

УДК 524.7-54

КИНЕМАТИКА ГАЗА В ГАЛАКТИКЕ МАГЕЛЛАНОВА ТИПА NGC 7292

© 2023 А. С. Гусев^{1*}, А. В. Моисеев^{1,2**}, С. Г. Желтоухов¹¹Государственный астрономический институт им. П. К. Штернберга Московского государственного университета имени М. В. Ломоносова, Москва, 119234 Россия²Специальная астрофизическая обсерватория РАН, Нижний Архыз, 369167 Россия

Поступила в редакцию 22 апреля 2023 года; после доработки 5 июня 2023 года; принята к публикации 6 июня 2023 года

Представлены результаты исследования кинематики ионизованного газа в галактике типа Большого Магелланова облака NGC 7292, полученные на 2.5-м телескопе Кавказской горной обсерватории ГАИШ МГУ и 6-м телескопе Специальной астрофизической обсерватории РАН. Анализ полей скоростей ионизованного и нейтрального водорода показал, что кинематический центр NGC 7292 находится в центре перемычки, к северо-западу от фотометрического центра галактики (юго-восточный конец бара), принимаемого ранее за центр NGC 7292. Кроме кругового вращения газа, в кинематике диска заметную роль играют радиальные движения, связанные с баром. Наблюдаемые возмущения кинематики газового диска, вызванные воздействием текущего звездообразования, не превышают тех, что производятся баром. Вероятно, часть некруговых движений (в юго-восточном конце перемычки — ярчайшей области Н II) может быть связана с последствиями захвата карликового компаньона или газового облака.

Ключевые слова: галактики: неправильные — галактики: эволюция — межзвездная среда: кинематика — галактики: индивидуальные: NGC 7292

1. ВВЕДЕНИЕ

Дисковые галактики крайне поздних типов промежуточных масс, ближайшим аналогом которых является Большое Магелланово облако, представляют из себя относительно редкий класс галактик. Имея, в большинстве случаев, асимметричную форму, они являются продуктом сложных эволюционных процессов: взаимодействий с крупными соседями или возможных слияний со спутниками (см., например, Zaritsky, 2009; Besla et al., 2012; Yozin and Bekki, 2014; Harris and Koch et al., 2015; Pardy et al., 2016; Siejkowski et al., 2018). Одной из таких звездных систем является близкая, но относительно малоизученная галактика NGC 7292; согласно базе данных NED¹, ее относят к IBm типу (рис. 1).

Галактика выделяется мощным баром, смещенным относительно диска. На концах бара расположены крупные области звездообразования — ярчайшие зоны в коротковолновых оптических полосах (U , B) и в линии $H\alpha$ (рис. 1). За центр галактики обычно принимают юго-восточную часть бара (см., например, базу данных NED), хотя еще Gusev

and Esipov (1996) на основе данных многоцветной поверхностной фотометрии предположили, что центром NGC 7292 является центр бара.

Параметры галактики определены недостаточно надежно. Согласно базе данных LEDA² ее абсолютная звездная величина $M(B)_0^i = -16.7 \pm 1.0$, позиционный угол равен 113° , а наклон диска составляет 54.4° . На расчет последних двух параметров определяющую роль играет бар, подавляющий излучение более слабого диска. Расстояние до NGC 7292 также остается открытым вопросом (см. оценки расстояния в NED), притом что радиальная скорость галактики относительно Солнца (986 км с^{-1}) определена достаточно уверенно. Расстояние до галактики мы приняли равным $d = 6.82 \text{ Мпк}$, согласно Tully et al. (2009), что соответствует масштабу 33 пк/угл. сек. Все величины, зависящие от расстояния и взятые из других работ (светимость, размеры и т.д.), в нашей статье приведены именно к этому расстоянию.

Галактика NGC 7292 входит в группу NGC 7331, но находится на ее периферии и не имеет близких спутников (Ludwig et al., 2012).

Кривая вращения NGC 7292 была получена в работе Esipov et al. (1991) по эмиссионным линиям

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

**E-mail: moisav@gmail.com

¹<http://ned.ipac.caltech.edu>²<http://leda.univ-lyon1.fr>

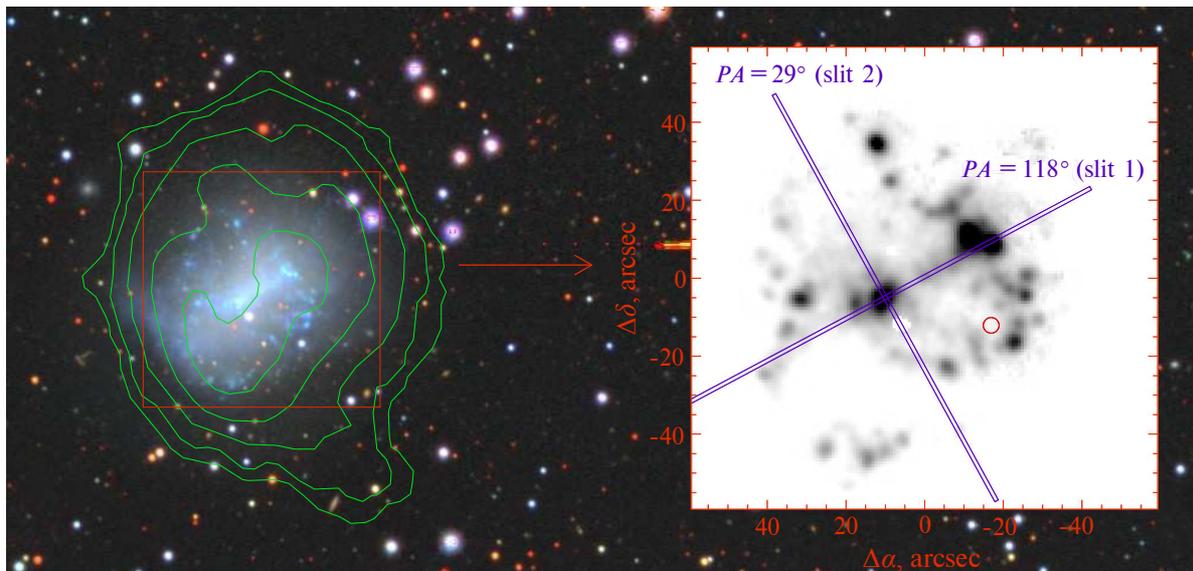


Рис. 1. Изображение NGC 7292 из DESI Legacy survey (Dey et al., 2019). Зеленым показаны линии равной плотности H I, согласно Biswas et al. (2022). Справа на врезке — изображение в линии H α , полученное с помощью сканирующего ИФП. Показаны положения щели спектрографа. Центр координат соответствует ядру галактики. Красным кружком обозначено положение сверхновой 1964N. Север — сверху, восток — слева.

[S II]. При принятом наклоне диска 36° авторы нашли, что скорость вращения достигает 100 км с^{-1} на расстоянии 800 пк от центра. Однако в указанной работе отсутствует какая-либо информация о кинематическом центре и позиционном угле NGC 7292, что не дает возможности верифицировать результаты Esipov et al. (1991).

