

УДК 524.74; 524.7-52/54

КИНЕМАТИКА И ПРОИСХОЖДЕНИЕ ГАЗА В ДИСКОВОЙ ГАЛАКТИКЕ NGC 2655

© 2022 О. К. Сильченко^{1*}, А. В. Моисеев^{1,2**}, А. С. Гусев^{1***}, Д. В. Козлова³

¹Государственный астрономический институт им. П. К. Штернберга Московского государственного университета имени М. В. Ломоносова, Москва, 119234 Россия

²Специальная астрофизическая обсерватория РАН, Нижний Архыз, 369167 Россия

³Институт астрофизики им. Лейбница, 14482 Потсдам, Германия

Поступила в редакцию 24 августа 2022 года; после доработки 29 сентября 2022 года;
принята к публикации 30 сентября 2022 года

Мы представляем новые наблюдательные данные для распределения, возбуждения и кинематики ионизованного газа в гигантской галактике раннего типа NGC 2655, полученные на 6-м телескопе Специальной астрофизической обсерватории РАН и на 2.5-м телескопе Кавказской горной обсерватории ГАИШ МГУ. Совместный анализ этих и более ранних спектральных наблюдений позволяет сделать вывод, что газ в NGC 2655 имеет множественное происхождение: на фоне собственного большого газового диска галактики, пребывающего в течение миллиардов лет в регулярном вращении в экваториальной плоскости гравитационного потенциала звездной компоненты, мы наблюдаем остатки от поглощенного малого спутника, упавшего вертикально на центральную часть NGC 2655 примерно 10 млн. лет назад.

Ключевые слова: галактики: раннего типа — галактики: эволюция — галактики: звездообразование: — галактики: индивидуальные: NGC 2655

1. ВВЕДЕНИЕ

Морфологический тип линзовидных галактик был введен Hubble (1936) как переходный между эллиптическими и спиральными галактиками: при наличии в структуре крупномасштабного звездного диска, линзовидные галактики тем не менее не обнаруживали в нем заметного звездообразования. На заре развития внегалактической астрономии выдвигалась естественная гипотеза, что в дисках линзовидных галактик не идет звездообразование, потому что там нет газа; а газа там нет потому, что его оттуда каким-то образом «убрали» — например, взаимодействием с горячей межгалактической средой в скоплении (Gunn and Gott 1972, Larson et al. 1980). Однако с тех пор парадигма эволюции спиральных (дисковых) галактик поменялась — стало ясно, что вся эволюция дисковых галактик сопровождается натеканием холодного газа извне, что восполняет любые его потери в диске, в частности — потери на звездообразование (Tacconi et al. 2020). Также и глубокие наблюдения в радиодиапазоне, как слепые обзоры вроде ALFALFA (Grossi

et al. 2009), так и целенаправленные исследования конкретных выборок галактик ранних типов, например, в обзоре ATLAS-3D (Serra et al. 2012), показали, что почти половина линзовидных галактик поля имеет массивные протяженные газовые диски. Почему же в этих дисках не идет такое же звездообразование, как в дисках спиральных галактик?

Исследования кинематики газа в линзовидных галактиках поля всегда показывали впечатляющий процент расогласованного вращения газа и звезд — от 24% (Kuijken et al. 1996) в ранних работах до 36% (Davis et al. 2011) и даже до половины всех линзовидных галактик в особо разреженном окружении (Katkov et al. 2015). Мы высказали предположение, что подавленное звездообразование в богатых газом линзовидных галактиках может быть связано с наклонным втеканием аккреционного потока: падающий под углом в потенциальную яму звездного диска газ формирует ударные волны, нагревается и становится неспособен формировать звезды. Мы проверили эту гипотезу на выборке из 18 линзовидных галактик с протяженными газовыми дисками, наблюдая их с панорамным спектрографом — сканирующим интерферометром Фабри–Перо 6-м телескопа САО РАН, —

*E-mail: olga@sai.msu.ru

**E-mail: moisav@gmail.com

***E-mail: gusev@sai.msu.ru

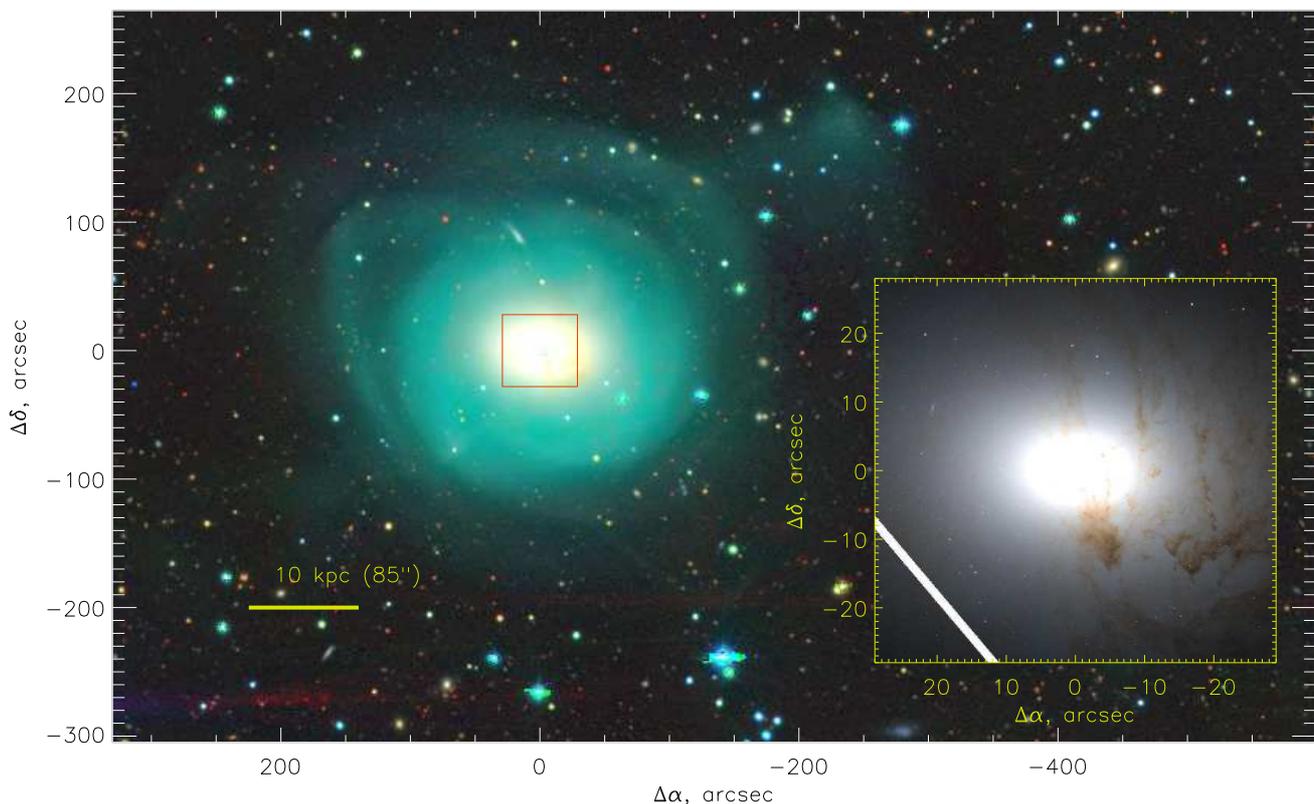


Рис. 1. Изображение NGC 2655 в оптических цветах по данным ресурса DESI Legacy Imaging Surveys. На врезке показана центральная часть галактики по данным камеры WFC3 космического телескопа им. Хаббла (комбинация изображений в фильтрах F814W и F555W). Видны асимметричные пылевые кольца от околоядерного газового диска.

