

СПЕКТРАЛЬНЫЕ СВОЙСТВА СИЛЬНО ПОГЛОЩЕННЫХ СЕЙФЕРТОВСКИХ ГАЛАКТИК ИЗ ОБЗОРА ВСЕГО НЕБА ОБСЕРВАТОРИИ ИНТЕГРАЛ

© 2019 г. А. Н. Семена^{1*}, С. Ю. Сазонов¹, Р. А. Кривонос¹

¹Институт космических исследований РАН, Москва, Россия

Поступила в редакцию 28.11.2019 г.; после доработки 15.05.2019 г.; принята к публикации 28.05.2019 г.

Исследованы рентгеновские спектральные свойства десяти сильно поглощенных близких ($z < 0.1$) активных ядер галактик (АЯГ) IGR J00256+6821, NGC 1194, CGCG 420–015, IGR J09253+6929, NGC 3281, NGC 4939, IGR J14175–4641, NGC 5643, NGC 5728 и ESO 137–G034 из каталога жестких рентгеновских источников, обнаруженных в ходе семилетнего обзора всего неба обсерватории ИНТЕГРАЛ. По данным космического телескопа NuSTAR, дополненным на низких энергиях данными обсерваторий *XMM-Newton* и *Chandra*, получены оценки собственной колонки поглощения, фотонного индекса и внутренней светимости АЯГ. В трех объектах (NGC 5643, NGC 3281 и ESO 137–G034) колонка поглощения на луче зрения (N_H) превышает $2 \times 10^{24} \text{ см}^{-2}$, а в наблюдаемом спектре доминирует излучение центрального источника, рассеянное в окружающем газопылевом торе. В пяти объектах (IGR J00256+6821, IGR J14175–4641, CGCG 420–015, NGC 1194 и NGC 5728) $N_H = 1–2 \times 10^{24} \text{ см}^{-2}$, а прошедшее через тор и отраженное от него излучение вносит сравнимые вклады в регистрируемый рентгеновский поток. Еще два источника (IGR J09253+6929 и NGC 4939) проявили себя как комптоновски-тонкие ($N_H < 5 \times 10^{23} \text{ см}^{-2}$) АЯГ во время наблюдений телескопа NuSTAR. Внутренние светимости исследованных АЯГ превышают наблюдаемые вплоть до 7 раз. С учетом полученных результатов теперь практически для всей выборки АЯГ из каталога семилетнего обзора всего неба обсерватории ИНТЕГРАЛ имеются надежные оценки колонки поглощения и внутренней светимости, что делает ее одной из лучших для исследований популяции АЯГ в местном объеме Вселенной.

Ключевые слова: NuSTAR, АЯГ, источники IGR J00256+6821, NGC 1194, CGCG 420–015, IGR J09253+6929, NGC 3281, NGC 4939, IGR J14175–4641, NGC 5643, NGC 5728, ESO 137–G034.

DOI: 10.1134/S0320010819080084

ВВЕДЕНИЕ

Активными ядрами галактик (АЯГ) называются аккрецирующие сверхмассивные черные дыры (СМЧД) в центрах галактик (Риис, 1984). Исследования АЯГ важны для понимания роста СМЧД, эволюции их родительских галактик и формирования космического рентгеновского фона Вселенной.

В зависимости от ширины разрешенных линий водорода и других элементов в оптическом спектре различают АЯГ первого и второго типа. Считается (Антонучи, 1993), что эта дихотомия связана с разной ориентацией объектов относительно наблюдателя, так как центральная область энерговыделения около СМЧД окружена холодной газопылевой структурой в форме тора. По этой же причине в рентгеновских спектрах АЯГ 2-го типа

обычно наблюдается завал на низких энергиях (из-за фотопоглощения), которого нет в спектрах большинства АЯГ 1-го типа. Рентгеновские спектры сильно различаются и внутри популяции АЯГ 2-го типа. Особый интерес представляют так называемые комптоновски-толстые АЯГ, которые характеризуются очень большой колонкой поглощения на луче зрения ($N_H > 10^{24} \text{ см}^{-2}$) и заметным или даже доминирующим вкладом излучения, отраженного от газопылевого тора, в наблюдаемом спектре. Вид конкретного спектра определяется свойствами тора (в первом приближении — углом раскрытия и оптической толщиной в экваториальной плоскости) и углом, под которым последний наклонен к наблюдателю.

Из спектра космического рентгеновского фона, который, в основном, представляет собой суммарное излучение далеких АЯГ (квазаров), следует, что значительная их часть характеризуется сильно

*Электронный адрес: san@iki.rssi.ru

поглощенными спектрами (Уеда и др., 2003; Трейзер и Юри 2005; Джилли и др., 2007; Сазонов и др., 2008). Для поиска и исследования таких объектов в далекой Вселенной хорошо подходят (с учетом того, что космологическое красное смещение приводит к уменьшению влияния поглощения на наблюдаемый спектр) наблюдения в стандартном рентгеновском диапазоне (на энергиях ниже 10 кэВ) Стефен и др., 2003; Ля Франка и др., 2005; Хазингер, 2008; Бучнер и др., 2015; Аирд и др., 2015; Калистро Ривьера и др., 2016; Лью и др., 2016), а в близкой Вселенной — наблюдения в жестком рентгеновском диапазоне ($E > 10$ кэВ) (Сазонов и Ревнивцев, 2004; Бэкман и др., 2009; Бурлон и др., 2011; Уеда и др., 2014).

Жесткие рентгеновские обзоры всего неба, проведенные обсерваториями ИНТЕГРАЛ (Винклер и др., 2003) и им. Нила Джерельса *Swift* (Джерельс и др., 2004), позволили обнаружить большое количество сильно поглощенных АЯГ в местном объеме Вселенной (Сазонов и др., 2007; Аджелло и др., 2008, 2012; Палтани и др., 2008; Бэкман и др., 2009; Малиция и др., 2009b; Бурлон и др., 2011; Баумгартнер и др., 2013; Ричи и др., 2015), однако исследование их спектров было сильно ограничено возможностями телескопов с кодирующей апертурой. Благодаря запуску орбитального телескопа NuSTAR появилась возможность более детально изучать широкополосные рентгеновские спектры АЯГ.

Сазонов и др. (2015, далее С15) исследовали статистические свойства близких ($z < 0.2$) АЯГ на основе каталога жестких рентгеновских источников семилетнего обзора обсерватории ИНТЕГРАЛ (Кривонос и др., 2010). В частности, было показано, что наблюдаемое уменьшение доли поглощенных АЯГ с увеличением рентгеновской светимости может быть частично связано с эффектами наблюдательной селекции, хотя вполне возможно, что имеет место и увеличение угла раскрытия газопылевого тора с увеличением светимости АЯГ.

Использованная в работе С15 выборка из 151 АЯГ прекрасно подходит для статистических исследований близких АЯГ, так как она была отобрана в жестком рентгеновском диапазоне и характеризуется высокой статистической полнотой: 97% источников 7-летнего обзора обсерватории ИНТЕГРАЛ на $|b| > 5^\circ$ отождествлены, а для всех АЯГ имеются оценки колонки поглощения на луче зрения (N_H) и внутренней светимости. Семнадцать объектов из выборки С15 являются кандидатами в комптоновски-толстые ($N_H > 10^{24}$ см $^{-2}$) АЯГ (см. табл. 1 в работе Сазонов и др., 2015), однако некоторые из этих оценок были получены по рентгеновским спектрам на энергиях ниже 10 кэВ, либо по соотношению потоков излучения в жестком и

мягком рентгеновском диапазонах и поэтому не могут считаться надежными. Как известно (см., например, Матт и др., 2000), надежно выделить компоненты прошедшего через газопылевой тор и отраженного от него излучения СМЧД можно лишь по данным широкополосной рентгеновской спектроскопии. Настоящая работа посвящена подробному анализу 10 из 17 кандидатов в комптоновски-толстые АЯГ из выборки С15 на основе данных космического телескопа NuSTAR. Их список приведен в табл. 1. Получены уточненные оценки колонки поглощения и внутренней светимости этих объектов.

1. НАБЛЮДЕНИЯ И АНАЛИЗ ДАННЫХ

Основным инструментом, используемым в этой работе для определения спектральных свойств сильно поглощенных АЯГ, является космический телескоп NuSTAR (Nuclear Spectroscopic Telescope Array, Харрисон и др., 2013). Он позволяет проводить наблюдения на энергиях выше 10 кэВ с рекордным для этих энергий угловым разрешением $18''$ (FWHM). Наблюдения производятся двумя идентичными оптическими модулями FPMA и FPMB, в фокальной плоскости которых расположены твердотельные CdZnTe детекторы. Рабочий диапазон телескопа — 3–79 кэВ, с энергетическим разрешением 400 эВ (FWHM) на энергии 10 кэВ. Благодаря этим характеристикам, телескоп NuSTAR является наилучшим прибором для спектральных исследований сильно поглощенных АЯГ.

Список наблюдений, использовавшихся в настоящей работе, приведен в табл. 2. Энергетические спектры по данным NuSTAR были получены с помощью программного обеспечения NUSTARDAS (версия 1.5.1), из пакета heasoft (версия 6.18). При обработке данных NuSTAR использовалась база калибровок версии 20160824. Для построения спектров использовались фотоны из круговой апертуры радиусом $50''$, центрированной на положении источника. Для оценки фона использовались фотоны в кольце с тем же центром, внутренний радиус задавался равным $90''$, внешний выбирался от $280''$ до $310''$ в зависимости от близости источника к краю поля зрения.

Для продления энергетического диапазона спектров исследуемых АЯГ в область мягких энергий мы использовали открытые данные обсерваторий XMM-Newton и Chandra (табл. 3). Для извлечения спектров использовались соответствующие пакеты программного обеспечения SAS (версии 15.0.0) и CIAO (версии 4.8). Спектры источников извлекались внутри круговой апертуры радиусом $25''$ (XMM-Newton) и $10''$ (Chandra).

Таблица 1. Список исследуемых АЯГ, их спектральная классификация, красные смещения, расстояния и колонки межзвездного поглощения в Галактике в направлении АЯГ

Название	Тип	Красное смещение (z)	Фотометрическое расстояние (Мпк)	$N_{\text{H,G}}$ ($\times 10^{20} \text{ см}^{-2}$)
IGR J00256+6821	Sy2	0.012 (Мазетти и др., 2008)	51.9	49.05
NGC 1194	Sy1.9	0.014 (Трейзер и др., 2008)	60.6	6.65
CGCG 420–015	Sy2	0.029 (Штраус и др., 1992)	127.0	6.56
IGR J09253+6929	Sy1.5	0.039 (Мазетти и др., 2009)	172.0	4.62
NGC 3281	Sy2	0.011 (Джонс и др., 2010)	47.5	6.62
NGC 4939	Sy2	0.010 (Корибальски и др., 2004)	43.6	3.33
IGR J14175–4641	Sy2	0.076 (Малиция и др., 2012)	344.1	9.04
NGC 5643	Sy2	0.0040 (Корибальски и др., 2004)	17.2	8.18
NGC 5728	Sy1.9	0.0093 (Катинелла и др., 2005)	39.4	7.62
ESO 137–G034	Sy2	0.009 (Баумгартнер и др., 2013)	38.8	23.75

Примечание. При расчете светимости для большинства АЯГ использовались оценки фотометрических расстояний, полученные на основе измеренных значений красных смещений, исходя из космологической модели Λ CDM с параметрами $\Omega_m = 0.3$ и $H_0 = 70 \text{ км с}^{-1} \text{ Мпк}^{-3}$. Расстояния до источников NGC 4939 и NGC 5728 были получены на основе аппроксимаций кривых блеска сверхновых в родительских галактиках (Рест и др., 2014; де Ягер и др., 2017). Колонки поглощения на луче зрения в Галактике получены путем усреднения оценок из работ Кальбера и др., (2005) и Дикки и Локман (1990).

Таблица 2. Наблюдения обсерватории NuSTAR, использованные для спектрального анализа

Источник	Дата	ObsID	Экспозиция, кс
IGR J00256+6821	2014-04-11	60061003002	26
NGC 1194	2015-02-28	60061035002	31.5
	2013-01-26	60061053002	15
CGCG 420–015	2014-08-13	60061053004	18.3
	2014-11-10	60001158002	94.7
IGR J09253+6929	2016-06-30	60201030002	45.5
NGC 3281	2016-01-22	60061201002	23
NGC 4939	2017-02-17	60002036002	22.0
IGR J14175–4641	2016-05-25	60201033002	21.5
NGC 5643	2014-05-24	60061362002	22.5
	2014-06-30	60061256004	19.7
NGC 5728	2013-01-02	60061256002	24.4
ESO 137–G034	2016-06-09	60061272002	18.5

Таблица 3. Наблюдения обсерваторий XMM-Newton и Chandra, использованные для спектрального анализа

Источник	Дата	ObsID	Экспозиция, кс	Обсерватория
NGC 1194	2006-02-19	0307000701	15.6	XMM-Newton
CGCG 420–015	2005-08-30	0307000401	9.2	XMM-Newton
NGC 3281	2011-01-05	0650591001	21	XMM-Newton
NGC 4939	2002-01-03	0032141201	11.5	XMM-Newton
	2010-06-09	11678	13.6	Chandra
	2009-07-25	0601420101	45.5	XMM-Newton
	2014-08-28	0744050101	100	XMM-Newton
NGC 5643	2004-12-26	5636	7.6	Chandra
	2015-05-22	17031	72.1	Chandra
	2015-12-26	17664	41.5	Chandra
NGC 5728	2003-06-27	4077	18.7	Chandra
ESO 137–G034	2006-02-13	0307001901	21	XMM-Newton

Для анализа полученных спектров использовался программный пакет XSPEC (Арно, 1996) версии 12.9.0. Спектры были сгруппированы таким образом, чтобы каждый энергетический канал содержал не менее 20 отсчетов. Ниже неопределенности на параметры моделей приводятся (если не сказано иначе) для доверительных интервалов 90%. Оценки значений потоков и светимостей по данным NuSTAR указываются для диапазона энергий 3–79 кэВ на основе модельных параметров, полученных для модуля FPMA.

2. СПЕКТРАЛЬНЫЕ МОДЕЛИ АЯГ

Для оценки колонки поглощения, фотонного индекса степенного спектрального континуума и внутренней светимости АЯГ спектры в рабочем диапазоне NuSTAR 3–79 кэВ аппроксимировались двумя моделями. Обе модели описывают спектр АЯГ тремя компонентами, отвечающими за (i) прошедшее сквозь газопылевой тор излучение СМЧД, (ii) отраженное (в результате комптоновских рассеяний) от тора излучение СМЧД и (iii) флуоресцентные эмиссионные линии, возникшие после поглощения рентгеновского излучения СМЧД в торе (см., например, Кролик и др., 1994; Джиселлини и др., 1994). Совокупность отраженного излучения и эмиссионных линий будем называть также переработанным излучением. Кроме того, в области мягких энергий (0.1–5 кэВ) в спектрах АЯГ часто наблюдается избыточное

мягкое излучение различной природы (Тёрнер и др., 1993), для описания которого будут задействованы дополнительные спектральные компоненты.

2.1. PEXRAV

В рамках первой модели для описания спектра АЯГ использовалась совокупность следующих моделей из пакета XSPEC. Предполагалось, что излучение СМЧД описывается степенным законом с завалом на высоких энергиях (*cutoffpl*) (см., Ривз и Тёрнер 2000). В большинстве АЯГ завал расположен на энергиях >150 кэВ (вне энергетического диапазона NuSTAR), мы фиксировали его на значении 200 кэВ. Поглощение излучения в торе описывалось моделью *zTBabs* (Вилмс и др., 2000), при этом использовались таблица обилия элементов из работы Андрес и Гривз (1989) и таблица сечений фотопоглощения из работы Балучинска-Чёрч и Маккамон (1992).

Для описания отраженного излучения использовалась спектральная модель *pehrav*, представляющая собой полуаналитическую модель спектра, формируемого при отражении изотропного рентгеновского излучения от плоского слоя холодного неионизованного вещества с бесконечной оптической толщиной (Магдзярз и Дзярский 1995). Косинус угла, под которым наблюдатель смотрит на плоский слой, был принят равным $\cos \Theta = 0.5$, обилие железа в слое — солнечным. Фотонный индекс Γ и завал в спектре падающего излучения E_{cut}

задавались такими же, как и для исходного спектра излучения СМЧД. При этом, следуя примеру многих авторов, были развязаны нормировки компонент, отвечающих за излучение СМЧД и отраженное излучение. Отношение этих нормировок описывается параметром R . Этот коэффициент может отличаться от единицы из-за переменности СМЧД и из-за того, что геометрические свойства отражающей среды в АЯГ (газопылевой тор), вероятно, существенно отличаются от модели плоского слоя (Соболевска и Пападакис, 2009).

Для описания флуоресцентных линий железа ($\text{Fe } K\alpha$ и $\text{Fe } K\beta$) использовались две гауссианы. Положения линий (с учетом красного смещения АЯГ) фиксировались на значениях 6.402 кэВ ($\text{Fe } K\alpha$) и 7.058 кэВ ($\text{Fe } K\beta$), отношение потоков в линиях — на значении $\text{Fe } K\beta/\text{Fe } K\alpha = 0.135$ (Пальмэри и др., 2003), ширина линий принималась равной 0.01 кэВ (Лью 2016).

Описанную модель далее будем называть PEXRAV. В терминологии XSPEC она имеет вид $wabs \times [pexrav + zTBabs \times [cutoffpl] + 2zgauss]$. Ее явным недостатком является то, что спектр отраженного излучения в модели PEXRAV рассчитывается в предположении плоского, изотропно освещенного слоя, а не для тора, что лучше соответствовало бы геометрии АЯГ. Однако коэффициент R , являющийся свободным параметром модели, позволяет в какой-то степени компенсировать этот недостаток.

2.2. MYTORUS

Вторая использованная модель — MYTORUS (Мёрфи и Якуб, 2009; Якуб и Мёрфи, 2011) была специально создана для описания спектров АЯГ и является физически более обоснованной. Она была получена с помощью расчетов методом Монте Карло взаимодействия излучения точечного рентгеновского источника с окружающим его однородным тором из холодного нейтрального вещества с углом раскрытия 60° . Данная модель является табличной, т.е. форма спектра для заданного набора параметров получается путем интерполяции из таблицы спектров.

В терминологии XSPEC рассмотренная нами модель имеет следующий вид: $wabs \times [MYTZ \times [cutoffpl] + R \times [MYTS + MYTL]]$. Модель состоит из трех спектральных компонент:

- $MYTZ$, определяет поглощение излучения рентгеновского источника в торе (аналогично компоненте $zTBabs$ в модели PEXRAV). Спектр прошедшего сквозь тор излучения рассчитывается как произведение $MYTZ$ и

исходного спектра излучения СМЧД, который мы описываем степенным законом с завалом на высоких энергиях: $MYTZ \times [cutoffpl]$, завал фиксировался на энергии 200 кэВ. Помимо параметров исходного спектра, модель задается двумя свободными параметрами: колонкой поглощения в экваториальной плоскости тора N_H^{eq} и углом наклона тора Θ . В модели $MYTZ$ химический состав газа зафиксирован на значениях из работы Андрес и Гривз (1989).

- $MYTS$ описывает спектр излучения СМЧД, вышедшего наружу после отражения в торе. Эта компонента определяется тремя свободными параметрами: N_H^{eq} , Θ и фотонным индексом исходного спектра излучения Γ . Завал степенной компоненты зафиксирован на энергии 200 кэВ.
- $MYTL$ описывает флуоресцентные линии железа и никеля, возникающие в результате фотопоглощения в газе тора рентгеновского излучения СМЧД. Эта компонента имеет одинаковый с $MYTS$ набор свободных параметров (N_H^{eq} , Θ и Γ). Завал степенной компоненты зафиксирован на энергии 200 кэВ. Эквивалентная ширина линии $\text{Fe } K\alpha$ оценивалась с помощью алгоритма, описанного в разделе A1.

По аналогии с моделью PEXRAV мы ввели коэффициент R для описания относительных нормировок компонент $MYTS$, $MYTL$ и $MYTZ$. По умолчанию, для самосогласованного определения внутренней светимости АЯГ спектральный анализ проводился при $R = 1$ (связанный режим MYTORUS). Однако в некоторых случаях это ограничение снималось (свободный режим MYTORUS).

2.3. Мягкое излучение в спектрах АЯГ

Для того чтобы продлить энергетический диапазон исследуемых спектров в область мягких энергий, данные NuSTAR были дополнены данными обсерваторий Chandra и XMM-Newton (см. табл. 3). В мягком рентгеновском диапазоне в спектре сильно поглощенных АЯГ часто наблюдается избыточное излучение (Тёрнер и др., 1993; Бьянчи и др., 2006; Гуанацци и др., 2005b; Гуанацци и Бьянчи, 2007), как правило, незначимое на фоне описанных выше основных компонент спектра АЯГ на энергиях выше ~ 3 кэВ. Дополнительное мягкое излучение может иметь разное физическое происхождение: это может быть излучение АЯГ, рассеянное на ионизованном газе вне газопылевого тора,

излучение газа, нагретого ударными волнами в ядре галактики, или излучение, связанное с процессами звездообразования в галактике.

