

УДК 524.338.5-14

ZZ TAU IRS: МАЛОМАССИВНАЯ ЗВЕЗДА ТИПА UX ORI С ИНТЕНСИВНЫМ ВЕТРОМ

© 2024 М. А. Бурлак¹, А. В. Додин¹, А. В. Жарова¹,
С. Г. Желтоухов¹, Н. П. Иконникова¹, С. А. Ламзин^{1*},
С. А. Потанин¹, Б. С. Сафонов¹, И. А. Страхов¹, А. М. Татарников¹

¹Государственный астрономический институт им. П. К. Штернберга МГУ имени М. В. Ломоносова,
Москва, 119234 Россия

Поступила в редакцию 2 ноября 2023 года; после доработки 1 декабря 2023 года; принята к публикации 4 декабря 2023 года

Представлены результаты фотометрических, поляриметрических и спектральных наблюдений молодой звезды ZZ Tau IRS в видимой и ближней ИК-областях. На фоне континуума звезды спектрального класса M отождествлено около 50 эмиссионных линий как дипольно-разрешенных переходов (H I, He I, Na I, Ca II), так и запрещенных (O I, O II, O III, N I, N II, S II, Ca II, Fe II, Ni II). Обнаружено, что с осени 2020 г. до начала 2023 г. блеск звезды в видимой области спектра падал ($\Delta I \approx 1^{\text{m}5}$), а затем начал возвращаться к исходному уровню. При ослаблении блеска показатели цвета уменьшались в видимой области спектра, но возрастали в ближней ИК-области. В минимуме блеска степень поляризации в полосе I достигала почти 13%, а эквивалентные ширины линий H α и [S II] λ 6731 выросли до 376 Å и 79 Å соответственно. Приведены аргументы в пользу того, что ZZ Tau IRS — звезда типа UX Ori, а ее переменность связана с затмениями пылевыми облаками, которые представляют собой неоднородности в запыленном дисковом ветре. Запрещенные линии формируются как в дисковом ветре, так и в джете, ось которого ориентирована вдоль $PA = 61^\circ \pm 3^\circ$. Поток массы, уносимой джетом, превышает $5 \times 10^{-10} M_\odot \text{ год}^{-1}$, что аномально велико для звезды с массой меньше $0.3 M_\odot$. Дисковый ветер ZZ Tau IRS, по-видимому, не является аксиально симметричным, вероятно, из-за азимутальной асимметрии протопланетного диска, обнаруженной ранее с помощью интерферометра ALMA.

Ключевые слова: МЗС: джеты и истечения — звезды: переменные: Т Тельца, Ae/Be Хербига — звезды: отдельные: ZZ Tau IRS

1. ВВЕДЕНИЕ

Strom et al. (1989) пришли к выводу, что ИК-источнику IRAS 04278+2435 (Rucinski, 1985) в видимом диапазоне соответствует молодая звезда, расположенная примерно в $35''$ к югу от ZZ Tau. Kenyon and Hartmann (1995) нашли, что светимость этой звезды в далеком инфракрасном диапазоне составляет более 50% ее болометрической светимости, и на этом основании назвали звезду ZZ Tau IRS.

Паралакс ZZ Tau IRS по данным Gaia EDR3 (id 147869573608324992) равен $9.46 \pm 0.61 \text{ mas}$, что соответствует расстоянию $103.7 \pm 6.7 \text{ пк}$ (Prusti et al., 2016; Brown et al., 2020). Однако Hashimoto et al. (2021) отметили, что ошибка соответствующего астрометрического решения ($RUWE = 2.49$) для этой звезды велика, поэтому в дальнейшем мы

будем использовать расстояние $d \approx 130 \text{ пк}$ (Akeson et al., 2019).

White and Hillenbrand (2004) получили первый (и пока единственный) спектр высокого разрешения этой слабой¹⁾ звезды в видимой области ($0.635\text{--}0.874 \text{ мкм}$). На основе анализа этого спектра они заключили, что ZZ Tau IRS — классическая звезда типа Т Тельца (CTTS) спектрального класса $M 4.5 \pm 2$ с большим поглощением ($A_V = 7^{\text{m}6}$) и аномально сильными эмиссионными линиями (например, эквивалентная ширина (EW) линий H α и [S II] λ 6731 составляет 238 и 77 Å соответственно). Чтобы объяснить эти особенности, авторы предположили, что ZZ Tau IRS окружена

¹⁾Согласно «The Second-Generation Guide Star Catalog» (Lasker et al., 2008), $V = 18^{\text{m}}17 \pm 0^{\text{m}}39$, $B = 18^{\text{m}}70 \pm 0^{\text{m}}39$, но в каталоге указана только средняя эпоха $t = 1994.776$ (по крайней мере, двух) наблюдений, из которых получены эти данные.

*E-mail: lamzin@sai.msu.ru

протопланетным диском, который мы видим почти с ребра.

Спектроскопические наблюдения с низким разрешением ($R \approx 3000$) в целом подтвердили этот вывод. Guieu et al. (2006) нашли, что спектральный класс звезды M 5.25 ($T_{\text{eff}} = 3100$ K), но экстинкция существенно меньше: $A_V = 2^{\text{m}}4$. Еще меньшее значение экстинкции $A_V = 1^{\text{m}}7$ получили Herczeg and Hillenbrand (2014) при почти таком же значении $T_{\text{eff}} = 3077 \pm 32$ K. Несмотря на столь малую величину T_{eff} и большую величину экстинкции, излучение ZZ Tau IRS было зарегистрировано космической обсерваторией GALEX в ближнем ($\lambda_{\text{eff}} = 0.23$ мкм) и дальнем ($\lambda_{\text{eff}} = 0.15$ мкм) ультрафиолетовом диапазоне: $m_{\text{NUV}} = 21^{\text{m}}53 \pm 0^{\text{m}}29$ и $m_{\text{FUV}} = 21^{\text{m}}02 \pm 0^{\text{m}}23$ (Bianchi et al., 2017).

Наблюдения Hashimoto et al. (2021), выполненные с помощью радиоинтерферометра ALMA, позволили обнаружить вокруг ZZ Tau IRS протопланетный диск, большая ось изображения которого имела позиционный угол $PA \approx 135^\circ$, а ось вращения наклонена к лучу зрения под углом около 60° . Hashimoto et al. (2021) также нашли, что масса ZZ Tau IRS лежит в диапазоне от $0.1 M_\odot$ до $0.3 M_\odot$, что согласуется с оценкой $M = 0.1\text{--}0.2 M_\odot$, сделанной на основе спектральных наблюдений в видимом диапазоне (Andrews et al., 2013; Herczeg and Hillenbrand, 2014).

На изображении, полученном в линиях [S II] $\lambda(6716 + 6731)$, Gomez et al. (1997) обнаружили диффузную туманность примерно в $28''$ к юго-западу от ZZ Tau IRS — объект Хербига—Аро HN 393. Позднее в окрестности звезды были обнаружены еще две эмиссионные туманности, которые имели форму волокон. Одну из туманностей, расположенную к северо-западу от звезды, нашел Hodapp (1994) на изображении в фильтре K' , в полосу пропускания которого попадают линии H_2 ($\lambda = 2.12$ мкм) и $\text{Br}\gamma$. Второе волокно обнаружили Bally et al. (2012) на изображении в фильтре $\text{H}\alpha$ юго-западнее звезды. Физические параметры и кинематика волоконистых туманностей и объекта HN 393 были проанализированы в работе Dodin et al. (2023).

Статья организована следующим образом. В разделе 2 мы описываем выполненные нами наблюдения, в разделе 3 рассказываем о полученных результатах, а в разделе 4 предлагаем их интерпретацию. В заключении мы суммируем и обобщаем наши выводы.

2. НАБЛЮДЕНИЯ

Фотометрия ZZ Tau IRS в видимом диапазоне была получена на 60-см телескопе Кавказской

горной обсерватории Государственного астрономического института им. Штернберга Московского государственного университета имени Ломоносова (ГАИШ МГУ), оснащенной CCD-камерой с набором BVR_cI_c фильтров системы Бесселя—Казинса (Verdnikov et al., 2020). Блеск звезд сравнения был взят с сайта AAVSO²⁾. Отметим, что наши оценки блеска в полосе B , по-видимому, несколько завышены вследствие так называемого эффекта «красной утечки» (Nikishev et al., 2023), который трудно оценить количественно для столь слабой и красной звезды.

Мы не нашли в литературе данных о фотометрических наблюдениях ZZ Tau IRS в видимой области спектра, не считая упомянутых в разделе 1, поэтому попытались найти звезду на фотопластинках коллекции ГАИШ МГУ, полученных в период с 26 марта 1965 г. по 18 февраля 1988 г. Было просмотрено около 300 фотопластинок с центром на звезде RY Tau в фотометрической системе, близкой к полосе B Джонсона. Предельная звездная величина фотопластинок варьировалась между $B \approx 17^{\text{m}}\text{--}18^{\text{m}}$, и нам удалось найти ZZ Tau IRS на девяти пластинках — см. таблицу 1, в которой, как и в дальнейшем, мы пользуемся сокращенной юлианской датой $\text{rJD} = \text{JD} - 2400000$.

Фотометрические наблюдения ZZ Tau IRS в ближнем инфракрасном (ИК) диапазоне проводились в полосах $YJHK$ фотометрической системы МКО-NIR на 2.5-м телескопе КГО ГАИШ МГУ с помощью ИК-камеры-спектрографа ASTRONIRCAM (Nadjip et al., 2017). Описание наблюдений и обработка данных приведены в статье Tatarnikov et al. (2023). Результаты наших измерений, а также данные, найденные в литературе, представлены в таблице 2.

В феврале 2023 г. на 2.5-м телескопе КГО ГАИШ МГУ была введена в эксплуатацию еще одна камера ИК-диапазона LM³⁾, с помощью которой мы измерили блеск звезды в полосах L ($\lambda_c = 3.7$ мкм, $\Delta\lambda_{0.5} = 0.49$ мкм) и M ($\lambda_c = 4.8$ мкм, $\Delta\lambda_{0.5} = 0.54$ мкм).

Поляриметрические наблюдения в полосе I_c были выполнены на том же 2.5-м телескопе с помощью спекл-поляриметра SPP (Safonov et al., 2017). Детали процесса наблюдений и их обработки описаны в статье Dodin et al. (2019), а полученные результаты представлены в таблице 3.

Спектры ZZ Tau IRS были получены нами с помощью спектрографа TDS (Transient Double-beam Spectrograph). Описание прибора и методика обработки наблюдений приведены в статье Potanin

²⁾<https://www.aavso.org>

³⁾LM-фотометр с детектором Gavin615A (Zheltoukhov and Tatarnikov, 2022)

УДК 524.338.5-14

ZZ TAU IRS: МАЛОМАССИВНАЯ ЗВЕЗДА ТИПА UX ORI С ИНТЕНСИВНЫМ ВЕТРОМ

© 2024 М. А. Бурлак¹, А. В. Додин¹, А. В. Жарова¹,
С. Г. Желтоухов¹, Н. П. Иконникова¹, С. А. Ламзин^{1*},
С. А. Потанин¹, Б. С. Сафонов¹, И. А. Страхов¹, А. М. Татарников¹

¹Государственный астрономический институт им. П. К. Штернберга МГУ имени М. В. Ломоносова,
Москва, 119234 Россия

Поступила в редакцию 2 ноября 2023 года; после доработки 1 декабря 2023 года; принята к публикации 4 декабря 2023 года

Представлены результаты фотометрических, поляриметрических и спектральных наблюдений молодой звезды ZZ Tau IRS в видимой и ближней ИК-областях. На фоне континуума звезды спектрального класса M отождествлено около 50 эмиссионных линий как дипольно-разрешенных переходов (H I, He I, Na I, Ca II), так и запрещенных (O I, O II, O III, N I, N II, S II, Ca II, Fe II, Ni II). Обнаружено, что с осени 2020 г. до начала 2023 г. блеск звезды в видимой области спектра падал ($\Delta I \approx 1^{\text{m}5}$), а затем начал возвращаться к исходному уровню. При ослаблении блеска показатели цвета уменьшались в видимой области спектра, но возрастали в ближней ИК-области. В минимуме блеска степень поляризации в полосе I достигала почти 13%, а эквивалентные ширины линий H α и [S II] λ 6731 выросли до 376 Å и 79 Å соответственно. Приведены аргументы в пользу того, что ZZ Tau IRS — звезда типа UX Ori, а ее переменность связана с затмениями пылевыми облаками, которые представляют собой неоднородности в запыленном дисковом ветре. Запрещенные линии формируются как в дисковом ветре, так и в джете, ось которого ориентирована вдоль $PA = 61^\circ \pm 3^\circ$. Поток массы, уносимой джетом, превышает $5 \times 10^{-10} M_\odot \text{ год}^{-1}$, что аномально велико для звезды с массой меньше $0.3 M_\odot$. Дисковый ветер ZZ Tau IRS, по-видимому, не является аксиально симметричным, вероятно, из-за азимутальной асимметрии протопланетного диска, обнаруженной ранее с помощью интерферометра ALMA.

Ключевые слова: МЗС: джеты и истечения — звезды: переменные: Т Тельца, Ae/Be Хербига — звезды: отдельные: ZZ Tau IRS

1. ВВЕДЕНИЕ

Strom et al. (1989) пришли к выводу, что ИК-источнику IRAS 04278+2435 (Rucinski, 1985) в видимом диапазоне соответствует молодая звезда, расположенная примерно в $35''$ к югу от ZZ Tau. Kenyon and Hartmann (1995) нашли, что светимость этой звезды в далеком инфракрасном диапазоне составляет более 50% ее болометрической светимости, и на этом основании назвали звезду ZZ Tau IRS.

Паралакс ZZ Tau IRS по данным Gaia EDR3 (id 147869573608324992) равен $9.46 \pm 0.61 \text{ mas}$, что соответствует расстоянию $103.7 \pm 6.7 \text{ пк}$ (Prusti et al., 2016; Brown et al., 2020). Однако Hashimoto et al. (2021) отметили, что ошибка соответствующего астрометрического решения ($RUWE = 2.49$) для этой звезды велика, поэтому в дальнейшем мы

будем использовать расстояние $d \approx 130 \text{ пк}$ (Akeson et al., 2019).