Недавние исследования нейтрального водорода, проведенные на индийском радиоинтерферометре GMRT (Biswas et al., 2022), показали, что NGC 7292 обладает регулярно вращающимся диском H I диаметром, примерно равным $3'$ (6 кпк) с массой $(2.08 \pm 0.06) \times 10^8 M_\odot$ (на уровне колонковой плотности H I от $1 \times 10^{20} \text{ см}^{-2}$ и выше). Авторы дают значение «фотометрического» позиционного угла диска 9° , однако карта поля скоростей H I указывает на величину кинематического позиционного угла $PA_{\text{kin}} \approx 250^\circ$.

Диск H I в NGC 7292 имеет округлую форму, за исключением небольшого выступа на юго-западной окраине (см. рис. 1). Этот выступ не отличается по скорости и дисперсии скоростей от основного диска H I (Biswas et al., 2022, см. подробности в Разделе 3). Наблюдаемая асимметричная структура морфологически похожа на часть приливного хвоста, что вместе с искаженной формой внешних оптических изофот может указывать на относительно недавнее (менее 1–2 оборотов диска) событие, связанное с захватом внешнего вещества.

В галактике наблюдается большое количество областей H II (Gusev and Dodin, 2021). Известна одна сверхновая II типа (1964N), вспыхнувшая в западной цепочке областей H II с координатами J2000: $\alpha = 22^{\text{h}}28^{\text{m}}24^{\text{s}}.06$, $\delta = +30^\circ17'23''.3$ (Crowther, 2013).

Спектральные наблюдения с длинной щелью, ориентированной вдоль бара ($PA = 118^\circ 3'$), проведенные в работе Gusev and Dodin (2021), позволили оценить химический состав газа в девяти областях H II. Было показано, что содержание кислорода и азота в областях H II является типичным для галактик данной светимости ($O/H = 8.26 \pm 0.03 \text{ dex}$, $N/H = 6.86 \pm 0.07 \text{ dex}$) при отсутствии радиального градиента металличности. Был отмечен слабый градиент N/O вдоль большой оси бара NGC 7292: отношение N/O уменьшается от восточной к западной части галактики.

Среди областей H II выделяется область в центре бара (область С на рис. 2), в которой наблюдается пониженное отношение N/O; она расположена на диагностической диаграмме «[N II]/H α – [O III]/H β » (Baldwin et al., 1981; Kewley et al., 2001; Kauffmann et al., 2003) вблизи границы, разделяющей объекты с тепловым и нетепловым (ударные волны, ионизирующее излучение от активного галактического ядра) механизмом возбуждения эмиссионных линий (см. рис. 5 в работе Gusev and Dodin, 2021). Кроме того,

область в центре бара характеризуется максимальным отношением О/Н в галактике. Самая яркая область Н II, расположенная на юго-восточном конце бара (область А на рис. 2), показывает при среднем О/Н максимальное значение N/O (Gusev and Dodin, 2021).

Спектр, полученный в работе Gusev and Dodin (2021), обратил на себя внимание из-за необычной кривой вращения, что послужило стимулом детально исследовать кинематику газа в NGC 7292.

2. НАБЛЮДЕНИЯ И ОБРАБОТКА ДАННЫХ

2.1. Панорамная спектроскопия с интерферометром Фабри-Перо

Наблюдения NGC 7292 с помощью сканирующего ИФП, установленного в многорежимном редукторе первичного фокуса SCORPIO-2 (Afanasiev and Moiseev, 2011), были выполнены на 6-м телескопе САО РАН 9/10 октября 2021 года. Спектральный диапазон вокруг линии $H\alpha$ выделялся узкополосным фильтром шириной $FWHM \approx 14 \text{ \AA}$. В процессе наблюдений зазор между пластинами ИФП изменялся так, чтобы полученные 40 интерферограмм равномерно заполняли весь свободный от перекрытия порядков спектральный диапазон ($\Delta\lambda = 36 \text{ \AA}$). Длительность индивидуальных экспозиций равнялась 90 с при качестве звездных изображений $1''.8-2''.8$. Спектральное разрешение ИФП составляло 1.7 \AA , что соответствует 78 км с^{-1} на длине волны $H\alpha$. Детектор — ПЗС-камера E2V 261-84 — обеспечивал поле зрения около $6'.6$ с дискретизацией $0''.78/\text{пиксель}$ в режиме считывания с аппаратным биннингом 2×2 .

В результате первичной редукции (подробное описание применяемого матобеспечения и ссылки на оригинальные работы даны Moiseev, 2021) наблюдения были представлены в виде куба данных, в котором каждый пиксель в поле зрения содержит спектр области вокруг линии $H\alpha$. Астрометрическая калибровка данных выполнялась с помощью онлайн сервиса astrometry.net (Lang et al., 2010). Итоговое угловое разрешение после сглаживания в процессе первичной редукции составило $2''.8$.

Распределения яркости в эмиссии $H\alpha$, поле лучевых скоростей в этой линии и свободное от аппаратного уширения поле дисперсии лучевых скоростей (рис. 2) были построены путем аппроксимации спектров профилем Фойгта, согласно методике, описанной Moiseev and Egorov (2008).

2.2. Спектральные наблюдения с длинной щелью

Наблюдения проводились на 2.5-м телескопе Кавказской горной обсерватории ГАИШ МГУ имени М. В. Ломоносова (КГО ГАИШ МГУ) с помощью транзиентного двухлучевого спектрографа ТДС (TDS — transient two-beam spectrograph). Спектрограф работает одновременно в двух каналах: синем (диапазон $3600-5770 \text{ \AA}$ с дисперсией $1.21 \text{ \AA}/\text{пиксель}$ и спектральным разрешением 3.6 \AA) и красном (диапазон $5673-7460 \text{ \AA}$, с дисперсией $0.87 \text{ \AA}/\text{пиксель}$ и спектральным разрешением 2.6 \AA). Две ПЗС-камеры используют детекторы E2V 42-10 размером 2048×512 пикселей². Размер пикселя — $0''.363$, размер используемых щелей — $180'' \times 1''$. Подробное описание спектрографа дано в работе Potanin et al. (2020).

Наблюдения проводились в декабре 2020 г. и мае 2021 г. (см. журнал наблюдений в Таблице 1) при качестве изображения $1''.2-1''.8$. Во время первого сета наблюдений щель была расположена вдоль бара галактики ($PA = 118^\circ 3$), а во время второго — перпендикулярно первому ($PA = 28^\circ 5$), так, что щель проходила через самую яркую область NGC 7292 — восточную оконечность бара (см. рис. 1). Во время майских наблюдений щель во вторую ночь (сет 2b) была развернута на 180° относительно первой ночи (сет 2a). Инструментальная спектральная ширина линий ($FWHM$) $\delta\lambda_{\text{lab}}$, определенная по эмиссионным линиям ночного неба, составила $2.5-2.6 \text{ \AA}$ ($115-120 \text{ км с}^{-1}$, см. Таблицу 1).

Процедура наблюдений включала получение плоских полей и калибровочных изображений в начале и в конце каждой серии наблюдений. Спектрофотометрические стандарты наблюдались сразу после наблюдений галактики при той же воздушной массе.

