

РЕНТГЕНОВСКОЕ ИЗЛУЧЕНИЕ ЗВЕЗД ХЕРБИГА

Е. Б. Рыспаева

Крымская астрофизическая обсерватория Российской академии наук

Проанализированы архивные рентгеновские наблюдения девяти звезд Хербига, полученные на спутнике XMM-Newton для проверки гипотез о формировании их рентгеновских спектров. Из анализа зависимостей характеристик рентгеновского излучения звезд Хербига от параметров звезд обнаружена тесная взаимосвязь магнитной активности и процессов генерации рентгеновского излучения звезд Хербига, а также возможное наличие нетепловой составляющей рентгеновских спектров.

X-RAY EMISSION FROM HERBIG STARS

Е. В. Ryspaeva

Crimean Astrophysical observatory

The archived X-ray observations of 9 Ae/Be Herbig stars obtained on the XMM-Newton space observatory are analysed for checking the hypotheses of their X-rays formation. An analysis of the dependences of the X-ray radiation characteristics for Herbig stars on the parameters of the stars revealed a close relationship between the magnetic activity and the processes of generation of X-ray radiation from Herbig stars, as well as the possible presence of a non-thermal component of the X-ray spectra.

Введение

К звездам Хербига относятся звезды спектральных классов не позднее F промежуточной массы ($2-10 M_{\odot}$), еще не вышедшие на стадию главной последовательности. Вокруг звезд Хербига присутствуют плотные газопылевые диски. Рентгеновское излучение таких объектов может генерироваться либо в результате магнитосферной аккреции, либо в рамках модели ударной волны в звездном ветре, ограниченной магнитным полем (англ. Magnetic Confined Wind Shock model, MCWS), предложенной изначально для Ae/Be звезд Babel & Montmerle [1]. Однако, согласно недавним исследованиям звезд Хербига в рентгеновской части спектра с помощью орбитальной обсерватории «Chandra» (Stelzer et al. [2, 3]), температура плазмы, излучающей в рентгеновском диапазоне, оказалась весьма высока: $kT \sim 0.4-10$ кэВ. Похожий результат получен Hamaguchi et al. [4] из анализа наблюдений на спутнике ASCA. Авторы утверждали, что рентгеновское излучение рассмотренных ими 11 звезд Хербига исходит из областей плазмы, нагретой до $kT \sim 1-5$ кэВ.

Таким образом применение модели MCWS для описания процессов генерации рентгеновского излучения звезд Хербига вызывает сомнение, поскольку для большинства из таких объектов характерны слабые магнитные поля ($B_p < 1$ Гс) и медленные звездные ветры ($v_{\infty} < 600$ км \cdot с $^{-1}$). При указанных терминальных скоростях верхний предел температуры плазмы в рамках модели MCWS должен составлять ~ 0.43 кэВ (см. формулу (10) в статье [5]). Поэтому многие авторы предполагают, что модель MCWS вероятнее всего описывает только малую часть рентгеновских потоков от звезд Хербига, а основное рентгеновское излучение формируется либо в результате аккреции, либо звезды Хербига могут

иметь невидимые компоненты поздних спектральных классов, дающие существенный вклад в рентгеновское излучение.

В настоящей работе проанализированы архивные рентгеновские наблюдения девяти звезд Хербига, выполненные на спутнике XMM-Newton с целью проверки указанных выше гипотез. В подборке звезд присутствуют F звезда, 6 A звезд и 2 B звезды.

Анализ рентгеновских спектров звезд Хербига

Первичная обработка использованных в работе наблюдений и дальнейшее извлечение спектров звезд из изображений с камеры EPIC, установленной на спутнике XMM-Newton, были выполнены с помощью программного пакета SAS 17.0 с учетом рекомендаций группы SAS¹. Полученные спектры в диапазоне энергий 0.2–8 кэВ были аппроксимированы различными моделями с использованием пакета XSPEC 12.10.0². Для проверки применимости MCWS к изучаемым звездам Хербига их спектры были аппроксимированы двух- или трехтемпературными моделями APEC (Astrophysical Plasma Emission Code [6]) или MEKAL [7–9], описывающими излучение горячей плазмы, в которой атомы ионизируются электронным ударом. Для проверки гипотезы о формировании рентгеновского излучения звезд в результате аккреции на поверхность звезды использовалась сумма моделей APEC и PSHOCK [10] — модели ударной волны, описывающей нестационарное тепловое рентгеновское излучение. Дополнительно спектры были аппроксимированы моделью APEC с добавлением степенного компонента для выявления возможного нетеплового рентгеновского излучения звезд. О его наличии позволяют предположить прежде всего высокие температуры излучающей плазмы, а также присутствие околосредных дисков, взаимодействующих с магнитным полем. Примеры аппроксимаций спектра с покомпонентным разложением показаны на рис. 1.

