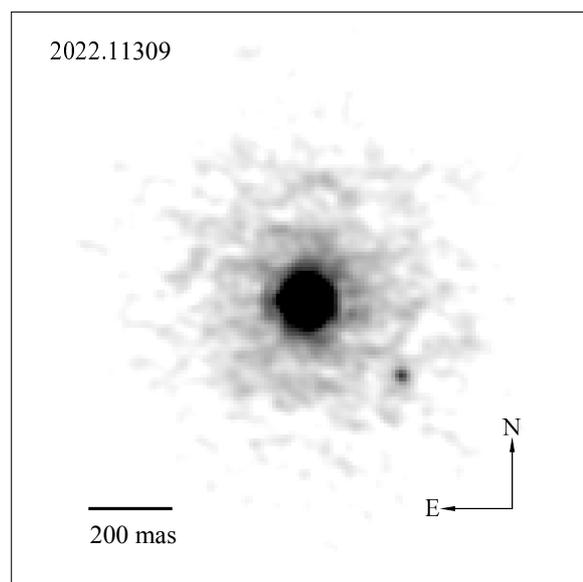


Рис. 1. Восстановленное методом биспектрального анализа изображение системы μ Cet. Эпоха 2022.11309, фильтр 550/50 нм.

2.2. Спектроскопические наблюдения

Для спектроскопического анализа использовался спектр μ Cet из открытого архива данных эшелле-спектрометра Elodie ($S/N = 88$, $R = 42\,000$, наблюдаемый диапазон 4000–6800 Å), полученный 25 сентября 1994 года на 193-см рефлекторе в Обсерватории Верхнего Прованса¹. Нормировка спектра на уровень континуума была проведена нами самостоятельно. При этом особое внимание уделялось областям, в которых лежат водородные линии $H\alpha$ и $H\beta$, поскольку они играют ключевую роль в определении параметров атмосферы звезды.

Для оценки магнитного поля использовались спектры круговой поляризации ($R = 15\,000$, $S/N = 150$), полученные на основном звездном спектрографе (ОЗСП)² 6-м телескопа БТА в Специальной астрофизической обсерватории 8 марта 2019 года в синем (4430–4987 Å) и красном (5860–6700 Å) фильтрах. Первичная обработка спектров проведена с помощью пакета программ ESO MIDAS (см. Kudryavtsev, 2000). Неполяризованный спектр звезды был получен путем суммирования спектров круговой поляризации.

2.3. Фотометрические данные миссии TESS

В ходе космической миссии TESS³ (Ricker et al., 2015) были получены фотометрические наблюде-

¹<http://atlas.obs-hp.fr/elodie/>

²MSS, <https://www.sao.ru/hq/lizm/mss/en/>

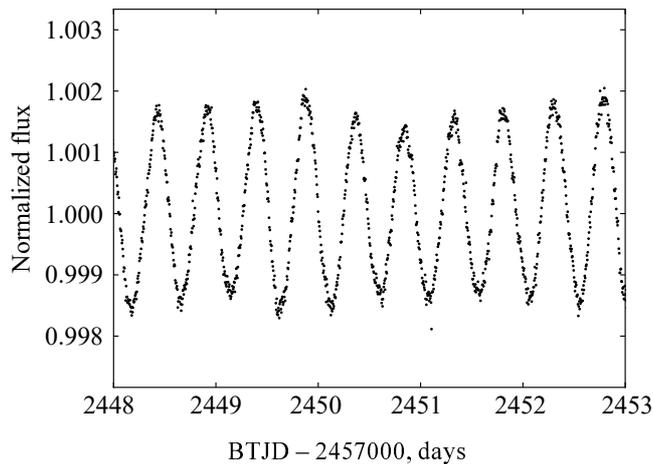


Рис. 2. Часть кривой блеска μ Cent по данным миссии TESS.

ния с двухминутной экспозицией более чем для 200 000 объектов из обоих полушарий (Stassun et al., 2018). Телескоп оснащен четырьмя камерами с полем зрения $24^\circ \times 24^\circ$, дающим эффективное поле зрения $24^\circ \times 96^\circ$ с масштабом $21''/\text{pixel}$. Каждый такой участок — сектор — наблюдается в течение 27.4 суток, причем каждые 13.7 суток наблюдения приостанавливаются на 16 часов для передачи информации на наземные станции. Затем процесс повторяется для следующего сектора. На каждое полушарие приходится 13 секторов и, таким образом, телескоп охватывает 85% всего неба за два года наблюдений. На телескопе установлен фильтр с полосой пропускания 600–1000 нм, с центральной длиной волны 786.5 нм, соответствующей полосе *I* в системе Казинса. Фотометрические данные по отдельным секторам представлены в виде Target Pixel Files (TPF) — изображений объекта, из которых методом SPOC⁴ (Jenkins et al., 2016) извлекаются три типа временных рядов наблюдений: SAP (Simple Amplitude Aperture) и PDCSAP (Pre-search Data Conditioning SAP) потоки, а также фоновый сигнал. Значения потоков SAP извлекаются из апертуры, подобранной так, чтобы оптимизировать отношение S/N , а затем исправляются с учетом измеренного фона. При таком подходе могут оставаться некоторые систематические эффекты, вносимые, например, вращением спутника. Такая систематика минимизирована в данных PDCSAP посредством Co-trending Basis Vectors (CBVs). В настоящей работе мы использовали значения потоков PDCSAP.

Система μ Cent наблюдалась телескопом TESS в

³Transiting Exoplanet Survey Satellite:
<https://exoplanets.nasa.gov/tess/>

⁴<https://archive.stsci.edu/hlsp/tess-spoc>

42, 43, 44 и 70 секторах с двухминутной экспозицией. Фрагмент кривой блеска сектора 42 показан на рис. 2. Мы проанализировали как каждый сектор отдельно, так и объединенные данные 42, 43, 44-го секторов и 42, 43, 44 и 70-го секторов. Измерение частот, амплитуд и фаз проводилось с помощью программы Period04 (Deeming, 1975; Kurtz, 1985), в основе которой лежит дискретное преобразование Фурье. Процесс извлечения продолжался до тех пор, пока выполнялось условие $S/N > 4$ (Bregier et al., 1993). Отметим, что есть и более сложные стоп-критерии (см., например, Van Reeth et al., 2015). Величина S/N на данной частоте определялась как отношение амплитуды пика на спектре мощности к среднему значению отсчетов в окне размером 1 сут^{-1} . Две частоты считались неразрешенными при условии $|\nu_i - \nu_j| < 2/T$, где T — временное окно наблюдений. Ошибки параметров вычислялись методом, изложенным в работе Montgomery and O'Donoghue (1999).

Результаты измерений частот приведены в таблицах 1–3. Жирным шрифтом во всех таблицах выделена частота 2.06 сут^{-1} ($P = 0.485$) с максимальным отношением S/N . Некоторые из частот, полученные по 42, 43, 44 и 70-му секторам, с одной стороны, могут не иметь физического смысла, но быть следствием сложной структуры спектрального окна. С другой стороны, при сравнении таблицы 3 с таблицами 1–2 видно, что все частоты, измеренные по секторам 42, 43, 44 (как по отдельности, так и вместе), были получены и при анализе объединенных данных секторов 42, 43, 44 и 70. Исключениями являются лишь частоты 2.1749 сут^{-1} по данным сектора 44. Справедливо полагать, что помимо 2.06 сут^{-1} у μ Cent наблюдается переменность и с другими периодичностями.

Периодограммы по объединенным секторам 42–44 и 70 до и после удаления доминирующей частоты показаны на рис. 3а и 3б соответственно. Также на рис. 3б серой линией отображен спектр мощности после извлечения всех частот с $S/N > 4$.

2.4. Архивные фотометрические данные

Для оценки светимости L/L_\odot μ Cent, радиуса R^A и эффективной температуры T_{eff}^A главного компонента мы использовали архивные фотометрические данные в различных фильтрах из каталогов, приведенных в таблице 4. Данные были взяты с помощью сервиса VizieR Photometry viewer⁵. Для каждого фильтра мы отобрали по одному наиболее достоверному измерению.

⁵<http://vizier.cds.unistra.fr/vizier/sed>

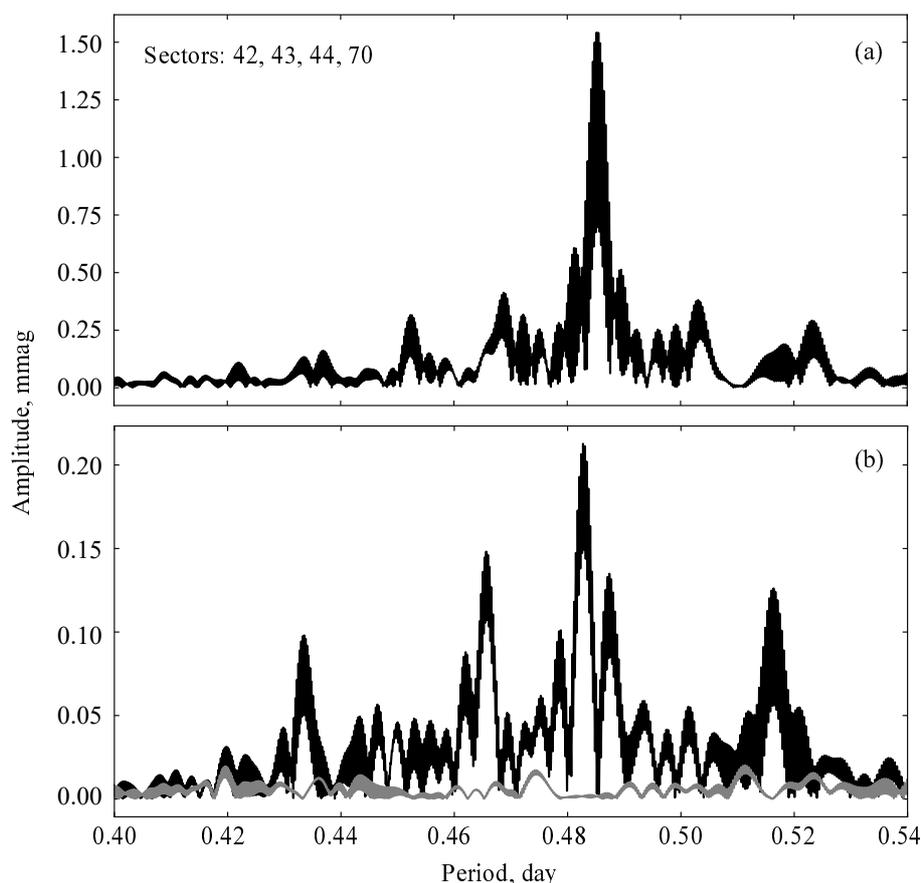


Рис. 3. Панель (а): периодограммы μ Сет по объединенным данным 42–44 и 70-го секторов. Панель (б): то же, после удаления главной частоты 2.06 сут^{-1} и всех частот с $S/N > 4$ (черная и серая линии соответственно).

