

УДК 524.7—82—355

ГАЗ В ЯДРЕ СЕЙФЕРТОВСКОЙ ГАЛАКТИКИ NGC 4151

В. И. ПРОНИК, И. С. БАЛИНСКАЯ

Поступила 2 июля 1982

Принята к печати 6 ноября 1982

Нерасширенный спектр ядра NGC 4151, полученный нами на 6-метровом телескопе САО АН СССР, а также аналогичные наблюдения, выполненные ранее Ульрих и совсем недавно Пела и Аллонн, позволяют сделать вывод о том, что в ядре NGC 4151 имеется вращающийся газовый диск, плотность которого увеличивается к центру галактики. Размер диска $\approx 3''$. Линейная скорость вращения мало меняется с радиусом и составляет около 300 км/с. В центре диска имеется яркое газовое образование, размером меньше углового разрешения ($< 1''$), ответственное за излучение основного центрального максимума запрещенных линий ($\Delta\lambda = 4 \text{ \AA}$). Скорость газа в нем (по всей вероятности, также круговая) не превышает 100—150 км/с. Линия 3869 [Ne III] указывает на наличие вокруг ядра слабой газовой короны.

1. *Введение.* Структура и характер движения газа, находящегося вдали (более 500 пс) от ядер сейфертовских галактик, практически ничем не отличается от газа, наблюдаемого в обычных спиральных галактиках. Это — типичные диффузные туманности или обширные H II-зоны, по которым прослеживается спиральный узор, вращающийся со скоростью 100—150 км/с. По мере приближения к ядру, согласно представлениям многих авторов, должно появиться различие между газом, наблюдаемым в сейфертовских и в обычных галактиках; в частности, в окрестности сейфертовских ядер помимо вращения может иметь место радиальное движение газа (от ядра). Так, по данным Вокера [1] в NGC 1068, на расстоянии 300—500 пс от центра галактики, радиальная скорость расширения спиральной структуры сравнима со скоростью вращения. Это обстоятельство весьма существенно для понимания природы как самого ядра, так и газа, окружающего ядро. В частности, важно знать, является ли этот газ результатом эволюции звезд диска или же он выброшен из ядра, размеры которого $\ll 1 \text{ пс}$.

Совершенно очевидно, что при наличии вращения всякое радиальное перемещение газа, в силу закона сохранения вращательного момента, должно сопровождаться изменением тангенциальной скорости. В связи с этим представляет интерес любая информация, касающаяся характера и ско-

рости движения газа в непосредственной близости от ядра, на расстояниях 10—100 пс от центра галактики. Если учесть, что для ближайших сейфертовских галактик (NGC 4151, NGC 1068) одна угловая секунда соответствует линейным размерам 50—75 пс, то становится ясным, что при наземных наблюдениях такая информация может быть получена только из анализа суммарного контура линии, относящегося одновременно к ядру и окооядерной области ($r \sim 100$ пс). Для этой цели выгодно использовать не широкие водородные, а узкие запрещенные линии, из-за малого вклада в них излучения плотного центрального образования.

Окончательный вывод о том, что представляет собой газ в ядрах сейфертовских галактик и каков характер наблюдаемых скоростей, вероятно будет сделан после того, как будут получены внеатмосферные спектры ядер с угловым разрешением $\ll 1''$. Тем не менее, некоторая информация, касающаяся структуры газа на расстояниях $50 \div 100$ пс от центра ядра, может быть получена и сейчас на базе наземных спектрограмм с высоким спектральным ($\sim 0.2 \text{ \AA}$) и угловым ($\lesssim 1''$) разрешениями.

Ниже приводится описание контура линии [O III] и других запрещенных линий в спектре ядра NGC 4151, полученном на 6-метровом телескопе Специальной астрофизической обсерватории АН СССР. На основании этого материала, а также результатов наблюдений NGC 4151, опубликованных другими авторами, делается заключение о характере движения газа, форме газового образования и плотности газа в ядре этой галактики.

2. Наблюдения. Нерасширенный спектр ядра NGC 4151 получен в фокусе Невсмита 6-метрового телескопа с вшельным спектрографом. Дисперсия составляла от 27 до 38 $\text{\AA}/\text{мм}$ в области 3600—5000 $\text{\AA}$. Время экспозиции 1 час на эмульсии 103-aD. Спектральное разрешение составляло примерно 1 $\text{\AA}$ или 60 км/с.

