

УДК 524.74:524.78

## ХАРАКТЕРИСТИКИ ИОНИЗОВАННОГО ГАЗА В ПОЛОСТЯХ ГАЗО-ПЫЛЕВОГО ДИСКА СПИРАЛЬНОЙ ГАЛАКТИКИ NGC 6946

© 2011 Ю. Н. Ефремов<sup>1\*</sup>, В. Л. Афанасьев<sup>2</sup>, О. В. Егоров<sup>3</sup><sup>1</sup>Государственный астрономический институт им. П.К.Штернберга, Москва, Россия<sup>2</sup>Специальная астрофизическая обсерватория, Нижний Архыз, 369167 Россия<sup>3</sup>Государственный астрономический институт им. П. К. Штернберга, Москва, Россия

Поступила в редакцию 19 марта 2011 г.; принята в печать 15 мая 2011 г.

Параметры ионизованного газа в NGC 6946 (в линиях [NII]  $\lambda\lambda 6548, 6583$ ,  $H_{\alpha}$  и [SII]  $\lambda\lambda 6717, 6731$ ) исследованы на БТА САО РАН вдоль трех положений длинной щели фокального редуктора SCORPIO, проходящих через ряд больших и малых полостей газового диска этой галактики. Эти полости точно соответствуют полостям в теплой пыли, видимых на длине волны 5–8 микрон. Мы обнаружили, что повсюду в направлении NGC 6946 линии ионизованного газа раскладываются при гауссовой декомпозиции на две компоненты, одна из которых показывает практически постоянное отношение [SII]/ $H_{\alpha}$  и [NII]/ $H_{\alpha}$ , а также почти постоянную в пределах ошибок измерений лучевую скорость (около  $-35 \dots -50$  км/с). Эта компонента является фоновым излучением от диффузного ионизованного газа нашей Галактики, что не удивительно, учитывая низкую ( $12^{\circ}$ ) широту NGC 6946; аналогичная компонента имеется и в излучении нейтрального водорода. Анализ компоненты ионизованного газа, возникающей в NGC 6946, показал, что в полостях газового диска этой галактики она показывает признаки ударного возбуждения, типичные и для экстрапланарного диффузного ионизованного газа (EDIG), наблюдающегося в ряде спиральных галактик на их больших Z-координатах. Скорее всего, это объясняется просто малой плотностью газа диска NGC 6946 (с обычной фотоионизацией) в пределах полостей, из-за чего мы видим спектральные признаки проецирующегося на них EDIG газа NGC 6946, находящегося вне плоскости этой галактики. При отсутствии разделения ионизованного газа на две компоненты по лучевым скоростям, с уменьшением плотности газа NGC 6946 всё больший вклад в интегральные параметры линий дает EDIG нашей Галактики, что и объясняет некоторые странные результаты, полученные в предыдущих исследованиях. Морфология теплой пыли, видимой в ИК-диапазоне, и HI практически одинакова (за исключением окраинной части галактики, в которых нет источников нагрева пыли), причем ударное возбуждение ионизованного газа обнаруживается и в самых малых дырах, различимых только на ИК-изображениях.

Ключевые слова: галактики, группы и скопления галактик, межгалактический газ

### 1. ВВЕДЕНИЕ

Близкая (расстояние около 6 Мпк [1, 2], так что  $1'' = 30$  пк) изолированная спиральная галактика NGC 6946, видимая почти плашмя, выделяется рекордным количеством не только наблюдавшихся в ней сверхновых звезд (9), но и полостей (121), обнаруженных в ее газовом диске; их размеры доходят до 2 кпк. Рассматриваемая коллекция полостей HI, наибольшая из известных, выявлена благодаря детальному исследованию нейтрального водорода в этой галактике на радиотелескопе WSRT [1, 2], и мы будем использовать обозначения полостей, введенные в этих работах. Эти

данные делают NGC 6946 наиболее подходящим объектом для понимания природы полостей. Для этого необходимы детальные исследования полостей и их окружения в разных диапазонах спектра, определение параметров ионизованного газа и характеристик звездных скоплений, изучение остатков сверхновых и т.д. О происхождении полостей продолжается дискуссия, которая подробно описана в работах [1, 3–5]. Рассматривается возможность образования полостей под действием взрывов сверхновых и звездного ветра от горячих звезд, которая на наш взгляд противоречит наблюдательным данным для больших полостей [6], а также гипотеза образования полостей в результате пролета сквозь диск галактики массивного облака [5]

\*E-mail:efremovn@yandex.ru

или темного мини-гало [7]. Мы вернемся к этой проблеме в заключении.

Нашей первоначальной задачей было повторное исследование полости № 85 и первое изучение огромной полости № 107. Сравнение характеристик газа в этих двух полостях представляет особый интерес, ибо эти две полости экстремально различны по своей морфологии и внутреннему содержанию. Первая из них, как и находящийся внутри нее огромный странный звездный комплекс, включающий сверхгигантское молодое скопление [8], неоднократно исследовалась спектрально [9–11]. Одного сверхскопления казалось бы достаточно, чтобы раздуть эту (сравнительно небольшую, диаметром около 700 пк) дыру в газовом диске.

Однако внутри гигантской сверхоболочки № 107 не видно никаких объектов, на которые можно было бы возложить ответственность за ее образование. В данной работе эта полость впервые исследована спектрально. Она одна из немногих, которая действительно заслуживает название сверхоболочки — вокруг нее наблюдается кольцо повышенной плотности HI и ободок повышенной яркости в ИК-диапазоне на длинах 4.5, 5.8 и 8.0 микрон (свечение нагретой пыли, связанной с плотным газом и молекулами ПАУ).

Эта полость № 107 является наибольшей (диаметр 1.8 кпк) среди правильных круглых дыр в газовом диске NGC 6946. С юга ее окружает дуга областей HI, указывающих, очевидно, на звездообразование, инициированное столкновением расширяющейся газовой оболочки с окружающим газом или же начавшееся просто по достижении в нагретой сверхоболочке HI достаточной плотности. Нынешний диаметр этой структуры намного больше толщины газового диска галактики, источников давления в ней нет, и если она продолжает расширяться, то только по инерции. Впрочем, размеры всех полостей, обнаруженных в газовом диске NGC 6946 заведомо превышают его эффективную толщину, что является общим правилом и для других спиральных галактик и остается труднейшей проблемой для гипотез, объясняющих образование и раздувание оболочек каким бы то ни было источником центрального давления [2]. Прорыв за пределы диска галактики газа из расширяющейся оболочки (наблюдающийся, по крайней мере, в двух случаях в нашей Галактике (см., например, [12]), очевидно, должен приводить к прекращению расширения полости в диске галактики. В нескольких случаях признаки этого (gas fountains), по видимому, наблюдаются и в NGC 6946 (см. [1, 2]).

Помимо вышеописанных каверн № 85 и № 107, каждое из трех положений щели проходит через ряд других полостей. Задачей работы стало изучение вариаций лучевых скоростей и параметров возбуждения ионизованного газа вдоль щели — в надежде получить материал для объяснения происхождения каверн в газо-пылевом диске NGC 6946 и других галактик.

Отметим сразу же, что морфология теплой пыли, обрисовываемая изображением, полученном в дальнем ИК-диапазоне (5–8 микрон) на орбитальном телескопе Spitzer обнаруживает почти точное соответствие с картиной, даваемой нейтральным водородом, что справедливо как для полостей, так и для областей с повышенной плотностью газа и пыли. При этом высокое разрешение ИК-изображения (сравнительно с картиной в нейтральном водороде) позволяет заметить и малые дыры в межзвездной среде, практически не обнаруживаемые на длине волны 21 см.

## 2. НАБЛЮДЕНИЯ

Наблюдения были проведены В. Л. Афанасьевым 16–17 августа 2007 г. на БТА САО РАН. Использовался фокальный редуктор SCORPIO (описание его см. в работе [13]) и длинная (6'06'') щель, масштаб вдоль которой составляет  $1\text{px} = 0''.357$ .

В Табл. 1 приведены значения позиционных углов и номера полостей, находящихся близ центров щелей.

На Рис. 1 показаны положения щелей спектрографа относительно полостей HI. Приведены номера полостей в работах [1, 2] и показаны также обычно совпадающие с ними, но меньшие по размерам полости, найденные недавно в работе [3]. Ширина щели составляла 1'', спектральное разрешение — FWHM около 3.4 Å. Точность построения шкалы длин волн по линиям ночного неба составляет 20–30 км/сек для линий, полученных с отношением сигнал/шум порядка 5 и выше (что хорошо видно из баров ошибок на рисунках, где приводятся распределения лучевых скоростей вдоль щели). Спектр ночного неба (на координатах RA = 00<sup>h</sup>10<sup>m</sup>00<sup>s</sup>.00 и DEC = +18°00'00''.0; галактическая широта около –42° и расстояние от NGC 6946 около 50°) наблюдался сразу после NGC 6946 при тех же условиях, что и сама галактика. Полученные спектры использовались для вычитания ночного неба из спектрограмм объекта. Выбор позиционного угла около –33° диктовался надеждой на то, что при этом угле (параллельно малой оси галактики) влияние ее вращения на

Таблица 1. Журнал наблюдений

Дата	Дыра	Позиционный угол, град.	Спектральный диапазон, Å	Дисперсия, Å	$T_{\text{exp}}$ , сек.	“Seeing”
16/17.08.2007	107	-33(147)	6100–7100	0.52	1800	2''
16/17.08.2007	107	180(0)	6100–7100	0.52	1800	2''
16/17.08.2007	85	-34(326)	6100–7100	0.52	1200	1.5''

лучевые скорости минимально и должны быть заметны локальные особенности лучевых скоростей.