Обработка первоначальных данных выполнялась по стандартной процедуре, включая коррекцию за темновой ток, удаление следов космических лучей, исправление за плоское поле, калибровку по длинам волн с помощью стандартной лампы Ne-Al-Si и ее коррекцию с использованием линий

Таблица 1. Журнал наблюдений на КГО ГАИШ

Slit	Date	$T_{\text{exp, s}}$	$PA, \text{ deg}$	$\delta\lambda_{\text{lab}}, \text{ \AA}$
1	Dec 10/11, 2020	100 + 3×900	118.3	2.53 ± 0.12
2a	May 01/02, 2021	900	-151.5	2.61 ± 0.19
2b	May 02/03, 2021	3×900	28.5	2.53 ± 0.14

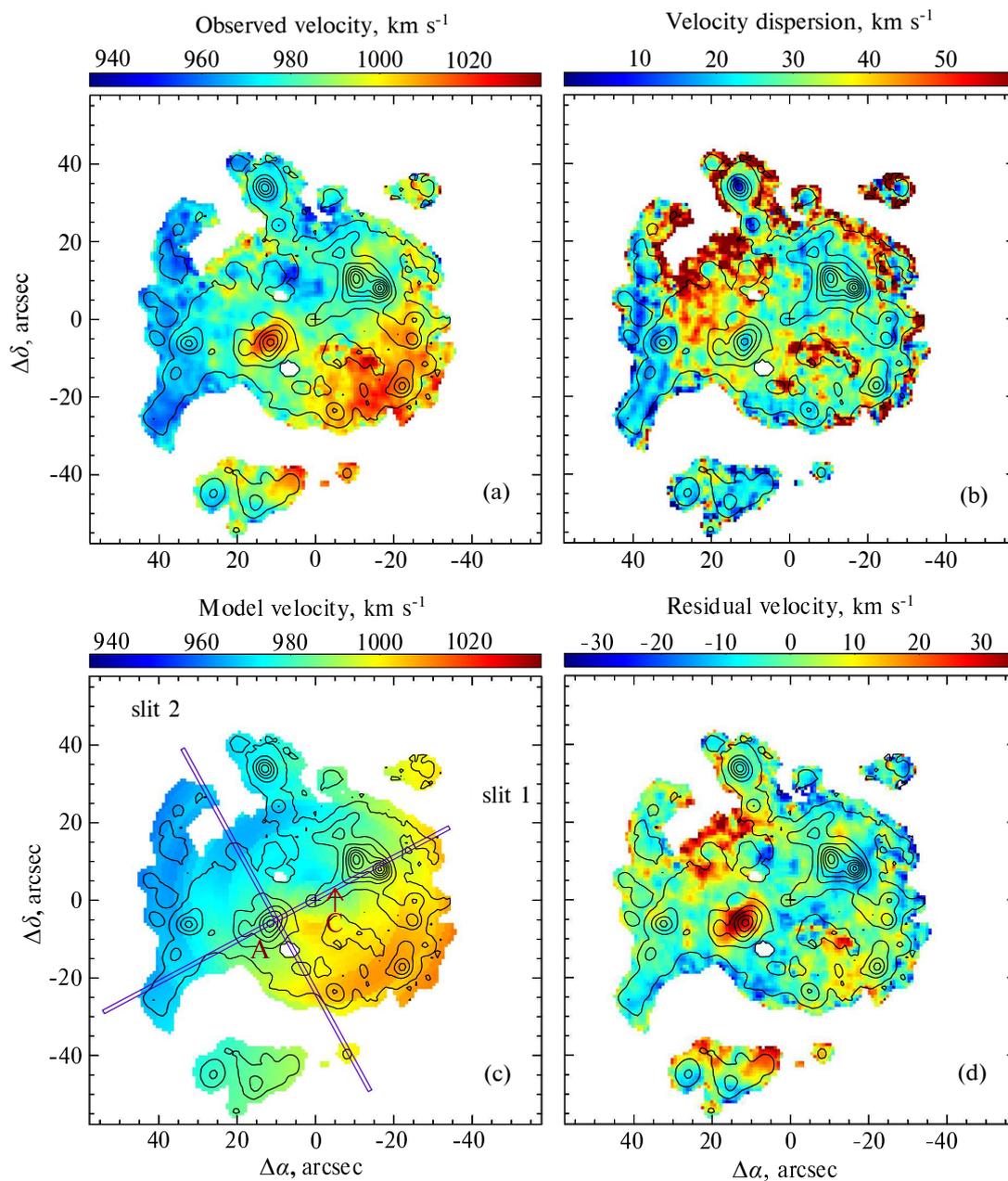


Рис. 2. Кинематика ионизованного газа в линии $H\alpha$ по данным 6-м телескопа. Наблюдаемые параметры: поле лучевых скоростей (a) и дисперсии скоростей (b). Модельное поле скоростей представлено на панели (c), а распределение отклонения от модели — на панели (d). Крестиком на картах отмечен кинематический центр галактики. Положение области С в центре бара указано стрелкой. На панели (c) отмечено положение щелей спектрографа и обозначены две области H II внутри бара, обсуждаемые в тексте.

ночного неба, фотометрическую калибровку, сложение спектров отдельных экспозиций, вычитание фона и преобразование в одномерный спектр (подробнее см. в работе Potanin et al. (2020)). Для первичной обработки спектров мы использовали пакет обработки данных на основе языка Python, разработанный в ГАИШ МГУ А. В. Додиныным; дальнейшая редукция проводилась с помощью системы обработки данных ESO-MIDAS.

Лучевая скорость и дисперсия скоростей определялись по длине волны и ширине линии $H\alpha$ с шагом $1''$. Для этого спектр в пределах $1''$ интегрировался, а длина волны и полуширина линии $H\alpha$ (при наличии эмиссии) определялись путем аппроксимации линии гауссианой. Спектры не исправлялись за абсорбционную компоненту от звездного населения. Как было показано в работе Gusev and Dodin (2021), ее вклад в линии $H\alpha$

является незначительным: во всех исследованных областях $\text{H II } EW(\text{H}\alpha) > 40 \text{ \AA}$.

Наблюдаемая лучевая скорость приведена к гелиоцентрической. Дисперсия скоростей σ рассчитывалась с учетом инструментальной ширины $\delta\lambda_{\text{lab}}$:

$$\sigma^2 = \sigma_{\text{obs}}^2 - \sigma_{\text{lab}}^2,$$

где $\sigma_{\text{lab}} = \delta\lambda_{\text{lab}} / (2\sqrt{2 \ln 2})$, $\sigma_{\text{obs}} = \delta\lambda_{\text{obs}} / (2\sqrt{2 \ln 2})$.

3. РЕЗУЛЬТАТЫ

3.1. Лучевые скорости и дисперсия скоростей H II

Данные измерений лучевых скоростей газа в галактике, полученные с помощью спектроскопии с длинной щелью и со сканирующим ИФП, в пределах ошибок согласуются друг с другом (рис. 3 и 4). Оба набора данных демонстрируют сходные изменения дисперсии скоростей вдоль щели, но при этом измерения σ^2 с ТДС систематически выше, чем с ИФП, что, скорее всего, связано с двумя эффектами. Во-первых, спектральное разрешение у сканирующего ИФП в полтора раза лучше, что существенно, так как наблюдаемое уширение линий из-за дисперсии скоростей сравнимо с шириной инструментального профиля ТДС ($\sigma_{\text{lab}} = 50 \pm 1 \text{ км с}^{-1}$). Во-вторых, при наблюдениях с ТДС происходит усреднение распределения лучевых скоростей внутри щели, что также несколько уширяет профили линий. Так, на верхних графиках рис. 3 и 4 заметно, что скорости, определенные из поля скоростей, построенного с ИФП, отличаются на ΔV до 5 км с^{-1} в пределах $1''$ (черные, красные и зеленые кривые).