Щель спектрографа вырезала на небе площадку размером $0.4 \times 4''$ (рис. 1), что соответствует $0.02 \times 0.2 \text{ мм}^2$ на негативе. Видимый на щели спектрографа диск звезды 13^m во время наблюдений составлял $1''$ или меньше. Положение ядра галактики удерживалось на центре щели с точностью $0.25''$, поэтому реальное угловое разрешение на спектре не хуже $1.5''$. Наблюдения велись без компенсатора вращения поля, поэтому позиционный угол щели на небе во время экспозиции менялся от 110° до 130° , что в среднем близко к позиционному углу малой оси галактики.

Полученный спектр состоит из слабых полосок континуума с эмиссионными линиями в виде точек разного диаметра. Непрерывный спектр виден только в области более коротковолновой, чем 4800 $\text{\AA}$. Его ширина, как следовало ожидать, составляет около $1.5''$ (размер изображения плюс точность гидировки). В спектре присутствуют эмиссионные линии $\lambda 5007$

4959 [O III], 4363 [O III], H_γ, 3869 [Ne III] и 3727 [O II]. Линия H_β приходится на конец одной из полосок и из-за виньетирования света на краю поля камеры практически не видна.

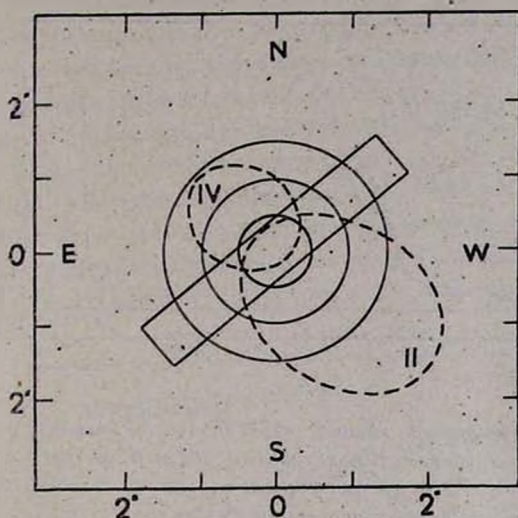


Рис. 1. Положение щели спектрографа и газовых облаков относительно центра галактики NGC 4151 на картинной плоскости неба. Границы облаков (пунктир) и их нумерация (II и IV) заимствованы из работы [3]. Концентрическими кругами диаметром 2" и 3" показано положение центрального источника и протяженной короны. Непрерывный спектр и эмиссия в линиях, которые видны на нашей спектрограмме, относятся к центральной области диаметром 1" ÷ 1"5.

В спектре наиболее отчетливо видна структура эмиссионных линий H_β и N₂. Линия N₁ сильно передержана. На рис. 2 приведен контур линии 4959 [O III], полученный при фотометрировании вдоль дисперсии с вырезом из щели, равной ширине полоски непрерывного спектра в синей области. На рис. 3 схематически показаны изофоты линии N₂, дающие представление о структуре линий, видимой на спектрограмме.

Изображение линии [O III] состоит из трех наиболее выразительных деталей: самая яркая центральная и две более слабые детали, расположенные симметрично с красной и синей сторон от центральной. Даже на линии λ 4959 Å центральная деталь передержана в центре. Она имеет совершенно правильную круглую форму, напоминающую изображение звезды на прямой фотографии. Ее диаметр примерно в два раза больше, чем ширина полоски непрерывного спектра. При этом граница ее выглядит более диффузной, чем граница передержанных линий в спектре сравнения. Совершенно правильная круглая форма центрального ядра линии на спектрограмме дает основание предполагать, что это ядро излучается точечным

источником, угловые размеры которого меньше $1''$ (< 50 пс), а внутренние скорости в нем сравнимы со спектральным разрешением (~ 60 км/с). С другой стороны, диффузные края центральной детали в направлении, пер-

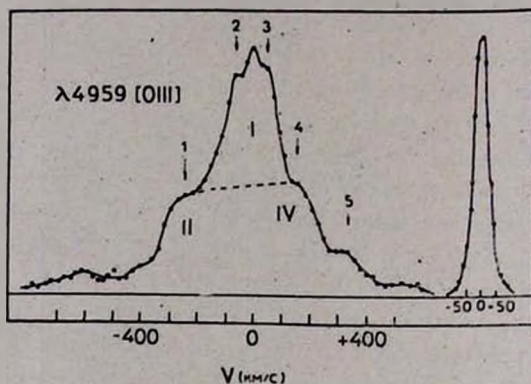


Рис. 2. Контур эмиссионной линии λ 4959 [O III]. Римскими цифрами отмечены детали контура, которые соответствуют газовым облакам на рис. 1. Справа показан инструментальный контур. При фотометрировании спектра ядра высота щели микрофотометра равнялась высоте полосы непрерывного спектра.