Для описания избыточного мягкого излучения мы, как правило, использовали две дополнительные спектральные компоненты: *apex* — модель, описывающая тепловое излучение горячей оптически тонкой плазмы, и степенной закон с завалом (*cutoffpl*). При этом завал степенной компоненты фиксировался на значении 200 кэВ. Этот дополнительный набор компонент соответствует сценарию, когда излучение АЯГ нагревает и ионизирует вещество снаружи от газопылевого тора и рассеивается на нем. В некоторых случаях, если мягкое излучение источника было ранее детально исследовано другими авторами, мы использовали представленные в этих работах спектральные модели для описания этого излучения.

3. СПЕКТРАЛЬНЫЙ АНАЛИЗ СИЛЬНО-ПОГЛОЩЕННЫХ АЯГ

Ниже описываются результаты моделирования широкополосных рентгеновских спектров 10 сильно поглощенных АЯГ (см. табл. 1) из выборки, полученной на основе семилетнего обзора неба обсерватории ИНТЕГРАЛ (С15).

3.1. IGR J00256+6821

Этот объект был обнаружен в жестких рентгеновских лучах впервые по данным обсерватории ИНТЕГРАЛ (Койпер и др., 2006). В ходе исследования статистических свойств близких АЯГ на основе 7-летнего обзора неба обсерватории ИНТЕГРАЛ мы провели предварительный анализ данных обсерватории NuSTAR, который выявил сильное поглощение в спектре источника IGR J00256+6821 (Сазонов и др., 2015). Ниже представлены результаты более подробного моделирования имеющихся спектральных данных.

Полученные при аппроксимации данных NuSTAR спектральные параметры моделей PEXRAV и MYTORUS (в связанном режиме) приведены в табл. 4, модели представлены на рис. 1. Модель PEXRAV указывает на высокую долю отраженного излучения в спектре источника ($R > 1.7$, см. табл. 4). Однако, так как компонента, описывающая отраженное излучение в модели PEXRAV, не зависит от внутреннего поглощения, получить надежную оценку N_{H} в данном случае оказывается невозможно.

Модель MYTORUS также указывает на то, что отраженное излучение дает основной вклад в наблюдаемый поток от источника. Следует отметить, что доверительный интервал параметра N_{H}^{eq}

Таблица 4. Спектральные параметры IGR J00256+6821, полученные для моделей PEXRAV и MYTORUS по данным NuSTAR

Параметр	PEXRAV	MYTORUS
Const (FPMB/FPMA)	$0.94^{+0.07}_{-0.12}$	$0.94^{0.07}_{-0.10}$
Γ	$1.65^{+0.13}_{-0.28}$	$2.27^{+0.22}_{-0.08}$
$N_{\text{H}}^{\text{eq}}, \times 10^{24} \text{ см}^{-2}$	—	$8.5^{<10(\text{fixed})}_{-6.3}$ **
$N_{\text{H}}, \times 10^{24} \text{ см}^{-2}$	>1.7	$1.7^{+0.7}_{-0.3}$ **
$EW_{\text{Fe K}\alpha}, \text{ кэВ}$	$0.81^{+0.28}_{-0.37}$	$0.78^{+0.15}_{-0.28}$
$F, \times 10^{-12} \text{ эрг с}^{-1} \text{ см}^{-2}$	$6.9^{+1.2}_{-1.3}$	$6.3^{+0.8}_{-1.0}$
$F_{\text{sc}}, \times 10^{-12} \text{ эрг с}^{-1} \text{ см}^{-2}$	$4.5^{+3.1}_{-0.6}$	$3.5^{+0.9}_{-0.6}$
$F_{\text{tr}}, \times 10^{-12} \text{ эрг с}^{-1} \text{ см}^{-2}$	$1.9^{+1.3}_{-1.0}$	$2.8^{+1.6}_{-0.9}$
$L_{\text{obs}}, \times 10^{42} \text{ эрг с}^{-1}$	$2.2^{+0.4}_{-0.2}$	2.0 ± 0.3
$L_{\text{int}}, \times 10^{42} \text{ эрг с}^{-1}$	—	$8.5^{+4.0}_{-1.6}$ **
R	$3.1^{7.9}_{-1.5}$	1^*
$\Theta, \text{ град}$	60^*	$60.9^{+10.2}_{-0.2}$
Reduced χ^2 (d.o.f.)	0.92 (70)	0.91 (71)

* Параметры зафиксированы.

** Верхний предел на параметр N_{H}^{eq} определяется ограничениями модели MYTORUS, в связи с чем оценки доверительных интервалов для внутренней светимости и колонки поглощения могут быть смещенными (см. раздел А2).

Примечание. Здесь и далее F_{sc} — поток переработанного излучения (отраженного и флуоресцентного), F_{tr} — поток излучения, прошедшего насквозь через толщу газа, F — полный поток регистрируемого излучения, L_{int} и L_{obs} — внутренняя и наблюдаемая светимости АЯГ, рассчитанные для расстояния, приведенного в табл. 1. L_{int} рассчитывается исходя из измеренных значений фотонного индекса и нормировки степенного континуума для модели MYTORUS с $R = 1$. Потоки и светимости приведены для диапазона энергий 3–79 кэВ.

достигает предельного значения, для которого производились расчеты спектров модели (10^{25} см^{-2}). Тем не менее внутреннее поглощение в АЯГ все же может быть ограничено на основе доверительных интервалов, построенных на плоскости параметров N_{H}^{eq} и Θ (см. раздел А2 и рис. 2).

Измеренный в модели MYTORUS угол наклона тора оказался близок к углу его раскрытия, который в этой модели зафиксирован на значении 60° . Важно отметить, что в рассматриваемой модели форма непрерывного спектра, отношение потоков переработанной и прошедшей компонент, а также эквивалентная ширина линии железа оказываются сильно чувствительны к углу наклона в окрестности $\Theta \approx 60^\circ$. Угол наклона в этой

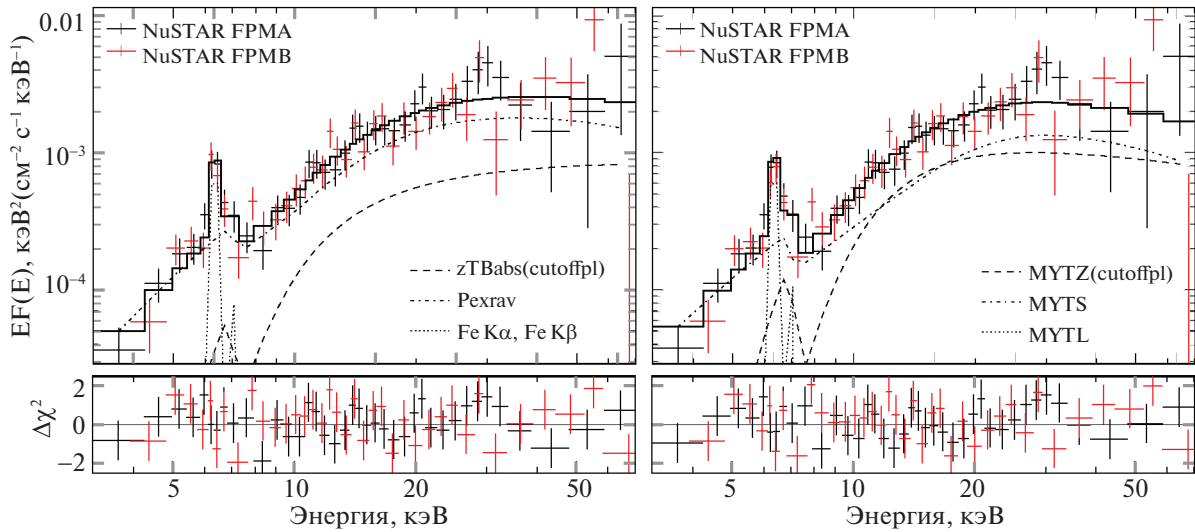


Рис. 1. Спектр IGR J00256+6821 по данным NuSTAR, восстановленный с помощью модели PEXRAV (слева) и MYTORUS (справа).

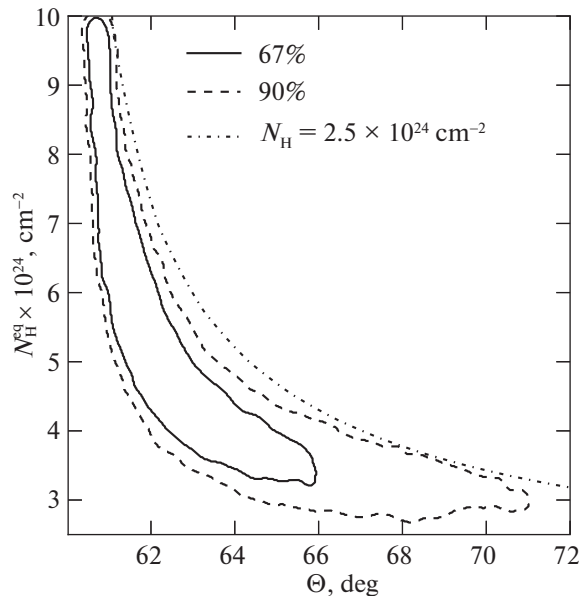


Рис. 2. Контуры охватывают 67% и 90% допустимых значений параметров N_{H}^{eq} и Θ модели MYTORUS с $R = 1$ и получены методом Монте-Карло по схеме марковской цепи. Штрих-пунктирная кривая описывает зависимость $N_{\text{H}}^{\text{eq}}(\Theta)$, при которой колонка поглощения на луче зрения $N_{\text{H}} = 2.5 \times 10^{24} \text{ cm}^{-2}$.

области работает аналогично параметру R , а полученное значение угла около 60° указывает на значительную долю отраженного излучения, причем само это значение не может считаться надежным, так как получено в рамках жестко заданной геометрии тора.

В моделях PEXRAV и MYTORUS получены существенно разные значения фотонного индекса, что, вероятно, объясняется различиями в конфигурациях моделей. В модели PEXRAV наилучшая аппроксимация спектра достигается варьировани-

ем фотонного индекса Γ и отношения потоков отраженного и прошедшего излучения R , в то время как в модели MYTORUS угол наклона может влиять как на относительный вклад отраженной компоненты, так и на ее спектральную форму. В частности, при аппроксимации спектра моделью MYTORUS с фиксированным значением угла наклона $\Theta > 80^\circ$ и свободным параметром R получается $\Gamma < 1.5$ (при этом, однако, качество аппроксимации значительно ухудшается).

Большое значение коэффициента R , полученное

в модели PEXRAV, может быть связано с изменениями в светимости IGR J00256+6821. Поэтому мы исследовали переменность этого объекта. Оцененная по кривой блеска *Swift*/BAT (Баумгартнер и др., 2013) мощность переменности потока IGR J00256+6821 относительно его среднего значения на масштабах 4.5 лет и 1 года составляет $49_{-30}^{+21}\%$ и $<20\%$ соответственно (эти значения получены интегрированием спектра мощности до соответствующих частот). Таким образом, переменность светимости IGR J00256+6821 действительно могла влиять на измеряемое отношение потоков отраженного и прошедшего излучения в спектре.

Учитывая переменность IGR J00256+6821, мы дополнительно аппроксимировали спектр NuSTAR моделью MYTORUS со свободным параметром R . Это привело к незначительному улучшению качества аппроксимации $\chi^2/\text{d.o.f.} = 63.3/70$ при $R = 3.9_{-1.7}^{+10.2}$, причем значение угла наклона практически не изменилось: $\Theta = 61.2_{-0.5}^{+13.6^\circ}$. Это указывает на то, что модель недостаточно хорошо описывает форму спектра, а не поток отраженного излучения, т.е. конфигурация тора в модели MYTORUS, по-видимому, не вполне соответствует реальной геометрии распределения холодного газа в IGR J00256+6821.

3.2. NGC 1194

В этом АЯГ обнаружен водный мегамазер (Гринхил и др., 2008), что указывает на большую колонку поглощения в холодном газе. В рентгеновском диапазоне NGC 1194 исследовался в работах Гринхил и др. (2008); Масини и др. (2016); Марчези и др. (2018). Во всех этих работах было выявлено сильное поглощение в спектре источника: $N_{\text{H}} \approx 10^{24} \text{ см}^{-2}$.

Гринхил и др. (2008) исследовали спектр NGC 1194 на энергиях ниже 10 кэВ по данным XMM-Newton и обнаружили избыточное мягкое излучение в спектре. Оцененная для мягкой компоненты колонка поглощения оказалась больше колонки поглощения на луче зрения в Галактике. Авторы предположили, что дополнительное поглощение, $N_{\text{H}} = 1.0_{-0.7}^{+0.3} \times 10^{21} \text{ см}^{-2}$, связано с межзвездной средой в родительской галактике АЯГ. Жесткий рентгеновский спектр NGC 1194 впервые исследовался по данным NuSTAR в работе Масини и др. (2016) с помощью модели MYTORUS в нестандартной конфигурации, при которой потоки отраженного и прошедшего излучения не связаны между собой. Марчези и др. (2018) аппроксимировали совместно спектры XMM-Newton, *Swift*/XRT и NuSTAR моделью MYTORUS. Использовалось минимальное число свободных параметров, коэффициент R был

зафиксирован на единице, а угол наклона на 90° . Авторами были получены следующие оценки на значения фотонного индекса спектрального континуума и колонки поглощения $\Gamma = 1.50_{-0.09}^{+0.10}$, $N_{\text{H}} = (0.8 \pm 0.1) \times 10^{24} \text{ см}^{-2}$, при этом качество полученной аппроксимации оказалось низким $\chi^2/\text{d.o.f.} = (307.5/243)$. При аппроксимации данных XMM-Newton и NuSTAR моделью MYTORUS в аналогичной конфигурации нами были получены согласующиеся результаты ($\Gamma = 1.47 \pm 0.11$), а качество аппроксимации также оказалось низким: $\chi^2/\text{d.o.f.} = 522.4/326$ (модель со свободным углом наклона лучше описывает данные, см. табл. 5). Полученные низкие значения фотонного индекса, вероятно, связаны с невозможностью одновременно описать область комптоновского бугра и жесткую часть спектра при фиксированном значении угла наклона тора.

При анализе данных с помощью моделей PEXRAV и MYTORUS мы убедились, что параметры, получаемые при аппроксимации отдельно данных XMM-Newton и NuSTAR, согласуются между собой в пределах ошибок. Поэтому был проведен совместный спектральный анализ этих данных. Для описания избыточного мягкого излучения на энергиях ниже 5 кэВ в обе модели были добавлены компоненты *apex* и *cutoffpl*. Следуя Гринхилу и др. (2008), мы также добавили компоненту zTBabs, действующую на все остальные компоненты, чтобы учесть возможное дополнительное поглощение в родительской галактике.

Обе модели PEXRAV и MYTORUS с дополнительными мягкими компонентами плохо описывают форму спектра АЯГ (см. табл. 5 и рис. 3), при этом с помощью модели PEXRAV было получено лучшее значение χ^2 . Отклонение моделей от данных в основном наблюдается в области линии железа и комптоновского бугра. Лучшее качество аппроксимации в модели PEXRAV, вероятно, связано с возможностью варьирования потоков отраженной и прошедшей компонент за счет свободного параметра R . Поэтому мы также аппроксимировали спектр моделью MYTORUS в развязанном режиме (колонка MYTORUS⁽²⁾ в табл. 5). Это модель значительно лучше описывает данные.

Полученное в моделях MYTORUS и PEXRAV значение коэффициента $R \approx 3$ может быть связано с уменьшением внутренней светимости АЯГ в момент наблюдений (хотя кривая блеска *Swift*/BAT совместима с постоянным потоком от источника) и/или с большим углом перехвата излучения холодным газом в NGC 1194 по сравнению с модельными предположениями.

Таблица 5. Спектральные параметры NGC 1194, полученные для моделей PEXRAV и MYTORUS по данным NuSTAR и XMM-Newton

Параметры	PEXRAV	MYTORUS ⁽¹⁾	MYTORUS ⁽²⁾
Const (FPMB/FPMA)	1.01 ± 0.05	0.97 ± 0.05	0.97 ± 0.05
Γ	1.36 ± 0.09	$2.07^{+0.03}_{-0.02}$	1.88 ± 0.08
$N_{\text{H}}^{\text{eq}}, \times 10^{24} \text{ см}^{-2}$	—	$7.4^{<10(\text{fixed})}_{-1.8}$	$6.0^{+0.7}_{-1.1}$
$N_{\text{H}}, \times 10^{24} \text{ см}^{-2}$	$1.2^{+0.5}_{-0.2}$	$1.5^{+0.2}_{-0.3}$	$1.1^{+0.2}_{-0.1}$
$N_{\text{H}}^{\text{h.g.}}, \times 10^{21} \text{ см}^{-2}$	$1.2^{+3.0}_{-0.6}$	$2.3^{+1.8}_{-1.6}$	1.2 ± 0.6
$EW_{\text{Fe K}\alpha}, \text{ кэВ}$	$1.09^{+0.45}_{-0.10}$	0.69 ± 0.11	$0.35^{+0.11}_{-0.07}$
$F, \times 10^{-11} \text{ эрг с}^{-1} \text{ см}^{-2}$	$2.2^{+0.1}_{-0.2}$	1.9 ± 0.5	$2.1^{+0.1}_{-0.2}$
$F_{\text{sc}}, \times 10^{-11} \text{ эрг с}^{-1} \text{ см}^{-2}$	0.7 ± 0.2	1.0 ± 0.1	1.4 ± 0.1
$F_{\text{tr}}, \times 10^{-11} \text{ эрг с}^{-1} \text{ см}^{-2}$	1.5 ± 0.3	0.9 ± 0.1	$0.7^{+0.1}_{-0.2}$
$L_{\text{obs}}, \times 10^{42} \text{ эрг с}^{-1}$	$9.1^{+0.4}_{-0.8}$	$7.9^{+1.3}_{-1.0}$	$8.6^{+8.4}_{-2.7}$
$L_{\text{int}}, \times 10^{42} \text{ эрг с}^{-1}$	—	$11.4^{+1.5}_{-1.4}$	—
R	$3.2^{+1.3}_{-0.8}$	1*	$2.6^{+1.0}_{-0.4}$
$\Theta, \text{ град}$	60*	$60.9^{+0.5}_{-0.4}$	$60.8^{+0.3}_{-0.4}$
Const (MOS1/FPMA)**	1.0 ± 0.1	1.0 ± 0.1	0.9 ± 0.1
Const (MOS2/MOS1)**	1.0 ± 0.1	1.0 ± 0.1	0.9 ± 0.1
Const (PN/MOS1)**	0.9 ± 0.1	1.0 ± 0.1	0.9 ± 0.1
<i>apex</i>			
$kT, \text{ кэВ}$	$1.1^{+0.5}_{-0.1}$	$0.9^{+0.1}_{-0.2}$	1.0 ± 0.2
Norm, $\times 10^{-5} \text{ см}^{-5}$	$1.0^{+0.7}_{-0.5}$	$1.3^{+0.4}_{-0.2}$	$0.9^{+0.6}_{-0.5}$
Abundance	1*	1*	1*
<i>soft cutoffpl</i>			
Γ_{s}	$2.2^{+0.6}_{-0.5}$	$1.9^{+0.2}_{-0.3}$	$1.9^{+1.0}_{-0.5}$
Norm, $\times 10^{-5} \text{ с}^{-1} \text{ см}^{-2} \text{ кэВ}^{-1}$	2.8 ± 0.5	$2.3^{+1.4}_{-0.2}$	$2.5^{+2.5}_{-0.7}$
<i>поток мягких компонент</i>			
$F_{0.5-10 \text{ keV}}, \times 10^{-13} \text{ эрг с}^{-1} \text{ см}^{-2}$	1.4 ± 0.3	$1.3^{+0.6}_{-0.1}$	$1.2^{+0.3}_{-0.5}$
$F_{3-79 \text{ keV}}, \times 10^{-13} \text{ эрг с}^{-1} \text{ см}^{-2}$	$2.2^{+2.7}_{-1.4}$	$6.5^{+1.0}_{-2.7}$	$1.6^{+6.0}_{-0.5}$
Reduced χ^2 (d.o.f.)	1.06 (321)	1.18 (322)	1.08 (321)

* Параметры зафиксированы.

** Нормировочный коэффициент между детекторами MOS1, MOS2 и PN задан равным единице.

Примечание. $N_{\text{H}}^{\text{h.g.}}$ — дополнительная колонка поглощения, связанная, вероятно, с поглощением мягкого излучения АЯГ в родительской галактике (см. текст).Модель PEXRAV использовалась с дополнительными компонентами для описания мягкого излучения: $wabs \times zTBabs \times [pe xrav + zTBabs \times [cutoffpl] + 2zgauss + apex + cutoffpl]$.Модель MYTORUS имела вид: $wabs \times zTBabs \times [MYTZ \times [cutoffpl] + R \times [MYTS + MYTL] + apex + cutoffpl]$.