построив двумерные карты лучевых скоростей и определив ориентацию вращающегося газа в пространстве, с изменением углов ориентации вдоль по радиусу галактики. И действительно, звездообразование (кольца звездообразования в линзовидных галактиках) оказалось заметно только на тех радиусах, где газ ложится в плоскость звездного диска. В то время как в наклонных газовых дисках звездообразование не идет (Sil'chenko et al. 2019).

Одним из объектов в нашей выборке Sil'chenko et al. (2019) была близкая гигантская линзовидная галактика NGC 2655. Ее изображения, как по данным наземных фотометрических наблюдений обзора BASS, так и композитное с высоким пространственным разрешением с космического телескопа им. Хаббла, представлены на рис. 1.

NGC 2655 — гигантская дисковая галактика в центре группы: при принятом сейчас расстоянии до галактики 24.4 Мпк (масштаб — 118 пк/угл. сек.), ее абсолютная звездная величина $M_K = -25^m$ (LEDA и NED) и масса звездного населения $2 \times 10^{11} M_\odot$ (Bouquin et al. 2018). В группу входит 6–7 галактик ярче $M_B = -15^m$, все — поздних типов (García 1993). При такой конфигурации можно ожидать, что все газовое

содержимое NGC 2655 может быть результатом поглощения центральной галактикой карликовых членов группы. И действительно, NGC 2655 богата нейтральным водородом: начиная с самых ранних обзоров, в галактике обнаруживалось до 3–6 миллиардов солнечных масс нейтрального водорода (Lewis and Davies 1973), организованного в диск с диаметром, в пять раз превышающим диаметр звездного диска (Huchtmeier and Richter 1982). Интегральные темпы звездообразования, оцениваемые по ультрафиолетовому изображению галактики по данным космического телескопа GALEX — $0.08 M_\odot$ в год (Bouquin et al. 2018), что помещает галактику существенно ниже главной последовательности, классифицируя ее как «галактику с подавленным звездообразованием» (Cortese et al. 2020). При этом надо отметить, что такие темпы звездообразования аномально низки для наблюдаемого содержания HI (Catinella et al. 2018). Картирование распределения плотности нейтрального водорода (Shane and Krumm 1983, Sparke et al. 2008) обнаруживает вытянутость проекции газового диска в позиционном угле примерно равным 110° ; соотношение этой ориентации с параметрами ориентации плоскости звездного диска будет предметом детального обсуждения

в нашей статье. Что касается кинематики звезд и газа, картированной для центральной части галактики методами панорамной спектроскопии, то в центре газ демонстрирует полярное вращение по отношению к звездам (Dumas et al. 2007, Sil'chenko and Afanasiev 2004).

Еще один пункт, на котором следует остановиться, — это активное ядро NGC 2655. Большинство исследователей вслед за нами (Sil'chenko and Burenkov 1990) считает ядро NGC 2655 сейфертовским II типа, но, например, Keel and Hummel (1988) отмечают сильную эмиссию [O I] λ 6300 в спектре ядра и классифицировали его как LINER. Ядро NGC 2655 показывает заметный поток в рентгене, в том числе в жестком (Terashima et al. 2002). Картирование ядра NGC 2655 с высоким разрешением в радиоконтинууме обнаруживает источник с крутым спектром, компактный и на длине волны 6 см, и на длине волны 20 см (Hummel et al. 1984), и из ядерного источника в направлении «запад–восток» выходит двусторонний джет, который, в конце концов, искривляется ближе к направлению «север–юг» (Ho and Ulvestad 2001). Возможно, именно джет возбуждает еще один компактный радиоисточник в $15''$ на юго-востоке от ядра с таким же крутым спектром, как и у ядра (Keel and Hummel 1988).

NGC 2655 представляет собой случай сильно наклоненного вращения газа в отсутствие всяческих признаков звездообразования, что имеет для нас особый интерес как классический случай линзовидной галактики с большим газовым диском. Однако полная картина распределения скоростей в протяженном газовом диске NGC 2655 не объясняется в рамках простой геометрической модели наклонной плоскости вращения. И скорости, и распределение яркости эмиссионных линий в этой галактике обнаруживают весьма сложную картину. Мы предприняли некоторые дополнительные наблюдения и сейчас готовы детально разобраться с тем, как и когда пришел газ в NGC 2655.

2. НОВЫЕ НАБЛЮДЕНИЯ

Галактике NGC 2655 мы уже посвятили несколько статей (Sil'chenko and Afanasiev 2004, Sil'chenko and Burenkov 1990, Sil'chenko et al. 2019), и у нас имелся на руках богатый набор спектральных наблюдательных данных, полученных ранее на 6-м телескопе БТА. Однако оставались непонятные моменты в интерпретации кинематики ионизованного газа, и, чтобы разобраться с ними, мы решили получить дополнительные наблюдательные данные.

2.1. Картирование в эмиссионных линиях

Мы получили изображение галактики с камерой NBI (Shatsky et al. 2020) в узком фильтре H α r, центрированном на комплекс ярких эмиссионных линий ионизованного газа H α + [N II] λ 6548, λ 6583 на 2.5-м телескопе Кавказской горной обсерватории ГАИШ МГУ (Shatsky et al. 2020) 10 января 2018 г. Качество изображений во время наблюдений составляло $2''5$. Центральная длина волны используемого фильтра — 6560 Å, ширина полосы пропускания — 77 Å, так что туда попадают и дублет линии [N II] λ 6548, λ 6583, и бальмеровская линия водорода; при этом особенностью NGC 2655 является то, что линия [N II] λ 6583 сильнее линии H α по всему телу галактики (Sil'chenko and Burenkov 1990). Суммарная экспозиция анализируемого изображения галактики в эмиссионных линиях — 25 минут. Масштаб изображения — $0''155$ на пиксель. Кроме фотометрирования в узком фильтре H α r, в течение 20 минут галактика еще экспонировалась в соседнем континууме (через фильтр шириной 100 Å, центрированном на λ 6430 Å), чтобы после вычитания изображения в континууме из изображения, полученного в фильтре H α r, можно было бы получить чистое распределение интенсивности эмиссионных линий. Результат этой процедуры показан на рис. 2 вместе с картой цвета $g-r$, рассчитанной по широкополосной фотометрии в обзоре BASS¹. Морфология изображения в эмиссионных линиях представляет собой узкую петлю, центр которой не совпадает с центром галактики, плюс компактную эмиссионную область в $15''$ на юго-востоке от ядра, которая ранее была детектирована в радиоизлучении в континууме (обозначена на нашей картинке как ESE). Пылевая (красная) петля обрисовывает внутренний край петли эмиссии газа, особо ярко выделяясь на юг от центра NGC 2655. Она, по-видимому, связана с ударными фронтами, порожденными столкновением наклонного ядерного газового диска с другим, более ранним по происхождению газом галактики, вероятно, лежащим в основной плоскости галактического диска: в ударных фронтах газ уплотняется, и связанная с ним пыль проявляет себя узкими красными полосками на картах цвета. Это хорошо видно, например, на кромках сильных баров в спиральных галактиках.