пендикулярном дисперсии, не могут быть обусловлены только ошибками гидирования и атмосферным дрожанием. Они, вероятно, отражают истинное падение плотности газа в диске вдоль малой оси. Отсутствие непрерывного спектра вблизи линий [O III] не позволяет судить о пространствен-

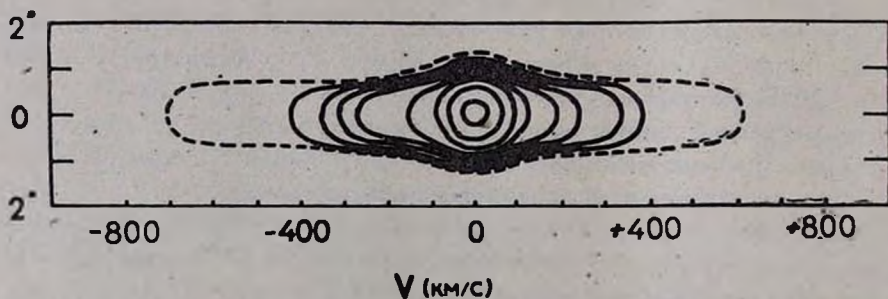


Рис. 3. Изофоты изображения линии λ 4959 [O III] на нерасширенной спектрограмме.

ном (поперек дисперсии) совмещении источников, ответственных за излучение континуума и ядра эмиссионной линии N_2 , однако, судя по линиям, наблюдаемым в синей области спектра, где виден континуум, эти источники совпадают. Линия 3869 [Ne III] позволяет также сделать вывод о точ-

ном наложении на непрерывный спектр двух других, более слабых деталей — красной и голубой. Помимо этих двух деталей, на спектрограмме хорошо видны усы-крылья линий; для $\lambda 5007$ [O III] они тянутся вплоть до $v \approx 1000$ км/с по обе стороны от центра линии. Таким образом, вся эмиссия, видимая на спектрограмме в линиях [O III], исходит из точечного источника пренебрежимо малых угловых размеров ($\leq 1''$). Этот факт в дальнейшем будет иметь немаловажное значение при обсуждении формы газового образования в центре галактики NGC 4151.

Из других запрещенных линий обращает на себя внимание форма линии 3869 [Ne III] (рис. 4). В отличие от N_1 и N_2 [O III] в линии 3869 [Ne III] заметно усилены далекие крылья, совпадающие с полоской непрерывного спектра, а слабый узкий центральный максимум прослеживается по всей высоте щели, занимающей на небе $4''$. Интерпретация этого очевидна: линия [Ne III] менее «запрещенная», чем линии N_1 и N_2 [O III],

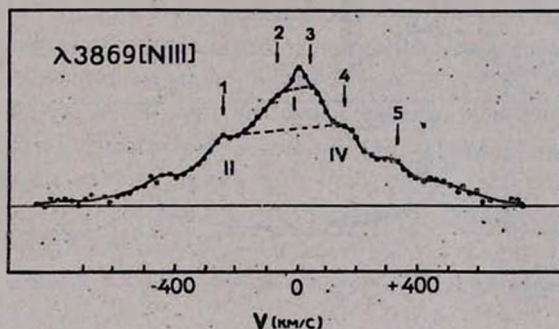


Рис. 4. Контур линии $\lambda 3869$ [Ne III]. Обозначения те же, что и на рис. 2.

потому она достаточно хорошо может светиться в плотных внутренних областях газовой оболочки (или диска), где скорости больше. Слабая и узкая центральная эмиссия вероятно принадлежит внешней разреженной газовой короне, имеющейся вокруг ядра. Усиление линии [Ne III] в короне можно объяснить повышенной ионизацией и высокой электронной температурой.

