

УДК 524.74:524.52

ГАЛАКТИЧЕСКИЙ ВЕТЕР В NGC 4460: НОВЫЕ НАБЛЮДЕНИЯ

© 2015 Д. В. Опарин^{1*}, А. В. Моисеев^{1,2**}

¹Специальная астрофизическая обсерватория РАН, Нижний Архыз, 369167 Россия

²Государственный астрономический институт имени П. К. Штернберга Московского государственного университета имени М. В. Ломоносова, Москва, 119991 Россия

Поступила в редакцию 19 мая 2015 года; принята в печать 31 июля 2015 года

NGC 4460 — линзовидная изолированная галактика, в которой ранее был обнаружен галактический ветер, представляющий собой истечение газа, связанное с околюядерными областями звездообразования. Используя результаты наблюдений в линии $H\alpha$ с помощью сканирующего интерферометра Фабри–Перо на 6-м телескопе САО РАН, мы изучили кинематику ионизованного газа в этой галактике. В рамках простой геометрической модели уточнены параметры истечения газа из плоскости галактического диска. Показано, что ветер невозможно охарактеризовать одной фиксированной величиной скорости. Характерные скорости истечения лежат в пределах 30–80 км с⁻¹, они недостаточны для того, чтобы выметаемое вещество окончательно покинуло галактику.

Ключевые слова: галактики: межзвёздная среда — галактики: вспышки звездообразования — галактики: индивидуальные: NGC 4460

1. ВВЕДЕНИЕ

Галактический ветер (галактическое истечение, сверхветер, далее — ГВ) — одно из наиболее выразительных и масштабных проявлений воздействия звездообразования на межзвездную и даже межгалактическую среду. Он выглядит как поток газа (ионизованного, нейтрального, молекулярного), выбрасываемый из галактики в результате коллективного действия явлений, связанных с молодыми звездными группировками: радиационного давления, ветров звезд-гигантов, взрывов сверхновых. ГВ оказывает серьезное влияние на структуру и химсостав межзвёздной среды и распределение массы в ней, перемешивая её, перенося кинетическую энергию и запуская процессы звездообразования [1]. Результаты численных расчетов подчеркивают важную роль ГВ в галактической эволюции (см., например, [2]), что подтверждается также наблюдениями проявлений ГВ среди галактик на больших красных смещениях [3]. Наблюдения галактик с мощным звездообразованием показывают, что практически в каждой из них в той или иной форме проявляет себя галактическое истечение, хотя бы как широкая подложка в основании эмиссионных линий [4].

Таким образом, феномен ГВ хорошо известен (см. обзор [1], там же ссылки на более ранние

работы). В то же время детальное изучение эмиссионных туманностей, созданных ГВ, с достаточным высоким пространственным разрешением выполнено только для немногих близких галактик, таких как M 82 [5], NGC 253 [6], NGC 1569 [7], NGC 3079 [8]. Поэтому многие вопросы, в частности относящиеся к ГВ в карликовых галактиках, остаются открытыми. В зависимости от энергии ветра и массы самой галактики вещество может как выметаться в межгалактическую среду, так и, не имея достаточной начальной скорости, возвращаться обратно в галактический диск. В каких случаях реализуется тот или иной сценарий? Здесь требуются как детальные теоретические расчеты для конкретных объектов (см., например, [9]), так и новые наблюдательные данные.

Рассматриваемая в данной работе галактика NGC 4460 является хорошим «полигоном» для такого рода исследований. Это карликовая линзовидная галактика, не имеющая заметных компаньонов и находящаяся в рассеянном облаке Гончих Псов. Согласно базе данных галактик Местного объема [10], ее абсолютная звездная величина $M_B = -17.73$, полная масса $M = 6.4 \times 10^9 M_\odot$, принятое расстояние 9.59 Мпк, что даёт видимый масштаб около 47 пк/угл. сек.

Протяженная эмиссионная туманность здесь была обнаружена в ходе $H\alpha$ -обзора близких галактик [11]. Ее спектральное исследование представлено в работе [12]. Было показано, что боль-

