

THE OBSCURED ACTIVE NUCLEUS OF NGC 7172 AS SEEN BY NuSTAR

Vasylenko A. A.

Main astronomical observatory of NAS of Ukraine, Kyiv, 03143, UKRAINE

e-mail: vasylenko_a@mao.kiev.ua

We present the hard X-ray spectral analysis of NGC 7172, the nearby ($z=0.0087$) Seyfert 2 galaxy. This analysis is based on the spectral data from a 32 ks *NuSTAR* observation conducted in 2014 (ID 6006130800). The *NuSTAR* 3-64 keV spectrum of the source showed a constant Compton-thin obscuration $N_{\text{H}} \approx 8 \cdot 10^{22} \text{ cm}^{-2}$, which is similar to that observed by *XMM-Newton*, *Suzaku*, *ASCA* and *BeppoSAX* over past 30 years.

We revealed the presence of a primary power-law continuum with $\Gamma \approx 1.8$, a moderate reflection component with $\langle R \rangle \sim 0.44$ (adopting the *ad-hoc* disk-like reflection model *pexmon* (Nandra et al., 2007)) and a narrow Fe K_{α} line with $EW = 67_{-14}^{+13} \text{ eV}$. The application of the numerical torus models, such as *BNTorus* (Brightman & Nandra, 2011) and *MYTorus* (Murphy & Yaqoob, 2009), confirmed the Compton-thin type of the Seyfert nucleus and allowed us to obtain an estimations of the torus opening angle $\Theta_t \sim 59^{\circ}$ and inclination $\Theta_i \sim 61^{\circ}$. Interestingly, that additional reflection component with $R \approx 0.35$ is needed unexpectedly during the fit with *BNTorus* model, thus this model is likely to be inappropriate for NGC 7172.

The measured intrinsic 2-10 keV ($L_{\text{intr}}(2-10 \text{ keV}) = (1.14-1.23) \cdot 10^{43} \text{ erg/s}$) and 10-40 keV ($L_{\text{intr}}(10-40 \text{ keV}) = (1.56-1.62) \cdot 10^{43} \text{ erg/s}$) luminosity of NGC 7172 indicate the brightening of source in X-rays as compare with previous data for ~ 18 years. Using the data of previous observations, we demonstrate also the long-term variability of $L_{\text{intr}}(2-10 \text{ keV})$ almost by order and $EW \text{ FeK}_{\alpha}$ by factor ~ 4 on a timescale of ~ 12 years. It coincides to the distance of $d \sim 3.7 \text{ pc}$ between central source and reprocessing medium. Such changes of intrinsic luminosity without changes in N_{H} value indicate the variability of a central source. In the same time the results of spectral analysis with the presence of the lag between variability of intrinsic luminosity $L_{\text{intr}}(2-10 \text{ keV})$ and $EW \text{ FeK}_{\alpha}$, as well as a behavior of intensity $I_{\text{FeK}_{\alpha}}$ of the line, are in agreement with the scenario, where the observed FeK_{α} line is generated in a distant gas-dust torus.

Keywords: galaxies: active --- X-rays: galaxies --- X-rays: individual (NGC 7172)

Затенённое активное ядро галактики NGC 7172 по наблюдению NuSTAR

А.А. Василенко

Главная астрономическая обсерватория НАН Украины, ул. Академика Заболотного 27, Киев,
03143

Проанализированы свойства рентгеновского излучения активного ядра галактики NGC 7172 типа Сейферт 2 по данным наблюдения космической обсерватории NuSTAR в 2014 году. Источник демонстрирует постоянное во времени поглощение $N_H \approx 8 \cdot 10^{22} \text{ см}^{-2}$, значение которого сравнимо с полученным поглощением из наблюдений XMM-Newton, Suzaku, ASCA и ВерроSAX за предыдущие ~30 лет. Базовый спектральный анализ выявил присутствие умеренной компоненты отражения с $\langle R \rangle \sim 0.44$ и узкой линии Fe K_α с $EW = 67_{-14}^{+13} \text{ эВ}$. Мы применили численные модели тора, которые подтвердили Комптоновски-тонкий тип сейфертовского ядра галактики, а также помогли получить оценку угла наклона тора $\Theta_i \sim 61^\circ$ и его раскрытия $\Theta_t \sim 59^\circ$. Мы также продемонстрировали, что данные предыдущих наблюдений показывают изменчивость собственной светимости $L_{\text{intr}}(2-10 \text{ кэВ})$ примерно на порядок и эквивалентной ширины $EW \text{ Fe}K_\alpha$ в 4 раза на интервале ~12 лет, что соответствует расстоянию $d \sim 3.7 \text{ пк}$. Такое поведение $L_{\text{intr}}(2-10 \text{ кэВ})$ свидетельствует о переменности центрального источника. Наряду с этим, результаты спектрального анализа вместе с задержкой между изменением светимости и $EW \text{ Fe}K_\alpha$, а также изменение интенсивности $I_{\text{Fe}K_\alpha}$, лучше всего соответствуют варианту рождения линии $\text{Fe}K_\alpha$ в отдалённом газопылевом торе.

ЗАТЕМНЕНЕ АКТИВНЕ ЯДРО ГАЛАКТИКИ NGC 7172 ЗА СПОСТЕРЕЖЕННЯМ NuSTAR, Василенко А. А. — Проаналізовано властивості рентгенівського випромінювання активного ядра галактики NGC 7172 типу Сейферт 2 за даними спостереження космічної обсерваторії NuSTAR в 2014 році. Джерело демонструє постійне в часі поглинання $N_H \approx 8 \cdot 10^{22} \text{ см}^{-2}$, величина якого порівняна з отриманим поглинанням зі спостережень XMM-Newton, Suzaku, ASCA та ВерроSAX за попередні ~30 років. Базовий спектральний аналіз виявив присутність помірної компоненти відбиття з $\langle R \rangle \sim 0.44$ та вузької лінії Fe K_α з $EW = 67_{-14}^{+13} \text{ еВ}$. Ми застосували чисельні моделі тору, які підтвердили Комптонівськи-тонкий тип сейфертівського ядра галактики, а також допомогли отримати оцінку куту нахилу тору $\Theta_i \sim 61^\circ$ та його розкриття $\Theta_t \sim 59^\circ$. Ми також продемонстрували, що дані попередніх спостережень показують змінність власної світності $L_{\text{intr}}(2-10 \text{ кеВ})$ приблизно на порядок та еквівалентної ширини $EW \text{ Fe}K_\alpha$ в 4 рази на інтервалі ~12 років, що відповідає відстані $d \sim 3.7 \text{ пк}$. Така

поведінка $L_{intr}(2-10 \text{ keV})$ свідчить про змінну поведінку центрального джерела. Водночас результати спектрального аналізу разом із затримкою між зміною світності та $EW \text{ FeK}_\alpha$, а також зміна інтенсивності I_{FeK_α} найкраще відповідають варіанту народження лінії FeK_α у віддаленому газопиловому торі.

1 Введение

Галактика NGC 7172 являється видимою почти с ребра галактикой раннего типа, которая входит в компактную группу галактик HCG 90. Оптически классифицированная как Сейферт 2 [30], эта галактика находится на расстоянии $z=0.0087$.