Заслуживает также внимания присутствие в спектре линии 3727 [O II]. Излучение этой линии наблюдается только на полоске непрерывного спектра, что свидетельствует о принадлежности эмиссии $\lambda 3727$ центральному газовому образованию малых размеров. Однако не исключено также, что здесь «сработал» эффект очувствления эмульсии подсветкой континуума. Несмотря на то, что узкая центральная эмиссия в линии $\lambda 3727$ выражена слабо, структура контура показывает разрешение дублета 3726, 3729 Å (рис. 5).

3. *Характер движения газа вблизи ядра.* Наблюдательные свидетельства существования отдельных газовых облаков вблизи ядра NGC 4151 впервые были получены Уокером [1]. Позже Ульрих [3] выделила четыре детали в линиях [O III], соответствующие четырем облакам, имеющим разные размеры, положение и скорости по отношению к центру галактики (см. рис. 1). В проекции на небо все облака располагаются на прямой, позиционный угол которой равен примерно 30° — 35° . Именно для этого позиционного угла наблюдается максимальный наклон линий в спектре [3]. Ульрих исходила из того, что позиционный угол 35° соответствует малой оси галактики, а так как в этом сечении наблюдаются максимальные скорости, то, вполне естественно, она сделала вывод о чисто радиальном движении газа.

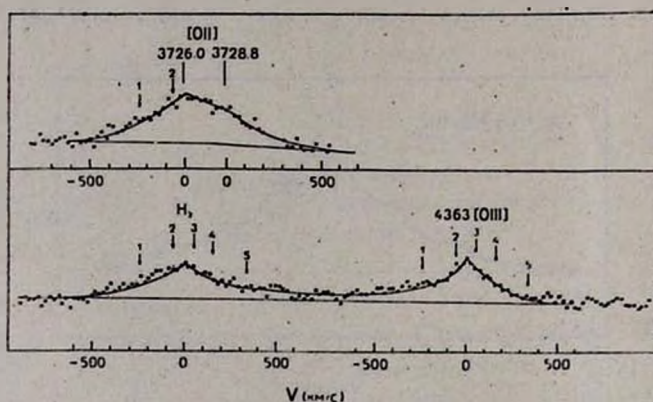


Рис. 5. Контур дублета кислорода $\lambda\lambda$ 3726—3729 [O II], H_γ и 4363 [O III].

Однако вскоре Андерсон [4] показал, что угол 35° совпадает с большой осью галактики, поэтому наблюдения Ульрих свидетельствуют о существовании вблизи ядра NGC 4151 вращающегося газового образования.

Заметим, что общая протяженность облаков вдоль большой оси согласно Ульрих составляет $6''$. Положительные скорости газа до $+300$ км/с (после вычета лучевой скорости центра галактики) наблюдаются только в северо-восточном секторе, а примерно такой же величины отрицательные скорости—в юго-западном. Как свидетельствует наша спектрограмма, в самом ядре размером $1''$ наблюдаются и те, и другие скорости, причем отношение интенсивностей этих крыльев к центральному «неподвижному» компоненту практически такое же, как и на спектрограммах, полученных с ориентацией щели вдоль большой оси. Однако из-за атмосферного дрожания, которое ставит предел в угловом разрешении, нельзя сказать, что мы имеем в центре галактики: касание двух облаков (IV и II) с разной лучевой скоростью (что фактически еще может означать су-

ществование границы смены знака скорости в диске) или переналожение их. Можно только утверждать, исходя из наблюдений Ульрих, что, если в направлении на ядро облака проектируются друг на друга, то ширина области переналожения их вдоль большой оси $\lesssim 1''$. То же самое можно сказать о центрировке облаков II и IV относительно ядра вдоль сечения малой оси.

Таким образом, мы имеем следующую картину в проекции на небо: два облака со скоростями, примерно одинаковыми по величине, но разными по знаку, смещены в разные стороны от ядра вдоль большой оси так, что в проекции на ядро они либо касаются друг друга, либо слегка перекладываются. Нас интересует следующий вопрос: как движутся эти облака относительно ядра — по радиусу (удаляются от ядра) или по кругу (вращаются вокруг него)?

