

УДК 524.724-423

**ИЗОГНУТОЕ ПОЛЯРНОЕ КОЛЬЦО В ГАЛАКТИКЕ Aгр 212**© 2008 А. В. Моисеев<sup>1</sup><sup>1</sup> *Специальная астрофизическая обсерватория, Нижний Архыз, 369167 Россия*

Поступила в редакцию 9 апреля 2008 г.; принята в печать 5 мая 2008 г.

С помощью сканирующего интерферометра Фабри-Перо на 6-м телескопе САО РАН изучено распределение и кинематика ионизованного газа в пекулярной галактике Aгр 212 (NGC 7625, III Zw 102). В пределах оптического радиуса обнаружено две кинематически различные подсистемы вращающегося газа — внутренний диск и внешние эмиссионные филаменты. Вращение первой подсистемы, на расстояниях  $r < 3.5$  кпк от центра, происходит в плоскости звездного диска. При этом внутренняя часть диска ионизованного газа ( $r < 1.5-2$  кпк) точно совпадает с известным ранее диском молекулярного газа. Вторая подсистема ионизованного газа располагается на расстояниях 2–6 кпк от центра. Здесь вращение происходит в плоскости, находящейся под значительным углом к звездному диску. Угол наклона орбит филаментов во внешнем диске увеличивается с расстоянием от центра и достигает  $50^\circ$  на  $r \approx 6$  кпк. Далее ионизованная фракция газового диска уже не обнаруживается, но мы предполагаем, что диск нейтрального водорода продолжает изгибаться и приближается к плоскости, полярной относительно внутреннего диска галактики. Таким образом, Aгр 212 можно отнести к классу галактик с полярными кольцами (дисками). Наблюдаемая кинематика молекулярного, ионизованного и нейтрального газа объясняется в предположении, что распределение гравитационного потенциала в галактике отлично от сферически симметричного. Наиболее вероятной причиной образования полярного кольца является аккреция газа с карликового спутника UGC 12549.

Key words: *галактики, группы и скопления галактик***1. ВВЕДЕНИЕ**

В настоящее время практически общепризнанным является утверждение, что гравитационные взаимодействия и слияния играют одну из важнейших ролей в эволюции галактик, изменяя их наблюдаемую структуру, кинематику, историю звездообразования и т.д. Одним из следствий таких взаимодействий являются галактики с полярными кольцами (ГПК). В таких объектах наблюдаются кольца или диски из газа, пыли и звезд, вращающиеся в плоскости примерно перпендикулярной (полярной) диску основной (“хозяйской”) галактики. Считается, что образование ГПК, в большинстве случаев, вызвано слиянием галактик, аккрецией на хозяйскую галактику вещества спутника или газовых филаментов из межгалактической среды (см. [1, 2], там же ссылки на более ранние работы).

Поскольку в случае ГПК наблюдается круговое вращение в двух взаимно перпендикулярных плоскостях, то появляется возможность изучить трехмерное распределение массы в галактике, в том числе определить форму темного гало: сплюснутость, вытянутость, отклонения от осевой симметрии [2]. Для этого необходимо получить достаточно подробную информацию о внутренней кинематике ГПК. В статье [3] был приведен список

из 157-ми кандидатов в галактики с полярными кольцами, отобранных в основном по пекулярности их внешнего вида. Однако, число “реальных” ГПК, т.е. таких, где действительно наблюдается вращение в ортогональных плоскостях, значительно меньше. Даже в самом простом случае, когда и центральная галактика, и кольцо видны в положении “с ребра”, требуется получить как минимум два спектральных разреза с длинной щелью, чтобы определить характер вращения обеих подсистем. Если же пространственная ориентация такова, что одна из плоскостей вращения видна под умеренным наклоном к лучу зрения, то возникает ряд трудностей. Во-первых, используя только прямые снимки, далеко не всегда удастся понять, что объект относится к ГПК. Во-вторых, для детального изучения кинематики необходимо получить значительно большее количество разрезов с различной ориентацией щели спектрографа. В этом случае лучше построить двумерное поле скоростей, используя методы панорамной спектроскопии в оптическом диапазоне или радиоинтерферометрии в линиях молекулярного или атомарного газа. Хорошей иллюстрацией является пример галактики NGC 2655. В ней присутствие внутреннего полярного кольца было заподозрено благодаря мощной пылевой полосе, пересекающей диск галактики.