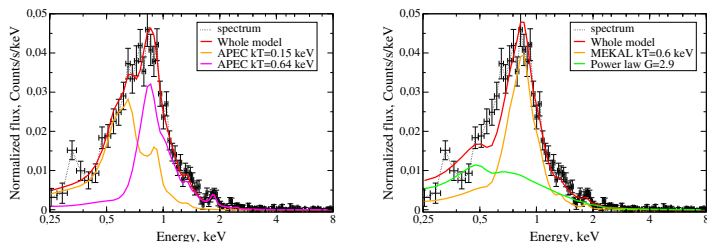


Рис. 1. Модельные спектры звезды HD 31293 с покомпонентным разложением. Красной пунктирной линией показан суммарный модельный спектр; оранжевыми и сиревыми линиями — вклады моделей APEC, MEKAL; зеленой линией — вклад степенной компоненты. Пик на 0.3 кэВ соответствует резонансной линии гелиеподобного иона CVI

В результате аппроксимаций рассмотренных спектров было установлено, что они могут быть достаточно точно описаны моделями APEC или MEKAL с $kT < 3$ кэВ, но при добавлении степенного закона температуры уменьшаются до 1 кэВ и ниже. При этом доли степенных компонент³ составляют от 20 до 70 %, а спектральный индекс $G \sim 2-3$. Спектры рассмотренных звезд Ae Хербига также удалось описать моделями APEC+PSHOCK.

¹www.cosmos.esa.int/web/xmm-newton

²<https://heasarc.gsfc.nasa.gov/xanadu/xspec/>

³Эти величины определялись как отношение интегрального потока степенного компонента к потоку, описываемому полным модельным спектром (см. формулу (4) в статье [11]).

Далее был выполнен регрессионный анализ возможных зависимостей найденных характеристик рентгеновского излучения звезд Хербига (светимость, жесткость [12], температура плазмы, спектральный индекс, доля степенной компоненты) от таких параметров звезд, как терминальные скорости звездного ветра, скорости аккреции, напряженности магнитного поля, массы звезд. Были выявлены корреляции, показанные на рис. 2. Доля степенной компоненты линейно увеличивается с ростом жесткости (коэффициент корреляции 0.76 ± 0.11), а жесткость спектров Ae звезд Хербига линейно убывает с увеличением напряженности магнитного поля (коэффициент корреляции -0.93 ± 0.6).

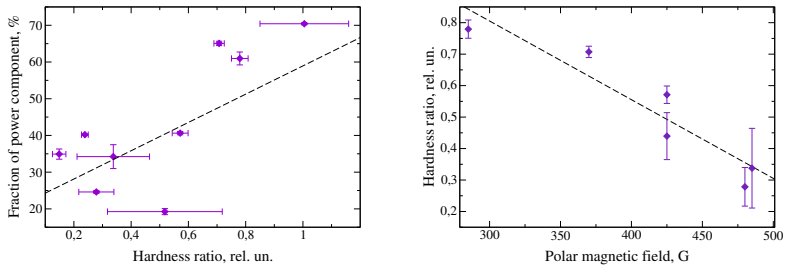


Рис. 2. Слева — зависимость доли степенной компоненты от жесткости (hardness ratio) спектров звезд Хербига; справа — зависимость жесткости от напряженности полярного магнитного поля для звезд Ae Хербига. Линейные аппроксимации показаны штриховыми линиями

Обсуждение результатов и общее заключение

В работах Ryspaeva & Kholtygin [11, 13] показано, что процессы, формирующие рентгеновое излучение звезд спектральных классов O и B, *не связаны с магнитной активностью звезд*. При этом температура излучающей плазмы OB звезд увеличивается с ростом жесткости спектров, а доля степенной компоненты линейно возрастает с увеличением температуры плазмы. У рассмотренных в данной статье звезд Хербига таких корреляций не было обнаружено. Эти результаты и найденные в данной работе зависимости позволяют заключить, что, в отличие от типичных OBA звезд, звезды Хербига генерируют рентгеновое излучение в результате процессов, в которых участвуют их магнитные поля. В то же время в работе Холтыгина и др. [14] было обнаружено, что звезды Ae/Be Хербига с высокими скоростями аккреции, возможно, имеют в среднем меньшие магнитные поля. В данной работе не удалось выявить корреляции между характеристиками рентгеновского излучения звезд Хербига и их скоростями аккреции, так как эта величина измерена только у шести из девяти рассмотренных объектов, а известные значения находились в узком диапазоне 0.6 dex. В то же время не было обнаружено зависимости между рентгеновскими светимостями и массами звезд Хербига, характерной для звезд типа T Тельца [15]. Следовательно, возможный механизм формирования рентгеновского излучения звезд Хербига в результате аккреции не является единственным. Обнаруженный нами факт, что при добавлении к рентгеновскому спектру степенного компонента температура плазмы уменьшается до приемлемых для звезд Хербига значений, указывает на наличие нетепловой составляющей рентгеновских спектров звезд Хербига.