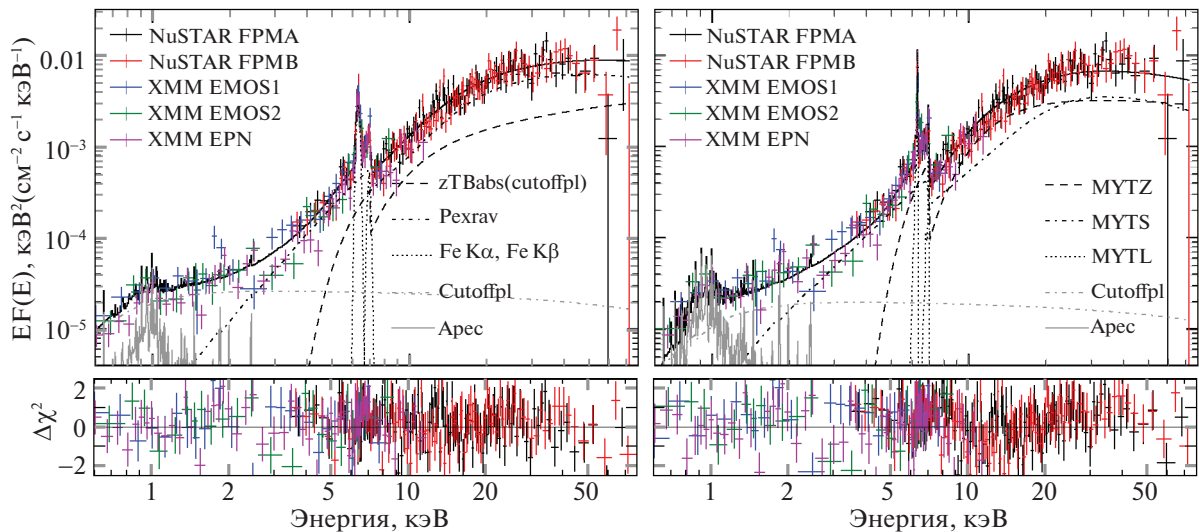


Рис. 3. Слева: спектр NGC 1194 по данным NuSTAR и XMM-Newton, восстановленный с помощью модели PEXRAV с дополнительными компонентами, описывающими мягкое излучение: $wabs \times zTBabs \times [pexrav + zTBabs \times [cutoffpl] + 2zgauss + apec + cutoffpl]$. Справа: спектр NGC 1194, восстановленный с помощью модели MYTORUS с дополнительными мягкими компонентами: $wabs \times zTBabs \times [MYTZ \times [cutoffpl] + R \times [MYTS + MYTL] + apec + cutoffpl]$.

3.3. CGCG 420–015

Северджини и др. (2011), проанализировав спектр CGCG 420–015 на энергиях ниже 10 кэВ по данным XMM-Newton и *Swift*, получили указание на большую колонку поглощения: $N_H \sim 1.5 \times 10^{24} \text{ см}^{-2}$. Кроме того, было обнаружено избыточное мягкое излучение на энергиях ниже ~ 2 кэВ, спектр которого может быть описан степенным законом в сочетании с двумя тепловыми компонентами *apec* с температурами $kT \approx 0.15$ кэВ, $kT \approx 0.7$ кэВ. Авторы пришли к выводу, что мягкое излучение связано со звездообразованием в родительской галактике (тепловые компоненты) и рассеянием излучения АЯГ в окружающей ионизованной среде (степенная компонента).

Марчези и др. (2018) аппроксимировали спектры XMM-Newton и NuSTAR (использовалось только первое из трех имеющихся наблюдений, см. табл. 1) моделью MYTORUS со свободным параметром R и фиксированным на 90° углом наклона. Были получены следующие значения параметров: $R = 2.7^{+2.0}_{-1.0}$ (что свидетельствует об избытке переработанного излучения), $\Gamma = 1.66^{+0.11}_{-0.12}$, $N_H = 0.7 \pm 0.1 \times 10^{24} \text{ см}^{-2}$, при плохом качестве аппроксимации $\chi^2/\text{d.o.f.} = 268.6/216$. При этом данные на энергиях ниже 2 кэВ были отброшены, а избыточное мягкое излучение в спектре аппроксимировалось дополнительной степенной компонентой со свободной нормировкой и тем же фотонным индексом, что и для основного степенного континуума АЯГ. Мы повторили анализ Марчези и др. (2018), используя модель MYTORUS в

такой же конфигурации для полного набора данных NuSTAR и получили согласующийся набор значений параметров, при качестве аппроксимации $\chi^2/\text{d.o.f.} = 1144.7/1069$.

При анализе спектров CGCG 420–015 с помощью моделей PEXRAV и MYTORUS ($R = 1$) мы использовали полный набор данных NuSTAR, включающий три наблюдения, разделенных по времени на 1.5 года (первое и второе) и 4 месяца (второе и третье). Сначала аппроксимировались только данные телескопа NuSTAR, без добавления компонент, описывающих избыточное мягкое излучение. Для обеих использованных моделей нормировочные константы между первым и вторым наблюдением оказались равны 1.00 ± 0.05 , между первым и третьим — 1.14 ± 0.05 . Затем, чтобы выявить возможные изменения формы спектра с изменением потока, мы аппроксимировали отдельно два первых и последнее наблюдение NuSTAR. Все параметры модели, кроме нормировки, полученные для этих двух наборов данных, оказались совместимы в пределах ошибок, поэтому дальнейший анализ был проведен по совокупности всех данных NuSTAR.

Модель MYTORUS аппроксимирует данные NuSTAR хуже, чем модель PEXRAV ($\chi^2/\text{d.o.f.} = 1081.1/1000$ и $\chi^2/\text{d.o.f.} = 949.5/1000$ соответственно). Отклонение модели MYTORUS от данных проявляется в области мягких энергий, поэтому мы дополнили эту модель компонентами для описания мягкого избыточного излучения (*cutoffpl* и *apec*) и включили в анализ данные

Таблица 6. Спектральные параметры CGCG 420–015, полученные по данным NuSTAR для модели PEXRAV, а также по данным NuSTAR и XMM-Newton (MOS1 и MOS2) для модели MYTORUS в разных конфигурациях. Во втором случае для описания избыточного мягкого излучения использовались дополнительные спектральные компоненты: $wabs \times [MYTZ \times [cutoffpl] + R * (MYTS + MYTL) + apec^{(1)} + apec^{(2)} + cutoffpl]$

Параметр	PEXRAV	MYTORUS ⁽¹⁾	MYTORUS ⁽²⁾	MYTORUS ⁽³⁾	MYTORUS ⁽⁴⁾
Γ	1.75 ± 0.03	2.10 ± 0.03	$2.06^{+0.05}_{-0.03}$	$1.90^{+0.05}_{-0.08}$	$2.02^{+0.08}_{-0.12}$
$N_H^{eq}, \times 10^{24} \text{ см}^{-2}$	—	7.7 ± 0.4	4.6 ± 0.3	$2.6^{+0.6}_{-0.4}$	1.4 ± 0.1
$N_H, \times 10^{24} \text{ см}^{-2}$	1.6 ± 0.1	1.1 ± 0.1	1.1 ± 0.1	0.8 ± 0.1	1.2 ± 0.1
$EW_{FeK\alpha}, \text{ кэВ}$	$0.52^{+0.11}_{-0.03}$	0.53 ± 0.03	$0.39^{+0.12}_{-0.06}$	0.40 ± 0.05	$0.53^{+0.06}_{-0.04}$
$F, \times 10^{-11} \text{ эрг с}^{-1} \text{ см}^{-2}$	2.2 ± 0.2	$2.2^{+0.1}_{-0.2}$	2.2 ± 0.1	2.2 ± 0.1	2.2 ± 0.1
$F_{sc}, \times 10^{-11} \text{ эрг с}^{-1} \text{ см}^{-2}$	$1.1^{+0.1}_{-0.3}$	$0.83^{+0.04}_{-0.05}$	1.0 ± 0.1	1.2 ± 0.1	1.1 ± 0.1
$F_{tr}, \times 10^{-11} \text{ эрг с}^{-1} \text{ см}^{-2}$	$0.9^{+0.1}_{-0.2}$	1.4 ± 0.1	1.1 ± 0.1	1.0 ± 0.1	$0.8^{+0.1}_{-0.2}$
$L_{obs}, \times 10^{43} \text{ эрг с}^{-1}$	4.5 ± 0.3	$4.5^{+0.2}_{-0.4}$	4.4 ± 0.2	4.4 ± 0.2	4.4 ± 0.2
$L_{int}, \times 10^{43} \text{ эрг с}^{-1}$	—	$8.1^{+1.1}_{-0.7}$	—	—	—
R	1.6 ± 0.1	1*	$1.3^{+0.1}_{-0.2}$	1.9 ± 0.3	2.4 ± 0.4
$\Theta, \text{ град}$	60*	60.62 ± 0.03	60.9 ± 0.1	61.6 ± 0.5	75*
<i>apec⁽¹⁾</i>					
$kT, \text{ кэВ}$	0.18 ± 0.03	$0.22^{+0.10}_{-0.09}$	$0.22^{+0.05}_{-0.04}$	$0.21^{+0.04}_{-0.06}$	$0.22^{+0.08}_{-0.06}$
Norm, $\times 10^{-4} \text{ см}^{-5}$	0.7 ± 0.1	$1.2^{+0.9}_{-0.6}$	$1.4^{+0.5}_{-0.4}$	$1.3^{+0.8}_{-0.4}$	$1.5^{+0.9}_{-0.8}$
Abundance	1*	1*	1*	1*	1*
<i>apec⁽²⁾</i>					
$kT, \text{ кэВ}$	$0.91^{+0.07}_{-0.06}$	$0.88^{+0.16}_{-0.11}$	$0.90^{+0.16}_{-0.09}$	$0.86^{+0.14}_{-0.10}$	$0.91^{+0.17}_{-0.18}$
Norm, $\times 10^{-5} \text{ см}^{-5}$	5.5 ± 0.4	$7.4^{+2.3}_{-3.3}$	$7.6^{+1.9}_{-2.4}$	$4.8^{+1.9}_{-1.6}$	$7.2^{+4.0}_{-3.3}$
Abundance	1*	1*	1*	1*	1*
<i>soft cutoffpl</i>					
Γ_s	$2.2^{+0.3}_{-0.4}$	1.3 ± 0.4	1.3 ± 0.3	$1.90^{+0.05}_{-0.08} (=AGN)$	1.3 ± 0.4
Norm, $\times 10^{-5} \text{ с}^{-1} \text{ см}^{-2} \text{ кэВ}^{-1}$	5.4 ± 0.5	$4.5^{+3.7}_{-2.2}$	$4.6^{+1.9}_{-1.6}$	8.8 ± 0.9	4.5 ± 1.5
<i>поток мягких компонент</i>					
$F_{0.5-10 \text{ кэВ}}, \times 10^{-12} \text{ эрг с}^{-1} \text{ см}^{-2}$	0.5 ± 0.1	0.9 ± 0.2	$0.8^{+0.2}_{-0.1}$	$0.7^{+0.2}_{-0.1}$	1.0 ± 0.1
$F_{3-79 \text{ кэВ}}, \times 10^{-12} \text{ эрг с}^{-1} \text{ см}^{-2}$	$0.2^{+0.2}_{-0.1}$	$2.1^{+1.8}_{-1.0}$	$1.8^{+1.4}_{-1.2}$	$0.5^{+0.2}_{-0.1}$	$4.2^{+2.4}_{-1.2}$
$\chi^2 \text{ (d.o.f.)}$	0.949 (1000)	0.955 (1068)	0.952 (1067)	0.973 (1068)	0.973 (1068)

* Параметры зафиксированы.

XMM-Newton¹ После этого качество аппроксимации данных значительно улучшилось (см. модель MYTORUS⁽¹⁾ в табл. 6 и рис. 4). Аналогичное добавление мягких компонент к модели PEXRAV не привело к значительным изменениям спектральных параметров и качества аппроксимации.

¹ Часть данных была отброшена ввиду высокого фона, полная экспозиция использованных данных составила 9370 сек. Данные EPIC PN были исключены из анализа.

При аппроксимации спектра моделью MYTORUS с $R = 1$ угол наклона тора оказывается близок к углу его раскрытия: $\Theta \approx 61^\circ$. Отметим также значительный вклад степенного закона, описывающего мягкое избыточное излучение, в жестком рентгеновском диапазоне. При аппроксимации данных моделью MYTORUS со свободным параметром R его значение все равно оказывается близким к единице, причем угол наклона и

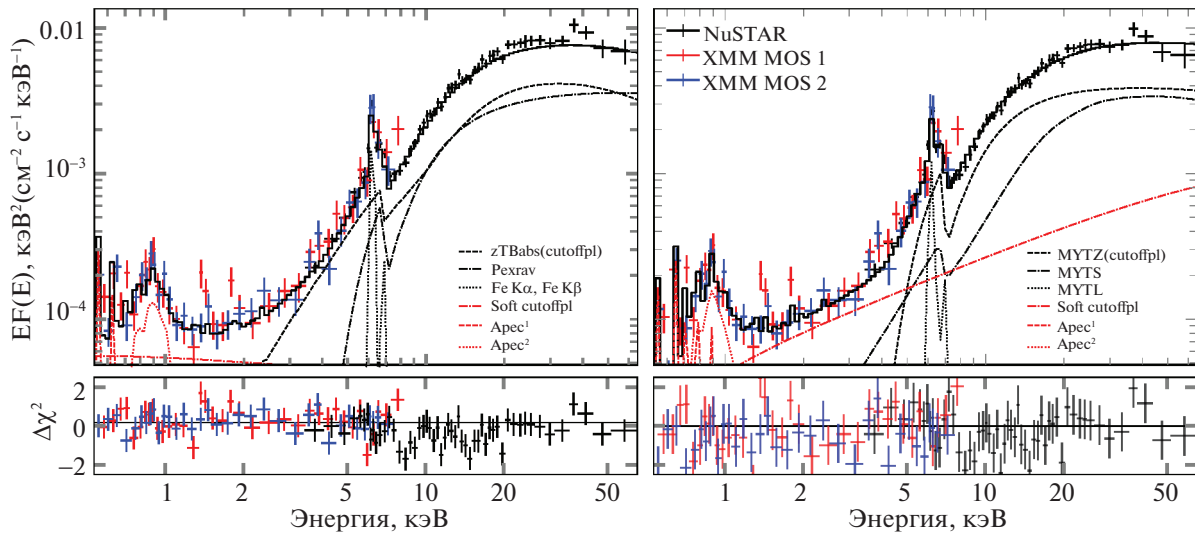


Рис. 4. Слева: спектр CGCG 420–015 по данным NuSTAR, восстановленный с помощью модели PEXRAV. Справа: спектр по данным XMM–Newton и NuSTAR, восстановленный с помощью модели MYTORUS с дополнительными компонентами (см. значения параметров в табл. 6): $wabs \times zTBabs \times [MYTZ \times [cutoffpl] + R \times [MYTS + MYTL] + 2apec + cutoffpl]$ (см. текст). Данные трех наблюдений и двух детекторов NuSTAR сгруппированы в один спектр.

вклад степенной мягкой компоненты практически не меняются (см. модель MYTORUS⁽²⁾ в табл. 6). Мы также попробовали зафиксировать наклон степенной компоненты избыточного мягкого излучения (которое, предположительно, возникает из-за рассеяния излучения АЯГ в окружающей ионизированной среде) на значении наклона основного степенного континуума. Это привело к ухудшению качества аппроксимации, однако полученное значение фотонного индекса $\Gamma = 1.9^{+0.05}_{-0.08}$ оказалось ближе к значениям, характерным для АЯГ (1.7–1.9), при этом вырос вклад отраженного излучения в спектре (см. модель MYTORUS⁽³⁾ в табл. 6). Наконец, мы попробовали зафиксировать угол наклона тора на значении $\Theta = 75^\circ$, оставив при этом коэффициент R и фотонный индекс мягкой степенной компоненты свободными параметрами. Это привело к еще большему росту доли отраженного излучения в спектре (см. модель MYTORUS⁽⁴⁾ в табл. 6).

По результатам аппроксимации спектров моделью MYTORUS во всех описанных конфигурациях можно сделать вывод, что качество аппроксимации удастся улучшить за счет увеличения вклада отраженного от тора излучения в общий поток (т.е. коэффициента R) при практически неизменном значении угла наклона $\Theta \approx 60^\circ$. Как уже отмечалось выше, такое поведение, скорее всего, указывает на неадекватное описание геометрии распределения холодного газа в АЯГ в модели MYTORUS.

3.4. IGR J09253+6929

Этот источник был найден в обзоре неба обсерватории ИНТЕГРАЛ и классифицирован как сейфертовская галактика типа 1.5 (Мазетти и др. 2009). На основе жесткости рентгеновского спектра Малиция и др. (2012) оценили колонку поглощения $N_H = 1.4^{+3.8}_{-0.9} \times 10^{23} \text{ см}^{-2}$.

Аппроксимация спектра NuSTAR моделями MYTORUS и PEXRAV указывает на оптически тонкую по комптоновскому рассеянию колонку поглощения на луче зрения: $N_H \sim 1\text{--}2 \times 10^{23} \text{ см}^{-2}$ (см. табл. 7 и рис. 5). Таким образом, прошедшее излучение АЯГ дает основной вклад в спектр источника (переработанное излучение дает менее 30% потока в диапазоне энергий NuSTAR). Тем не менее для модели MYTORUS получен угол наклона $\Theta \approx 60^\circ$, как и для ряда других рассмотренных нами АЯГ.

3.5. NGC 3281

Винтэр и др. (2009) исследовали рентгеновский спектр NGC 3281 по данным ASCA, полученным в 1996 г., и оценили колонку поглощения: $N_H = (0.89 \pm 0.16) \times 10^{24} \text{ см}^{-2}$. Проанализировав спектральные данные обсерватории ВерроSAX, полученные в 2000 г., Вингьяли и Комастри (2002) пришли к выводу, что $N_H > 10^{24} \text{ см}^{-2}$. Следует отметить более широкий энергетический диапазон ВерроSAX (3–100 кэВ) по сравнению с ASCA (<10 кэВ), позволяющий лучше разделять отраженное и прошедшее излучение в спектре.

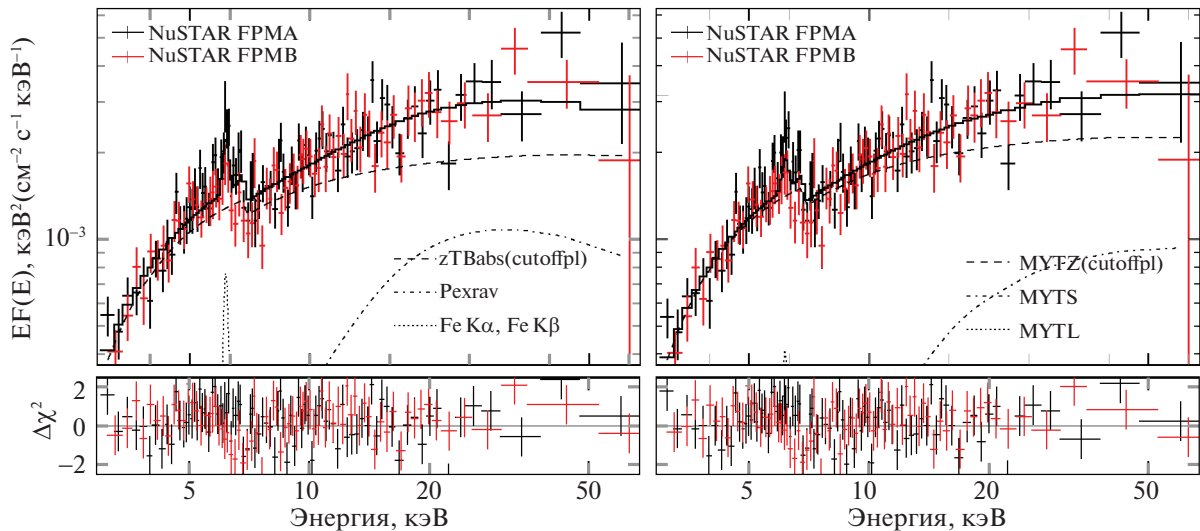


Рис. 5. Спектр IGR J09253+6929 по данным NuSTAR, восстановленный с помощью моделей PEXRAV (слева) и MYTORUS (справа).

Проведенный нами анализ данных NuSTAR в рамках моделей PEXRAV и MYTORUS подтвердил присутствие большой колонки поглощения на луче зрения, что проявляется в преобладании пе-

реработанного излучения в рентгеновском спектре (см. табл. 8 и рис. 6).