White and Hillenbrand (2004) получили первый (и пока единственный) спектр высокого разрешения этой слабой¹⁾ звезды в видимой области ($0.635\text{--}0.874 \text{ мкм}$). На основе анализа этого спектра они заключили, что ZZ Tau IRS — классическая звезда типа Т Тельца (CTTS) спектрального класса $M 4.5 \pm 2$ с большим поглощением ($A_V = 7^{\text{m}6}$) и аномально сильными эмиссионными линиями (например, эквивалентная ширина (EW) линий H α и [S II] λ 6731 составляет 238 и 77 Å соответственно). Чтобы объяснить эти особенности, авторы предположили, что ZZ Tau IRS окружена

¹⁾Согласно «The Second-Generation Guide Star Catalog» (Lasker et al., 2008), $V = 18^{\text{m}}17 \pm 0^{\text{m}}39$, $B = 18^{\text{m}}70 \pm 0^{\text{m}}39$, но в каталоге указана только средняя эпоха $t = 1994.776$ (по крайней мере, двух) наблюдений, из которых получены эти данные.

*E-mail: lamzin@sai.msu.ru

протопланетным диском, который мы видим почти с ребра.

Спектроскопические наблюдения с низким разрешением ($R \approx 3000$) в целом подтвердили этот вывод. Guieu et al. (2006) нашли, что спектральный класс звезды M 5.25 ($T_{\text{eff}} = 3100$ K), но экстинкция существенно меньше: $A_V = 2^{\text{m}}4$. Еще меньшее значение экстинкции $A_V = 1^{\text{m}}7$ получили Herczeg and Hillenbrand (2014) при почти таком же значении $T_{\text{eff}} = 3077 \pm 32$ K. Несмотря на столь малую величину T_{eff} и большую величину экстинкции, излучение ZZ Tau IRS было зарегистрировано космической обсерваторией GALEX в ближнем ($\lambda_{\text{eff}} = 0.23$ мкм) и дальнем ($\lambda_{\text{eff}} = 0.15$ мкм) ультрафиолетовом диапазоне: $m_{\text{NUV}} = 21^{\text{m}}53 \pm 0^{\text{m}}29$ и $m_{\text{FUV}} = 21^{\text{m}}02 \pm 0^{\text{m}}23$ (Bianchi et al., 2017).

Наблюдения Hashimoto et al. (2021), выполненные с помощью радиointерферометра ALMA, позволили обнаружить вокруг ZZ Tau IRS протопланетный диск, большая ось изображения которого имела позиционный угол $PA \approx 135^\circ$, а ось вращения наклонена к лучу зрения под углом около 60° . Hashimoto et al. (2021) также нашли, что масса ZZ Tau IRS лежит в диапазоне от $0.1 M_\odot$ до $0.3 M_\odot$, что согласуется с оценкой $M = 0.1\text{--}0.2 M_\odot$, сделанной на основе спектральных наблюдений в видимом диапазоне (Andrews et al., 2013; Herczeg and Hillenbrand, 2014).

На изображении, полученном в линиях [S II] $\lambda(6716 + 6731)$, Gomez et al. (1997) обнаружили диффузную туманность примерно в $28''$ к юго-западу от ZZ Tau IRS — объект Хербига—Аро HN 393. Позднее в окрестности звезды были обнаружены еще две эмиссионные туманности, которые имели форму волокон. Одну из туманностей, расположенную к северо-западу от звезды, нашел Hodapp (1994) на изображении в фильтре K' , в полосу пропускания которого попадают линии H_2 ($\lambda = 2.12$ мкм) и $\text{Br}\gamma$. Второе волокно обнаружили Bally et al. (2012) на изображении в фильтре $\text{H}\alpha$ юго-западнее звезды. Физические параметры и кинематика волоконистых туманностей и объекта HN 393 были проанализированы в работе Dodin et al. (2023).

Статья организована следующим образом. В разделе 2 мы описываем выполненные нами наблюдения, в разделе 3 рассказываем о полученных результатах, а в разделе 4 предлагаем их интерпретацию. В заключении мы суммируем и обобщаем наши выводы.

2. НАБЛЮДЕНИЯ

Фотометрия ZZ Tau IRS в видимом диапазоне была получена на 60-см телескопе Кавказской

горной обсерватории Государственного астрономического института им. Штернберга Московского государственного университета имени Ломоносова (ГАИШ МГУ), оснащенной CCD-камерой с набором BVR_cI_c фильтров системы Бесселя—Казинса (Verdnikov et al., 2020). Блеск звезд сравнения был взят с сайта AAVSO²⁾. Отметим, что наши оценки блеска в полосе B , по-видимому, несколько завышены вследствие так называемого эффекта «красной утечки» (Nikishev et al., 2023), который трудно оценить количественно для столь слабой и красной звезды.

Мы не нашли в литературе данных о фотометрических наблюдениях ZZ Tau IRS в видимой области спектра, не считая упомянутых в разделе 1, поэтому попытались найти звезду на фотопластинках коллекции ГАИШ МГУ, полученных в период с 26 марта 1965 г. по 18 февраля 1988 г. Было просмотрено около 300 фотопластинок с центром на звезде RY Tau в фотометрической системе, близкой к полосе B Джонсона. Предельная звездная величина фотопластинок варьировалась между $B \approx 17^{\text{m}}\text{--}18^{\text{m}}$, и нам удалось найти ZZ Tau IRS на девяти пластинках — см. таблицу 1, в которой, как и в дальнейшем, мы пользуемся сокращенной юлианской датой $\text{rJD} = \text{JD} - 2400000$.

Фотометрические наблюдения ZZ Tau IRS в ближнем инфракрасном (ИК) диапазоне проводились в полосах $YJHK$ фотометрической системы МКО-NIR на 2.5-м телескопе КГО ГАИШ МГУ с помощью ИК-камеры-спектрографа ASTRONIRCAM (Nadjip et al., 2017). Описание наблюдений и обработка данных приведены в статье Tatarnikov et al. (2023). Результаты наших измерений, а также данные, найденные в литературе, представлены в таблице 2.

В феврале 2023 г. на 2.5-м телескопе КГО ГАИШ МГУ была введена в эксплуатацию еще одна камера ИК-диапазона LM³⁾, с помощью которой мы измерили блеск звезды в полосах L ($\lambda_c = 3.7$ мкм, $\Delta\lambda_{0.5} = 0.49$ мкм) и M ($\lambda_c = 4.8$ мкм, $\Delta\lambda_{0.5} = 0.54$ мкм).

Поляриметрические наблюдения в полосе I_c были выполнены на том же 2.5-м телескопе с помощью спекл-поляриметра SPP (Safonov et al., 2017). Детали процесса наблюдений и их обработки описаны в статье Dodin et al. (2019), а полученные результаты представлены в таблице 3.

Спектры ZZ Tau IRS были получены нами с помощью спектрографа TDS (Transient Double-beam Spectrograph). Описание прибора и методика обработки наблюдений приведены в статье Potanin

²⁾<https://www.aavso.org>

³⁾LM-фотометр с детектором Gavin615A (Zheltoukhov and Tatarnikov, 2022)

Таблица 1. Фотографические звездные величины

| rJD | m_{pg} | σ_m | rJD | m_{pg} | σ_m | rJD | m_{pg} | σ_m |
|-----------|----------|------------|-----------|----------|------------|-----------|----------|------------|
| 43865.335 | 18.2 | 0.3 | 46466.282 | 17.9 | 0.4 | 46771.384 | 17.9 | 0.5 |
| 46379.420 | 18.4 | 0.5 | 46497.248 | 17.7 | 0.4 | 47200.200 | 17.1 | 0.2 |
| 46406.422 | 18.4 | 0.5 | 46763.322 | 18.8 | 0.5 | 47207.237 | 17.7 | 0.3 |

Таблица 2. Фотометрия ZZ Tau IRS в ближнем ИК-диапазоне

| rJD | J | σ_J | H | σ_H | K | σ_K | rJD | Y | σ_Y | J | σ_J | H | σ_H | K | σ_K |
|-----------------------|-------|------------|-------|------------|-------|------------|-----------------------|-------|------------|-------|------------|-------|------------|-------|------------|
| 48562.75 ^a | 10.33 | 0.02 | 9.37 | 0.02 | 8.72 | 0.03 | 59944.32 ^c | | | 14.28 | 0.01 | 12.61 | 0.01 | 10.84 | 0.01 |
| 50782.77 ^b | 12.84 | 0.02 | 11.44 | 0.03 | 10.31 | 0.02 | 59953.45 ^c | 15.32 | 0.02 | 14.41 | 0.05 | 12.85 | 0.08 | 10.96 | 0.04 |
| 59079.53 ^c | 13.25 | 0.01 | 12.32 | 0.01 | 11.46 | 0.01 | 59954.35 ^c | 15.35 | 0.02 | 14.43 | 0.02 | 12.77 | 0.06 | 10.95 | 0.03 |
| 59084.49 ^c | 13.18 | 0.01 | 12.23 | 0.01 | 11.33 | 0.02 | 59966.15 ^c | 15.09 | 0.03 | 14.10 | 0.02 | 12.37 | 0.05 | 10.42 | 0.05 |
| 59091.57 ^c | 13.19 | 0.01 | 12.26 | 0.01 | 11.40 | 0.01 | 59976.24 ^c | 15.06 | 0.06 | 99.99 | 9.99 | 12.70 | 0.04 | 10.79 | 0.03 |
| 59094.49 ^c | 13.21 | 0.01 | 12.29 | 0.02 | 11.43 | 0.02 | 59985.20 ^c | 15.05 | 0.01 | 14.20 | 0.10 | 12.82 | 0.05 | 11.05 | 0.04 |
| 59551.26 ^c | 13.08 | 0.07 | 12.09 | 0.02 | 11.24 | 0.02 | 60000.17 ^c | 15.02 | 0.03 | 14.11 | 0.02 | 12.68 | 0.05 | 10.94 | 0.03 |
| 59899.24 ^c | 14.15 | 0.03 | 12.53 | 0.03 | 10.91 | 0.02 | 60012.32 ^c | 15.43 | 0.02 | 14.57 | 0.02 | 13.01 | 0.01 | 10.83 | 0.01 |
| 59907.34 ^c | 13.69 | 0.04 | 11.97 | 0.01 | 10.40 | 0.01 | 60188.52 ^c | 14.49 | 0.03 | 13.82 | 0.01 | 12.69 | 0.02 | 11.35 | 0.03 |
| 59915.40 ^c | 13.57 | 0.08 | 11.88 | 0.07 | 10.34 | 0.07 | 60202.50 ^c | 14.42 | 0.01 | 13.57 | 0.01 | 12.22 | 0.03 | 10.83 | 0.02 |
| 59920.32 ^c | 13.53 | 0.02 | 11.84 | 0.02 | 10.29 | 0.01 | | | | | | | | | |

^a — Kenyon and Hartmann (1995); ^b — Cohen et al. (2003); ^c — наши данные.

Таблица 3. Поляриметрия ZZ Tau IRS

| rJD | p , % | σ_p , % | θ , deg | σ_θ , deg |
|----------|---------|----------------|----------------|-----------------------|
| (1) | (2) | (3) | (4) | (5) |
| 59248.31 | 11.33 | 0.22 | 163.5 | 0.6 |
| 59305.21 | 11.12 | 0.34 | 163.8 | 0.9 |
| 59517.42 | 11.62 | 0.27 | 155.1 | 0.7 |
| 59628.27 | 11.14 | 0.38 | 165.0 | 2.0 |
| 59914.14 | 13.21 | 0.67 | 180.6 | 2.9 |
| 60202.55 | 10.3 | 0.4 | 146.0 | 1.0 |

Колонки (2), (3): степень поляризации и ее ошибки; колонки (4), (5): угол поляризации и его ошибки.

et al. (2020), а здесь мы приведем лишь самую необходимую информацию. Спектральная разрешающая сила TDS $R = \lambda/\Delta\lambda \approx 2400$ в красном канале и примерно 1300 в синем канале, что соответствует значениям $FWHM \approx 120$ и 240 км с^{-1} при ширине щели $1''$ — см. рис. 3 в статье Belinski et al. (2023). Калибровка по длинам волн вначале проводилась по лабораторному источнику, а затем

уточнялась по эмиссионным линиям ночного неба. В красном канале остаточный разброс положений теллурических линий составлял $3\text{--}4 \text{ км с}^{-1}$, и этой величиной ограничивалась точность калибровки в этом канале. В синем канале точность калибровки была хуже из-за малого числа теллурических линий. В частности, при $\lambda \gtrsim 5000 \text{ \AA}$, где единственной опорной линией была линия [O I] $\lambda 5577$, точность калибровки около 10 км с^{-1} .

Мы также анализировали спектры высокого разрешения ZZ Tau IRS из архива KOA Keck/HIRES ($R \approx 36\,000$, PI: R. White)⁴). Спектры имеют маркировку «scientific grade», поэтому мы их дополнительно не обрабатывали. Информация о спектральных наблюдениях приведена в таблице 4.

Кроме того, в нашей работе мы использовали изображения окрестностей ZZ Tau IRS, полученные с помощью NBI CCD камеры 2.5-м телескопа⁵) в фильтрах [S II] $\lambda(6716 + 6731)$ и близлежащем континууме [S II]rc — подробности см. в Dodin et al. (2023).

⁴<https://koa.ipac.caltech.edu/cgi-bin/KOA/nph-KOAllogin>

⁵<https://obs.sai.msu.ru/cmo/sai25/wfi/>

Таблица 4. Исследуемые спектры ZZ Tau IRS

| rJD | Spectrograph | $\Delta\lambda$, nm | Δt , min | d , arcsec |
|----------|--------------|----------------------|------------------|--------------|
| 52688.75 | HIRES | 624–868 | 3×15 | 1.2 |
| 59503.55 | TDS | 370–745 | 8×10 | 1.0 |
| 59504.54 | TDS | 370–745 | 8×10 | 1.0 |
| 59516.54 | TDS | 370–745 | 8×10 | 1.0 |
| 59955.27 | TDS | 370–745 | 8×20 | 1.5 |
| 60203.56 | TDS | 370–745 | 3×10 | 1.5 |

Δt — время экспозиции, d — ширина щели.