*E-mail: doparin@mail.ru

**E-mail: moisav@sao.ru

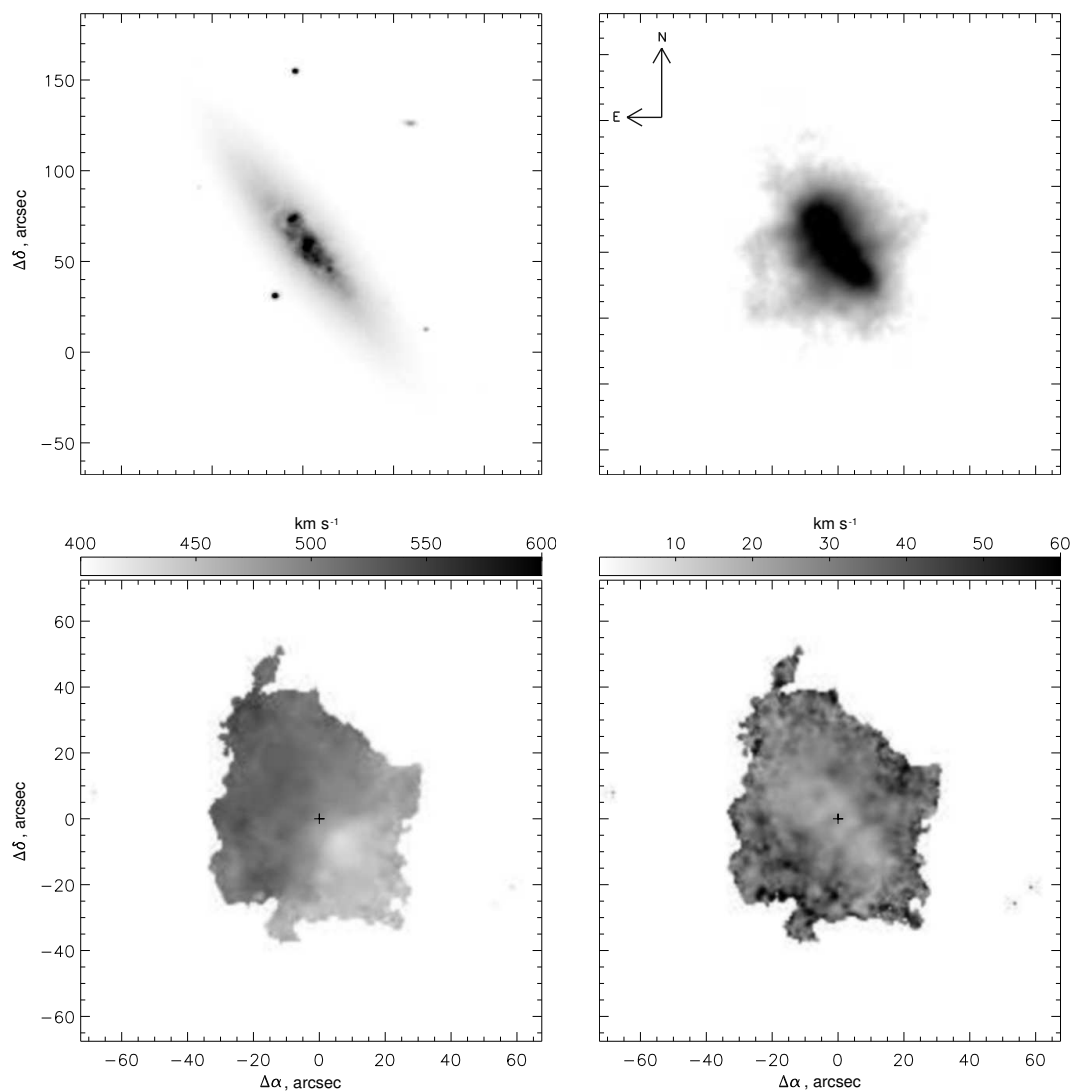


Рис. 1. Вверху: слева — изображение из SDSS-обзора в фильтре r , справа — изображение в эмиссионной линии $H\alpha$. Внизу: слева — карта поля скоростей, справа — карта поля дисперсии лучевых скоростей.

шая часть излучения в эмиссионных линиях исходит из компактной (диаметром примерно 1 кпк) области в центре галактического диска, что также подтверждается оптическими (HST, SDSS) и УФ (GALEX) снимками. В то же время диффузное излучение в линии $H\alpha$ распределено вдоль оси вращения галактики по обе стороны от ядра на значительные расстояния (до 1.5 кпк). Ионизация газа в данных областях объясняется комбинированным воздействием фотоионизации молодых горячих звёзд и ударных волн, связанных с современным звездообразованием. Таким образом, согласно [12], протяженная туманность в NGC 4460 порождена галактическим ветром. Сделанные в той же работе оценки скорости истечения составили

более 130 км с^{-1} , кинетической энергии ветра — 5.8×10^{52} эрг, а характерное время формирования наблюдаемой структуры — 10–12 млн лет.

Информация о движениях ионизованного газа в области ГВ была представлена в статье [12] на основании только двух спектральных разрезов с разрешением, соответствующим $\text{FWHM} \approx 110 \text{ км с}^{-1}$ в линии $H\alpha$, область центрального килопарсека также наблюдалась с панорамным спектрографом с разрешением $\text{FWHM} \approx 160 \text{ км с}^{-1}$. Этого было достаточно для измерения состояния ионизации газа. Однако для детального изучения кинематики галактического ветра желательно более высокое разрешение по лучевой скорости для возможного большего числа излучающих областей. Это и вы-

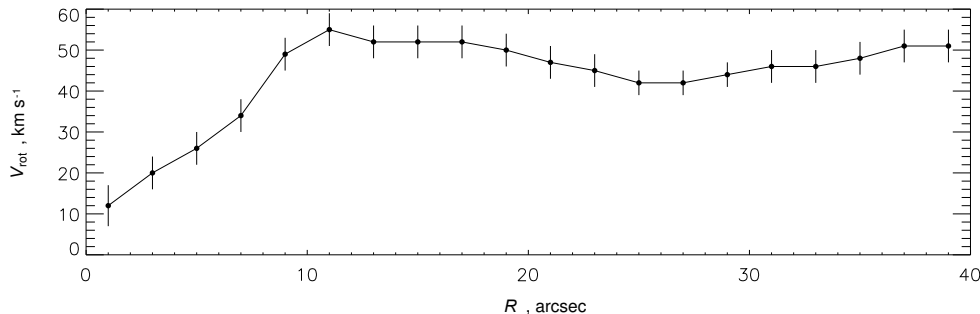


Рис. 2. Кривая вращения галактики.