Параллакс объекта по данным космической миссии HIPPARCOS равен $\pi = 38.71 \pm 1.31 \text{ mas}$, $m_V = 4^{\text{m}}26 \pm 0^{\text{m}}01$ (ESA, 1997), а по данным обзора Gaia — $\pi = 37.59 \pm 0.24 \text{ mas}$ (фактор $RUWE = 1.344$), $m_G = 4^{\text{m}}154 \pm 0^{\text{m}}003$ (Gaia Collab., 2022). Для наблюдений HIPPARCOS болометрическая поправка $BC = -0^{\text{m}}11$ взята из справочника Аллена (Сох, 2000), для наблюдений миссии Gaia $BC = 0^{\text{m}}08$ — из таблиц болометрических поправок MESA⁶ (Dotter, 2016).

Ультрафиолетовые наблюдения в области до 2000 \AA (дата наблюдения 8 сентября 1993 года), также переведенные в абсолютные единицы, взяты из архива данных космической обсерватории IUE⁷.

3. РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

3.1. Орбита системы

Результаты спекл-интерферометрических измерений приведены в таблице 5. Для построения ор-

биты использованы литературные данные прямых наблюдений (см. работу Dyachenko et al., 2019), новые точки, полученные Tokovinin et al. (2020), и данные из настоящей работы. Орбита приведена на рис. 4. Ошибки расчета параметров орбиты формальные. Сравнение орбитальных параметров предварительного решения и полученного в настоящей работе приведены в таблице 6. Отметим, что высокая точность определения точки прохождения периастра связана с малой скважностью наблюдений, проведенных нами вблизи момента прохождения, и большим ($e = 0.9219$) эксцентриситетом системы.

По результатам новых спекл-интерферометрических наблюдений нами также не обнаружена пара слабых компонентов, ранее найденных по наблюдениям в ИК-диапазоне методом покрытий Луной (Richichi et al., 2000). Отметим, что их вклад мал для всех использованных в этой работе методов и не влияет на выводы.

Данные 1980-х годов (Tokovinin, 1985; Ismailov, 1992) демонстрируют значительные отклонения от нового орбитального решения, что может быть объяснено нахождением компонентов вблизи

⁶Modules for Experiments in Stellar Astrophysics: <https://waps.cfa.harvard.edu/MIST/>

⁷International Ultraviolet Explorer: <http://archive.stsci.edu/iue/>

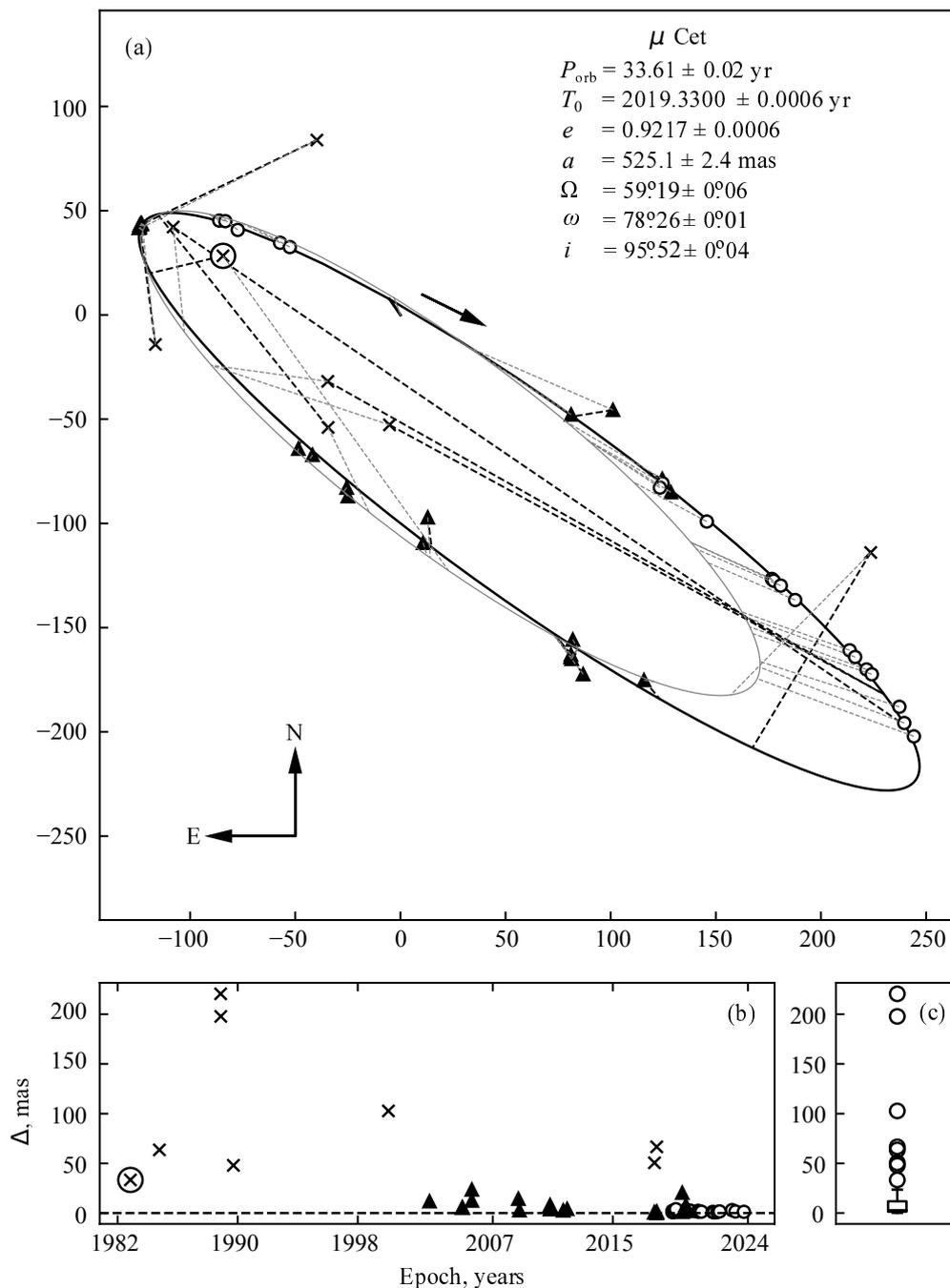


Рис. 4. Панель (a) — орбита пары μ Cet. Крестиками отмечены точки, полученные в 1980-е годы методом спекл-интерферометрии, и данные лунных покрытий. Треугольниками — точки из литературы, в том числе и ранние наблюдения на БТА. Пустые кружки показывают данные из этой работы. Крест в кружке — первая разрешенная точка (Tokovinin, 1985). Панель (b) — невязки отдельных точек; панель (c) — соответствующая диаграмма размаха.

предела разрешения 1-м телескопа обсерватории Санглок.

Результирующие суммы масс системы для параллакс миссий HIPPARCOS и Gaia составляют $\Sigma M_{\text{hip}} = 2.20 \pm 0.06 M_{\odot}$ и $\Sigma M_{\text{gaia}} = 2.42 \pm 0.05 M_{\odot}$ соответственно, для скорректированного параллакса ($\pi = 37.6847 \text{ mas}$) миссии Gaia (Bailer-Jones et al., 2021) — $\Sigma M_{\text{gaia}} = 2.39 \pm 0.02 M_{\odot}$.

По измерениям разности блеска между компонентами на 6-м телескопе, зависимостям для звезд ГП (Pecaut and Mamajek, 2013), а также статусу главного компонента системы, определенного в настоящей работе, вторичный компонент определен как карлик K0.5 V.

Таблица 1. Частоты, извлеченные для μ Сет по фотометрическим данным TESS. Здесь и далее в скобках указана ошибка измерений, соответствующая последней значащей цифре каждого параметра

Частота, сут ⁻¹	Амплитуда, mmag	Фаза	S/N
Сектор 42			
1.6497(9)	0.053(2)	0.56(1)	4.9
1.9322(3)	0.130(2)	0.156(2)	5.0
2.06213(3)	1.712(2)	0.3009(1)	42.8
2.3131(4)	0.109(2)	0.457(3)	6.3
4.121(1)	0.044(2)	0.95(1)	7.9
4.245(2)	0.051(2)	0.69(1)	5.9
Сектор 43			
0.09562(4)	0.092(2)	0.758(3)	4.7
1.9412(3)	0.128(2)	0.958(2)	5.6
2.05990(3)	1.696(2)	0.9209(2)	32.9
2.3064(4)	0.098(2)	0.952(3)	7.3
4.246(1)	0.036(2)	0.982(7)	4.2
Сектор 44			
2.05989(3)	1.344(2)	0.8262(2)	30.1
2.1749(2)	0.195(2)	0.505(1)	15.1
2.311(1)	0.083(2)	0.871(4)	6.0
4.240(1)	0.056(2)	0.46(1)	7.1
Сектор 70			
0.0953(4)	0.093(2)	0.514(3)	5.0
1.9429(3)	0.126(2)	0.287(2)	5.0
2.06125(2)	1.670(2)	0.3773(1)	52.9
2.3090(4)	0.101(2)	0.876(2)	4.9
4.251(1)	0.048(2)	0.23(1)	5.7

Таблица 2. Частоты, извлеченные для μ Сет по объединенным фотометрическим данным 42, 43 и 44-го секторов TESS

Секторы 42, 43, 44			
Частота, сут ⁻¹	Амплитуда, mmag	Фаза	S/N
1.6494(2)	0.038(1)	0.389(5)	4.5
1.9364(1)	0.119(1)	0.855(2)	7.4
2.06067(1)	1.601(1)	0.8775(1)	56.1
2.1620(1)	0.0814(1)	0.224(2)	8.6
2.3078(1)	0.095(1)	0.547(2)	7.7
4.1199(3)	0.028(1)	0.854(6)	6.9
4.2438(2)	0.047(1)	0.3400(4)	10.1

Таблица 3. Частоты, извлеченные для μ Сет по объединенным фотометрическим данным 42, 43, 44 и 70-го секторов TESS

Секторы 42, 43, 44, 70			
Частота, сут ⁻¹	Амплитуда, mmag	Фаза	S/N
0.09803(1)	0.076(1)	0.846(2)	5.3
0.15938(1)	0.041(1)	0.731(3)	4.3
0.18302(1)	0.059(1)	0.183(2)	4.3
0.21797(1)	0.044(1)	0.862(3)	4.3
0.29545(1)	0.052(1)	0.505(2)	4.6
1.46026(2)	0.027(1)	0.818(5)	4.5
1.64930(2)	0.034(1)	0.591(4)	4.9
1.936831(4)	0.120(1)	0.835(1)	7.0
1.95582(2)	0.031(1)	0.470(3)	4.6
2.028954(6)	0.063(1)	0.548(2)	6.7
2.048764(6)	0.128(1)	0.373(1)	9.2
2.0611761(4)	1.530(1)	0.62374(8)	64.2
2.071342(3)	0.198(1)	0.731(1)	11.8
2.08616(1)	0.047(1)	0.413(3)	6.8
2.12079(1)	0.042(1)	0.370(3)	5.1
2.149003(4)	0.152(1)	0.9842(8)	8.5
2.16250(1)	0.057(1)	0.996(2)	7.4
2.18326(2)	0.035(1)	0.721(4)	6.0
2.20901(2)	0.024(1)	0.742(5)	4.4
2.25848(2)	0.023(1)	0.19(1)	4.3
2.30812(1)	0.091(1)	0.667(1)	7.5
2.38224(2)	0.022(1)	0.12(1)	4.7
4.11961(2)	0.029(1)	0.613(4)	8.0
4.24348(1)	0.045(1)	0.166(3)	11.2