Еще одно изображение окрестностей звезды взято нами из архива космического телескопа им. Хаббла (HST)⁶. Оно было получено 8 августа 2017 г. в фильтре $F160W$ ($\lambda_0 = 1.55$ мкм, $FWHM = 0.3$ мкм) камеры WFC3/IR. Чтобы увеличить контрастность изображения и устранить дифракционные «лучи», мы из исходного изображения вычли модель распределения сигнала в изображении точечного источника, построенную по трем ближайшим ярким звездам, а затем произвели сглаживание с помощью двумерной функции Гаусса.

3. РЕЗУЛЬТАТЫ

3.1. Фотометрия и поляриметрия

Кривые блеска ZZ Tau IRS в видимой и ближней ИК-областях, построенные на основе наших наблюдений, представлены на рис. 1, причем результаты фотометрии в полосах VRI усреднены внутри каждой ночи для улучшения отношения сигнал/шум (S/N). Из рисунка видно, что в видимой области спектра максимальную амплитуду имеет переменность в полосе I . С августа 2020 г. («яркое» состояние) средний блеск звезды в этой полосе плавно уменьшился от почти 15^m1 примерно на 0^m2 , а в январе–апреле 2022 г. вырос примерно на 0^m1 . Однако в начале нового сезона видимости (август 2022 г.) звезда в полосе I оказалась примерно на 0^m6 слабее, чем в апреле. Позднее (вплоть до апреля 2023 г.) блеск звезды колебался вокруг среднего значения $I \approx 16^m3$ («слабое» состояние), а с конца апреля звезда, по-видимому, начала возвращаться к «яркому» состоянию.

Блеск звезды в полосах R и V менялся аналогичным образом (рис. 2а), причем по мере ослабления блеска показатель цвета ($V - I$) становился

более «голубым» (рис. 2б). Аналогичным образом менялся и показатель цвета ($R - I$), несмотря на то, что вклад эмиссионных линий, особенно $H\alpha$, в полосе пропускания фильтра R увеличивался по мере ослабления блеска (см. раздел 4.3).

Мы полагаем, что фотометрическое поведение ZZ Tau IRS в видимой области объясняется так же, как в случае ускоров (звезд типа UX Ori): по мере ослабления блеска звезды возрастает вклад более «голубого» излучения, рассеянного околозвездной пылью (Grinin, 1988). Дополнительным аргументом в пользу такой интерпретации служит и возрастание степени поляризации в полосе I при переходе звезды из «яркого» в «слабое» состояние (см. рис. 3).

На начальной стадии ослабления блеска ускоры становятся более красными, и только когда блеск звезды падает достаточно сильно, она начинает голубеть (Wenzel, 1969). Отсутствие «стадии покраснения» в случае ZZ Tau IRS, видимо, означает, что уже в 2020 г. рассеянный свет доминировал в видимой области спектра. Этот вывод подтверждается тем, что в 1980-х годах звезда в полосе B была ярче, чем в 2020–2021 гг., что видно из рис. 4, построенного по результатам наших фотометрических наблюдений, и таблицы 1. Кроме того, степень поляризации излучения ZZ Tau IRS p_I в «ярком» состоянии превышала 11% (см. таблицу 3) — насколько нам известно, большее значение p_I у ускоров наблюдалось только в случае RW Aur A (Dodin et al., 2019).

Отметим также, что угол поляризации исследуемого нами объекта в «ярком» состоянии $\theta \approx 160^\circ$ близок к позиционному углу большой оси изображения протопланетного диска звезды $PA_{\text{disk}} = 135^\circ$ (Hashimoto et al., 2021). Такая ориентация поляризации соответствует ситуации, когда свет рассеивается пылевой оболочкой, вытянутой вдоль оси вращения диска, а не самим диском (Whitney and Hartmann, 1993).

Как видно из рис. 2а, постепенное ослабление блеска звезды в видимом диапазоне в 2020–2021 гг. сопровождалось небольшим повышением яркости в полосах JHK . После перехода звезды в «слабое» состояние в видимом диапазоне ее блеск в полосах J и H , наоборот, достиг максимума и затем начал уменьшаться, тогда как яркость в полосе K продолжала расти. На протяжении всего периода наших наблюдений чем ярче была звезда в ближней ИК-области, тем «красней» становились показатели цвета ($H - K$) (см. рис. 2а) и ($J - H$).

Из анализа таблицы 2 следует, что тридцать лет назад ZZ Tau IRS была гораздо ярче в ближней ИК-области. Например, 2 ноября 1991 г. в полосе K звезда была ярче примерно на 2^m5 (Kenyon and

⁶PI: T. Megeath, Proposal ID:14181, <https://mast.stsci.edu>

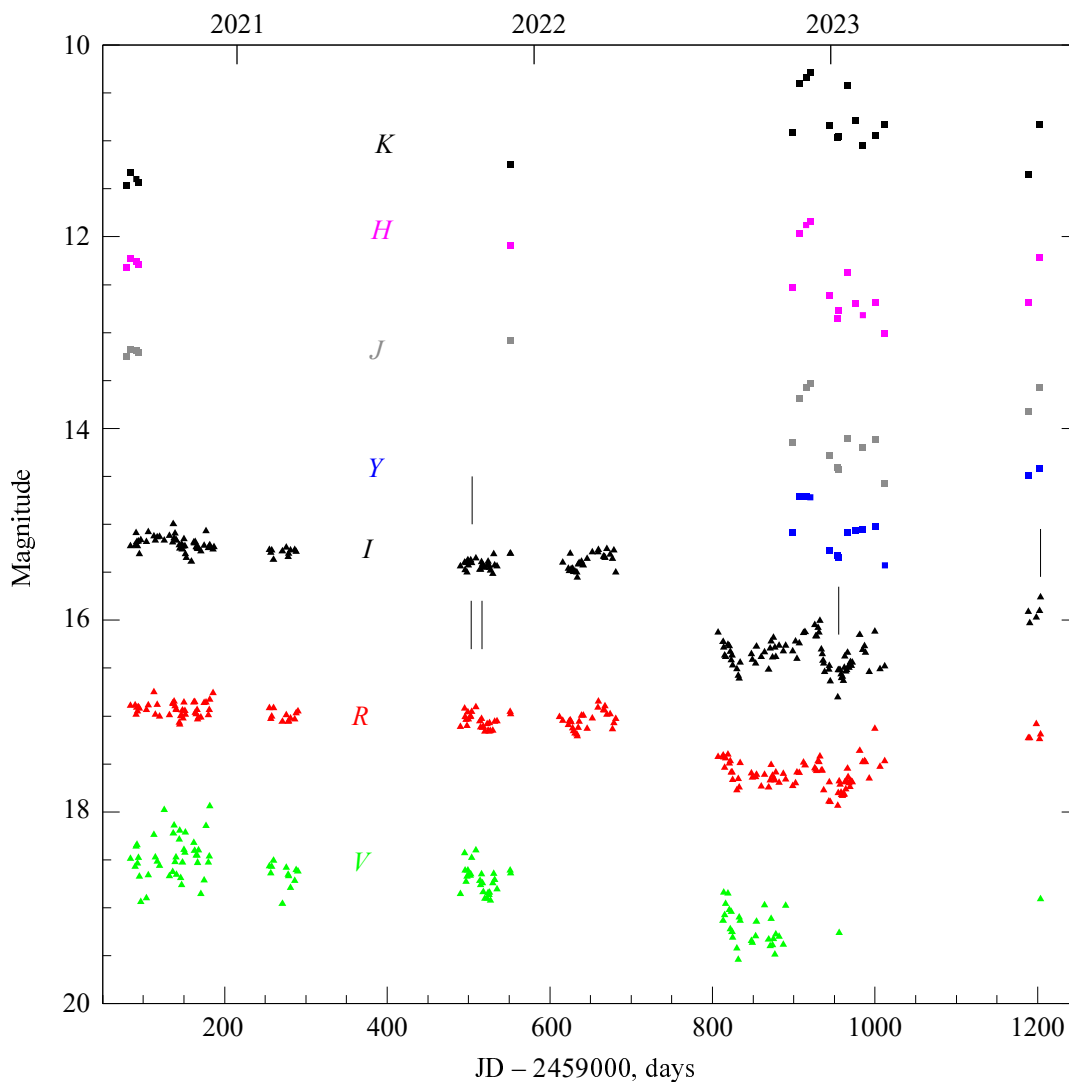


Рис. 1. Кривые блеска ZZ Tau IRS в полосах пропускания фильтров *VRIYJHK*. Квадратами показаны индивидуальные наблюдения, а треугольниками — данные, усредненные за ночь. Вертикальными отрезками отмечены даты наших спектроскопических наблюдений.

Hartmann, 1995), а 3 ноября 1997 г. в полосе *J* ярче примерно на 1^m (Cohen et al., 2003), чем в 2020 г. Однако характер изменения яркости в ИК-диапазоне при этом не изменился: более слабому блеску в полосе *J* соответствовали более «красные» показатели цвета ($H - K$) (рис. 2с) и ($J - H$).

Таким образом, до 2020 г., по крайней мере иногда, ZZ Tau IRS была значительно ярче как в видимом, так и в ближнем ИК-диапазоне, что согласуется с предположением о том, что к моменту начала наших наблюдений звезда уже находилась в достаточно глубоком затмении.

Нам удалось провести наблюдения ZZ Tau IRS 8 марта 2023 г. не только в полосах *YJHK*, но и в полосах *L* и *M*. Сравнение полученных значений

($m_L = 7^m96 \pm 0^m24$, $m_M = 6^m78 \pm 0^m25$) с результатами наблюдений космической обсерватории WISE в феврале 2010 г. (Wright et al., 2010) в полосах W_1 ($\lambda_{\text{eff}} = 3.35$ мкм) и W_2 ($\lambda_{\text{eff}} = 4.60$ мкм) показывает⁷⁾, что в 2023 г., в период минимальной яркости звезды, в видимой области поток от нее в диапазоне от 3 до 5 мкм был больше, чем в 2010 г. (см. рис. 5).

3.2. Спектроскопические наблюдения

По данным White and Hillenbrand (2004) и Kounkel et al. (2019) лучевая скорость ZZ Tau IRS $V_r = 18.4 \pm 3.7$ км с⁻¹ и 18.6 ± 1.9 км с⁻¹ соответственно, поэтому в дальнейшем мы будем полагать, что $V_r = 18.5$ км с⁻¹.

⁷⁾ $W_1 = 9^m00 \pm 0^m02$, $W_2 = 7^m15 \pm 0^m02$

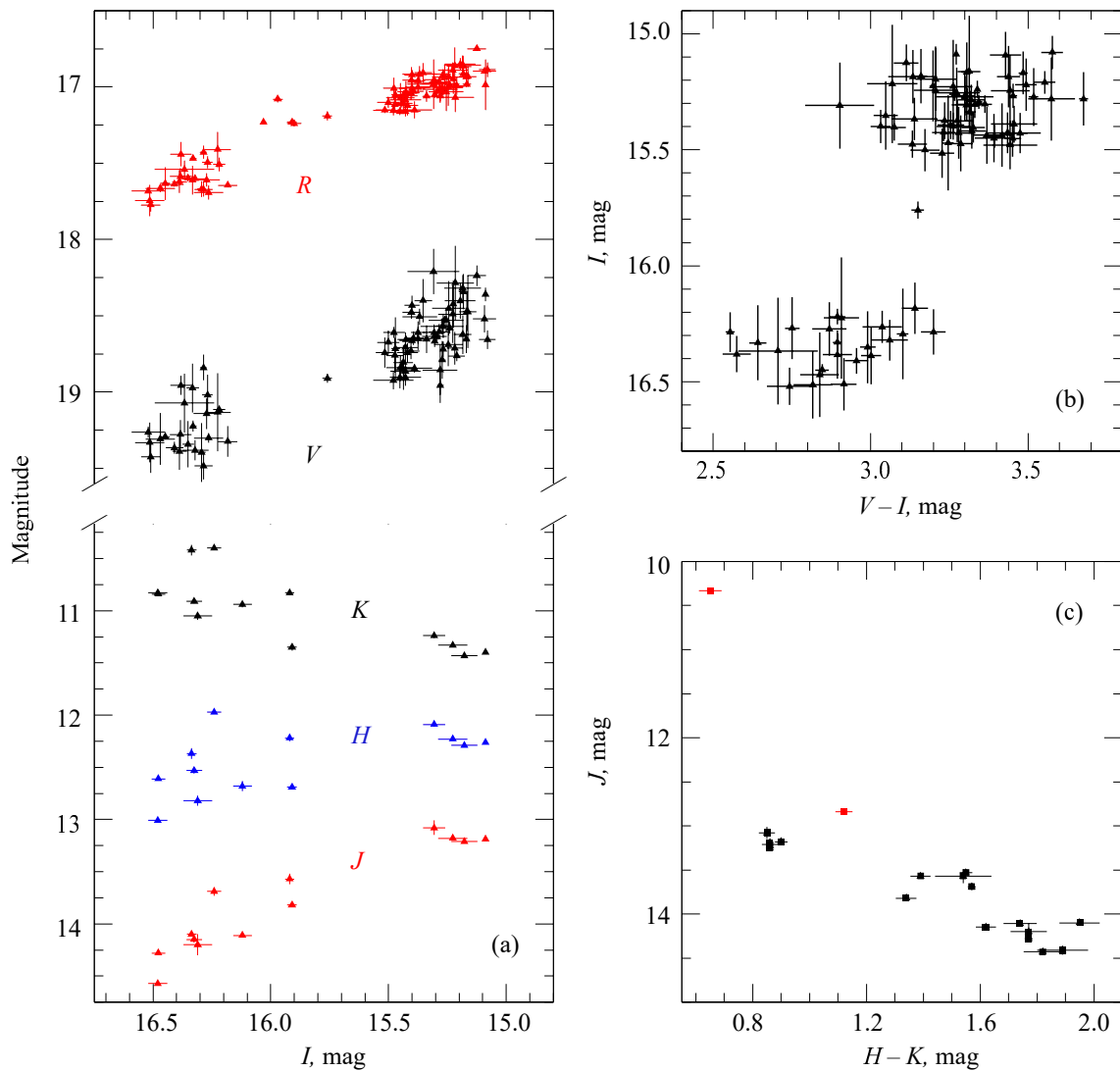


Рис. 2. Зависимость изменения блеска в полосах R , V , J , H и K от изменения блеска в полосе I — панель (а). Представлены только данные, полученные в одну и ту же ночь. Изменение показателей цвета ($V - I$) в зависимости от блеска в полосе I и ($H - K$) в зависимости от блеска в полосе J — панели (b) и (c) соответственно. Черные точки на панели (c) — наши наблюдения, красные — данные из работ Kenyon and Hartmann (1995) и Cohen et al. (2003), приведенные в таблице 2.