Сравнение полей скоростей газа и звезд в околоядерной области подтвердило правильность такой интерпретации [4]. А недавние наблюдения в линии 21 см позволили уже детально проанализировать структуру и кинематику полярного кольца [5]. Отметим, что в столь сложных объектах, иногда даже наличие большого набора как фотометрических, так и кинематических данных не всегда позволяет сделать однозначный вывод о структуре подсистем галактики, см. пример UGC 5600 в работе [6].

В представленной статье рассмотрены новые наблюдательные данные, касающиеся пекулярной галактики Agr 212. Хотя этот объект по косвенным признакам считался возможным кандидатом в галактики похожие на ГПК, однако полярного компонента до сих пор в нем обнаружено не было. В разделе 2 дается краткая сводка информации об этой галактике, далее в разделе 3 описываются наблюдения и обработка данных, полученных на 6-м телескопе САО РАН. В разделе 4 показано, что в поле скоростей ионизованного газа обнаруживаются две подсистемы с различными плоскостями вращения. В следующем разделе 5 для объяснений кинематики полярного кольца построена двумерная модель вращения газа во внешних областях. Общая структура галактики обсуждается в разделе 6. Основные выводы и заключение сформулированы в разделе 7.

## 2. Agr 212: ИСТОРИЯ ИССЛЕДОВАНИЯ

Agr 212 (NGC 7625, III Zw 102) — пекулярная галактика. Согласно базе данных NED, она относится к типу SA(rs)a pec, ее оптический диаметр  $D_{25} = 1'.6$ . Большинство авторов относят галактику к объектам раннего морфологического типа — к линзовидным или даже эллиптическим галактикам (см. обсуждение в [7]). В то же время, галактика богата газом (как атомарным, так и молекулярным) и содержит многочисленные области HII, свидетельствующие о бурном звездообразовании. Современный темп звездообразования, согласно оценкам [8, 9], составляет от 2.7 до 8  $M_{\odot}$ /год.

Во многом благодаря высокой интенсивности излучения в эмиссионных линиях ионизованного газа, авторы работы [10] отнесли Agr 212 к классу голубых компактных карликовых галактик (BCDG), хотя ее размеры ( $D_{25} = 11$  кпк), масса и светимость ( $(3-8) \times 10^{10} M_{\odot}$ ,  $L_B = 1.3 \times 10^9 L_{\odot}$ , согласно [8]) значительно превышают таковые для карликовых [7]. Тем не менее, традиция сохраняется, и объект продолжает фигурировать в различных каталогах и выборках BCD галактик [11–13].

Отметим, что и классификацию Agr 212 как галактики раннего типа тоже ставят под сомнение. В работе [11] показано, что уже на небольших

расстояниях от центра ( $r > 1$  кпк), профиль поверхностной яркости хорошо описывается экспоненциальным законом, характерным для плоского диска. Поэтому авторы относят галактику к позднему типу Im.

Наиболее известная особенность Agr 212, заметная на всех опубликованных оптических снимках, — цепочка пылевых полос, образующих незамкнутое кольцо радиусом около 15 – 20", вытянутое вдоль  $PA \approx 45^\circ$ . Юго-западная часть кольца характеризуется наиболее мощными взаимно пересекающимися пылевыми прожилками. Благодаря этой детали галактика была не только внесена в список пекулярных галактик Арпа [14], но и отмечена в работе [3], как объект “родственный галактикам с полярными кольцами”.