### 3. ОБНАРУЖЕНИЕ ДВУХ СОСТАВЛЯЮЩИХ В ПРОФИЛЯХ ЛИНИЙ ИОНИЗОВАННОГО ГАЗА

Еще в процессе наблюдений В. Л. Афанасьев и О. К. Сильченко заметили, что дублет запрещенных линий серы (они свободны от эмиссий неба) виден не только по всей галактике, но и весьма далеко за ее видимыми пределами, на спектрограммах, полученных выше по склонению в  $2^\circ$  от NGC 6946. Это навело на мысль, что эти линии могут принадлежать переднему фону — нашей Галактике, что вполне возможно, ввиду довольно низкой ( $11^\circ.7$ ) широты NGC 6946. Поэтому, как показано на Рис. 2, была проведена гаусс-декомпозиция профилей лучевых скоростей линий  $H_\alpha$ , [NII] и [SII] на две компоненты (с учетом того, что две последние линии — дублеты). Оказалось, что вдоль всей щели имеется компонента, имеющая практически постоянную по всей длине спектра лучевую скорость (обычно в пределах  $-30 \pm 7$  км/с) и постоянное в пределах ошибок отношение потоков в линиях  $H_\alpha$ /[NII] и  $H_\alpha$ /[SII]6717 (Рис. 3). Скорость же, полученная по второй компоненте, изменяется вдоль спектра и тесно коррелирует с деталями морфологии распределения газа в NGC 6946. Отсюда следует, что первая компонента возникает в диффузном ионизованном газе нашей Галактики, а вторая приходит от NGC 6946. Это можно усмотреть и непосредственно на спектрах (включающих линии ночного неба), на которых показаны области, включающие дублет [NII],  $H_\alpha$  и дублет [SII] — на всех трех наших щелях (Рис. 4, 5 и 6).

Эти изображения, особенно линии серы, свободные от примеси линий ночного неба, демонстрируют одинаковую, гладкую и резкую границу со стороны наименьших скоростей — эта граница определяется излучением, приходящим от нашей Галактики. Она представляет собой скорость экстрапланарного диффузного ионизованного газа (EDIG) Млечного Пути в направлении

на NGC 6946. Верхняя же граница обрисована ионизованным газом самой NGC 6946, с его резко неоднородной интенсивностью и изменяющимися лучевыми скоростями.

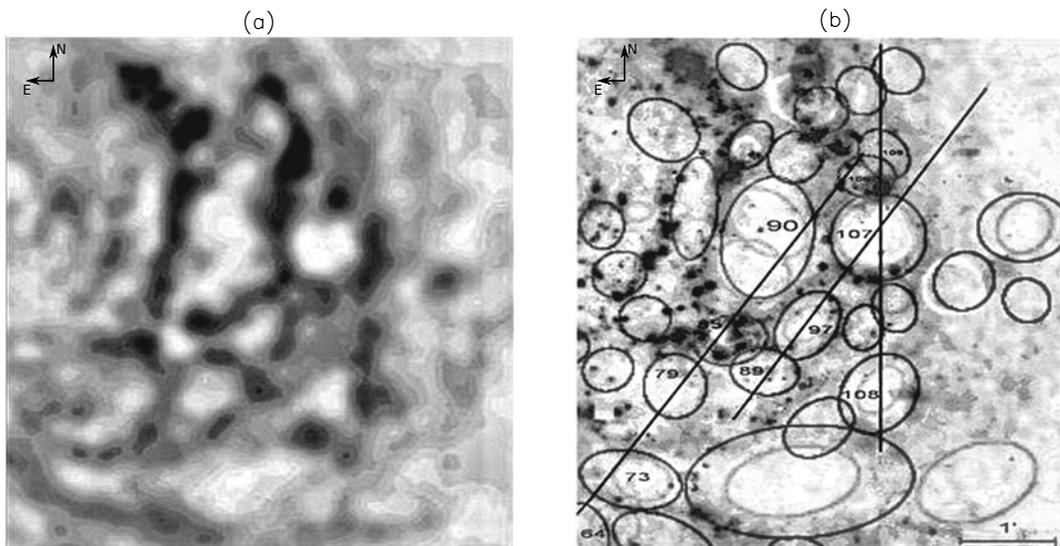
Поразительным образом наличие весьма существенной примеси излучения ионизованного газа переднего фона не замечалось в предыдущих работах (в том числе и наших), а косвенные его признаки (описанные, например, еще в работе [14]) приписывались либо плохому учету фона ночного неба, либо же пекулярным лучевым скоростям в некоторых областях NGC 6946. Поток от ионизованного газа переднего фона показан на Рис. 4–9 пунктирной линией — вне HII-областей он обычно превышает поток от NGC 6946. Отметим, что Рис. 2 строился именно по участкам спектра NGC 6946, соответствующим HII-областям.

### 4. ЛУЧЕВЫЕ СКОРОСТИ

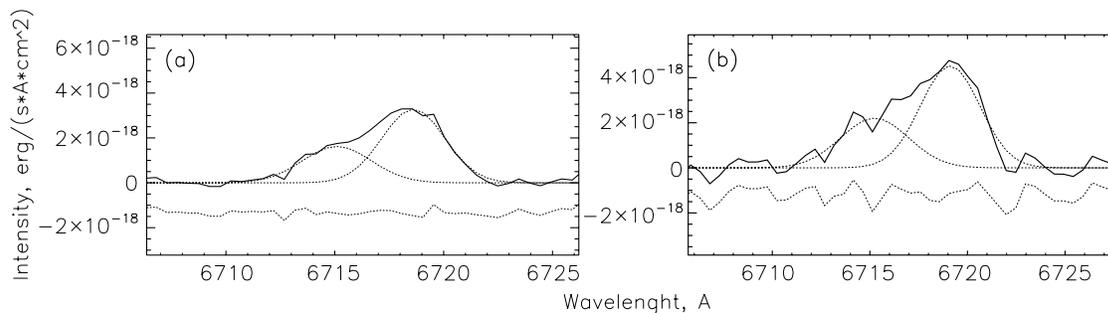
Свойства газа переднего фона мы обсудим в дальнейшем, а пока речь будет идти исключительно об NGC 6946. На Рис. 7, 8 и 9 для всех трех положений щели показаны лучевые скорости в трех линиях ионизованного газа как для NGC 6946, так и для переднего фона, а также лучевые скорости HII вдоль всех положений щели, которые любезно предоставил Р. Боомсма (детали его наблюдений см. в [1]).

Усреднение производилось в участках размером  $2.8''$ . Отметим прежде всего, что дисперсия скоростей (точнее, разброс измерений от точки к точке) резко увеличивается в полостях. Это может быть признаком их расширения и/или следствием меньшего отношения сигнал/шум для потока от газа меньшей плотности в полостях.

Иногда сравнение лучевых скоростей разных серий ионизованного газа обнаруживает любопытные различия. В полостях № 90 и № 73 лучевые скорости  $H_\alpha$  резко уклоняются от средней в сторону отрицательных скоростей, тогда как линии [SII] и [NII] дают почти постоянные скорости; более



**Рис. 1.** Западная область галактики NGC 6946 в линии нейтрального водорода. (a) — изображение в линии H I по данным [1]; (b) — изображение в линии H I (серым цветом, по данным [3]) и области H II (черным цветом). Показаны положение полостей (по данным [1–3]), их номера согласно работам [1, 2] и положение наших щелей. Серые и белые контуры полостей даны по работе [3].



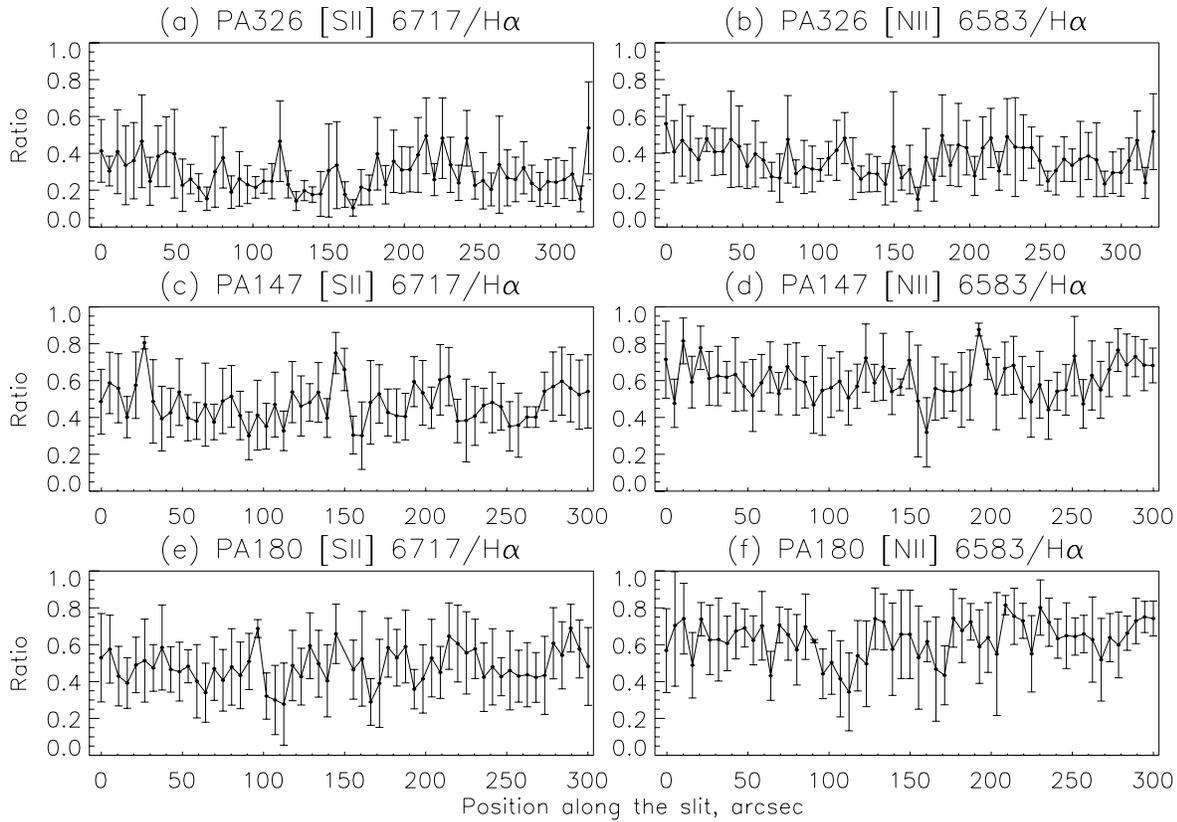
**Рис. 2.** Пример разложения профилей линии серы [SII]  $\lambda 6717$  на две компоненты. Наблюдаемый профиль показан сплошной линией, разложение на 2 гауссианы и остаток от их вычитания — штриховой линией. Правая компонента в разложении соответствует NGC 6946, левая — нашей Галактике. Остаток от вычитания гауссиан из наблюдаемого спектра смещен вниз для наглядности; медианное значение остатка равно нулю.