NGC 7172 наблюдалась в рентгеновском диапазоне почти всеми основными миссиями. Первое наблюдение было предпринято спутником *EXOSAT* в диапазоне 2-10 кэВ, которое показало наличие степенного спектра со степенным индексом $\Gamma=1.84$ и поглощением (т.е. столбцевой концентрацией водорода) $N_{\text{H}} \approx 10^{23} \text{ см}^{-2}$ [33]. Анализ двух наблюдений с помощью *ASCA* [12,29,34] показал наличие меньшего наклона континуума $\Gamma \approx 1.5$ при значении поглощения $N_{\text{H}} \approx 8 \cdot 10^{22} \text{ см}^{-2}$, а также присутствие эмиссионной линии железа Fe K_α 6.4 кэВ. Кроме того, в [12] была обнаружена переменность кривой блеска на уровне 30% в пределах нескольких часов. В работах [1,7,28] представлен анализ двух широкодиапазонных (1.65-50 кэВ) наблюдений с помощью *BeppoSAX*, в которых определены значения степенного индекса в пределах 1.6-1.9 в зависимости от модели спектра, значения поглощения в пределах $8.3-11 \cdot 10^{22} \text{ см}^{-2}$, а также присутствие узкой линии Fe K_α 6.4 кэВ. Было отмечено наличие компоненты отражения от нейтральной среды [28]. Обсерватория *XMM-Newton* трижды наблюдала NGC 7172 и все наблюдения показывают практически одинаковые значения степенного индекса $\Gamma \approx 1.6$ и поглощения $\sim 7-8 \cdot 10^{22} \text{ см}^{-2}$ [напр., 3,8,13,17,36] (в работе [11], где применялась модель с двумя компонентами отражения, $N_{\text{H}} \sim 1.3 \cdot 10^{23} \text{ см}^{-2}$), а также наличие узкой линии Fe K_α . В работе [11] проверка на наличие релятивистского размытия для линии железа показала отсутствие такового. Анализ наблюдения *Suzaku* в широком диапазоне 0,5-150 кэВ [9,16] показал значение степенного индекса $\Gamma \approx 1.7$, поглощения $\sim 8.9 \cdot 10^{22} \text{ см}^{-2}$, наличие узкой линии Fe K_α , а также отсутствие в спектре релятивистских эффектов.

Рентгеновскому излучению от активного ядра NGC 7172 присуща кратковременная переменность, которая, например, была детально изучена в работе [3], а также долговременная переменность (см., например [12,13]). При этом отсутствует значительное изменение величины поглощения (в зависимости от модели $7-9 \cdot 10^{22} \text{ см}^{-2}$), по значению которой галактика относится к Комптоновски-тонкой по поглощению.

Наличие и вклад нейтрального отражения в рентгеновский спектр NGC 7172 не до конца изучен, несмотря на присутствие линии Fe K α , и не рассматривается как необходимая в ряде работ [1,12,13,17]. В то же время, в работах [3,7,11,16,28,34] авторы приходят к выводу о его присутствии в спектре.

В данной работе представлен спектральный анализ рентгеновского спектра NGC 7172, полученного космическим аппаратом миссии *NuSTAR* (Nuclear Spectroscopic Telescope Array), который наблюдает в диапазоне энергий 3-79 кэВ. Благодаря высокой чувствительности обсерватории, качество её данных позволило получить характеристики спектра отражения, а также протестировать несколько моделей структуры поглощающей среды.

Статья структурирована следующим образом: в п. 2 описана процедура обработки сырых данных, в п. 3 — краткое описание кривой блеска, в п. 4 представлен спектральный анализ, а в п. 5 обсуждается интерпретация результатов и формулируются соответствующие выводы.

2 Обработка данных

Галактика NGC 7172 наблюдалась с помощью *NuSTAR* 07.10.2014 (ID 60061308002) продолжительностью 32 тыс. сек. Исходные данные были обработаны с помощью программ пакета *NuSTARDAS* v.1.6.0 (*NuSTAR* Data Analysis Software package). Калиброванные и очищенные файлы событий были получены с использованием калибровочных файлов *NuSTAR* CalDB (20171204) и стандартных критериев отбора в подпрограмме *nupipeline*. Для получения спектров источника и фона, а также очищенных кривых блеска была использована подпрограмма *nuproducts*. Области источника и фона были выбраны в обоих детекторах FPMA и FPMB как круговые области радиусом 60" и 70" соответственно (для фона — в области без других источников). Для минимизации систематических эффектов, спектры, полученные камерами FPMA и FPMB, не были объединены в один, хотя их подгонка была одновременной.

3 Кривая блеска

На Рис. 1 приведена исправленная на фон кривая блеска *NuSTAR* FPMA+FPMB в диапазонах 3-10 кэВ и 10-60 кэВ, а также их отношение. Данные сгруппированы в бины с шириной интервала 900 с. Для анализа кривой блеска была использована программа *FTOOLS* *lcstats*. Средние значения скорости счета со стандартными отклонениями имеют значения $3.12 \pm 0.27 \text{ с}^{-1}$ для 3-10 кэВ и $1.56 \pm 0.19 \text{ с}^{-1}$ для 10-60 кэВ соответственно. Принимая гипотезу об отсутствии вариаций кривых блеска в обоих диапазонах, соответственно получим

$\chi^2/\text{d.o.f.}=117.3/49$ и $\chi^2/\text{d.o.f.}=96.27/49$, что свидетельствует о присутствии умеренной кратковременной переменности. Вследствие отсутствия значительных по амплитуде вариаций в кривых блеска, в дальнейшем используется усреднённый по времени спектр.

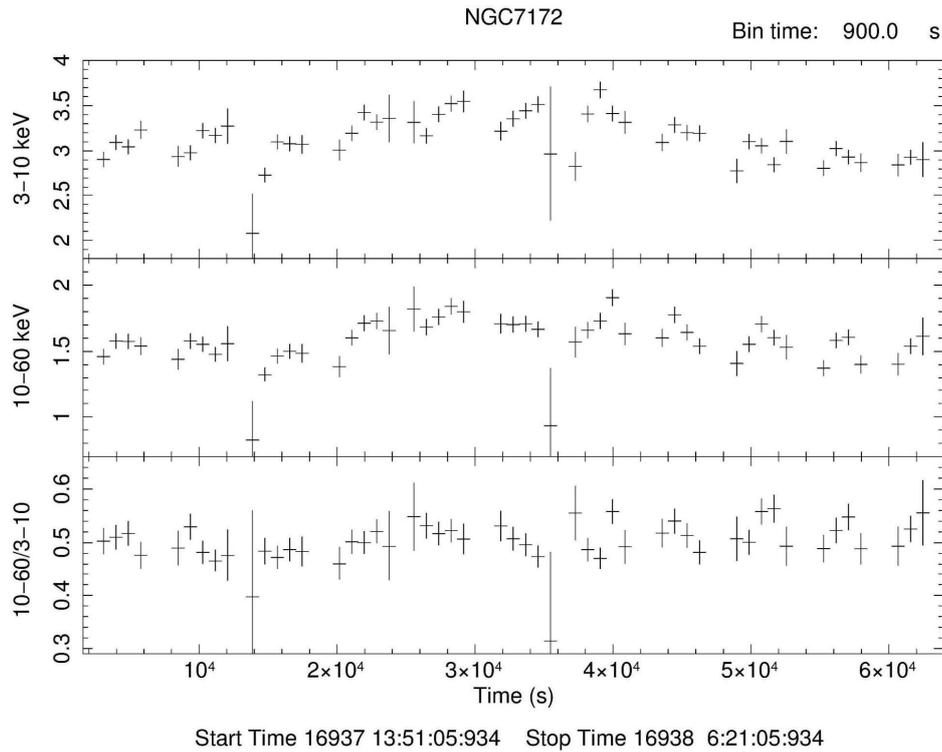


Рис. 1. Кривые блеска FPMA+FPMB в диапазонах 3-10 кэВ (вверху), 10-60 кэВ (посередине), а также их отношение (внизу).

4 Спектральный анализ

Анализ спектра производился при помощи специализированной программы XSPEC v.12.9.0u, которая является частью программного пакета HEASOFT v.6.19. Ошибки параметров, приведённые в данной работе, отображают 90% доверительный интервал для одного параметра ($\Delta\chi=2.71$). При вычислении светимостей были использованы космологические параметры $H_0=70 \text{ км с}^{-1} \text{ Мпс}^{-1}$, $\Lambda_0=0.73$, $\Omega_M=0.27$ [5]. Детекторы FPMA/FPMB могут получать спектры вплоть до 79 кэВ, но в нашем случае диапазон энергий был ограничен до ~ 60 кэВ из-за значительного фона на высших энергиях. Таким образом, в спектральном анализе используется диапазон энергий 3-64 кэВ.

Величина поглощения в Галактике определяется столбцевой концентрацией $N_{\text{H,gal}} = 1.9 \cdot 10^{20} \text{ см}^{-2}$ согласно [15] и учитывалась моделью tbabs [37]. Для учёта расхождений во взаимной калибровке камер FPMA и FPMB была введена постоянная интеркалибровки C (в

моделях обозначена как *constant*), которая в процессе подгонки равнялась 0.98 ± 0.01 , т.е. не более 5% ,что соответствует [20].