Нами анализировались те же Кеск-спектры высокого разрешения звезды, что и в работе White and Hillenbrand (2004), поэтому мы получили такие же значения эквивалентных ширины (EW) наиболее сильных линий, например $EW_{\text{H}\alpha} \approx 240 \text{ \AA}$. Кроме эмиссионных линий $[\text{O I}] \lambda 6363$, $\text{H}\alpha$, $[\text{N II}] \lambda (6548 + 6583)$, $[\text{S II}] \lambda (6717 + 6731)$, $\text{Ca II} \lambda (8498 + 8662)$, отождествленных White and Hillenbrand (2004), мы идентифицировали в этих спектрах эмиссионные линии $\text{He I} \lambda 6678$, $[\text{Fe II}] \lambda 7155$ и $[\text{Ni II}] \lambda 7378$.

Как видно из рис. 6, профили всех эмиссионных линий, кроме линии $\text{He I} \lambda 6678$, имеют асимметричную форму, и их можно представить в виде суммы двух компонент: «низкоскоростной»

(LV) компоненты, почти симметричной относительно лучевой скорости звезды⁸⁾, и «высокоскоростной» (HV) компоненты, которая смещена в синюю область спектра примерно на 30 км с^{-1} . На рис. 6 видно, что LV-компоненты занимают область скоростей примерно от -60 км с^{-1} до $+60 \text{ км с}^{-1}$, а синее крыло HV-компоненты тянется почти до -60 км с^{-1} . Относительный вклад f_b потока HV-компоненты в общий поток различен у

⁸⁾Точнее говоря, LV-компоненты смещены в коротковолновую область относительно этой системы отсчета на $2-3 \text{ км с}^{-1}$.

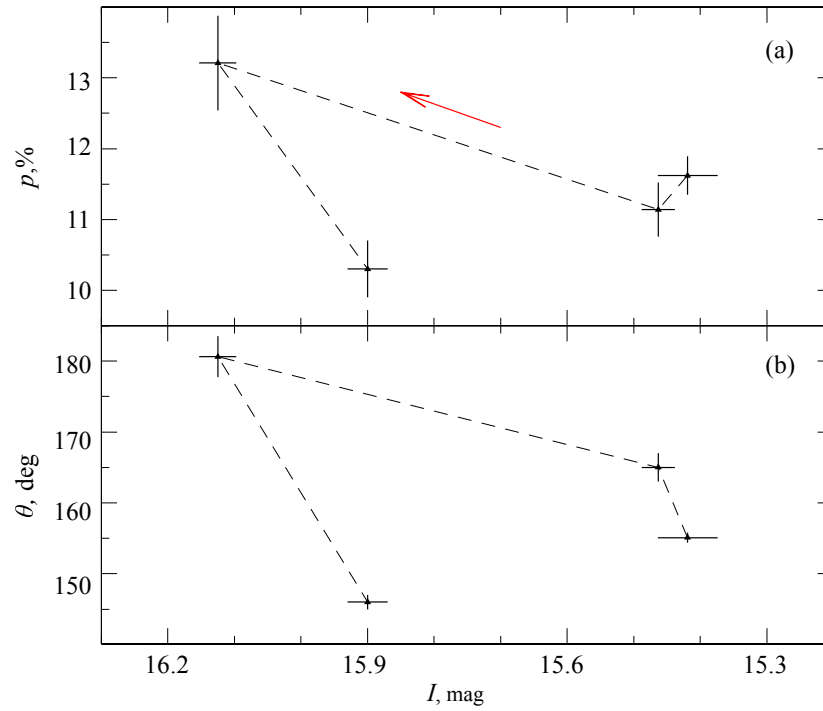


Рис. 3. Зависимость степени поляризации (а) и угла поляризации (б) ZZ Tau IRS в полосе I от блеска звезды. Из таблицы 3 на рисунке приведены только те данные, которые были получены в ту же ночь, что и поляриметрия. Штриховая линия соединяет измерения, следующие друг за другом по времени.

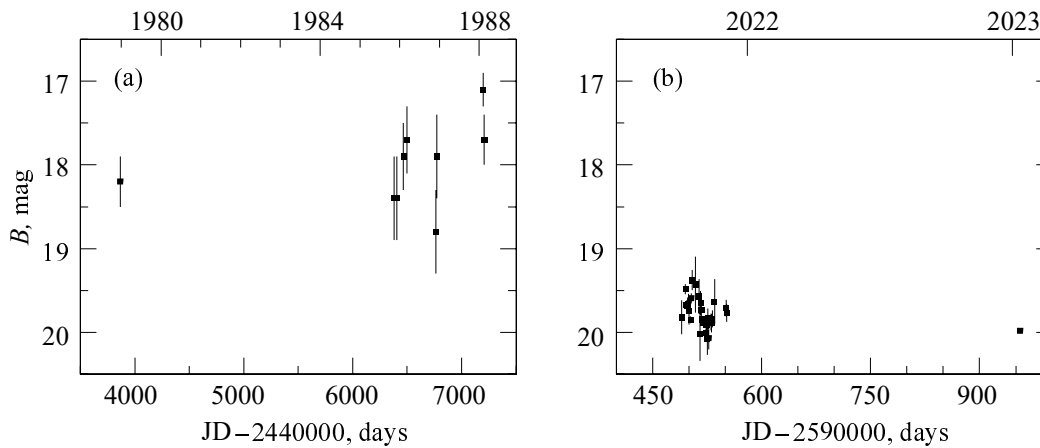


Рис. 4. Историческая кривая блеска ZZ Tau IRS, построенная по фотографическим (а) и ПЗС (б) наблюдениям.

разных линий и варьируется от $f_b \approx 0.33$ у линии [S II] $\lambda 6717$ до $f_b \approx 0.22$ у линии [Fe II] $\lambda 7155$.

Естественно интерпретировать наблюдаемую у ZZ Tau IRS структуру профилей эмиссионных линий в рамках характерной для СТТСs двухкомпонентной модели истечения (Kwan and Tademaru, 1988; 1995), которая предполагает, что HV-компонента линий образуется в коллимированном потоке (джете), а LV-компонента — в слабо коллимированном дисковом ветре, который в нашем случае содержит пыль и порождает укороподобную переменность звезды.

Наши спектры низкого разрешения позволили обнаружить много новых эмиссионных линий. Как видно из рис. 7, нам удалось отождествить около двух десятков линий дипольно разрешенных переходов (H I, He I, Na I, Ca II), интеркомбинационную линию Mg I $\lambda 4571$ и более трех десятков запрещенных линий атомов (O, N) и ионов (Fe^+ , S^+ , N^+ , Ca^+ , Ni^+ , O^+ , O^{+2}).

Мы использовали наши спектры, полученные $r\text{JD} = 59503.55$ (позиционный угол щели $PA = 48^\circ$) и 59504.54 ($PA = -42^\circ$), для измерения смещения фотоцентра наиболее сильных

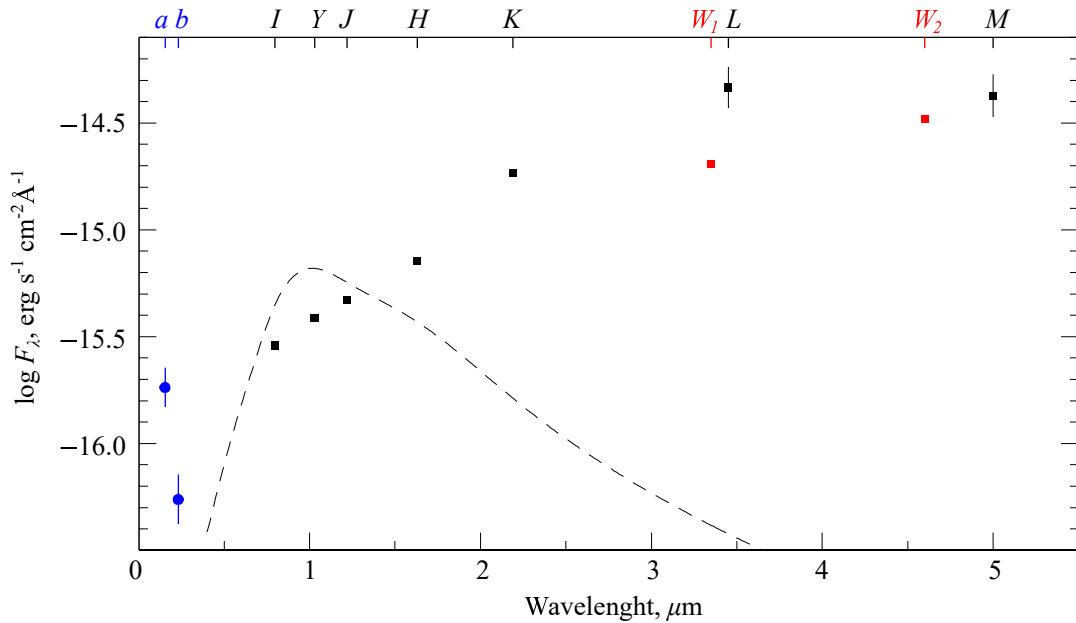


Рис. 5. Сравнение распределения энергии в спектре (SED) ZZ Tau IRS 8 марта 2023 г. (черные квадратики) с данными космических обсерваторий WISE (красные квадратики) и GALEX (голубые кружки). Буквы *a* и *b* соответствуют звездным величинам GALEX в дальнем и ближнем УФ-диапазонах соответственно. Штриховая кривая — теоретическое SED звезды с $T_{\text{эфф}} = 3100$ К и $\lg g = 4.0$, построенное по синтетическим показателям цвета модели BT-Settl (Pecaut and Matajek, 2013) и нормированное на $I = 16^{\text{m}}0$.

эмиссионных линий относительно близлежащего континуума (Whelan and Garcia, 2008) в красной области спектра, где отношение S/N достаточно велико. Результат спектроастрометрических измерений представлен на рис. 8, из которого видно, что фотоцентр линий в обоих спектрах заметно смещен относительно континуума. Это свидетельствует о том, что область формирования линии $\text{H}\alpha$ и запрещенных линий имеет значительную пространственную протяженность. Видно также, что смещение фотоцентра ионных линий $[\text{S II}]$ и $[\text{N II}]$ в 3–4 раза больше, чем атомарных линий $\text{H}\alpha$ и $[\text{O I}]$.

Лучевые скорости V_r этих двух групп линий также отличаются. Это видно из рис. 9, на котором показано, как меняется величина V_r (относительно звезды), усредненная по всем спектрам низкого разрешения, в зависимости от энергии верхнего уровня линии E_u , отсчитываемой от основного состояния соответствующего атома⁹⁾. В рамках двухкомпонентной модели зависимость V_r от E_u означает, что чем больше величина E_u линии, тем больший вклад в ее профиль дает HV-компонента. Отметим в этой связи, что линия $[\text{O III}] \lambda 5007$, которая имеет наибольшее коротковолновое смещение, никогда не наблюдалась в дисковом ветре

⁹⁾Например, в случае линии $[\text{O III}] \lambda 5007$ E_u — это сумма потенциалов ионизации атома O и иона O^+ плюс энергия возбуждения уровня $^1\text{D}_2$.

CTTSs, зато наблюдается в спектрах многих объектов Хербига—Аро, то есть в джеттах (Dopita and Sutherland, 2017).

Примечательным исключением из общей зависимости $V_r(E_u)$ является линия $\text{He I} \lambda 6678$, которая имеет довольно большую энергию возбуждения, но практически нулевое значение V_r . По нашему мнению, это говорит о том, что данная линия образуется вблизи поверхности звезды в аккреционной ударной волне. Напомним, что, в отличие от других эмиссионных линий в спектре 2003 г., линия $\text{He I} \lambda 6678$ имеет однокомпонентный симметричный профиль.