Кинематически выделяется восточный конец бара (самая яркая область H II) со скоростью $V \approx 1020 \text{ км с}^{-1}$. Скорость вдоль остальной части бара остается постоянной ($V = 980\text{--}985 \text{ км с}^{-1}$). Дисперсия скоростей газа σ в баре, включая и его юго-восточную оконечность, $20\text{--}40 \text{ км с}^{-1}$, невысока. Она соответствует нижнему пределу σ в NGC 7292, наблюдаемому в некоторых частях диска галактики. В областях H II σ не превышает 30 км с^{-1} (рис. 2–4). Эта величина несколько больше полученного Law et al. (2022) значения $\sigma = 19 \pm 4 \text{ км с}^{-1}$ для галактик с таким же темпом звездообразования (согласно James et al. (2004), в NGC 7292 $SFR = 0.22 \pm 0.04 M_{\odot} \text{ уг}^{-1}$), однако соответствует результатам Moiseev et al. (2015) для галактик сравнимой светимости в видимом диапазоне и $\text{H}\alpha$.

3.2. Параметры вращения диска по данным кинематики

Для измерения кривой вращения тонкого плоского диска необходимо найти следующие параметры, определяющие его ориентацию и кинематику: позиционный угол линии узлов (большой оси) PA_0 , наклон диска к лучу зрения i_0 , координаты центра вращения, V_{SYS} , V_{ROT} — системную скорость и скорость вращения. При этом на каждом конкретном радиусе кинематический позиционный угол большой оси PA_{kin} и наклон орбит газовых облаков к картинной плоскости i_{kin} могут по тем или иным причинам отличаться от PA_0 и i_0 .

В то время как PA_{kin} , а следовательно, и PA_0 , достаточно уверенно измеряется, поскольку характеризует направление глобального градиента лучевой скорости, измерение угла наклона i_0 является проблемой. Анализируя поле скоростей, это сделать не удается, так как галактика находится в положении, близком к плашмя ($i_0 < 40^\circ$). Проекция скорости вращения на луч зрения не очень велика, притом что некруговые движения, связанные с областями звездообразования и течением газа в баре, вносят очень существенный вклад в наблюдаемую картину. Установить ориентацию диска по морфологии тоже затруднительно, из-за того что во внутренней части галактики — сильно вытянутый бар, а внешние области сильно возмущены (рис. 1 и 5). Поэтому видимое по полям лучевых скоростей H I (см. Раздел 1) и H II положение большой оси вдоль $PA_{\text{kin}} \approx 250^\circ$ не соответствует большой оси оптических изофот (см. Раздел 3.3) или изоденсам распределения H I . Определять по их эллиптичности величину i_0 некорректно.

Чтобы оценить наклон диска, мы воспользовались соотношением Талли—Фишера, связывающим V_{ROT} со светимостью галактики. Максимальную скорость вращения мы определили, анализируя методом tilted-ring поле скоростей H I , предоставленное авторами статьи Biswas et al. (2022). Угловое разрешение данных H I составляет $30'' \times 23''$, а спектральное соответствует 6.6 км с^{-1} . Отметим здесь, что отклонения от кругового вращения в юго-западном выступе диска H I не превышают 5 км с^{-1} , что даже меньше, чем в некоторых внутренних областях диска H I . Диск нейтрального газа более протяженный, поэтому и удается обнаружить максимум на кривой вращения на $r = 60''$, где ионизованный газ уже не наблюдается. Приняв, согласно LEDA, $M(B) = -16.7 \pm 1.0$, из калибровочных соотношений, приведенных Rhee and Broeils (2005) для их RC-выборки, получаем ожидаемую амплитуду кривой вращения 63 км с^{-1} . Подгонка поля лучевых скоростей моделью наклонных колец с различными величинами i_0 показала, что требуемые скорости вращения достигаются при $i_0 = 29^\circ \pm 4^\circ$.

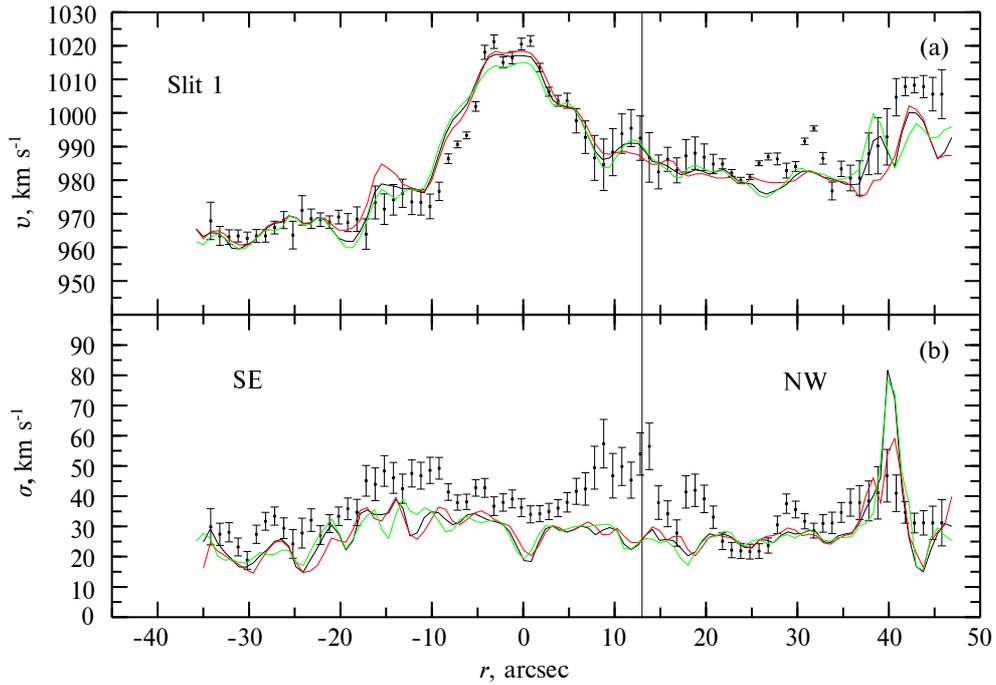


Рис. 3. Лучевая скорость (а) и дисперсия скоростей (б) Н II вдоль первого положения щели ($PA = 118.28^\circ$) по данным спектроскопии с длинной щелью (точки) и панорамной спектроскопии (черные кривые). Красными и зелеными кривыми показаны профили V и σ , полученные с интерферометром Фабри–Перо, смещенные вправо–влево относительно щели на $1''$. Показаны ошибки измерений. За нуль-пункт взят центр ярчайшей области Н II (юго-восточный конец бара — область А). Вертикальная прямая на $r = +13''$ соответствует кинематическому центру галактики.