2.2. Спектроскопия с длинной щелью

Дополнительные спектральные данные с длинной щелью были получены 26 мая 2022 г. на

¹данные предоставлены ресурсом DESI Legacy Imaging Surveys на сайте legacysurvey.org

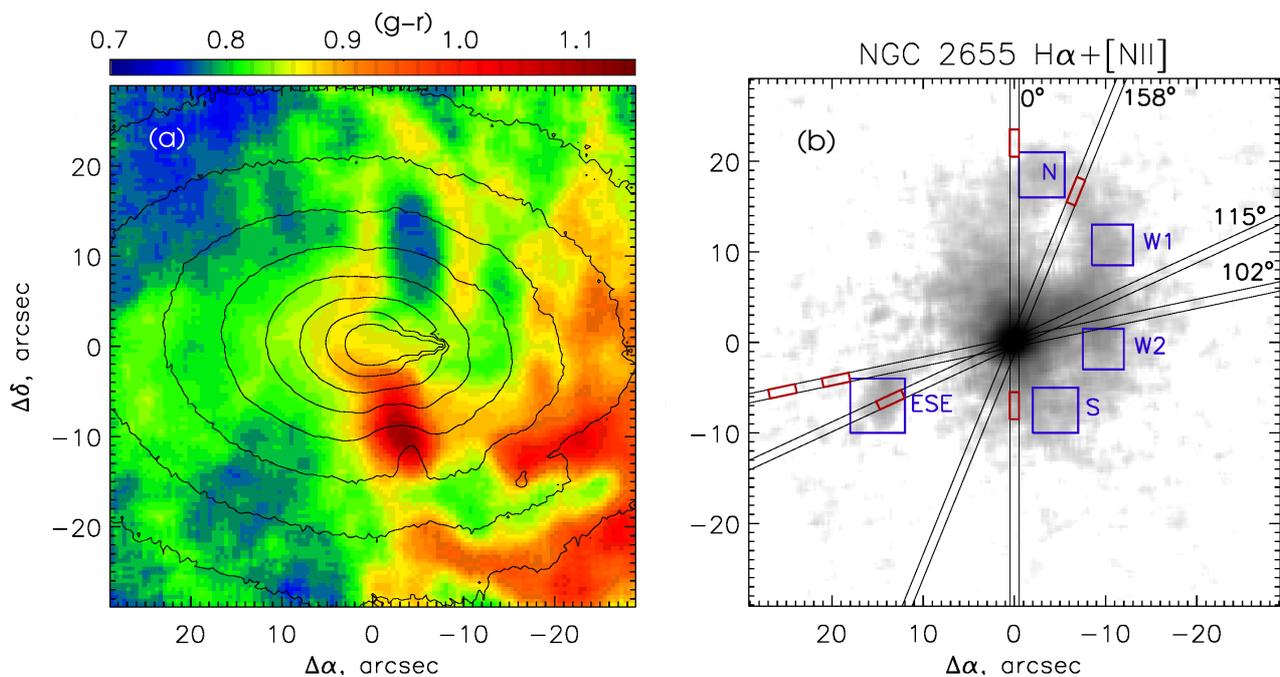


Рис. 2. Центральная часть галактики NGC 2655: (а) — в цвете $g-r$ по данным обзора BASS, (б) — в узком фильтре $H\alpha + [N II]$, полоса которого включает эмиссионные линии $H\alpha + [N II]$ $\lambda 6548, \lambda 6583$, с вычтенным континуумом — по данным, полученным нами на 2.5-м телескопе КГО ГАИШ. Синими квадратами отмечены части газовой структуры, выделенные для дальнейшего детального спектрального анализа. Черными линиями показано положение щелей спектрографа, указаны соответствующие позиционные углы. Красными прямоугольниками выделены области, для которых на рис. 3 рассмотрено состояние ионизации газа.

БТА — 6-м телескопе CAO РАН, с многорежимным фокальным редуктором SCORPIO-2 (Afanasiev and Moiseev 2011). Использовалась гризма VPHG1200@540 с максимумом чувствительности на $\lambda 5400 \text{ \AA}$, обеспечивавшая полный оптический диапазон спектральных наблюдений в интервале длин волн $3650\text{--}7300 \text{ \AA}$ с разрешением около 5 \AA . Щель шириной $1''$ была ориентирована в двух позиционных углах: в $PA = 115^\circ$, чтобы попасть на «радиогромкую» компактную эмиссионную область ESE (рис. 2), и в $PA = 158^\circ$, чтобы зацепить верхушку северной части околоядерной эмиссионной петли; времена экспозиции были равны 1600 с и 800 с соответственно. Качество изображений при спектральных наблюдениях 2022 г. составляло $2''.4$. Эти длиннощелевые разрезы, вместе с ранее полученными на том же приборе с той же гризмой разрезами в позиционных углах $PA = 102^\circ$ и $PA = 0^\circ$, использовались для измерения потоков различных эмиссионных линий и их отношений для выделенных областей на разных расстояниях от центра галактики и оценки лучевых скоростей газа и звезд.

3. ВОЗБУЖДЕНИЕ ИОНИЗОВАННОГО ГАЗА

Во многих предыдущих работах (например, Keel and Hummel 1988) отмечалось, что сильные эмиссионные линии в спектре ядра NGC 2655 показывают отношения потоков, характерные для активного ядра — сейфертовского II типа или LINER. Более того, Keel and Hummel (1988) на основании скромного по диапазону и отношению S/N спектра сгустка ESE заподозрили, что и спектр сгустка ESE, находящегося в 1.8 кпк от ядра, по рисунку отношений потоков в линиях очень похож на спектр ядра. Поскольку ограничения на энергетику ядра не позволяли проинтерпретировать ионизованный газ сгустка ESE как возбужденный излучением центральной машины активного ядра, было высказано предположение о том, что источником возбуждения газа здесь является ударная волна от джета активного ядра, вроде бы, согласно радиоинтерферометрии, развернутого в нужном направлении. Мы получили на 6-м телескопе БТА достаточно глубокие спектры при четырех разных ориентациях щели. Измерения отношений потоков эмиссионных линий в этих четырех спектрах показали, что характерное отношение потоков, с доминированием высоковозбужденной линии $[O III] \lambda 5007$, наблюдается по всему диску NGC 2655, не только в сгустке ESE, но и в полярной центральной петле