Таким образом, полученные в представленной статье результаты позволяют сделать следующий вывод. Модель MCWS вероятнее всего неприменима к звездам Хербига в силу

меньшей величины их магнитного поля по сравнению с ВА звездами главной последовательности и малости скорости их звездного ветра. Рисунок 2 (справа) показывает, что чем больше напряженность магнитного поля, тем сильнее подавляется магнитосферная аккреция и уменьшается жесткость рентгеновского излучения. Природа возможной нетепловой компоненты рентгеновского излучения пока не ясна. Возможно, нетепловое излучение формируется в результате звездных вспышек в области локальных магнитных полей.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ 18-02-00554 А, а также при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации, тема FEUZ-2020-0030.

Библиографические ссылки

- [1] *Babel J., Montmerle T.* X-ray emission from Ap-Bp stars: a magnetically confined wind-shock model for IQ Aur. // *Astron. Astrophys.* — 1997. — Vol. 323. — P. 121–138.
- [2] *Stelzer B., Micela G., Hamaguchi K., Schmitt J. H. M. M.* On the origin of the X-ray emission from Herbig Ae/Be stars // *Astron. Astrophys.* — 2006. — Vol. 457, № 1. — P. 223–235. [astro-ph/0605590](#).
- [3] *Stelzer B., Robrade J., Schmitt J. H. M. M., Bouvier J.* New X-ray detections of Herbig stars // *Astron. Astrophys.* — 2009. — Vol. 493, № 3. — P. 1109–1119. [0810.1836](#).
- [4] *Hamaguchi Kenji, Yamauchi Shigeo, Koyama Katsuji.* X-Ray Study of Herbig Ae/Be Stars // *Astrophys. J.* — 2005. — Vol. 618, № 1. — P. 360–384. [astro-ph/0406489](#).
- [5] *ud-Doula A., Owocki Stanley, Townsend Richard et al.* X-rays from magnetically confined wind shocks: effect of cooling-regulated shock retreat // *Mon. Not. R. Astron. Soc.* — 2014. — Vol. 441, № 4. — P. 3600–3614. [1404.5336](#).
- [6] *Smith Randall K., Brickhouse Nancy S., Liedahl Duane A., Raymond John C.* Collisional Plasma Models with APEC/APED: Emission-Line Diagnostics of Hydrogen-like and Helium-like Ions // *Astrophys. J. Lett.* — 2001. — Vol. 556, № 2. — P. L91–L95. [astro-ph/0106478](#).
- [7] *Mewe R., Gronenschild E. H. B. M., Oord G. H. J. van den.* Calculated X-radiation from optically thin plasmas. V. // *Astron. Astrophys., Suppl. Ser.* — 1985. — Vol. 62. — P. 197–254.
- [8] *Mewe R., Lemen J. R., Oord G. H. J. van den.* Calculated X-radiation from optically thin plasmas. VI - Improved calculations for continuum emission and approximation formulae for nonrelativistic average Gaunt factors. // *Astron. Astrophys., Suppl. Ser.* — 1986. — Vol. 65. — P. 511–536.
- [9] *Liedahl Duane A., Osterheld Albert L., Goldstein William H.* New Calculations of Fe L-Shell X-Ray Spectra in High-Temperature Plasmas // *Astrophys. J. Lett.* — 1995. — Vol. 438. — P. L115.
- [10] *Borkowski Kazimierz J., Lyerly William J., Reynolds Stephen P.* Supernova Remnants in the Sedov Expansion Phase: Thermal X-Ray Emission // *Astrophys. J.* — 2001. — Vol. 548, № 2. — P. 820–835. [astro-ph/0008066](#).
- [11] *Ryspaeva E. B., Kholtygin A. F.* Contribution of a Non-Thermal Component to the X-Ray Emission of OB Stars // *Astrophysical Bulletin.* — 2020. — Vol. 75, № 2. — P. 127–138.
- [12] *Nazé Yaël, Petit Véronique, Rinbrand Melanie et al.* X-ray emission from magnetic massive stars // 40th COSPAR Scientific Assembly. — 2014. — Vol. 40. — P. E1.3–15–14.
- [13] *Ryspaeva Elizaveta, Kholtygin Alexander.* Analysis of the X-ray emission from OB stars III: low-resolution spectra of OB stars // *Research in Astronomy and Astrophysics.* — 2020. — Vol. 20, № 7. — P. 108.
- [14] *Kholtygin A. F., Tsiopa O. A., Doronina Ya. A. et al.* Accretion and magnetic fields of Ae/Be Herbig stars // *Astrophysics.* — 2021. — Vol. 64, № 1.