# НАБЛЮДАТЕЛЬНЫЕ ПРОЯВЛЕНИЯ КАНАЛА СВЕРХКРИТИЧЕСКОГО АККРЕЦИОННОГО ДИСКА В SS 433

**А. С. Медведев**[1], **С. Н. Фабрика**[2]



[1] *Московский государственный университет им. М. В. Ломоносова*
*119991, Россия, Москва*
*e-mail:* a.s.medvedev@gmail.com

[2] *Специальная астрофизическая обсерватория РАН*
*369167, Россия*
*e-mail:* fabrika@sao.ru

Исследованы спектры SS 433, полученные космической обсерваторией XMM-Newton. Обнаружено, что помимо теплового излучения релятивистских струй в рентгеновский спектр значительный вклад вносит излучение, выходящее из глубин канала сверхкритического аккреционного диска, отраженное от внешних частей канала. Также обнаружен избыток мягкого излучения, который, вероятно, является собственным излучением внешних, видимых наблюдателем частей канала.

## ВВЕДЕНИЕ

Хорошо известная тесная двойная система SS 433 [2] интенсивно изучается методами рентгеновской астрофизики. Интерес к этой системе обусловлен прежде всего тем, что процессы, приводящие к образованию рентгеновского спектра SS 433, протекают во внутренних областях аккреционного диска, лежащих в непосредственной близости к компактному объекту (вероятно, черной дыре). В данной области темп аккреции на компактный объект существенно превышает критический, что приводит к нестабильности диска и образованию струй. Поэтому изучение рентгеновских спектров и построение соответствующих моделей может пролить свет на механизмы образования и ускорения струй, а также подтвердить или опровергнуть некоторые положения теории сверхкритической аккреции.

В работах, посвященных изучению рентгеновских спектров SS 433, были найдены линии струй, при этом считается, что весь рентгеновский поток SS 433 формируется в струях (например [4, 6]). Однако в работе Бринкманна и др. [1], посвященной исследованиям спектров SS 433, полученных на обсерватории XMM-Newton, было обнаружена дополнительная жёсткая компонента спектра. Разумного объяснения жесткой компоненты авторам найти не удалось. В настоящей работе мы предлагаем объяснение природы дополнительного компонента в спектре SS 433. Болометрическая светимость диска SS 433 составляет $L_{bol} \sim 10^{40}$ эрг/с, а максимум излучения приходится на ультрафиолетовый диапазон. Однако вся эта энергия первоначально должна выделяться в рентгеновском диапазоне при аккреции газа на черную дыру. Вероятно, рентгеновское излучение термализуется в мощном ветре, истекающем из центральных областей диска. В сверхкритическом аккреционном диске есть гидродинамический канал, в котором формируются струи. Наблюдаемое рентгеновское излучение SS 433 составляет всего $L_{\rm x} \sim 10^{36}$ эрг/с, и считается, что это излучение охлаждающихся релятивистских струй [1, 4, 6], которые испускает центральная машина.

Ожидаемая рентгеновская светимость на 4 порядка величины больше, чем та, что наблюдается. Объяснение этого факта следующее: ориентация системы SS 433 не позволяет нам прямо “заглянуть” в канал аккреционного диска. Поэтому часть рентгеновского потока оказывается запертой внутри канала и выходит по направлению струй. Иными словами, при ориентации SS 433 струями в сторону наблюдателя мы увидели бы яркий рентгеновский источник со светимостью $L_{\rm x} \sim 10^{40}$ эрг/с.

Несмотря на то, что большая часть рентгеновского потока является закрытой для наблюдателя, мощный ветер, истекающий из диска, дает надежду обнаружить излучение яркого канала в качестве отраженного излучения от ветровых структур. Наблюдение отраженного излучения дало бы возможность доказать справедливость современных моделей сверхкритической аккреции. Целью нашей работы было найти свидетельства излучения канала в сверхкритическом аккреционном диске SS 433.

