

## 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  $N_H \approx 8 \cdot 10^{22} \text{ cm}^{-2}$ , 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  $K_\alpha$  line with  $EW = 67^{+13}_{-14} \text{ eV}$ . 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  $\sim 18$  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  $\sim 4$  on a timescale of  $\sim 12$  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  $\text{FeK}_\alpha$  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  $K_\alpha$  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  $K_\alpha$  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  $L_{\text{intr}}(2-10 \text{ keV})$  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  $I_{\text{FeK}_\alpha}$ , найкраще відповідають варіанту народження лінії  $\text{FeK}_\alpha$  у віддаленому газопиловому торі.

## 1 Введение

Галактика NGC 7172 является видимой 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  $\text{Fe K}_\alpha$  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  $\text{Fe K}_\alpha$  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  $\text{Fe K}_\alpha$ . 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  $\text{Fe K}_\alpha$ , 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 $\alpha$ , 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.

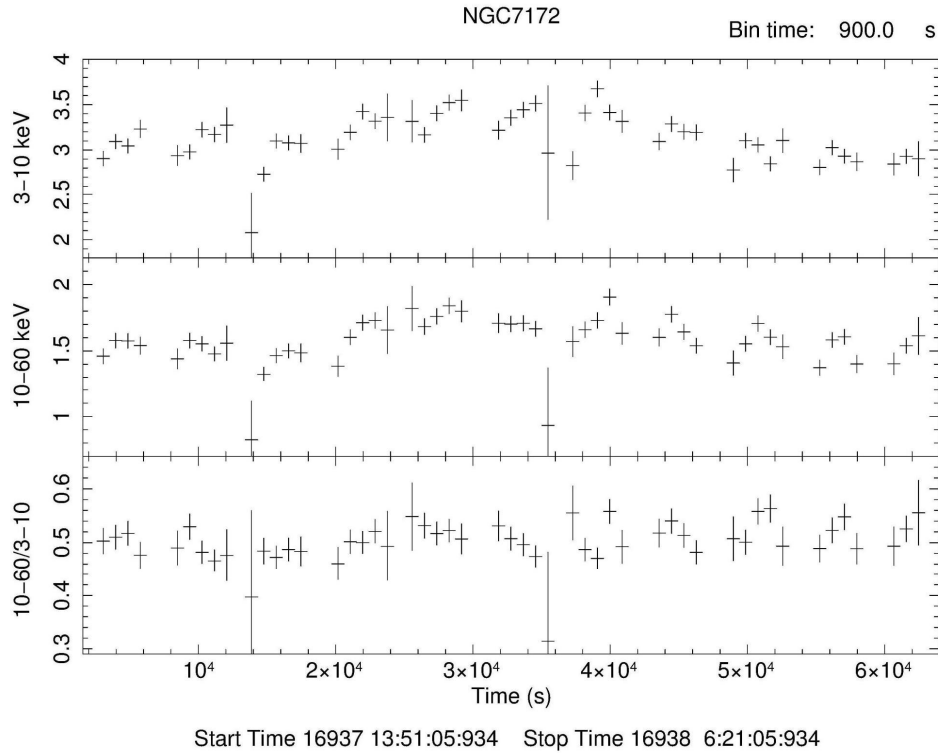


Рис. 1. Кривые блеска FPMA+FPMB в диапазонах 3-10 кэВ (вверху), 10-60 кэВ (посередине), а также их отношение (внизу).

#### 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  $\sim 60$  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  $0.98 \pm 0.01$ , 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  $\Gamma$  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  $E_{line}=6.29 \pm 0.07 \text{ кэВ}$ ,  $\sigma = 190^{+165}_{-115} \text{ эВ}$ . 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  $2\pi$ . 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  $E_{line}=6.33 \pm 0.06 \text{ кэВ}$ ,  $\sigma = 93^{+100}_{-90} \text{ эВ}$ , эквивалентная ширина  $EW = 67^{+13}_{-14} \text{ эВ}$ . 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  $K_\alpha$ . 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  $\sigma$  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.