3.2. Магнитное поле

Поскольку магнитное поле, если оно достаточно сильное, может влиять на расчет потоков через изменение поглощения в линейчатом спектре, то в первую очередь была проведена оценка магнитного поля компонента А системы как по неполяризованным спектрам, так и по спектрам круговой поляризации. В первом случае исследовалось магнитное уширение линии FeI λ 6336.82 в спектре Elodie в зависимости от величины B_s — усредненного по поверхности модуля вектора магнитного поля μ Сет. Синтетический спектр рассчитывался по программе *Synmast* (Kochukhov, 2007), учитывающей вклад магнитного поля в формирование спектральной линии. *Synmast* работает в связке с программой *Binmag6* (Kochukhov, 2018) для визуализации. Указанная линия имеет высокий фактор Ланде $z = 2.00$ и большую интенсивность, к

Таблица 4. Отобранные фотометрические данные с портала Vizieur

λ , Å	Фильтр	Каталог	Ссылка
3530	Johnson: <i>U</i>	II/7A/catalog	Morel and Magnenat (1978)
4020	HIP: <i>H_p</i>	I/239/hip_main	Perryman et al. (1997)
4203	HIP: <i>BT</i>	I/239/hip_main	Perryman et al. (1997)
4442	Johnson: <i>B</i>	II/7A/catalog	Morel and Magnenat (1978)
5035	Gaia/Gaia3: <i>G_{BP}</i>	I/355/gaiadr3	Gaia Collab. (2022)
5318	HIP: <i>VT</i>	I/239/hip_main	Perryman et al. (1997)
5537	Johnson: <i>V</i>	II/7A/catalog	Morel and Magnenat (1978)
5822	Gaia/Gaia3: <i>G</i>	I/355/gaiadr3	Gaia Collab. (2022)
6938	Johnson: <i>R</i>	II/7A/catalog	Morel and Magnenat (1978)
7620	Gaia/Gaia3: <i>G_{RP}</i>	I/355/gaiadr3	Gaia Collab. (2022)
8779	Johnson: <i>I</i>	II/7A/catalog	Morel and Magnenat (1978)
12 500	Johnson: <i>J</i>	II/246/out	Cutri et al. (2003)
16 300	Johnson: <i>H</i>	II/246/out	Cutri et al. (2003)
21 900	Johnson: <i>K</i>	II/246/out	Cutri et al. (2003)
33 500	WISE: <i>W1</i>	II/311/wise	Cutri et al. (2012)
34 000	Johnson: <i>L</i>	II/346/jsdc_v2	Bourges et al. (2014)
35 499	Spitzer/IRAC: 3.6	J/AJ/163/45/table11	Rieke et al. (2022)
46 000	WISE: <i>W2</i>	II/311/wise	Cutri et al. (2012)
50 299	Johnson: <i>M</i>	II/346/jsdc_v2	Bourges et al. (2014)
86 100	AKARI: <i>S9W</i>	II/297/irc	Ishihara et al. (2010)
115 598	WISE: <i>W3</i>	II/311/wise	Cutri et al. (2012)
115 901	IRAS: 12	I/270/cpirss01	Hindsley and Harrington (1994)
183 898	AKARI: <i>L18W</i>	J/MNRAS/471/770/table2	McDonald et al. (2017)
220 906	WISE: <i>W4</i>	II/311/wise	Cutri et al. (2012)
236 746	Spitzer/MIPS: 24	J/ApJS/211/25/catalog	Chen et al. (2014)
238 801	IRAS: 25	I/270/cpirss01	Hindsley and Harrington (1994)
618 497	IRAS: 60	I/270/cpirss01	Hindsley and Harrington (1994)
714 198	Spitzer/MIPS: 70	J/ApJS/211/25/catalog	Chen et al. (2014)
1 019 492	IRAS: 100	I/270/cpirss01	Hindsley and Harrington (1994)

тому же лежит в длинноволновой части спектра, что увеличивает зеemannовское расщепление. Атомные данные, необходимые для вычисления картины расщепления линии под действием эффекта Зеемана, взяты из Венской базы атомных параметров спектральных линий (VALD)⁸ (см. Ryabchikova et al., 2015) с помощью запроса «Extract stellar» в формате long с включением сверхтонкой структуры (HFS splitting). Для расчетов профиля линии использовались модели атмосферы μ Cet A с параметрами, полученными в разделе 3.3.2.

Поляриметрические измерения усредненной по

⁸<http://vald.inasan.ru>

поверхности продольной компоненты вектора магнитного поля выполнены по спектрам с ОЗСП 6-м телескопа БТА. Поле измерялось двумя методами, используемыми нами в лаборатории исследований звездного магнетизма. Подробно методика измерения магнитного поля была изложена, например, в работах Semenکو et al. (2014; 2022)

Спектрополяриметрия ОЗСП указывает, что видимое продольное поле не превышает ошибки определения, которая составляет около 100 Гс, что согласуется с отсутствием дополнительного магнитного уширения линии Fe I λ 6336.82. Поэтому мы использовали для анализа химического состава атмосферы μ Cet A программу расчета синтетиче-

Таблица 5. Позиционные параметры и разности блеска μ Сет по результатам спекл-интерферометрических измерений

Эпоха	Фильтр	ρ , mas	θ , deg	Δm , mag
2018.9699	550/20	97.3 ± 1	62.3 ± 0.1	3.51 ± 0.02
2018.9699	694/10	94.6 ± 1	61.7 ± 0.1	3.11 ± 0.02
2019.0465	550/20	87.4 ± 1	62.3 ± 0.1	3.35 ± 0.03
2019.1508	550/20	66.8 ± 1	58.9 ± 0.1	3.33 ± 0.03
2019.2000	550/20	62.8 ± 1	58.2 ± 0.1	3.17 ± 0.04
2019.9393	550/20	148.5 ± 1	237.1 ± 0.1	3.47 ± 0.03
2019.9393	694/10	148.6 ± 1	236.2 ± 0.1	2.86 ± 0.04
2020.1774	550/20	176.2 ± 1	235.9 ± 0.1	3.37 ± 0.02
2020.6740	694/10	217.4 ± 1	234.4 ± 0.1	3.22 ± 0.03
2020.6740	800/100	218.6 ± 1	234.3 ± 0.1	3.17 ± 0.02
2020.7450	550/20	222.7 ± 1	234.4 ± 0.1	3.20 ± 0.03
2020.9031	550/20	232.3 ± 1	234.0 ± 0.1	3.77 ± 0.02
2021.6486	550/50	267.4 ± 1	233.1 ± 0.1	3.32 ± 0.02
2021.7360	550/50	271.4 ± 1	232.9 ± 0.1	3.83 ± 0.02
2021.9571	550/50	279.4 ± 1	232.6 ± 0.1	3.78 ± 0.02
2022.1131	550/50	282.8 ± 1	232.5 ± 0.1	3.65 ± 0.03
2022.943	550/50	302.7 ± 1	231.7 ± 0.1	3.49 ± 0.03
2023.1672	550/50	309.4 ± 1	230.8 ± 0.1	3.60 ± 0.04
2023.7293	550/50	317 ± 1	230.5 ± 0.1	3.59 ± 0.03

ского спектра **SynthVb** (Tsymbal, 1996) в связке с **BinMag6** и независимо пакет программ **SME** (Piskunov and Valenti, 2017; Valenti and Piskunov, 1996), которые не учитывают магнитное поле при формировании спектра.

3.3. Параметры атмосферы и радиус звезды

3.3.1. Фотометрия

В работе Blackwell and Shallis (1977) рассмотрен метод определения T_{eff} и углового диаметра звезды θ по фотометрическим данным (IRFM — метод инфракрасных потоков). Рассчитывается

$$\theta = 2\sqrt{\frac{F_{\lambda}^E}{F_{\lambda}^S}}, \quad (1)$$

где F_{λ}^E — наблюдаемый поток на поверхности Земли, F_{λ}^S — поток в континууме, выходящий

с единичной площадки в единицу времени с поверхности звезды. Данный метод используется для наблюдений в инфракрасном (1–13 мкм) диапазоне спектра в силу слабой зависимости F_{λ}^S от T_{eff} и малого межзвездного поглощения в указанной области длин волн. Для расчета потока F_{λ}^S мы используем сетку моделей атмосфер Куруца, интерполированную на нужные значения T_{eff} , $\lg g$, [M/H]. Ошибка углового диаметра рассчитывается по формуле:

$$\sigma_{\theta} = \sqrt{0.05^2 + \sigma_{\langle\theta\rangle}^2},$$

где первый член соответствует ошибке 10% в наблюдаемом потоке, а $\sigma_{\langle\theta\rangle}$ — ошибка средневзвешенного значения углового диаметра, полученного для набора потоков в инфракрасном диапазоне.

Эффективная температура может быть найдена по формуле:

$$T_{\text{eff}} = \sqrt[4]{\frac{F^E}{(\theta/2)^2}}, \quad (2)$$

где F^E — интегральный поток, регистрируемый на поверхности Земли.

На рис. 5 приведены полученные значения углового диаметра θ_A , оцененного по потокам в ИК-диапазоне. Вклад вторичного компонента из итоговых расчетов вычтен. Оценки $\theta_A = 0.738 \pm 0.038$ mas, $R_A = 2.07 \pm 0.11 R_{\odot}$ получены по набору измерений от 1 до 13 мкм (на рис. 5 данная область длин волн и ошибка θ_A указаны прямоугольником). Заметим, что в фильтре *L* имеется значительная ошибка, а данные в *W2* и *W3*, несмотря на небольшие ошибки, показывают существенное расхождение между собой, как и большая часть измерений после 13 мкм. По этим причинам мы исключили из определения среднего значения θ_A измерения, заметно отличающиеся от большинства. Оценка T_{eff}^A по формуле (2) дает температуру $T = 7380 \pm 180$ K.

3.3.2. Спектроскопический анализ

Для определения параметров атмосферы звезды (T_{eff} , $\lg g$) и содержания некоторых основных химических элементов, определяющих металличность [M/H], мы использовали написанный на языке IDL пакет программ **SME** (Spectroscopy Made Easy) для автоматического спектрального анализа (Valenti and Piskunov, 1996; Piskunov and Valenti, 2017).

Параметры атмосферы, микротурбулентная скорость ξ_t , скорость вращения $v \sin i$ и лучевая скорость v_r определялись методом минимизации критерия χ^2 при аппроксимации выбранных участков спектральных наблюдений синтетическими

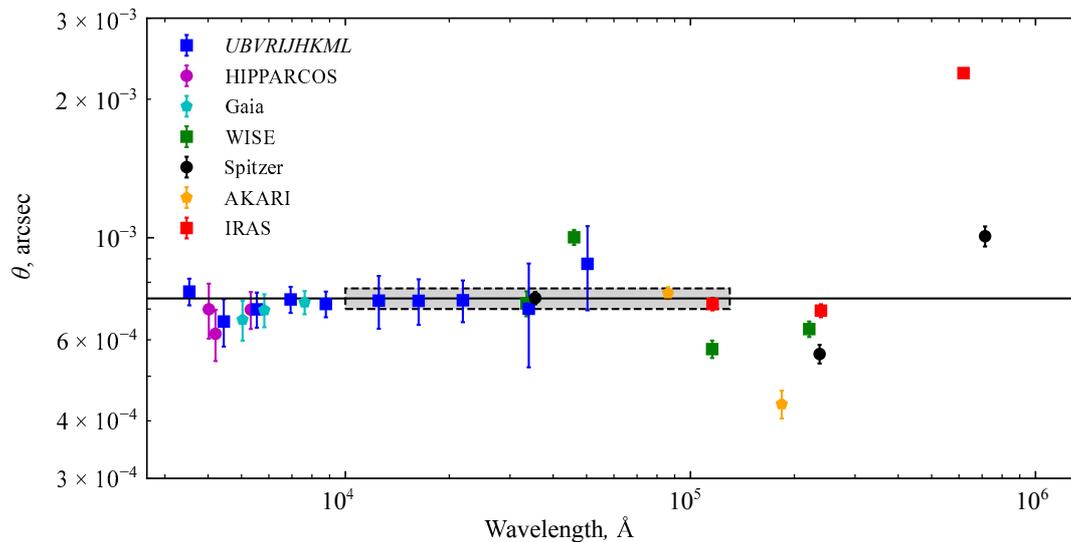


Рис. 5. Угловой диаметр компонента A-системы μ Ceti по данным на разных длинах волн. Оценка θ_A , полученная в настоящей работе, отмечена сплошной линией; прямоугольником показаны область использованных наблюдений и ошибка θ_A .