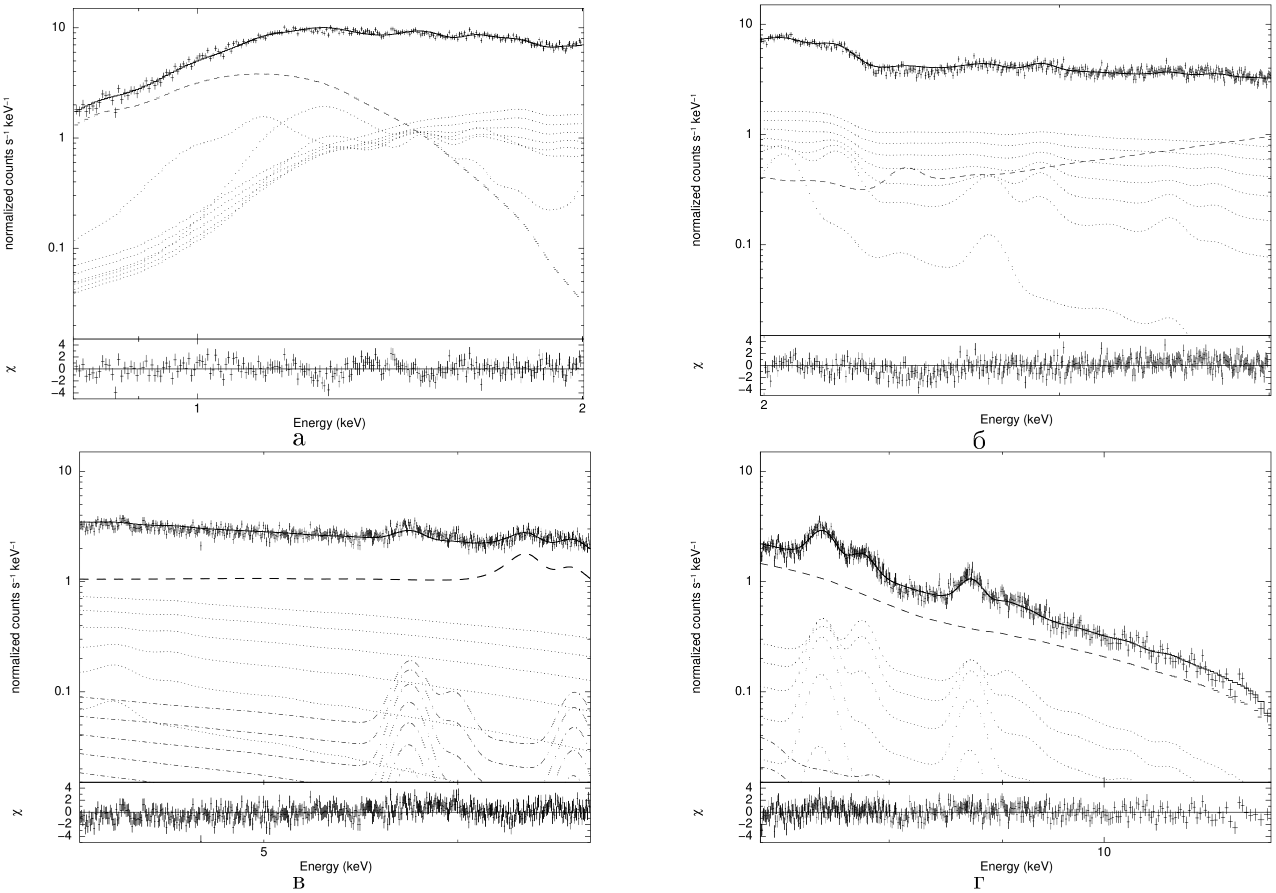


Рис. 1. Аппроксимация спектра SS 433 моделью "струи+отражение" в четырех диапазонах спектра. *а* – Диапазон 0.8–2.0 кэВ. В этом диапазоне мы не обнаружили отраженного компонента. Чтобы описать избыток излучения в мягкой части спектра было добавлено чернотельное излучение (пунктир). *б* – Диапазон 2.0–4.0 кэВ. Отраженный спектр (пунктир) очень слаб. Падающий на отражающую стенку спектр является степенным с фотонным индексом $\Gamma \leq 1$. *в* – Диапазон 4.0–7.0 кэВ. Модель отражения (пунктир) хорошо описывает излучение в континууме и объясняет специфические линии железа, возникающие в процессе отражения (в районе 6.4 и 6.7 кэВ). *г* – Диапазон 7–12 кэВ. Модель хорошо описывает спектр. Помимо континуального излучения, наша модель объясняет абсорбционную особенность между линиями железа и никеля, на которую было указано в работе Куботы и др. [5]

## МОДЕЛИРОВАНИЕ РЕНТГЕНОВСКОГО СПЕКТРА SS 433

Нами были изучены внезатменные рентгеновские спектры SS 433 в двух различных фазах прецессии диска, $\Psi = 0.8$ и $\Psi = 0$, полученные космической обсерваторией XMM-Newton. Последняя фаза соответствует максимальному раскрытию диска в сторону наблюдателя. Мы построили модель адиабатически охлаждающихся струй с учётом потерь энергии на тормозное излучение, основанную на модели излучения горячей оптически прозрачной плазмы APEC Смита и др. [8]. Эта модель хорошо описывает эмиссионные линии струй, но, как было сказано во введении, для описания континуального излучения SS 433 требуется привлечение дополнительных моделей.

Мы использовали модель отражения от частично ионизованной среды Росса и Фабиана [7]. Наш выбор обусловлен тем, что в спектре SS 433 присутствуют особенности, которые могут быть объяснены только отражением. Это флюоресцентные линии железа Fe $K_\alpha$ (рис. 1, *в*, в районе 6.4 кэВ) и рекомбинационные линии железа высоких стадий ионизации (рис. 1, *в*, в районе 6.7 кэВ). Кроме того, в диапазоне 8–9 кэВ Куботой и др. [5] был обнаружен широкий абсорбционный компонент.