полнено в данной работе, основанной на наблюдениях со сканирующим интерферометром Фабри–Перо (ИФП).

2. НАБЛЮДЕНИЯ И ОБРАБОТКА

Наблюдения проводились 19–20 мая 2010 г. на 6-м телескопе САО РАН с помощью сканирующего ИФП, установленного внутри фокального редуктора светосилы SCORPIO [13], в линии $H\alpha$ при среднем качестве атмосферных изображений $2''.5$. Интерферометр IFR751 на данной длине волны обеспечивал свободный спектральный диапазон между соседними порядками интерференции $\Delta\lambda = 8.7 \text{ \AA}$ и спектральное разрешение 0.4 \AA (19 км с^{-1}) при масштабе 0.21 \AA на канал. Рабочий диапазон вокруг красномещенной линии $H\alpha$ выделялся узкополосным фильтром.

Сканирование состояло из последовательности 40 интерферограмм (две серии $40 \times 80 \text{ с}$), получаемых при различных расстояниях между пластинами интерферометра, равномерно заполняющих спектральный диапазон. Результатом обработки, проведённой с помощью пакета программ, работающих в среде IDL [14, 15], являлся куб данных, где каждый пиксель содержит 40-канальный спектр.

По результатам аппроксимации профилей эмиссионной линии $H\alpha$ функцией Фойгта строились изображения в линии $H\alpha$ и в континууме, а также карты лучевых скоростей и дисперсий скоростей (рис. 1).

3. АНАЛИЗ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ЛУЧЕВЫХ СКОРОСТЕЙ

3.1. Модель вращения галактического диска

Построенное по наблюдениям с ИФП поле скоростей ионизованного газа уже использовалось в работе [16] для получения средней кривой вращения галактики. Интересно, что даже вне плоскости

диска — в области ГВ — в распределении лучевых скоростей доминирует компонент, соответствующий круговому вращению. Вклад в лучевую скорость каждой точки данной галактики помимо звёздного ветра вносит также вращение самой галактики. Поэтому, чтобы его исключить, требовалось построить модель кругового вращения, после чего вычесть её из поля скоростей. Построение модели вращения производилось методом наклонных колец (tilted rings) в рамках предположения о плоском тонком диске (подробнее см. [16]).

Для построения модели вращения использованы следующие параметры, взятые из [12]:

$PA_0 = 42^\circ \pm 2^\circ$ — позиционный угол линии узлов,

$V_{\text{sys}} = 487 \pm 1 \text{ км с}^{-1}$ — системная скорость,

$i = 77^\circ$ — угол между картинной плоскостью и плоскостью галактического диска.

Кривая вращения диска галактики, полученная из поля скоростей, приведена на рис. 2. В следующем подразделе мы экстраполируем эту кривую вращения на область, занятую галактическим ветром.

3.2. Моделирование ветрового конуса

Истечение вещества из области активного звездообразования происходит в направлениях, перпендикулярных плоскости галактики, поскольку плотность вещества на данном направлении существенно ниже, чем в экваториальной плоскости. Таким образом, происходит «всплытие» расширяющейся выметенной оболочки в менее плотную среду, как это наблюдается в детально исследованных галактиках, таких как NGC 1482, NGC 3079 или M 82 (см. ссылки во Введении). В наблюдаемом поле скоростей доминирует круговое вращение. Это указывает на то, что выметаемое вещество не встречает серьёзного сопротивления, поэтому можно предположить, что его момент вращения сохраняется. На основе вышесказанного можно