Другая интересная структурная особенность была обнаружена на снимках в эмиссионной линии  $H\alpha$  [12]. Большая часть излучения ионизованного водорода концентрируется в центральной области галактики. В то же время, часть областей HII располагается в криволинейных филаментах, простирающихся до 4 кпк (35 – 45") от центра. По предположению авторов статьи [12] эти структуры напоминают приливные хвосты в известной галактике Антенны (Antennae, VV 245), т.е. вызваны недавним взаимодействием.

Кинематика межзвездной среды изучалась в Agr 212 неоднократно. С помощью длиннощелевого спектрографа вдоль большой оси галактики был обнаружен значительный градиент лучевой скорости ионизованного газа [15], скорость вращения достигает 155 км/с. Измерения лучевых скоростей молекулярного газа [8] показали, в целом, неплохое согласие между наблюдениями и моделью кругового вращения газового диска. В то же время, в нескольких областях вблизи пылевых полос были обнаружены заметные отклонения от кругового вращения, возможно связанные с выпадением газовых облаков на диск галактики. Относительно низкое пространственное разрешение этих радионаблюдений ( $beam = 15''$ ) не позволяло дать однозначную интерпретацию наблюдаемой картине движения газа. Построенное в работе [9] поле скоростей в линии CO с разрешением в два раза лучшим показало, что молекулярный диск внутри  $r < 17''$  совершает круговое вращение в плоскости звездного диска. Измерить скорости молекулярного газа в районе пылевых полос не удалось, но в той же статье представлено поле скоростей HI. Оказалось, что диаметр диска нейтрального водорода в 4 раза превышает оптический диаметр  $D_{25}$ . При этом газ за пределами звездного диска вращается в той же плоскости, но в противоположном направлении. Кинематика нейтрального водорода внутри оптического диска весьма сложна, изолинии лучевых

скоростей разворачиваются почти на  $90^\circ$ . Авторы предположили, что здесь присутствует либо сильный изгиб газового диска (waгr), либо наклоненное газовое кольцо. К сожалению, низкое пространственное разрешение ( $beam = 51''$ ) не позволяло изучить характер движения нейтрального газа внутри оптического диска.

То, что галактика несет в себе следы недавнего взаимодействия, сомнений не вызывает, но при этом нет четкого ответа на вопросы: с чем именно происходит взаимодействие, как движутся внешние эмиссионные области, и принадлежат ли они вообще галактике и т.д. Ответы могло дать изучение поля скоростей ионизованного газа в “переходной области” между внутренним молекулярным диском и внешней структурой нейтрального водорода. В 2003 г. галактика Aгр212 наблюдалась на 6-м телескопе со сканирующим интерферометром Фабри-Перо (ИФП) по заявке Миһоз-Тиһоп (IAC, Spain) с соавторами. Основной целью проекта было исследование влияния мощного звездообразования на межзвездную среду галактик, первые полученные результаты опубликованы нами в [16]. Однако уже предварительный анализ поля скоростей позволил выделить в Aгр212 вторую, независимо вращающуюся подсистему ионизованного газа, указывающую на существование изогнутого (возможно, полярного) диска. Исследованию кинематики ионизованного газа и посвящена данная работа, базирующаяся на наблюдательных данных из архива САО РАН.

В согласии с [9] мы приняли расстояние до галактики равным 23.5 Мпк, что соответствует масштабу 115 пк в  $1''$ .