4. ОБСУЖДЕНИЕ

4.1. Геометрия истекающего вещества и outflow cavity

Как видно из рис. 10, спектроастрометрические смещения фотоцентров линий s_{\parallel} (при ориентациях щели вдоль $PA = 48^\circ$) и s_{\perp} (вдоль $PA = -42^\circ$) коррелируют друг с другом. Используя обобщенный метод наименьших квадратов (Ivezić et al., 2014), мы нашли, что наклон прямой, аппроксимирующей зависимость $s_{\perp}(s_{\parallel})$ — $k = -0.23 \pm 0.05$. По нашему мнению, корреляция величин s_{\perp} и s_{\parallel} обусловлена тем, что позиционный угол PA_j направления, вдоль которого движется газ, отличается от $PA = 48^\circ$ на некоторую величину γ . В таком

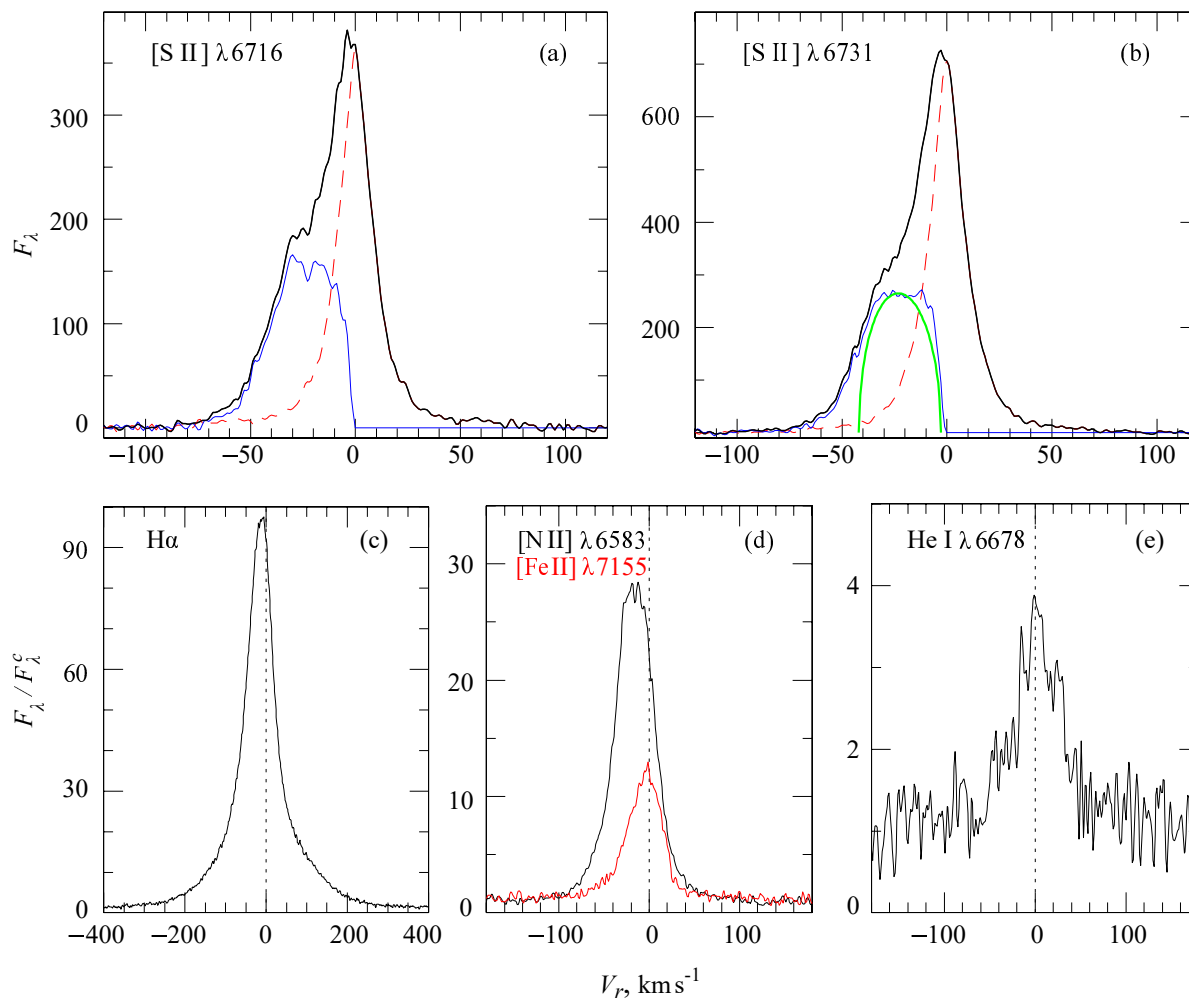


Рис. 6. Профили некоторых эмиссионных линий в спектре ZZ Tau IRS высокого разрешения в системе отсчета, связанной со звездой. На панелях (a) и (b) показано разложение профилей линий [S II] λ 6716 и λ 6731 на низко- и высокоскоростную компоненты. Модельный профиль, описанный в разделе 4.2, показан жирной зеленой линией. На панелях (a) и (b) по оси ординат поток F_λ выражен в единицах 10^{-17} эрг с^{-1} см^{-2} \AA^{-1} , а на панелях (c), (d), (e) профили нормированы на уровень континуума.

случае $k = \text{tg } \gamma$, а $PA_j = 48^\circ - \gamma = 61^\circ \pm 3^\circ$, если принять во внимание, в какую сторону от звезды смещение считается положительным при той или иной ориентации щели, — см. подпись к рис. 8.

Dodin et al. (2023) нашли, что изображение ZZ Tau IRS, полученное путем вычитания изображений в линиях [S II] λ (6716 + 6731) и близлежащем континууме, имеет вытянутую, овальную форму. Как видно из рис. 11a, синяя прямая линия с $PA = 61^\circ$ проходит примерно через большую ось этого овала, подтверждая тем самым наш вывод о том, что истекающий газ, ответственный за излучение в линиях, вытянут вдоль направления с $PA = 61^\circ \pm 3^\circ$ (ось истечения).

На рис. 11a приведено изображение той же области, полученное в ближней ИК-области с борта HST (см. раздел 2). Судя по размеру двух звезд поля, попавших в кадр, это изображение ZZ Tau IRS

имеет достаточно хорошее угловое разрешение, что позволяет идентифицировать светлую дугу между темными «половинками» изображения как тень от диска — сравните, например, с рис. 2 работы Habel et al. (2021). Ось истечения (синяя прямая линия, наложенная на HST-изображение), по-видимому, проходит через середину дуги, а это значит, что ось истечения практически перпендикулярна плоскости диска.

Вклад эмиссионных линий в диапазоне от 1.5 до 1.7 мкм пренебрежимо мал (Kounkel et al., 2019), поэтому пространственная протяженность изображения ZZ Tau IRS в фильтре F160W — следствие рассеяния излучения в континууме на околосредной пыли. Таким образом, изображение окрестности ZZ Tau IRS в фильтре [S II] соответствует области, отвечающей за эмиссию в линиях, то есть ветра и джета, тогда как изображение

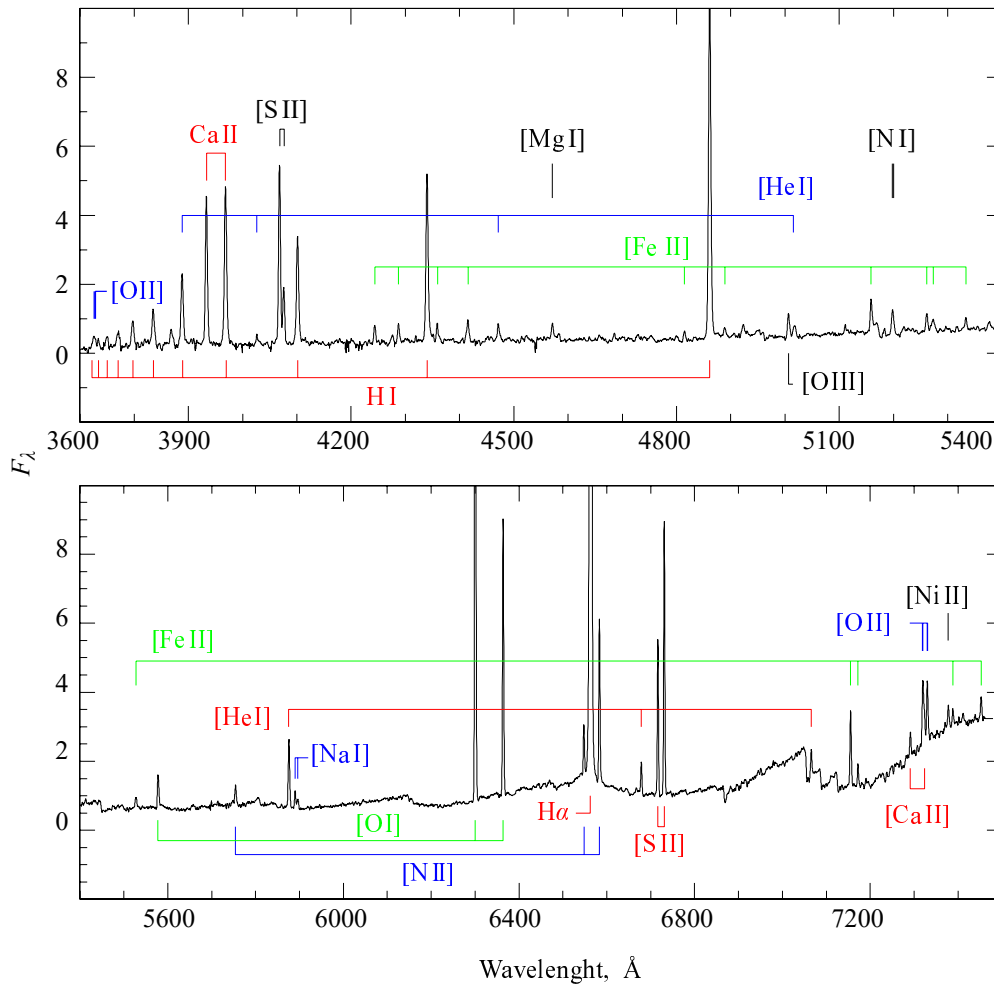


Рис. 7. Спектр ZZ Tau IRS, усредненный по трем спектрам, полученным в «ярком» состоянии. По оси ординат отложен монохроматический поток F_λ в произвольных единицах.

в $F160W$ -фильтре содержит информацию о пространственном распределении пыли, рассеивающей свет центральной звезды. Как видно из рис. 11, эти изображения имеют разную форму: в отличие от изображения в фильтре [S II] изображение в фильтре $F160W$ явно асимметрично относительно оси истечения — оно имеет большую протяженность в юго-восточном направлении вдоль $PA \approx 150^\circ$.

Неосесимметричное распределение вещества рассеивающей континуум оболочки — возможное объяснение аномальной зависимости угла поляризации от блеска ZZ Tau IRS в полосе I (рис. 3)¹⁰. Мы имеем в виду следующее. Ориентация вектора поляризации θ_I в «ярком» состоянии показывает, что рассеяние света происходит на околозвездной пылевой оболочке, вытянутой в направлении оси

¹⁰Судя по спектру высокого разрешения (White and Hillenbrand, 2004), вклад эмиссионных линий в полосе I меньше 10%.

вращения диска, а не на самом диске (раздел 3.1). Тогда можно ожидать (Shulman and Grinin, 2022), что по мере ослабления блеска звезды величина θ_I будет приближаться к направлению, перпендикулярному оси истечения, то есть к $PA \approx 151^\circ$ в нашем случае. Такая зависимость $\theta_I(I)$ наблюдалась, например, у звезды RW Aur A (Dodin et al., 2019), но в случае ZZ Tau IRS изменение θ_I при изменении блеска выглядит совсем по-другому (сравните рис. 3 с правой панелью рис. 9 из работы Dodin et al. (2019)). Такое возможно, если распределение рассеивающей пыли неосесимметрично (Grinin et al., 1988; 1994; Shulman and Grinin, 2022), но чтобы подтвердить эту гипотезу количественно, необходимо иметь больше поляриметрических данных, желательно на разных длинах волн.

Из рис. 11 видно, что протяженность области, рассеивающей свет звезды, превышает $1''.5$, то есть составляет не менее 200 а.е. при расстоянии до звезды 130 пк (Akeson et al., 2019). Разумно предположить, что рассеяние происходит на стенках

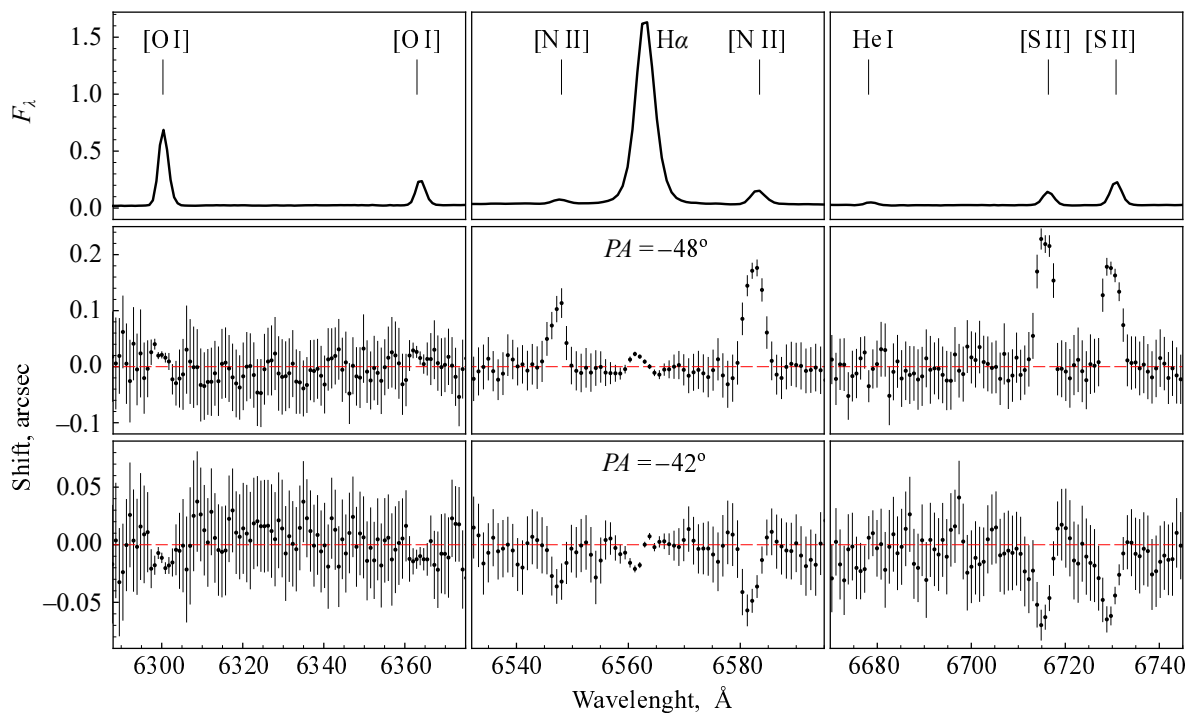


Рис. 8. Спектроастрометрия ZZ Tau IRS. Верхний ряд — участки спектра звезды в «ярком» состоянии, содержащие сильные эмиссионные линии. По оси ординат отложен поток в произвольных единицах F_λ . Смещение фотоцентра тех же спектральных линий относительно соседнего континуума при ориентации щели $PA = 48^\circ$ (средний ряд) и при $PA = -42^\circ$ (нижний ряд). Положительный сдвиг вдоль щели соответствует северо-восточному направлению от звезды при $PA = 48^\circ$ и северо-западному направлению при $PA = -42^\circ$. Видно, что смещение фотоцентра линий [S II] и [N II] значительно больше, чем линий $H\alpha$ и [O I].