Таблица 7. Параметры моделей PEXRAV и MYTORUS, полученные для IGR J09253+6929 в результате аппроксимации данных NuSTAR

Параметры	PEXRAV	MYTORUS
Const (FPMB/FPMA)	0.94 ± 0.04	0.94 ± 0.04
Γ	$1.78^{+0.22}_{-0.21}$	$1.77^{+0.11}_{-0.25}$
$N_{\text{H}}^{\text{eq}}, \times 10^{24} \text{ см}^{-2}$	—	$1.9^{+3.6}_{-1.3}$
$N_{\text{H}}, \times 10^{24} \text{ см}^{-2}$	0.15 ± 0.04	0.11 ± 0.03
$EW_{\text{Fe K}\alpha}, \text{ кэВ}$	$0.14^{+0.07}_{-0.08}$	$0.08^{+0.01}_{-0.03}$
$F, \times 10^{-12} \text{ эрг с}^{-1} \text{ см}^{-2}$	$11.2^{+0.8}_{-1.2}$	$11.5^{+0.8}_{-2.2}$
$F_{\text{sc}}, \times 10^{-12} \text{ эрг с}^{-1} \text{ см}^{-2}$	$3.0^{+2.0}_{-1.6}$	2.4 ± 0.5
$F_{\text{tr}}, \times 10^{-12} \text{ эрг с}^{-1} \text{ см}^{-2}$	$8.1^{+1.5}_{-3.0}$	9.1 ± 1.5
$L_{\text{obs}}, \times 10^{43} \text{ эрг с}^{-1}$	$4.0^{+0.3}_{-0.5}$	$4.0^{+0.3}_{-0.7}$
$L_{\text{int}}, \times 10^{43} \text{ эрг с}^{-1}$	—	4.0 ± 0.2
R	$0.9^{+0.8}_{-0.5}$	1^*
$\Theta, \text{ град}$	60^*	$60.3^{+0.3}_{-0.4}$
Reduced χ^2 (d.o.f.)	0.893 (310)	0.882 (311)

* Параметры зафиксированы.

Мы проанализировали также данные XMM-Newton, полученные в 2011 г., и обнаружили в спектре NGC 3281 избыточное мягкое излучение, дающее незначительный вклад в диапазоне NuSTAR. Оба набора данных (XMM-Newton и NuSTAR) по отдельности хорошо описываются моделью MYTORUS в связанном режиме (с дополнительными мягкими компонентами в случае XMM-Newton). При этом получить хорошую аппроксимацию совокупного спектра XMM-Newton (2011 г.) и NuSTAR (2016 г.) не удается (наилучшее достигнутое значение $\chi^2/\text{d.o.f.} = 1.24$). По этой причине мы отдельно приводим результаты анализа данных XMM-Newton (колонка MYTORUS⁽²⁾ табл. 8 и рис. 7). Из результатов аппроксимации данных моделью MYTORUS следует, что по сравнению с наблюдением XMM-Newton (2011 г.) в момент наблюдения NuSTAR (2016 год) наклон степенного континуума стал несколько больше, а колонка поглощения на луче зрения возросла. Эти изменения хорошо заметны при сравнении спектров XMM-Newton и NuSTAR: они имеют разные наклоны в диапазоне 4–7 кэВ и пересекаются на энергии ~ 5 кэВ. Наблюдаемые изменения колонки поглощения, а именно $N_{\text{H}} \approx 0.9 \times 10^{24} \text{ см}^{-2}$ в 1996 г. (ASCA), $\approx 2 \times 10^{24} \text{ см}^{-2}$ в 2000 г. (BeppoSAX), $\approx 1.0 \times 10^{24} \text{ см}^{-2}$ в 2011 г. (XMM-Newton) и $\approx 2.5 \times 10^{24} \text{ см}^{-2}$ в 2016 г. (NuSTAR), позволяют причислить NGC 3281 к так называемым “изменчивым” АЯГ.

Таблица 8. Параметры моделей, полученные при аппроксимации спектра NGC 3281. В колонках PEXRAV и MYTORUS¹ приведены параметры моделей в их стандартной конфигурации, полученные по данным NuSTAR. Параметры в правой колонке (MYTORUS²) получены для модели MYTORUS с дополнительными мягкими компонентами ($wabs \times [MYTZ \times [cutoffpl] + R * (MYTS + MYTL) + apec + cutoffpl]$) по данным XMM-Newton

Параметр	PEXRAV	MYTORUS ¹	MYTORUS ²
Const (FPMB/FPMA)	$0.97^{+0.05}_{-0.04}$	0.97 ± 0.05	—
Γ	1.31 ± 0.04	$1.97^{+0.09}_{-0.05}$	$1.73^{+0.13}_{-0.19}$
$N_{\text{H}}^{eq}, \times 10^{24} \text{ см}^{-2}$	—	$9.0^{<10(\text{fixed})}_{-4.1}$	$9.9^{<10(\text{fixed})}_{-0.7}$
$N_{\text{H}}, \times 10^{24} \text{ см}^{-2}$	>0.6	$2.5^{+0.6}_{-0.2}$	1.0 ± 0.1
$EW_{\text{Fe K}\alpha}, \text{ кэВ}$	1.38 ± 0.17	$1.08^{+0.05}_{-0.07}$	0.51 ± 0.06
$F, \times 10^{-11} \text{ эрг с}^{-1} \text{ см}^{-2}$	4.3 ± 0.2	4.1 ± 0.2	—
$F_{\text{sc}}, \times 10^{-11} \text{ эрг с}^{-1} \text{ см}^{-2}$	$3.8^{+0.6}_{-0.3}$	$2.9^{+0.5}_{-0.3}$	$2.7^{+2.2**}_{-0.8}$
$F_{\text{tr}}, \times 10^{-11} \text{ эрг с}^{-1} \text{ см}^{-2}$	$0.2^{+0.1}_{-0.2}$	$1.2^{+0.3}_{-0.5}$	$0.7^{+0.2**}_{-0.1}$
$L_{\text{obs}}, \times 10^{43} \text{ эрг с}^{-1}$	1.24 ± 0.01	$1.2^{+0.3}_{-0.1}$	—
$L_{\text{int}}, \times 10^{43} \text{ эрг с}^{-1}$	—	$4.7^{+0.3}_{-0.2}$	3.3 ± 0.7
R	>25	1*	1*
$\Theta, \text{ град}$	60*	$61.3^{+3.7}_{-0.3}$	$60.9^{+4.1}_{-0.4}$
<i>apec</i>			
$kT, \text{ кэВ}$			$0.76^{+0.12}_{-0.10}$
Norm, см^{-5}			$2.2^{+0.7}_{-0.6} \times 10^{-5}$
Abundance			1*
<i>soft cutoffpl</i>			
Γ_s			$3.1^{+0.8}_{-1.0}$
Norm, $\text{с}^{-1} \text{ см}^{-2} \text{ кэВ}^{-1}$			$1.9^{+0.8}_{-0.6} \times 10^{-5}$
<i>поток мягких компонент</i>			
$F_{0.5-10 \text{ keV}}, \times 10^{-13} \text{ эрг с}^{-1} \text{ см}^{-2}$			1.0 ± 0.2
$F_{3-79 \text{ keV}}, \times 10^{-14} \text{ эрг с}^{-1} \text{ см}^{-2}$			$0.8^{+5.0}_{-0.2}$
Reduced χ^2 (d.o.f.)	0.95 (254)	0.97 (255)	1.01 (327)

* Параметры зафиксированы.

** Значение потока в диапазоне 3–79 кэВ и доверительный интервал вычислены с помощью модели по значениям параметров из марковской выборки.

3.6. NGC 4939

Майолино и др. (1998), проанализировав данные обсерватории ВерроSAX, пришли к выводу об очень большом поглощении ($N_{\text{H}} > 10^{25} \text{ см}^{-2}$) в рентгеновском спектре этого АЯГ. Правда, измеренная эквивалентная ширина линии железа оказалась сравнительно небольшой, $0.48^{+0.42}_{-0.21} \text{ кэВ}$,

что лучше соответствует более умеренной колонке поглощения $N_{\text{H}} \approx 10^{24} \text{ см}^{-2}$. Позже, в работе Гуанаци и др. (2005а) спектр NGC 4939 исследовался по данным обсерватории XMM-Newton. Было показано, что в спектре преобладает прошедшее излучение, а измеренная колонка поглощения оказалась небольшой: $N_{\text{H}} \approx 1.3 \times 10^{23} \text{ см}^{-2}$. Вви-

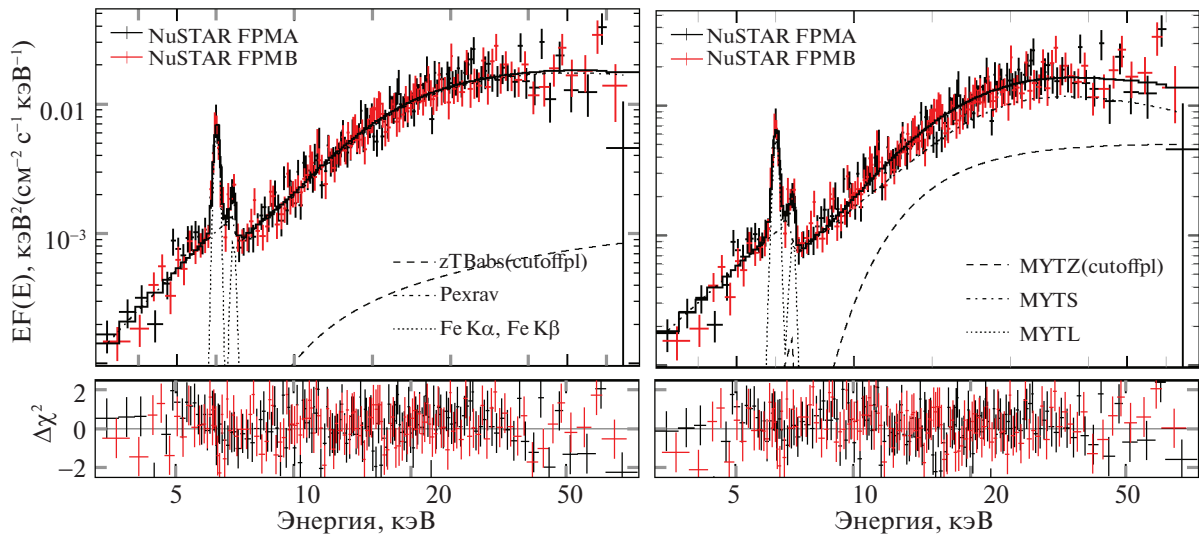


Рис. 6. Спектр NGC 3281 по данным NuSTAR, восстановленный с помощью моделей PEXRAV (слева) и MYTORUS (справа).

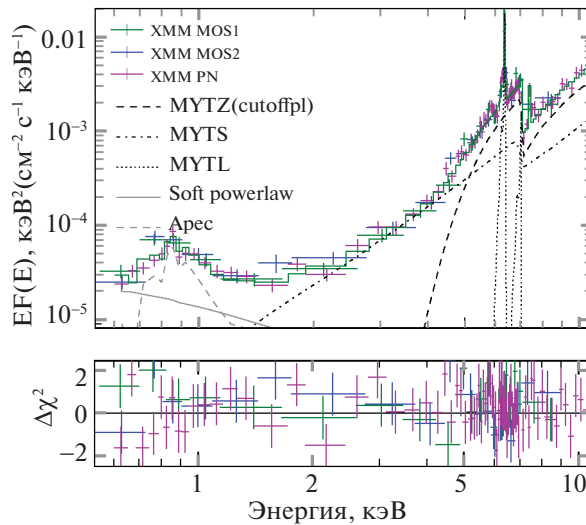


Рис. 7. Спектр NGC 3281 по данным XMM-Newton, восстановленный с помощью модели MYTORUS с дополнительными компонентами для описания мягкого излучения: $wabs \times wabs \times [MYTZ \times [cutoffpl] + R \times [MYTS + MYTL] + apec + cutoffpl]$.

ду явного расхождения с результатами Майолино и др. (1998), авторы повторили анализ данных ВерроSAX с помощью тех же моделей, что применялись ими для анализа данных XMM-Newton, и подтвердили, что спектр ВерроSAX лучше описывается комптоновски-толстой моделью. Они также указали на то, что поток в мягком рентгеновском диапазоне значительно вырос в момент наблюдения XMM-Newton по сравнению с наблюдением ВерроSAX, что логично объясняется значительно возросшей долей прошедшего через тор излучения относительно переработанного в нем излучения при уменьшении колонки поглощения на луче зрения. Таким образом, NGC 4939 — еще

один представитель класса “изменчивых” АЯГ в исследуемой выборке. Данные XMM-Newton также анализировались в работе Ногучи и др. (2009). Авторы оценили эквивалентную ширину линии железа, которая оказалась меньше <0.22 кэВ, что предполагает небольшую колонку поглощения на луче зрения. Кроме того, было обнаружено избыточное мягкое излучение, которое может быть описано моделью теплового излучения плазмы с температурой ≈ 0.7 кэВ либо степенным законом с фотонным индексом $\Gamma \approx 2.7$.

Мы использовали набор данных XMM-Newton, Chandra и NuSTAR. Эти наблюдения проводились с большими перерывами во времени (8.5 и

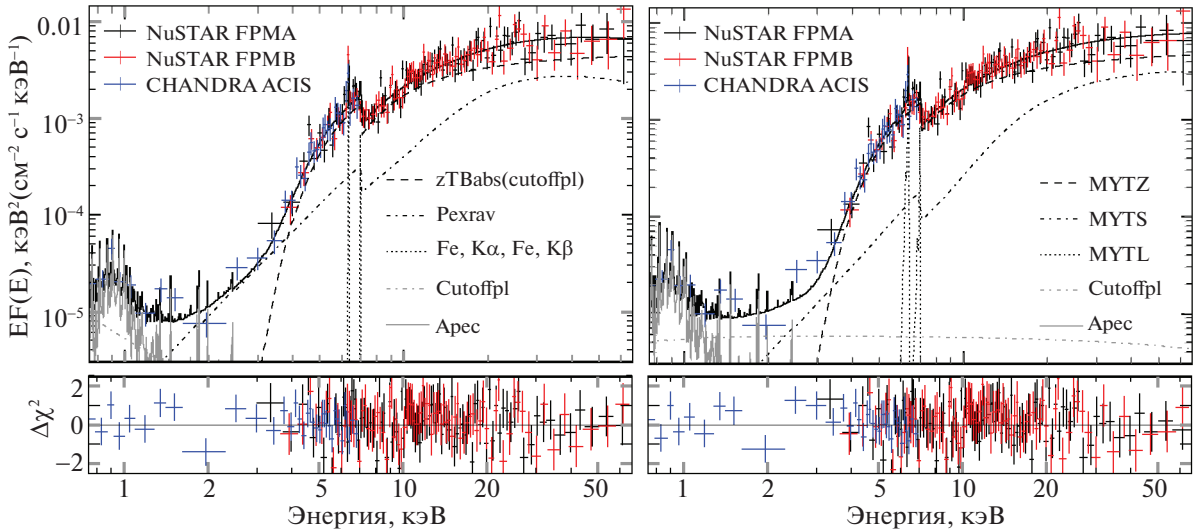


Рис. 8. Спектр NGC 4939, восстановленный с помощью моделей PEXRAV (слева) и MYTORUS (справа). Для описания избыточного мягкого излучения были включены дополнительные компоненты: $wabs \times zTBabs \times [pexrav + zTBabs \times [cutoffpl] + 2zgauss + apec + cutoffpl]$, $wabs \times zTBabs \times [MYTZ \times [cutoffpl] + R \times [MYTS + MYTL] + apec + cutoffpl]$.

6.5 лет соответственно). Попытка описать совокупный набор этих данных с помощью единой модели (PEXRAV или MYTORUS) не увенчалась успехом, так как данные XMM-Newton явно указывают на меньшую колонку поглощения по сравнению с другими наблюдениями. Результаты отдельного анализа спектра по данным XMM-Newton (2002 года) совпали с результатами Гуанци и др. (2005а), указывая на колонку поглощения $1.5^{+0.5}_{-0.6} \times 10^{23} \text{ см}^{-2}$. Результаты аппроксимации спектра по совокупности данных NuSTAR и Chandra приведены в табл. 9 и на рис. 8. Полученное значение колонки поглощения оказалось значительно выше полученного в наблюдении XMM-Newton, но меньше чем в упомянутом выше наблюдении ВерроSAX. Эквивалентная ширина линии железа в наблюдениях Chandra и NuSTAR также оказалась значительно больше, чем в наблюдении XMM-Newton. Таким образом, подтверждается, что NGC 4939 относится к “изменчивым” АЯГ и, как минимум, дважды менял свое состояние за 27 лет наблюдений: от комптоновски-толстого (ВерроSAX в 1989 г.) до комптоновски-тонкого (XMM-Newton в 2003 г.), с последующим новым увеличением колонки поглощения (Chandra в 2010 г. и NuSTAR в 2016 г.).

В рамках модели MYTORUS получен угол наклона тора $\Theta \approx 60^\circ$. Использование модели MYTORUS в развязанном режиме (со свободным параметром R) не приводит к значительному улучшению качества аппроксимации, при этом $R = 1.4^{+0.5}_{-0.4}$, $\Theta = 60.9 \pm 0.4^\circ$. При фиксировании угла наклона на значениях $\Theta > 70^\circ$ наблюдается

значительное отклонение модели от данных в области линии железа и комптоновского бугра. Как и в случае других исследованных нами АЯГ, полученное значение угла наклона вблизи значения угла раскрытия тора, по-видимому, связано с отличием реальной геометрии распределения холодного газа от заложенной в модели MYTORUS.

3.7. IGR J14175–4641

Этот жесткий рентгеновский источник был обнаружен в обзоре неба обсерватории ИНТЕГРАЛ и затем был классифицирован как сейфертовская галактика 2-го типа (Мазетти и др., 2006). Исходя из измеренного значения спектральной жесткости Малиция и др. (2012) оценили внутреннюю колонку поглощения: $N_{\text{H}} = 0.7^{+2.8}_{-0.4} \times 10^{24} \text{ см}^{-2}$. Марчези и др. (2018) исследовали спектр IGR J14175–4641 по данным обсерватории NuSTAR на основе модели MYTORUS с фиксированным углом наклона тора $\Theta = 90^\circ$ и свободным параметром R . Были получены следующие значения параметров: $\Gamma = 1.79^{+0.15}_{-0.14}$, $N_{\text{H}} = (0.8 \pm 0.1) \times 10^{24} \text{ см}^{-2}$ и $R = 0.55^{+1.56}_{-0.55}$.

Мы провели анализ данных NuSTAR с помощью моделей PEXRAV и MYTORUS, в стандартной конфигурации последней. Обе модели хорошо описывают спектр, за исключением области скачка поглощения железа в районе ~ 7 кэВ (см. рис. 9). Полученные параметры моделей PEXRAV и MYTORUS хорошо согласуются между собой. По сравнению с Марчези и др. (2018), мы получили несколько большие значения фотонного

Таблица 9. Параметры моделей PEXRAV и MYTORUS, полученные в результате анализа спектра NGC 4939 по данным NuSTAR и Chandra/ACIS. К обеим моделям были добавлены дополнительные компоненты (*apex* и *cutoffpl*) для описания мягкой части спектра

Параметры	PEXRAV	MYTORUS
Const (FPMB/FPMA)	0.94 ± 0.06	0.94 ± 0.06
Const (ACIS/FPMA)	$1.49^{+0.13}_{-0.16}$	$1.50^{+0.17}_{-0.16}$
Γ	$1.65^{+0.07}_{-0.13}$	$1.65^{+0.15}_{-0.14}$
$N_{\text{H}}^{\text{eq}}, \times 10^{24} \text{ см}^{-2}$	—	$3.0^{+0.5}_{-0.6}$
$N_{\text{H}}, \times 10^{24} \text{ см}^{-2}$	0.48 ± 0.05	$0.44^{+0.07}_{-0.08}$
$EW_{\text{Fe K}\alpha}, \text{ кэВ}$	$0.13^{+0.08}_{-0.07}$	$0.14^{+0.02}_{-0.01}$
$F, \times 10^{-11} \text{ эрг с}^{-1} \text{ см}^{-2}$	$1.9^{+0.2}_{-0.1}$	2.0 ± 0.1
$F_{\text{sc}}, \times 10^{-11} \text{ эрг с}^{-1} \text{ см}^{-2}$	0.7 ± 0.2	1.4 ± 0.2
$F_{\text{tr}}, \times 10^{-11} \text{ эрг с}^{-1} \text{ см}^{-2}$	$1.2^{+0.3}_{-0.2}$	0.7 ± 0.1
$L_{\text{obs}}, \times 10^{42} \text{ эрг с}^{-1}$	$4.6^{+0.2}_{-0.5}$	4.7 ± 0.3
$L_{\text{int}}, \times 10^{42} \text{ эрг с}^{-1}$	—	5.7 ± 0.5
R	$0.9^{+0.3}_{-0.4}$	1*
$\Theta, \text{ град}$	60*	$60.7^{+0.1}_{-0.2}$
<i>apex</i>		
$kT, \text{ кэВ}$	0.9 ± 0.2	$0.8^{+0.8}_{-0.2}$
$\text{norm}, \times 10^{-5} \text{ см}^{-5}$	$0.6^{+0.2}_{-0.1}$	$1.1^{+0.5}_{-0.3}$
Abundance	1*	1*
<i>soft cutoffpl</i>		
Γ_s	$4.0^{+2.4}_{-1.6}$	$2^{+1.3}_{-0.9}$
$\text{Norm}, \times 10^{-5} \text{ см}^{-5}$	0.6 ± 0.4	$0.6^{+0.1}_{-0.3}$
<i>поток мягких компонент</i>		
$F_{0.5-10 \text{ keV}}, \times 10^{-13} \text{ эрг с}^{-1} \text{ см}^{-2}$	$0.3^{+0.6}_{-0.1}$	$11.9^{+11.9}_{-11.8}$
$F_{3-79 \text{ keV}}, \times 10^{-13} \text{ эрг с}^{-1} \text{ см}^{-2}$	<0.6	$5.8^{+5.8}_{-5.7}$
Reduced χ^2 (d.o.f.)	0.954 (200)	0.974 (201)

* Параметры зафиксированы.