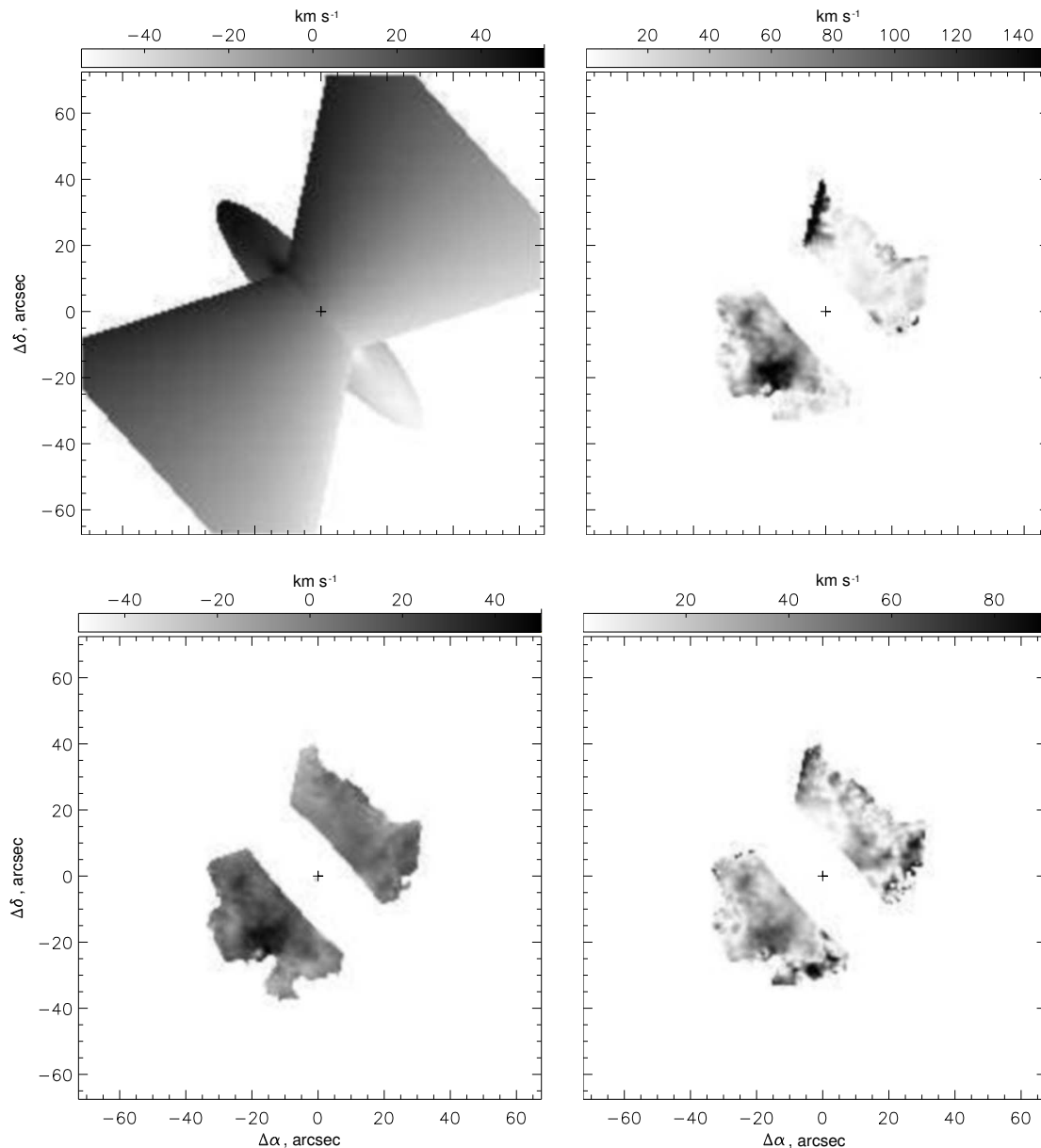


Рис. 3. Слева: сверху — модель вращения диска галактики и выметаемого вещества галактического ветра; внизу — карта остаточных скоростей, центральные области замаскированы. Справа: сверху — карта скоростей движения выметаемого вещества вдоль стенок конуса (учтен эффект проекции) для случая, когда юго-восточный конус ближе к наблюдателю; внизу — аналогичная карта для случая, когда к наблюдателю ближе северо-западный конус. Именно эту ориентацию мы считаем наиболее правдоподобной.

построить модель вращения выброшенных оболочек.

Мы предположили, что выбрасываемое из области активного звездообразования вещество истекает в виде одной большой структуры — оболочки. Такую оболочку можно аппроксимировать усечённым конусом, ось которого проходит через центр галактики, а меньшее основание расположено в галактическом диске. При этом в линии $H\alpha$ будут наблюдаться в основном только стенки этого конуса, горячий же газ внутри него в

бальмеровских эмиссионных линиях не излучает. Следует отметить, что эти стенки вовсе не должны быть сплошными, поскольку в других галактиках с ГВ конусы, излучающие в оптических линиях, как правило, состоят из отдельных филаментов, образующихся под действием разного рода неустойчивостей [1]. Несколько таких филаментов заметны и на $H\alpha$ -изображении NGC 4460.

Угол раствора конуса принят равным 60° , что достаточно хорошо описывает наблюдаемую структуру.