того, в полости № 90 линии серы показывают уклонение в сторону положительных скоростей (Рис. 7). В этой полости нейтральный водород расщепляется по скоростям на две составляющие, одна из которых продолжает плавный ход скорости вдоль щели, а другая указывает на приближение к нам одной из стенок полости, уклоняясь в ту же сторону, что и скорости по  $H_{\alpha}$ , хотя ионизованный водород показывает еще большую скорость движения этой стенки. Возможно, это указывает на истечение газа из оболочки.

Расширение полости, намного превышающей толщину газового диска галактики, представляется необъяснимым, как уже отмечалось (см. также [2]). Возможно, что в случае полости № 90 мы име-

ем дело не с расширяющейся полостью в газовом диске, а просто с (необычно резко) ограниченной межзвучавной областью низкой плотности (как и было заподозрено в работе [1]). Однако полость № 90 показана в работе [3] как двойная, что видно на Рис. 1. Разнообразие в поведении лучевых скоростей различных спечей газа внутри этой сверхгигантской полости (Рис. 7, интервал вдоль щели  $80''$ – $140''$ ) не поддается однозначному объяснению.

Отметим также любопытные “выбросы” (уклонения в сторону больших скоростей), наблюдаемые в полости № 90 по линиям [SII] и в полости № 107 по линиям [NII] — и только по ним (Рис. 7 и 8). Отметим также, что линии [SII] переднего фона



**Рис. 3.** Отношения потоков (вдоль всех трех щелей) в линиях [SII]  $\lambda 6717$  и [NII]  $\lambda 6583$  к потоку в линии  $H\alpha$  в компоненте ионизованного газа, лучевая скорость которого указывает на принадлежность к нашей Галактике. Сходство профилей линий вдоль щели (особенно заметное для PA 147) подтверждает их происхождение в одних и тех же дискретных облаках WIM нашей Галактики.

дают выброс скорости в положительную сторону в области высокой плотности ионизованного газа NGC 6946, что может объясняться либо случайностью, либо не вполне точным для таких плотностей разделением спектральных линий на компоненты, приходящие от NGC 6946 и переднего фона.

Особо отметим на Рис. 7 узкий провал в скорости по линии  $H\alpha$ , соответствующий небольшой области наименьшей плотности газа и наименьшей лучевой скорости внутри дыры № 85, центр которой находится в  $7''$  к востоку от сверхскопления. Эта область была найдена в работе [9] и обозначена как deer dip в работе [10]. Намек на этот провал можно усмотреть и по линии [SII] (но не [NII]) на Рис. 7.

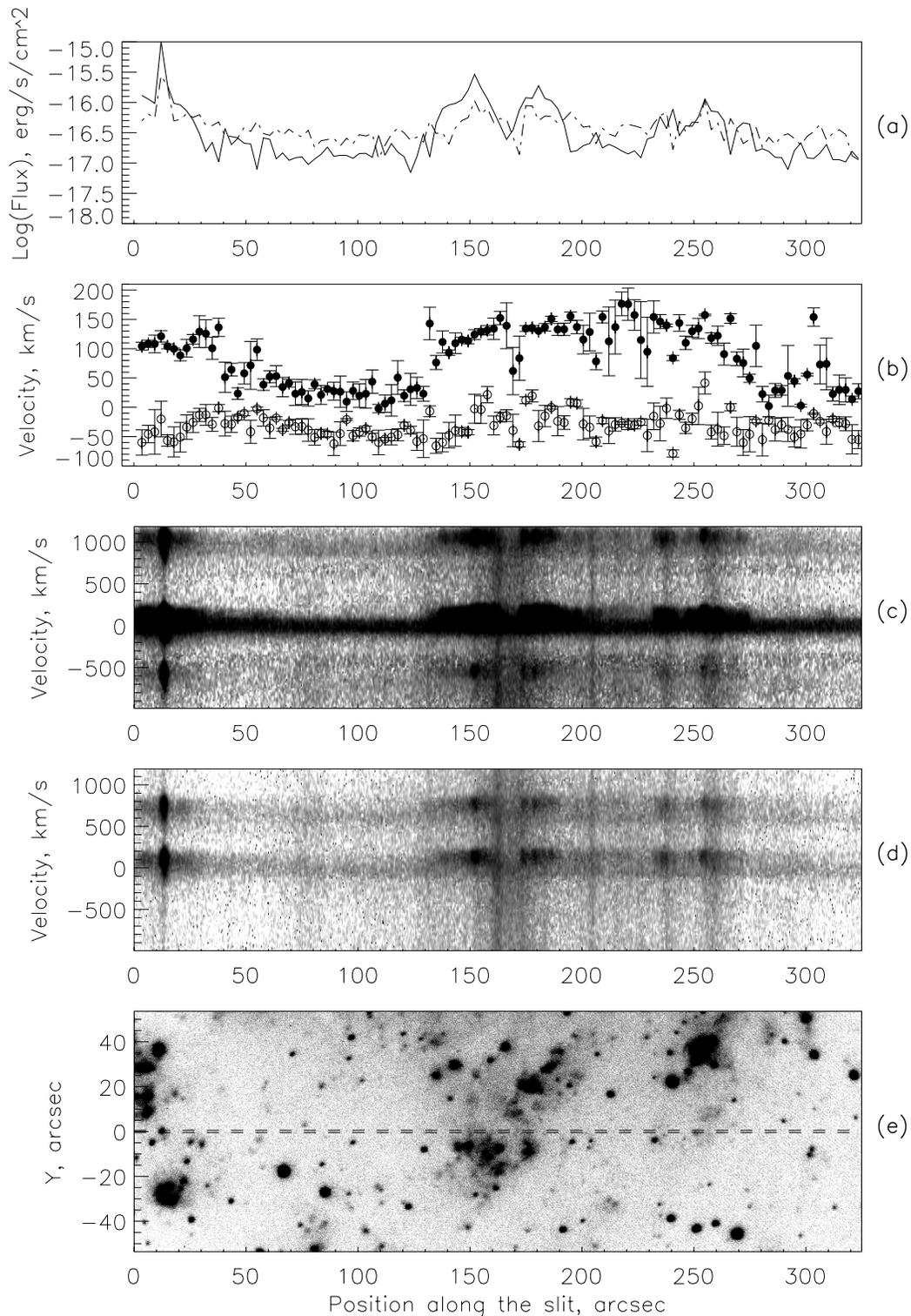
Даже внутри наибольших полостей (№ 90 и № 107) мы не видим одинаковых для всех линий особенностей в ходе лучевых скоростей ионизованного газа, так что надежды на обнаружение расширения полостей остались неосуществленными. Поведение лучевых скоростей нейтрального

водорода в пределах полостей также неоднозначно; оно было обсуждено в работе Боумса [1].

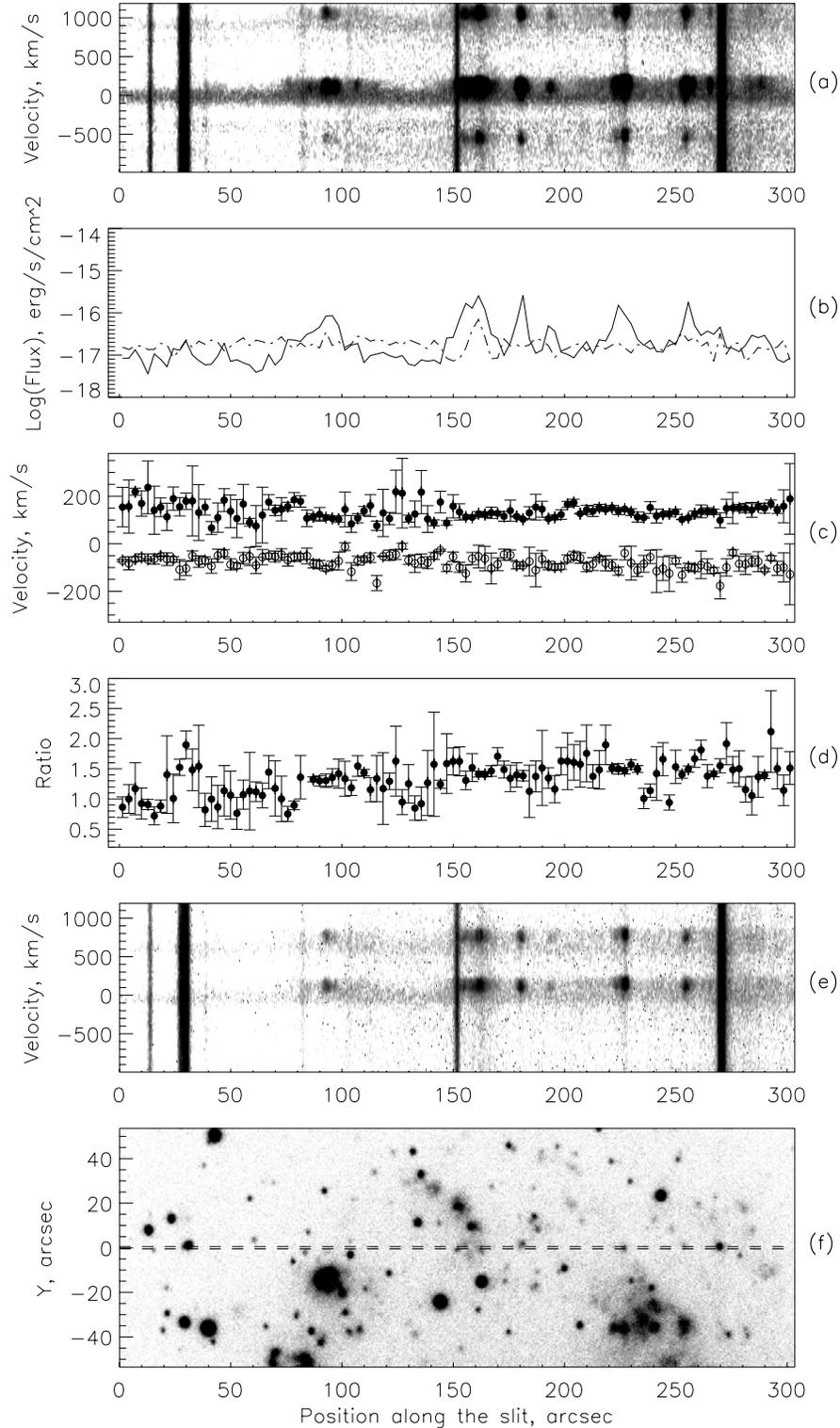
### 5. ОТНОШЕНИЯ ПОТОКОВ В ЛИНИЯХ

Мы обнаружили, что внутри полостей отношения потоков [SII]/ $H\alpha$  систематически выше, чем вне их, тогда как для областей HII, в том числе находящихся на периферии полости № 107, отношения потоков соответствуют нормальным для фото-ионизации газа горячими звездами.