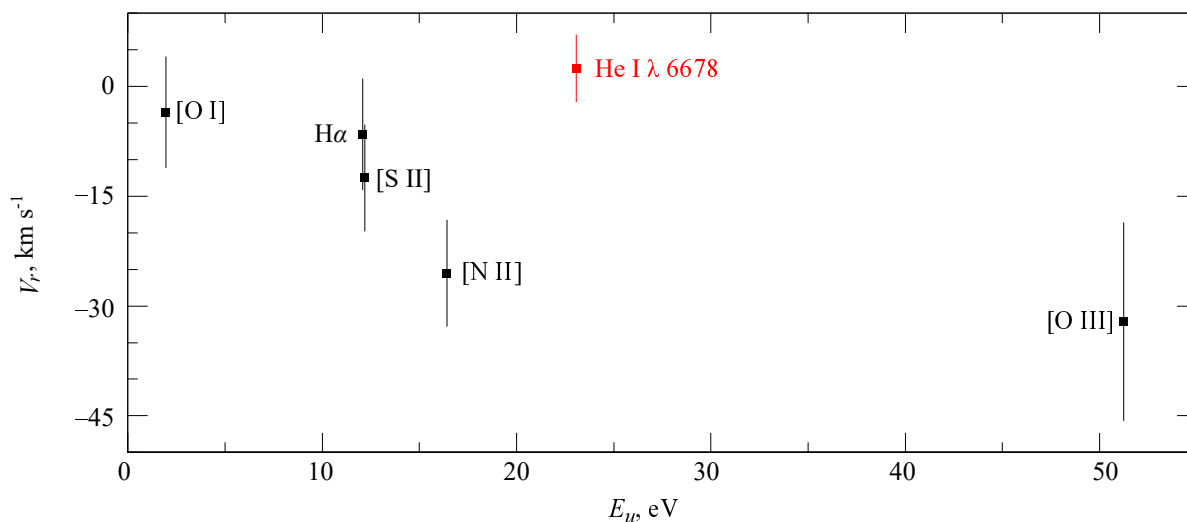


Рис. 9. Зависимость (средней по всем спектрам) лучевой скорости линий [O I] λ (6300 + 6363), $H\alpha$, [S II] λ (6716 + 6731), [N II] λ (6548 + 6583), [O III] λ 5007 (черные квадратики) и He I λ 6678 (красный квадратик) от энергии их верхнего уровня, отсчитываемой от основного состояния соответствующего атома.

полости, созданной дисковым ветром и джетом в протозвездном облаке, из которого сформировалась ZZ Tau IRS — так называемой outflow cavity. Что касается асимметрии формы этой полости, то напомним, что Hashimoto et al. (2021) обнаружили,

что пылевой диск ZZ Tau IRS представляет собой кольцо с яркой серповидной структурой вблизи $PA = 135^\circ$. Естественно предположить, что азимутальная асимметрия диска и полости каким-то образом связаны.

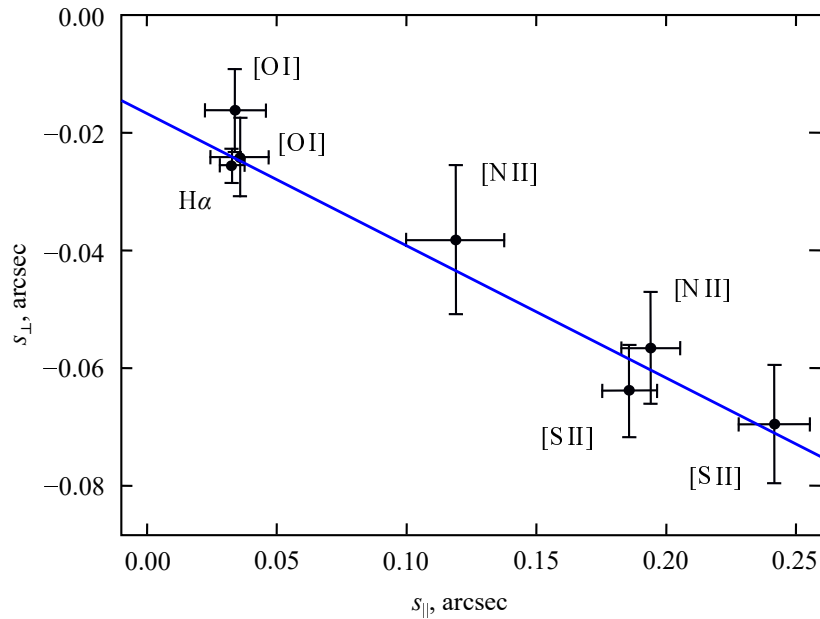


Рис. 10. Зависимость спектроастрометрического смещения фотоцентров наиболее интенсивных линий в красном канале TDS-спектра при направлении щели вдоль $PA = -42^\circ$ от аналогичной величины при $PA = 48^\circ$.

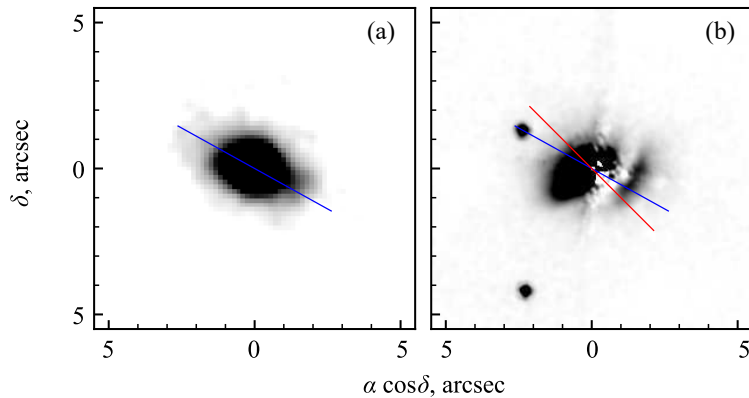


Рис. 11. Изображение окрестности ZZ Tau IRS, полученное путем вычитания изображений в линиях $[S II] \lambda(6716 + 6731)$ и близлежащем континууме (a), и изображение той же области, полученное с борта HST камерой WFC3/IR в фильтре $F160W$ (b). Синяя прямая на обеих панелях соответствует направлению оси истечения ($PA = 61^\circ$), найденному по данным спектроастрометрии, а красная прямая на правой панели ($PA = 45^\circ$) показывает направление малой оси изображения пылевого диска по данным Hashimoto et al. (2021). Подробности в тексте.

Позиционный угол главной оси изображения пылевого диска примерно 135° (Hashimoto et al., 2021). Следовательно, если истечение вещества происходит вдоль оси вращения этого диска, то оно должно быть направлено вдоль $PA_a = 135^\circ - 90^\circ = 45^\circ$, что заметно отличается от найденного нами значения $PA_j = 61^\circ \pm 3^\circ$, — сравните направление синей и красной линий на рис. 11b. При этом объект Хербига–Аро HN 393 расположен в направлении $PA_{HN} \approx 52^\circ$ от ZZ Tau IRS — см., например, рис. 1 в работе Dodin et al. (2023). У нас не хватает данных для однозначной интерпретации различия позиционных

углов PA_a , PA_j и PA_{HN} , поэтому мы ограничимся следующими качественными замечаниями.

Чтобы объяснить асимметрию пылевого диска ZZ Tau IRS, Hashimoto et al. (2021) предположили, что внутренние ($r \lesssim 0''.4$) области диска наклонены относительно внешних из-за наличия массивной планеты, которая движется по вытянутой орбите. Если это так, то можно ожидать прецессии оси симметрии джета и/или дискового ветра, вследствие чего возникнет асимметрия полости в остатках протозвездного облака. Для проверки этой гипотезы необходимо провести дополнительные наблю-

дения ZZ Tau IRS на интерферометре ALMA с лучшим угловым разрешением и чувствительностью по потоку. Отметим в этой связи, что оценка массы звезды, полученная Hashimoto et al. (2021) по наблюдениям в линии $^{12}\text{CO } J = 3 \rightarrow 2$, основана на предположении, что лучевая скорость звезды $V_r = +6.5 \text{ км с}^{-1}$, что на 12 км с^{-1} меньше, чем использованная нами величина (см. раздел 3.2).

4.2. Физические параметры джета и темп аккреции

Как было отмечено в разделе 3.2, спектродоплерические смещения фотоцентров и лучевые скорости ионных ([S II], [N II]) и атомных ([O I]) линий существенно отличаются. В рамках двухкомпонентной модели истечения вещества (Kwan and Tademaru, 1988) эти особенности естественным образом объясняются тем, что линии ионов формируются преимущественно в джете, а линии [O I] — в дисковом ветре.

В качестве простой модели джета мы рассмотрели конический сегмент (слой), каждая точка которого удаляется от звезды с одинаковой скоростью v_0 . Пусть оболочка заключена внутри конуса с углом раствора при вершине (на звезде) 2α , а ось конуса образует с лучом зрения угол i , причем $i > \alpha$. В этом случае профиль оптически тонкой линии, локальный профиль которой представляет собой δ -функцию, описывается соотношением:

$$F(v) = \frac{1}{\alpha} \arccos \left[\frac{\cos \alpha}{(1 - v^2)^{1/2} \sin i - v \cos i} \right], \quad (1)$$

где V_r — лучевая скорость, $v = V_r/v_0$, причем $-\cos(i - \alpha) \leq v \leq -\cos(i + \alpha)$ (Kwan and Tademaru, 1995). Отметим, что форма профиля, описываемая соотношением (1), не зависит от расстояния слоя до звезды, поэтому данная модель также описывает ситуацию, когда внутри одного конуса имеется несколько отдельных слоев, которые удаляются от звезды с одинаковой скоростью v_0 .

Оказалось, что этот профиль при $v_0 = 84 \text{ км с}^{-1}$, $\alpha = 14^\circ$ и $i = i_j = 74^\circ$ с разумной точностью описывает HV-компоненты запрещенных линий, как это видно на рис. 6b на примере линии [S II] $\lambda 6731$. Поскольку ось джета должна быть перпендикулярна внутренним областям аккреционного диска, полученное значение величины i_j согласуется с представлением о том, что протопланетный диск ZZ Tau IRS виден почти с ребра.

Напомним в этой связи, что, по оценке Hashimoto et al. (2021), наклон оси пылевого диска к лучу зрения $i_d = 60^\circ$, что существенно меньше i_j . Однако модель, использованная нами для оценки i_j , слишком проста, чтобы только на этом

основании утверждать, что внутренние области диска наклонены к внешним. Дополнительным аргументом в пользу такого утверждения могли бы служить следующие соображения. Наличие в спектре ZZ Tau IRS линии [O III] $\lambda 5006.8$ (см. рис. 7) означает, что головная ударная волна джета движется относительно газа перед ее фронтом со скоростью $v_{sh} > 75 \text{ км с}^{-1}$ (Dopita and Sutherland, 2017). С другой стороны, согласно рис. 9, лучевая скорость этой линии в системе отсчета звезды $V_r = 32.1 \pm 11.6 \text{ км с}^{-1}$, следовательно, наклон джета к лучу зрения $i_j = \arccos(V_r/v_{sh}) \approx 64^\circ \pm 10^\circ$. Но объекты Хербига—Аро представляют собой ударные волны в джете, которые возникают, когда летящий с большой скоростью газ сталкивается с предшествующим, более медленным потоком вещества внутри джета (Raga et al., 1990). Иными словами, речь идет об ударной волне, которая распространяется по уже движущемуся газу джета, а поэтому скорость движения ударной волны относительно звезды может быть больше, чем v_{sh} . Тогда величина i_j должна быть больше полученного нами значения, что согласуется с выводом Hashimoto et al. (2024) о том, что внутренний диск наклонен по отношению к внешнему на 15° .

При скорости ударной волны $v_{sh} > 75 \text{ км с}^{-1}$ температура за ее фронтом более 10^5 K (Dopita and Sutherland, 2017). Следовательно, УФ-излучение, зарегистрированное космической обсерваторией GALEX (Bianchi et al., 2017) в полосах FUV ($\lambda_c \approx 0.15 \text{ мкм}$) и NUV ($\lambda_c \approx 0.23 \text{ мкм}$), может быть обусловлено излучением джета в линиях дублетов C IV $\lambda 1550$ и Mg II $\lambda 2800$, а не излучением хромосферы звезды и/или аккреционной ударной волны.

Мы нашли, что отношение потоков HV- и LV-компонент линий [S II] $\lambda 6731$ и $\lambda 6716$ в спектре ZZ Tau IRS с точностью около 5% равно 1.98 и 1.75 соответственно. Как следует из диагностической диаграммы, построенной по данным работы Giannini et al. (2015) и представленной на рис. 12, это значит, что в области формирования линий [S II] в джете электронная концентрация $N_e^j \approx 5 \times 10^3 \text{ см}^{-3}$ и примерно вдвое больше в дисковом ветре.