Весь спектр был поделен на четыре диапазона, в каждом из них параметры отраженного спектра искались независимо, но совместно с единой моделью тепловых струй. Рентгеновский спектр SS 433 прекрасно описывается в модели "струи плюс отражение" (рис. 1). Найдено, что видимое основание струй имеет температуру $\approx 17$ кэВ и находится на расстоянии $\sim 10^{11}$ см от черной дыры. Поток

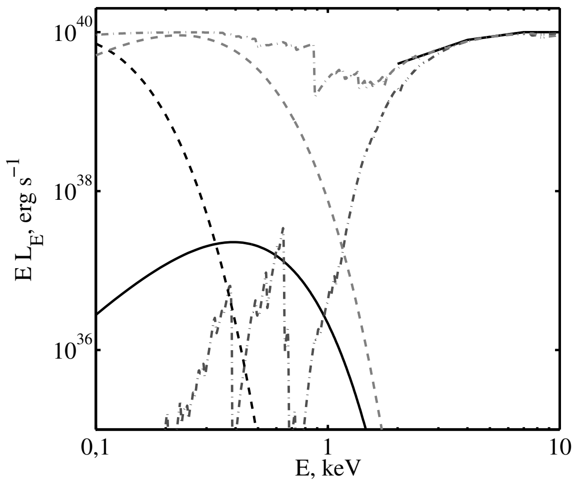


Рис. 2. Дополнительные компоненты в спектре SS 433 показаны сплошными линиями. Это излучение, падающее на отражающую поверхность, его спектр плоский в диапазоне 7.0–12.0 кэВ и становится более крутым в диапазоне 2.0–7.0 кэВ, а также мягкое дополнительное излучение в диапазоне 0.1–1.0 кэВ, показанное как планковское с температурой 0.1 кэВ. Штрих-пунктиром показаны две модели плоского спектра после прохождения через поглощающую среду для двух разных температур. Пунктиром показаны непоглощенные спектры двух моделей "многоцветного канала" [3].

кинетической энергии в струях $L_{kin} \sim 2 \cdot 10^{39}$ эрг/с, лучевая плотность поглощающего межзвездного газа составляет $N_H \sim 1.5 \cdot 10^{22}$ см$^{-2}$. Используемый нами подход позволил восстановить спектр отражаемого на стенках канала излучения, т. е. того излучения, которое формируется в самых центральных областях аккреционного диска.

На рисунке 2 представлен восстановленный спектр дополнительного компонента, а также нанесены модельные спектры. Падающий на отражающую поверхность спектр получился плоским в диапазоне 4–12 кэВ с резким завалом в сторону низких энергий в районе 2 кэВ. Завал в спектре может быть объяснен многократным рассеянием исходного спектра на стенках канала, поскольку при каждом рассеянии происходит поглощение мягкой части спектра квазинейтральным веществом стенки. Форма спектра в диапазоне высоких энергий предполагает сильную комптонизацию излучения. На рисунке 2 нанесен дополнительный компонент мягкой части спектра, который мы представили функцией Планка с температурой $\approx 0.1$ кэВ. Возможно, что своим происхождением данный компонент обязан собственному излучению стенок гидродинамического канала.


[1] *Brinkmann W., Kotani T., Kawai N.* XMM-Newton observations of SS 433. I. EPIC spectral analysis // Astron. and Astrophys. – 2005. – **431**. – P. 575–586.

[2] *Fabrika S.* The jets and supercritical accretion disk in SS 433 // Astrophys. and Space Phys. Rev. – 2004. – **12**. – P. 1–152.

[3] *Fabrika S., Karpov S., Abolmasov P., Sholukhova O.* Properties of SS 433 and ultraluminous X-ray sources in external galaxies // IAU Symp. N 230. – 2006. – P. 278–281.

[4] *Kotani T., Kawai N., Matsuoka M., Brinkmann W.* Iron-Line Diagnostics of the Jets of SS 433 // Publ. Astron. Soc. Japan. – 1996. – **48**. – P. 619–629.

[5] *Kubota K., Kawai N., Kotani T., et al.* The Plasma Structure in the Vicinity of the Jet of SS 433 // ASP Conf. Ser. – 2007. – **362**. – P. 121.

[6] *Marshall H., Canizares C., Schulz N.* The High-Resolution X-Ray Spectrum of SS 433 Using the Chandra HETGS // Astrophys. J. – 2002. – **564**, N 2. – P. 941–952.

[7] *Ross R., Fabian A.* A comprehensive range of X-ray ionized-reflection models // Mon. Notic. Roy. Astron. Soc. – 2005. – **358**, N 1. – P. 211–216.

[8] *Smith R., Brickhouse N., Liedahl D., Raymond J.* Collisional Plasma Models with APEC/APED: Emission-Line Diagnostics of Hydrogen-like and Helium-like Ions // Astrophys. J. – 2001. – **556**, N 2. – P. L91–L95.