Феноменологические модели. Для начала мы получили параметры континуума, для чего был исключён интервал энергий в диапазоне 5.5 – 7.5 кэВ, где возможен существенный вклад эмиссионных линий, и проведена подгонка спектра со степенным энергетическим распределением, где нормировка, фотонный индекс Γ и значение внутреннего поглощения N_H являются свободными входными параметрами модели. Начальная базовая модель имела вид $Tbabs * zTbabs * zpo * constant$. Была получена неплохая подгонка ($\chi^2/d.o.f.=1093/1077$) со значениями параметров $\Gamma=1.67 \pm 0.02$ и $N_H=(7.7 \pm 0.3) \cdot 10^{22} \text{ см}^{-2}$. Экстраполяция на диапазон 5.5 – 7.5 кэВ показывает хорошо заметную эмиссионную линию, что отражается на значении статистики $\chi^2/d.o.f.=1299/1079$. Включение в модель линии с гауссовским профилем *zgauss* значительно улучшило статистику ($\chi^2/d.o.f.=1140/1125$) и показало параметры линии $E_{line}=6.29 \pm 0.07 \text{ кэВ}$, $\sigma = 190_{-115}^{+165} \text{ эВ}$. Несмотря на хорошее значение статистики, в спектре наблюдается небольшой горб в диапазоне 20-40 кэВ, соответствующий по энергии т.н. «комптоновскому горбу», а также порог поглощения около 7 кэВ, которые являются характерными признаками наличия компоненты отражения. Для её учёта, а также для учёта возможного экспоненциального высокоэнергетического обрезания, мы добавили компоненту нейтрального комптоновского отражения *pexrav* [21] и заменили простой степенной закон на такой же, но с энергией обрезания E_{cut} . Модель *pexrav* включает в себя параметр относительного отражения R , который определяется как отношение телесного угла аккреционного диска (в виде плоской непрозрачной пластины), под которым диск наблюдается из первичного источника (т.н. короны диска), к полусфере 2π . Таким образом, окончательная базовая модель выглядит как: $Tbabs * (zTbabs * cutoffpl + pexrav + zgauss) * constant$. Получены значения $\Gamma=1.83 \pm 0.05$, $N_H=(8.9 \pm 0.5) \cdot 10^{22} \text{ см}^{-2}$, $R=0.50 \pm 0.13$ при $\chi^2/d.o.f.= 1106/1124$. Параметры линии $E_{line}=6.33 \pm 0.06 \text{ кэВ}$, $\sigma = 93_{-90}^{+100} \text{ эВ}$, эквивалентная ширина $EW = 67_{-14}^{+13} \text{ эВ}$. Значение энергии обрезания не было получено и поэтому было зафиксировано на $E_{cut}=500 \text{ кэВ}$. Результирующая подгонка рентгеновского спектра галактики NGC 7172 показана на Рис. 3, значения параметров приведены в Табл. 1.

Полученная энергия линии $E_{line} \sim 6.33 \text{ кэВ}$ (Рис. 2) может быть интерпретирована как смещённая линия Fe K_{α} . В то же время в работах [3,9,17] были получены значения, близкие к традиционной величине $E_{line} \sim 6.4 \text{ кэВ}$. Если мы зафиксируем энергию линии на 6.4 кэВ, то значения ширины σ и ширины EW не изменяются в границах ошибок. Таким образом, смещённая величина E_{line} может быть объяснена худшим энергетическим разрешением матриц детекторов FPMA/FPMB (FWHM $\sim 400 \text{ эВ}$) на 6 кэВ по сравнению с детекторами камер XMM-

Newton/EPIC и Suzaku/XIS (FWHM~150 эВ), данные которых использовались в упомянутых работах.

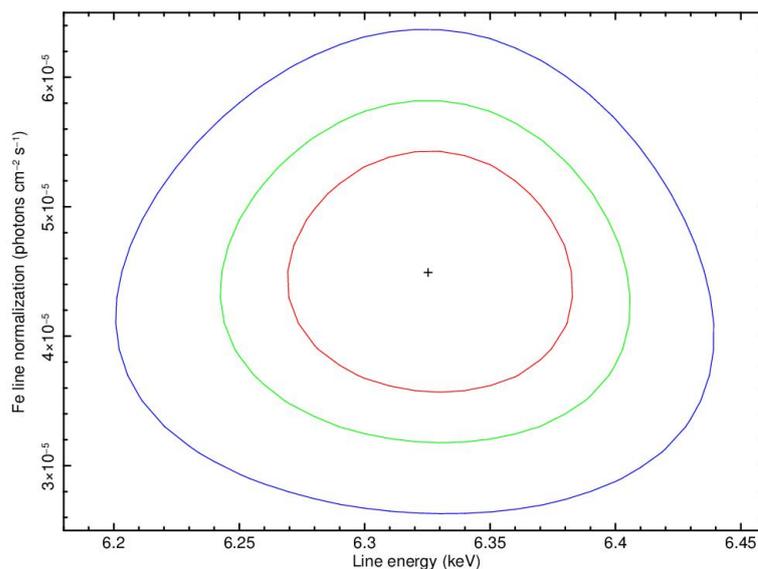


Рис. 2. Контурные доверительных интервалов для энергии линии Fe K α и ее нормировки. Показаны контуры 68.3%, 90% и 99%.

Поскольку нейтральная линия железа Fe K α и «комптоновский горб» являются проявлениями одной спектральной компоненты отражения, единая модель, которая описывает эти части вместе, может дать лучшие значения параметров. Поэтому мы заменили модели `pexrav` и `zgauss` на одну модель `pexmon` [25], которая самосогласованно включает линию Fe K α и «комптоновский горб» (`Tbabs * (zTbabs * cutoffpl + gsmooth * pexmon) * constant`). Компонента `gsmooth` учитывает уширения эмиссионных линий с гауссовским профилем (свободный параметр σ) Значения основных параметров $\Gamma=1.80\pm 0.02$, $N_{\text{H}}=(8.6\pm 0.3)\cdot 10^{22}$ см⁻², $R=0.44\pm 0.04$ при $\chi^2/\text{d.o.f.}=1104/1124$.

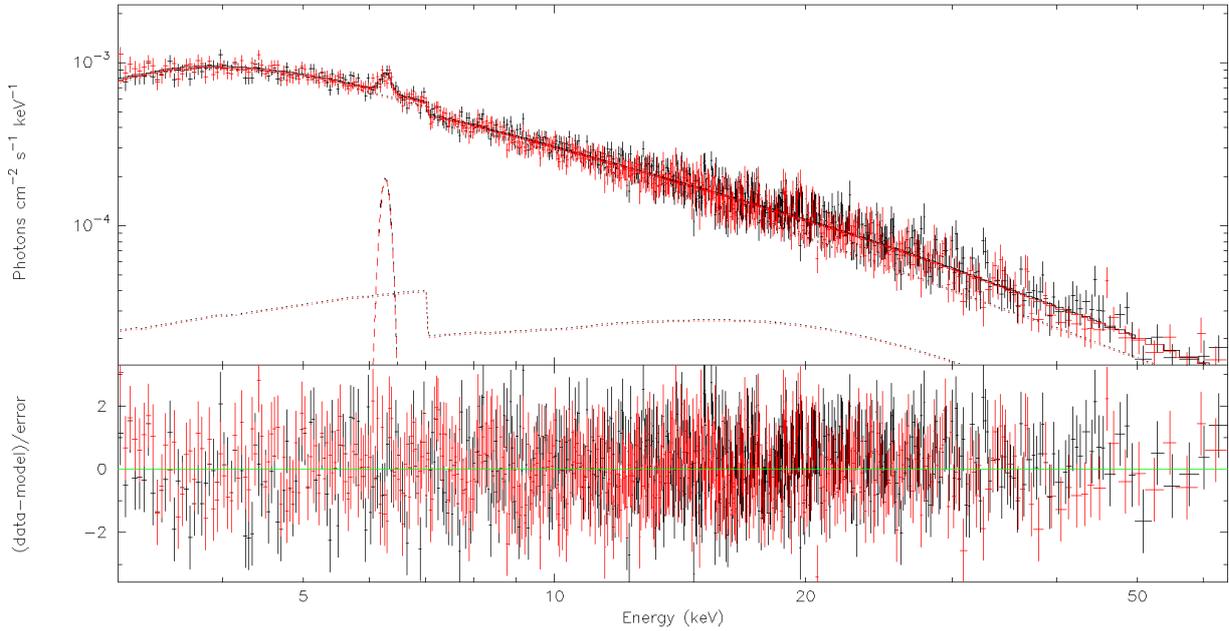


Рис. 3. Лучшая подгонка спектра с использованием базовой модели `plxav`. Нижняя панель – остаточные отклонения. Сплошная кривая – суммарная модель, точечный пунктир – отдельные вклады степенного континуума и отражения, пунктир – линия Fe K α .