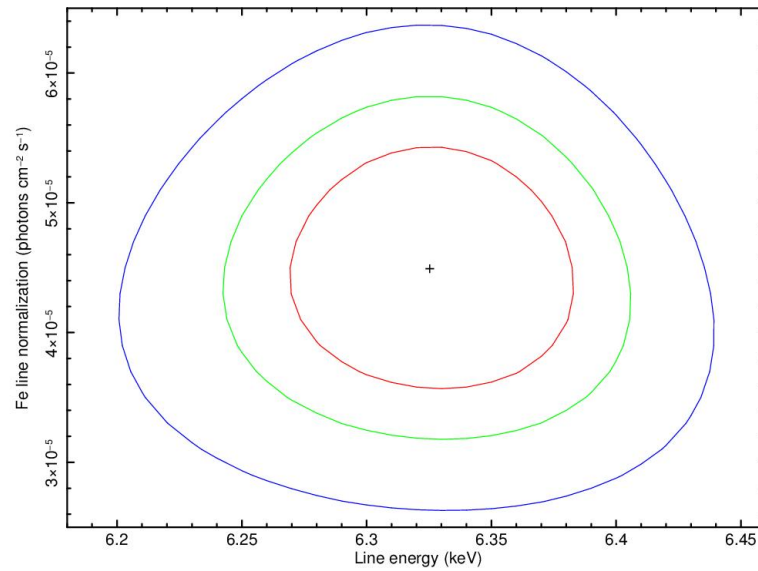


Рис. 2. Контурные доверительных интервалов для энергии линии Fe K $_{\alpha}$  и ее нормировки. Показаны контуры 68.3%, 90% и 99%.

Поскольку нейтральная линия железа Fe K $_{\alpha}$  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 `rextav` и `zgauss` на одну модель `rextmon` [25], которая самосогласованно включает линию Fe K $_{\alpha}$  и «комптоновский горб» (`Tbabs*(zTbabs*cutoffpl+gsmooth*pextmon)*constant`). Компонента `gsmooth` учитывает уширения эмиссионных линий с гауссовским профилем (свободный параметр  $\sigma$ ) Значения основных параметров  $\Gamma=1.80\pm0.02$ ,  $N_{\text{H}}=(8.6\pm0.3)\cdot10^{22}\text{ см}^{-2}$ ,  $R=0.44\pm0.04$  при  $\chi^2/\text{d.o.f.}=1104/1124$ .