### 3. НАБЛЮДЕНИЯ И ОБРАБОТКА ДАННЫХ

#### 3.1. Панорамная спектроскопия

Наблюдения галактики Aгр 212 выполнялись 30 ноября 2003 г. в прямом фокусе 6-м телескопа САО РАН с помощью сканирующего ИФП, установленного внутри фокального редуктора SCORPIO [17, 18]. Рабочий спектральный диапазон вокруг линии  $H\alpha$  вырезался узкополосным фильтром с шириной полосы  $FWHM = 21\text{\AA}$ . Свободный спектральный диапазон между соседними порядками интерференции составлял  $13\text{\AA}$  ( $\sim 600$  км/с). Разрешение интерферометра ( $FWHM$  инструментального профиля) составляло  $0.8\text{\AA}$  (35 км/с), при масштабе  $0.36\text{\AA}$  на канал. В качестве приемника использовалась ПЗС матрица EEV 42-40 размером  $2048 \times 2048$  пикселей, работающая в режиме аппаратного усреднения  $4 \times 4$  пикселя с целью экономии времени считывания. Результирующий масштаб изображения составил  $0''.7$  на пиксель, при поле зрения  $6.1' \times 6.1'$ .

В процессе наблюдений было последовательно получено 36 интерферограмм объекта, при различных расстояниях между пластинами ИФП. Суммарная экспозиция составляла 6480 секунд, качество изображений (seeing) менялось в пределах  $1''.3-1''.8$ . С целью удаления паразитных бликов, возникающих в пластинах используемого ИФП, объект последовательно наблюдался в двух положениях поля зрения, развернутых по позиционному углу. Удаление изображений бликов проводилось согласно алгоритмам, описанным в [18]. Обработка наблюдательного материала производилась с помощью пакета программ, работающего в среде IDL и описанного в [18, 19]. После первичной обработки, вычитания линий неба и приведения к шкале длин волн наблюдательный материал представлял собою куб данных, в котором каждая точка в поле размером  $512 \times 512$  элементов содержит 36-канальный спектр.

Итоговое угловое разрешение соответствовало качеству изображений  $1''.9$ . С целью увеличения отношения сигнал-шум в областях низкой поверхностной яркости производилось сглаживание исходных данных двумерной гауссианой с полушириной эквивалентной этому качеству изображений. После описанной процедуры пространственное разрешение составило  $2''.7$ . Мы проанализировали данные с обоими вариантами пространственного разрешения, полученные выводы согласуются друг с другом. Далее в статье приводятся только результаты анализа сглаженного куба, поскольку точность определения кинематических параметров здесь несколько выше, чем в несглаженных данных.

Профили эмиссионной линии  $H\alpha$  аппроксимировались функцией Фойгта (Voigt), которая в большинстве случаев хорошо описывает наблюдаемый контур (см. обсуждение в [18]). По результатам аппроксимации профилей построены двумерное поле лучевых скоростей ионизованного газа, поле дисперсии лучевых скоростей, а также изображения галактики в эмиссионной линии  $H\alpha$  и в соседнем континууме. Точность измерения лучевых скоростей оценивалась по измерениям отношения сигнал-шум, с использованием соотношений, приведенных на Рис. 5 в [18]. Она составляла 1–6 км/с в ярких областях  $HII$  и достигала 10–20 км/с в областях с минимальной поверхностной яркостью, в которых эмиссионная линия выделяется на уровне  $S/N \approx 5$ .

#### 3.2. Глубокое изображение

Прямой снимок Aгр212 был получен 5 февраля 2008 г. на 6-м телескопе САО РАН с помощью той же аппаратуры (фокального редуктора SCORPIO). Суммарная экспозиция в фильтре  $R_c$