Для лучшего учёта поглощения излучения от центрального источника, вместо простого степенного закона с дополнительным поглощением, была также использована более физическая модель `plcabs` [39]. Эта модель описывает континуум спектра рентгеновского излучения от изотропного источника в центре сферической формы поглощающего материала с учётом комптоновского рассеяния и поглощения. Выражение для полной модели $Tbabs * (plcabs + gsmooth * pexmon) * constant$. В этом случае также была получена очень хорошая подгонка $\chi^2/d.o.f. = 1109/1124$ и следующие значения спектральных параметров $\Gamma = 1.79 \pm 0.02$, $N_H = (8.2 \pm 0.4) \cdot 10^{22} \text{ cm}^{-2}$, $R = 0.41 \pm 0.05$.

Численные модели газопылевого тора. Для изучения структуры поглощающей среды и более реалистичного учёта её взаимодействия с рентгеновским излучением от центрального источника, была предпринята подгонка спектра с использованием физических численных моделей, полученных из Монте-Карло моделирования, а именно с табличными моделями `VNTorus` [6] и `MYTorus` [23,40,41].

Модель `VNTorus` описывает поглощающий материал в форме сферического тора с изменяемым углом раскрытия Θ_i полярных конусов от 25.8° до 84.3° , а также углом наклона экватора тора Θ_e от 18.2° до 87.1° . Поглощение на луче зрения совпадает с поглощением в экваториальной плоскости и не зависит от угла наклона. Модель самосогласованно содержит в себе компоненты пройденного, рассеянного и отражённого излучения, а также включает в себя

эмиссионные линии Fe K_α, Fe K_β, Ni K_α и ряда других элементов в мягком рентгене. По отдельности компоненты не разделяются.

В начале углы наклона были зафиксированы, — на верхнем значении $\Theta_i=87.1^\circ$ для наклона, и на нижнем пределе $\Theta_i=25.8^\circ$ для раскрытия, так как они не определяются при одновременной вариации со степенным индексом. Полученная величина поглощения равна $N_H=(7.5\pm 0.2)\cdot 10^{22}$ см⁻², степенной индекс $\Gamma=1.73\pm 0.01$. Несмотря на то, что подгонка показывает хорошую статистику $\chi^2/\text{d.o.f.}=1186/1126$, на спектре чётко выделяется недооценка уровня потока между 6-7 кэВ, то есть в области линии железа Fe K_α, а также в диапазоне 20-40 кэВ, который соответствует области «комптоновского горба». Эти особенности свидетельствуют о необходимости дополнительной модели отражения, для чего в модель спектра была добавлена компонента `rexpmon`. Выражение для полной модели стало иметь вид:

Модель Г = `Tbabs*gsmooth*(atable{torus1006.fits}+pexpmon)*constant`.

Результирующая подгонка показывает очень хорошую статистику $\chi^2/\text{d.o.f.}=1116/1125$ изменившись на $\Delta\chi^2=70$ для 1 d.o.f. Применение теста Фишера показывает величину $F_{\text{value}}=70.22$ и соответствующую вероятность $p=1.6\cdot 10^{-16}$, что свидетельствует о статистической обоснованности добавления модели отражения. Полученная величина поглощения $N_H=(7.7\pm 0.2)\cdot 10^{22}$ см⁻², степенной индекс стал более «мягким» $\Gamma=1.80\pm 0.01$, а параметр отражения $R=0.35\pm 0.04$. Величина R немного меньше полученных значений при базовом моделировании, что ожидаемо, поскольку модель `BNTorus` уже включает в себя компоненту рассеянного и отражённого излучения, но её присутствие в принципе является несколько неожиданным¹. Также удалось получить оценку угла раскрытия газопылевого тора $\Theta_r=(59_{-20}^{+16})^\circ$. Величина угла наклона определяется более грубо $\Theta_i=75_{-12}^{+u}$ град².

Вторая численная модель — модель `MYTorus`, описывает поглощающий материал с тороподобной геометрией с фиксированным углом раскрытия 60° (фактор перекрытия $\equiv 0.5$), изменяемым углом наклона и включает в себя несколько компонентов. Первая и основная из них (`MYTZ`) отвечает за модификацию первичного излучения, прошедшего сквозь газопылевой тор. Вторая компонента (`MYTS`) представляет собой отражённое и рассеянное в торе излучение первичного источника. Эти две компоненты континуума дополняет третья компонента (`MYTL`), которая описывает излучение в эмиссионных линиях Fe K_α, Fe K_β и Ni K_α, которые генерируются в этом же торе, т.е. эта компонента является согласованной с параметрами

¹ Дополнительная компонента отражения, возможно, обуславливается тем, что а) геометрия модели `BNTorus` не подходит к описанию данного спектра, или б) отражённое от дальней стенки тора излучение в модели `BNTorus` при любых углах наклона и раскрытия считается таким, что не претерпевает поглощения или рассеяния при дальнейшем прохождении ближней стенки тора.

² “u” - величина не определена

континуума. Для описания первичного источника рентгеновского излучения был выбран степенной закон. Для учёта экспоненциального энергетического обрезания, была выбрана табличная модель³ с наибольшим значением 500 кэВ, поскольку точное значение E_{cut} не было определено в базовой подгонке.

Мы использовали стандартный вариант модели MYTORUS – т.н. “coupled” режим⁴, при котором все параметры компонент MYTS и MYTL были приравнены к параметрам компоненты первичного излучения MYTZ. Константы относительной нормировки A_i между всеми тремя компонентами (т.е. A_S , A_L и A_Z) были зафиксированы и равнялись 1, что точно соответствует оригинальному варианту модели MYTORUS. Значения поглощения между всеми тремя компонентами также приравнивались ($N_{\text{H(MY TZ)}} = N_{\text{H(MY TS)}} = N_{\text{H(MY TL)}} = N_{\text{H(eq)}}$), что соответствует стандартному однородному тору. Свободными параметрами являются индекс Γ и нормировка степенного закона, поглощение в экваториальной плоскости $N_{\text{H(eq)}}$ и угол наклона газопылевого тора Θ_i . Таким образом, выражение для полной модели имеет вид:

Модель M =

```
constant*Tbabs*(zpowerlw*etable{mytorus_Ezero_v00.fits}
+constant*atable{mytorus_scatteredH500_v00.fits}
+constant*(gsmooth*atable{mytl_v000010nEp000H500_v00.fits})).
```

Применение модели показало хорошую подгонку $\chi^2/\text{d.o.f.}=1136/1125$, степенной индекс $\Gamma=1.71\pm 0.01$ и угол наклона $\Theta_i \approx 60.4$, что близко к касательному углу. Неожиданно было получено большое значение поглощения $N_{\text{H(eq)}}=(7.5\pm 1.7)\cdot 10^{23} \text{ см}^{-2}$. Поглощения на луче зрения в “coupled” режиме модели MYTORUS может быть получено с помощью уравнения (см. раздел 3.1 в [23]):

$$N_{\text{H(l.o.s)}}= N_{\text{H(eq)}}(1+4\cos^2\Theta_i)^{1/2},$$

откуда следует, что $N_{\text{H(l.o.s)}} \approx 1,2 \cdot 10^{23} \text{ см}^{-2}$, что приблизительно на 60% больше $N_{\text{H(l.o.s)}}$, полученных в данной и других работах. Поэтому, как следующий шаг, мы «отвязали» значение нормировок A_S и A_L от первичной компоненты, позволив им изменяться, но с условием, что $A_S=A_L$, что подразумевает общий регион формирования рассеянного излучения и эмиссионных линий. Важно отметить, что, как подчёркивается в [40], величина A_S не может быть напрямую интерпретирована как некий аналог фактора перекрытия, поскольку точная форма рассеянного континуума варьируется с изменением этого же фактора. В результате была также получена хорошая подгонка с $\chi^2/\text{d.o.f.}=1143/1125$, значением степенного индекса $\Gamma=1.71\pm 0.01$ и

³ <http://mytorus.com/model-files-mytorus-downloads.html>

⁴ <http://mytorus.com/mytorus-manual-v0p0.pdf>

аналогичным углом наклона $\theta_i = (61.1^{+0.9}_{-0.4})^\circ$. При этом, небольшое значение константы $A_S = A_L = 1.20 \pm 0.07$ привело к более правдоподобию поглощению $N_{H(l.o.s)} \approx 8 \cdot 10^{22} \text{ см}^{-2}$ из полученного на экваторе тора $N_{H(eq)} = (3.1 \pm 0.1) \cdot 10^{23} \text{ см}^{-2}$.