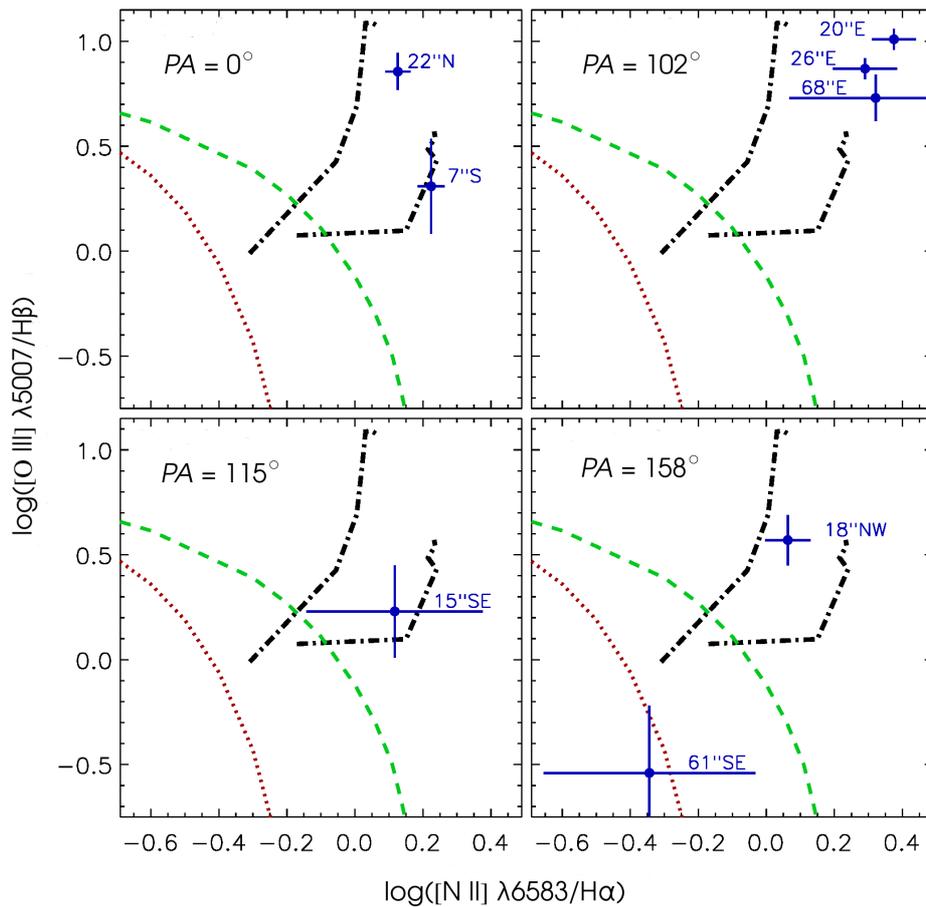


Рис. 3. Диагностические BPT-диаграммы для определения характера возбуждения ионизованного газа в четырех спектральных разрезах NGC 2655 с длинной щелью. Ориентация щели указана в левом верхнем углу каждого графика. Для каждой точки (эмиссионной области) отмечены расстояние от центра галактики (вдоль щели, то есть в проекции на картинную плоскость) и сторона щели (северная или южная, западная или восточная). Если эмиссионные области принадлежат диску галактики, то этим точкам соответствуют физические расстояния от ядра $30''$ и $9''$ ($PA = 0^\circ$) и $24''$ и $73''$ ($PA = 158^\circ$). Красная пунктирная и зеленая штриховая линии разграничивают положения эмиссионных областей, возбужденных молодыми звездами (слева и снизу от линии), от других механизмов возбуждения, согласно Kauffmann et al. (2003) и Kewley et al. (2001) соответственно. Штрихпунктирными линиями показаны модели возбуждения газа ударной волной — газа с солнечной металличностью и стандартной электронной плотностью $n = 1 \text{ см}^{-3}$ — из работы Allen et al. (2008). Вдоль каждой ломаной снизу вверх растет скорость ударной волны, от 200 км с^{-1} до 1000 км с^{-1} ; из двух ломаных правая соответствует ударной волне, распространяющейся в окружении низкой плотности, а левая — в уже возбужденном плотном газе (модель ударной волны вместе с прекурсором).

(сгустки N, W1, S), и в регулярном газовом диске NGC 2655 вплоть до расстояния 8 кпк от центра.

На рис. 3 мы показываем диагностические (BPT) диаграммы, сопоставляющие отношение высоковозбужденной линии $[\text{O III}] \lambda 5007$ к ближайшей линии водорода $\text{H}\beta$ и отношение низковозбужденной линии $[\text{N II}] \lambda 6583$ к соседней линии водорода $\text{H}\alpha$, для выделенных областей NGC 2655; BPT-диаграмма была предложена в работе Baldwin et al. (1981) для диагностики источника ионизации газа. Красная пунктирная и зеленая штриховая линии разграничивают положения эмиссионных областей, возбужденных молодыми звездами (слева и снизу от линии), от других

механизмов возбуждения, согласно Kauffmann et al. (2003) и Kewley et al. (2001) соответственно. Другие механизмы возбуждения — это ионизация либо степенным спектром активного ядра, либо ударной волной: BPT-диаграмма не позволяет различить эти два механизма. Поскольку исследуемые области располагаются на разных расстояниях от активного ядра, от 1 до 8 кпк, а отношения линий у всех областей похожие, очевидно, мы имеем дело с возбуждением газа ударной волной. Из восьми исследованных областей семь содержат газ, возбужденный именно ударной волной. Хотя области возбуждения ударной волной и сейфертовским ядром на BPT-диаграммах перекрываются, но в данном

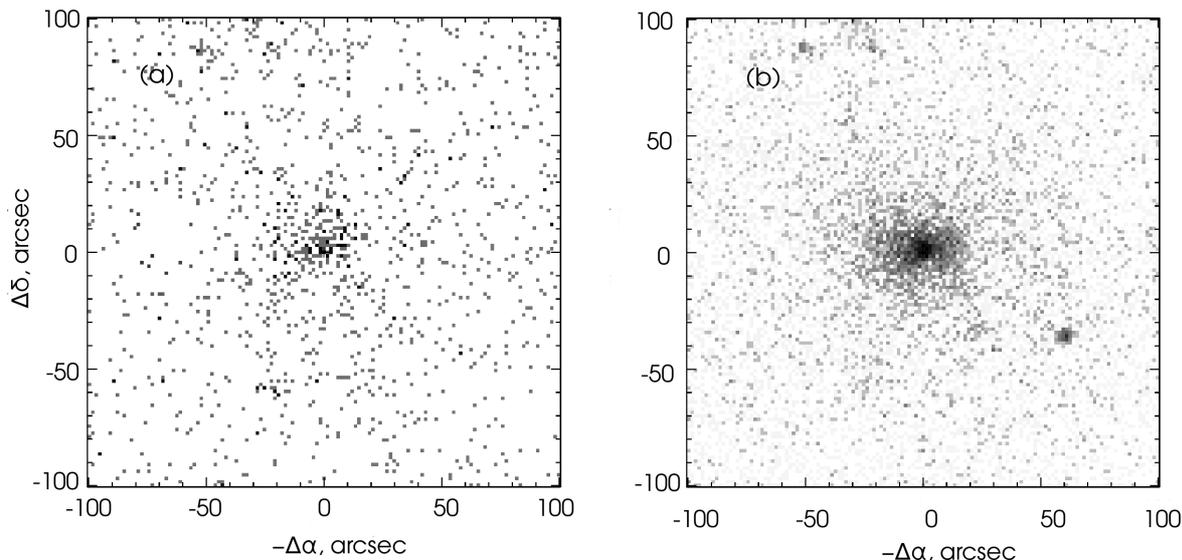


Рис. 4. Ультрафиолетовые карты NGC 2655 по данным космического телескопа GALEX: (a) — карта в далеком ультрафиолете, $\lambda \approx 1500 \text{ \AA}$, (b) — карта в ближнем ультрафиолете, $\lambda \approx 2300 \text{ \AA}$.