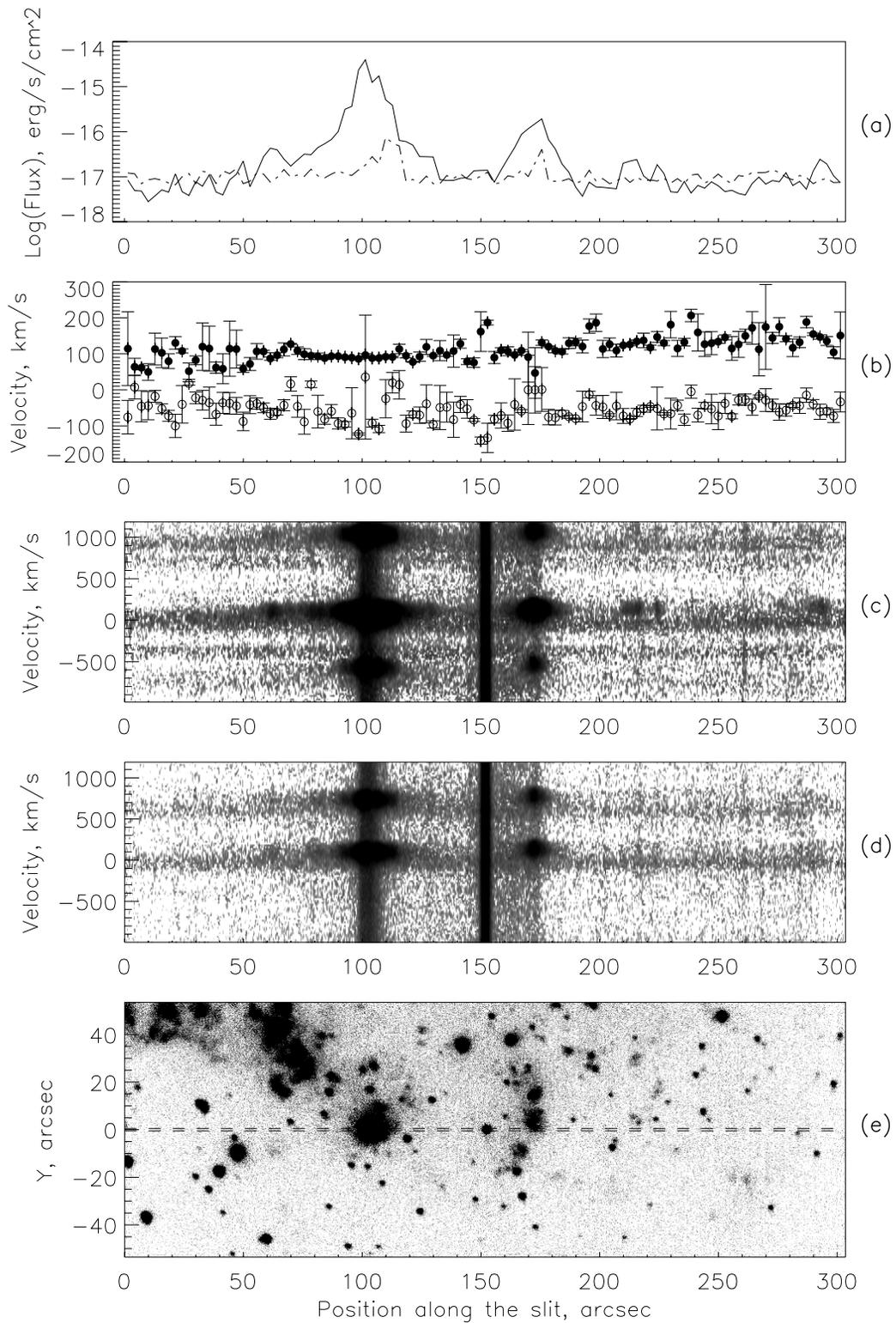
На северном краю сверхоболочки № 107 находится сверхгигантский комплекс областей HII, второй по размерам и яркости в NGC 6946. Он расположен на стыке полостей № 107 и № 106 (Рис. 1 и 10) и мог бы рассматриваться как иллюстрация возможности возникновения гигантских областей звездообразования при столкновении двух расширяющихся газовых оболочек. Гипотеза звездообразования, индуцированного столкновением ударных волн, была выдвинута в работе Чернина и др. [15] и затем неоднократно другими авторами. Этот комплекс HII рядом с полостью № 107 пересекается



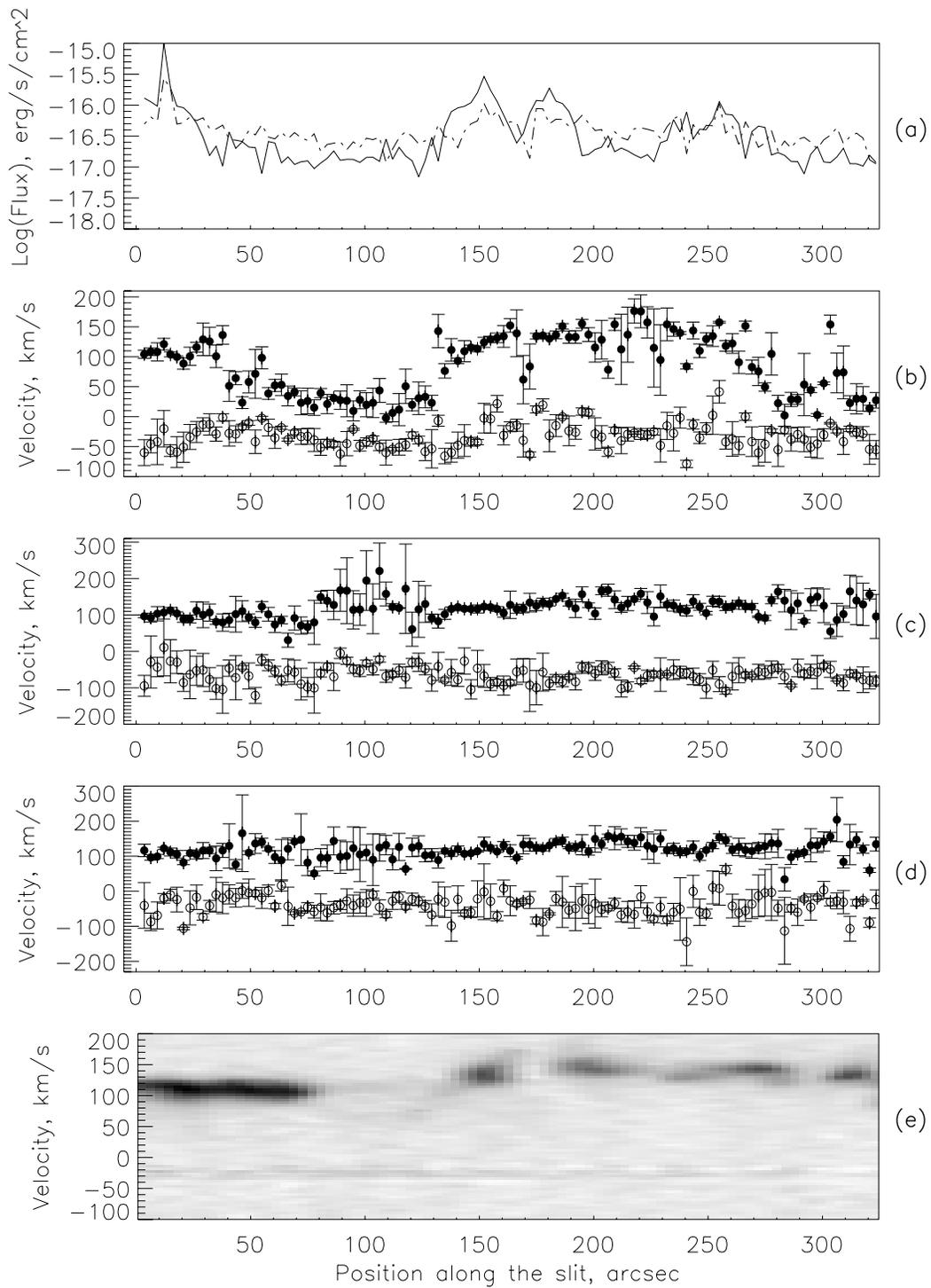
**Рис. 4.** Изменение характеристик спектра вдоль щели RA 326, проходящей через полость № 85: (а) — потоки в линии  $\text{H}\alpha$  от NGC 6946 (сплошная линия) и WIM Галактики (штрих-пунктирная линия); (б) — лучевые скорости ионизованного газа галактики NGC 6946 (верхняя кривая) и WIM Галактики (нижняя кривая) в линии  $\text{H}\alpha$ ; (с) — участок спектра в области линии  $\text{H}\alpha$ . Шкала длин волн переведена в шкалу скоростей относительно линии  $\text{H}\alpha$   $\lambda 6562.8$ ; (д) — аналогично панели (с) для линий [SII]. Шкала длин волн дана относительно линии [SII]  $\lambda 6717$ ; (е) — положение щели на  $\text{H}\alpha$ -изображении галактики.