Величины спектральных параметров для наилучших подгонок моделей BNTorus и MYTorus приведены в Табл.1. Изображение спектра для модели MYTorus приведено на Рис. 4 соответственно.

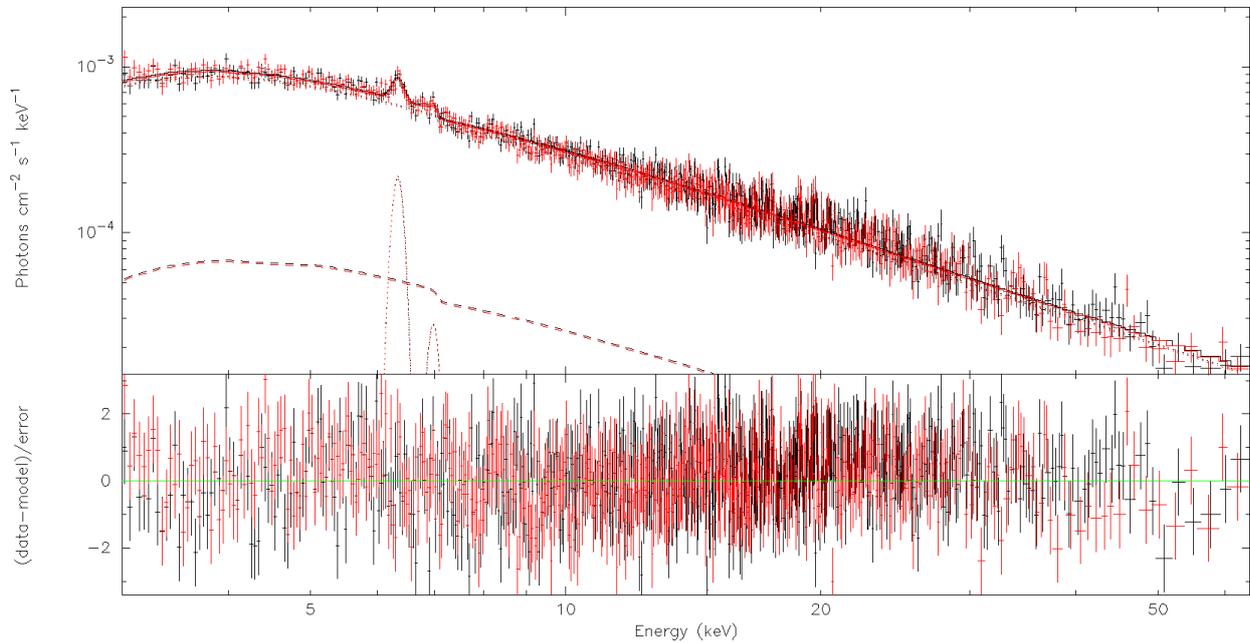


Рис. 4. Лучшая подгонка спектра с использованием модели MYTorus. Нижняя панель – остаточные отклонения. Сплошная кривая – суммарная модель, точечный пунктир – отдельные вклады степенного континуума и эмиссионных линий, пунктир – компонента рассеянного континуума.

Таблица 1. Значения спектральных параметров для лучшей подгонки спектра NGC 7172.

Базовая модель	Γ	$N_H (10^{22} \text{ см}^{-2})$	R	$E_{\text{line}} (\text{кэВ})$	$\sigma_{\text{line}} (\text{эВ})$	$\theta_i (\text{град})$	$\chi^2/\text{d.o.f.}$
рехrav	1.83 ± 0.05	8.9 ± 0.5	0.50 ± 0.13	6.33 ± 0.06	93^{+100}_{-90}	60(f)	1106/1124
рехmon	1.80 ± 0.02	8.6 ± 0.3	$0.43^{+0.08}_{-0.07}$	-	59^{+110}_{-59}	60(f)	1104/1124
plcabs	1.79 ± 0.02	8.2 ± 0.4	0.41 ± 0.05^b	-	94^{+111}_{-94}	60(f)	1109/1124
BNTorus	1.80 ± 0.01	7.7 ± 0.2	0.35 ± 0.04^b	-	93(f)	75^{+u}_{-12}	1116/1125
MYTorus	1.71 ± 0.01	31.0 ± 1.0^a	-	-	93(f)	$61.1^{+0.9}_{-0.4}$	1143/1125

Примечания: ^aПриведена величина $N_{H(eq)}$. ^bОтражение согласно дополнительной компоненты рехmon.

5 Обсуждение и результаты

Мы представляем результаты первого наблюдения обсерваторией *NuSTAR* галактики NGC 7172 типа Сейферт 2. Было проанализировано спектр в диапазоне энергий 3-64 кэВ с помощью как феноменологических моделей, так и численных *BNTorus* и *MYTorus*. Фактически, все предпринятые модели показывают хорошую подгонку, а значения их параметров сопоставимы между собой.

Континуум. Значения степенного индекса в зависимости от модели $\Gamma \sim 1.71-1.83$, сравнимы со значениями, полученными другими авторами с использованием широкодиапазонных данных (например, [7,16,28]). Анализ в диапазоне 0.3-10 кэВ по данным XMM-Newton показывает более плоский спектр с $\Gamma \sim 1.55-1.65$ (например, [11,13,17]), возможно, по причине влияния компоненты отражения на более высоких энергиях. Присутствие этой компоненты было уставлено в работах с использованием в широком диапазоне энергий данных *BeppoSAX* [7]⁵, *XMM-Newton+INTEGRAL/ISGRI* [8,36] и *Suzaku* [16]. Небольшие оценки параметра отражения R из последних трёх работ, а именно, $R=0.3 \pm 0.1$ ⁶, $R=0.33 \pm 0.17$ и $R = 0.34^{+0.10}_{-0.09}$ соответственно, совпадают в пределах ошибки с нашей оценкой $\langle R \rangle \sim 0.44$ ⁷, что значит, что спектр NGC 7172 не является отражённо-доминирующим.

Полученное значение поглощения $N_H \sim 8 \cdot 10^{22} \text{ см}^{-2}$ полностью согласуется с результатами всех предыдущих анализов рентгеновских наблюдений, что свидетельствует о неизменном его значении на интервале почти в 30 лет. Отметим, что почти одинаковые значение были получены при подгонке моделями с разной геометрией (т. е. *regrav* и *MYTorus*). Не смотря на стабильную величину поглощения, наблюдения демонстрируют значительную долговременную вариацию источника более чем на порядок (см. Рис 5, верхняя панель). Анализ представленного наблюдения *NuSTAR* с двумя разными упомянутыми приближениями показывает, что внутренние светимости, исправленные на поглощение, лежат в диапазоне $L_{\text{intr}}(2-10 \text{ кэВ}) = (1.14-1.23) \cdot 10^{43} \text{ эрг/с}$, $L_{\text{intr}}(10-40 \text{ кэВ}) = (1.56-1.62) \cdot 10^{43} \text{ эрг/с}$, что соответствует повышению яркости источника. Для вычисления болометрической светимости воспользуемся фактором ~ 10 , выведенным для диапазона 2-10 кэВ в работе [19], что даёт нам $L_{\text{bol}} \sim 1.19 \cdot 10^{44} \text{ эрг/с}$. Принимая оценку масс центральной сверхмассивной чёрной дыры (СМЧД) $\sim 4.5 \cdot 10^8 M_{\text{Sun}}$ из наблюдения с высокой разрешающей способностью в ближнем ИК на телескопе VLT (UT4, Yerun) [31], можно вычислить Эддингтоновское отношение $L_{\text{bol}}/L_{\text{edd}} \sim 1.19 \cdot 10^{44} / 5.62 \cdot 10^{46} = 2.1 \cdot 10^{-3}$ (или $\log_{10}(L_{\text{bol}}/L_{\text{edd}}) = -2.67$). Такой низкий темп аккреции может означать наличие режима

⁵ Хотя присутствие отражения установлено на уровне более 90%, из-за плохой интеркалибровки между инструментами MECS и PDS, значение параметра отражения вычислено приблизительно ($R \sim 1-3$).