Предположим, что газ в облаках движется радиально от ядра и рассмотрим два случая:

- а) расстояние от проектирующихся друг на друга границ облаков до ядра мало по сравнению с размерами облаков (облака касаются ядра),
- б) то же расстояние велико: облака сильно удалены от ядра по лучу зрения. Легко видеть, что в первом случае максимальная лучевая скорость газа должна наблюдаться в той части облака, которая проектируется на ядро. Наблюдаемый наклон линий для Р. А. 35° [3, 5] свидетельствует о противоположном. Второй случай маловероятен по другой причине: вероятность того, что проектирующиеся друг на друга внутренние границы двух сильно удаленных от ядра облаков к тому же еще и проектируются на ядро, пренебрежимо мала.

Сейчас можно только предполагать, что в действительности мы имеем дело не с переналожением двух облаков, а с вращающимся газовым диском и границей смены знака скорости, которая проходит по малой оси. Это предположение можно будет считать доказанным только в том случае, если выяснится, что по мере улучшения углового разрешения область «переналожения двух облаков» (II и IV) будет уменьшаться.

4. *Структура газового образования.* Как уже говорилось в предыдущем разделе, среди газовых облаков, выделенных Ульрих в ядре галактики NGC 4151, наиболее ярким является центральное образование, окруженное сферической короной диаметром более $3''$. По всей вероятности, его центральная часть представляет собой плотную внутреннюю газовую корону вокруг ядра. Остальные три облака имеют разные размеры от $1''$ до $4''$ и смещены в разные стороны от ядра вдоль большой оси (северо-восток, юго-запад). Ульрих обозначила их римскими цифрами II, III, IV. Облако III наиболее протяженное и слабое (на наших спектрограммах оно не видно).

В нашем случае щель спектрографа была ориентирована вдоль малой оси, т. е. проходила вдоль границы касания облаков. Учитывая это, а также то, что ширина щели спектрографа составляла $0.''4$ при изображении $1''$, можно было надеяться, что вклад излучения облаков II и IV в общий контур линий на нашей спектрограмме сильно уменьшится по сравнению с контуром, полученным при ориентации щели вдоль большой оси. Для сравнения на рис. 6 приведен контур линии [O III], опубликованный недавно авторами Пела и Аллоин [2]. Заметим, что последний получен со входной щелью спектрографа шириной $2.''8$. Как видно из сравнения рис. 2 и 6 вклад облаков II и IV в общий контур несколько не уменьшил-

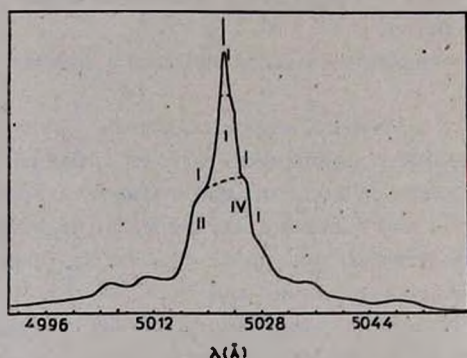


Рис. 6. Репродукция контура линии $\lambda 4959$ [O III], полученного Пела и Аллоин [2] с помощью электронно-графической камеры в фокусе куда 1.52 -м телескопа обсерватории Верхний Прованс. Входная щель спектрографа составляла $2.''8$. Вертикальными рисками отмечены детали, выделенные авторами [2] и совпадающие с нашими.

ся. Отсюда мы делаем вывод, что поверхностная яркость облаков сильно растет к центру галактики. В случае вращающегося газового диска этот феномен является вполне естественным. При радиальном движении газа такая картина может быть только в том случае, если газовые облака представляют собой две конусообразные струи, направленные в разные стороны от ядра и уплотняющиеся к центру галактики. Следует, однако, иметь в виду, что струи имеют самую обычную газовую природу (тепловое излучение), к тому же лежат в плоскости галактики, т. е. ничем не отличаются от внутренних спиралей. Другими словами, облака II и IV не являются дискретными, удаляющимися друг от друга и от ядра облаками в прямом смысле этого слова, а представляют собой либо внутренние спирали, либо половинки наклонного газового диска, поверхностная яркость которого растет по направлению к центру галактики.

При такой интерпретации наблюдаемый контур линии уже нельзя представлять суммой гауссиан. Вращение газового кольца (тора) вокруг

оси дает П-образный контур. Если плотность газа в диске меняется с радиусом скачками, то мы получим простое наложение П-контуров разной ширины, из-за чего на результирующем контуре появляются ступеньки. Асимметрия ступенек относительно центра линии свидетельствует о неоднородности диска и по азимуту.