Таблица 6. Орбитальные параметры μ Ceti

P_{orb} , уг	T_0 , уг	e	a , mas	Ω , deg	ω , deg	i , deg	Ссылка*
25.4 ± 0.3	2019.5 ± 0.3	0.89 ± 0.01	378 ± 20	57.1 ± 0.8	80.4 ± 0.3	97.4 ± 0.3	D2019
33.62 ± 0.03	2019.3300 ± 0.0006	0.9219 ± 0.0006	525.9 ± 2.6	59.18 ± 0.06	78.26 ± 0.01	95.5 ± 0.04	tw

*Dyachenko et al. (2019); tw — данная работа.

спектрами. Детальное исследование химического состава в ЛТР-приближении проводилось как с помощью пакета SME (по группе линий одного элемента), так и независимо по коду SynthVb (Tsymbal, 1996) (индивидуальные линии).

В SME можно выбрать для работы одну из трех сеток моделей атмосфер: ATLAS9 (Castelli and Kurucz, 2003), MARCS (Gustafsson et al., 2008), LLmodels (Shulyak et al., 2004). Все сетки рассчитываются в предположении ЛТР и для плоскопараллельной структуры атмосферы. Мы используем сетку моделей LLmodels, поскольку она более детально учитывает коэффициент поглощения в линиях по сравнению с моделями ATLAS9.

Атомные параметры спектральных линий для расчета синтетического спектра получены из базы данных VALD с помощью запроса «Extract stellar».

В SME приводятся две ошибки: σ_1 (кумулятивная), которая находится из кумулятивного распределения для выбранного свободного параметра с использованием всех пикселей внутри маски, и σ_2 (ошибка фитирования), представляющая из себя оценку эффективности алгоритма, реализованного в SME. В подавляющем большинстве случаев в качестве неопределенности параметра атмосферы

справедливо брать его кумулятивную ошибку (подробное описание дано в работах Ryabchikova et al., 2016; Piskunov and Valenti, 2017).

Выбор участков спектра для работы в SME (маска) определяется наличием в этих участках спектральных линий, чувствительных к изменениям параметров атмосферы, например линий бальмеровской серии водорода (Ryabchikova et al., 2016).

В спектре Elodie было выбрано несколько спектральных областей: 4700–5000 Å и 6450–6650 Å, которые содержат водородные линии H β и H α , а также спектральные диапазоны 4400–4750 Å и 4950–6500 Å, содержащие линии металлов. Из-за высокой степени блендирования и неопределенности проведения континуума мы не используем участок спектра короче 4400 Å.

При создании маски спектра мы исключили из рассмотрения теллурические линии, линии с плохо известными силами осцилляторов, а также участки спектра с дефектами (мертвыми пикселями) и со следами космических частиц, оставшимися после первичной обработки спектра. Ядра линий атома водорода (область шириной около 2.0 Å вблизи

Таблица 7. Сравнение параметров атмосферы μ Cет, полученных по спектрам с Elodie и ОЗСП, со значениями из литературы

Параметр	Elodie						ОЗСП			Gray et al. (2003)	
	H α + H β			H α + H β + металлы			H α + H β				
	σ_1	σ_2		σ_1	σ_2		σ_1	σ_2		σ	
T_{eff} , К	7210	230	16	7260	360	20	7056	190	6	7225	115
$\lg g$	3.8	0.6	0.1	3.8	1.7	0.2	3.5	0.9	0.0	3.9	—
[M/H]	-0.05	0.16	0.02	-0.08	0.22	0.05	—	—	—	0.04	0.09
ξ_t , км с $^{-1}$	3.9	1.0	0.1	3.8	1.4	0.2	—	—	—	3.2	—
$v \sin i$, км с $^{-1}$	50.3	9.2	0.7	49.3	12.3	1.0	—	—	—	—	—

центра линии) также не использовались при моделировании.

Стартовые параметры атмосферы системы μ Cет в SME — $T_{\text{eff}} = 7050 \pm 450$ К, $\lg g = 3.92 \pm 0.23$ [M/H] = 0.06 ± 0.03 — были оценены с помощью программы Templogg (Kaiser, 2006) по фотометрическим индексам в системах Стремгрена, Джонсона, Женевской фотометрии, взятыми из работ Hauck and Mermilliod (1998), Morel and Magnenat (1978), Johnson et al. (1966) соответственно.

Результаты определения параметров атмосферы по методике, описанной выше, представлены в таблице 7. В силу большого значения $v \sin i$ макротурбулентная скорость при моделировании атмосферы принята равной нулю. В таблице приведены параметры атмосферы μ Cет, полученные по спектру Elodie, отдельно:

- 1) по областям с профилями водородных линий H α и H β ,
- 2) по спектральным участкам 4400–4750 Å и 4950–6500 Å + H α и H β .

В двух последних колонках приведены параметры, полученные по участкам с H α и H β спектра ОЗСП, а также известные из литературных источников.

Полученные нами с помощью методов спектрального анализа параметры атмосферы μ Cет очень хорошо согласуются с данными из литературы. Сравнение результатов анализа профилей линий водорода, сделанного независимо по спектрам двух спектрографов, указывает на более низкое значение T_{eff} по спектру ОЗСП (см. в таблице 7 колонку с данными «ОЗСП»). Отчасти данный эффект объясняется известной методической сложностью проведения уровня континуума эшелле-спектров звезд ранних спектральных классов. Возможно, что уровень континуума в области водородных линий проведен более корректно в спектре с ОЗСП (см. рис. 6). Однако в пользу более высокой температуры свидетельствует среднее значение $T_{\text{eff}} = 7380 \pm 180$ К, полученное по

фотометрии методом IRFM (см. раздел 3.3.1). Эффективная температура 7210 ± 230 К, определенная по профилям водородных линий спектра Elodie, соответствует диапазону температур, полученных различными методами.

Подтверждение корректности определения эффективной температуры μ Cет А и, частично, металличности было получено из сравнения со спектром нормальной звезды HD 32115 с параметрами атмосферы 7250/4.2/0.0, $\xi_t = 2.3$ км с $^{-1}$ (см. работу Mashonkina et al., 2020), показанного на рис. 7. Основные индикаторы T_{eff} — профили линий водорода — совпадают. Хотя все линии металлов в спектре μ Cет глубже, но это легко объясняется большей величиной макротурбулентной скорости в атмосфере μ Cет (3.9 км с $^{-1}$).

3.3.3. Спектральное распределение энергии

Дополнительно мы проверили параметры атмосферы, сравнив наблюдаемое и модельное спектральное распределение энергии. На рис. 8 точками нанесены фотометрические измерения, взятые из открытых источников данных. Фиолетовой сплошной кривой показано спектральное распределение энергии, полученное на IUE⁹. Черной сплошной кривой показано модельное распределение потока μ Cет, рассчитанное для параметров «горячей» (7210 К) атмосферы μ Cет из таблицы 7. Пунктирными линиями указаны распределения, найденные для максимального диапазона изменения обеих эффективных температур с учетом их ошибок $1\sigma_1$. Во всех теоретических расчетах потоков использовалось значение радиуса звезды $R_A = 2.07 \pm 0.11 R_{\odot}$.

В пределах σ_1 для T_{eff} и в пределах σ для R_A обе модели атмосферы компонента μ Cет А согласуются с наблюдениями.

⁹International Ultraviolet Explorer <https://sci.esa.int/web/iue>

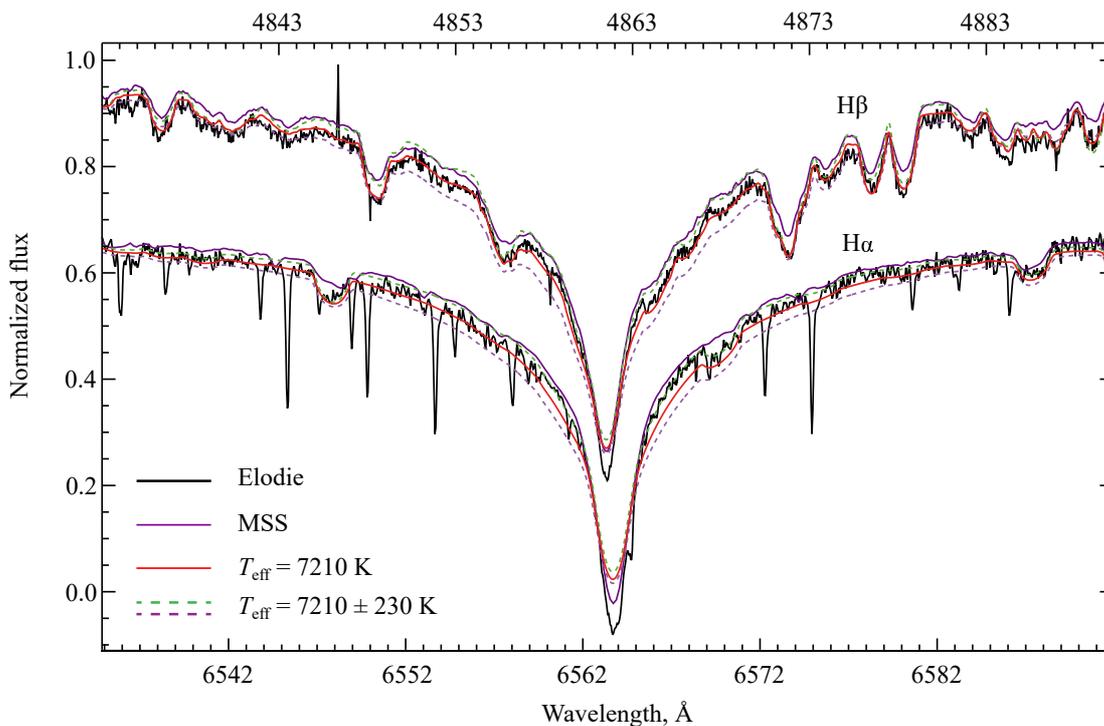


Рис. 6. Профили линий $H\alpha$ (снизу) и $H\beta$ (сверху). Черной линией обозначен спектр с Elodie, серой линией (более узкий профиль линии водорода) — спектр с ОЗСП. Красная линия соответствует синтетическому спектру при $T_{\text{eff}} = 7210$ К. Синтетические спектры при температурах $T_{\text{eff}} = 7210 \pm 230$ К показаны штриховыми линиями.