⁶ Отметим, что к значению R , полученному в работе [8], нужно относиться с осторожностью, поскольку верхний предел для $\Delta E_{\text{cut}}^{\text{up}} = 56 \text{ кэВ}$ близок к области «комптоновского горба» $\sim 20-40 \text{ кэВ}$, что может привести к недооценке/переоценке этих величин.

⁷ Без учёта отражения, полученного с моделью *BNTorus*.

аккреции с неэффективно излучающим потоком или RIAF (Radiatively Inefficient Accretion Flow) (см. например, [4,26]). Данный тип аккреции может показывать степенной индекс в диапазоне $\Gamma \sim 1.4-1.9$, подразумевает присутствие горячей короны, а также предсказывает возможное присутствие биполярных оттоков. NGC 7172 не является радио громкой галактикой, но в работе [32] при анализе наблюдений VLA на частоте 8.4 ГГц ядра галактики была найдена юго-западная удлинённая структура размером 67 пк, похожая на слабый джет или отток. Поскольку в работах [13,17,16] использовались другие значения фактора перевода в L_{bol} и другое значение массы СМЧД, для сравнения было пересчитано L_{bol}/L_{edd} и получено, что, начиная с наблюдения *XMM-Newton* в 2002 году, Эддингтоновское отношение возрастает с величины $\sim 7 \cdot 10^{-3}$ (или $\log_{10}(L_{bol}/L_{Edd}) = -3.16$). Интересно отметить, что сценарий с аккрецией в режиме RIAF согласуется с тем, что долгое время NGC7172 относилась к классу галактик без скрытой области широких линий или NHBLR (Non-Hidden Broad-Line Region) [18] и только в работе [31] авторы обнаружили слабые широкие линии P_{α} (1.875 мкм) и B_{γ} (2.16 мкм), а отсутствие других широких линий (например, H_{α} и H_{β}) они объясняют перекрытием пылевой полосой галактики. С другой стороны, режим RIAF подразумевает геометрически толстый внутренний регион аккреционного диска, который частично может заполнять область BLR, таким образом, уменьшая её объем.

Линия Fe K $_{\alpha}$. В соответствии с предыдущими наблюдениями, данные *NuSTAR* также показывают присутствие эмиссионной линии около 6.4 кэВ, энергия которой согласуется с нейтральной линией Fe K $_{\alpha}$. Измеренная эквивалентная ширина линий равняется $EW = 67_{-14}^{+13}$ эВ, поток в линии $F_{FeK_{\alpha}} = (1.92 \pm 0.43) \cdot 10^{-5}$ фотонов/см²/с или $(1.95_{-0.56}^{+0.35}) \cdot 10^{-13}$ эрг/см²/с.

Для того, чтобы установить место происхождения линии Fe K $_{\alpha}$, было проведено сравнение полученных в этой работе значений параметров линии $EW_{FeK_{\alpha}}$, $F_{FeK_{\alpha}}$ и континуума L_{intr} с результатами наблюдений за предыдущие ~ 30 лет. В таблице 2 приведено, а на Рис. 5 отображено эволюцию значения $EW_{FeK_{\alpha}}$ вместе со светимостью L_{intr} в диапазоне 2-10 кэВ, а на Рис. 6 – изменение интенсивности линии вместе с качественными данными наблюдений *XMM-Newton* [17] и *Suzaku* [9]. Данные показывают чёткую антикорреляцию между изменениями $EW_{FeK_{\alpha}}$, $F_{FeK_{\alpha}}$ и L_{intr} . Изменение светимости происходит больше, чем на порядок, а $EW_{FeK_{\alpha}}$ приблизительно в ~ 4 раза. Основной эффект в том, что ширина линии $EW_{FeK_{\alpha}}$ возрастает с уменьшением светимости и наоборот.

Считается, что двумя основными областями генерации линии Fe K $_{\alpha}$ являются аккреционный диск и газопылевой тор. Если линия генерируется в аккреционном диске, тогда согласно [10], угол его наклона для текущей $EW_{FeK_{\alpha}}$ должен составлять около $\sim 70^{\circ}$, по результатам работы [9] $\sim 80^{\circ}$, а согласно наблюдениям *VepoSAX* [7], – быть ориентированным почти плашмя. Более реалистичной причиной вариации $EW_{FeK_{\alpha}}$ может быть изменение состояния короны аккреционного диска – ее температуры или оптической толщи. Но тогда

временная задержка изменения $F_{\text{FeK}\alpha}$ линии по отношению к континууму должна составлять от десятков минут до нескольких часов (т.е. быть соизмеримой с размерами аккреционного диска), а результирующая эквивалентная ширина быть неизменной. Но такового не наблюдается.

С другой стороны, применив модели газопылевого тора по данным *NuSTAR*, было найдено, что линия Fe K α возможно генерируется в поглощающей структуре с фактором раскрытия ~ 0.5 и величиной поглощения $N_{\text{H}} \sim 8 \cdot 10^{22} \text{ см}^{-2}$. Кроме того, применение модели *MUTORUS* дало значение $A_S = A_L$, отличное от 1, а именно $A_S = A_L \approx 1.2$, и в общем, следуя [40,42], это может быть интерпретировано как проявление задержки отклика рассеянного континуума на переменность центрального источника, т.е. часовой масштаб отклика больше времени накопления наблюдения. Последнее полностью согласуется с взаимным поведением $EW_{\text{FeK}\alpha}$, $I_{\text{FeK}\alpha}$ и L_{intr} . Используя данные из таблицы 2, при простейшем приближении можно вычислить ориентировочное расстояние между центральным источником и источником линий (т.е. $d \approx c \cdot \Delta t$, Δt – наблюдаемое время вариации) $d \sim 12 \text{ лет} \sim 3.7 \text{ пк}$. Подчеркнем, что полученная величина расстояния $d \sim 3.7 \text{ пк}$ совпадает с типичными значениями размеров газопылевого тора.

Прямое сопоставление значения $EW_{\text{FeK}\alpha}$ к измеряемому N_{H} или параметру отражения для Сейфертов 2 типа не является полностью корректным из-за присутствия эффекта Балдвина [14] (зависимость $EW_{\text{FeK}\alpha} - L_{\text{intr,x-ray}}$), впервые установленного для данного типа АЯГ в работе [27] с использованием выборки [9]. Согласно результатам в [27], для корректного учёта влияния поглощения на континуум, при допущении образования линии Fe K α , лучше использовать соотношение светимостей $L_{\text{intr}}(10-50 \text{ кэВ})$ и $L_{\text{FeK}\alpha}$. Наблюдаемая $\log(L_{\text{FeK}\alpha}) = 41.23$. При использовании уравнения 2 в [27] с имеющейся $L_{\text{intr}}(10-50 \text{ кэВ}) = 1.93 \cdot 10^{43} \text{ эрг/с}$, ожидаемая $\log(L_{\text{FeK}\alpha}) = 41.76-39.90$, т.е. полностью соответствует измеренной⁸. Для эффекта Балдвина (уравнение 7 в [27] с параметрами из Рис.6(b) в [16]), вычисленный наклон ω зависимости “ $\log(L_{\text{FeK}\alpha}/L_{\text{intr}}(10-50 \text{ кэВ})) - \log(L_{\text{intr}}(10-50 \text{ кэВ}))$ ” составляет ~ 0.05 , что меньше полученного в [27], но сопоставимо с таким в [16]. Объяснение расхождения может заключаться в том, что в [16] используется более однородная выборка галактик только с диапазоном $22 \leq \log(N_{\text{H}}) < 24$ и без радио-громких источников. Таким образом, вариант, в котором газопылевой тор есть источником линии Fe K α , лучше описывает спектральные и временные характеристики рентгеновского излучения активного ядра в NGC 7172.