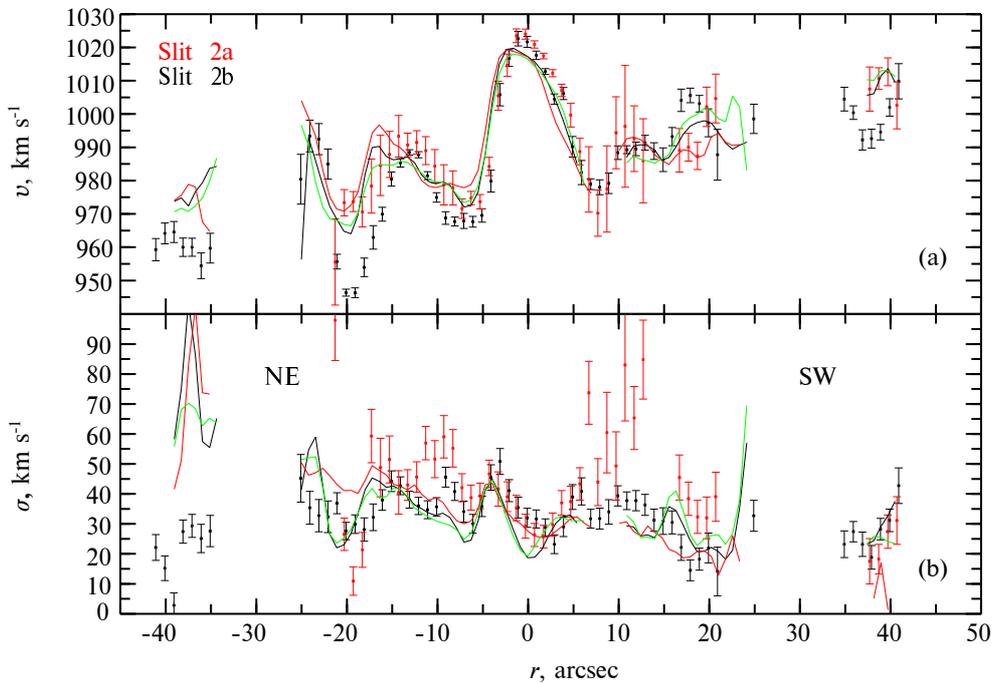


Рис. 4. Лучевая скорость (а) и дисперсия скоростей (б) Н II вдоль второго положения щели. Черные точки — положение 2b ($PA = 28.48^\circ$), красные точки — положение 2a ($PA = -151.52^\circ$). Остальные обозначения — те же, что и на рис. 3.

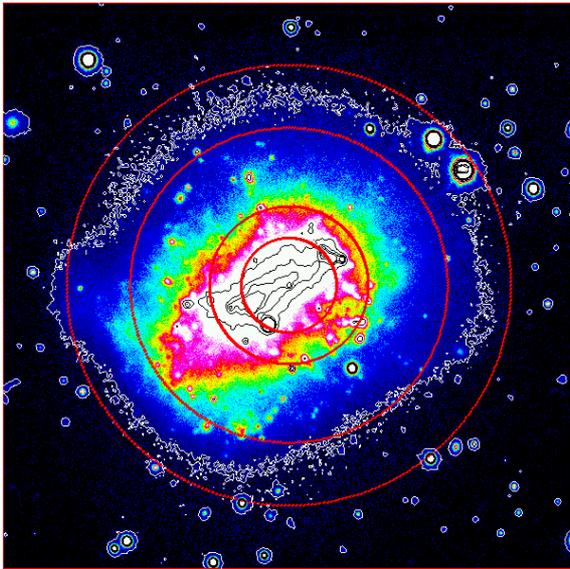


Рис. 5. Глубокий снимок NGC 7292 в полосе r Legacy Surveys до вычитания звезд поля. Радиусы окружностей равны $15''$, $25''$, $50''$ и $70''$. Выделенная белым цветом внешняя изофота в r соответствует уровню 3σ выше фона неба.

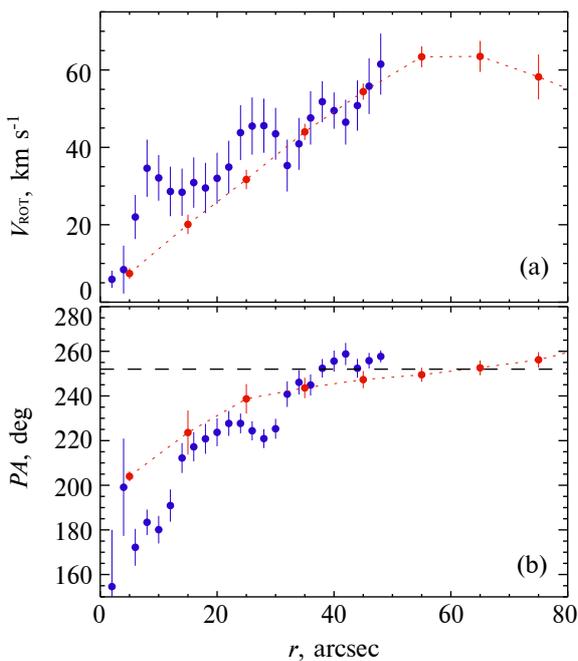


Рис. 6. Параметры кинематической модели: кривая вращения ионизованного газа (а) и радиальные изменения PA_{kin} (б). Синие символы — ионизованный газ, красные — нейтральный водород. Черной штриховой линией показана принятая ориентация линии узлов газового диска.

Параметры вращения галактического диска определялись методом наклонного кольца (tilted ring), адаптированным для анализа поля лучевых

скоростей ионизованного газа (подробное описание и основные соотношения приведены в работах Moiseev, 2014; 2021). В соответствии с принятыми параметрами ориентации внешнего диска PA_0 , i_0 поле скоростей разбивалось на узкие эллиптические кольца, распределение лучевых скоростей в каждом кольце радиуса r подгонялось моделью кругового вращения со следующими параметрами: V_{SYS} , V_{ROT} , PA_{kin} и i_{kin} . Центр вращения, определяемый из соображений симметрии поля лучевых скоростей, в пределах ошибок совпадает с небольшой областью H II в центре бара (область 5 из работы Gusev and Dodin (2021), расположенная в $3''.5$ юго-восточнее области С), поэтому в дальнейшем анализе он был зафиксирован в этой точке с координатами $\alpha(\text{J2000.0}) = 22^{\text{h}}28^{\text{m}}25^{\text{s}}.34$, $\delta(\text{J2000.0}) = +30^{\circ}17'35''.3$. Точность измерения положения кинематического центра составляет около $\pm 1''$. Перенос принятого положения кинематического центра на большее расстояние (например, в описанную во Введении область С, находящуюся в $3''.5$ от выбранного центра) приводит к заметным (более $10\text{--}15 \text{ km s}^{-1}$) изменениям системной скорости вдоль радиуса, отсутствующим в случае принятого нами центра вращения. В дальнейшем для получения более устойчивой модели вращения системная скорость фиксировалась в среднем значении $V_{\text{SYS}} = 988 \pm 1 \text{ km s}^{-1}$.