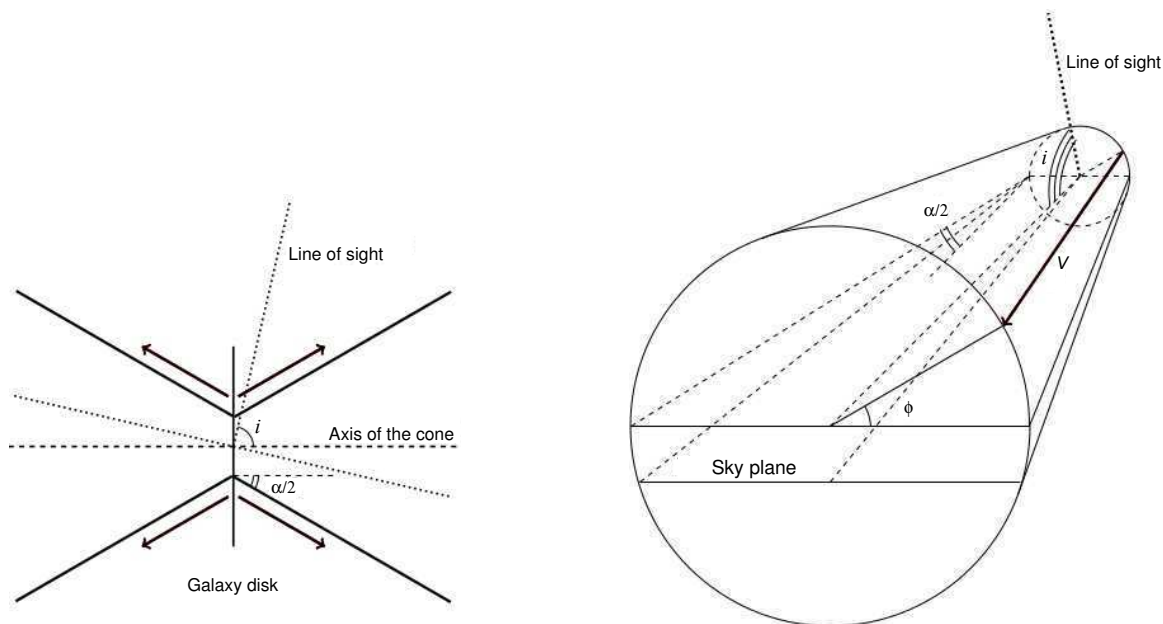


Рис. 4. Схема движения газа в конусе в зависимости от пространственного расположения: слева — вид из плоскости, перпендикулярной диску галактики; справа — вид со стороны оси конуса. Луч зрения показывает направление на наблюдателя. Видно, что если угол ϕ будет достаточно мал, т.е. точка будет лежать близко к видимой границе конуса, то для обоих возможных её положений (на ближней и дальней стенках конуса от наблюдателя) векторы скоростей истечения будут направлены в одну сторону от картинной плоскости.

При моделировании конуса мы принимали, что истекающее вещество не испытывает значительных потерь скорости вращения, поскольку момент вращения сохраняется (см. выше), а вещество выбрасывается не из самого ядра, а из протяженной килопарсековой области, так что перемещение по радиусу от оси вращения не существенно. В рамках данного предположения вклад вращения в лучевую скорость оказывается не зависящим от того, какую сторону конуса мы наблюдаем — ближнюю или дальнюю от нас, а также какой из конусов ближе к нам.

Скорости вращения конуса взяты согласно принятой кривой вращения (рис. 2). Угол наклона галактики $i = 77^\circ$; отметим, что на основе прямых изображений здесь сложно определить пространственную ориентацию диска относительно наблюдателя.

3.3. Остаточные скорости

Вычитание модели вращения ветра из поля скоростей дает карту остаточных скоростей, показанную на рис. 3 (слева внизу). Мы видим отсутствие значительных градиентов скоростей по направлению вращения, что позволяет считать наше предположение о малых отличиях скоростей вращения в диске и в ветре достаточно адекватным.

Благодаря тому, что ось вращения галактики отклонена от картинной плоскости всего на 13° ,

и предполагая, что весь наблюдаемый в конусах газ относится к стенкам и движется только по направлению от диска, мы можем утверждать, что отрицательная остаточная лучевая скорость означает движение по ближней к нам стенке конуса, положительная — по дальней. Зона, где данное правило не будет работать, так как участки обеих стенок конуса окажутся по одну сторону от картинной плоскости, составит менее десяти процентов от радиуса конуса в данной точке, то есть в пределах двух–трех пикселей на краях конуса (рис. 4). Таким образом, после вычитания модели вращения и системной скорости можно судить о пространственном распределении излучающего в $\text{H}\alpha$ газа, а также о скоростях его движения.

Пересчет скоростей осуществляется по формуле, полученной из простых геометрических соображений (рис. 4):

$$V_{\text{out}} = \frac{V_{\text{res}}}{\cos(\alpha/2) \cos i + \sin(\alpha/2) \sin i \sin \phi'}$$

где V_{out} — искомая скорость движения газа вдоль стенок конуса, V_{res} — остаточная лучевая скорость после вычитания круговой составляющей, i — угол между картинной плоскостью и плоскостью галактического диска, $\alpha/2$ — половинный угол раствора проекции конуса, ϕ — азимутальный угол относительно оси конуса.