К сожалению, изучить поведение параметра отражения R со временем не представляется возможным по причине наличия только двух оценок данного параметра с небольшими ошибками.

Исходя от полученных результатов анализа для линии Fe K α , отметим, что заключение о её образовании в поглощающей среде согласуется с таким в работе [7]. При этом, оно

⁸ С целью упрощения и возможности сравнения значений параметров с работами других авторов, использованные здесь величины $\log(L_{\text{FeK}\alpha})$ и $L_{\text{intr}}(10-50 \text{ кэВ})$ были вычислены в результате базового моделирования на основе модели *rehrav*.

противоречит заключению о формировании в аккреционном диске [1], в основном, из-за наличия лучшего качества данных и обнаружения большой по времени задержки в переменности $EW_{\text{FeK}\alpha}$ и L_{intr} .

Таблица 2. Величины собственной светимости в диапазоне 2-10 кэВ и эквивалентной ширины линии Fe K α , использованные для графика на Рис.5.

Дата наблюдения	Инструмент	L_{intr} (эрг/сек)	$EW_{\text{FeK}\alpha}$ (эВ)	Статьи
28.10.1985	<i>EXOSAT</i>	$2.10 \cdot 10^{43}$	-	[33]
26.10.1989	<i>Ginga</i>	$1.10 \cdot 10^{43}$	71 ± 39	[24]
12.05.1995	<i>ASCA</i>	$1.65 \cdot 10^{43}$	68 ± 35	[34]
15.10.1996	<i>BeppoSAX</i>	$3.50 \cdot 10^{42}$	120 ± 65	[1,7]
06.11.1997	<i>BeppoSAX</i>	$1.70 \cdot 10^{42}$	210 ± 105	[1,7]
18.11.2002	<i>XMM-Newton</i>	$3.98 \cdot 10^{42}$	200 ± 50	[17]
11.11.2004	<i>XMM-Newton</i>	$5.01 \cdot 10^{42}$	120 ± 10	[17]
24.04.2007	<i>XMM-Newton</i>	$7.94 \cdot 10^{42}$	100 ± 20	[17]
25.05.2008	<i>Suzaku</i>	$1.00 \cdot 10^{43}$	52 ± 4	[16]
07.10.2014	<i>NuSTAR</i>	$1.14 \cdot 10^{43}$	67 ± 14	эта работа

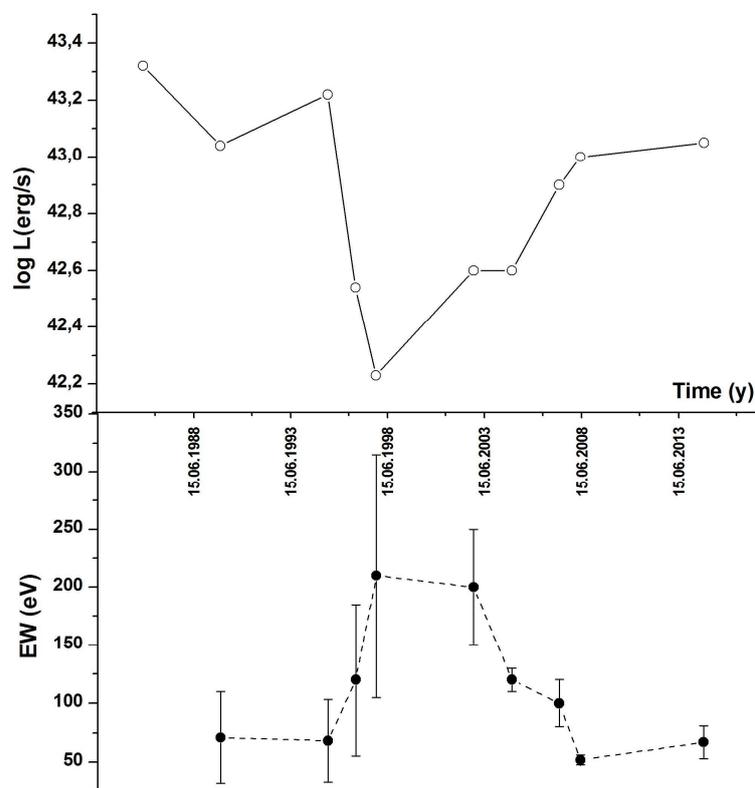


Рис. 5. Изменение собственной светимости активного ядра галактики NGC 7172 в диапазоне 2-10 кэВ и EW Fe K α .

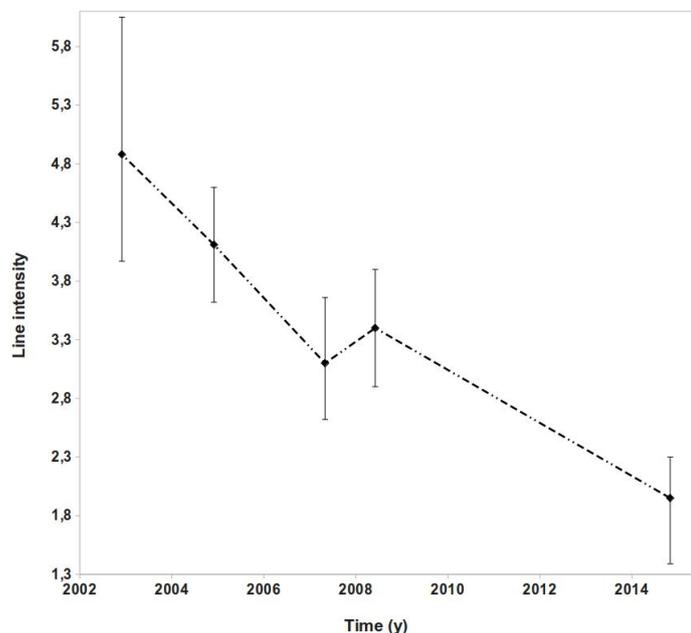


Рис. 6. Изменение интенсивности линии Fe K α по данным *XMM-Newton*, *Suzaku* и *NuSTAR*. Поток в линии в единицах 10^{-13} эрг/см 2 /с.

В перспективе, проведение широкодиапазонных рентгеновских наблюдений NGC 7172 с использованием миссий *NuSTAR*, *XMM-Newton* или будущей миссии *Athena* даст возможность детальнее изучить спектр отражения, попытаться разделить в нем вклады от аккреционного диска и газопылевого тора, а также детальнее изучить переменность объекта на долгих промежутках времени.

Благодарности

Эта работа использует данные миссии *NuSTAR*, проекта под руководством Калифорнийского Технологического института, разработанной Лабораторией реактивного движения и профинансированной Национальным управлением по авиации и исследованию космического пространства. Это исследование было выполнено с использованием программного обеспечения по обработке данных *NuSTAR* (NuSTARDAS) разработанным вместе Научным центром ASI (ASDC, Италия) и Калифорнийским Технологическим институтом (США). Работа частично поддержана грантом на научные исследования молодых учёных НАН Украины (проект №389Кт ГАО НАН Украины).