Чтобы получить сведения, касающиеся степени ионизации газа в разных подсистемах, мы попытались разделить контур линии $[O III]$ и $H\beta$ на отдельные составляющие. Для этого мы воспользовались контуром линии $[O III]$, приведенным в [2] (он получен с лучшим спектральным разрешением, чем наш контур и относится к большему объему околоядерной области), и контуром линии $H\beta$, полученным Оуком и Сарджентом [6]. Интегральные значения потоков или светимости в линиях взяты из работы Андерсена [7] (см. также Адамс и Видман [8]).

В контуре $[O III]$ мы различаем три основных компонента, принадлежащих трем образованиям:

1. Газовый диск или спирали — средняя часть контура, имеющая полуширину 10 А, что соответствует скорости вращения диска 300 км/с.

2. Центральная часть диска или внутренняя корона, излучающая в контуре $[O III]$ основной максимум с полушириной 4 А, что соответствует скоростям ± 100 км/с.

3. Широкое основание линии с полушириной около 30 А (скорости ± 1000 км/с), принадлежащей плотным элементам газа в ядре.

Наконец, линии $[O III]$ и $[Ne III]$, как и, вероятно, все остальные запрещенные линии, в самом максимуме контура показывают слабый чрезвычайно узкий компонент шириной ~ 1 А, принадлежащий протяженной газовой короне ядра. Наблюдаемое значение длины волны этого компонента $\lambda 5022.5$ [2] должно соответствовать лучевой скорости динамического центра галактики NGC 4151.

В контуре $H\beta$ имеется еще один компонент, которого либо нет в линии $[O III]$, либо он чрезвычайно слаб, это — очень широкое основание линии ($\Delta\lambda \sim 120$ А). Между ним и основанием линии $[O III]$ нет качественного различия, разница только в большей плотности и скорости газа, излучающего в крыльях $H\beta$.

Примерное распределение потоков в линиях $[O III]$ и $H\beta$ между отдельными газовыми образованиями приведено в табл. 1.

Степень ионизации газа (отношение $[O III]/H\beta$), по всей вероятности, определяется главным образом плотностью газа: ионизация максимальна там, где плотность минимальна и наоборот.

Контур дублета кислорода $\lambda\lambda 3726-28.8$ $[O II]$ позволяет оценить отношение интенсивностей этих компонентов. После разделения контура:

$\lambda 3727$ на две составляющие получим (отношение максимумов в центре каждого компонента)

$$\frac{I_{3728.8}}{I_{3726}} = 0.4 + 0.3.$$

При температуре $T_e = (10 \div 15) \cdot 10^3$ К такое отношение соответствует электронной плотности газа

$$n_e = (2 \div 8) \cdot 10^4 \text{ см}^{-3}.$$

Нужно иметь в виду, что дублет [O II], как правило, дает заниженное значение плотности, поскольку флуктуации газа с плотностями, сильно превышающими 10^4 , слабо светятся в линиях [O II], тем не менее полученное значение n_e превышает критическую плотность для [O II].

Таблица 1

Составляющая газового обра- зования ядра	Соответствующая деталь в контуре линии [O III] или H γ	Светимость в λ 5007 [O III] эрг/с	Светимость в H γ эрг/с	λ 5007 [O III]
				H γ
Корона внешняя	Слабый узкий централь- ный максимум ($\Delta\lambda \approx 1\text{A}$)	—	—	—
Диск или спирали	Средняя часть контура ($\Delta\lambda \approx 10\text{A}$)	$1.2 \cdot 10^{41}$	$0.1 \cdot 10^{41}$	12
Центральная линза в диске или внутренняя корона	Основной центральный максимум ($\Delta\lambda \approx 4\text{A}$)	$0.6 \cdot 10^{41}$	$0.1 \cdot 10^{41}$	6
Плотный газ	Широкое основание кон- тура линии [O III] ($\Delta\lambda \approx 30\text{A}$)	$1.2 \cdot 10^{41}$	$0.3 \cdot 10^{41}$	4
	Широкое основание кон- тура линии H γ ($\Delta\lambda \approx 120\text{A}$)	—	$0.9 \cdot 10^{41}$	—
Суммарное значение потока [7, 8]		$3.0 \cdot 10^{41}$	$1.4 \cdot 10^{41}$	