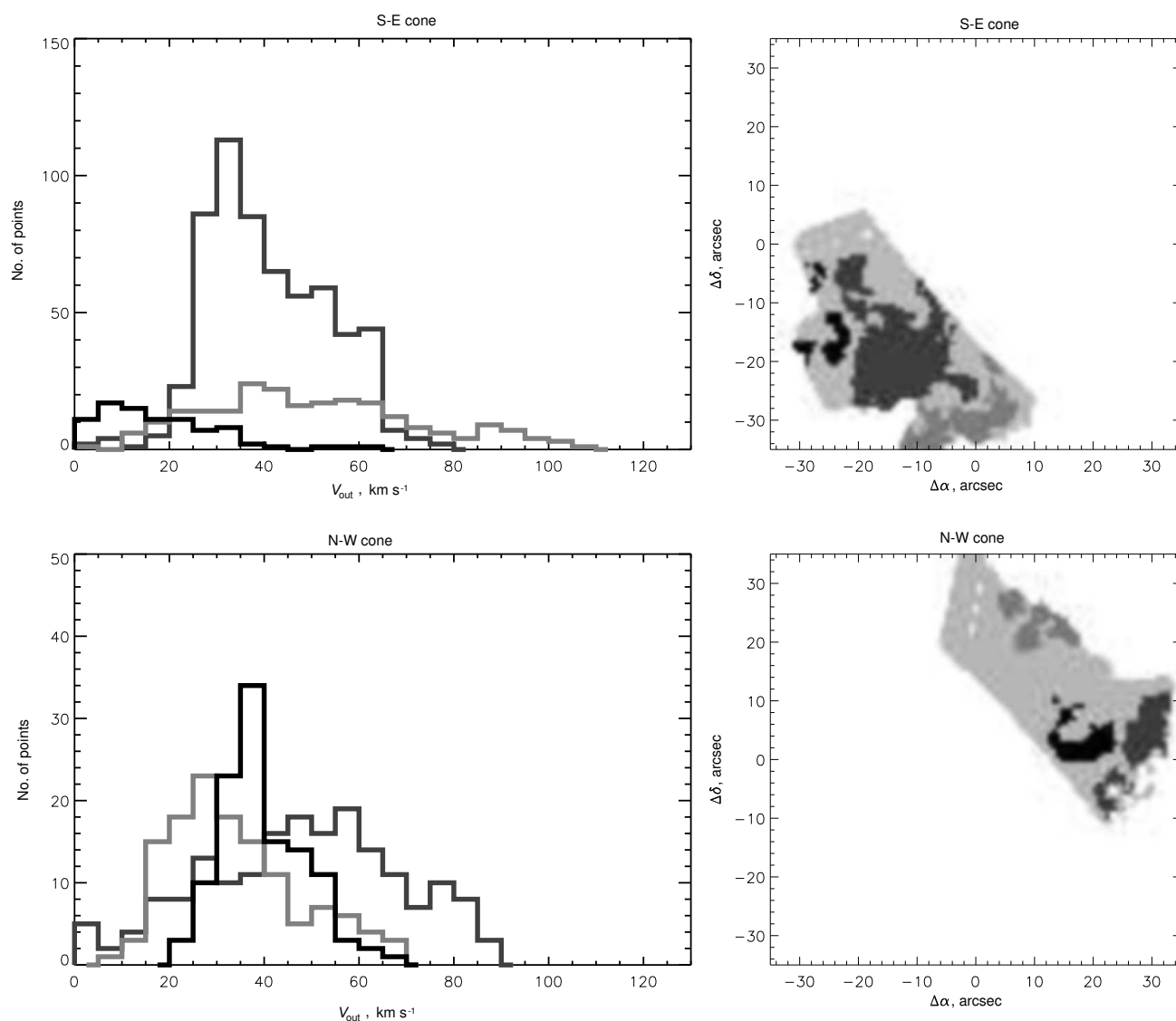


Рис. 5. Распределение скоростей в наиболее быстрых филаментах для дальнего (юго-восточного, сверху) и ближнего (северо-западного, внизу) конусов. Справа — расположение рассматриваемых филаментов на картинной плоскости; слева — гистограмма распределения скоростей в них. Более светлые регионы — фоновые области с низкими ($10\text{--}20\text{ км с}^{-1}$) скоростями — не представленные на гистограмме. Тёмными оттенками обозначены локальные области с большими скоростями движения вдоль стенок конуса.

Из-за неопределённости пространственной ориентации оси галактики нельзя с уверенностью сказать, какой из моделируемых конусов ближе к наблюдателю, что требуется, чтобы пересчитать остаточные лучевые скорости в скорости движения газа вдоль стенок конуса, поэтому мы будем рассматривать оба варианта ориентации конусов. Кроме того, из-за эффекта проекции на картинную плоскость возникает неопределённость с тем, в какой из стенок данного конуса находится излучающая точка — ближней или дальней к наблюдателю. Эта неопределённость влияет на величину угла ϕ . Однако, как было замечено

выше, мы можем понять, на какой из сторон конуса находится излучающая точка, зная знак остаточных лучевых скоростей.

После учета эффекта проекции получаем, что модель, в которой юго-восточный конус принят расположенным ближе к наблюдателю, имеет явно неодинаковое распределение скоростей для ветра по обе стороны галактики: $130\text{--}150\text{ км с}^{-1}$ для юго-восточного и $10\text{--}30\text{ км с}^{-1}$ для северо-западного конусов, в то время как вторая модель (где юго-восточный конус принимается дальним от наблюдателя) дает значительно более близкие скорости истечения для обоих конусов. Поэтому в

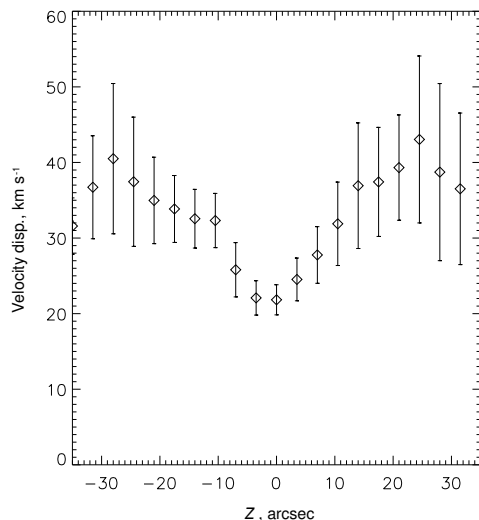


Рис. 6. Зависимость дисперсии скоростей от расстояния до диска галактики и от скорости истечения.