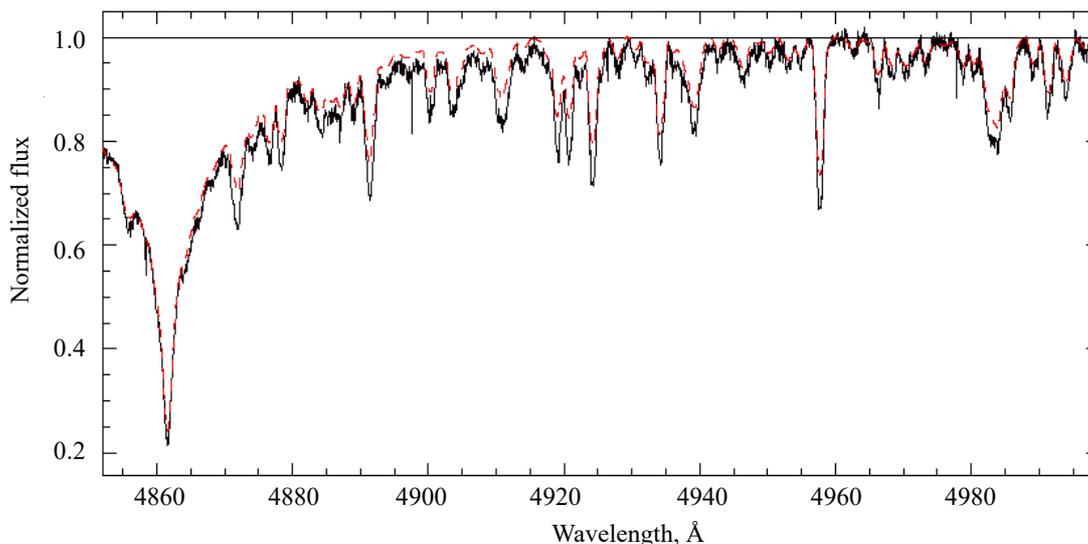


Рис. 7. Сравнение спектра μ Cet с Elodie (сплошная линия) со спектром HD 32115 (штриховая линия).

Разность звездных величин между компонентами двойной системы μ Cet в трех фильтрах — $\Delta m_{500} = 3^{\text{m}}5 \pm 0^{\text{m}}3$, $\Delta m_{694} = 3^{\text{m}}1 \pm 0^{\text{m}}3$, $\Delta m_{800} = 3^{\text{m}}2$ — пересчитана в отношения потоков. Интерполированием фотометрических точек получены потоки на длинах волн 500, 694, 800 нм. Решая два уравнения с двумя неизвестными на каждой из трех длин волн, мы нашли потоки для

компонентов А и В. Мы оцениваем параметры компонента В как $T_{\text{eff}}^{\text{B}} = 5250$ К, соответствующей звездам ГП на $m_V = 3^{\text{m}}5$ слабее главного компонента (см. раздел 3.6), и $R_{\text{B}} = 0.80 \pm 0.15 R_{\odot}$. Итоговый вклад компонента В в наблюдаемый спектр достаточно мал, им можно пренебречь при оценке химического состава.

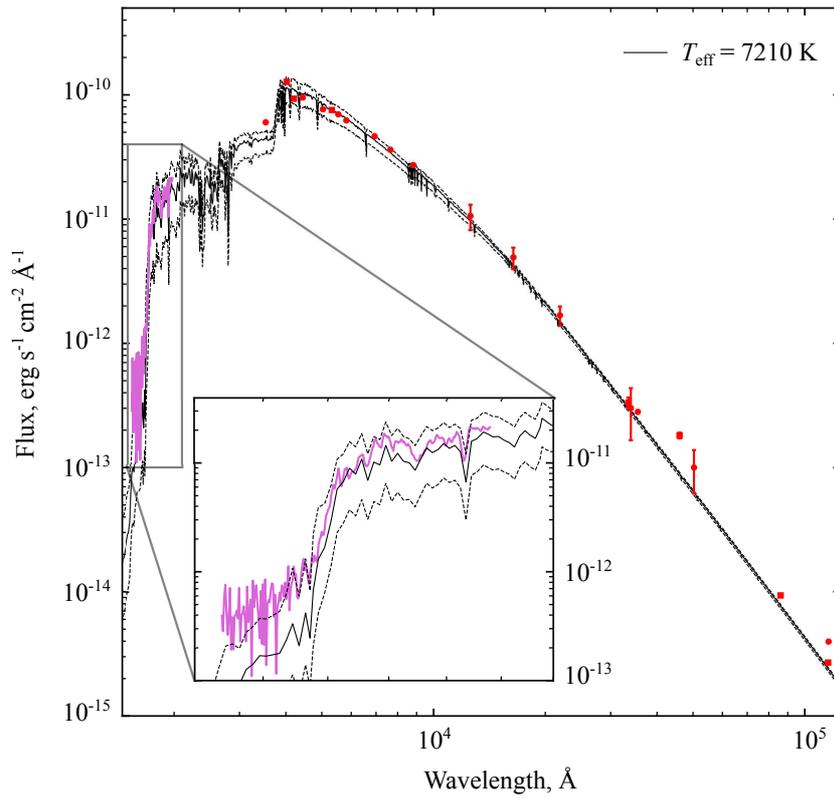


Рис. 8. Сравнение наблюдаемого и теоретического распределения энергии μ Сет. Красные кружки, квадраты и сплошная фиолетовая линия — фотометрические наблюдения в отдельных фильтрах и IUE соответственно. Теоретическое распределение энергии для модели с $T_{\text{eff}} = 7210$ K, $\lg g = 3.8$ показано черной сплошной линией. Штриховые линии соответствуют температурам $7210 + 230$ K, $7060 - 190$ K.

Таблица 8. Содержания 14 химических элементов на Солнце и μ Сет. Показаны вычисления при параметрах «горячей» и «холодной» атмосферы из таблицы 7. Для элементов со звездочкой * указаны содержания, полученные по *Binmag6* и *SynthVb*, для остальных элементов приведены содержания, вычисленные в *SME*

Element	Sun		$T_{\text{eff}} = 7210$ K			$T_{\text{eff}} = 7060$ K			Δ_{NLTE}
	$\lg \varepsilon_{\odot}$	N	$\lg \varepsilon$	σ	$[N_{\text{el}}/N_{\text{tot}}]$	$\lg \varepsilon$	σ	$[N_{\text{el}}/N_{\text{tot}}]$	
C*	8.46	4	8.54	0.08	0.08	8.45	0.13	-0.01	-0.10
Mg	7.55	8	7.65	0.22	0.10	7.70	0.23	0.15	-0.03
Si	7.51	4	7.70	0.29	0.19	7.68	0.29	0.17	-0.07
Ca	6.30	—	6.45	0.18	0.15	6.42	0.19	0.12	-0.14
Sc	3.14	—	2.95	0.21	-0.19	2.85	0.25	-0.29	—
Ti	4.97	—	4.87	0.23	-0.10	4.72	0.22	-0.25	0.03
Cr	5.62	—	5.63	0.29	0.01	5.52	0.29	-0.10	—
Fe	7.46	—	7.37	0.19	-0.09	7.28	0.19	-0.18	-0.01
Ni	6.20	—	6.09	0.41	-0.11	6.01	0.42	-0.19	—
Zn	4.56	—	4.01	0.25	-0.55	4.00	0.25	-0.56	0.13
Sr	2.83	2	3.27	0.34	0.44	3.15	0.32	0.32	-0.05
Y	2.21	—	2.14	0.35	0.03	1.95	0.40	-0.26	—
Ba*	2.27	4	2.24	0.15	-0.03	2.14	0.26	-0.13	-0.17
Eu	0.52	2	0.73	0.28	0.21	0.58	0.27	0.06	—

3.4. Химический состав

Спектрополяриметрия ОЗСП указывает, что видимое продольное поле не превышает ошибки определения, которая составляет около 100 Гс. Поэтому мы использовали для расчета химического состава код *SynthVb* в связке с *BinMag6* и независимо пакет программ *SME*, которые не учитывают магнитного уширения линий. Анализ химического состава был проведен для двух наборов параметров атмосферы, полученных по линиям водорода.

Мы определили в пакете *SME* содержания таких элементов, как Ca, Sc, Ti, Cr, Fe, Ni, Zn, Y, по участкам спектра с *Elodie*, не имеющим профили водородных линий. Для Mg, Si, Sr, Eu содержания определялись в *SME* с масками, в которых были выделены только наблюдаемые линии данных атомов. Такой выбор маски особенно важен для пекулярных элементов Sr, Eu, поскольку линий данных атомов мало и они слабы. Для элементов C и Ba содержания получены усреднением содержаний, вычисленных отдельно для каждой линии с помощью *SynthVb* и *Binmag6*. Среднее содержание элемента $\lg \varepsilon$, содержание элемента относительно Солнца $[N_{\text{el}}/N_{\text{tot}}]$, ошибка содержания σ (только для C, Ba, для остальных элементов за σ взята кумулятивная ошибка из *SME*) элемента вычислялись по формулам:

$$\begin{aligned} \lg \varepsilon &= \lg(N_{\text{el}}/N_{\text{tot}}) + 12.04, \\ [N_{\text{el}}/N_{\text{tot}}] &= \lg \varepsilon - \lg \varepsilon_{\odot}, \\ \sigma &= \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (\lg \varepsilon_i - \lg \varepsilon)^2}{N-1}}, \end{aligned}$$

где N_{el} — концентрация атомов данного элемента в атмосфере, N_{tot} — концентрация всех атомов; $\lg \varepsilon_{\odot}$ — содержание элемента в атмосфере Солнца, в системе где $\lg \varepsilon(\text{H}) = 12.00$, $\lg \varepsilon(\text{He}) = 11.04$; $\lg \varepsilon_i$ — содержание элемента, определенное по i -ой линии. Солнечные содержания элементов взяты из работы *Asplund et al. (2021)*.

Результаты определения содержаний химических элементов в атмосфере μ Cet приведены в таблице 8. Если содержание элемента определяется по коду *SynthVb* или по *SME* со специальными масками, в которых были выделены только наблюдаемые линии данных атомов/ионов, то в таблице приведено число используемых в расчете линий конкретного атома/иона.

Для оценки приблизительных не-ЛТР-поправок Δ_{NLTE} к содержанию относительно Солнца в ЛТР-приближении $[N_{\text{el}}/N_{\text{tot}}]$ мы использовали данные для звезды HD 32115 из работы *Mashonkina et al. (2020)*. Поправка для Zn взята из *Sitnova et al. (2022)*.

Содержания $[N_{\text{el}}/N_{\text{tot}}]$ в атмосфере μ Cet A показаны на рис. 9b. Величины поправок для элементов C, Ca, Zn, Ba отмечены стрелками. На панели (a) приведено сравнение химического состава μ Cet A с химическим составом атмосферы Am-звезды Сириус (*Mashonkina et al., 2020*), а также с усредненным химическим составом девяти Ar-звезд из работы *Romanovskaya (2023)*.

В пределах ± 0.2 dex химический состав атмосферы μ Cet A близок к солнечному, без существенных систематических отклонений.