**Рис. 5.** Изменение характеристик спектра вдоль щели PA 147, проходящей через полость № 107: (а) — участок спектра в области линии  $H_{\alpha}$ . Шкала длин волн переведена в шкалу скоростей относительно линии  $H_{\alpha}$   $\lambda 6562.8$ ; (б) — потоки в линии  $H_{\alpha}$  от NGC 6946 (сплошная линия) и WIM Галактики (штрих-пунктирная линия); (с) — лучевые скорости ионизованного газа галактики NGC 6946 (верхняя кривая) и WIM Галактики (нижняя кривая) в линии [SII]  $\lambda 6717$ ; (д) — отношение потоков в компонентах дублета линии [SII]  $F(\lambda 6717)/F(\lambda 6731)$ . (е) — аналогично панели (а) для линий [SII]. Шкала длин волн дана относительно линии [SII]  $\lambda 6717$  (f) — положение щели на  $H_{\alpha}$ -изображении галактики.



**Рис. 6.** Изменение характеристик спектра вдоль щели PA 180, проходящей через полость № 107. Панели (а)–(е) аналогичны показанным на Рис. 4.



**Рис. 7.** Изменение характеристик спектра вдоль щели PA 326, проходящей через полость № 85: (a) — потоки в линии  $H_{\alpha}$  от NGC 6946 (сплошная линия) и WIM Галактики (штрих-пунктирная линия); (b) — лучевые скорости ионизованного газа галактики NGC 6946 (верхняя кривая) и WIM Галактики (нижняя кривая) в линии  $H_{\alpha}$ ; (c) — аналогично, в линии [SII]  $\lambda 6717$ ; (d) — аналогично, в линии [NII]  $\lambda 6583$ ; (e) — лучевые скорости в линии HI 21 см.

нашей щелью с PA 180, и в его спектре, вопреки нашим ожиданиям, не обнаруживаются признаки ударного возбуждения, — напротив, отношения как [SII]6717+6731, так и [NII]6583 к  $H_\alpha$  здесь минимальны (Рис. 10).

Принято считать (см., например, Моисеев и др. [16]), что именно величина отношения потоков в этих линиях, превышающая 0.4, указывает, что основной вклад в ионизацию газа вносят ударные волны. На Рис. 11 мы провели вертикальные линии через точки максимальных значений отношения [SII]/ $H_\alpha$  и горизонтальную линию — через значение этого отношения, равное 0.4. Видно, что участки щели, вдоль которых оно превышает 0.4, соответствуют полостям HII, причем более точно — границам полостей, обрисовываемым теплой пылью. Два узких пика отношения [SII]/ $H_\alpha$  (при координате вдоль щели 170'' и 240'', по обе стороны полости № 97) точно соответствуют положениям на щели двух мини-полостей в теплой пыли, почти неразличимых на HII-изображениях.

## 6. ДИСКУССИЯ

### 6.1. Экстрапланарный диффузный ионизованный газ

Повышенные значения отношения потоков в запрещенных линиях азота и серы к потоку в  $H_\alpha$ , обнаруженные нами в полостях NGC 6946, давно известны в экстрапланарном диффузном ионизованном газе вне плоскости (EDIG) галактик, видимых с ребра, а также и в EDIG нашей Галактики. Наши данные (Рис. 3, 7, 8 и 9) показывают, что по всей области галактики NGC 6946 наблюдается и газ с почти постоянной скоростью около  $-40$  км/с, который несомненно является диффузным ионизованным газом (EDIG) нашей Галактики, находящимся вне ее плоскости. Отношения интенсивностей линий этого газа вдоль наших щелей показаны на Рис. 3. Для щели, проходящей через полость № 85, эти отношения указывают, скорее, на фотоионизацию, а для обеих щелей, проходящих через полость № 107, и особенно при PA 147, они характерны для ударного возбуждения. Можно предположить, что эти отличия отражают угловые размеры облаков DIG/WIM Галактики и различия параметров ионизации в разных облаках.

Отметим, что по всей длине каждой щели отношения этих линий изменяются почти хаотически, а точнее, в пределах ошибок являются постоянными, что совершенно не похоже на вариации отношения интенсивностей для компоненты, приходящей от

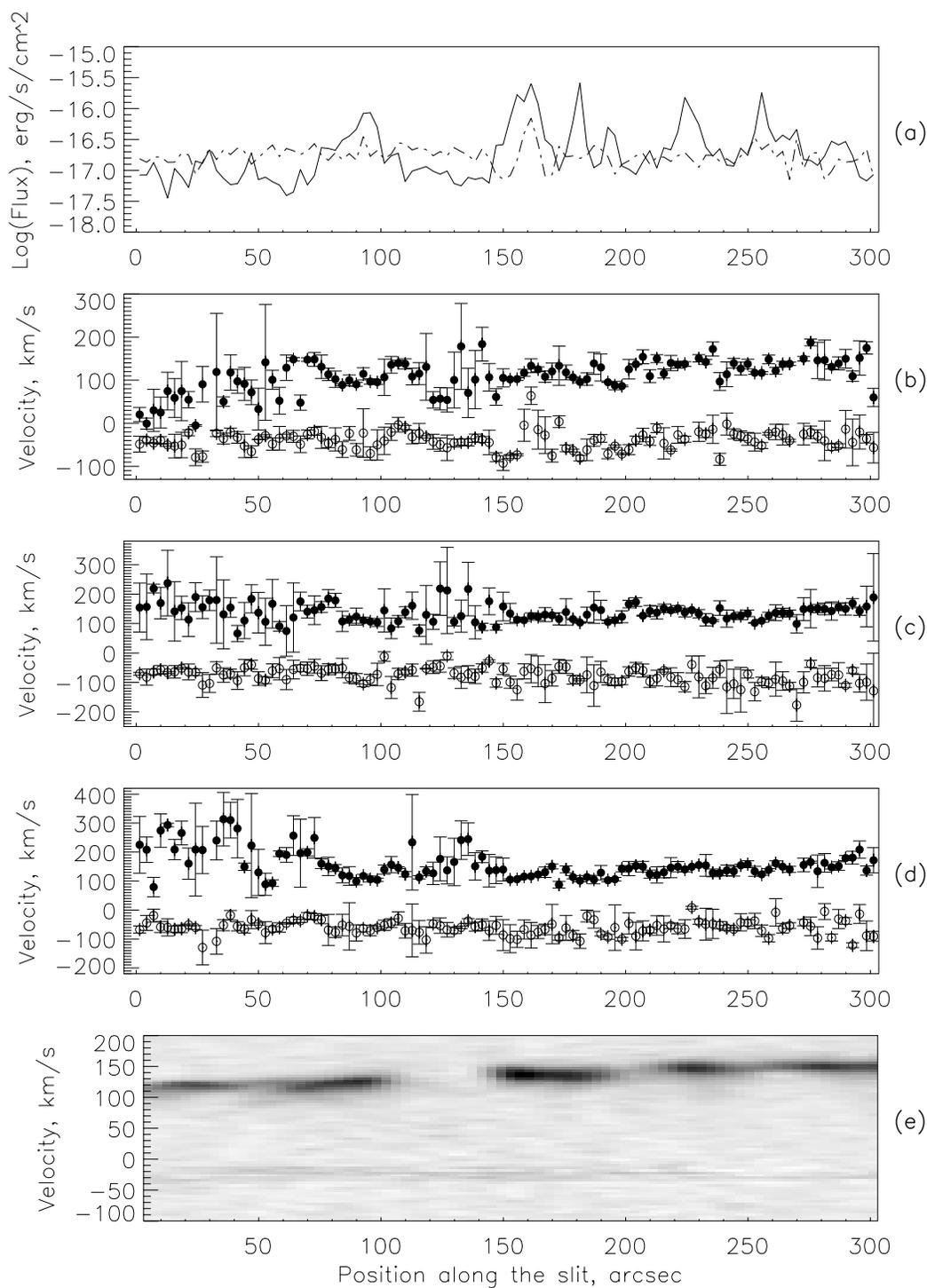
газа NGC 6946, тесно увязанные с морфологией газо-пылевого диска галактики.

Заметим, что на некоторых рисунках в диссертации Боомсма [1], например, стр. 68 и 69, можно усмотреть вытянутые облака HII переднего фона с размерами порядка десятка минут и со скоростями в пределах от  $-67$  до  $-8$  км/с. Облака с близкими характеристиками можно угледеть и в полосе с постоянной скоростью, присутствующей на рисунке для кривой вращения NGC-6946 в работе Боомсма и др. [2], о которой авторы даже не упоминают. Эта полоса HII с лучевой скоростью около  $-35 \pm 5$  км/с точно соответствует компоненте лучевой скорости, найденной нами по линиям ионизованного газа; она простирается по всей длине ( $26'$ ) кривой вращения NGC 6946, построенной вдоль большой оси галактики в этой работе, но авторы [2] никак не комментируют ее наличие. Можно заподозрить, что высокоширотный нейтральный газ нашей Галактики в направлении NGC 6946 сосредоточен в слое тесно примыкающих друг к другу облаков с небольшой дисперсией скоростей. По рисункам в работе [1] можно оценить угловые размеры некоторых из этих облаков. Они близки к характерным размерам не вполне случайных (но небольших, Рис. 7, 8 и 9) вариаций лучевых скоростей ионизованного газа переднего фона на наших спектрограммах, и это, вероятно, указывает на то, что нейтральный и ионизованный газ Галактики на высоких широтах концентрируется все же в одних и тех же облаках, и тогда нельзя считать его таким уж диффузным.