случае речь идет о возбуждении газа на большом расстоянии от центра, а в свое время еще Keel and Hummel (1988) оценили, что энергии излучения активного ядра NGC 2655 не хватает даже для возбуждения области ESE в $15''$ от центра, не говоря уже о более удаленных областях. В ориентации $PA = 102^\circ$ можно увидеть, как тормозится ударная волна с удалением от центра: если сравнивать отношения линий с моделями Allen et al. (2008), то от точки $r = 20''$ до точки $r = 60''$ скорость ударной волны падает на 150 km s^{-1} . И лишь одна область — в 7 кпк на юг от центра в $PA = 158^\circ$ — возбуждена молодыми звездами. Эта компактная область расположена на периферии внешнего диска и заметна также в ультрафиолете (рис. 4). Поскольку газ в этой области ионизован молодыми звездами, мы можем оценить его металличность по отношениям потоков сильных линий, калиброванным с помощью детально отмоделированных спектров HII-областей. Мы использовали два популярных источника таких калибровок и получили для NGC 2655 оценки обилия кислорода в газе: $12 + \lg(\text{O}/\text{H}) = 8.58 \pm 0.18 \text{ dex}$ по индикатору N2 и $12 + \lg(\text{O}/\text{H}) = 8.58 \pm 0.16 \text{ dex}$ по индикатору O3N2 (Marino et al. 2013), либо же $12 + \lg(\text{O}/\text{H}) = 8.71 \pm 0.18 \text{ dex}$ по индикатору N2 и $12 + \lg(\text{O}/\text{H}) = 8.79 \pm 0.21 \text{ dex}$ по индикатору O3N2 (Pettini and Pagel 2004). Несмотря на невысокую точность этих оценок, мы все же можем констатировать, что металличность газа примерно солнечная — и это на периферии диска галактики!

4. ДЕТАЛЬНАЯ КИНЕМАТИКА ГАЗА

Ранее мы неоднократно указывали на полярное вращение газа в центральной области NGC 2655 (Sil'chenko and Afanasiev 2004, Sil'chenko et al. 2019). Отметим, что реальная картина кинематики газа на полном протяжении галактики может быть гораздо сложнее, чем просто разворот плоскости вращения на 90° . Так, нейтральный водород за пределами звездного диска скорее вращается круговым образом согласно видимой ориентации диска на 90° ; Sparke et al. (2008) предлагали модель с плавным разворотом газового диска при приближении к центру галактики. Наши данные по ионизованному газу в самых внешних областях диска, на $R > 40''$, тоже вроде бы согласуются со звездной кинематикой (Sil'chenko et al. 2019). Однако обилие деталей в распределении поверхностной яркости эмиссионных линий на рис. 2 скорее свидетельствует не о плавном искривлении газового диска, а о наличии на луче зрения нескольких газовых подсистем с разной кинематикой. Эта последняя гипотеза согласуется и с ударным возбуждением газа на всем протяжении диска NGC 2655.

Воспользовавшись достаточно высоким спектральным разрешением наших данных, полученных со сканирующим интерферометром Фабри—Перо, мы во втором подходе к их анализу решили повнимательнее рассмотреть профили линий — конкретно, профили эмиссионной линии $[\text{O III}] \lambda 5007$, в узком диапазоне вокруг которой и сканировался спектр ионизованного газа по всему телу NGC 2655 с интерферометром Фабри—Перо.

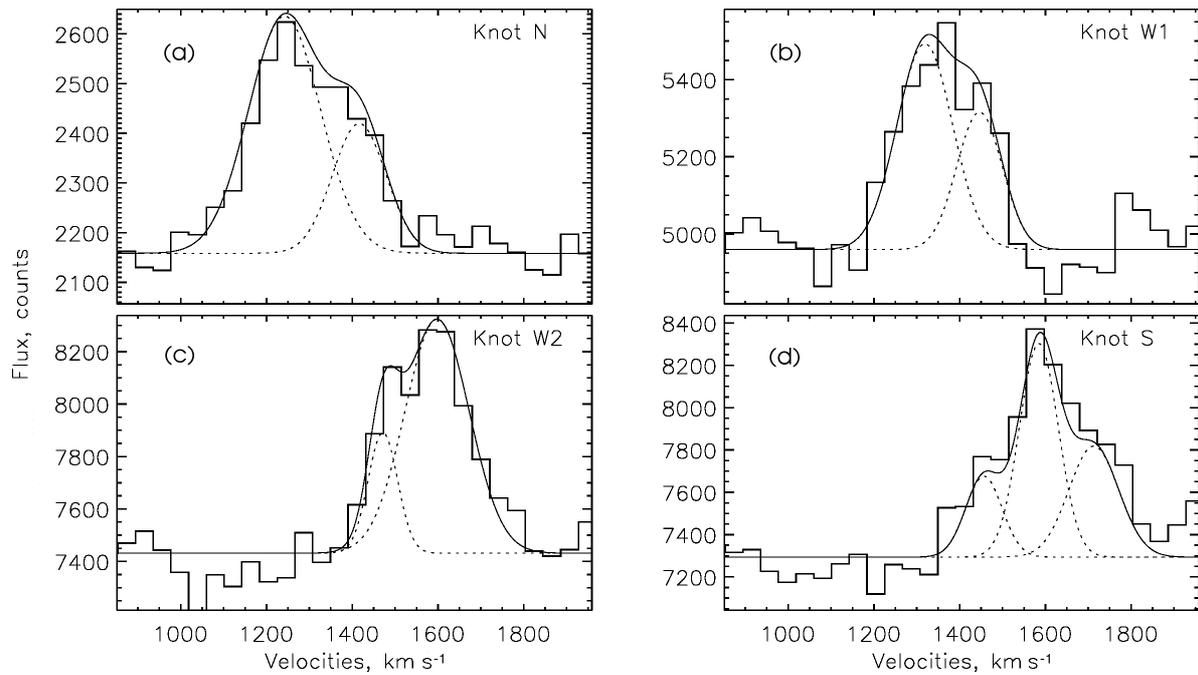


Рис. 5. Гаусс-анализ профиля эмиссионной линии [O III] λ 5007 для четырех компактных эмиссионных областей, обозначенных на рис. 2 как N, W1, W2 и S — панели (a), (b), (c) и (d) соответственно. Три первых области показывают наличие двух кинематических компонент каждая, со скоростями $1196 \pm 12 \text{ км с}^{-1}$ и $1371 \pm 16 \text{ км с}^{-1}$ (N), $1273 \pm 33 \text{ км с}^{-1}$ и $1401 \pm 37 \text{ км с}^{-1}$ (W1), $1560 \pm 6 \text{ км с}^{-1}$ и $1431 \pm 6 \text{ км с}^{-1}$ (W2) соответственно. Южный сгусток обнаруживает три компоненты скорости: $1539 \pm 11 \text{ км с}^{-1}$, $1667 \pm 32 \text{ км с}^{-1}$ и $1410 \pm 120 \text{ км с}^{-1}$.

Профили оказались сложными и многокомпонентными. На рис. 5 представлены примеры гаусс-анализа² этих профилей для областей петли, обозначенных как N, W1, W2, S на рис. 2. В каждой области мы можем выделить минимум две компоненты с разными лучевыми скоростями. В областях N и S более сильные компоненты соответствуют скоростям полярного вращения петли; но есть и слабые компоненты, близкие к системной скорости галактики 1400 км с^{-1} , ожидающиеся от газа на малой оси диска. Очевидно, слабые компоненты соответствуют вращению газа, лежащего в плоскости звездного диска, большая ось изофот которого (линия узлов) примерно соответствует направлению запад–восток.

Для «радиогромкой» отдельной эмиссионной области ESE, располагающейся в $15''$ (1.8 кпк) на юго-востоке от ядра, на рис. 6 показаны результаты гаусс-анализа трех линий — кислорода по данным Фабри–Перо и водорода и дублета азота по данным длиннощелевой спектроскопии.

²Отметим, что хотя инструментальный профиль ИФП отличается от гауссовского и описывается профилем Фойгта (Moiseev and Egorov 2008), в случае данного ИФП с относительно низким разрешением, наблюдаемые профили линий мало отличаются от гауссовского, что хорошо видно на рис. 5.