Очень грубо можно оценить среднее значение плотности газа, излучающего в линиях [O III]. На нашей спектрограмме уверенно определяется отношение интенсивностей линий $\lambda 4363$ [O III] и H γ :

$$\frac{I_{4363} [\text{O III}]}{I_{\text{H}\gamma}} = 1.5.$$

Обе линии имеют одинаковые ширины (крылья линии H γ сильно недодержаны), находятся близко друг к другу и расположены в центре поля камеры, поэтому никаких редукиций за чувствительность фотоэмульсии, из-

менение концентрации света эшелле и виньетирование в камере спектрографа не требуется. Приняв теоретическое значение $N_1/N_2 = 0.5$, получим

$$I_{4363}/I_{H\beta} = 0.75.$$

Далее, пользуясь данными табл. 1, находим, что среднее отношение небулярных линий к $H\beta$ для газа, излучающего линии [O III], равно 6. Отсюда

$$\frac{I_{4363}}{I_{N_1+N_2}} = 0.125.$$

По известным графикам [9], представляющим зависимость этого отношения от n_e и T_e , находим значение плотности $n_e = 6 \cdot 10^6 \text{ см}^{-3}$ при $T_e = 10^4 \text{ К}$ или $n_e = 3 \cdot 10^6$ при $T_e = 12 \cdot 10^4 \text{ К}$. Заметим, что излучение линий $\lambda 4363$, N_1 , N_2 , H_1 и центральный узкий компонент линии $H\beta$ относятся к одному и тому же объему газа с внутренними скоростями, не превышающими $\pm 800 \text{ км/с}$.

Крайне любопытно, что полученное по линиям [O III] значение электронной плотности для ядра NGC 4151 совпадает со значением n_e , вычисленным аналогичным методом для других объектов с широкими водородными линиями (см., например, [10]). Отметим также, что детальное сравнение контуров $\lambda 4363$ и 5007 [O III] может позволить в дальнейшем оценить плотность газа отдельно для каждой составляющей компонента газозового образования в ядре сейфертовской галактики.

Мы благодарим Д. Пела и Д. Аллоин за любезно присланный препринт их статьи.

Крымская астрофизическая
обсерватория
Специальная астрофизическая
обсерватория АН СССР

GAS IN THE NUCLEUS OF THE SEYFERT GALAXY NGC 4151

V. I. PRONIK, I. S. BALINSKAJA

Unwidened spectrum of NGC 4151 nucleus obtained on the 6-m telescope together with the analogous observations made earlier by Ulrich and recently by Pelat and Alloin permit us to draw the conclusion that in the nucleus of NGC 4151 there is a rotating gaseous disk showing the increase of density toward the center of the galaxy. Gaseous disk has an overall dimension of $3''$. The velocity of rotation

increases slowly with the radius and is equal in average to about 300 km/s. In the center of the disk there is a gaseous formation with a dimension less than the angular resolution ($\lesssim 1''$). This formation is responsible for the emitting of the main central maximum of forbidden lines ($\Delta\lambda = 4\text{\AA}$). Gaseous velocities (probably rotational) do not exceed 100–150 km/s. The 3869 [Ne III] line points to the existence of weak gaseous corona around the nucleus.

ЛИТЕРАТУРА

1. *M. F. Walker*, *A. J.*, 73, 854, 1968.
2. *D. Pelat, D. Alloin*, *Astron. Astrophys.* 105, 335, 1982.
3. *M. H. Ulrich*, *Ap. J.*, 181, 51, 1973.
4. *K. S. Anderson*, *Ap. J.*, 187, 445, 1974.
5. *В. И. Проник*, *Изв. Крымской обс.*, 58, 104, 1978.
6. *J. B. Oke, W. L. W. Sargent*, *Ap. J.*, 151, 807, 1968.
7. *K. S. Anderson*, *Ap. J.*, 162, 743, 1970.
8. *T. F. Adams, D. W. Weedman*, *Ap. J.*, 199, 19, 1975.
9. *А. А. Боярчук, Р. Е. Гершберг, В. И. Проник*, *Изв. Крымской обс.*, 39, 147, 1969.
10. *В. И. Проник*, *Астрофизика*, 13, 51, 1977.