дальнейшем именно эту пространственную ориентацию мы считаем корректной. Участки больших скоростей на границах конусов малопригодны для анализа, потому что здесь мы не можем однозначно определить, к какой стороне, ближней или дальней, относится вещество, а значит, не можем вычислить угол ϕ , а также из-за отличия нашей простой модели от реальной морфологии ветра, которая на малых значениях $|\sin(\phi)|$ приводит к явно ложным результатам.

4. ОБСУЖДЕНИЕ

4.1. Параметры ветра. Сравнение с другими галактиками

На построенной карте скоростей истечения (рис. 3 справа внизу) на фоне относительно медленного газа, $V_{\text{out}} = 10\text{--}20 \text{ км с}^{-1}$, выделяются отдельные быстро движущиеся филаменты. На рис. 5 приведены гистограммы распределения скоростей внутри таких областей. Анализ этих гистограмм позволяет сделать вывод, что характерные скорости галактического ветра в NGC 4460 лежат в пределах $30\text{--}80 \text{ км с}^{-1}$.

При сравнении с другими галактиками, например с NGC 1482, где скорости истечения достигают 250 км с^{-1} [17], или $300\text{--}350 \text{ км с}^{-1}$ в M 82 [5], ветер в NGC 4460 демонстрирует значительно меньшие скорости, сопоставимые с истечениями в карликовых галактиках, таких как NGC 2366 ($30\text{--}50 \text{ км с}^{-1}$) [18] или NGC 4681 ($30\text{--}80 \text{ км с}^{-1}$) [19]. Отметим, что в отличие от этих

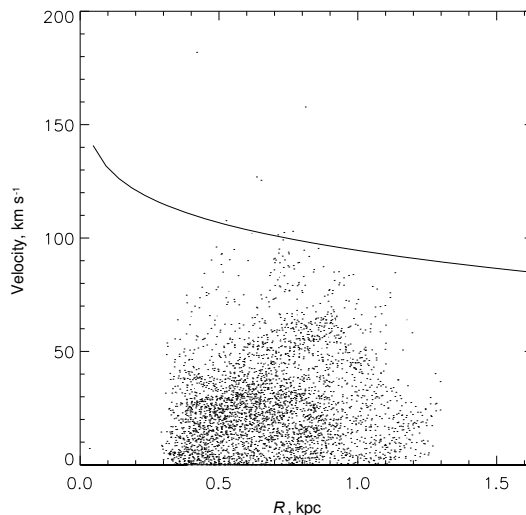


Рис. 7. Распределение скоростей истечения вещества из плоскости галактического диска (точки) в зависимости от расстояния до центра галактики. Сплошная линия — зависимость скорости, необходимой для покидания веществом галактики в рамках модели псевдоизотермического гало радиуса 6 кпк.

двух галактик, где наблюдались отдельные изолированные истечения от областей H II, в NGC 4460 присутствует значительно более масштабная и коллимированная структура галактического ветра.

Ранее по ширине линий, измеренных в спектрах низкого разрешения, была получена оценка скорости ветра более 130 км с^{-1} [12]. Теперь же мы значительно уточнили этот параметр, так как наша геометрическая модель позволила уверенно выделить в поле скоростей компонент, соответствующий ГВ. Это позволило скорректировать значения прочих параметров ветра: возраст образованной ветром структуры лежит в пределах $20\text{--}50$ млн лет; при массе выброшенного из диска газа $M_{\text{wind}} = 1.7 \times 10^5 M_{\odot}$ его кинетическая энергия составит $E_{\text{wind}} = 0.3\text{--}2.2 \times 10^{52}$ эрг.

Распределение дисперсии лучевых скоростей перпендикулярно к галактическому диску (рис. 6) демонстрирует, что вне ярких плотных областей в газе становятся существенны турбулентные движения — значения дисперсии скоростей достигают $40\text{--}50 \text{ км с}^{-1}$, что согласно нашим оценкам сопоставимо с самой скоростью истечения. Отметим, что небольшой вклад в измеряемую дисперсию скоростей вносит тепловое уширение эмиссионных линий, составляющее около 10 км с^{-1} для электронной температуры порядка $10\,000 \text{ К}$, характерной для областей H II.

4.2. Скорость покидания галактики

Используя методику, аналогичную применяемой в работах [18, 19], попытаемся определить, является ли скорость ветра достаточной для того, чтобы преодолеть силу притяжения галактики и позволить газу быть выброшенным в межгалактическое пространство.

Для оценки скорости, необходимой газу для покидания галактики, воспользуемся моделью сферического псевдоизотермического гало тёмной материи, достаточно хорошо описывающей внешние кривые вращения для карликовых галактик.

В этой модели скорость покидания галактики

$$V_{\text{esc}}(r) = \sqrt{2V_c^2(1 + \ln(r_h/r))},$$

где V_c — скорость вращения галактики, r_h — радиус тёмного гало [20].

Радиус гало примем равным холмберговскому радиусу галактики 2.135 [10], что составляет приблизительно 6 кпк.