Хотя слабая компонента измеряется с невысокой точностью, но по всем трем линиям получается, что в области присутствует газ с лучевой скоростью около 1700 км с^{-1} — на 300 км с^{-1} больше, чем системная скорость галактики. Газ с похожей скоростью наблюдается на юго-западном краю газового диска по данным Фабри–Перо (Sil'chenko et al. 2019), и эта скорость не укладывается ни в одну из моделей кругового вращения. Вероятно, что касается сгустка ESE, речь идет о компактном остатке спутника, врезавшегося в диск NGC 2655 с высокой скоростью $400\text{--}500 \text{ км с}^{-1}$, почти перпендикулярно звездному диску. Вся конфигурация с разрушенным спутником и полярной околоядерной петлей внешне напоминает разрушенный, растянутый в полярный поток спутник Sgr в нашем Млечном Пути (Ibata et al. 2001, Laporte et al. 2018). А собственный газ NGC 2655, по которому в центре «ударил» упавший спутник, должен был потерять момент в ударной волне и упасть на ядро; возможно, это и запитало текущую активность ядра.

5. ОБСУЖДЕНИЕ

5.1. Структура и звездная кинематика NGC 2655

NGC 2655 — гигантская дисковая галактика раннего типа. Обычно считается, что у таких га-

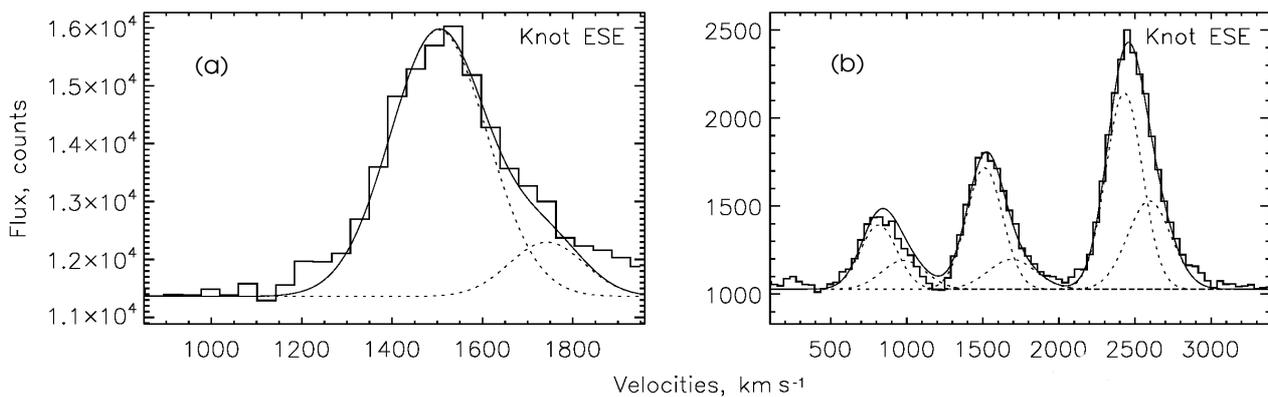


Рис. 6. Гаусс-анализ профилей эмиссионных линий для сгустка ESE: профиль $[O\ III]\lambda 5007$ по данным Фабри–Перо дает скорости 1499 ± 99 км с⁻¹ и 1737 ± 377 км с⁻¹ (а), по данным разреза с длиной щелью скорости газа по профилю $H\alpha$ равны 1517 ± 35 км с⁻¹ и 1730 ± 295 км с⁻¹, а по профилю дублета однажды ионизованного азота — 1490 ± 36 км с⁻¹ и 1677 ± 138 км с⁻¹ (б). Шкалы лучевых скоростей приведены для линии $[O\ III]\lambda 5007$ и $H\alpha$ соответственно.

лактик должен быть очень большой, доминирующий балдж. Детальный морфологический анализ и декомпозиция изображения галактики на компоненты, предпринятая опытной финской командой фотометристов в рамках обзора галактик S4G (Sheth et al. 2010), показали, что диск вкладывает в инфракрасную светимость (и, очевидно, в звездную массу) не более 42% (Salo et al. 2015). Согласно проведенной декомпозиции, экспоненциальный диск начинает доминировать в галактике на радиусе $R > 50''$, а ближе к центру профиль поверхностной яркости состоит из суммарного излучения балджа и бара. Почему команда Salo et al. (2015) решила, что у NGC 2655 есть бар, хотя галактика ни в одном каталоге не классифицирована как SB? Потому что ориентация большой оси изофот внутренних компонент — балджа, $PA = 82^\circ$, и бара, $PA = 85.6^\circ$, — отличается от ориентации самых внешних изофот диска, $PA = 110^\circ$, которые принято отождествлять с ориентацией линии узлов. В результате депроецирования изображения NGC 2655 в обзоре S4G, предпринятого командой Salo et al. (2015) именно с ориентацией линии узлов $PA = 110^\circ$, получается картинка галактики с некруглыми внутренними компонентами, одну из которых команда Salo et al. (2015) посчитала триаксиальным балджем, а другую — баром.

Мы не согласны с такой трактовкой структуры NGC 2655. Дело в том, что со спектрографом интегрального поля SAURON была измерена и опубликована двумерная карта лучевых скоростей звезд — проекций на луч зрения скоростей вращающегося в центре галактики звездного компонента (Dumas et al. 2007). Мы проанализировали это поле скоростей методом наклонных колец и нашли ориентацию линии узлов плоскости вращения звездного компонента $PA = 263^\circ \pm 3^\circ$ вплоть до расстояния от центра $25''$. Dumas et al. (2007)

методом кинеметрии по этим же данным получили $PA = 266^\circ \pm 1^\circ$. Точное совпадение ориентаций фотометрической и кинематической больших осей доказывает, что звезды в центре NGC 2655 вращаются по круговым орбитам в осесимметричной потенциале: никакого бара у галактики нет.

На самом деле, решающим признаком тонкого звездного диска является его динамическая холодность: когда скорость вращения в разы превосходит дисперсию скоростей звезд. На рис. 7 представлен профиль измеренной нами дисперсии скоростей звезд вдоль разреза с длиной щелью в $PA = 102^\circ$. Измерения параметров звездной кинематики выполнялись кросс-корреляционным методом, аналогично тому, как это сделано нами в работе Sil'chenko et al. (2019). Уже на радиусе $R = 30''$ дисперсия скоростей звезд падает до 50 км с⁻¹: это локация начала доминирования тонкого звездного диска. На рис. 8 мы показали и декомпозицию профиля поверхностной яркости, которая согласуется со столь близким к центру доминированием диска: диск у NGC 2655 имеет профиль III типа, то есть состоит из двух экспоненциальных сегментов, внутреннего с меньшим характерным масштабом и внешнего (который находили и в обзоре S4G) — с большим.

Итак, можно сказать, что у NGC 2655 два экспоненциальных диска: у них разные характерные масштабы, но у них также и разные ориентации большой оси изофот. При этом ориентация большой оси внутренних изофот поддерживается кинематикой: как показывает анализ двумерного поля скоростей, это действительно линия узлов плоскости кругового вращения. Что касается внешнего диска, для которого в обзоре S4G найдена ориентация фотометрической большой оси $PA = 110^\circ$, тут мы не можем сравниться с ориентацией кинематической большой оси полноценно:

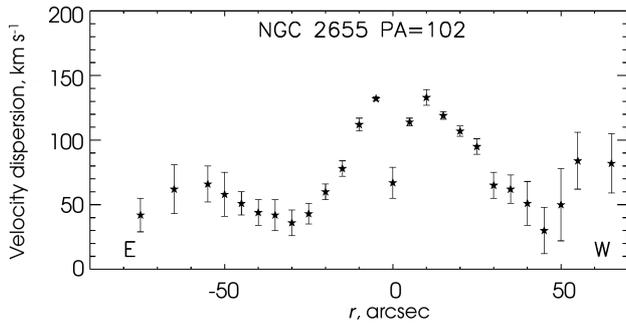


Рис. 7. Профиль дисперсии скоростей звезд в разрезе $PA = 102^\circ$ по данным длиннощелевой спектроскопии.