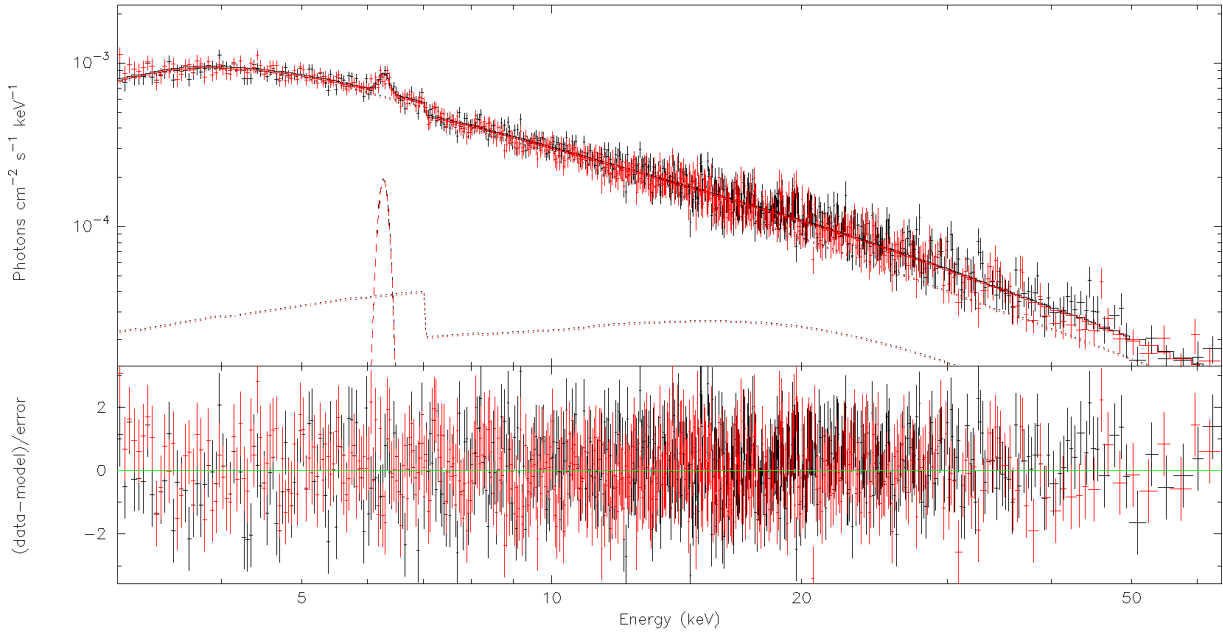


Рис. 3. Лучшая подгонка спектра с использованием базовой модели `pexrav`. Нижняя панель – остаточные отклонения. Сплошная кривая – суммарная модель, точечный пунктир – отдельные вклады степенного континуума и отражения, пунктир – линия Fe K $_{\alpha}$ .

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  $\chi^2/\text{d.o.f.}=1109/1124$  и следующие значения спектральных параметров  $\Gamma=1.79\pm0.02$ ,  $N_{\text{H}}=(8.2\pm0.4)\cdot10^{22}\text{ cm}^{-2}$ ,  $R=0.41\pm0.05$ .

**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 `BNTorus` [6] и `MYTorus` [23,40,41].

Модель `BNTorus` описывает поглощающий материал в форме сферического тора с изменяемым углом раскрытия  $\Theta_i$  полярных конусов от  $25.8^\circ$  до  $84.3^\circ$ , а также углом наклона экватора тора  $\Theta_e$  от  $18.2^\circ$  до  $87.1^\circ$ . 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 $_{\alpha}$ , Fe K $_{\beta}$ , Ni K $_{\alpha}$  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  $N_H=(7.5\pm0.2)\cdot10^{22}$  см $^{-2}$ , степенной индекс  $\Gamma=1.73\pm0.01$ . 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 $_{\alpha}$ , 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 `pexmon`. Выражение для полной модели стало иметь вид:

$$\text{Модель T} = \text{Tbabs} * \text{gsmooth} * (\text{atable}\{\text{torus1006.fits}\} + \text{pexmon}) * \text{constant}.$$

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  $p=1.6\cdot10^{-16}$ , что свидетельствует о статистической обоснованности добавления модели отражения. Полученная величина поглощения  $N_H=(7.7\pm0.2)\cdot10^{22}$  см $^{-2}$ , степенной индекс стал более «мягким»  $\Gamma=1.80\pm0.01$ , а параметр отражения  $R=0.35\pm0.04$ . 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 неожиданным<sup>1</sup>. Также удалось получить оценку угла раскрытия газопылевого тора  $\Theta_i=(59_{-20}^{+16})^\circ$ . Величина угла наклона определяется более грубо  $\Theta_i=75_{-12}^{+u}$  град<sup>2</sup>.

Вторая численная модель — модель `MYTorus`, описывает поглощающий материал с тороподобной геометрией с фиксированным углом раскрытия  $60^\circ$  (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 $_{\alpha}$ , Fe K $_{\beta}$  и Ni K $_{\alpha}$ , которые генерируются в этом же торе, т.е. эта компонента является согласованной с параметрами

<sup>1</sup> 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.

<sup>2</sup> “u” - величина не определена

континуума. Для описания первичного источника рентгеновского излучения был выбран степенной закон. Для учёта экспоненциального энергетического обрезания, была выбрана табличная модель<sup>3</sup> с наибольшим значением 500 кэВ, поскольку точное значение  $E_{\text{cut}}$  не было определено в базовой подгонке.

Мы использовали стандартный вариант модели MYTorus – т.н. “coupled” режим<sup>4</sup>, 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 ( $N_{\text{H(MYTZ)}} = N_{\text{H(MYTS)}} = N_{\text{H(MYTL)}} = N_{\text{H(eq)}}$ ), что соответствует стандартному однородному тору. Свободными параметрами являются индекс  $\Gamma$  и нормировка степенного закона, поглощение в экваториальной плоскости  $N_{\text{H(eq)}}$  и угол наклона газопылевого тора  $\Theta_i$ . 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  $\Gamma=1.71\pm0.01$  и угол наклона  $\Theta_i\approx60.4$ , что близко к касательному углу. Неожиданно было получено большое значение поглощения  $N_{\text{H(eq)}}=(7.5\pm1.7)\cdot10^{23}\text{ см}^{-2}$ . 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  $N_{\text{H(l.o.s)}}\approx1,2\cdot10^{23}\text{ см}^{-2}$ , 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  $\Gamma=1.71\pm0.01$  и

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

<sup>4</sup> <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.