индекса степенного континуума и колонки поглощения (см. табл. 10). Это, вероятно, связано с разными использованными конфигурациями модели MYTORUS. Как и для других АЯГ нашей выборки, в рамках модели MYTORUS получен

Таблица 10. Параметры моделей PEXRAV и MYTORUS, полученные в результате анализа спектра IGR J14175–4641 по данным NuSTAR

Параметры	PEXRAV	MYTORUS
Const (FPMB/FPMA)	$0.94^{+0.09}_{-0.08}$	0.95 ± 0.08
Γ	$1.90^{+0.15}_{-0.12}$	$1.90^{+0.17}_{-0.15}$
$N_{\text{H}}^{\text{eq}}, \times 10^{24} \text{ см}^{-2}$	—	$2.9^{<10(\text{fixed})}_{-1.7}$
$N_{\text{H}}, \times 10^{24} \text{ см}^{-2}$	$1.9^{+0.7}_{-0.5}$	1.0 ± 0.3
$EW_{\text{Fe K}\alpha}, \text{ кэВ}$	$0.18^{+0.57}_{-0.18}$	$0.33^{+0.21}_{-0.07}$
$F, \times 10^{-12} \text{ эрг с}^{-1} \text{ см}^{-2}$	$8.9^{+0.4}_{-0.5}$	$9.5^{+1.0}_{-5.1}$
$F_{\text{sc}}, \times 10^{-12} \text{ эрг с}^{-1} \text{ см}^{-2}$	$3.4^{+1.8}_{-1.3}$	3.8 ± 0.7
$F_{\text{tr}}, \times 10^{-12} \text{ эрг с}^{-1} \text{ см}^{-2}$	$5.5^{+1.2}_{-1.3}$	5.7 ± 0.5
$L_{\text{obs}}, \times 10^{44} \text{ эрг с}^{-1}$	1.3 ± 0.1	1.3 ± 0.1
$L_{\text{int}}, \times 10^{44} \text{ эрг с}^{-1}$	—	$2.7^{+1.0}_{-0.4}$
R	$0.9^{+0.8}_{-0.5}$	1*
$\Theta, \text{ град}$	60*	$61.6^{+7.9}_{-1.2}$
Reduced χ^2 (d.o.f.)	0.846 (84)	0.935 (85)

* Параметры зафиксированы.

угол наклона $\Theta \approx 60$, причем освобождение параметра R не приводит к значимому изменению качества аппроксимации и параметров модели.

3.8. NGC 5643

В близкой сейфертовской галактике NGC 5643 (Филлипс и др., 1983), помимо активного ядра, также находится ультраяркий рентгеновский источник (УРИ), расположенный на расстоянии $50''$ от АЯГ. Ядро галактики исследовалось в рентгеновском диапазоне по данным ASCA (Майолино и др., 1998), ВерроSAX и ROSAT (Гуанаци и др., 2004), Chandra (Бьянчи и др., 2006), XMM-Newton (Гуанаци и др., 2004; Матт и др., 2013) и NuSTAR (Аннуар и др., 2015; Кривонос и Сазонов, 2016; Марчези и др., 2018). Гуанаци и др. (2004) показали, что переменность суммарного потока рентгеновского излучения АЯГ и УРИ связана со значительными (вплоть до 5 раз) изменениями потока от УРИ, при этом спектр АЯГ остается постоянным. В работе Бьянчи и др. (2006) был сделан вывод, что наблюдаемое избыточное мягкое рентгеновское излучение АЯГ связано с фотоионизированной средой. Наконец, по данным NuSTAR было показано, что колонка поглощения в АЯГ является оптически толстой по комптоновскому

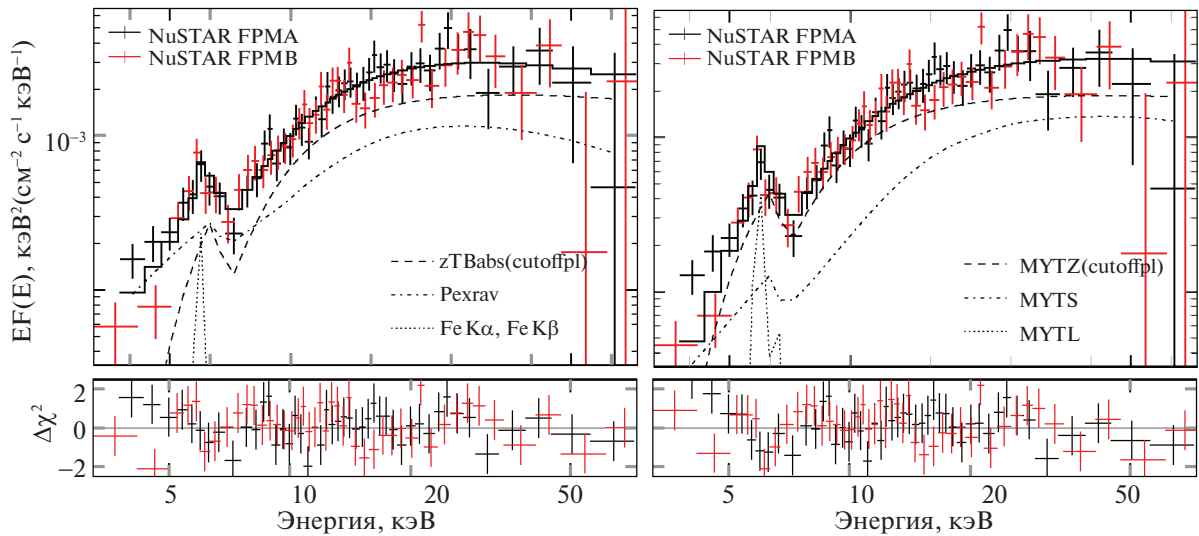


Рис. 9. Спектр IGR J14175–4641 по данным NuSTAR, восстановленный с помощью модели PEXRAV (слева) и MYTORUS (справа).

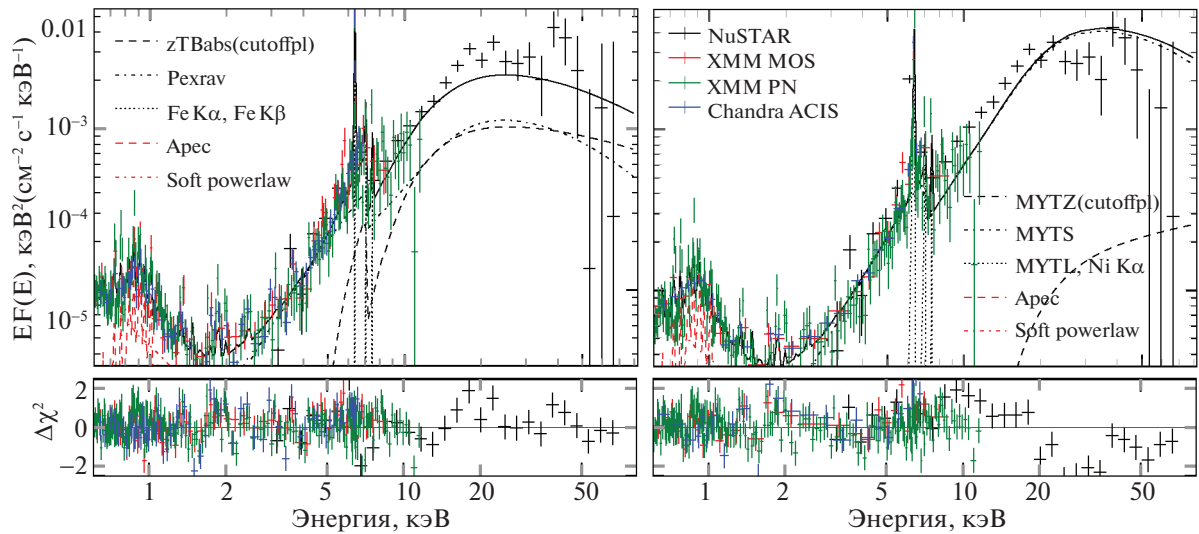


Рис. 10. Спектр NGC 5643 по данным Chandra, XMM-Newton и NuSTAR, восстановленный с помощью моделей PEXRAV и MYTORUS с дополнительными компонентами, описывающими мягкое излучение и линию Ni K α на энергии 7.47 кэВ.

рассеянию (Аннуар и др., 2015; Кривонос и Сазонов, 2016; Марчези и др., 2018).

В работе Кривонос и Сазонов (2016), основной целью которой было исследование спектра УРИ, для разделения излучения двух близко расположенных источников в данных NuSTAR использовался метод извлечения спектра, учитывающий известную зависимость распределения потока фотонов от угла отклонения источника от оптической оси телескопа. Мы применили такой же подход для извлечения спектра АЯГ (см. раздел А3). Это позволило избавиться от сигнала, создаваемого УРИ, и увеличить количество фотонов в извлеченном

спектре АЯГ в ≈ 2.5 раза по сравнению со стандартным апертурным подходом.

Однако у этого метода есть и недостаток, который заключается в некотором ухудшении энергетического разрешения получаемого спектра по сравнению с оригинальными данными. В частности, по этой причине мы использовали также данные Chandra и XMM-Newton (см. табл. 3). Для описания избыточного мягкого излучения использовались дополнительные компоненты *apoc* и *cutoffpl*. Также в результате анализа выяснилось, что добавление гауссианы для описания линии никеля (Ni K α 7.47 кэВ) позволяет существенно улучшить качество аппроксимации данных для модели

Таблица 11. Параметры моделей MYTORUS($wabs \times [MYTZ \times [cutoffpl] + R * (MYTL + MYTS) + zgauss + apec + cutoffpl]$) и PEXRAV($wabs \times [zTBabs \times [cutoffpl] + 3 \times zgauss + pexrav + apec + cutoffpl]$), полученные для спектра NGC 5643 по данным Chandra, XMM-Newton и NuSTAR

Параметры	PEXRAV	MYTORUS
Γ	$2.11^{+0.06}_{-0.05}$	$2.04^{+0.03}_{-0.04}$
$N_{\text{H}}^{\text{eq}}, \times 10^{24} \text{ см}^{-2}$	—	$10.0^{<10(\text{fixed})}_{-0.9}$
$N_{\text{H}}, \times 10^{24} \text{ см}^{-2}$	1.9 ± 0.2	$5.5^{+0.9}_{-1.0}$
$EW_{\text{Fe K}\alpha}, \text{ keV}$	1.27 ± 0.08	1.14 ± 0.03
$F, \times 10^{-11} \text{ эрг с}^{-1} \text{ см}^{-2}$	$0.67^{+0.06}_{-0.07}$	$1.06^{+0.07}_{-0.05}$
$F_{\text{sc}}, \times 10^{-11} \text{ эрг с}^{-1} \text{ см}^{-2}$	$0.30^{+0.06}_{-0.07}$	$1.01^{+0.04}_{-0.08}$
$F_{\text{tr}}, \times 10^{-11} \text{ эрг с}^{-1} \text{ см}^{-2}$	$0.28^{+0.05}_{-0.06}$	$0.04^{+0.04}_{-0.02}$
$L_{\text{obs}}, \times 10^{41} \text{ эрг с}^{-1}$	2.4 ± 0.2	3.7 ± 0.2
$L_{\text{int}}, \times 10^{41} \text{ эрг с}^{-1}$	—	$24.5 \pm ^{+6.0}_{-5.0}$
R	$1.4^{+0.4}_{-0.2}$	1*
$\Theta, \text{ град}$	60*	$65.7^{+2.4}_{-2.8}$
<i>apec</i>		
$kT, \text{ кэВ}$	$0.83^{+0.02}_{-0.03}$	0.81 ± 0.02
Norm, 10^{-5} см^{-5}	$3.9^{0.2}_{-0.1}$	$3.8^{+0.3}_{-0.4}$
Abundance	1*	1*
<i>soft cutoffpl</i>		
Γ_s	4.0 ± 0.1	3.8 ± 0.1
Norm, $\times 10^{-5} \text{ с}^{-1} \text{ см}^{-2} \text{ кэВ}^{-1}$	$5.4^{+0.6}_{-0.5}$	$4.6^{+0.3}_{-0.4}$
поток мягких компонент		
$F_{0.5-10 \text{ keV}}, \times 10^{-13} \text{ эрг с}^{-1} \text{ см}^{-2}$	$2.8^{+0.3}_{-0.2}$	2.6 ± 0.1
$F_{3-79 \text{ keV}}, \times 10^{-15} \text{ эрг с}^{-1} \text{ см}^{-2}$	$5.5^{+1.5}_{-1.0}$	$6.1^{+1.5}_{-0.9}$
Reduced χ^2 (d.o.f.)	1.27 (1139)	1.57 (1140)

* Параметры зафиксированы.

PEXRAV. При этом поток в линии Ni K α составил 0.09 ± 0.03 от потока в линии Fe K α .

Набор параметров, полученный при аппроксимации совокупного набора данных моделями PEXRAV и MYTORUS, приведен в табл. 11. Эти значения хорошо согласуются с результатами Аннуар и др. (2015). Модель PEXRAV аппроксими-

рует данные значительно лучше MYTORUS и указывает на меньшую колонку поглощения. При этом обе модели демонстрируют значительные отклонения от данных NuSTAR (см. рис. 10). Относительные нормировки между разными наборами данных (относительно первого наблюдения NuSTAR: второе наблюдение NuSTAR 1.07 ± 0.07 , наблюдения XMM-Newton 0.93 ± 0.05 , 0.97 ± 0.05 и наблюдения Chandra 0.80 ± 0.05 , 0.82 ± 0.05) указывают на отсутствие существенных вариаций светимости NGC 5643. Форма спектра в наблюдениях XMM-Newton и Chandra также не менялась. Ввиду значительного отклонения моделей от спектра NuSTAR мы провели дополнительный анализ этих данных, аппроксимируя спектр моделями PEXRAV и MYTORUS ($R = 1$) без компонент, описывающих избыточное мягкое излучение. Обе модели, как и раньше, показали большое поглощение, но существенно более крутой степенной континуум: $\Gamma = 2.38^{+0.15}_{-0.04}$.

3.9. NGC 5728

В работе Верон-Цетти и Верон (2006) NGC 5728 был классифицирован как сейфертовская галактика типа 1.9, что может указывать на умеренную колонку поглощения (см., например, Ризалитти и др., 1999). При этом в ядре галактики наблюдается водный мегамазер, что является признаком комptonовски-толстого АЯГ (Гринхил и др., 2008). Измеренное значение эквивалентной ширины линии железа ~ 1 кэВ (Шу и др., 2007) также указывает на большую колонку поглощения в этом АЯГ (Жанг и др., 2010). В работе Шу и др. (2007) на основе данных Chandra была сделана оценка колонки поглощения: $N_{\text{H}} \approx 0.8 \times 10^{24} \text{ см}^{-2}$. Позже Марчези и др. (2018), используя данные Chandra и NuSTAR, с помощью модели MYTORUS (с фиксированным углом наклона тора 90° и свободным параметром R) получили следующие значения спектральных параметров: $N_{\text{H}} = (1.4 \pm 0.1) \times 10^{24} \text{ см}^{-2}$ и $\Gamma = 1.88 \pm 0.06$.

Мы начали анализ с аппроксимации данных NuSTAR моделями PEXRAV и MYTORUS (колонки PEXRAV и MYTORUS⁽¹⁾ табл. 12 и рис. 11). Обе модели хорошо описывают данные и указывают на комptonовски-толстую колонку поглощения, жесткий степенной континуум и доминирование прошедшего излучения в спектре.

Следует отметить, что на оптическом изображении галактики NGC 5728 обнаружены два ярких ядра, одно из которых (более яркое в видимом диапазоне) ассоциируется с АЯГ (Пеконтал и др., 1990; Сон и др., 2009). Сон и др. (2009) исследовали кинематику ядер и пришли к выводу, что

Таблица 12. Параметры моделей PEXRAV и MYTORUS, полученные в результате анализа спектра NGC 5728 по данным NuSTAR. В колонке MYTORUS⁽²⁾ приведен результат анализа данных NuSTAR и Chandra с помощью модели $wabs \times [MYTZ \times [cutoffpl] + R * (MYTL + MYTS) + apec + cutoffpl]$

Параметры	PEXRAV	MYTORUS ⁽¹⁾	MYTORUS ⁽²⁾
Const (FPMB/FPMA)	1.04 ± 0.04	1.04 ± 0.04	1.04 ± 0.04
Γ	1.43 ± 0.08	$1.59^{+0.09}_{-0.10}$	$1.52^{+0.07}_{-0.03}$
$N_H^{eq}, \times 10^{24} \text{ см}^{-2}$	—	$1.6^{+1.0}_{-0.2}$	$1.4^{+0.4}_{-0.1}$
$N_H, \times 10^{24} \text{ см}^{-2}$	2.0 ± 0.2	$1.2^{+0.2}_{-0.1}$	1.3 ± 0.2
$EW_{Fe K\alpha}, \text{ кэВ}$	$0.64^{+0.16}_{-0.17}$	0.61 ± 0.07	$0.57^{+0.06}_{-0.07}$
$F, \times 10^{-11} \text{ эрг с}^{-1} \text{ см}^{-2}$	5.9 ± 0.3	6.0 ± 0.3	$6.1^{+0.2}_{-0.3}$
$F_{sc}, \times 10^{-11} \text{ эрг с}^{-1} \text{ см}^{-2}$	1.5 ± 0.3	2.7 ± 0.3	2.5 ± 0.3
$F_{tr}, \times 10^{-11} \text{ эрг с}^{-1} \text{ см}^{-2}$	4.4 ± 0.3	3.3 ± 0.3	$3.6^{+0.3}_{-0.4}$
$L_{obs}, \times 10^{42} \text{ эрг с}^{-1}$	$11.4^{+0.5}_{-0.6}$	11.5 ± 0.6	$11.5^{+0.4}_{-1.0}$
$L_{int}, \times 10^{42} \text{ эрг с}^{-1}$	—	$23.7^{+3.0}_{-3.7}$	$23.8^{+1.7}_{-1.3}$
R	$0.44^{+0.13}_{-0.11}$	1*	1*
$\Theta, \text{ град}$	60*	$72.1^{+3.5}_{-9.0}$	$74.1^{+4.2}_{-6.3}$
Const (ACIS/FPAM)	—	—	1.0 ± 0.1
<i>apec</i>			
kT, кэВ			0.7 ± 0.2
Norm, 10^{-5} см^{-5}			$2.1^{+0.9}_{-0.6}$
Abundance			1*
<i>soft cutoffpl</i>			
Γ_s			$2.0^{+0.9}_{-0.4}$
norm, $\times 10^{-5} \text{ с}^{-1} \text{ см}^{-2} \text{ кэВ}^{-1}$			$3.6^{+1.1}_{-0.9}$
ПОТОК МЯГКИХ КОМПОНЕНТ			
$F_{0.5-10 \text{ keV}}, \times 10^{-13} \text{ эрг с}^{-1} \text{ см}^{-2}$			$1.8^{+0.4}_{-0.3}$
$F_{3-79 \text{ keV}}, \times 10^{-13} \text{ эрг с}^{-1} \text{ см}^{-2}$			$0.6^{+3.0}_{-0.4}$
Reduced χ^2 (d.o.f.)	0.93 (332)	0.97 (333)	1.00 (383)

* Параметры зафиксированы.

второе ядро также может содержать сверхмассивную черную дыру. Более того, в оптическом спектре второго ядра были обнаружены широкие линии H α , что может указывать на наличие там АЯГ с небольшой колонкой поглощения.