Рассмотрим джет звезды ZZ Tau IRS. Судя по рис. 6, лучевая скорость газа относительно звезды в области формирования линий [S II] в джете превышает 50 км с^{-1} , следовательно, газ удаляется от звезды со скоростью $v_j > 50 \text{ км с}^{-1}$. Характерный поперечный размер джетов CTTSs $R_j \gtrsim 10 \text{ а. е.}$ (Cabrit, 2007), а типичная величина степени ионизации водорода в области за фронтом ударной волны, где формируются линии [S II], примерно 0.1–0.2 (Cabrit, 2007; Melnikov et al., 2009). Тогда

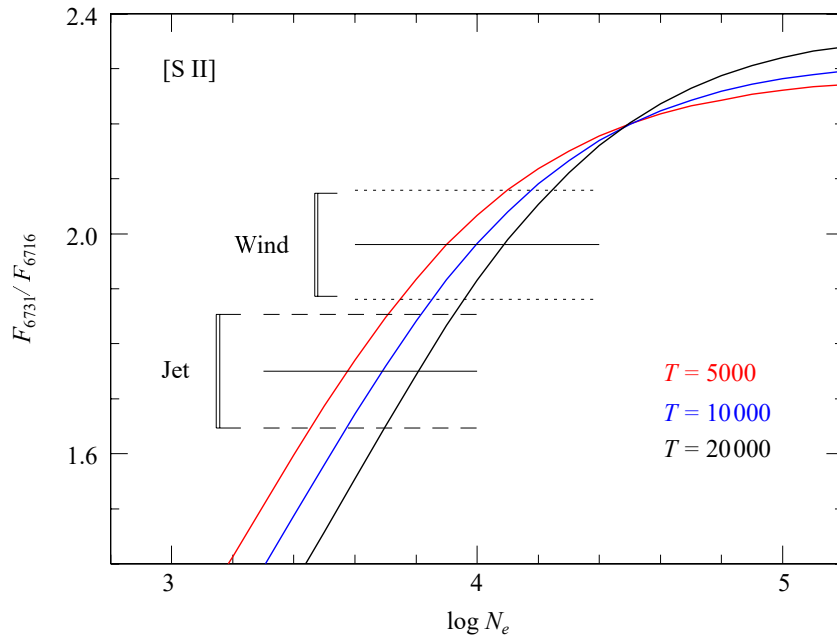


Рис. 12. Сравнение наблюдаемого отношения потоков HV- и LV-компонент линий [S II] $\lambda 6731$ и $\lambda 6716$ в спектре ZZ Tau IRS с теоретическим (Giannini et al., 2015).

оценка уносимой джетом массы будет выглядеть следующим образом:

$$\dot{M}_j \approx \pi R_j^2 v_j m_H N_e^j \left(\frac{N_H}{N_e} \right) \gtrsim 5 \times 10^{-10} M_\odot \text{ год}^{-1}, \quad (2)$$

где m_H — масса атома водорода.

Темп аккреции на CTTSs \dot{M}_{acc} , как правило, на порядок больше, чем темп потери массы (Cabrit, 2007). Если это справедливо и в случае ZZ Tau IRS, то для нее $\dot{M}_{\text{acc}} > 5 \times 10^{-9} M_\odot \text{ год}^{-1}$, что слишком велико для звезды с массой $M_* < 0.3 M_\odot$ (см. раздел 1): статистическая зависимость $\lg \dot{M}_{\text{acc}}$ от $\lg M_*$ со стандартной ошибкой 0.4 (Alcalá et al., 2014)¹¹⁾ предсказывает для ZZ Tau IRS темп аккреции почти на порядок меньше полученного нами значения. При всей неопределенности нашей оценки мы приходим к выводу о том, что ZZ Tau IRS весьма активный аккректор.

4.3. Природа переменности ZZ Tau IRS

Мы полагаем, что первопричина сильной фотометрической и спектральной переменности ZZ Tau IRS — нестационарная дисковая аккреция. В пользу этого вывода можно привести следующие аргументы.

¹¹⁾См. также Somigliana et al. (2022) и приведенные там ссылки.

Наблюдаемая у уксов зависимость «цвет — величина» в видимом и ближнем ИК-диапазонах — следствие того, что эффективность поглощения и рассеяния излучения околозвездной пылью уменьшается с ростом длины волны. В случае ZZ Tau IRS это обстоятельство позволяет объяснить, почему по мере ослабления блеска в полосе I звезда становится более «голубой» в видимой области, но более «красной» в ближней ИК-области (раздел 3.1). Однако только этим невозможно объяснить, почему уменьшение яркости в видимой области сопровождается увеличением яркости в ближнем ИК-диапазоне. Такое поведение не типично для уксов, хотя Shenavrin et al. (2016) изредка наблюдали у звезд RR Tau и SV Сер увеличение ИК-потока при ослаблении блеска в полосе V . Кроме того, в период глубокого ($\Delta V > 10^m$) затмения RW Aug A блеск в полосах V и JHK вначале коррелировал друг с другом, однако при $\Delta V > 4^m$ корреляция между блеском в полосах V и K пропала — см. рис. 5 в работе Dodin et al. (2019). По мнению Shenavrin et al. (2019) в этих случаях происходит увеличение интенсивности излучения газа и пыли на длинах волн свыше 1 мкм из внутренних областей аккреционного диска и/или запыленного дискового ветра. Естественно предположить, что это вызвано увеличением темпа аккреции, в результате чего происходит нагрев ближайших к звезде областей диска и увеличение интенсивности дискового ветра.

Рассмотрим теперь вопрос о причинах спектральной переменности. При уменьшении ярко-

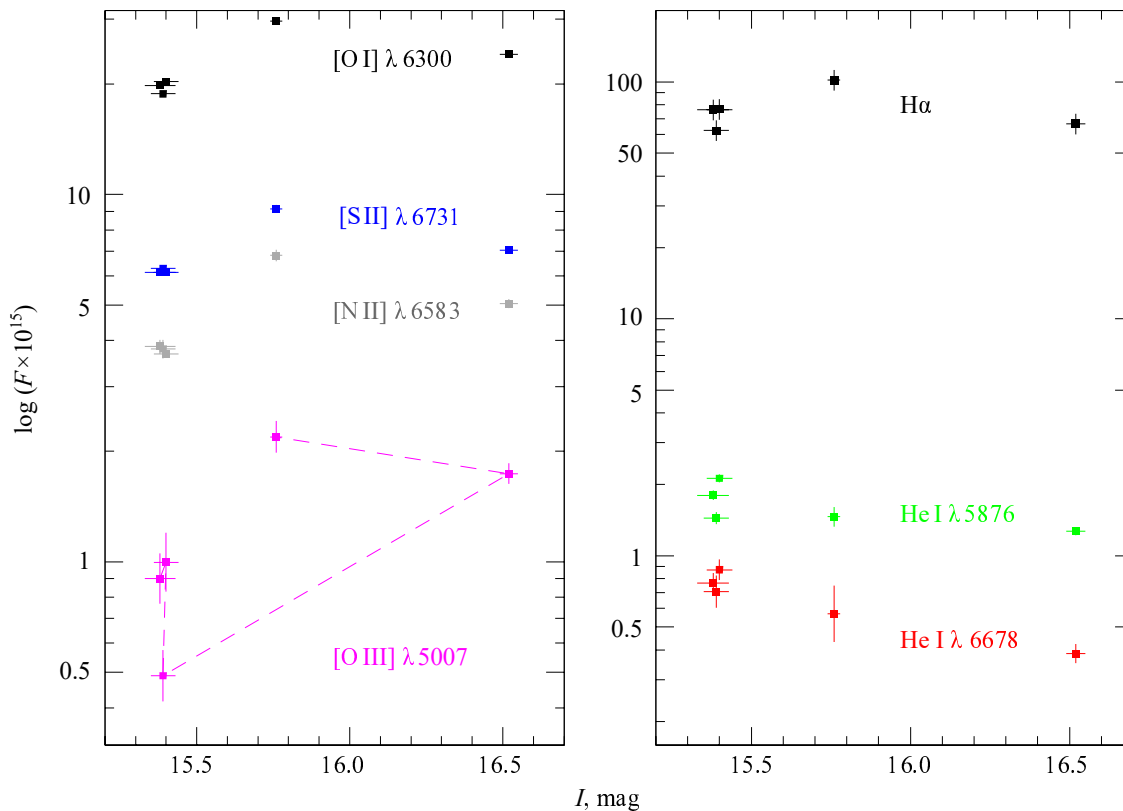


Рис. 13. Зависимость потоков F ($\text{эрг с}^{-1} \text{см}^{-2}$) некоторых эмиссионных линий в спектре ZZ Tau IRS от блеска звезды в полосе I . Штриховая линия соединяет измерения, следующие друг за другом по времени.

сти ZZ Tau IRS в видимом диапазоне эквивалентные ширины эмиссионных линий в ее спектре увеличивались. Например, в «ярком» состоянии ($\text{rJD} = 59504.54$, $I = 15^{\text{m}}39$) EW линий $\text{H}\alpha$ и $[\text{S II}] \lambda 6731$ были равны 160 и 22 \AA соответственно, а когда звезда имела почти минимальную яркость ($\text{rJD} = 59955.27$, $I = 16^{\text{m}}52$), EW этих линий выросли до значений 376 и 79 \AA соответственно. При этом монохроматические потоки F_λ континуума во всех участках TDS-спектра менялись так же, как и в полосах V и R (рис. 2), то есть коррелировали с потоком в полосе I .

Поведение потоков эмиссионных линий более сложное. Из рис. 13 видно, что при переходе звезды из «яркого» в «слабое» состояние, потоки F запрещенных линий (рис. 13а) выросли, тогда как потоки в линиях He I уменьшились, а поток в линии $\text{H}\alpha$ почти не изменился (рис. 13б). Для количественной интерпретации этих фактов необходимо знать, как меняются профили и потоки HV и LV -компонент этих линий по отдельности, что невозможно из-за низкого разрешения наших TDS спектров. Вместо этого мы предлагаем следующее качественное объяснение наблюдаемой зависимости $F(I)$, полагая, что у линий $\text{He I} \lambda 6678$ и $[\text{O III}] \lambda 5007$ имеется

только одна компонента — LV и HV соответственно (см. раздел 3.2).

Если линия $\text{He I} \lambda 6678$ образуется в аккреционной ударной волне вблизи поверхности ZZ Tau IRS, то уменьшение ее потока по мере ослабления блеска звезды связано с увеличением оптической толщи запыленного дискового ветра. Вероятно, так же объясняется зависимость $F(I)$ и в случае линии $\text{He I} \lambda 5876$.

С другой стороны, если линия $[\text{O III}] \lambda 5007$ образуется только в джете, то возрастание ее потока означает, что переход ZZ Tau IRS из «яркого» в «слабое» состояние сопровождался появлением нового объекта Хербига—Аро в дополнение к уже существовавшему ранее. В пользу такой интерпретации можно привести два аргумента. Во-первых, когда в осеннем сезоне 2023 г. яркость звезды в полосе I начала увеличиваться, поток в линии $[\text{O III}] \lambda 5007$ стал даже больше, чем в «слабом» состоянии. Во-вторых, глубокое затмение RW Aur A запыленным ветром (Dodin et al., 2019) также сопровождалось появлением нового объекта Хербига—Аро (Takami et al., 2023).

У других запрещенных линий зависимость $F(I)$ примерно такая же и, вероятно, объясняется аналогичным образом. Меньшая амплитуда перемен-

ности потоков этих линий, по нашему мнению, обусловлена вкладом LV-компоненты, которая формируется в дисковом ветре. Что касается линии $H\alpha$, то следует учесть, что она формируется не только в ветре и/или джете, но и в аккреционной ударной волне.

Таким образом, характер переменности потоков линий свидетельствует о существенном изменении интенсивности не только дискового ветра, но и коллимированного истечения вещества, что у CTTSs однозначно связано с изменением темпа аккреции (Hartmann et al., 2016).

5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Из наших наблюдений следует, что фотометрическая и поляриметрическая переменность ZZ Tau IRS обусловлена затмениями звезды околозвездными пылевыми облаками. Иными словами, исследуемая звезда относится к звездам типа UX Ori, причем, насколько нам известно, имеет среди них самый поздний спектральный класс. Природа затмевающих звезду пылевых облаков может быть разной (Ansdell et al., 2020), но наш анализ спектров показывает, что в случае ZZ Tau IRS облака представляют собой неоднородности в запыленном дисковом ветре.

Наличие у ZZ Tau IRS дискового ветра позволяет сделать следующие выводы.

1. Аномально большие эквивалентные ширины эмиссионных линий в спектре ZZ Tau IRS принято объяснять тем, что мы наблюдаем звезду сквозь запыленные верхние слои «расклевшенного» (flared) протопланетного диска, в то время как линии формируются над диском в джете (White and Hillenbrand, 2004). Иными словами, предполагается, что ось диска ZZ Tau IRS наклонена к лучу зрения под углом, близким к 90° . Но если звезду загораживает не гидростатически равновесная атмосфера диска, а запыленный дисковый ветер, то наклон внутреннего диска к внешнему может быть не очень велик, что согласуется с результатами Hashimoto et al. (2024).
2. Hashimoto et al. (2021; 2022) нашли, что во внешних областях диска ZZ Tau IRS пыль гораздо крупнее, чем в межзвездной среде, а внутри азимутальной (серповидной) неоднородности достигает размера свыше 1 мм. Однако зависимость «блеск — показатель цвета» звезды в видимом и ИК-диапазонах свидетельствует о том, что в запыленном ветре преобладают пылинки с размером меньше 1 мкм. Это значит, что либо рост размеров пылинок во внешних областях диска происходит быстрее, чем во внутренних, либо ветер выносит из диска преимущественно мелкую пыль.

3. Азимутальная неоднородность дискового ветра ответственна за возникновение асимметричной полости внутри родительского протозвездного облака, а также за нерегулярный характер изменения степени и угла поляризации в полосе I. Резонно предположить, что асимметрия ветра каким-то образом связана с наличием азимутальной неоднородности протопланетного диска звезды.

Из наших данных следует, что кроме запыленного дискового ветра у ZZ Tau IRS имеется джет. Судя по спектрам, полученным в феврале 2003 г., головная ударная волна джета двигалась относительно окружающей среды со скоростью $v_j > 75 \text{ км с}^{-1}$, а уносимый джетом поток массы \dot{M}_j превышал $5 \times 10^{-10} M_\odot \text{ год}^{-1}$. В 2022–2023 гг. переход звезды из «яркого» состояния в «слабое», вызванный усилением интенсивности запыленного дискового ветра, сопровождался появлением нового коллимированного выброса.