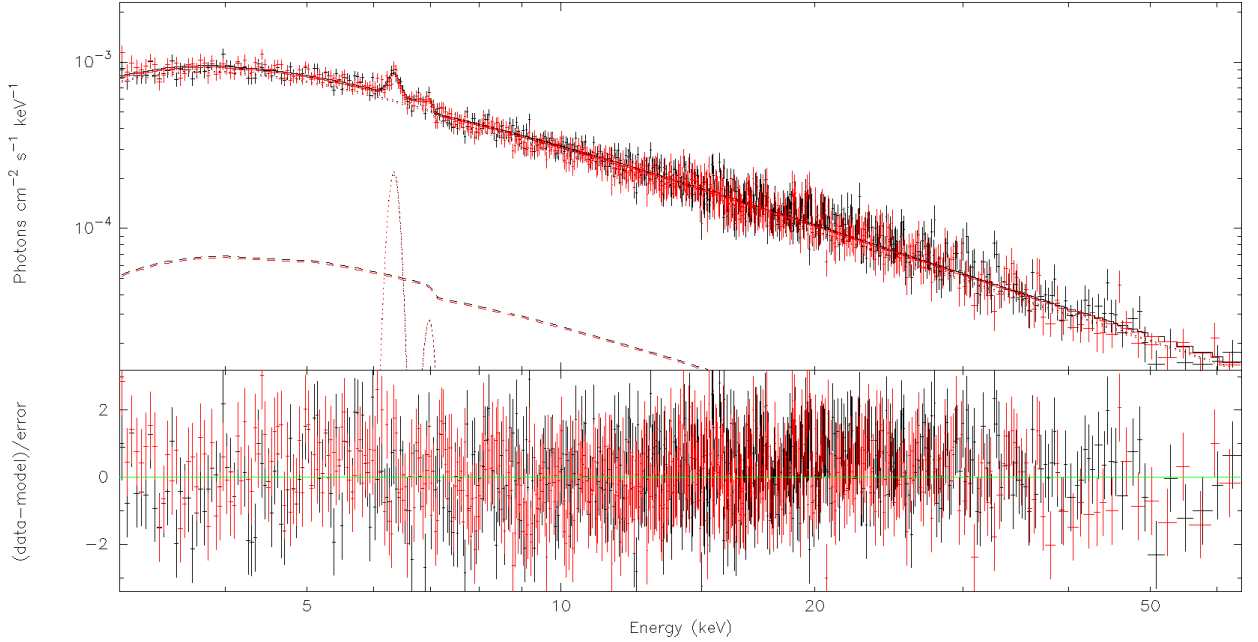


Рис. 4. Лучшая подгонка спектра с использованием модели MYTorus. Нижняя панель – остаточные отклонения. Сплошная кривая – суммарная модель, точечный пунктир – отдельные вклады степенного континуума и эмиссионных линий, пунктир – компонента рассеянного континуума.

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

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

Примечания: <sup>a</sup>Приведена величина  $N_{H(eq)}$ . <sup>b</sup>Отражение согласно дополнительной компоненты plxmon.

## 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]<sup>5</sup>, *XMM-Newton+INTEGRAL/ISGRI* [8,36] и *Suzaku* [16]. Небольшие оценки параметра отражения  $R$  из последних трёх работ, а именно,  $R=0.3 \pm 0.1$ <sup>6</sup>,  $R=0.33 \pm 0.17$  и  $R = 0.34^{+0.10}_{-0.09}$  соответственно, совпадают в пределах ошибки с нашей оценкой  $\langle R \rangle \sim 0.44$ <sup>7</sup>, 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. *pekrav* 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  $\sim 10$ , 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, Yepun) [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

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

<sup>6</sup> 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.