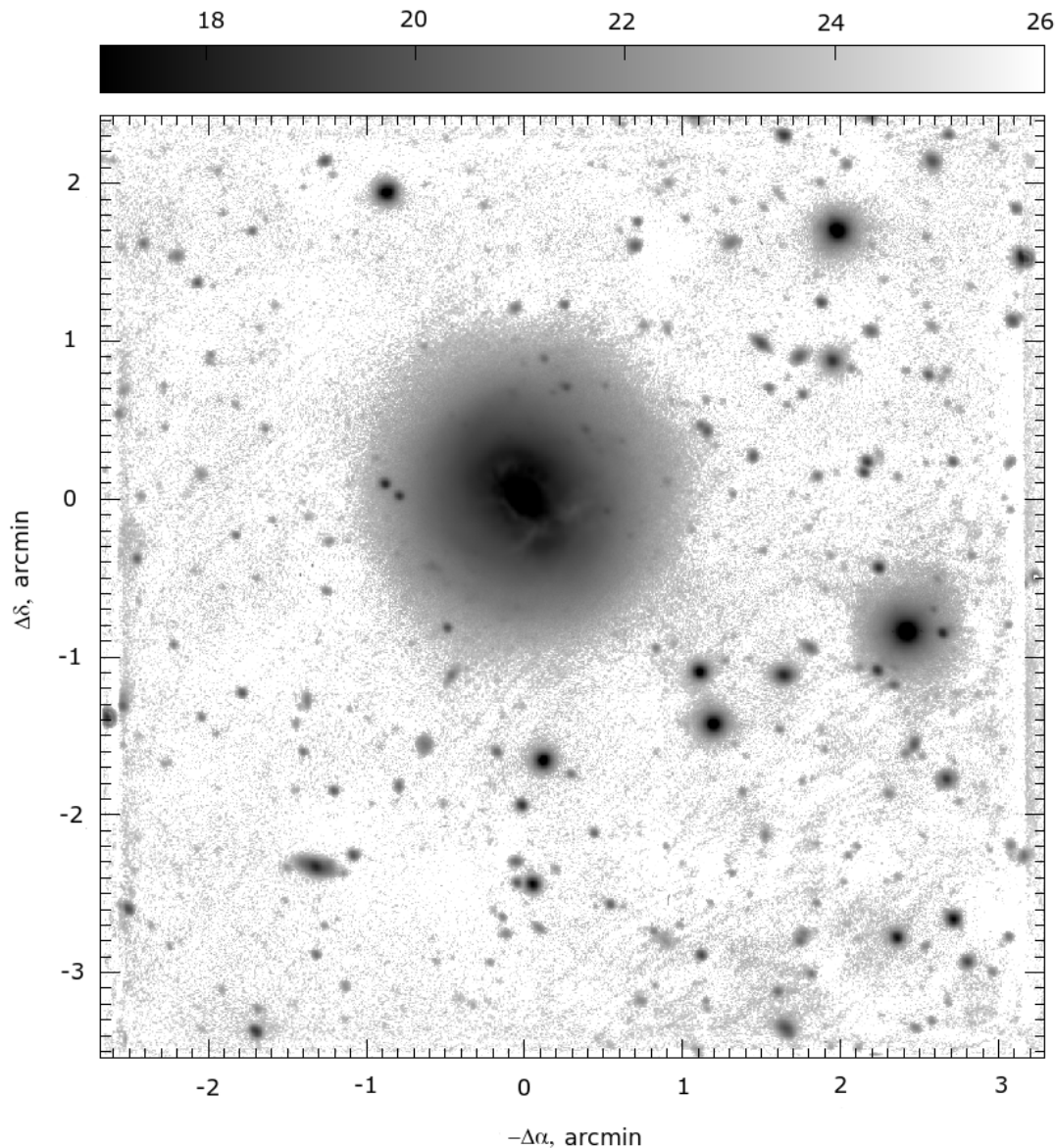


Рис. 1. Глубокое изображение Агр 212 в фильтре  $R_c$  в шкале звездных величин.

системы Джонсона-Касинса составляла 1320 с, качество звездных изображений (seeing)  $1''.9$ , масштаб изображения  $0''.35$  на пиксель, поле зрения  $6.1' \times 6.1'$ . Калибровка снимка в шкалу звездных величин проводилась на основании профиля поверхностной яркости в этом фильтре из работы [11]. Несмотря на то, что наблюдения выполнялись в нефотометрических атмосферных условиях на зенитных расстояниях  $z=61-71^\circ$ , удалось получить наиболее глубокое из известных нам изображений галактики. Предел обнаружения слабых протяженных объектов на снимке по уровню  $1\sigma$  составляет  $25.2 - 25.5^m / \square''$ . Радиально усредненный

профиль поверхностной яркости галактики прослеживается в полтора раза дальше, чем построенный в работе [11], достигая уровня  $26^m / \square''$ . Снимок был получен с целью поиска возможных приливных структур низкой поверхностной яркости вблизи галактики. Однако, как видно из рисунка 1, никаких внешних филаментов в поле зрения не обнаруживается.