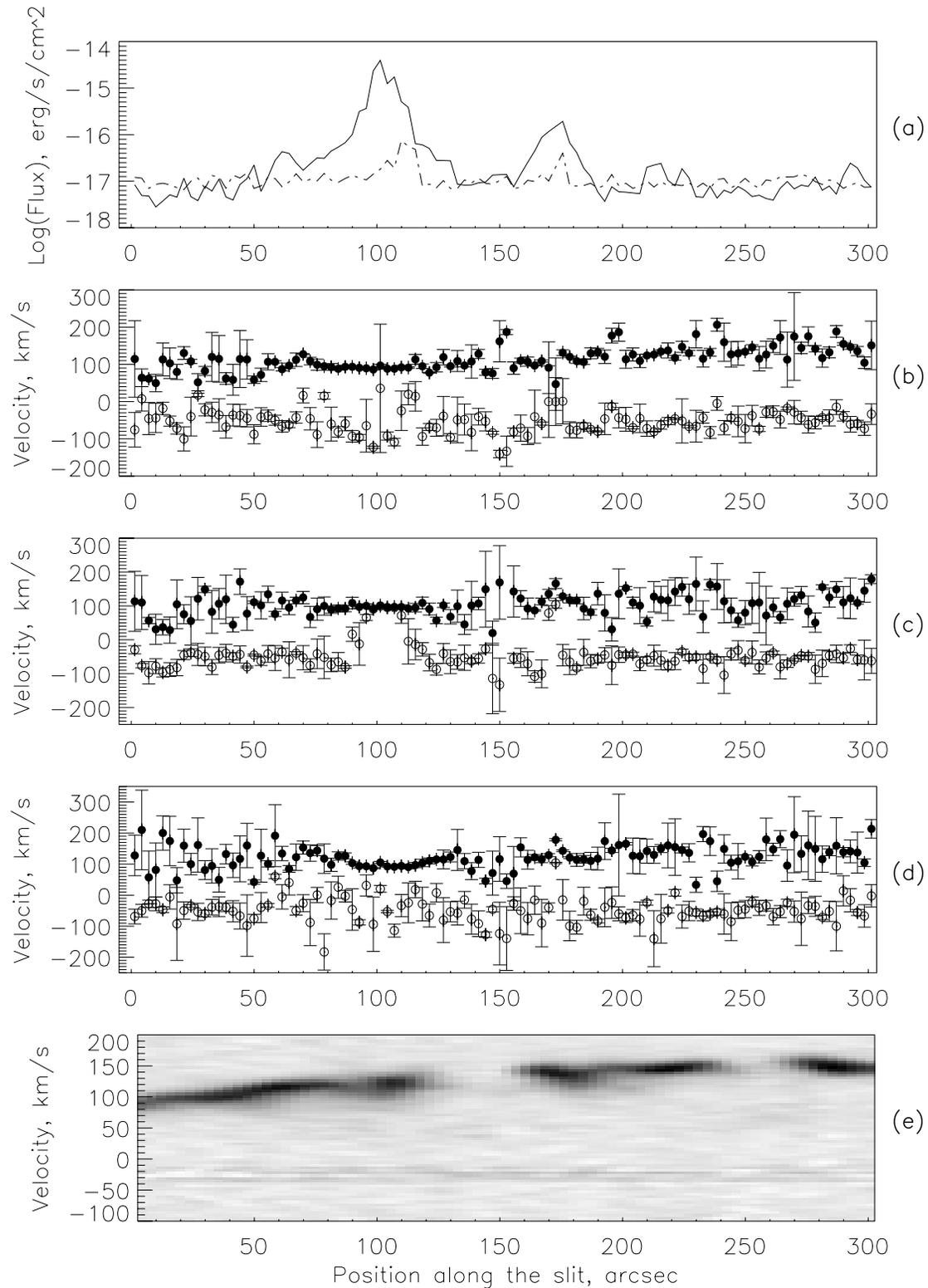
Скорость газа переднего фона, найденная нами в проекции на NGC 6946, находится в пределах скорости EDIG Галактики, наблюдаемой в этой области [17]. В работе [17] и ряде других показано, что для этого газа Галактики характерны высокие значения отношений интенсивности линий [NII]/ $H_\alpha$  и [SII]/ $H_\alpha$ , подобные наблюдаемым у диффузного ионизованного газа на высоких (около 1–2 кпк) Z-координатах в галактиках, видимых с ребра. Так, в NGC 4302 [18] было найдено, что отношение [SII]/ $H_\alpha$  увеличивается от 0.2 при  $Z = 0$  кпк до 0.6 при  $Z$  от 1 до 2 кпк.

### 6.2. Происхождение полостей в диске NGC 6946

Итак, области HII, находящиеся непосредственно на границах полостей HII в NGC 6946, показывают обычное отношение линий, типичное для ионизации горячими звездами. Однако образование тех из них, которые окаймляют полости в HII, и прежде всего, областей HII и звезд, располагающихся по дуге вдоль южной границы



**Рис. 8.** Изменение характеристик спектра вдоль щели PA 147, проходящей через полость № 107. Панели (а)—(е) аналогичны показанным на Рис. 7.



**Рис. 9.** Изменение характеристик спектра вдоль щели PA 180, проходящей через полость № 107. Панели (a)–(e) аналогичны показанным на Рис. 7.

гигантской (диаметром в 1.8 кпк) полости № 107 почти очевидным образом связано с нагребанием газа расширяющейся оболочкой полости. Отсутствие в этих областях III спектральных признаков ударной волны означает, что расширение прекратилось (или его скорость стала меньше дисперсии скоростей в окружающем газовом диске). Вероятно, отношение потоков в линиях возвращается к обычному для фото-ионизации за сроки, меньшие возраста O-звезд (т.е. примерно менее 2 млн. лет). Как говорилось выше, бесспорных признаков расширения полостей/оболочек нет и в лучевых скоростях вдоль полостей и их границ. Прекращение расширения полостей неудивительно, если оно было вызвано давлением изнутри их, ибо размеры почти всех полостей бесспорно больше (эффективной) толщины газового диска спиральных галактик (и NGC 6946 в частности) — они открыты для исхода из них сжатого газа. Так или иначе, в полости № 107, выдающейся по своим размерам и правильной круглой форме, нет ни малейших признаков звездного скопления, которое могло бы быть источником расширения полости.

Как подчеркивают Боомсма и др. [2], и многие другие авторы, непонятно, как гигантские размеры полостей можно согласовать с популярной гипотезой о происхождении полостей под действием источника давления внутри них (от сверхновых и/или звездного ветра O-звезд). Полости с эффективными размерами, превышающими толщину газового диска, известны и в нашей Галактике. Так, высота газовых филаментов, ограничивающих по Z-координате газ, истекающий из HI сверхоболочки GSH 242-03+37, одной из самых крупных в нашей Галактике (ее радиус около 560 пк) составляет около 1.6 кпк и над и под галактической плоскостью [12]. Отметим, однако, что толщина газового диска у неправильных галактик существенно больше, чем у спиральных, что, вероятно, и объясняет часто наблюдаемое в них (например, в IC 1613 — см. [19]) расширение газовых оболочек.

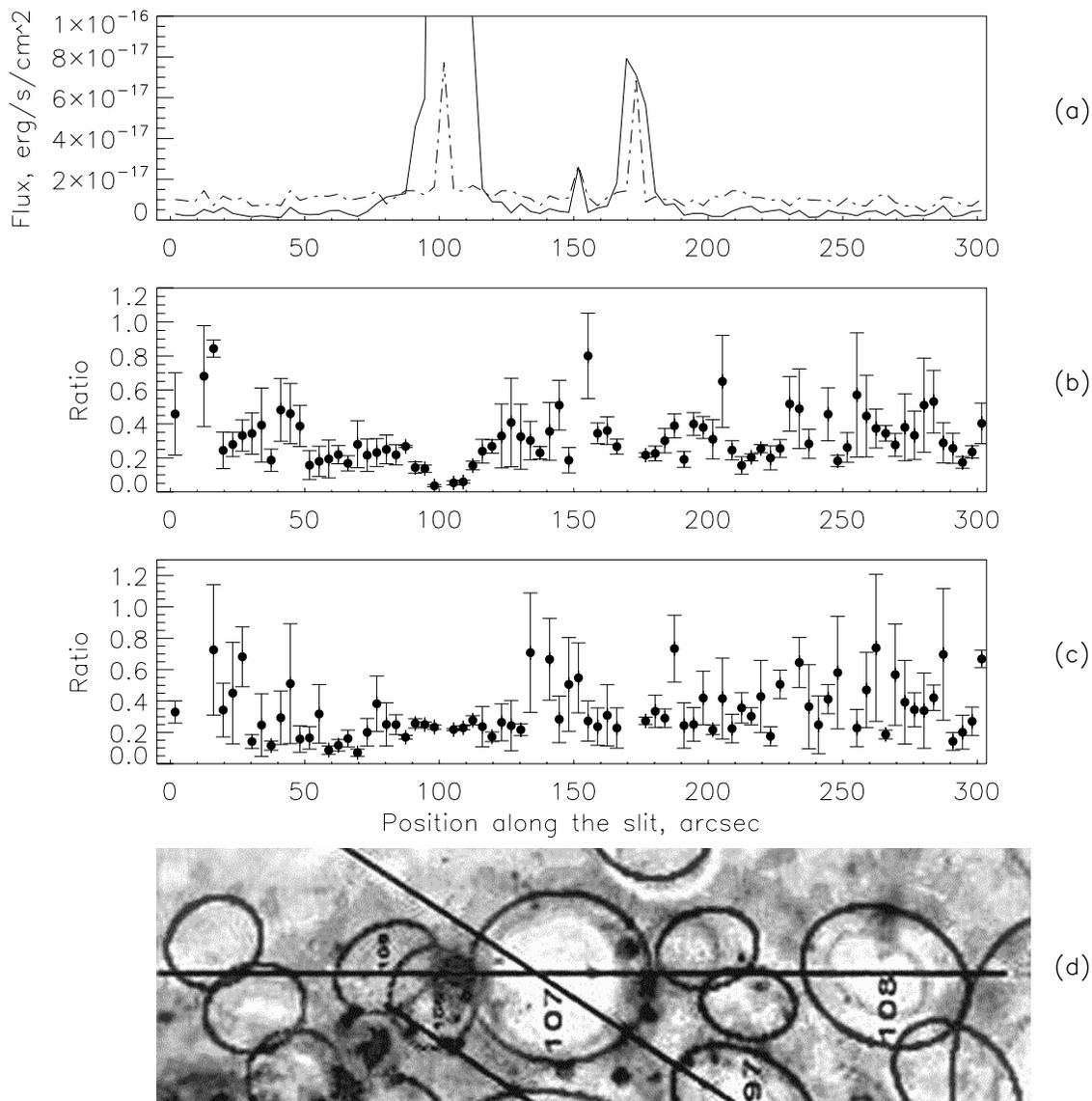
Наши Рис. 10 и 11 показывают, что внутри полостей отношения интенсивностей линий соответствует ударному возбуждению. Возникает вопрос, видим ли мы в проекции на полости газ NGC 6946 на больших Z-координатах, где он имеет обычные для EDIG отношения линий, близкие к наблюдаемым при ударном возбуждении — или же газ диска галактики был возбужден в полостях при их образовании?