<sup>7</sup> 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  $L_{\text{bol}}$  и другое значение массы СМЧД, для сравнения было пересчитано  $L_{\text{bol}}/L_{\text{edd}}$  и получено, что, начиная с наблюдения *XMM-Newton* в 2002 году, Эддингтоновское отношение возрастает с величины  $\sim 7 \cdot 10^{-3}$  (или  $\log_{10}(L_{\text{bol}}/L_{\text{Edd}}) = -3.16$ ). 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  $\text{Pa}_{\alpha}$  (1.875 мкм) и  $\text{Br}_{\gamma}$  (2.16 мкм), а отсутствие других широких линий (например,  $\text{H}_{\alpha}$  и  $\text{H}_{\beta}$ ) 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  $EW = 67^{+13}_{-14}$  эВ, поток в линии  $F_{\text{FeK}\alpha} = (1.92 \pm 0.43) \cdot 10^{-5}$  фотонов/см<sup>2</sup>/с или  $(1.95^{+0.35}_{-0.56}) \cdot 10^{-13}$  эрг/см<sup>2</sup>/с.

Для того, чтобы установить место происхождения линии Fe K $_{\alpha}$ , было проведено сравнение полученных в этой работе значений параметров линии  $EW_{\text{FeK}\alpha}$ ,  $F_{\text{FeK}\alpha}$  и континуума  $L_{\text{intr}}$  с результатами наблюдений за предыдущие ~30 лет. В таблице 2 приведено, а на Рис. 5 отображено эволюцию значения  $EW_{\text{FeK}\alpha}$  вместе со светимостью  $L_{\text{intr}}$  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  $EW_{\text{FeK}\alpha}$ ,  $F_{\text{FeK}\alpha}$  и  $L_{\text{intr}}$ . Изменение светимости происходит больше, чем на порядок, а  $EW_{\text{FeK}\alpha}$  приблизительно в ~4 раза. Основной эффект в том, что ширина линии  $EW_{\text{FeK}\alpha}$  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  $EW_{\text{FeK}\alpha}$  должен составлять около  $\sim 70^{\circ}$ , по результатам работы [9]  $\sim 80^{\circ}$ , а согласно наблюдениям *VeroSAX* [7], – быть ориентированным почти плашмя. Более реалистичной причиной вариации  $EW_{\text{FeK}\alpha}$  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 $\alpha$  возможно генерируется в поглощающей структуре с фактором раскрытия  $\sim 0.5$  и величиной поглощения  $N_{\text{H}} \sim 8 \cdot 10^{22} \text{ см}^{-2}$ . Кроме того, применение модели *MUTorus* дало значение  $A_{\text{S}}=A_{\text{L}}$ , отличное от 1, а именно  $A_{\text{S}}=A_{\text{L}} \approx 1.2$ , 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  $L_{\text{intr}}$ . Используя данные из таблицы 2, при простейшем приближении можно вычислить ориентировочное расстояние между центральным источником и источником линий (т.е.  $d \approx c \cdot \Delta t$ ,  $\Delta t$  – 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  $N_{\text{H}}$  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 $\alpha$ , лучше использовать соотношение светимостей  $L_{\text{intr}}(10\text{-}50 \text{ кэВ})$  и  $L_{\text{FeK}\alpha}$ . Наблюдаемая  $\log(L_{\text{FeK}\alpha})=41.23$ . При использовании уравнения 2 в [27] с имеющейся  $L_{\text{intr}}(10\text{-}50 \text{ кэВ})=1.93 \cdot 10^{43} \text{ эрг/с}$ , ожидаемая  $\log(L_{\text{FeK}\alpha})=41.76\text{-}39.90$ , т.е. полностью соответствует измеренной<sup>8</sup>. Для эффекта Балдвина (уравнение 7 в [27] с параметрами из Рис.6(b) в [16]), вычисленный наклон  $\omega$  зависимости “ $\log(L_{\text{FeK}\alpha}/L_{\text{intr}}(10\text{-}50 \text{ кэВ})) - \log(L_{\text{intr}}(10\text{-}50 \text{ кэВ}))$ ” составляет  $\sim 0.05$ , 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 $\alpha$ , 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.