Литература

1. *Akylas A., Georgantopoulos I., Comastri A.* BeppoSAX observations of the Seyfert 2 galaxies NGC 7172 and ESO103-G35 // *Mon. Not. R. Astron. Soc.* – 2001. – 324. – P. 521-528.
2. *Antonucci R.* Unified models for active galactic nuclei and quasars // *Annu. Rev. Astron. Astrophys.* - 1993.- 31.- P.473-521.
3. *Awaki H., Murakami H., Ogawa Y.* Variability study of Seyfert 2 galaxies with XMM-Newton // *Astrophys. J.* – 2006. – 645. – P. 928-939.
4. *Blandford, R. D., Begelman, M. C.* On the fate of gas accreting at a low rate on to a black hole // *Mon. Not. R. Astron. Soc.* – 1999. – 303. – P. 1-5.
5. *Bennet C. L., Halpern M., Hinshaw G., et al.* First-year Wilkinson Microwave Anisotropy Probe (WMAP) observations: Preliminary maps and basic results // *Astrophys. J. Suppl. Ser.* – 2003. – 148. – P. 1-27.
6. *Brightman M., Nandra K.* An XMM-Newton spectral survey of 12 μm selected galaxies - I. X-ray data // *Mon. Not. R. Astron. Soc.* – 2011. – 413. – P. 1206-1235.
7. *Dadina M., Bassani L., Cappi M., et al.* On the origin of the Fe K line in the Seyfert 2 galaxy NGC 7172 // *Astron. and Astrophys.* – 2001. – 370. – P. 70-77.
8. *De Rosa A., Panessa F., Bassani L., et al.* Broad-band study of hard X-ray-selected absorbed active galactic nuclei // *Mon. Not. R. Astron. Soc.* – 2012. – 420. – P. 2087-2101.
9. *Fukazawa Y., Hiragi K., Mizuno M., et al.* Fe-K Line Probing of Material Around the Active Galactic Nucleus Central Engine with Suzaku // *Astrophys. J.* – 2011. – 727. – P. 19-31.
10. *George I. M., Fabian A. C.* X-ray reflection from cold matter in active galactic nuclei and X-ray binaries // *Mon. Not. R. Astron. Soc.* – 1991. – 249. – P. 352-367.
11. *Guainazzi M., Bianchi S., de la Calle Perez I., et al.* On the driver of relativistic effect strength in Seyfert galaxies // *Astron. and Astrophys.* – 2011. – 531. – P. 131-144.
12. *Guainazzi M., Matt G., Antonelli L. A., et al.* The X-ray spectrum and variability of the Seyfert 2 galaxy NGC 7172 // *Mon. Not. R. Astron. Soc.* – 1998. – 298. – P. 824-830.
13. *Hernández-García L., Masegosa J., González-Martín O., et al.* X-ray spectral variability of Seyfert galaxies // *Astron. and Astrophys.* – 2015. – 579. – P. 90-167.
14. *Iwasawa K., Taniguchi Y.* The X-ray Baldwin effect // *Astrophys. J.* – 1993. – 413. – P. 15-18.
15. *Kalberla P. Burton W. B., Hartmann D., et al.* The LAB survey of Galactic HI final data release of the combined LDS and IAR surveys with improved stray-radiation corrections // *Astron. and Astrophys.* – 2005. – 440. – P. 775-782.
16. *Kawamuro T., Ueda Y., Tazaki F., et al.* Suzaku observations of moderately obscured (Compton-thin) Active Galactic Nuclei selected by Swift/BAT Hard X-ray Survey // *Astrophys. J. Suppl. Ser.* – 2016. – 225. – P. 14-37.

17. *LaMassa S. M., Heckman T. M., Ptak A., et al.* Uncovering Obscured Active Galactic Nuclei in Homogeneously Selected Samples of Seyfert 2 Galaxies // *Astrophys. J.* – 2011. – 729. – P. 52-80.
18. *Lumsden S. L., Heisler C. A., Bailey J. A., et al.* Spectropolarimetry of a complete infrared-selected sample of Seyfert 2 galaxies // *Mon. Not. R. Astron. Soc.* – 2001. – 327. – P. 459-474.
19. *Lusso E., Comastri A., Simmons B.D., et al.* Bolometric luminosities and Eddington ratios of X-ray selected active galactic nuclei in the XMM-COSMOS survey // *Mon. Not. R. Astron. Soc.* – 2012. – 425. – P. 623-640.
20. *Madsen K. K., Harrison F. A., Markwardt C. B., et al.* Calibration of the NuSTAR high-energy focusing x-ray telescope // *Astrophys. J. Suppl. Ser.* – 2015. – 220. – P. 8-24.
21. *Magdziarz P., Zdziarski A.* Angle-dependent Compton reflection of X-rays and gamma-rays // *Mon. Notic.Roy. Astron. Soc.* – 1995. – 273. – P.837-848.
22. *Molina M., Bassani L., Malizia A., et al.* Hard x-ray spectra of active galactic nuclei in the INTEGRAL complete sample // *Mon. Not. R. Astron. Soc.* – 2013. – 433. – P. 1687-1700.
23. *Murphy K. D., Yaqoob T.* An X-ray spectral model for Compton-thick toroidal reprocessors // *Mon. Not. R. Astron. Soc.* – 2009. – 397. – P. 1549-1562.
24. *Nandra K., Pounds K. A.* GINGA observations of the x-ray spectra of Seyfert galaxies // *Mon. Notic.Roy. Astron. Soc.* – 1994. – 268. – P.405-429.
25. *Nandra K., O'Neill P. M., George I. M., et al.* An XMM-Newton survey of broad iron lines in Seyfert galaxies // *Mon. Not. R. Astron. Soc.* – 2007. – 381. – P. 194-228.
26. *Narayan R., Yi I.* Advection-dominated accretion: A self-similar solution // *Astrophys. J.* – 1994. – 428. – P. 13-16.
27. *Ricci C., Ueda Y., Paltani S., et al.* Iron K α emission in type-I and type-II active galactic nuclei // *Mon. Not. R. Astron. Soc.* – 2014. – 441. – P. 3622-3633.
28. *Risaliti G.* The BeppoSAX view of bright Compton-thin Seyfert 2 galaxies // *Astron. and Astrophys.* – 2002. – 386. – P. 379-398.
29. *Ryde F., Poutanen J., Svensson R., et al.* The variable X/gamma-ray spectrum of the Seyfert 2 galaxy NGC 7172 // *Astron. and Astrophys.* – 1997. – 328. – P. 69-77.
30. *Sharples R.M., Longmore A.J., Hawarden T.G., et al.* NGC 7172 - an obscured active nucleus // *Mon. Not. R. Astron. Soc.* – 1984. – 208. – P. 15-24.
31. *Smajić S., Fischer S., Zuther J., et al.* Unveiling the nucleus of NGC 7172 // *Astron. and Astrophys.* – 2012. – 544. – P. 105-119.
32. *Thean A., Pedlar A., Kukula M. J., et al.* High-resolution radio observations of Seyfert galaxies in the extended 12- μ m sample - I. The observations // *Mon. Not. R. Astron. Soc.* – 2000. – 314. – P. 573-588.

33. *Turner T. J., Pounds K. A.* The EXOSAT spectral survey of AGN // *Mon. Not. R. Astron. Soc.* – 1989. – 240. – P. 833-880.
34. *Turner T. J., George I. M., Nandra K., et al.* ASCA observations of type 2 Seyfert galaxies. I. Data analysis results // *Astrophys. J. Suppl. Ser.* – 1997. – 113. – P.23-67.
35. *Urry C. M., Padovani P.* Unified schemes for radio-loud active galactic nuclei // *Publ. Astron. Soc. Pac.* – 1995. – 107. – P. 803-845.
36. *Vasylenko A. A., Zhdanov V. I., Fedorova E. V.* X-ray spectral parameters for a sample of 95 active galactic nuclei // *Astrophys. Space Sci.* – 2015. – 360. – P. 71-87.
37. *Wilms J., Allen A., McCray R.* On the absorption of X-rays in the interstellar medium // *Astrophys. J.* – 2000. – 542. – P. 914-924.
38. *Winter L. M., Mushotzky R. F., Reynolds C.S., et al.* X-ray spectral properties of the BAT AGN sample // *Astrophys. J.* – 2009. – 690. – P. 1322-1349.
39. *Yaqoob T.* X-ray transmission in cold matter: nonrelativistic corrections for compton scattering // *Astrophys. J.* – 1997. – 479. – P. 184-189.
40. *Yaqoob T.* The nature of the Compton-thick X-ray reprocessor in NGC 4945 // *Mon. Not. R. Astron. Soc.* – 2012. – 423. – P. 3360-3396.
41. *Yaqoob T., Murphy K. D., Miller L., et al.* On the efficiency of production of the Fe K α emission line in neutral matter // *Mon. Not. R. Astron. Soc.* – 2010. – 401. – P. 411-417.
42. *Yaqoob T., Tatum M.M., Scholtes A., et al.* A Compton-thin solution for the Suzaku X-ray spectrum of the Seyfert 2 galaxy Mkn 3 // *Mon. Not. R. Astron. Soc.* – 2015. – 454. – P. 973-990.