Радиальные изменения параметров вращения газа в галактике показаны на рис. 6. Ориентация линии узлов, определенная как средняя величина PA_{kin} на $r = 35''\text{--}45''$, составляет $PA_0 = 253^{\circ} \pm 2^{\circ}$. Разворот кинематической оси в более внутренних областях галактики, очевидно, связан с радиальными потоками газа под воздействием трехосного потенциала бара. Прямым доказательством здесь является то, что отклонения PA_{kin} от PA_0 происходят в противоположном направлении относительно поворота внутренних изофот, большая ось которых в области бара располагается вдоль $PA \approx 305^{\circ}$ (125°), в то время как во внешних областях изофоты постепенно разворачиваются ближе к принятой величине PA_0 . (рис. 6 и 7). Подробное обсуждение методики сравнения фотометрических и кинематических PA в галактиках с перемычками и ссылки на оригинальные статьи приводятся в обзоре Moiseev (2021), сравнение с результатами численного моделирования представлено, например, в работе Moiseev and Mustsevoi (2000).

Также на рис. 6 показаны результаты применения той же модели вращения к полю скоростей в H I из работы Biswas et al. (2022). Видно достаточно хорошее согласие кинематики ионизованного и нейтрального водорода, с учетом того, что угловое разрешение в линии 21 см на порядок более низкое

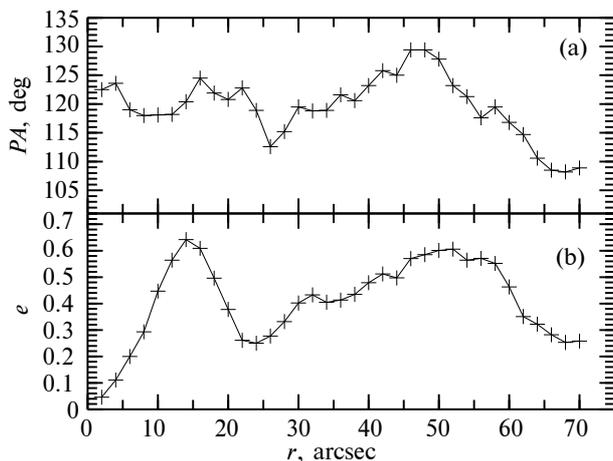


Рис. 7. Радиальные профили позиционного угла PA (панель а) и эллиптичности e (панель б), полученные для изображения NGC 7292 в полосе r .

и составляет $30'' \times 23''$. Поэтому внутри $r < 30''$ изменения PA_{kin} и V_{ROT} в линии $H\alpha$ более резкие. Медленное увеличение PA_{kin} в $H\alpha$ для $r > 40''$, возможно, указывает на изгиб внешнего газового диска, в котором ионизованный газ уже почти не наблюдается.

3.3. Фотометрические параметры диска

Для сравнения, используя данные о координатах кинематического центра NGC 7292 и изображение галактики в полосе r , взятое из обзора Legacy Surveys (рис. 5), мы приводим полученное радиальное распределение фотометрических значений позиционного угла PA и эллиптичности изофот $e \equiv 1 - b/a$ (рис. 7). Параметры PA и e рассчитывались с помощью пакета программ SURFPHOT в среде MIDAS. Из изображения, показанного на рис. 5, были предварительно удалены звезды поля. Области звездообразования (области $H\text{II}$) галактики из изображения не вычитались. Как хорошо видно по рис. 5 и рис. 7, они дают заметный вклад на галактоцентрических расстояниях $r < 30\text{--}35''$, не влияя на определение параметров для внешних областей диска NGC 7292.

Рисунок 7 показывает сложную структуру NGC 7292. В области бара ($r < 15''$) наблюдается рост эллиптичности с 0.05 до 0.65 при постоянстве позиционного угла ($PA = 118^\circ\text{--}123^\circ$). В диапазоне $r = 15''\text{--}25''$ эллиптичность резко падает до 0.3, а позиционный угол уменьшается до 113° . Эта область соответствует наиболее яркой части диска, активно излучающей в линии $H\alpha$ и ограниченной цепочками областей $H\text{II}$ (см. изображения галактики на рис. 1, 2 и 5). В диапазоне галактоцентрических расстояний $25''\text{--}50''$ наблюдается диск

умеренной яркости, причем его центр симметрии смещен относительно кинематического центра NGC 7292 и находится вблизи юго-восточной оконечности бара галактики (рис. 5). В данной области позиционный угол изофот достигает максимума на 129.5° , а эллиптичность увеличивается до 0.6. Оба параметра, PA и e , на $r = 50''$ близки к значениям, полученным для $r = 15''$. Наконец, в самой внешней части галактики, на $r = 70''$ (2.3 кпк), эллиптичность и позиционный угол вновь падают до значений, близких к полученным на $r = 25''$ (рис. 7).

Как хорошо видно, параметры PA и e , определенные по фотометрическим данным, не согласуются с параметрами, полученными из анализа поля скоростей.

4. ОБСУЖДЕНИЕ

На рис. 2с и 2d приведены поле скоростей в модели кругового вращения (точнее, квазикругового, так как PA_{kin} меняется с r) и остаточные скорости V_{res} после вычитания модели из наблюдений. В их распределении прослеживается несколько особенностей. Прежде всего, это высокие по модулю V_{res} в двух гигантских областях звездообразования на концах бара. Такое симметричное расположение может быть вызвано тем, что остаточные скорости связаны с некруговыми (обычно — радиальными) движениями в баре, которые не полностью учтены нашей квазикруговой моделью вращения. Но странно, что амплитуда скоростей в симметричных относительно центра областях различается в два раза: V_{res} составляет $-10\text{--}-15 \text{ км с}^{-1}$ в северо-западной области, но достигает $+30\text{--}+37 \text{ км с}^{-1}$ в юго-восточной (области А). Тогда скорость радиальных движений составит, в пересчете в плоскость диска, $V_{\text{res}}/\sin i = 23\text{--}35 \text{ км с}^{-1}$ и $71\text{--}87 \text{ км с}^{-1}$ соответственно. И если первая оценка выглядит разумно, то во втором случае скорость потока газа к центру превышает гиперболическую на данном радиусе ($V_{\text{ROT}} \approx 30 \text{ км с}^{-1}$ на $r = 20''$, рис. 6), что сомнительно.

Вероятно, что столь высокие пекулярные скорости в юго-восточной области, обозначенной как А (см. рис. 2), связаны не с радиальным, а с каким-то другим направлением, например с вертикальными движениями газа в диске. Наиболее очевидной причиной могли бы быть оттоки газа из областей звездообразования, связанные с расширяющейся под действием вспышек сверхновых и звездных ветров газовой оболочкой. Но в таком случае непонятно, почему мы видим только удаляющуюся часть оболочки ($V_{\text{res}} > 0$), а не расширяющуюся в сторону наблюдателя. Более того, карта распределения дисперсии скоростей в линии $H\alpha$

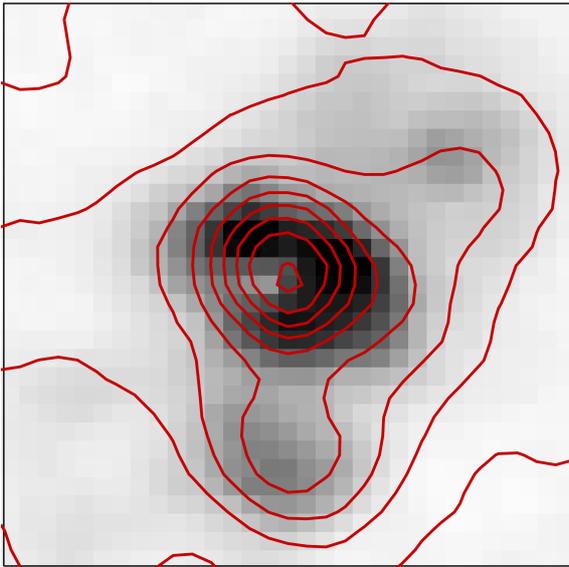


Рис. 8. Изображение ярчайшей области H II NGC 7292 (область А на юго-восточном конце бара) в линии $H\alpha + [N II]$ с наложенными изофотами в полосе U . Размер изображения — $8'' \times 8''$ (260 пк). Север — сверху, восток — слева. Используются неопубликованные данные в U , полученные на 1.5-м телескопе Майданакской обсерватории (Узбекистан), и в линии $H\alpha + [N II]$ с вычтенным континуумом, полученные на 2.5-м телескопе КГО ГАИШ МГУ, из личного архива одного из авторов. Наблюдения в континууме (фильтр с $\lambda_{\text{eff}} = 6427 \text{ \AA}$, $\Delta\lambda = 122 \text{ \AA}$) проводились вместе с наблюдениями в линии $H\alpha + [N II]$.