3.5. Пульсации

По фотометрическим данным миссии TESS главному пику с полуамплитудой 1.51 ± 0.05 mmag соответствует период 0.485 ± 0.002 суток. Периодограмма Ломба—Скаргла с соответствующим профилем приведена на рис. 10. Указанному значению периода соответствует $S/N = 28$, которое рассчитывается путем оценки фонового шума. Период переменности не характерен для звезд типа δ Sct. Полученный период и небольшая амплитуда соответствуют переменным типа γ Dor, что согласуется со спектральным классом главного компонента μ Cet.

Полагая значения в V -фильтре системы Джонсона $m_V = 4^{\text{m}}26$ близкими к значениям фильтров 550/20 и 550/50 нм спекл-интерферометра, получим в полосе V для главного и вторичного компонентов $m_V^A = 4^{\text{m}}30$, $m_V^B = 7^{\text{m}}80$ соответственно. Такое большое различие в блеске компонентов позволяет пренебречь влиянием вторичного компонента на фотометрическую переменность системы, а также на ее спектр.

Переменность μ Cet может быть следствием пульсаций главного компонента в гравитационных модах, характерных для объектов типа γ Doradus (γ Dor) — звезд ГП раннего F или позднего A спектральных классов и массой $1.4 M_{\odot} \leq M \leq 2.0 M_{\odot}$ (*Kaye et al., 1999*). Пульсации этих объектов носят мультипериодичный характер с периодами от 0.3 до 4 суток.

Звезды γ Dor ввиду своей тонкой конвективной оболочки не обладают существенным магнитным полем (*Schatzman, 1962*), как и в случае μ Cet. Возникновение больших пятен и, как следствие, переменность блеска из-за вращения — маловероятны. По расположению переменных звезд на диаграмме Герцшпрунга—Рассела можно сделать предположение о природе переменности (см. рис. 7 в работе *Fetherolf et al. 2023*): μ Cet располагается в области объектов A–F-классов с короткими периодами (менее одних суток), большая доля из которых — пульсирующие звезды.

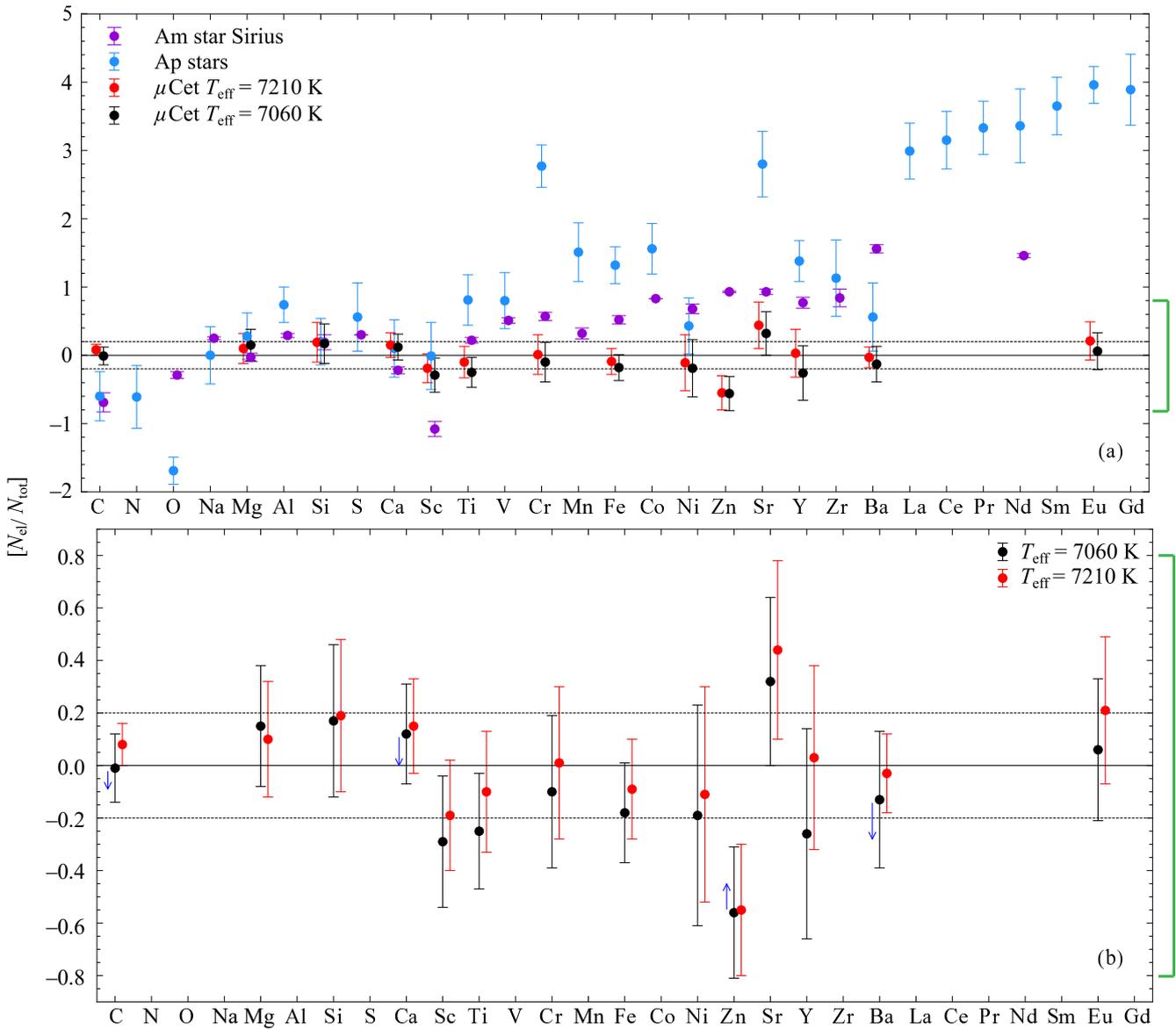


Рис. 9. Панель (a): сравнение содержания химических элементов в атмосфере μ Cet A с содержанием тех же элементов в Am-звезде Сириус и в Ap-звездах. Панель (b): содержания химических элементов в атмосфере μ Cet A относительно Солнца для двух моделей атмосфер. Характерная неопределенность ± 0.2 dex указана пунктирными линиями. Стрелками показан приближенный учет не-ЛТР эффектов в содержании элементов.

Зависимость « $\Delta P - P$ » — это основной инструмент для измерения околоядерной скорости вращения, чему посвящено множество работ (Van Reeth et al., 2016; Christophe et al., 2018a; Van Reeth et al., 2018; Li et al., 2019, 2020; Takata et al., 2020; Pedersen et al., 2021). Несмотря на скудность имеющихся данных, мы построили зависимость разности последовательных периодов ΔP от величины периода (P) для μ Cet (рис. 11). С осторожностью можно сказать о нисходящем тренде, то есть об уменьшении расстояния между периодами. В свою очередь, это говорит о проградных модах пульсаций (пульсации распростра-

няются по вращению). Индикатором скорости вращения звезды служит наклон (slope — Σ) зависимости « $\Delta P - P$ ». Мы аппроксимировали полученную зависимость линейной функцией и получили $\Sigma = -0.14$, в то время как типичные значения для проградных дипольных мод примерно равны -0.03 (Ouazzani et al., 2017). Малое количество данных и пробелы в общем фотометрическом ряду снижают отношение S/N , поэтому полученную зависимость « $\Delta P - P$ » мы считаем предварительной.

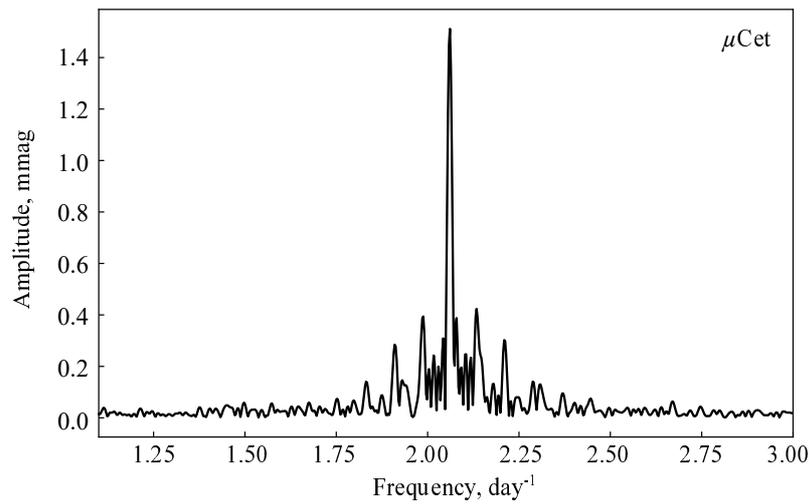


Рис. 10. Периодограмма Ломба–Скаргла μ Ceti по данным миссии TESS.

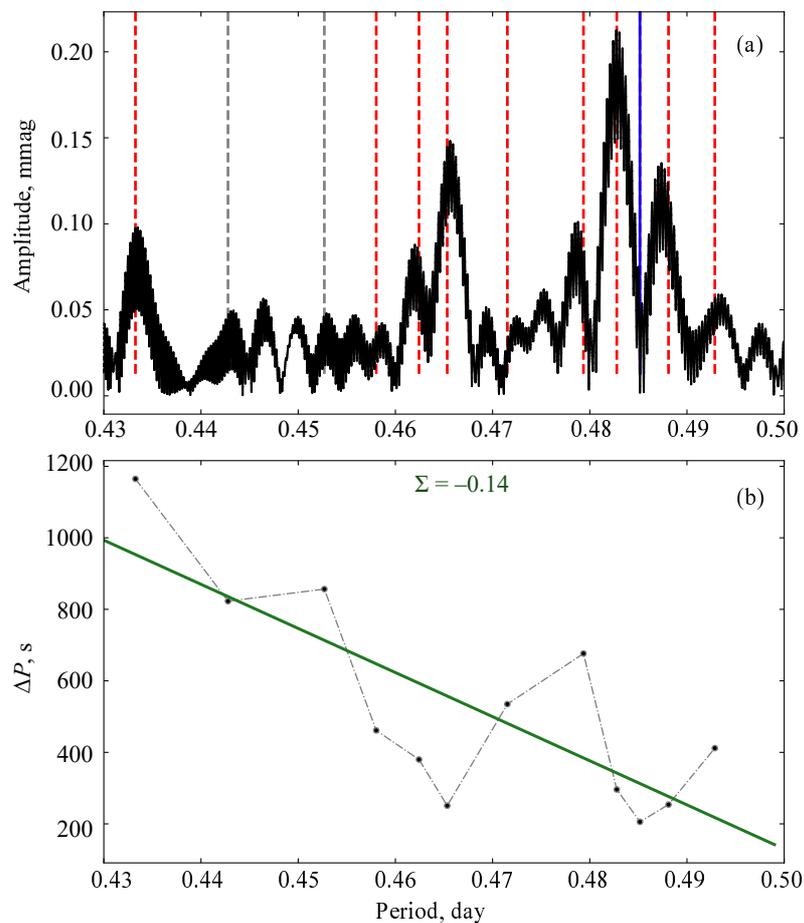


Рис. 11. Панель (a) — периодограмма μ Ceti с удаленной главной частотой (положение отмечено синей сплошной линией). Панель (b) — зависимость « $\Delta P - P$ », где ΔP — разность между последовательными периодами; зеленая линия — аппроксимирующая прямая с наклоном $\Sigma = -0.14$.