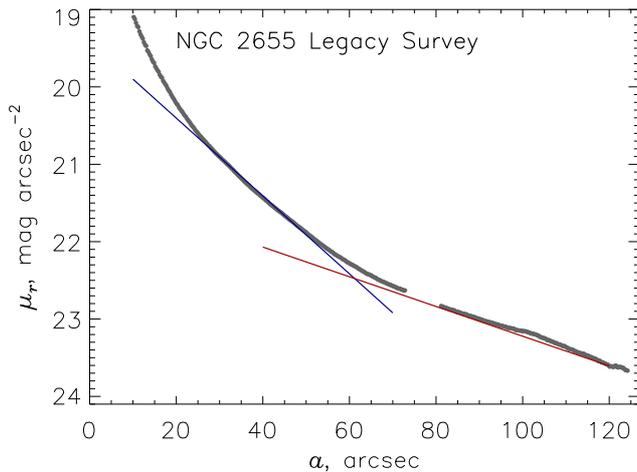


Рис. 8. Азимутально-усредненный профиль поверхностной яркости NGC 2655 по данным обзора BASS, с двумя вписанными экспоненциальными сегментами $\mu_r = 19.4 + 1.086R''/21.6''$ в интервале $R = 26''-50''$ и $\mu_r = 21.3 + 1.086R''/56.5''$ в интервале $R = 70''-120''$.

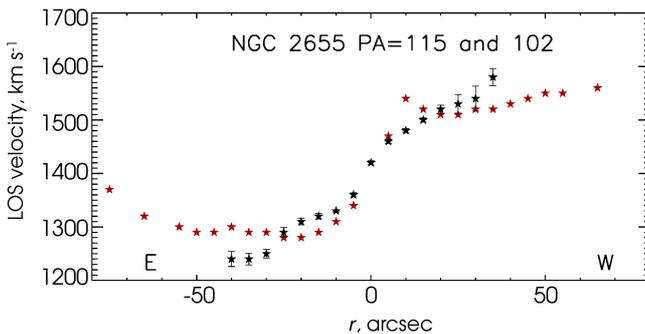


Рис. 9. Профиль лучевых скоростей звездного компонента вдоль двух ориентаций, близких к фотометрической большой оси: красные звездочки — $PA = 102^\circ$, черные звездочки — $PA = 115^\circ$.

отсутствует двумерное поле скоростей звезд. Но у нас есть длиннощелевые разрезы в разной ориентации щели. На рис. 9 сравниваются профили

лучевых скоростей звездного компонента в ориентации щели $PA = 102^\circ$ и $PA = 115^\circ$. Мы можем отметить, что на радиусе $R = 40''$ проекция скорости вращения на луч зрения больше в $PA = 115^\circ$, чем в $PA = 102^\circ$. Это означает, что кинематическая большая ось во внешнем звездном диске ближе к $PA = 115^\circ$, чем к $PA = 102^\circ$, что исключает ориентацию линии узлов $PA = 83^\circ \pm 3^\circ$, найденную для внутреннего диска. В то же время фотометрическая большая ось $PA = 110^\circ$ может быть ориентацией линии узлов внешнего диска — наши кинематические разрезы с длинной щелью не исключают этого. Получается, что внутренняя и внешняя оси вращения звездного диска NGC 2655 наклонены друг к другу — это то, что в англоязычной литературе называется multi-spin.

5.2. Происхождение газа в NGC 2655

Ориентация огромного диска нейтрального водорода и внешнего звездного диска в NGC 2655 согласуются между собой и пространственно, и кинематически. Ранее Sparke et al. (2008) отмечали, что два миллиарда солнечных масс газа — это слишком много для одного малого мерджинга, и нужно несколько таких событий (но с одинаковой ориентацией орбит, ведь весь газ вращается в одной плоскости). Теперь мы понимаем, что эти множественные малые слияния должны были принести не только несколько миллиардов солнечных масс газа, но и несколько миллиардов солнечных масс звезд для внешнего звездного диска NGC 2655, что делает предполагаемый множественный малый мерджинг уж совсем грандиозным — и невероятным — событием. В отличие от Sparke et al. (2008), мы заключаем, что внешний газовый диск лежит внутри внешнего звездного диска, и в нем даже местами идет звездообразование: в южном рукаве мы детектируем соответствующую эмиссию газа, возбужденного молодыми звездами, а в северной «дуге» виден избыток ультрафиолета (рис. 4). Металличность газа в этом внешнем диске — солнечная, что нетипично для карликовых галактик, которые Sparke et al. (2008) предлагали в качестве источника газового диска NGC 2655. Вся внешняя конфигурация галактики напоминает классический большой диск спиральной галактики, который по современным представлениям «собирается» в течение миллиардов лет плавной внешней аккрецией холодного газа (Tassoni et al. 2020) — правда, из не определенного в глобальном масштабе источника.

Но малый мерджинг в NGC 2655 все же несомненно имел место. Он принес с собой также заметное количество газа, с кинематикой, существенно отличающейся от регулярного вращения внешнего диска. Судя по всему, спутник падал на галактику практически вертикально, и сейчас в пределах

двух килопарсеков от центра мы наблюдаем остатки разорванного спутника в виде околополярной петли — картина очень похожа на разорванный Млечным Путем Sagittarius, только в данном случае в упавшем спутнике было намного больше газа. Газ падающего вертикально спутника ударялся о газовый диск самой NGC 2655, пребывавший в регулярном вращении, и это столкновение неизбежно приводило к развитию ударных фронтов. Ударная волна не только возбудила газ в полярной петле — она «побежала» наружу по большому газовому диску галактики. На расстояниях до 8 кпк от центра мы наблюдаем газ большого диска, возбужденный этой ударной волной — хотя кинематика этого газа на восток от ядра пострадала мало и демонстрирует вращение, согласующееся с вращением звездного диска. Если ударная волна распространялась со средней скоростью 1000 км с^{-1} , то импакт мог состояться примерно 10^7 лет назад.

БЛАГОДАРНОСТИ

Мы получили часть наблюдательных данных на уникальной научной установке Большой телескоп альт-азимутальный САО РАН. Наблюдения на телескопах САО РАН выполняются при поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации. Обновление приборной базы осуществляется в рамках национального проекта «Наука и университеты». В работе мы пользовались данными базы внегалактических данных NED (NASA/IPAC), которая управляется Лабораторией реактивного движения и Калифорнийским технологическим институтом, по контракту с НАСА. Мы использовали публичные данные космического телескопа им. Хаббла, взятые из Hubble Legacy Archive (коллаборация Telescope Science Institute, the Space Telescope European Coordinating Facility и Canadian Astronomy Data Centre), данные космического телескопа GALEX (NASA Galaxy Evolution Explorer), управлявшегося Калифорнийским технологическим институтом по контракту с НАСА номер NAS5-98034. Данные GALEX взяты из публичного архива MAST (Mikulski Archive for Space Telescopes), который поддерживается космическим офисом НАСА по гранту NNX13AC07G и другим грантам. Данные оптической фотометрии предоставлены сервисом Legacy Survey по данным обзора BASS. BASS — это ключевой проект китайской Программы доступа к телескопам (TAP), который финансируется Национальными астрономическими обсерваториями Китая, Китайской Академией наук (исследовательская стратегически приоритетная программа «Появление космологических структур», грант номер XDB09000000), и специальным

фондом для астрономии Министерства финансов. BASS также поддерживается Программой внешней кооперации Китайской Академии наук (грант № 114A11KYSB20160057) и Китайским национальным фондом естественных наук (гранты № 12120101003 и № 11433005).