Более вероятной представляется первая гипотеза. Внутри полостей газо-пылевого диска NGC 6946 плотность газа (в том числе и

ионизованного) резко уменьшена, а на больших Z-координатах она очевидно одинакова и над полостями и над областями вне их. Как следует из Рис. 11, отношение  $[SII]/H_{\alpha}$  антикоррелирует с потоком в линии  $H_{\alpha}$ , величина которого показывает, что внутри полостей вклад газа диска (с “нормальной” фото-ионизацией горячими звездами) в интегральные по лучу зрения характеристики газа в несколько раз меньше. На больших Z-координатах в NGC 6946, как и в нашей и в других галактиках, также должен быть EDIG с параметрами ионизации, близким к характерным для ударного возбуждения. В проекции на полости диска вклад EDIG на высоких Z-координатах преобладает над небольшим в полостях вкладом газа диска, почему мы и наблюдаем в полостях (по нашей гипотезе, над ними) параметры ионизации, соответствующие ударному возбуждению. Эта гипотеза подкрепляется также тем соображением, что такой характер ионизации сохраняется во всех дырах, в том числе и самых малых. Заметим, что не наблюдается корреляции величины этого отношения с размером полостей. Это можно рассматривать как указание на то, что аномальная ионизация в районе полостей физически с ними не связана. По всей видимости, благодаря обилию полостей в диске NGC 6946 — впервые для галактики, видимой практически плашмя — мы можем изучать характеристики газа высоко над ее плоскостью.

Отметим, что ни звездных скоплений, ни остатков сверхновых или рентгеновских источников нет внутри классической полости № 107, окруженной ярко выраженной газо-пылевой оболочкой. Вдоль ее южной границы располагается дуга областей III. Судя по нормальным параметрам ионизации в них, соответствующие молодые звездные группировки образовались не непосредственно под действием давления расширяющейся газовой оболочки, а при достижении достаточной плотности нагребаемого ею газа (впрочем, тут встает вопрос о том, как долго сохраняются спектральные признаки ударной ионизации).

Однако внутри нескольких полостей в NGC 6946 имеются звездные группировки. Так, внутри (но не в центре) полости № 85 находится странный звездный комплекс с диаметром около 600 пк, ограниченный с запада правильным полукругом, в котором царит молодое сверхмассивное скопление, находящееся, однако, не в его центре [8]. Мы предположили, что этот пекулярный комплекс с его сверхскоплением и асимметричная полость (Рис. 1), в которую он погружен, могли возникнуть в результате импакта темного мини-гало [10].

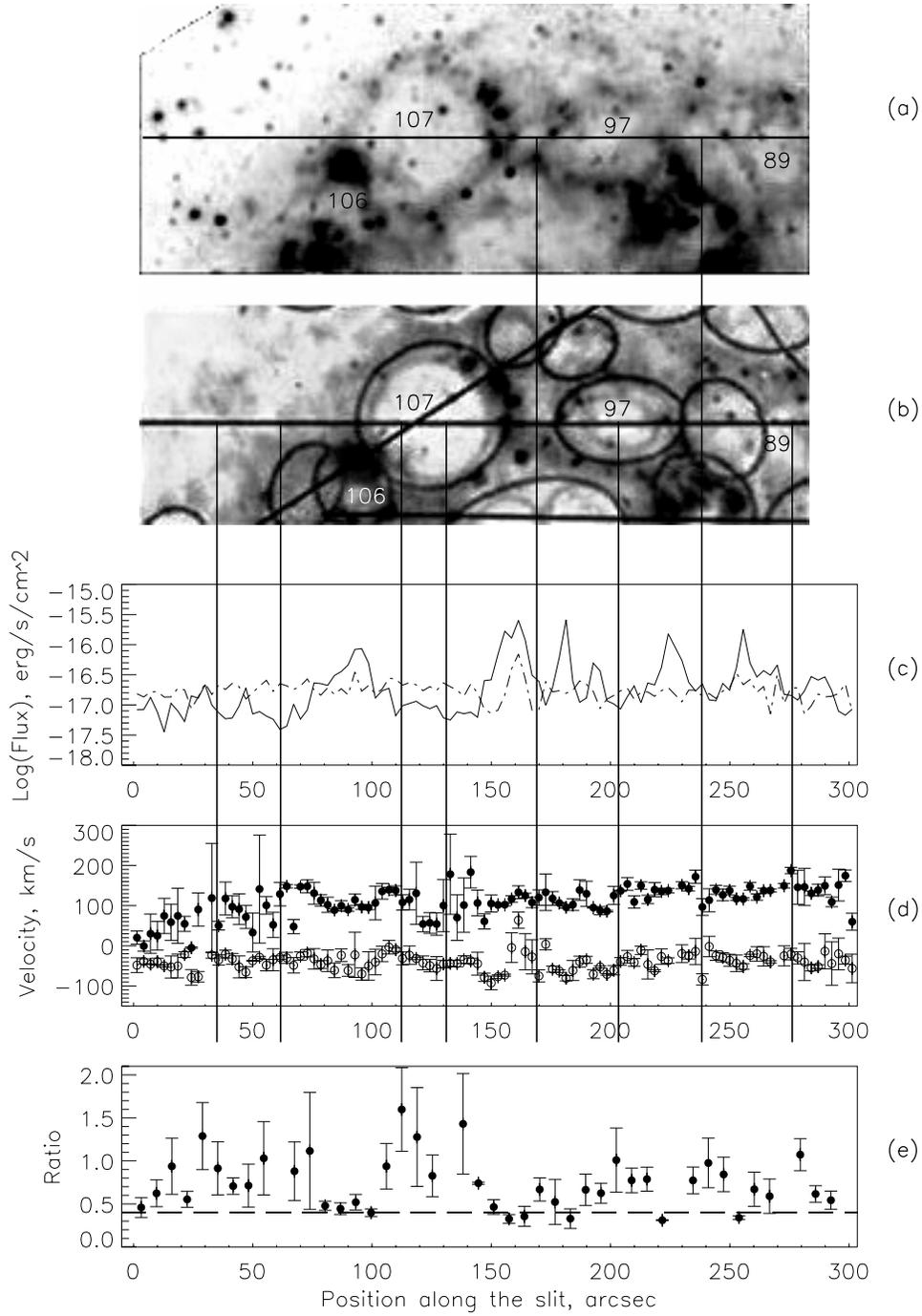


**Рис. 10.** Изменение характеристик спектра вдоль щели PA 180, проходящей через полость № 107: (a) — потоки в линии [NII]  $\lambda 6583$  от NGC 6946 (сплошная линия) и WIM Галактики (штрих-пунктирная линия); (b) — отношение потоков в линиях [SII]  $\lambda 6717/H\alpha$ ; (c) — отношение потоков в линиях [NII]  $\lambda 6583/H\alpha$ ; (d) — локализация щели на изображении галактики в линии NII относительно полостей NII. Черным цветом показаны области NII.

Казавшуюся поразительной корреляцию между интенсивностью, лучевой скоростью и параметрами возбуждения ионизованного газа в различных участках внутри и близ этого комплекса, обнаруженную в работе [10], можно теперь объяснить просто тем, что при уменьшении интенсивности эмиссии от NGC 6946, всё больший вклад в профили и интенсивности линий вносит EDIG нашей Галактики с его намного меньшей, чем в газе NGC 6946 лучевой скоростью, о чем мы тогда не

знали. Это же, очевидно, относится и к некоторым результатам работы [11] — сравнение Рис. 5 из этой работы с изображением NGC 6946 в ИК-диапазоне показывает, что на этом рисунке скорости, меньше  $80$  км/сек, наблюдаются только в мини-полостях, видимых в теплой пыли.

Измерение лучевых скоростей по профилям, полученным с низким спектральным разрешением, без разделения на компоненты, приходящие от Млечного пути и от NGC 6946 приводит к тому,



**Рис. 11.** Изменение характеристик спектра вдоль щели PA 147, проходящей через полость № 107: (a) — изображение области галактики в ИК-диапазоне по данным, полученным на телескопе Spitzer в дальней ИК-области: (см. <http://www.spitzer.caltech.edu/images/2078-sig08-008-The-Fireworks-Galaxy-NGC-6946>); (b) — положение полостей в HI, найденных в работе [3], на изображении области в линии HI 21 см. Показаны номера некоторых областей; (c) — потоки в линии H $\alpha$  от NGC 6946 (сплошная линия) и WIM Галактики (штрих-пунктирная линия); внизу (d) — лучевые скорости ионизованного газа галактики NGC 6946 (верхняя кривая) и WIM Галактики (нижняя кривая) в линии H $\alpha$ ; (e) — отношение потоков в линиях [SII]6717+6731/H $\alpha$ . Вертикальные линии указывают на характерные особенности в плотностях газа, отношения линий и/или хода лучевых скоростей; две наиболее длинные из них оканчиваются сверху в мини-полостях теплой пыли, почти невидимых в HI из-за худшего разрешения на 21 см, но ощутимых как локальные минимумы потоков от H $\alpha$  и как локальные максимумы отношения [SII]/H $\alpha$ .