3.6. Положение на диаграмме $\Gamma - P$

По модели атмосферы и анализу химического состава исследуемого объекта мы можем оценить его массу и возраст. На рис. 12а, б указа-

ны: положение μ Ceti на теоретической диаграмме Герцшпрунга–Рассела (черный эллипс) при наблюдениях Gaia и HIPPARCOS (см. раздел 2.4), для «холодной» и «горячей» моделей атмосфер;

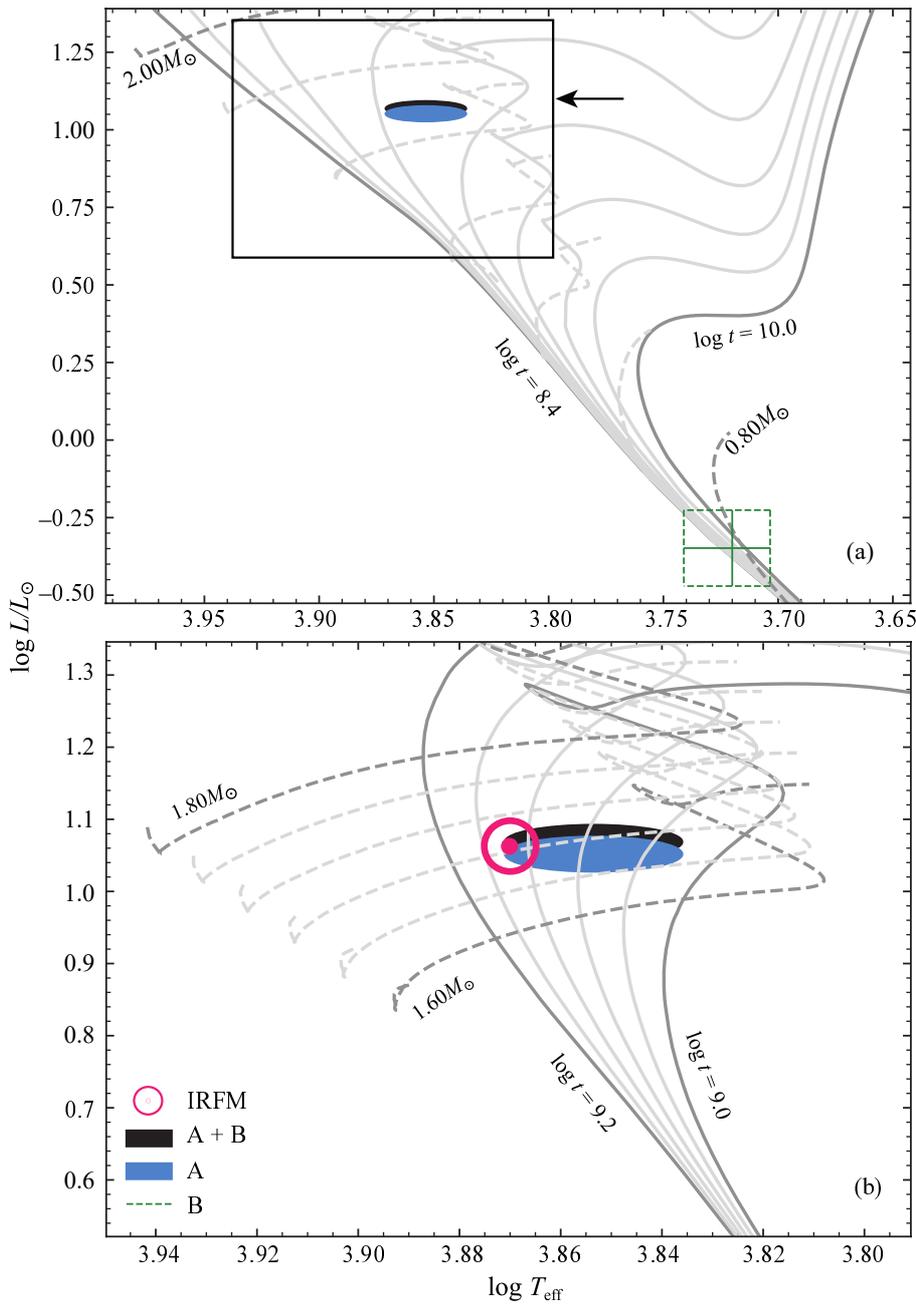


Рис. 12. Положение μ Сет на диаграмме Г–Р (черный эллипс), положения компонентов А (синий эллипс) и В (область, выделенная зелеными линиями). Синим отмечено значение радиуса компонента А. Часть рисунка на панели (а) (указано стрелкой) представлена в увеличенном масштабе на панели (b).

набор изохрон и эволюционных треков, взятый из MIST (MESA Isochrones and Stellar Tracks, Dotter, 2016), при солнечном химическом составе атмосферы и скорости вращения звезды менее половины от критической.

Поскольку известно отношение светимостей $L_A/L_B \approx 10^{0.4 \times \Delta m_{500}}$ и сумма $L_A + L_B = L$, мы показали на рис. 12 положение компонентов А (синий эллипс) и В (прямоугольник на рис. 12а, указывающий неопределенности в L_B и T_{eff}^B).

Значения параметров T_{eff}^B , $\sigma_{T_{\text{eff}}^B}$ мы находили из пересечения прямых $L_B \pm \sigma_{L_B}$ и изохрон, выбранных по положению компонента А на диаграмме Г–Р. Показано положение компонента А, определенное методом инфракрасных потоков (IRFM).

Из рисунка видно, что массы компонентов $M_A = 1.66 M_{\odot} \pm 0.04$, $M_B = 0.8 M_{\odot} \pm 0.1$, возраст системы $\lg t = 9.08 \pm 0.06$. Главный компонент μ Сет не принадлежит к классу гигантов, а заканчивает свою эволюцию на главной последовательно-

сти. Отметим, что сумма масс $M_A + M_B$ заключена в пределах от $2.3 M_\odot$ до $2.6 M_\odot$, что согласуется с прямыми наблюдениями.

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Нами построена новая орбита спекл-интерферометрической пары μ Cet по литературным данным и 19 наблюдениям, охватывающим 16 эпох 2018–2023 годов, из настоящей работы. Прохождение момента периастра в этот период определяет высокую точность полученного решения. Сумма масс системы составила $M_{\text{Gaia}} = 2.42 \pm 0.05 M_\odot$.

Анализ фотометрических данных миссии TESS показывает, что основной компонент системы пульсирует с основной частотой $2.0611761(4) \text{ сут}^{-1}$. Величины основной частоты и амплитуды являются нехарактерными для звезд типа δ Щита и свидетельствуют о принадлежности этой звезды к пульсаторам типа γ Дог. Это делает μ Cet ярчайшим представителем этого класса объектов среди звезд северного полушария. Помимо того, нами обнаружены 23 дополнительных частоты с $S/N > 4$. Полученная зависимость « $\Delta P - P$ » демонстрирует нисходящий тренд, свидетельствующий о проградных модах пульсации.

По имеющимся спектрам построены две модели атмосферы A-компонента μ Cet. По фотометрическим данным методом инфракрасных потоков определена эффективная температура и радиус главного компонента системы. Фотометрические и спектроскопические данные согласуются между собой. По двум моделям атмосферы вычислен химический состав μ Cet. Систематического хода содержания элементов с ростом атомного номера, характерного для CP-звезд, равно как и отличий в содержаниях относительно солнечного содержания элементов, в пределах ошибок не обнаруживается, что говорит об отсутствии аномалий в химическом составе. Содержания всех исследованных элементов в атмосфере μ Cet заключены в пределах $\pm 0.2 \text{ dex}$ от солнечного химического состава. Мы исключаем принадлежность μ Cet к классу магнитных пекулярных звезд. К сожалению, качество спектроскопического материала недостаточно, чтобы обнаружить слабые систематические тренды содержания, которые характерны для холодных звезд типа δ Щита (например, в случае звезды 44 Тау избыток тяжелых элементов составляет 0.3 dex).

БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы благодарят Национальный комитет по тематике российских телескопов НКТРТ (<https://www.sao.ru/hq/Komitet/>) за выделение наблюдательного времени. Наблюдения на телескопах

САО РАН выполняются при поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации. Обновление приборной базы осуществляется в рамках национального проекта «Наука и университеты». В настоящей работе использовались сведения из астрономических баз данных SIMBAD и VizieR. В эту статью включены данные, собранные миссией TESS. Финансирование миссии TESS обеспечивает Управление научных миссий НАСА. Авторы благодарят В. А. Васюка за реализацию пакета ORBIT в среде SQL.

ФИНАНСИРОВАНИЕ

Данная работа выполнена в рамках гранта Министерства науки и высшего образования Российской Федерации № 075-15-2022-262 (13.МНПМУ.21.0003).

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. H. A. Abt, *Astrophys. J. Suppl.*, **11**, 429 (1965). DOI:10.1086/190120
2. H. A. Abt and S. G. Levy, *Astrophys. J.*, **188**, 291 (1974). DOI:10.1086/152716
3. M. Asplund, A. M. Amarsi, and N. Grevesse, *Astron. and Astrophys.* **653**, id. A141 (2021). DOI:10.1051/0004-6361/202140445
4. C. Bailer-Jones, J. Rybizki, M. Fouesneau, et al., *Astron. J.* **161** (3), id. 147 (2021). DOI:10.3847/1538-3881/abd806
5. I. I. Balega, Y. Y. Balega, K.-H. Hofmann, et al., *Astron. and Astrophys.* **385** (1), 87 (2002). DOI:10.1051/0004-6361:20020005
6. D. E. Blackwell and M. J. Shallis, *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **180**, 177 (1977). DOI:10.1093/mnras/180.2.177
7. L. Bourges, S. Lafrasse, G. Mella, et al., *ASP Conf. Ser.* **485**, 223 (2014).
8. M. Breger, J. Stich, R. Garrido, et al., *Astron. and Astrophys.*, **271**, 482 (1993).
9. F. Castelli and R. L. Kurucz, *Proc. IAU Symp. No. 210*, Ed. by N. Piskunov, W. W. Weiss, and D. F. Gray (Astron. Soc. Pac., 2003), poster A20. DOI:10.48550/arXiv.astro-ph/0405087.
10. C. H. Chen, T. Mittal, M. Kuchner, et al., *Astrophys. J. Suppl.* **211** (2), article id. 25 (2014). DOI:10.1088/0067-0049/211/2/25
11. S. Christophe, J. Ballot, R.-M. Ouazzani, et al., *Astron. and Astrophys.* **618**, id. A47 (2018). DOI:10.1051/0004-6361/201832782