Наблюдавшаяся в 2021–2023 гг. переменность интенсивности дискового ветра и джета, скорее всего, обусловлена нестационарным характером аккреции вещества протопланетного диска. Эпизодическое усиление темпа аккреции, по-видимому, происходило и ранее: в конце 1980-х — начале 1990-х годов звезда в видимом и NIR-диапазонах была в 2–3 раза ярче, чем в 2021–2023 гг. Кроме того, в марте 2023 г. («слабое» состояние) яркость звезды в диапазоне 3–5 мкм была больше, чем в 2010 г. Учитывая, что полученная по спектру 2003 г. оценка темпа аккреции ($\dot{M}_{\text{acc}} > 5 \times 10^{-9} M_\odot \text{ год}^{-1}$) существенно больше ожидаемой для звезды с массой менее $0.3 M_\odot$, можно утверждать, что ZZ Tau IRS весьма активно аккрецирующая молодая звезда с мощным истечением вещества.

Напомним в этой связи, что Dodin et al. (2023) обнаружили в окрестности звезд ZZ Tau и ZZ Tau IRS движение околозвездного вещества со скоростями примерно 50 км с^{-1} на масштабах порядка нескольких тысяч астрономических единиц. Поскольку темп аккреции и истечения в случае ZZ Tau IRS на порядок больше, чем аналогичные величины компонент двойной системы ZZ Tau AB (Belinski et al., 2022), то резонно связать обнаруженное движение околозвездного газа с активностью ZZ Tau IRS.

БЛАГОДАРНОСТИ

Мы благодарим сотрудников КГО ГАИШ МГУ за помощь при проведении наблюдений, а также с благодарностью отмечаем, что при выполнении данной работы мы использовали базы данных SIMBAD (CDS, Strasbourg, France),

Astrophysics Data System (NASA, USA), NIST Atomic Spectra Database (<https://www.nist.gov/pml/atomic-spectra-database>) и The atomic line list v2.04 (<https://linelist.pa.uky.edu/atomic/>).

ФИНАНСИРОВАНИЕ

Работа А. В. Додина (наблюдения, обработка, интерпретация) и Б. С. Сафонова (поляриметрические наблюдения и обработка) поддержана грантом РНФ № 23-12-00092. Результаты получены с использованием оборудования, приобретенного в рамках программы развития МГУ.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы данной работы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- R. L. Akeson, E. L. N. Jensen, J. Carpenter, et al., *Astrophys. J.* **872** (2), article id. 158 (2019). DOI:10.3847/1538-4357/aaff6a
- J. M. Alcalá, A. Natta, C. F. Manara, et al., *Astron. and Astrophys.* **561**, id. A2 (2014). DOI:10.1051/0004-6361/201322254
- S. M. Andrews, K. A. Rosenfeld, A. L. Kraus, and D. J. Wilner, *Astrophys. J.* **771**, article id. 129 (2013). DOI:10.1088/0004-637X/771/2/129
- M. Ansdell, E. Gaidos, C. Hedges, et al., *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **492** (1), 572 (2020). DOI:10.1093/mnras/stz3361
- J. Bally, J. Walawender, and B. Reipurth, *Astron. J.* **144** (5), article id. 143 (2012). DOI:10.1088/0004-6256/144/5/143
- A. Belinski, M. Burlak, A. Dodin, et al., *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **515** (1), 796 (2022). DOI:10.1093/mnras/stac1798
- A. A. Belinski, A. V. Dodin, S. G. Zheltoukhov, et al., *Astrophysical Bulletin* **78** (3), 283 (2023). DOI:10.1134/S1990341323700074
- L. N. Berdnikov, A. A. Belinskii, N. I. Shatskii, et al., *Astronomy Reports* **64** (4), 310 (2020). DOI:10.1134/S1990341323700074
- L. Bianchi, B. Shiao, and D. Thilker, *Astrophys. J. Suppl.* **230** (2), article id. 24 (2017). DOI:10.3847/1538-4365/aa7053
- A. G. A. Brown et al. (Gaia Collab.), *Astron. and Astrophys.* **649**, id. A1. DOI:10.1051/0004-6361/202039657
- S. Cabrit, in *Proc. IAU Symp.* No. 243, Ed. by J. Bouvier and I. Appenzeller (Grenoble, France, 2007) p. 203. DOI:10.1017/S1743921307009568
- M. Cohen, W. A. Wheaton, and S. T. Megeath, *Astron. J.* **126** (2), 1090 (2003). DOI:10.1086/376474
- A. Dodin, K. Grankin, S. Lamzin, et al., *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **482** (4), 5524 (2019). DOI:10.1093/mnras/sty2988
- A. V. Dodin, S. G. Zheltoukhov, S. A. Lamzin, et al., *Astrophysical Bulletin* **78** (3), 364 (2023). DOI:10.1134/S1990341323700116
- M. A. Dopita and R. S. Sutherland, *Astrophys. J. Suppl.* **229** (2), article id. 35 (2017). DOI:10.3847/1538-4365/aa6542
- T. Giannini, S. Antonucci, B. Nisini, et al., *Astrophys. J.* **814** (1), article id. 52 (2015). DOI:10.1088/0004-637X/814/1/52
- M. Gomez, B. A. Whitney, and S. J. Kenyon, *Astron. J.* **114**, 1138 (1997). DOI:10.1086/118545
- V. P. Grinin, *Sov. Astron. Lett.* **14**, 27 (1988).
- V. P. Grinin, N. N. Kiselev, N. K. Minikulov, and G. P. Chernova, *Soviet Astronomy Letters* **14**, 219 (1988).
- V. P. Grinin, P. S. The, D. de Winter, et al., *Astron. and Astrophys.* **292**, 165 (1994).
- S. Guieu, C. Dougados, J. L. Monin, et al., *Astron. and Astrophys.* **446** (2), 485 (2006). DOI:10.1051/0004-6361:20053493
- N. M. Habel, S. T. Megeath, J. J. Booker, et al., *Astrophys. J.* **911** (2), id. 153 (2021). DOI:10.3847/1538-4357/abded8
- L. Hartmann, G. Herczeg, and N. Calvet, *Annual Rev. Astron. Astrophys.* **54**, 135 (2016). DOI:10.1146/annurev-astro-081915-023347
- J. Hashimoto, R. Dong, and T. Muto, *Astron. J.* **161** (6), id. 264 (2021). DOI:10.3847/1538-3881/abf431
- J. Hashimoto, R. Dong, T. Muto, H. B. Liu, and Y. Terada, *Astron. J.* **167** (2), id. 75 (2024).
- J. Hashimoto, H. B. Liu, R. Dong, et al., *Astrophys. J.* **941** (1), id. 66 (2022). DOI:10.3847/1538-4357/aca01d
- G. J. Herczeg and L. A. Hillenbrand, *Astrophys. J.* **786**, article id. 97 (2014). DOI:10.1088/0004-637X/786/2/97
- K.-W. Hodapp, *Astrophys. J. Suppl.* **94**, 615 (1994). DOI:10.1086/192084
- Ž. Ivezić, A. Connolly, J. Vanderplas, and A. Gray, *Statistics, Data Mining and Machine Learning in Astronomy: A Practical Python Guide for the Analysis of Survey Data* (Princeton University Press, Princeton, 2014). DOI:10.1515/9781400848911
- S. J. Kenyon and L. Hartmann, *Astrophys. J. Suppl.* **101**, 117 (1995). DOI:10.1086/192235
- M. Kounkel, K. Covey, M. Moe, et al., *Astron. J.* **157** (5), article id. 196 (2019). DOI:10.3847/1538-3881/ab13b1
- J. Kwan and E. Tadamaru, *Astrophys. J.* **332**, L41 (1988). DOI:10.1086/185262
- J. Kwan and E. Tadamaru, *Astrophys. J.* **454**, 382 (1995). DOI:10.1086/176489

34. B. M. Lasker, M. G. Lattanzi, B. J. McLean, et al., *Astron. J.* **136** (2), 735 (2008). DOI:10.1088/0004-6256/136/2/735
35. S. Y. Melnikov, J. Eisloffel, F. Bacciotti, et al., *Astron. and Astrophys.* **506**, 763 (2009). DOI:10.1051/0004-6361/200811567
36. A. E. Nadjip, A. M. Tatarnikov, D. W. Toomey, et al., *Astrophysical Bulletin* **72**, 349 (2017). DOI:10.1134/S1990341317030245
37. G. E. Nikishev, N. A. Maslennikova, A. M. Tatarnikov, et al., *Moscow University Physics Bulletin*, **78** (6), 854 (2023). DOI:10.3103/S0027134923060139
38. M. J. Pecaut and E. E. Mamajek, *Astrophys. J. Suppl.* **208** (1), article id. 9 (2013). DOI:10.1088/0067-0049/208/1/9
39. T. Prusti et al. (Gaia Collab.), *Astron. and Astrophys.* **595**, id. A1 (2016). DOI:10.1051/0004-6361/201629272
40. S. A. Potanin, A. A. Belinski, A. V. Dodin, et al., *Astronomy Letters* **46** (12), 836 (2020). DOI:10.1134/S1063773720120038
41. A. C. Raga, J. Canto, L. Binette, and N. Calvet, *Astrophys. J.* **364**, 601 (1990). DOI:10.1086/169443
42. S. M. Rucinski, *Astron. J.* **90**, 2321 (1985). DOI:10.1086/113937
43. B. S. Safonov, P. A. Lysenko, and A. V. Dodin, *Astronomy Letters* **43**, 344 (2017). DOI:10.1134/S1063773717050036
44. V. I. Shenavrin, V. P. Grinin, R. V. Baluev, and T. V. Demidova, *Astronomy Reports* **63** (12), 1035 (2019). DOI:10.1134/S1063772919120060
45. V. I. Shenavrin, A. N. Rostopchina-Shakhovskaya, V. P. Grinin, et al., *Astronomy Reports* **60** (8), 753 (2016). DOI:10.1134/S1063772916070064
46. S. G. Shulman and V. P. Grinin, *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **512** (2), 3098 (2022). DOI:10.1093/mnras/stac667
47. A. Somigliana, C. Toci, G. Rosotti, et al., *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **514** (4), 5927 (2022). DOI:10.1093/mnras/stac1587
48. K. M. Strom, S. E. Strom, S. Edwards, et al., *Astron. J.* **97**, 1451 (1989). DOI:10.1086/115085
49. M. Takami, H. M. Günther, P. C. Schneider, et al., *Astrophys. J. Suppl.* **264** (1), 1 (2023). DOI:10.3847/1538-4365/ac9afc
50. A. M. Tatarnikov, S. G. Zheltoukhov, N. Shatsky, et al., *Astrophysical Bulletin* **78** (3), 384 (2023). DOI:10.1134/S1990341323600163
51. W. Wenzel, *Communications of the Konkoly Observatory Hungary* **65**, 61 (1969).
52. E. Whelan and P. Garcia, *Lecture Notes in Physics: Jets from Young Stars II*, vol. 742, Ed. by F. Bacciotti, E. Whelan and L. Testi (Springer, Berlin Heidelberg, 2008), p. 123. DOI:10.1007/978-3-540-68032-1
53. R. J. White and L. A. Hillenbrand, *Astrophys. J.* **616**, 998 (2004). DOI:10.1086/425115
54. B. A. Whitney and L. Hartmann, *Astrophys. J.* **402**, 605 (1993). DOI:10.1086/172163
55. E. L. Wright, P. R. M. Eisenhardt, A. K. Mainzer, et al., *Astron. J.* **140**, 1868 (2010). DOI:10.1088/0004-6256/140/6/1868
56. S. G. Zheltoukhov and A. M. Tatarnikov, *Moscow University Physics Bulletin* **77** (6), 886 (2022). DOI:10.3103/S0027134922060133

ZZ Tau IRS: a Low Mass UX Ori Type Star with Strong Wind

M. A. Burlak¹, A. V. Dodin¹, A. V. Zharova¹, S. G. Zeltoukhov¹, N. P. Ikonnikova¹, S. A. Lamzin¹, S. A. Potanin¹, B. S. Safonov¹, I. A. Strakhov¹, and A. M. Tatarnikov¹

¹Sternberg Astronomical Institute, Lomonosov Moscow State University, Moscow, 119234 Russia

The results of photometric, polarimetric, and spectroscopic observations of the young star ZZ Tau IRS in the visible and near-infrared bands are presented. Against the continuum of an M spectral type star about 50 emission lines of allowed (H I, He I, Na I, S II) and forbidden (O I, O II, O III, N I, N II, S II, Ca II, Fe II, Ni II) transitions were identified. It was found that from the autumn of 2020 to the beginning of 2023, the brightness of the star in the visible region decreased ($\Delta I \approx 1^m.5$) and then began to return to the initial level. As the visible brightness of the star declined, its color indices decreased in the visible region, but increased in the near-IR bands. At light minimum, the degree of polarization in the *I* band reached approx 13%, and the equivalent widths of, e.g., the H α and [S II] λ 6731 lines increased to 376 and 79 Å, respectively. Arguments are given in favor of ZZ Tau IRS being a UX Ori type star, and its variability being due to eclipses by dust clouds, which are inhomogeneities in the dusty disk wind. Forbidden lines are formed both in the disk wind and in the jet, the axis of what is oriented along $PA = 61^\circ \pm 3^\circ$. The jet mass-loss rate exceeds $5 \times 10^{-10} M_\odot \text{ yr}^{-1}$, what is abnormally large for a star with a mass less than $0.3 M_\odot$. Apparently, the disk wind of ZZ Tau IRS is not axially symmetric, probably due to the azimuthal asymmetry of the protoplanetary disk found earlier from ALMA observations.

Keywords: ISM: jets and outflows—stars: variables: T Tauri, Herbig Ae/Be—stars: individual: ZZ Tau IRS