ФИНАНСИРОВАНИЕ

Спектральные наблюдения и анализ данных выполнены при поддержке гранта Российского научного фонда № 22-12-00080. Фотометрические наблюдения в узких фильтрах поддерживались грантом РФФИ № 20-02-00080.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. V. L. Afanasiev and A. V. Moiseev, *Baltic Astronomy* **20**, 363 (2011).
2. M. G. Allen, B. A. Groves, M. A. Dopita, et al., *Astrophys. J. Suppl.* **178** (1), 20 (2008).
3. J. A. Baldwin, M. M. Phillips, and R. Terlevich, *Publ. Astron. Soc. Pacific* **93**, 5 (1981).
4. A. Y. K. Bouquin, A. Gil de Paz, J. C. Muñoz-Mateos, et al., *Astrophys. J. Suppl.* **234** (2), article id. 18 (2018).
5. B. Catinella, A. Saintonge, S. Janowiecki, et al., *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **476** (1), 875 (2018).
6. L. Cortese, B. Catinella, R. H. W. Cook, and S. Janowiecki, *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **494** (1), L42 (2020).
7. T. A. Davis, K. Alatalo, M. Sarzi, et al., *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **417** (2), 882 (2011).
8. G. Dumas, C. G. Mundell, E. Emsellem, and N. M. Nagar, *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **379** (4), 1249 (2007).
9. A. M. Garcia, *Astron. and Astrophys. Suppl.* **100**, 47 (1993).
10. M. Grossi, S. di Serego Alighieri, C. Giovanardi, et al., *Astron. and Astrophys.* **498** (2), 407 (2009).
11. J. E. Gunn and J. R. Gott, III, *Astrophys. J.* **176**, 1 (1972).
12. L. C. Ho and J. S. Ulvestad, *Astrophys. J. Suppl.* **133** (1), 77 (2001).
13. E. P. Hubble, *Realm of the Nebulae* (Yale University Press, New Haven, 1936).
14. W. K. Huchtmeier and O. G. Richter, *Astron. and Astrophys.* **109**, 331 (1982).
15. E. Hummel, J. M. van der Hulst, and J. M. Dickey, *Astron. and Astrophys.* **134**, 207 (1984).
16. R. Ibata, M. Irwin, G. F. Lewis, and A. Stolte, *Astrophys. J.* **547** (2), L133 (2001).

17. I. Y. Katkov, A. Y. Kniazev, and O. K. Sil'chenko, *Astron. J.* **150** (1), article id. 24 (2015).
18. G. Kauffmann, T. M. Heckman, C. Tremonti, et al., *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **346** (4), 1055 (2003).
19. W. C. Keel and E. Hummel, *Astron. and Astrophys.* **194**, 90 (1988).
20. L. J. Kewley, M. A. Dopita, R. S. Sutherland, et al., *Astrophys. J.* **556** (1), 121 (2001).
21. K. Kuijken, D. Fisher, and M. R. Merrifield, *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **283** (2), 543 (1996).
22. C. F. P. Laporte, K. V. Johnston, F. A. Gómez, et al., *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **481** (1), 286 (2018).
23. R. B. Larson, B. M. Tinsley, and C. N. Caldwell, *Astrophys. J.* **237**, 692 (1980).
24. B. M. Lewis and R. D. Davies, *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **165**, 213 (1973).
25. R. A. Marino, F. F. Rosales-Ortega, S. F. Sánchez, et al., *Astron. and Astrophys.* **559**, id. A114 (2013).
26. A. V. Moiseev and O. V. Egorov, *Astrophysical Bulletin* **63**, 181 (2008).
27. M. Pettini and B. E. J. Pagel, *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **348** (3), L59 (2004).
28. H. Salo, E. Laurikainen, J. Laine, et al., *Astrophys. J. Suppl.* **219** (1), 4 (2015).
29. P. Serra, T. Oosterloo, R. Morganti, et al., *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **422** (3), 1835 (2012).
30. W. W. Shane and N. Krumm, *IAU Symp.* **100**, pp. 105–106 (1983).
31. N. Shatsky, A. Belinski, A. Dodin, et al., in *Proc. All-Russian Conf. on Ground-Based Astronomy in Russia. 21st Century*, Nizhny Arkhyz, Russia, 2020, Ed. by I. I. Romanyuk, I. A. Yakunin, A. F. Valeev, and D. O. Kudryavtsev, pp. 127–132 (IP Reshenilenko P.A., Pyatigorsk, 2020).
32. K. Sheth, M. Regan, J. L. Hinz, et al., *Publ. Astron. Soc. Pacific* **122** (898), 1397 (2010).
33. O. K. Sil'chenko and V. L. Afanasiev, *Astron. J.* **127** (5), 2641 (2004).
34. O. K. Sil'chenko and A. N. Burenkov, *Astron. and Astrophys.* **233**, 314 (1990).
35. O. K. Sil'chenko, A. V. Moiseev, and O. V. Egorov, *Astrophys. J. Suppl.* **244** (1), article id. 6 (2019).
36. L. S. Sparke, G. van Moorsel, P. Erwin, and E. M. H. Wehner, *Astron. J.* **135** (1), 99 (2008).
37. L. J. Tacconi, R. Genzel, and A. Sternberg, *Annual Rev. Astron. Astrophys.* **58**, 157 (2020).
38. Y. Terashima, N. Iyomoto, L. C. Ho, and A. F. Ptak, *Astrophys. J. Suppl.* **139** (1), 1 (2002).

The Gas Kinematics and Origin in the Disk Galaxy NGC 2655

O. K. Sil'chenko¹, A. V. Moiseev^{1,2}, A. S. Gusev¹, and D. V. Kozlova³

¹Sternberg Astronomical Institute, Moscow State University, Moscow, 119234 Russia

²Special Astrophysical Observatory, Russian Academy of Sciences, Nizhnii Arkhyz, 369167 Russia

³Leibniz-Institut für Astrophysik (AIP), An der Sternwarte 16, 14482 Potsdam, Germany

The new observational data concerning distribution, excitation, and kinematics of the ionized gas in the giant early-type galaxy NGC 2655 obtained at the 6m telescope of the Special Astrophysical Observatory (SAO RAS) and at the 2.5m telescope of the Caucasian Mountain Observatory (CMO SAI MSU) are presented in this work. The joint analysis of these and earlier spectral observations has allowed us to make a conclusion about multiple nature of the gas in NGC 2655. Together with a proper large gaseous disk experiencing regular circular rotation in the equatorial plane of the stellar potential of the galaxy for billions years, we observe also remnants of a merged small satellite having struck the central part of NGC 2655 almost vertically for some 10 million years ago.

Keywords: *galaxies: early-type—galaxies: evolution—galaxies: star formation—galaxies: individual: NGC 2655*