При исследовании мягкого рентгеновского спектра по данным Chandra (см. табл. 3) мы обнаружили избыточное мягкое излучение, домини-

рующее на энергиях ниже 2 кэВ (см. рис. 12). Для описания этого излучения в модель MYTORUS были добавлены компоненты *apec* и *cutoffpl*. Параметры, полученные при аппроксимации совместного набора данных Chandra и NuSTAR этой моделью, приведены в колонке MYTORUS⁽²⁾ табл. 12. Результаты анализа отдельно данных NuSTAR и данных NuSTAR совместно с Chandra

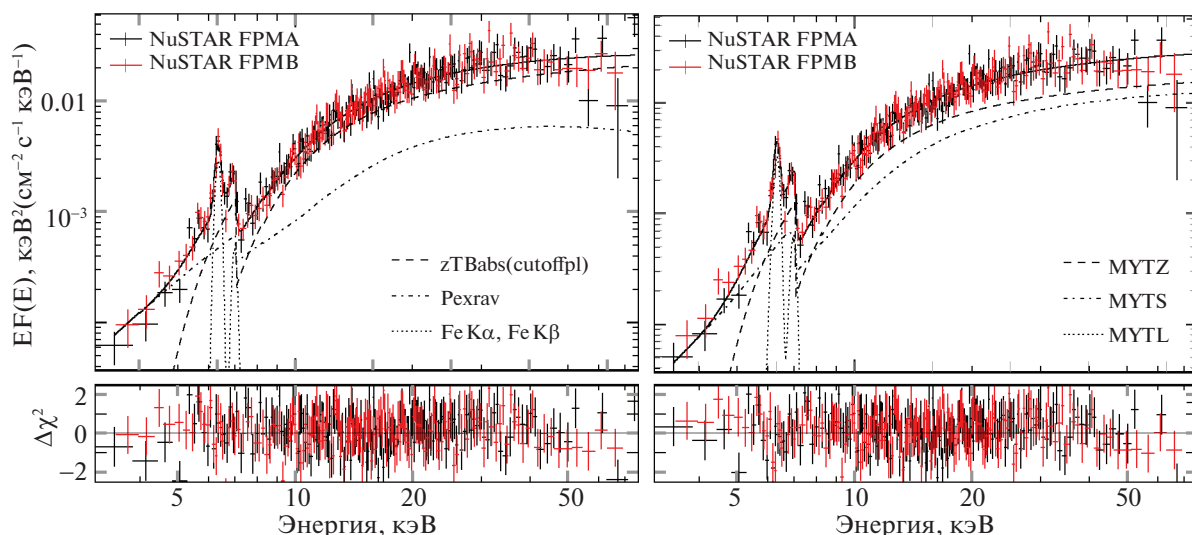


Рис. 11. Спектр NGC 5728 по данным NuSTAR, восстановленный с помощью моделей PEXRAV и MYTORUS.

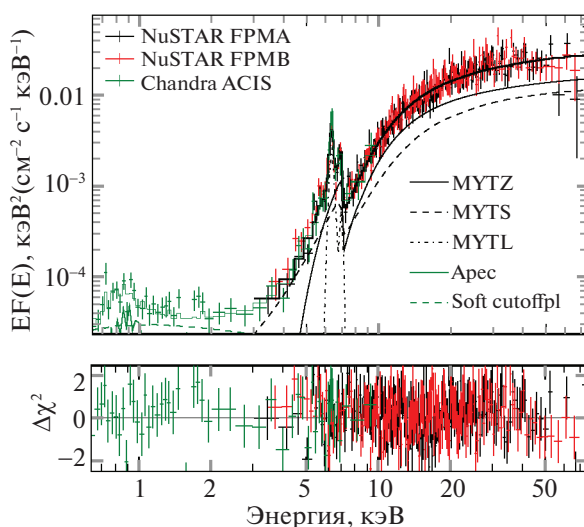


Рис. 12. Спектр NGC 5728 по данным Chandra/ACIS и NuSTAR, восстановленный с помощью модели MYTORUS с дополнительными компонентами, описывающими мягкое излучение $wabs \times [MYTZ \times [cutoffpl] + R * (MYTL + MYTS) + apec + cutoffpl]$.

хорошо согласуются между собой. Компоненты, описывающие мягкое излучение, имеют светимость $1.2^{+4.2}_{-1.0} \times 10^{40}$ эрг s^{-1} в диапазоне 3–79 кэВ. Таким образом, если второе оптически яркое ядро NGC 5728 тоже является активным, то оно должно иметь сравнимую с первым колонку поглощения $N_H > 10^{24}$ cm^{-2} или гораздо более низкую светимость $\sim 10^{40}$ эрг s^{-1} .

3.10. ESO 137–G034

Источник ESO 137–G034 исследовался в рентгеновском диапазоне в работах Малиция и др. (2009а), Комастри и др. (2010) и дэ Роса

и др. (2012) по данным ИНТЕГРАЛ, Suzaku и XMM-Newton. При этом использовалась модель PEXRAV в разных конфигурациях с дополнительными компонентами для описания мягкого излучения. Комастри и др. (2010) исследовали данные Suzaku с помощью модели PEXRAV, к которой опционально добавлялась компонента сильно поглощенного степенного излучения с завалом (таким образом, модель должна была описывать спектры, доминированные рассеянным или прошедшим излучением). Авторы указали, что спектр может быть описан моделью в обеих конфигурациях, независимо от конфигурации колонка поглощения оказывается комптоновски толстой. дэ Роса и др. (2012) показали, что рассеянное и прошедшее

Таблица 13. Параметры моделей PEXRAV и MYTORUS, полученные в результате анализа спектра ESO 137–G034 по данным NuSTAR (колонки PEXRAV и MYTORUS⁽¹⁾). В колонке MYTORUS⁽²⁾ приведены параметры модели $wabs \times [MYTZ \times [cutoffpl] + R(MYTL + MYTS) + apes + cutoffpl]$, полученные при аппроксимации данных NuSTAR и XMM-Newton

Параметры	PEXRAV	MYTORUS ⁽¹⁾	MYTORUS ⁽²⁾
Const (FPMB/FPMA)	1.01 ± 0.05	1.01 ± 0.08	$1.01^{+0.09}_{-0.06}$
Γ	$1.62^{+0.24}_{-0.25}$	$1.97^{+0.17}_{-0.21}$	$1.87^{+0.08}_{-0.09}$
$N_{\text{H}}^{\text{eq}}, \times 10^{24} \text{ см}^{-2}$	–	$3.7^{+2.6}_{-0.3}$	$3.7^{+0.9}_{-0.3}$
$N_{\text{H}}, \times 10^{24} \text{ см}^{-2}$	5.4 ± 1.2	3.0 ± 0.9	$2.8^{+0.5}_{-0.4}$
$EW_{\text{Fe K}\alpha}, \text{ keV}$	1.38 ± 0.35	1.22 ± 0.08	1.20 ± 0.06
$F, \times 10^{-11} \text{ эрг с}^{-1} \text{ см}^{-2}$	2.2 ± 0.2	2.2 ± 0.2	$2.3^{+0.2}_{-0.3}$
$F_{\text{sc}}, \times 10^{-11} \text{ эрг с}^{-1} \text{ см}^{-2}$	$0.7^{+0.3}_{-0.2}$	1.7 ± 0.2	1.7 ± 0.3
$F_{\text{tr}}, \times 10^{-11} \text{ эрг с}^{-1} \text{ см}^{-2}$	$1.5^{+0.2}_{-0.3}$	$0.5^{+0.1}_{-0.2}$	0.6 ± 0.1
$L_{\text{obs}}, \times 10^{42} \text{ эрг с}^{-1}$	$4.0^{+0.3}_{-0.7}$	$4.0^{+0.2}_{-0.3}$	$4.1^{+0.3}_{-0.4}$
$L_{\text{int}}, \times 10^{42} \text{ эрг с}^{-1}$	–	$21.3^{+14.9}_{-9.2}$	$18.5^{+3.3}_{-3.2}$
R	$0.52^{+0.21}_{-0.20}$	1*	1*
$\Theta, \text{ град}$	60*	$74.5^{+4.2}_{-12.5}$	$72.5^{+1.9}_{-3.4}$
Const (MOS1/FPMA)	–	–	$0.80^{+0.09}_{-0.11}$
Const (PN/FPMA)	–	–	$0.78^{+0.09}_{-0.11}$
<i>apes</i>			
$kT, \text{ кэВ}$			$0.79^{+0.07}_{-0.05}$
Norm, $\times 10^{-5} \text{ см}^{-5}$			$7.4^{+1.2}_{-1.8}$
Abundance			1*
<i>soft cutoffpl</i>			
Γ			$2.7^{+0.3}_{-0.2}$
Norm, $\times 10^{-5} \text{ с}^{-1} \text{ см}^{-2} \text{ кэВ}^{-1}$			$7.3^{+2.1}_{-1.0}$
<i>поток мягких компонент</i>			
$F_{0.5-10 \text{ keV}}, \times 10^{-13} \text{ эрг с}^{-1} \text{ см}^{-2}$			$4.5^{+1.1}_{-0.9}$
$F_{3-79 \text{ keV}}, \times 10^{-13} \text{ эрг с}^{-1} \text{ см}^{-2}$			$0.5^{+0.6}_{-0.2}$
Reduced χ^2 (d.o.f.)	0.875 (103)	0.843 (104)	0.98(269)

* Параметры зафиксированы.

излучение дают сравнимые вклады в спектр, степенной континуум жесткий ($\Gamma = 1.2 \pm 0.1$), а колонка поглощения комптоновски-толстая $N_{\text{H}} = 2 \times 10^{24} \text{ см}^{-2}$. Авторы обратили внимание на необычайно большой поток избыточного мягкого

излучения, вклад которого в излучение АЯГ составляет $f_{\text{sc}} = 9.0^{+0.6}_{-1.0}\%$. В работе Малиция и др. (2009а) спектр дополнительного мягкого излучения удалось хорошо описать с помощью сложной модели $MEKAL + PCFABS \times PCFABS \times$

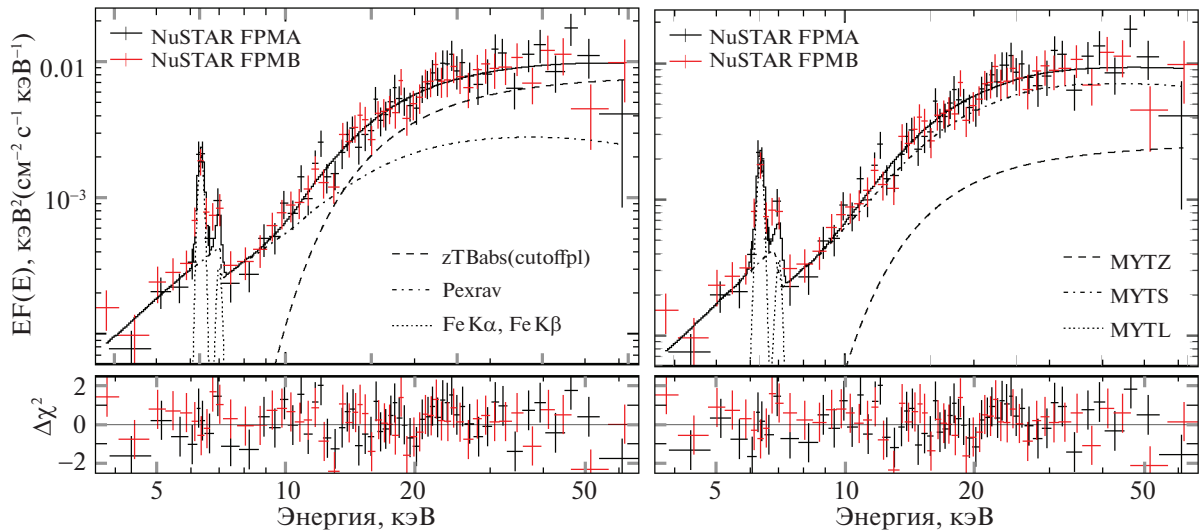


Рис. 13. Спектр ESO 137–G034, полученный по данным обсерватории NuSTAR и восстановленный с помощью моделей PEXRAV (слева) и MYTORUS (справа).

$\times powerlaw + zGauss$ со следующими значениями параметров: $N_{H1} = 3.7^{+4.8}_{-1.7} \times 10^{24} \text{ см}^{-2}$, $N_{H2} = (5.8 \pm 2.2) \times 10^{23} \text{ см}^{-2}$, $\Gamma = 1.78^{+0.08}_{-0.07}$.

Мы начали анализ с аппроксимации данных NuSTAR моделями PEXRAV и MYTORUS без дополнительных компонент для описания мягкого избыточного излучения. Для обеих моделей оцененные колонки поглощения оказались комptonовски-толстыми (см. табл. 13 и рис. 13). При этом модель PEXRAV указывает на большой поток прошедшего излучения, а модель MYTORUS — на большой поток отраженного излучения в спектре. Так как на эти результаты может влиять значительный поток избыточного мягкого излучения (Малиция и др., 2009а; дэ Роса и др., 2012), мы аппроксимировали совместно данные NuSTAR и XMM-Newton моделью MYTORUS с дополнительными компонентами (*apex* и *cutoffpl*) для описания мягкой части спектра (столбец MYTORUS⁽²⁾ в табл. 13 и рис. 14). Оказалось, что избыточное мягкое излучение доминирует на энергиях ниже 3 кэВ, однако параметры модели MYTORUS не изменились значительно.

4. ОБСУЖДЕНИЕ

Мы провели анализ широкополосных рентгеновских спектров десяти близких АЯГ ($z < 0.1$) из выборки S15 по данным обсерваторий NuSTAR, XMM-Newton и Chandra. Согласно предыдущим (в основном грубым) оценкам, рассматриваемые объекты являются кандидатами в комptonовски-толстые ($N_H > 10^{24} \text{ см}^{-2}$) АЯГ. С помощью двух популярных спектральных моделей PEXRAV и MYTORUS мы оценили внутреннее поглощение,

наклон степенного континуума и (в рамках самосогласованной модели MYTORUS) внутреннюю светимость АЯГ.

Для объектов NGC 4939 и IGR J09253+6929 колонка поглощения на луче зрения оказалось комptonовски-тонкой ($N_H < 5 \times 10^{23} \text{ см}^{-2}$), а в их спектрах доминирует излучение, прошедшее сквозь газопылевой тор. Однако необходимо отметить, что рентгеновский спектр NGC 4939, полученный обсерваторией ВерроSAX почти 30 лет назад (в 1989 году), указывал на комptonовски толстую колонку поглощения. Таким образом, этот объект, по-видимому, относится к так называемым “изменчивым” АЯГ. Для других пяти объектов выборки (IGR J00256+6821, IGR J14175–4641 CGCG 420–015, NGC 1194 и NGC 5728) полученные оценки колонок поглощения на луче зрения оказались равными $1–2 \times 10^{24} \text{ см}^{-2}$, а прошедшее через тор и переработанное в нем излучение вносят сравнимые вклады в наблюдаемые спектры на энергиях 3–79 кэВ. Спектры еще трех объектов (NGC 3281, NGC 5643 и ESO 137–G034) практически полностью определяются переработанным в торе излучением, для них $N_H > 2 \times 10^{24} \text{ см}^{-2}$. Табл. 14 обобщает полученные результаты.

Для восьми АЯГ из выборки было достигнуто высокое качество аппроксимации спектров ($\chi^2/\text{d.o.f.} \approx 1$) как для модели PEXRAV, так и для модели MYTORUS. В случае NGC 1194 качество аппроксимации обеими моделями оказалось низким, значительные отклонения наблюдаются в области скачка поглощения, эмиссионных линий и комptonовского бугра, т.е. областях спектра, где ожидается значительный вклад переработанного в торе излучения. Возможно, этот объект

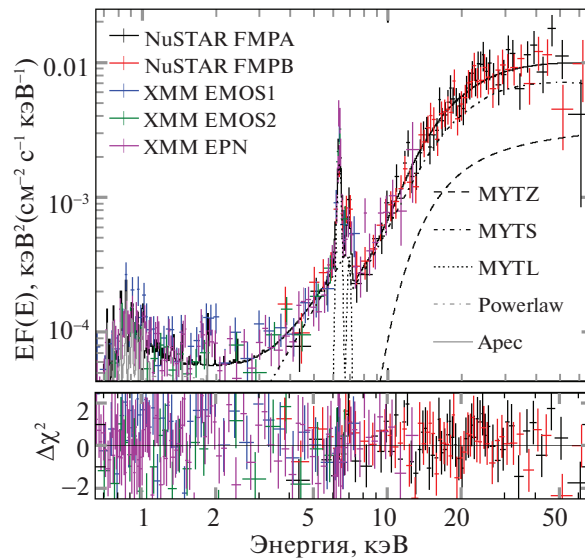


Рис. 14. Спектр ESO 137–G034 по данным NuSTAR и XMM–Newton, восстановленный с помощью модели MYTORUS с дополнительными компонентами для описания избыточного мягкого излучения ($wabs \times [MYTZ \times [cutoffpl] + R \times [MYTS + MYTL] + apec + cutoffpl]$).

характеризуется необычной геометрией вещества, в котором формируется переработанное излучение АЯГ. Также не удалось удовлетворительно описать и спектр NGC 5643, где отклонения в основном наблюдаются в области низких энергий 1–6 кэВ, что, вероятно, связано с недостаточно адекватным выбором спектральной модели для описания избыточного мягкого излучения АЯГ. В жесткой части спектра этого источника также наблюдаются существенные отклонения от модели, что может быть связано с недостаточно точным разделением сигналов от АЯГ и УРИ в этой галактике.

Во многих случаях при аппроксимации данных NuSTAR моделью PEXRAV были получены большие колонки поглощения и меньшие значения фотонного индекса, чем для модели MYTORUS. Аналогичная ситуация возникает при использовании модели MYTORUS со свободным параметром R , отвечающим за отношение нормировок переработанного и прошедшего излучения, и фиксированным углом наклона АЯГ (см., например, Марчези и др., 2018). При фиксированном значении угла наклона (тора в модели MYTORUS и плоского слоя, в котором происходит отражение в модели PEXRAV) форма спектра переработанного излучения оказывается тоже фиксированной, и при описании данных наилучшее качество аппроксимации достигается варьированием отношения потоков переработанной и прошедшей компонент. При использовании модели MYTORUS с фиксированным параметром R наилучшая аппроксимация спектра АЯГ достигается при варьировании угла наклона тора. При аппроксимации большинства

рассмотренных нами спектров угол наклона тора оказался близок к углу его раскрытия: $\Theta \approx 60^\circ$. По-видимому, этот результат является артефактом использования модели MYTORUS, так как в ней предполагается упрощенная геометрия тора с фиксированным углом раскрытия.