(рис. 2), согласующаяся с данными длиннощелевой спектроскопии (рис. 3), демонстрирует картину, типичную для карликовых галактик с текущим звездообразованием (Moiseev and Lozinskaya, 2012), а именно — σ имеет минимальные величины в центрах ярких областей H II, так как здесь основное излучение идет от более плотных облаков газа. В это же время на их периферии σ выше, так как в этой области мы видим излучение диффузного газа, более чувствительного к возмущению от процессов звездообразования. Если бы большие величины V_{res} в юго-восточной области были связаны, например, с прорывом расширяющейся газовой оболочки, то ожидаемо было бы увидеть и пик в дисперсии скоростей, однако этого не наблюдается.

Типичная картина, связанная с возмущением межзвездной среды, вызванным процессом звездообразования, наблюдается вдоль большой оси галактики на юго-западной и северо-восточной частях диска, где области высокой σ имеют низкую яркость в линии $H\alpha$ и относительно высокие величины V_{res} . В то же время как минимум часть некруговых движений газа вблизи больших комплексов звездообразования, скорее всего, связана с приливным возмущением диска после прошедшего взаимодействия. Возможно ли, что область

к юго-востоку от центра является частью спутника, слившегося с NGC 7292? Согласно Gusev and Dodin (2021), из всех исследованных областей H II в NGC 7292 данный комплекс имеет наименьшее внутреннее поглощение, определенное по бальмеровскому декременту. Это может свидетельствовать в пользу предположения о том, что он входит в газовый диск галактики со стороны земного наблюдателя. С другой стороны, комплекс звездообразования не выделяется по содержанию кислорода (его $O/H = 8.26 \pm 0.05 \text{ dex}$ соответствует среднему по галактике), а положение комплекса на характеристических диаграммах не указывает на наличие ударных механизмов возбуждения H II (Gusev and Dodin, 2021). Таким образом, имеющиеся сейчас наблюдательные данные не позволяют однозначно отождествить структуры, связанные со спутником, поглощенным основной галактикой.

Данный комплекс находится на эволюционно продвинутой стадии звездообразования. Его отношение N/O — наибольшее среди всех исследованных областей H II (Gusev and Dodin, 2021) и указывает на обогащение окружающей межзвездной среды азотом вторичного происхождения. Морфология комплекса также свидетельствует о понижении (прекращении в рамках модели единовременной вспышки звездообразования) темпа звездообразования в современную эпоху. На рис. 8 хорошо видно, что область эмиссии $H\alpha$ образует кольцо диаметром 50–80 пк, окружающее звездный комплекс. Согласно Whitmore et al. (2011), данная стадия эволюции («молодое скопление») наступает через 6–8 млн лет после вспышки звездообразования, когда первые сверхновые выметают газ на периферию звездного комплекса. Отметим асимметричность оболочки H II: максимум эмиссии $H\alpha$ наблюдается к западу (со стороны бара) от комплекса, где плотность газа, по-видимому, наибольшая.

Если предположить, что звездообразование в данной области стимулировано падением спутника (газового или звездно-газового), то оно должно было произойти относительно недавно, на временных масштабах порядка 10 млн лет назад. На это указывают: возраст звездного населения комплекса А; пространственный масштаб возмущений газового диска NGC 7292 (область резких изменений лучевых скоростей от 1020 до 980 km s^{-1} составляет $5''$ – $8''$ (рис. 2–4), что соответствует той же временной шкале 7–8 млн лет при наблюдаемой $\sigma \approx 30 \text{ km s}^{-1}$ в этой области); то обстоятельство, что расстояние, пройденное возможным спутником при радиальной проекции скорости относительно галактики 40 km s^{-1} , за время 6–8 млн лет по порядку величины сопоставимо с эффективной толщиной диска NGC 7292 — около 200 пк.

По имеющимся данным мы не можем сказать, связано ли данное локальное возмущение — возможное падение спутника — с более долгоживущими по времени и масштабными по расстоянию свидетельствами приливных возмущений, таких как изгиб внешнего диска Н I за пределами оптического радиуса, асимметрия в распределении Н I и искаженная форма внешних оптических изофот, или оно является независимым.

Галактика ранее детально не исследовалась с точки зрения кинематики. Полученные нами новые наблюдательные данные показывают пекулярные, весьма сложные для интерпретации особенности движения газа в диске NGC 7292. Рассмотрев выше все возможные случаи, мы считаем, что наиболее реалистичным вариантом объяснения аномалии лучевых скоростей на юго-восточном конце бара (ярчайшей области Н II в галактике, принимаемой ранее за ее центр) является падение внешнего спутника.

5. ВЫВОДЫ

Анализ полей скоростей ионизованного и нейтрального водорода показал, что кинематический центр NGC 7292 находится в центре бара, к северо-западу от фотометрического центра галактики (юго-восточный конец перемычки), который ранее принимался за центр NGC 7292. Кроме кругового вращения в кинематике газового диска заметную роль играют радиальные движения, связанные с баром. По сравнению с этими некруговыми движениями наблюдаемое возмущение газового диска процессом звездообразования не столь сильно: отличия от кругового вращения в областях Н II не превышают тех, что вызваны радиальными потоками в баре, рост дисперсии скоростей имеет место только в диффузном ионизованном газе ближе к периферии диска. В распределении дисперсии скоростей отсутствуют оболочечные структуры, характерные для ряда карликовых галактик со вспышкой звездообразования (Moiseev and Lozinskaya, 2012; Gerasimov et al., 2022). Возможно, что часть некруговых движений (прежде всего в юго-восточном конце бара — ярчайшей области Н II) может быть связана с последствиями слияния с карликовым компаньоном или захватом внешнего газового облака. Однако пока нам не удалось обнаружить прямых свидетельств этого взаимодействия. Наличие приливных возмущений, таких как изгиб внешнего диска Н I за пределами оптического радиуса, асимметрия в распределении нейтрального водорода и искаженная форма внешних оптических изофот, может быть как связана с возможным падением спутника в юго-восточном конце бара, так и независима от него.

БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы выражают благодарность рецензенту за ценные и полезные замечания. Мы благодарим Е. И. Шабловинскую и Е. А. Малыгина, выполнивших наблюдения на 6-м телескопе САО РАН, А. В. Додина, сделавшего первоначальную обработку данных спектроскопии с длинной щелью, и Pregarana Biswas, любезно предоставившую карты Н I, полученные на телескопе GWRT. В работе использовались открытые данные баз данных HyperLEDA (<http://leda.univ-lyon1.fr>) и NASA/IPAC Extragalactic Database (<http://ned.ipac.caltech.edu>). Использованы публичные данные обзора Legacy Survey (<http://legacysurvey.org>), состоящего из трех отдельных и дополняющих друг друга проектов: the Dark Energy Camera Legacy Survey (DECaLS; Proposal ID #2014B-0404; PIs: David Schlegel and Arjun Dey), the Beijing-Arizona Sky Survey (BASS; NAO Prop. ID #2015A-0801; PIs: Zhou Xu and Xiaohui Fan) и the Mayall z-band Legacy Survey (MzLS; Prop. ID #2016A-0453; PI: Arjun Dey). DECaLS, BASS and MzLS вместе включают данные, полученные соответственно на телескопах the Blanco telescope, Cerro Tololo Inter-American Observatory, NSF's NOIRLab; the Bok telescope, Steward Observatory, University of Arizona; the Mayall telescope, Kitt Peak National Observatory, NOIRLab. Проект Legacy Survey был удостоен чести получить разрешение на проведение астрономических исследований на Iolkam Duág (Kitt Peak), горе, имеющей особое значение для народа Tohono O'odham.

ФИНАНСИРОВАНИЕ

Спектральные наблюдения на КГО ГАИШ МГУ и анализ данных спектроскопии с длинной щелью выполнены при поддержке гранта РФФИ № 20-02-00080 и поддержаны Междисциплинарной научно-образовательной Школой МГУ имени М. В. Ломоносова «Фундаментальные и прикладные исследования космоса». Часть наблюдательных данных была получена на 2.5-м телескопе Кавказской горной обсерватории ГАИШ МГУ. Развитие приборной базы обсерватории проводится при поддержке Программы развития МГУ имени М. В. Ломоносова. Наблюдения на 6-м телескопе САО РАН выполняются при поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации. Обновление приборной базы осуществляется в рамках национального проекта «Наука и университеты». Работа по анализу кинематики ионизованного газа выполнена в рамках государственного задания САО РАН, утвержденного Министерством науки и высшего образования Российской Федерации.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. V. L. Afanasiev and A. V. Moiseev, *Baltic Astronomy* **20**, 363 (2011).
2. J. A. Baldwin, M. M. Phillips, and R. Terlevich, *Publ. Astron. Soc. Pacific* **93**, 5 (1981).
3. G. Besla, N. Kallivayalil, L. Hernquist, et al., *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **421** (3), 2109 (2012).
4. P. Biswas, N. N. Patra, N. Roy, and M. Rashid, *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **513** (1), 168 (2022).
5. P. A. Crowther, *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **428** (3), 1927 (2013).
6. A. Dey, D. J. Schlegel, D. Lang, et al., *Astron. J.* **157** (5), article id. 168 (2019).
7. V. F. Esipov, G. A. Kyazumov, and A. R. Dzhafarov, *Soviet Astronomy* **35** (5), 452 (1991).
8. I. S. Gerasimov, O. V. Egorov, T. A. Lozinskaya, et al., *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **517** (4), 4968 (2022).
9. A. S. Gusev and A. V. Dodin, *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **505** (2), 2009 (2021).
10. A. S. Gusev and V. F. Esipov, *Astronomy Reports* **40** (3), 319 (1996).
11. J. Harris and D. Zaritsky, *Astron. J.* **138** (5), 1243 (2009).
12. P. A. James, N. S. Shane, J. E. Beckman, et al., *Astron. and Astrophys.* **414**, 23 (2004).
13. G. Kauffmann, T. M. Heckman, C. Tremonti, et al., *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **346** (4), 1055 (2003).
14. L. J. Kewley, M. A. Dopita, R. S. Sutherland, et al., *Astrophys. J.* **556** (1), 121 (2001).
15. A. Koch, M. J. Frank, A. Pasquali, et al., *Astrophys. J.* **815** (2), article id. A105 (2015).
16. D. Lang, D. W. Hogg, K. Mierle, et al., *Astron. J.* **139** (5), 1782 (2010).
17. D. R. Law, F. Belfiore, M. A. Bershad, et al., *Astrophys. J.* **928** (1), id. A58 (2022).
18. J. Ludwig, A. Pasquali, E. K. Grebel, and I. Gallagher, *John S., Astron. J.* **144** (6), article id. A190 (2012).
19. A. V. Moiseev, *Astrophysical Bulletin* **69** (1), 1 (2014).
20. A. V. Moiseev, *Astrophysical Bulletin* **76** (3), 316 (2021).
21. A. V. Moiseev and O. V. Egorov, *Astrophysical Bulletin* **63** (2), 181 (2008).
22. A. V. Moiseev and T. A. Lozinskaya, *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **423** (2), 1831 (2012).
23. A. V. Moiseev and V. V. Mustsevoi, *Astronomy Letters* **26**, 565 (2000).
24. A. V. Moiseev, A. V. Tikhonov, and A. Klypin, *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **449** (4), 3568 (2015).
25. S. A. Pardy, E. D'Onghia, E. Athanassoula, et al., *Astrophys. J.* **827** (2), article id. A149 (2016).
26. S. A. Potanin, A. A. Belinski, A. V. Dodin, et al., *Astronomy Letters* **46** (12), 836 (2020).
27. M.-H. Rhee and A. H. Broeils, *J. Astron. and Space Sci.* **22** (2), 89 (2005).
28. H. Siejkowski, M. Soida, and K. T. Chyży, *Astron. and Astrophys.* **611**, id. A7 (2018).
29. R. B. Tully, L. Rizzi, E. J. Shaya, et al., *Astron. J.* **138** (2), 323 (2009).
30. B. C. Whitmore, R. Chandar, H. Kim, et al., *Astrophys. J.* **729** (2), article id. A78 (2011).
31. C. Yozin and K. Bekki, *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **439** (2), 1948 (2014).

Gas Kinematics in the Magellanic-type Galaxy NGC 7292

A. S. Gusev¹, A. V. Moiseev^{1,2}, and S. G. Zheltoukhov¹

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

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

The paper presents results of studying the kinematics of the ionized gas in the galaxy of the Large Magellanic Cloud type NGC 7292 obtained with the 2.5-m telescope of the Caucasian Mountain Observatory (CMO SAI MSU) and the 6-m BTA telescope of the Special Astrophysical Observatory (SAO RAS). Analysis of the velocity fields of the ionized and neutral hydrogen showed that the kinematic center of NGC 7292 located at the center of the bar, northwest of the photometric center of the galaxy (the southeastern end of the bar) previously taken as the center of NGC 7292. In addition to the circular rotation of the gas, the radial motions associated with the bar play a significant role in the kinematics of the disk. The observed perturbations of the gaseous-disk kinematics induced by the ongoing star formation do not exceed those caused by the bar. It is possible that part of the non-circular motions (at the southeastern end of the bar which is the brightest H II region) may be related to the effects of the capture of a dwarf companion or a gaseous cloud.

Keywords: *galaxies: irregular—galaxies: evolution—interstellar medium: kinematics—galaxies: individual: NGC 7292*