Построим график распределение скоростей истечения вещества в зависимости от расстояния от центра галактики (рис. 7). Если наложить на него кривую модельной скорости покидания галактики, можно увидеть, что подавляющая масса вещества находится значительно ниже, т.е. не достигает данных скоростей. Несколько точек, формально оказавшихся выше линии $V_{\text{esc}}(r)$, скорее всего объясняются ошибками, вызванными иным направлением вектора скорости, нежели предполагаемое в разделе 3.3.

Таким образом, истечение вещества происходит с энергией, недостаточной для покидания галактики.

5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Наблюдения с помощью сканирующего интерферометра Фабри—Перо с достаточно высоким спектральным (порядка 19 км с^{-1}) и пространственным (около 120 пк) разрешением позволили изучить структуру галактического ветра в NGC 4460:

- галактический ветер в NGC 4460, в основном, представлен двумя потоками, истекающими из плоскости диска галактики в противоположных направлениях; характерные скорости этих потоков составляют $30\text{--}80 \text{ км с}^{-1}$;
- галактический ветер в NGC 4460 является клочковатой, сильно возмущённой, сложной структурой.

Сравнение скоростей галактического ветра и модельных скоростей убегающего для случая псевдоизотермического гало тёмной материи позволяет сделать вывод, что энергии ветра недостаточно, чтобы выбросить газ за пределы области гравитационного влияния галактики. Поэтому следует ожидать, что по прошествии времени, охладившись, вещество вновь упадёт на галактический диск. Этот вывод согласуется с аналогичными результатами [18, 19], полученными для локальных истечений ионизованного газа в NGC 2366 и NGC 4681.

БЛАГОДАРНОСТИ

Работа проводилась при финансовой поддержке гранта Российского научного фонда № 14-22-00041. Статья основана на данных наблюдений, проводимых на 6-м телескопе САО РАН при финансовой поддержке Министерства образования и науки РФ (соглашение № 14.619.21.0004, проект ID PRFMEFI61914X0004).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. S. Veilleux, G. Cecil, and J. Bland-Hawthorn, *Annual Rev. Astron. Astrophys.* **43**, 769 (2005).
2. P. F. Hopkins, E. Quataert, and N. Murray, *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **421**, 3522 (2012).
3. M. Pettini, M. Kellogg, C. C. Steidel, et al., *Astrophys. J.* **508**, 539 (1998).
4. S. Arribas, L. Colina, E. Bellocchi, et al., *Astron. and Astrophys.* **568**, A14 (2014).
5. M. S. Westmoquette, L. J. Smith, J. S. Gallagher III, et al., *Astrophys. J.* **696**, 192 (2009).
6. K. Matsubayashi, H. Sugai, T. Hattori, et al., *Astrophys. J.* **701**, 1636 (2009).
7. M. S. Westmoquette, L. J. Smith, and J. S. Gallagher, *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **383**, 864 (2008).
8. G. Cecil, J. Bland-Hawthorn, S. Veilleux, and A. V. Filippenko, *Astrophys. J.* **555**, 338 (2001).
9. C. Melioli, E. M. de Gouveia Dal Pino, and F. G. Geraissate, *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **430**, 3235 (2013).
10. E. I. Kaisina, D. I. Makarov, I. D. Karachentsev, and S. S. Kaisin, *Astrophysical Bulletin* **67**, 115 (2012).
11. S. S. Kaisin and I. D. Karachentsev, *Astron. and Astrophys.* **479**, 603 (2008).
12. A. Moiseev, I. Karachentsev, and S. Kaisin, *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **403**, 1849 (2010).
13. V. L. Afanasiev and A. V. Moiseev, *Astronomy Letters* **31**, 194 (2005).
14. A. V. Moiseev, *Bull. Spec. Astrophys. Obs.* **54**, 74 (2002).
15. A. V. Moiseev and O. V. Egorov, *Astrophysical Bulletin* **63**, 181 (2008).
16. A. V. Moiseev, *Astrophysical Bulletin* **69**, 1 (2014).

17. S. Veilleux and D. S. Rupke, *Astrophys. J.* **565**, L63 (2002).
18. J. van Eymeren, M. Marcelin, B. Koribalski, et al., *Astron. and Astrophys.* **493**, 511 (2009).
19. J. van Eymeren, M. Marcelin, B. S. Koribalski, et al., *Astron. and Astrophys.* **505**, 105 (2009).
20. J. Binney and S. Tremaine, *Galactic Dynamics* (Princeton Univ. Press, Princeton, 1987).

Galactic Wind in NGC 4460: New Observations

D. V. Oparin and A. V. Moiseev

NGC 4460 is an isolated lenticular galaxy, in which galactic wind has been earlier discovered as a gas outflow associated with circumnuclear regions of star formation. Using the results of observations in the H α line with the scanning Fabry–Perot interferometer on the SAO RAS 6-m telescope, we studied the kinematics of the ionized gas in this galaxy. The parameters of gas outflow from the plane of the galactic disk were refined within a simple geometric model. We show that it is impossible to characterize the wind by a fixed velocity value. Characteristic outflow velocities are within 30–80 km s⁻¹, and they are insufficient to make the swept-out matter ultimately leave the galaxy.

Keywords: *galaxies: ISM—galaxies: starburst—galaxies: individual: NGC 4460*