Чтобы лучше продемонстрировать, почему модель MYTORUS стремится описывать различные спектры сильно поглощенных АЯГ набором параметров с углом наклона, примерно равным углу раскрытия тора, построим зависимость двух характеристик, описывающих спектр АЯГ в диапазоне энергий NuSTAR, а именно эквивалентной ширины линии железа и спектральной жесткости (определенной через потоки излучения в диапазонах энергий 3–20 и 20–70 кэВ, $HR = (f_{20-70} - f_{3-20}) / (f_{20-70} + f_{3-20})$), от параметров Θ и N_H^{eq} (см. рис. 15). Из рисунка следует, что набор параметров $N_H^{eq} > 2 \times 10^{24} \text{ см}^{-2}$ и $\Theta \approx 60^\circ$ позволяет описать широкий набор спектров, характеризующихся эквивалентной шириной линии железа 0.2–1.0 кэВ и жесткостью 0.2–0.5. Можно заключить, что при $\Theta \approx 60^\circ$ модель может удовлетворительно описать спектры, возникающие при существенно отличной от заложенной в модели MYTORUS геометрии вещества. При этом удается хорошо ограничить значение колонки поглощения на луче зрения. Это объясняется тем, что форма прошедшего излучения не зависит от геометрии газопылевого тора и определяется только колонкой вещества на луче зрения, в то время как форма отраженной компоненты может значительно меняться в зависимости от геометрии и ориентации вещества. Это дополнительно иллюстрируется на рис. 16, где

Таблица 14. Параметры моделей MYTORUS (верхняя строка для каждого АЯГ) и PEXRAV (нижняя строка), полученные по данным NuSTAR, XMM-Newton и Chandra. Параметры модели PEXRAV для объектов NGC 5728, NGC 3281 и CGCG 420–015 получены только по данным NuSTAR

Объект/параметр единицы измерения	N_{H} 10^{24} см^{-2}	N_{H}^{eq} 10^{24} см^{-2}	Θ , град	Γ	L_{obs} эрг с^{-1}	L_{int} эрг с^{-1}	Fe K α EW кэВ
IGR J00256+6821	$1.7^{+0.7}_{-0.3}$	$8.5^{<10(\text{fixed})}_{-6.3}$	$60.9^{+10.2}_{-0.2}$	$2.27^{+0.22}_{-0.08}$	$(2.0 \pm 0.3) \times 10^{42}$	$8.5^{+4.0}_{-1.6} \times 10^{42}$	$0.78^{+0.15}_{-0.28}$
	>1.7			$1.67^{+0.13}_{-0.28}$	$2.2^{+0.4}_{-0.2} \times 10^{42}$		$0.81^{+0.28}_{-0.37}$
NGC 1194	$1.5^{+0.2}_{-0.3}$	$7.4^{<10(\text{fixed})}_{-1.8}$	$60.9^{+0.5}_{-0.4}$	$2.07^{+0.03}_{-0.02}$	$7.9^{+1.3}_{-1.0} \times 10^{42}$	$1.1^{+0.2}_{-0.1} \times 10^{43}$	0.69 ± 0.11
	$1.2^{+0.5}_{-0.2}$			1.36 ± 0.09	$9.1^{+0.4}_{-0.8} \times 10^{42}$		$1.09^{+0.45}_{-0.10}$
CGCG 420–015	1.1 ± 0.1	7.7 ± 0.4	60.62 ± 0.03	2.10 ± 0.03	$4.5^{+0.2}_{-0.4} \times 10^{43}$	$8.1^{+1.1}_{-0.7} \times 10^{43}$	0.53 ± 0.03
	1.6 ± 0.1			1.75 ± 0.03	$(4.5 \pm 0.3) \times 10^{43}$		$0.52^{+0.11}_{-0.03}$
IGR J09253+6929	0.11 ± 0.03	$1.9^{+3.6}_{-1.3}$	$60.3^{+0.3}_{-0.4}$	$1.77^{+0.11}_{-0.25}$	$4.0^{+0.3}_{-0.7} \times 10^{43}$	$(4.0 \pm 0.2) \times 10^{43}$	$0.08^{+0.01}_{-0.03}$
	0.15 ± 0.04			$1.78^{+0.22}_{-0.21}$	$4.0^{+0.3}_{-0.5} \times 10^{43}$		$0.14^{+0.07}_{-0.08}$
NGC 3281	$2.5^{+0.6}_{-0.2}$	$9.0^{<10(\text{fixed})}_{-4.1}$	$61.3^{+3.7}_{-0.3}$	$1.97^{+0.09}_{-0.05}$	$1.20^{+0.25}_{-0.05} \times 10^{43}$	$4.7^{+0.3}_{-0.2} \times 10^{43}$	$1.08^{+0.05}_{-0.07}$
	>0.6			1.31 ± 0.04	$(1.24 \pm 0.01) \times 10^{43}$		1.38 ± 0.17
NGC 4939	$0.44^{+0.07}_{-0.08}$	$3.0^{+0.5}_{-0.6}$	$60.7^{+0.1}_{-0.2}$	$1.65^{+0.15}_{-0.14}$	$(4.7 \pm 0.3) \times 10^{42}$	$(5.7 \pm 0.5) \times 10^{42}$	$0.14^{+0.02}_{-0.01}$
	0.48 ± 0.05			$1.65^{+0.07}_{-0.13}$	$4.6^{+0.2}_{-0.5} \times 10^{42}$		$0.13^{+0.08}_{-0.07}$
IGR J14175–4641	1.0 ± 0.3	$2.9^{<10(\text{fixed})}_{-1.7}$	$61.6^{+7.9}_{-1.2}$	$1.90^{+0.17}_{-0.15}$	$(1.3 \pm 0.1) \times 10^{44}$	$2.7^{+1.0}_{-0.4} \times 10^{44}$	$0.33^{+0.21}_{-0.07}$
	$1.9^{+0.7}_{-0.5}$			$1.90^{+0.15}_{-0.12}$	$(1.3 \pm 0.1) \times 10^{44}$		$0.18^{+0.57}_{-0.18}$
NGC 5643	$5.5^{+0.9}_{-1.0}$	$10.0^{<10(\text{fixed})}_{-0.9}$	$65.7^{+2.4}_{-2.8}$	$2.04^{+0.03}_{-0.04}$	$(3.7 \pm 0.2) \times 10^{41}$	$2.5^{+0.6}_{-0.5} \times 10^{42}$	1.14 ± 0.03
	1.9 ± 0.2			$2.11^{+0.06}_{-0.05}$	$(2.4 \pm 0.2) \times 10^{41}$		1.27 ± 0.08
NGC 5728	$1.2^{+0.2}_{-0.1}$	$1.6^{+1.0}_{-0.2}$	$72.1^{+3.5}_{-9.0}$	$1.59^{+0.09}_{-0.10}$	$(1.15 \pm 0.06) \times 10^{43}$	$2.4^{+0.3}_{-0.4} \times 10^{43}$	0.61 ± 0.07
	2.0 ± 0.2			1.43 ± 0.08	$1.14^{+0.05}_{-0.06} \times 10^{43}$		$0.64^{+0.16}_{-0.17}$
ESO 137–G034	3.0 ± 0.9	$3.7^{+2.6}_{-0.3}$	$74.5^{+4.2}_{-12.5}$	$1.97^{+0.17}_{-0.21}$	$4.0^{+0.2}_{-0.3} \times 10^{42}$	$2.1^{+1.5}_{-0.9} \times 10^{43}$	1.22 ± 0.08
	5.4 ± 1.2			$1.62^{+0.24}_{-0.25}$	$4.0^{+0.2}_{-0.7} \times 10^{42}$		1.38 ± 0.35

показаны 90% доверительные интервалы для параметров N_{H}^{eq} и Θ для источника IGR J00256+6821, полученные при аппроксимации его спектра в специальном режиме, когда эти параметры задавались

независимо для прошедшего (MYTZ) и переработанного излучения (MYTL + MYTS). Видно, что колонка поглощения прошедшей компоненты $N_{\text{H}} = N_{\text{H}}^{\text{eq}} \sqrt{1 - 1/2 \cos^2 \Theta}$ хорошо определена, в

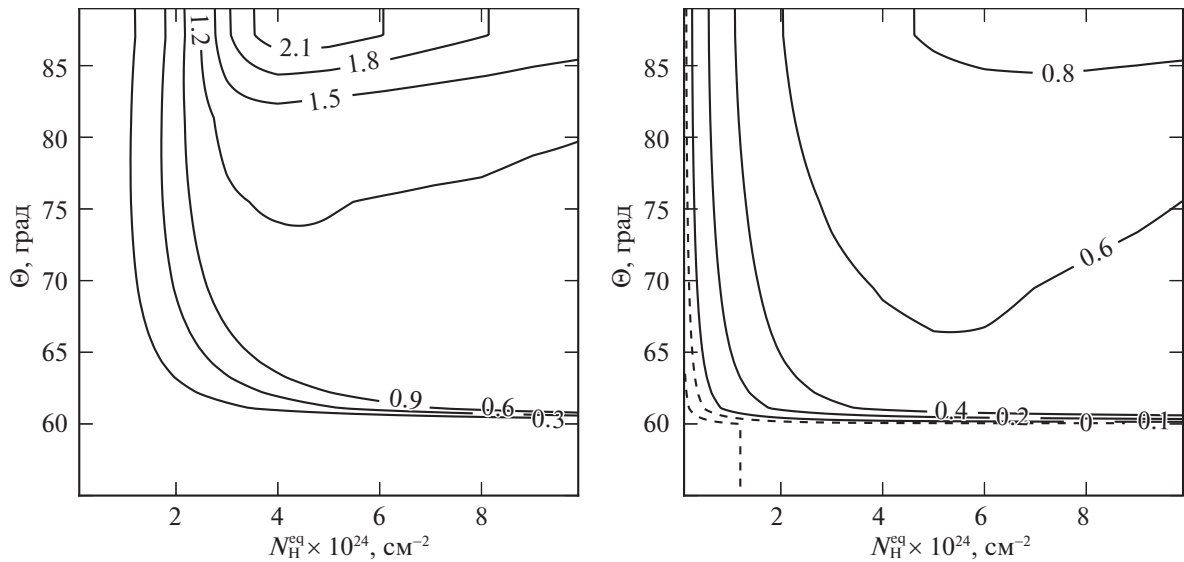


Рис. 15. Слева: контуры постоянных значений эквивалентной ширины линии Fe K α (в кэВ) в модели MYTORUS. Справа: контуры постоянных значений жесткости для энергетических диапазонов 3–20, 20–70 кэВ ($HR = (f_{20-70} - f_{3-20}) / (f_{20-70} + f_{3-20})$). Все контуры получены для значения фотонного индекса $\Gamma = 2$. Следует отметить, что эквивалентная ширина линии железа слабо зависит от фотонного индекса излучения.

то время как параметры угла наклона и экваториальной колонки поглощения в торе оказываются плохо ограничены.

Спектры других сильно поглощенных АЯГ из выборки C15 по данным NuSTAR

Четыре источника, отмеченные как кандидаты в комptonовски-толстые АЯГ в выборке C15 и

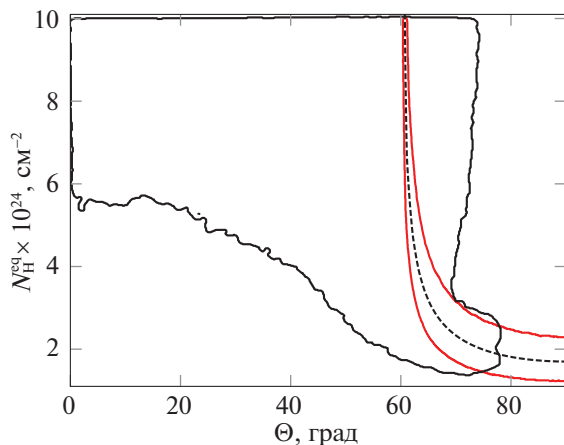


Рис. 16. Контуры показывают доверительные интервалы (90%) для параметров Θ и N_H^{eq} , полученные независимо для переработанной (красная сплошная линия) и прошедшей (черная сплошная линия) спектральных компонент источника IGR J00256+6821 (см. текст). Черная пунктирная кривая соответствует значениям параметров Θ и N_H^{eq} , для которых колонка поглощения $N_H = 1.7 \times 10^{24} \text{ см}^{-2}$.

не рассмотренные в настоящей работе, были исследованы другими авторами по данным NuSTAR, XMM-Newton, Chandra и *Swift*, в том числе с использованием модели MYTORUS. Основные спектральные характеристики АЯГ, полученные в этих работах, приведены в табл. 15 (светимости пересчитаны в диапазон 3–79 кэВ).

NGC 1068 исследовался в работе Бауэр и др. (2015) по данным обсерваторий NuSTAR, Chandra и XMM-Newton, полученным с 2000 по 2013 гг. С помощью моделей PEXRAV и MYTORUS в конфигурациях, аналогичных использованным в нашей работе, авторам не удалось хорошо описать спектр АЯГ. Поэтому они использовали также более сложную конфигурацию модели MYTORUS с несколькими компонентами переработанного излучения с углами наклона, зафиксированными на 0° и 90° , что позволило улучшить качество аппроксимации данных. Тем не менее в табл. 15 приводится результат Бауэр и др. (2015), полученный при использовании модели MYTORUS в связанном режиме ($R = 1$).

Mrk 3 был исследован Гуанацци и др. (2016) по данным NuSTAR, полученным в девяти наблюдениях, выполненных с сентября 2014 по апрель 2015 г. Авторы исследовали спектральную переменность в широкополосном спектре и обнаружили значимые изменения фотонного индекса и колонки поглощения. Вариации параметра N_H^{eq} при использовании модели MYTORUS в стандартной конфигурации составили $\approx 30\%$. В качестве основной спектральной модели авторы рассмотрели MYTORUS

Таблица 15. Спектральные характеристики сильно поглощенных АЯГ из выборки С15, полученные другими авторами на основе данных NuSTAR с помощью модели

Объект/параметр единицы измерения	C15 N_H 10^{24} см^{-2}	N_H^{eq} 10^{24} см^{-2}	Θ , град	Γ	L_{obs} эрг с^{-1}	L_{int} эрг с^{-1}	Fe K α EW кэВ
NGC 1068 ¹	>10	8.5* _{-3.1}	9.4 ^{<10(fixed)} _{-3.3}	1.40 ^{+0.12} _{>1.4(fixed)}	$\approx 1.4 \times 10^{42}$	$\approx 1.5 \times 10^{43}$	≈ 0.7
Mrk 3 ²	1	0.75–0.90 \pm 0.01	0.75–0.90 \pm 0.01	1.66–1.85 \pm 0.02	(4–5) $\times 10^{43}$	(1.2–1.6) $\times 10^{44}$	≈ 1.0
NGC 4945 ³	4	3.5 \pm 0.2	3.5 \pm 0.2	1.77–1.96	$\approx 1.9 \times 10^{42}$	$\approx (1.0–2.4) \times 10^{43}$	0.95 \pm 0.30
NGC 6240 ⁴	2.5	1.39 ^{+0.09} _{-0.08}	1.6 ^{+0.4} _{-0.2}	1.7 \pm 0.09	$\approx 7 \times 10^{43}$	$\approx 2.2 \times 10^{44}$	0.37 ^{+0.24} _{-0.05}

* Верхний предел на значение колонки поглощения не определен, так как значение экваториальной колонки поглощения в модели достигло предельного значения.

Примечание. ¹ Бауэр и др. (2015), ² Гуанацци и др. (2016), ³ Пучетти и др. (2014), ⁴ Пучетти и др. (2016) внутренние и наблюдаемые светимости NGC 1068, Mrk 3, NGC 4945 и NGC 6240 в диапазоне 3–79 кэВ были рассчитаны на основе параметров моделей.

с несвязанными нормировками и колонками поглощения для переработанной и прошедшей компонент. При аппроксимации спектров авторы предполагали, что колонка поглощения рассеянной компоненты и фактор R не меняются от наблюдения к наблюдению. В табл. 15 приведены диапазоны значений параметров, полученные в рамках этой модели.

NGC 4945 исследовался в работе Пучетти и др. (2014) с помощью модели MYTORUS в различных конфигурациях.

NGC 6240 — необычная галактика, содержащая два АЯГ на расстоянии $\sim 1.5''$ друг от друга. Пучетти и др. (2016) исследовали оба АЯГ по данным NuSTAR, XMM-Newton и Chandra. В табл. 15 приведено значение эквивалентной ширины линии железа, оцененное по данным Chandra для более яркого ядра (поток в ~ 3 раза выше, чем у второго ядра). Значения остальных спектральных параметров получены в результате аппроксимации спектра совокупного излучения пары АЯГ по данным NuSTAR.

Остальные три сильно поглощенных АЯГ из выборки С15 (NGC 3081, ESO 506-G027 и IGR J14561-3738) пока не наблюдались обсерваторией NuSTAR.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

По данным обсерватории NuSTAR, дополненным на низких энергиях данными обсерваторий Chandra и XMM-Newton, детально исследованы рентгеновские спектры 10 из 17 кандидатов в комптоновски-толстые АЯГ из статистически полной выборки С15. Благодаря использованию широкого диапазона энергий (1–80 кэВ) в спектрах АЯГ удалось достаточно надежно разделить компоненты, связанные с прошедшим через газопылевой тор и переработанным в нем излучением,

и измерить соответствующие спектральные параметры (см. табл. 14, а также табл. 15, где приведены аналогичные оценки для еще четырех объектов выборки С15, полученные другими авторами).

Для большинства источников уточненные оценки колонок поглощения и внутренней светимости АЯГ согласуются с предыдущими, более грубыми оценками (см. табл. 1 в работе Сазонов и др., 2015). При этом 8 из 10 объектов оказались комптоновски-толстыми АЯГ ($N_H > 10^{24} \text{ см}^{-2}$), а еще два (IGR J09253+6929 и NGC 4939) — комптоновски-тонкими: $N_H < 5 \times 10^{23} \text{ см}^{-2}$. Причем NGC 4939, вероятно, является “изменчивым” АЯГ, так как в 1989 г. с помощью обсерватории ВерроSAX у него наблюдалось более сильное поглощение. Один из основных результатов настоящей работы состоит в том, что внутренние светимости рассмотренных АЯГ оказались больше наблюдаемых до 7 раз (в рамках модели MYTORUS).

Однако необходимо отметить, что использованная нами популярная спектральная модель MYTORUS, базирующаяся на геометрии тора с фиксированным углом раскрытия (60°), по видимому, не совсем соответствует реальной геометрии распределения холодного газа в АЯГ, так как для большинства рассмотренных объектов требуемый угол наклона тора оказался очень близок к углу раскрытия ($\Theta \approx 60^\circ$), что невозможно списать на эффекты наблюдательной селекции. При этом модель MYTORUS все же позволяет достаточно надежно измерить колонку поглощающего вещества на луче зрения.

В результате настоящей работы и ряда недавних исследований, проведенных другими авторами, для практически всех АЯГ из каталога 7-летнего обзора обсерватории ИНТЕГРАЛ теперь имеются достаточно надежные оценки спектральных параметров и внутренней светимости. Это делает данную выборку одной из лучших для исследований

популяционных свойств АЯГ в местном объеме Вселенной. В качестве возможного направления дальнейших исследований стоит в первую очередь отметить необходимость использования для аппроксимации спектральных данных более совершенных физических моделей, а именно моделей комковатого газопылевого тора, которые активно развиваются в последнее время.

Работа поддержана грантом РФФ 14-22-00271.

ПРИМЕЧАНИЕ

A1. ОЦЕНКА ЭКВИВАЛЕНТНОЙ ШИРИНЫ ЛИНИИ Fe K α В МОДЕЛИ MYTORUS

Используемая в работе модель MYTORUS состоит из трех компонент, одна из которых (MYTL) описывает спектр излучения, возникающего в результате флуоресценции железа и никеля, а также в результате рассеяния этого излучения в веществе тора. Флуоресцентные линии в модели не уширены. Таким образом, компонента MYTL описывает четыре узкие флуоресцентные эмиссионные линии (Fe K α 1, Fe K α 2 Fe K β , Ni K α) и их комптоновские плечи. Стоит отметить, что при расчете рассеяния флуоресцентного излучения в торе линии Fe K α 1(6.391 кэВ) Fe K α 2(6.404 кэВ) были объединены в одну линию на энергии 6.4008 кэВ.

Авторы модели MYTORUS указывают, что стандартный подход, используемый в пакете XSPEC для определения эквивалентной ширины спектральных компонент излучения, не подходит для этой модели. Поэтому мы использовали следующий подход для оценки эквивалентной ширины линии Fe K α и погрешности на эту величину. Предполагалось, что весь поток в линии содержится в диапазоне 6.39–6.41 кэВ (таким образом часть комптоновски рассеянных фотонов не учитывается). На основе полученных для каждого набора параметров модели (N_H , Γ и Θ) потоков компоненты MYTL была составлена таблица потоков в линии Fe K α . Поток в линии для любого заданного набора этих параметров затем оценивался путем интерполяции значений из этой таблицы. Эквивалентная ширина линии железа оценивалась как отношение потока линии, рассчитанного для параметров наилучшей аппроксимации, к плотности потока энергии остальных компонент модели на энергии 6.4 кэВ. Границы доверительного интервала этой величины оценивались по 5% и 95% квантилям распределения значений эквивалентной ширины линии, полученных описанным выше образом, из Монте-Карло выборки параметров, полученных по схеме марковской цепи.

A2. КОЛОНКИ ПОГЛОЩЕНИЯ В МОДЕЛИ MYTORUS

Модель MYTORUS является табличной: для заданных параметров (N_H^{eq} , Γ и Θ) спектр рассчитывается путем интерполяции из библиотеки спектров, полученных методом Монте-Карло. В модели предполагается, что точечный источник рентгеновского излучения окружен холодным, изотропным газовым тором с углом раскрытия 60°. Во многих случаях при аппроксимации спектров, сильно поглощенных АЯГ, моделью MYTORUS нами были получены значения угла наклона 60° < Θ < 62°. В этой области параметра Θ спектры, на основе которых производится интерполяция, рассчитаны для небольшого числа значений (60.0°, 61.1°, 62.2°, ...). Поэтому при оценке колонки поглощения N_H в торе вместо аналитического соотношения

$$N_H = N_H^{\text{eq}} \sqrt{1 - 4 \cos^2 \Theta} \quad (1)$$

мы использовали значения, получаемые при помощи линейной интерполяции по углу наклона тора:

$$N_H = N_{H1} \frac{\Theta - \Theta_1}{\Theta_2 - \Theta_1} + N_{H2} \frac{\Theta_2 - \Theta}{\Theta_2 - \Theta_1}, \quad (2)$$

где N_H — колонка поглощения, рассчитываемая для угла поглощения в интервале $\Theta_1 < \Theta < \Theta_2$, для границ которого колонки поглощения N_{H1} , N_{H2} рассчитаны по формуле (1).

В некоторых случаях при аппроксимации спектров сильно поглощенных АЯГ доверительные интервалы для экваториальной колонки поглощения в торе достигают предельного значения модели 10²⁵ см⁻². При этом оказывается, что доверительные интервалы в плоскости параметров Θ , N_H^{eq} хорошо ограничены кривыми, соответствующими постоянным значениям N_H (см. рис. 2). В этих случаях мы принимаем, что доверительный интервал колонки поглощения является интервалом минимальной ширины, границы которого ($N_H = \text{const}$, рассчитывается по формуле (2)) ограничивают соответствующий доверительный интервал в плоскости параметров Θ , N_H^{eq} .