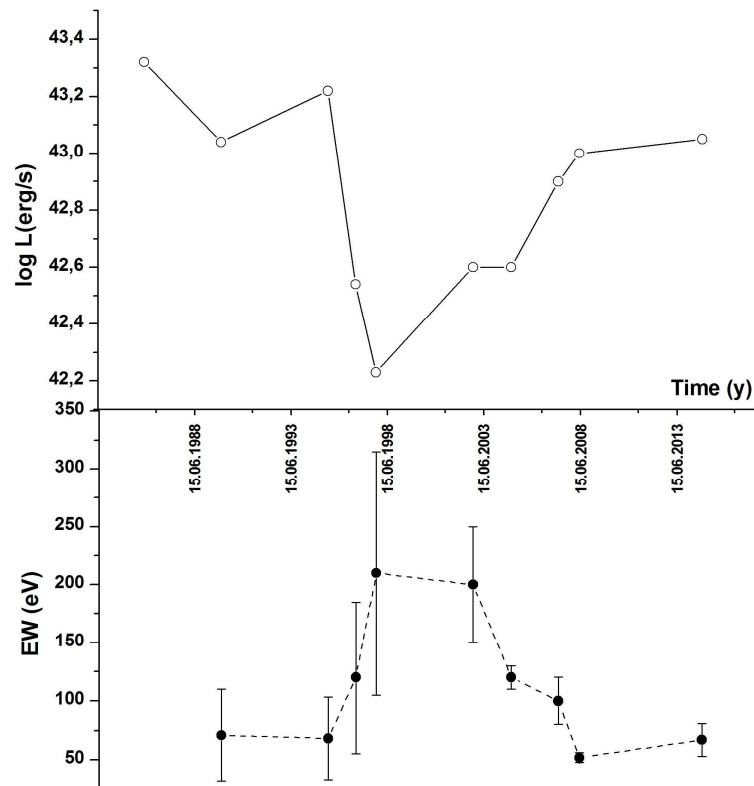
Исходя от полученных результатов анализа для линии Fe K $\alpha$ , отметим, что заключение о её образовании в поглощающей среде согласуется с таким в работе [7]. При этом, оно

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

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  $L_{\text{intr}}$ .

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

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



**Рис. 5. Изменение собственной светимости активного ядра галактики NGC 7172 в диапазоне 2-10 кэВ и  $EW_{\text{Fe K}\alpha}$ .**



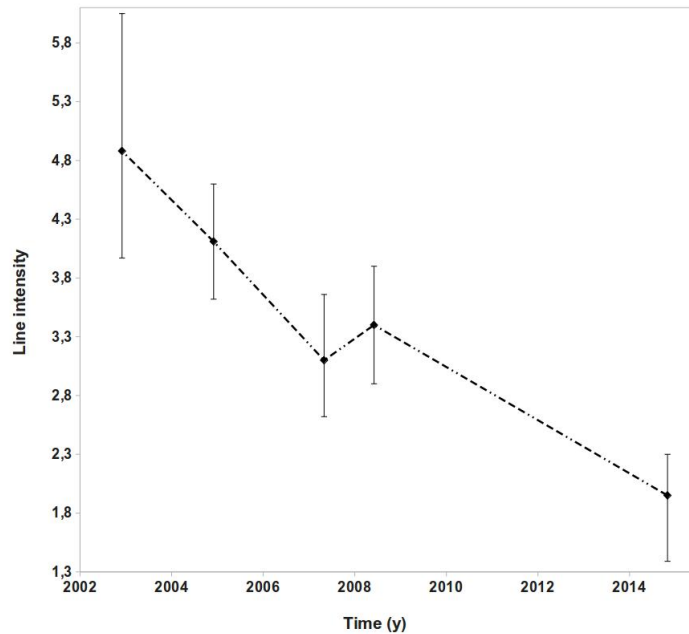


Рис. 6. Изменение интенсивности линии Fe K $_{\alpha}$  по данным *XMM-Newton*, *Suzaku* и *NuSTAR*. Поток в линии в единицах  $10^{-13}$  эрг/см<sup>2</sup>/с.

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  $\mu\text{m}$  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 $\alpha$  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- $\mu$ 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 $\alpha$  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.