12. A. N. Cox, *Allen's astrophysical quantities*, 4th ed. (AIP Press, Springer, New York, 2000).
13. R. Cutri, M. Skrutskie, S. Van Dyk, et al., The IRSA 2MASS All-Sky Point Source Catalog, NASA/IPAC Infrared Science (online at <http://wise2.ipac.caltech.edu/docs/release/allsky/expsup/index.html>)
14. R. Cutri, E. Wright, T. Conrow, et al., Explanatory Supplement to the WISE All-Sky Data Release Products (2012) (online at: <http://wise2.ipac.caltech.edu/docs/release/allsky/expsup/index.html>).
15. T. J. Deeming, *Astrophys. and Space Sci.* **36**, 137 (1975). DOI:10.1007/BF00681947
16. A. Dotter, *Astrophys. J. Suppl.* **222** (1), article id. 8 (2016). DOI:10.3847/0067-0049/222/1/8
17. V. Dyachenko, A. Richichi, Y. Balega, et al., *ASP Conf. Ser.* **518**, 156 (2019).
18. ESA Special Publication, *The Hipparcos and Tycho catalogues. Astrometric and photometric star catalogues derived from the ESA HIPPARCOS Space Astrometry Mission*, Vol. 1200 (ESA Publications Division, Noordwijk, Netherlands, 1997).
19. T. Fetherolf, J. Pepper, E. Simpson, et al., *Astrophys. J. Suppl. Ser.* **268** (1), id. 4 (2023). DOI:10.3847/1538-4365/acdee5
20. Gaia Collab., *VizieR Online Data Catalog I/350* (2020). DOI:10.26093/cds/vizier.1350
21. Gaia Collab., *VizieR Online Data Catalog I/355* (2022). DOI:10.26093/cds/vizier.1355
22. R. O. Gray, C. J. Corbally, R. F. Garrison, et al., *Astron. J.* **126** (4), 2048 (2003). DOI:10.1086/378365
23. B. Gustafsson, B. Edvardsson, K. Eriksson, et al., *Astron. and Astrophys.* **486** (3), 951 (2008). DOI:10.1051/0004-6361/200809724
24. B. Hauck, *Astron. and Astrophys.* **11**, 79 (1971).
25. B. Hauck and M. Mermilliod, *Astron. and Astrophys. Suppl.* **129**, 431 (1998). DOI:10.1051/aas:1998195
26. R. B. Hindsley and R. S. Harrington, *Astron. J.* **107** (1), 280 (1994). DOI:10.1086/116852
27. D. Ishihara, T. Onaka, H. Kataza, et al., *Astron. and Astrophys.* **514**, id. A1 (2010). DOI:10.1051/0004-6361/200913811
28. R. Ismailov, *Astron. and Astrophys. Suppl.* **96**, 375 (1992).
29. J. M. Jenkins, J. D. Twicken, S. McCauliff, *SPIE Conf. Proc.* **9913**, id. 99133E (2016). DOI:10.1117/12.2233418
30. H. L. Johnson, R. I. Mitchell, B. Iriarte, and W. Z. Wisniewski, *Communications of the Lunar and Planetary Laboratory* **4**, 99 (1966).
31. A. Kaiser, *ASP Conf. Ser.* **349**, p. 257 (2006).
32. A. B. Kaye, G. Handler, K. Krisciunas, et al., *Publ. Astron. Soc. Pacific* **111** (761), 840 (1999). DOI:10.1086/316399
33. O. Kochukhov, BinMag: Widget for comparing stellar observed with theoretical spectra, *Astrophysics Source Code Library*, record ascl:1805.015 (2018).
34. O. P. Kochukhov, in *Proc. Intern. Conf. on Physics of Magnetic Stars, Special Astrophysical Observatory RAS, Nizhnii Arkhyz, 2006*, Ed. by I. I. Romanyuk, D. O. Kudryavtsev, O. M. Neizvestnaya, and V. M. Shapoval (Special Astrophysical Observatory RAS, Nizhnii Arkhyz, 2007) p. 109. DOI:10.48550/arXiv.astro-ph/0701084
35. D. O. Kudryavtsev, *Baltic Astronomy* **9**, 649 (2000). DOI:10.1515/astro-2000-0438
36. D. Kurtz, *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **213** (4), 773 (1985). DOI:10.1093/mnras/213.4.773
37. A. Labeyrie, *Astron. and Astrophys.* **6**, 85 (1970).
38. R. Lallement, J. Vergely, C. Babusiaux, and N. Cox, *Astron. and Astrophys.* **661**, id. A147 (2022). DOI:10.1051/0004-6361/202142846
39. G. Li, T. R. Bedding, S. J. Murphy, et al., *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **482** (2), 1757 (2019).
40. G. Li, T. Van Reeth, T. R. Bedding, et al., *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **491** (3), 3586 (2020). DOI:10.1093/mnras/stz2906
41. A. W. Lohmann, G. Weigelt, and B. Wirtzner, *Applied Optics* **22** (24), 4028 (1983). DOI:10.1364/AO.22.004028
42. A. Maksimov, Y. Y. Balega, V. Dyachenko, et al., *Astrophysical Bulletin* **64**, 296 (2009). DOI:10.1134/S1990341309030092
43. L. Mashonkina, T. Ryabchikova, S. Alexeeva, et al., *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **499** (3), 3706 (2020). DOI:10.1093/mnras/staa3099
44. I. McDonald, A. A. Zijlstra, and R. A. Watson, *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **471** (1), 770 (2017).
45. D. G. Monet, *Astrophys. J.* **214**, L133 (1977). DOI:10.1086/182458
46. M. H. Montgomery and D. O'Donoghue, *Delta Scuti Star Newsletter* **13**, 28 (1999).
47. M. Morel and P. Magnenat, *Astron. and Astrophys. Suppl.* **34**, 477 (1978).
48. M. Obolentseva, V. Dyachenko, M. Pogodin, et al., *Astrophysical Bulletin* **76** (3), 292 (2021). DOI:10.1134/S1990341321030093
49. R.-M. Ouazzani, S. Salmon, V. Antoci, et al., *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **465** (2), 2294 (2017). DOI:10.1093/mnras/stw2717
50. M. J. Pecaut and E. E. Mamajek, *Astrophys. J. Suppl. Ser.* **208** (1), article id. 9 (2013). DOI:10.1088/0067-0049/208/1/9
51. M. G. Pedersen, C. Aerts, P. I. Pápics, et al., *Nature Astronomy* **5**, 715 (2021). DOI:10.1038/s41550-021-01351-x
52. M. A. Perryman, L. Lindegren, J. Kovalevsky, et al., *Astron. and Astrophys.*, **323**, L49 (1997).
53. N. Piskunov and J. A. Valenti, *Astron. and Astrophys.* **597**, id. A16 (2017). DOI:10.1051/0004-6361/201629124
54. E. Pluzhnik, *Astron. and Astrophys.* **431** (2), 587 (2005). DOI:10.1051/0004-6361:20041158

55. D. Pourbaix, A. A. Tokovinin, A. H. Batten, et al., *Astron. and Astrophys.* **424** (2), 727 (2004). DOI:10.1051/0004-6361:20041213
56. A. Richichi, S. Ragland, G. Calamai, et al., *Astron. and Astrophys.* **361**, 594 (2000).
57. G. R. Ricker, J. N. Winn, R. Vanderspek, et al., *J. Astronomical Telescopes, Instruments, and Systems* **1** (1), id. 014003 (2015). DOI:10.1117/1.JATIS.1.1.014003
58. G. Rieke, K. Su, G. Sloan, and E. Schlafin, *The Astron. J.* **163** (2), id. 45 (2022). DOI:10.3847/1538-3881/ac3b5d
59. A. M. Romanovskaya, in *Proc. 50th Intern. Student Scientific Conf. on Space Physics, Yekaterinburg, 2023*, Ed. by E. D. Kuznetsov (Ural Federal University, Yekaterinburg, 2023), pp. 437–439 (<http://elar.ufu.ru/handle/10995/124837>) [in Russian]
60. T. Ryabchikova, N. Piskunov, R. L. Kurucz, et al., *Physica Scripta* **90** (5), article id. 054005 (2015). DOI:10.1088/0031-8949/90/5/054005
61. T. Ryabchikova, N. Piskunov, Y. Pakhomov, et al., *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **456** (2), 1221 (2016). DOI:10.1093/mnras/stv2725
62. E. Schatzman, *Annales d'Astrophysique*, **25**, 18 (1962).
63. E. A. Semenko, I. I. Romanyuk, I. A. Yakunin, et al., *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **515** (1), 998 (2022). DOI:10.1093/mnras/stac1864
64. E. A. Semenko, I. I. Romanyuk, D. O. Kudryavtsev, and I. A. Yakunin, *Astrophysical Bulletin* **69** (2), 191 (2014). DOI:10.1134/S1990341314020060
65. D. Shulyak, V. Tsymbal, T. Ryabchikova, et al., *Astron. and Astrophys.* **428**, 993 (2004). DOI:10.1051/0004-6361:20034169
66. T. M. Sitnova, S. A. Yakovleva, A. K. Belyaev, and L. I. Mashonkina, *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **515** (1), 1510 (2022). DOI:10.1093/mnras/stac1813
67. K. G. Stassun, R. J. Oelkers, J. Pepper, et al., *Astron. J.* **156** (3), article id. 102 (2018). DOI:10.3847/1538-3881/aad050
68. M. Takata, R.-M. Ouazzani, H. Saio, et al., *Astron. and Astrophys.* **635**, id. A106 (2020). DOI:10.1051/0004-6361/201936297
69. A. Tokovinin, *Astron. and Astrophys. Suppl.* **61**, 483 (1985).
70. A. Tokovinin, *ASP Conf. Ser.* **32**, 573 (1992).
71. A. Tokovinin, B. D. Mason, R. A. Mendez, et al., *Astron. J.* **160** (1), id. 7 (2020). DOI:10.3847/1538-3881/ab91c1
72. V. Tsymbal, *ASP Conf. Ser.*, **108**, 198 (1996).
73. J. A. Valenti and N. Piskunov, *Astron. and Astrophys. Suppl.* **118**, 595 (1996).
74. T. Van Reeth, J. Mombarg, S. Mathis, et al., *Astron. and Astrophys.* **618**, id. A24 (2018). DOI:10.1051/0004-6361/201832718
75. T. Van Reeth, A. Tkachenko, and C. Aerts, *Astron. and Astrophys.* **593**, id. A120 (2016). DOI:10.1051/0004-6361/201628616
76. T. Van Reeth, A. Tkachenko, C. Aerts, et al., *Astron. and Astrophys.* **574**, id. A17 (2015). DOI:10.1051/0004-6361/201424585

Study of the μ Ceti Binary with Speckle Interferometric, Photometric, and Spectroscopic Techniques

V. V. Dyachenko¹, I. A. Yakunin¹, R. M. Bayazitov², S. A. Grigoriev², T. A. Ryabchikova³, Yu. V. Pakhomov³, E. A. Semenko⁴, A. S. Beskakov¹, A. A. Mitrofanova¹, A. F. Maksimov¹, and Yu. Yu. Balega¹

¹Special Astrophysical Observatory, Russian Academy of Sciences, Nizhnii Arkhyz, 369167 Russia

²Kazan (Volga Region) Federal University, Kazan, 420008 Russia

³Institute of Astronomy, Russian Academy of Sciences, Moscow, 119017 Russia

⁴National Astronomical Research Institute of Thailand, Mae Rim, Chiang Mai 50180 Thailand

We present a refined speckle-interferometric orbit of a binary system μ Ceti, with the main component studied based on the analysis of photometric and spectroscopic data, obtained with the SAO RAS 6-m telescope. The object was initially classified as a giant with chemical composition anomalies. As a result of our analysis, we conclude that the star belongs to the Main Sequence, to the class of non-peculiar stars. Analysis of photometric data from the TESS mission indicates that the main component of the system belongs to the γ Dor pulsators.

Keywords: *techniques: high angular resolution—stars: fundamental parameters—stars: double and multiples—stars: individual: HD 17094*