A3. ПРОСТРАНСТВЕННО РАЗРЕШЕННЫЕ СПЕКТРЫ NuSTAR

В галактике NGC 5643, помимо активного ядра, также имеется ультраяркий рентгеновский источник (УРИ). Эти два объекта находятся на угловом расстоянии 50'' друг от друга. На оптической оси рентгеновская оптика обсерватории NuSTAR обладает следующими характеристиками: радиус области, на границе которой поток источника падает в два раза по сравнению с максимальным значением

(FWHM), составляет $18''$, размер области, содержащей половину фотонов от источника — $48''$. Таким образом, при использовании стандартных инструментов обработки обсерватории NuSTAR спектр АЯГ оказывается загрязнен излучением УРИ.

В работе Кривонос и Сазонов (2016) для извлечения спектра УРИ авторы провели анализ данных NuSTAR с использованием информации об углах прихода фотонов и функции рассеяния точечного источника (ФРТИ) обсерватории NuSTAR. Мы провели аналогичный анализ данных обсерватории NuSTAR для получения спектра NGC 5643, а именно:

1. С помощью стандартного программного обеспечения *nupipeline* были получены: список очищенных событий, изображение неба и карта экспозиции для каждого наблюдения и каждого детекторного модуля.

2. Были выбраны две круговых апертуры, центрированные на положениях АЯГ и УРИ, с радиусами значительно больше поля зрения NuSTAR.

3. Для полученных регионов с помощью программы *nuproduct* были получены спектры, матрицы перераспределения энергии (RMF) и гистограммы отклонения от оптической оси.

4. С помощью программы *numkarf* были получены эффективные площади для наблюдения (ARF). При задании параметров *numkarf* была отключена коррекция по ФРТИ и однократным рассеяниям (коррекция по *tbx*ФРТИ не требуется, так как она учтена в нашем анализе).

5. Используя гистограмму отклонений от оптической оси и форму *tbx*ФРТИ оптики NuSTAR из библиотеки калибровочных данных (*caldb*) были построены интегральные функции рассеяния *tbx*ФРТИ за наблюдение для АЯГ и УРИ.

6. После этого все очищенные события были разбиты на 15 частей на основе значений регистрируемых энергий PI. Для каждого набора событий была задана функция правдоподобия:

$$L = \sum_i K_i \ln \lambda_i - \lambda_i + \ln K_i! \quad (3)$$

$$\lambda_i = F_{\text{bkg}} \cdot e_i + F_{\text{AGN}} \cdot \text{PSF}_i^{\text{AGN}} \cdot e_i + F_{\text{X1}} \cdot \text{PSF}_i^{\text{X1}} \cdot e_i, \quad (4)$$

где K_i — число событий, попавших в элемент X_i , Y_i координатной сетки (имеющих координаты в диапазоне $X_i - 0.5$, $X_i + 0.5$, $Y_i - 0.5$, $Y_i + 0.5$), $\text{PSF}_i^{\text{AGN}}$ и PSF_i^{X1} — рассчитанные на предыдущем шаге ФРТИ для АЯГ и УРИ, e_i — карта экспозиции, полученная на шаге 1). При минимизации функции правдоподобия были получены значения

фотонных потоков фона (F_{bkg}), АЯГ (F_{AGN}) и УРИ (F_{ULX}) для каждого наблюдения и детектора, для заданного диапазона значений PI.

7. Ошибки на параметры для каждого набора данных были получены при помощи марковской цепи. Полученные значения фотонных спектров и их ошибок в выбранных каналах были записаны в *fits* файлы PHA.

8. Матрицы перераспределения энергий, полученные на шаге 3), были просуммированы внутри заданных интервалов значений PI (таким образом размерность матрицы стала равна 4096×15).

Полученные на шаге 4) эффективные площади (ARF) на шаге 7) фотонные потоки PHA и на шаге 8) матрицы перераспределения энергии RMF использовались в программе *XSPEC* для стандартного спектрального анализа.

Описанный метод позволяет в ~ 2.5 раза увеличить статистику фотонов по сравнению со спектрами, извлеченными в $30''$ круговой апертуре. Параметры спектральных моделей и оцениваемые потоки для АЯГ, получаемые при аппроксимации спектров, полученных таким образом и извлеченных внутри $30''$ круговой апертуры с помощью стандартных инструментов NUSTARDAS, хорошо согласуются между собой.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Аирд и др. (J. Aird, A.L. Coil, A. Georgakakis, K. Nandra, G. Barro, and P.G. Pérez-González), *MNRAS* **451**, 1892 (2015).
2. Анджело и др. (M. Ajello, A. Rau, J. Greiner, G. Kanbach, M. Salvato, A.W. Strong, S.D. Barthelmy, N. Gehrels, et al.), *Astrophys. J.* **673**, 96 (2008).
3. Анджело и др. (M. Ajello, D.M. Alexander, J. Greiner, G.M. Madejski, N. Gehrels, and D. Burlon), *Astrophys. J.* **749**, 21 (2012).
4. Андрес, Гривз (E. Anders and N. Grevesse), *Geochimica Cosmochimica Acta* **53**, 197 (1989).
5. Аннуар и др. (A. Annuar, P. Gandhi, D.M. Alexander, G.B. Lansbury, P. Arevalo, D.R. Ballantyne, M. Balokovic, F.E. Bauer, et al.), *Astrophys. J.*, **815**, 36 (2015).
6. Антонучи (R. Antonucci), *Ann. Rev. of Astron. and Astrophys.* **31**, 473 (1993).
7. Арно и др. (K.A. Arnaud, G.H. Jacoby, and J. Barnes), eds, *Astronomical Society of the Pacific Conference Series, Astronomical Data Analysis Software and Systems* **101**, 17 (1996).
8. Балучинска-Чёрч, Маккаммон (M. Balucinska-Church and D. McCammon), *Astrophys. J.* **400**, 699 (1992).
9. Бауэр и др. (F.E. Bauer, P. Arevalo, D.J. Walton, M.J. Koss, S. Puccetti, P. Gandhi, D. Stern, D.M. Alexander, et al.), *Astrophys. J.* **812**, 116 (2015).

10. Баумгартнер и др. (W.H. Baumgartner, J. Tueller, C.B. Markwardt, G.K. Skinner, S. Barthelmy, R.F. Mushotzky, P.A. Evans, and N. Gehrels), *Astrophys. J. Suppl. Ser.* **207**, 19 (2013).
11. Бэкман и др. (V. Beckmann, S. Soldi, C. Ricci, J. Alfonso-Garzon, T.J.-L. Courvoisier, A. Domingo, N. Gehrels, P. Lubinski, et al.), *Astron. Astrophys.* **505**, 417 (2009).
12. Бъянчи и др. (S. Bianchi, M. Guainazzi, and M. Chiaberge), *Astron. Astrophys.* **448**, 499 (2006).
13. Бучнер и др. (J. Buchner, A. Georgakakis, K. Nandra, M. Brightman, M. Menzel, Z. Liu, L. Hsu, M. Salvato, et al.), *Astrophys. J.* **802**, 89 (2015).
14. Бурлон и др. (D. Burlon, M. Ajello, J. Greiner, A. Comastri, A. Merloni, and N. Gehrels), *Astrophys. J.* **728**, 58 (2011).
15. Верон-Цетти, Верон (M.-P. Véron-Cetty and P. Véron), *Astron. Astrophys.* **455**, 773 (2006).
16. Вингъяли, Комастри (C. Vignali and A. Comastri), *Astron. Astrophys.* **381**, 834 (2002).
17. Вилмс и др. (J. Wilms, A. Allen, and R. McCray), *Astrophys. J.* **542**, 914 (2000).
18. Винклер и др. (C. Winkler, T.J.-L. Courvoisier, G. Di Cocco, N. Gehrels, A. Gimenez, S. Grebenev, W. Hermsen, J.M. Mas-Hesse, et al.), *Astron. Astrophys.* **411**, L1 (2003).
19. Винтър и др. (L.M. Winter, R.F. Mushotzky, C.S. Reynolds, and J. Tueller), *Astrophys. J.* **690**, 1322 (2009).
20. Джерельс и др. (N. Gehrels, G. Chincarini, P. Giommi, K.O. Mason, J.A. Nousek, A.A. Wells, N.E. White, S.D. Barthelmy, et al.), *Astrophys. J.* **611**, 1005 (2004).
21. Джиселлини и др. (G. Ghisellini, F. Haardt, and G. Matt), *MNRAS* **267**, 743 (1994).
22. Джилли и др. (R. Gilli, A. Comastri, and G. Hasinger), *Astron. Astrophys.* **463**, 79 (2007).
23. Гринхилл и др. (L.J. Greenhill, A. Tilak, and G. Madejski), *Astrophys. J. (Letters)* **686**, L13 (2008).
24. Гуанаци, Бъянчи (M. Guainazzi and S. Bianchi), *MNRAS* **374**, 1290 (2007).
25. Гуанаци и др. (M. Guainazzi, P. Rodriguez-Pascual, A.C. Fabian, K. Iwasawa, and G. Matt), *MNRAS* **355**, 297 (2004).
26. Гуанаци и др. (M. Guainazzi, A.C. Fabian, K. Iwasawa, G. Matt, and F. Fiore), *MNRAS* **356**, 295 (2005a).
27. Гуанаци и др. (M. Guainazzi, G. Matt, and G.C. Perola), *Astron. Astrophys.* **444**, 119 (2005b).
28. Гуанаци и др. (M. Guainazzi, G. Risaliti, H. Awaki, P. Arevalo, F.E. Bauer, S. Bianchi, S.E. Boggs, W.N. Brandt, et al.), *MNRAS* **460**, 1954 (2016).
29. дэ Ягер и др. (T. de Jaeger, S. Gonzalez-Gaitan, M. Hamuy, L. Galbany, J.P. Anderson, M.M. Phillips, M.D. Stritzinger, R.G. Carlberg, et al.), *Astrophys. J.* **835**, 166 (2017).
30. дэ Роса и др. (A. de Rosa, F. Panessa, L. Bassani, A. Bazzano, A. Bird, R. Landi, A. Malizia, M. Molina, P. Ubertini, et al.), *MNRAS* **420**, 2087 (2012).
31. Дикки, Локман (J.M. Dickey and F.J. Lockman), *Ann. Rev. of Astron. and Astrophys.* **28**, 215 (1990).
32. Джонс и др. (D.H. Jones, M.A. Read, W. Saunders, M. Colless, T. Jarrett, Q.A. Parker, A.P. Fairall, T. Mauch, et al.), *VizieR Online Data Catalog* 7259 (2010).
33. Жанг и др. (J.S. Zhang, C. Henkel, Q. Guo, H.G. Wang, and J.H. Fan), *Astrophys. J.* **708**, 1528 (2010).
34. Калистро Ривьера и др. (G. Calistro Rivera, E. Lusso, J.F. Hennawi, and D.W. Hogg), *Astrophys. J.* **833**, 98 (2016).
35. Катинелла и др. (B. Catinella, M.P. Haynes, and R. Giovanelli), *Astron. J.* **130**, 1037 (2005).
36. Кальбера и др. (P.M. Kalberla W., W.B. Burton, D. Hartmann, E.M. Arnal, E. Bajaja, R. Morras, and W.G.L. Pöppel), *Astron. Astrophys.* **440**, 775 (2005).
37. Комастри и др. (A. Comastri, K. Iwasawa, R. Gilli, C. Vignali, P. Ranalli, G. Matt, and F. Fiore), *Astrophys. J.* **717**, 787 (2010).
38. Корибальски и др. (B.S. Koribalski, L. Staveley-Smith, V.A. Kilborn, S.D. Ryder, R.C. Kraan-Korteweg, E.V. Ryan-Weber, R.D. Ekers, H. Jerjen, et al.), *Astron. J.* **128**, 16 (2004).
39. Кривонос и Сазонов (R. Krivonos and S. Sazonov), *MNRAS* **463**, 756 (2016).
40. Кривонос и др. (R. Krivonos, S. Tsygankov, M. Revnivtsev, S. Grebenev, E. Churazov, and R. Sunyaev), *Astron. Astrophys.* **523**, A61 (2010).
41. Кролик и др. (J.H. Krolik, P. Madau, and P.T. Zycki), *Astrophys. J. (Letters)* **420**, L57 (1994).
42. Койпер и др. (L. Kuiper, P.R. den Hartog, and W. Hermsen), *The Astronomer's Telegram*, 939 (2006).
43. Ля Франка и др. (F. La Franca, F. Fiore, A. Comastri, G.C. Perola, N. Sacchi, M. Brusa, F. Cocchia, C. Feruglio, et al.), *Astrophys. J.* **635**, 864 (2005).
44. Лью (J. Liu), *MNRAS* **463**, L108 (2016).
45. Лью и др. (Z. Liu, A. Merloni, A. Georgakakis, M. Menzel, J. Buchner, K. Nandra, M. Salvato, Y. Shen, et al.), *MNRAS* **459**, 1602 (2016).
46. Магдзярз, Дзярский (P. Magdziarz and A.A. Zdziarski), *MNRAS* **273**, 837 (1995).
47. Майолино и др. (R. Maiolino, M. Salvati, L. Bassani, M. Dadina, R. della Ceca, G. Matt, G. Risaliti, and G. Zamorani), *Astron. Astrophys.* **338**, 781 (1998).
48. Малиция и др. (A. Malizia, L. Bassani, F. Panessa, A. de Rosa, and A.J. Bird), *MNRAS* **394**, L121 (2009a).
49. Малиция и др. (A. Malizia, J.B. Stephen, L. Bassani, A.J. Bird, F. Panessa, and P. Ubertini), *MNRAS* **399**, 944 (2009b).
50. Малиция и др. (A. Malizia, L. Bassani, A. Bazzano, A.J. Bird, N. Masetti, F. Panessa, J.B. Stephen, and P. Ubertini), *MNRAS* **426**, 1750 (2012).
51. Марчези и др. (S. Marchesi, M. Ajello, L. Marcotulli, A. Comastri, G. Lanzuisi, and C. Vignali), *Astrophys. J.* **854**, 49 (2018).
52. Мазетти (N. Masetti, L. Morelli, E. Palazzi, G. Galaz, L. Bassani, A. Bazzano, A.J. Bird, A.J. Dean, et al.), *Astron. Astrophys.* **459**, 21 (2006).

53. Мазетти и др. (N. Masetti, E. Mason, L. Morelli, S.A. Cellone, V.A. McBride, E. Palazzi, L. Bassani, A. Bazzano, A.J. Bird, et al.), *Astron. Astrophys.* **482**, 113 (2008).
54. Мазетти и др. (N. Masetti, P. Parisi, E. Palazzi, E. Jimenez-Bailon, L. Morelli, V. Chavushyan, E. Mason, V.A. McBride, et al.), *Astron. Astrophys.* **495**, 121 (2009).
55. Масини и др. (A. Masini, A. Comastri, M. Balokovic, I. Zaw, S. Puccetti, D.R. Ballantyne, F.E. Bauer, S.E. Boggs, et al.), *Astron. Astrophys.* **589**, A59 (2016).
56. Матт и др. (G. Matt, A.C. Fabian, M. Guainazzi, K. Iwasawa, L. Bassani, and G. Malaguti), *MNRAS* **318**, 173 (2000).
57. Матт и др. (G. Matt, S. Bianchi, A. Marinucci, M. Guainazzi, K. Iwasawa, and E. Jimenez Bailon), *Astron. Astrophys.* **556**, A91 (2013).
58. Мёрфи, Якуб (K.D. Murphy and T. Yaqoob), *MNRAS* **397**, 1549 (2009).
59. Ногучи и др. (K. Noguchi, Y. Terashima, and H. Awaki), *Astrophys. J.* **705**, 454 (2009).
60. Пальмэри и др. (P. Palmeri, C. Mendoza, T.R. Kallman, M.A. Bautista, and M. Meléndez), *Astron. Astrophys.* **410**, 359 (2003).
61. Палтани и др. (S. Paltani, R. Walter, I.M. McHardy, T. Dwelly, C. Steiner, and T.J. Courvoisier-L.), *Astron. Astrophys.* **485**, 707 (2008).
62. Пеконтал и др. (E. Pecontal, G. Adam, R. Bacon, G. Courtes, Y. Georgelin, and G. Monnet), *Astron. Astrophys.* **232**, 331 (1990).
63. Пучетти и др. (S. Puccetti, A. Comastri, F. Fiore, P. Arevalo, G. Risaliti, F.E. Bauer, W.N. Brandt, D. Stern, et al.), *Astrophys. J.* **793**, 26 (2014).
64. Пучетти и др. (S. Puccetti, A. Comastri, F.E. Bauer, W.N. Brandt, F. Fiore, F.A. Harrison, B. Luo, D. Stern, et al.), *Astron. Astrophys.* **585**, A157 (2016).
65. Риис (M.J. Rees), *Ann. Rev. of Astron. and Astrophys.* **22**, 471 (1984).
66. Ривз, Тёрнер (J.N. Reeves and M.J.L. Turner), *MNRAS* **316**, 234 (2000).
67. Рест и др. (A. Rest, D. Scolnic, R.J. Foley, M.E. Huber, R. Chornock, G. Narayan, J.L. Tonry, E. Berger, et al.), *Astrophys. J.* **795**, 44 (2014).
68. Ричи и др. (C. Ricci, Y. Ueda, M.J. Koss, B. Trakhtenbrot, F.E. Bauer, and P. Gandhi), *Astrophys. J. (Letters)* **815**, L13 (2015).
69. Ризалитти и др. (G. Risaliti, R. Maiolino, and M. Salvati), *Astrophys. J.* **522**, 157 (1999).
70. Сазонов, Ревнивцев (S.Y. Sazonov and M.G. Revnivtsev), *Astron. Astrophys.* **423**, 469 (2004).
71. Сазонов и др. (S. Sazonov, M. Revnivtsev, R. Krivonos, E. Churazov, and R. Sunyaev), *Astron. Astrophys.* **462**, 57 (2007).
72. Сазонов и др. (S. Sazonov, R. Krivonos, M. Revnivtsev, E. Churazov, and R. Sunyaev), *Astron. Astrophys.* **482**, 517 (2008).
73. Сазонов и др. (S. Sazonov, E. Churazov, and R. Krivonos), *MNRAS* **454**, 1202 (2015).
74. Северджини и др. (P. Severgnini, A. Caccianiga, R. Della Ceca, V. Braito, C. Vignali, V. La Parola, and A. Moretti), *Astron. Astrophys.* **525**, A38 (2011).
75. Соболевска, Пападакис (M.A. Sobolewska and I.E. Papadakis), *MNRAS* **399**, 1597 (2009).
76. Сон и др. (D. Son-H., S. Hyung, S. Lee-J., and P. Ferruit), *Journal of Korean Astronomical Society* **42**, 125 (2009).
77. Стефен и др. (A.T. Steffen, A.J. Barger, L.L. Cowie, R.F. Mushotzky, and Y. Yang), *Astrophys. J. (Letters)* **596**, L23 (2003).
78. Трейзер и Юри (E. Treister and C.M. Urry), *Astrophys. J.* **630**, 115 (2005).
79. Трейзер и др. (E. Treister, J.H. Krolik, and C. Dullemond), *Astrophys. J.* **679**, 140 (2008).
80. Тёрнер и др. (T. J. Turner, C.M. Urry, and R.F. Mushotzky), *Astrophys. J.* **418**, 653 (1993).
81. Уеда и др. (Y. Ueda, M. Akiyama, K. Ohta, and T. Miyaji), *Astrophys. J.* **598**, 886 (2003).
82. Уеда и др. (Y. Ueda, M. Akiyama, G. Hasinger, T. Miyaji, and M.G. Watson), *Astrophys. J.* **786**, 104 (2014).
83. Филлипс и др. (M.M. Phillips, P.A. Charles, and J.A. Baldwin), *Astrophys. J.* **266**, 485 (1983).
84. Харрисон и др. (F.A. Harrison, W.W. Craig, F.E. Christensen, C.J. Hailey, W.W. Zhang, S.E. Boggs, D. Stern, et al.), *Astrophys. J.* **770**, 103 (2013).
85. Хазингер (G. Hasinger), *Astron. Astrophys.* **490**, 905 (2008).
86. Штраус и др. (M.A. Strauss, J.P. Huchra, M. Davis, A. Yahil, K.B. Fisher, and J. Tonry), *Astrophys. J. Suppl. Ser.* **83**, 29 (1992).
87. Шу и др. (X. W. Shu, J.X. Wang, P. Jiang, L.L. Fan, and T.G. Wang), *Astrophys. J.* **657**, 167 (2007).
88. Якуб, Мёрфи (T. Yaqoob and K.D. Murphy), *MNRAS* **412**, 1765 (2011).