что лучевые скорости убывают, а относительная интенсивность запрещенных эмиссионных линий возрастает в областях с низкой плотностью газа в NGC 6946, что и объясняет (но, возможно, лишь отчасти) особенности “глубокого провала” внутри пекулярного комплекса, отмеченные, но неразгаданные в нашей предыдущей работе [10].

Поскольку, как показано в работе [11], пекулярный комплекс содержит и расширяющиеся газовые оболочки, расширяющаяся к нам сторона одной из которых была обнаружена еще в 2002 г. [9], скорее всего, deep dip [10] реально существует. Однако параметры его и, прежде всего, реальная глубина “провала”, максимальная скорость приближения к нам оболочки его (или скорость одностороннего истечения газа из нее) еще должна быть оценена заново с учетом интенсивности и скорости ионизованного экстрапланарного газа Млечного пути, присутствие которого мы доказали в данной статье.

Размеры больших полостей (а в NGC 6946 почти всех) превышают толщину газового диска в спиральных галактиках, что является огромной трудностью для обычных теорий их образования. Как отмечают Боомсма и др. [2], лишь в двух-трех полостях NGC 6946 наблюдаются группировки горячих звезд, которые могут быть ответственными за их образование. Проблема изучается давно и интенсивно (см., например, [1, 3, 4]), но причины возникновения полостей остаются дискуссионными. Во всяком случае, гравитационный импакт мини-гало темной материи [7] представляется наиболее вероятной причиной образования полости № 85 и находящегося на ее краю пекулярного звездного комплекса [10].

## 7. ВЫВОДЫ

Итак, мы заключаем, что в полостях газопылевого диска NGC 6946 мы имеем возможность наблюдать EDIG/WIM этой галактики — экстрапланарный газ в проекции на плоскость галактики. Присутствие этого газа мы, конечно, можем заметить лишь в проекции на те области диска NGC 6946, в которых плотность (интенсивность излучения) находящегося в диске газа с “нормальными” отношениями линий мала, т.е. в проекции на полости диска. Нам пока неизвестно, наблюдалась ли такая “аномалия” величин отношения интенсивностей линий внутри полостей (точнее, по нашему предположению, в проекции на полости) в других галактиках. Для проверки наших выводов мы планируем аналогичные наблюдения нескольких близких спиральных галактик.

По всему диску NGC 6946 мы обнаружили две составляющие в лучевых скоростях линий ионизованного газа — помимо компоненты с изменяющейся интенсивностью и скоростью, повсеместно присутствует ионизованный газ с практически одинаковой лучевой скоростью, составляющей в среднем примерно  $-40$  км/с. Поток от составляющей с этой скоростью изменяется вдоль щели незначительно и хаотически, как и отношения линий, а ее спектральные характеристики близки к наблюдающимся у теплого диффузного газа высоко над плоскостью Галактики. Не подлежит сомнению, что эта компонента возникает в Млечном пути на высоких Z-координатах.

В проекции же на полости газопылевого диска NGC 6946 мы наблюдаем EDIG этой галактики, находящийся высоко над ее плоскостью, чем и объясняется типичное для EDIG/WIM отношение линий  $[SII]/H\alpha$ , превосходящее 0.4, которое наблюдается во всех полостях — во всех без исключения полостях всевозможных размеров (в том числе и столь малых, что они заметны только в тепловой пыли на изображениях, полученных с IR телескопом Spitzer).

Образование полостей (bubbles, holes, shells, supershells, cavities) в галактических дисках нейтрального водорода приписывается обычно выпадению на диск быстрых газовых облаков, либо воздействию на окружающий газ энергии взрывов сверхновых и звездного ветра от горячих звезд. Вторая гипотеза, однако, подтверждается лишь в немногих случаях и не проходит как общее правило; в частности против нее говорит не только обычное отсутствие внутри полости подходящих скоплений, но и то, что вокруг множества звездных скоплений подходящего возраста и светимости нет никаких полостей [6].

Приходится закончить статью констатацией, что мы обнаружили необходимость исключения излучения экстрапланарного газа нашей Галактики при изучении NGC 6946, но не нашли признаков расширения полостей/оболочек в газовом диске этой галактики, равно и как и свидетельств ударной ионизации у HII-областей, окаймляющих полости. Несколько неожиданно мы увидели эти свидетельства внутри полостей, а скорее всего над ними. Двойной заговор линий спектра ионизованного газа в NGC 6946, показывающих признаки ударного возбуждения не в тех областях, где они ожидалась, подлежит дальнейшему расследованию.

Работа основана на данных наблюдений, полученных на 6-м телескопе САО РАН, финансируемых Министерством науки России (регистрационный номер 01-43).

## БЛАГОДАРНОСТИ

Мы весьма признательны А. В. Моисееву за подробный критический отзыв на рукопись статьи, который привел к ее существенному усовершенствованию, особенно рисунков. О. В. Егоров благодарит за финансовую поддержку Российский Фонд Фундаментальных Исследований, проект № 10-02-00091 (руководитель Лозинская Т.А.) и фонд некоммерческих программ “Династия”, а Ю. Н. Ефремов — грант РФФИ 10-02-00178 (рук. А. Д. Чернин). Особо мы признательны Р. Боомсма, который на базе своих наблюдений на WSRT построил профили лучевых скоростей нейтрального водорода вдоль наших щелей.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. R. Boomsma, Thesis, <http://dissertations.ub.rug.nl/faculties/science/2007/r.boomsma/>
2. R. Boomsma et al., *Astronom. and Astrophys.* **490**, 555 (2008).
3. I. Bagetakos, E. Brinks, F. Walter, et al., *Astronom. J.* **141**, 23 (2011).
4. D. R. Weisz, E. V. Skillman, J. M. Cannon, et al., *Astrophys. J.* **704**, 1538 (2009).
5. G. Tenorio-Tagle and P. Bodenheimer, *ARA and A* **26**, 145 (1988).
6. Yu. N. Efremov, *Astronom. and Astrophys. Trans.* **21**, 251 (2002).
7. K. Bekki and M. Chiba, *Astrophys. J.* **637**, (2006).
8. S. Larsen, Yu. N. Efremov, B. G. Elmegreen, et al., *Astrophys. J.* **567**, 896 (2002).
9. Yu. N. Efremov, S. A. Pustilnik, A. Y. Kniazev, et al., *Astronom. and Astrophys.* **389**, 855 (2002).
10. Yu. N. Efremov, V. L. Afanasiev, E. J. Alfaro, et al., *Monthly Notices Roy. Astronom. Soc.* **382**, 481 (2007).
11. M. Carmen Sánchez Gil, E. J. Alfaro, and E. Pérez, *Astrophys. J.* **702**, 141 (2009).
12. N. M. McClure-Griffiths, A. Ford, D. J. Pisano, et al., *Astrophys. J.* **638**, 196 (2006).
13. V. L. Afanasiev and A. V. Moiseev, *Pis'ma Astronom. Zh.* **31**, 214 (2005).
14. F. Bonnarel et al., *Astronom. and Astrophys.* **189**, 59 (1988).
15. A. D. Chernin, Yu. N. Efremov, and P. A. Voinovich, *Monthly Notices Roy. Astronom. Soc.* **275**, 313 (1995).
16. A. Moiseev, I. Karachentsev, and S. Kaisin, *Monthly Notices Roy. Astronom. Soc.* **403**, 1849 (2010).
17. L. M. Haffner, R. J. Reynolds, S. L. Tufte, et al., *Astrophys. J. Suppl.* **149**, 405 (2003).
18. J. A. Collins and R. J. Rand, *Astrophys. J.* **551**, 57 (2001).
19. S. Silich, T. Lozinskaya, A. Moiseev, et al., *Astronom. and Astrophys.* **448**, 123 (2006).

## THE CHARACTERISTICS OF IONIZED GAS IN THE GAS-DUST DISK CAVITIES OF THE SPIRAL GALAXY NGC 6946

Yu.N. Efremov, V.L. Afanasiev, O.V. Egorov

The parameters of the ionized gas in NGC 6946 (in the [NII]  $\lambda\lambda 6548, 6583$ ,  $H_{\alpha}$  and [SII]  $\lambda\lambda 6717, 6731$  lines) are investigated with the SAO RAS BTA telescope along three positions of the long slit of the SCORPIO focal reducer, passing through a number of large and small cavities of the gaseous disc of the galaxy. These cavities correspond exactly to the cavities in warm dust, visible at  $5 - 8\mu\text{m}$ . We found that everywhere in the direction of NGC 6946 the lines of ionized gas are decomposed into two Gaussians, one of which shows almost constant [SII]/ $H_{\alpha}$  and [NII]/ $H_{\alpha}$  ratios, as well as an almost constant radial velocity within the measurement errors (about  $-35... - 50$  km/s). This component is in fact the foreground radiation from the diffuse ionized gas of our Galaxy, which is not surprising, given the low ( $12^{\circ}$ ) latitude of NGC 6946; a similar component is also present in the emission of neutral hydrogen. The analysis of the component of ionized gas, occurring in NGC 6946, has revealed that it shows signs of shock excitation in the cavities of the gaseous disc of the galaxy. This shock excitation is as well typical for the extraplanar diffuse ionized gas (EDIG), observed in a number of spiral galaxies at their high  $Z$ -coordinates. This can most likely be explained by low density of the gas in the NGC 6946 disc (with the usual photoionization) inside the cavities, due to what we see the spectral features of the EDIG gas of NGC 6946, projected onto them, and located outside the plane of the galaxy. In the absence of separation of ionized gas into two components by radial velocities, there is an increasing contribution to the integral line parameters by the EDIG of our Galaxy when the gas density in NGC 6946 decreases, which explains some strange results, obtained in the previous studies. The morphology of warm dust, visible in the infrared range and HI is almost the same (except for the peripheral parts of the galaxy, where there are no sources of dust heating). Moreover, the shock excitation of the ionized gas is detected in the smallest holes, distinguishable only in the IR images.

Key words: *galaxies: spiral—galaxies: structure—galaxies: individual: NGC 6946*