Мы выполнили разложение профиля поверхностной яркости на стандартные компоненты: экспоненциальный диск (радиальная шкала  $h=10''.3$  что близко к результату [11], центральная поверхностная яркость  $\mu_0 = 17.4^m$ ) и балдж Серсика с параметрами  $n = 1$ ,  $r_e = 5''.2$ ,  $\mu_e = 17.7^m$ . Цен-

тральная поверхностная яркость диска значительно превосходит среднее значение для дисковых галактик, что характерно для взаимодействующих систем [20]. Отношение светимостей компонент  $B/D = 0.20$  позволяет отнести галактику к поздним типам (Sc). Отметим, что поскольку показатель степени в законе Серсика  $n = 1$ , а угол наклона галактики невелик, то мы не можем отличить балдж от внутреннего экспоненциального диска. Так что вклад сферической составляющей может быть еще меньше, а галактика, соответственно, относится к еще более позднему морфологическому типу.

## 4. АНАЛИЗ ПОЛЯ ЛУЧЕВЫХ СКОРОСТЕЙ

### 4.1. Модель чисто кругового вращения

На Рис. 2 приведено изображение галактики в линии  $\text{H}\alpha$  и поле лучевых скоростей ионизованного газа. Нам удалось уверенно измерить скорости почти во всех внешних эмиссионных областях, обнаруженных в [12]. Видно, что форма изолиний поля скоростей соответствует регулярному вращению в области ограниченной расстоянием от центра  $r \approx 20''$ , т.е. там, где сосредоточена большая часть эмиссии в  $\text{H}\alpha$ . Вид поля скоростей хорошо согласуется с данными панорамной спектроскопии для внутренней области, приведенными в недавней работе [13]. Положение центра вращения, определяемое из соображений симметрии поля скоростей, в пределах ошибок совпадает с центром изофот изображений в линии  $\text{H}\alpha$  и в континууме. Анализ поля скоростей проводился методом “наклонных колец” [21]. Поле скоростей разделялось на эллиптические кольца шириной  $1''$ , ориентированные согласно принятым значениям позиционного угла большой оси ( $PA_0$ ) и наклона диска ( $i_0$ ). Положение центра вращения фиксировалось. В первом приближении  $PA_0$  и  $i_0$  оценивались из фотометрии. В каждом кольце в приближении кругового вращения определялось оптимальное значение позиционного угла кинематической оси  $PA_{kin}$ , средняя скорость вращения  $V_{rot}$  и системная скорость  $V_{sys}$ . Обоснование метода и ссылки на оригинальные работы смотри, к примеру, в [22, 23].

Предварительный анализ показал, что в поле скоростей можно выделить две группы областей: со скоростями близкими к модели кругового вращения на данном радиусе  $r$  и заметно отличающиеся от нее более чем на некоторую пороговую величину ( $v_{lim}$ ). Мы построили несколько вариантов модели кругового вращения, подбирая  $v_{lim}$  так, чтобы точки, принадлежащие каждой группе скоростей, сосредоточивались в пространственно связанных в картинной плоскости областях. Наилучший результат достигается для  $v_{lim} \approx 36$  км/с, при этом

в поле скоростей четко выделяются два типа областей, показанные на Рис. 3: внутренний диск с вращением, близким к круговому, и отдельные кинематически выделенные области. К последним относятся все внешние области III на расстоянии более  $20''$  от центра, а также несколько областей III, проецирующихся на юго-западный край диска галактики.

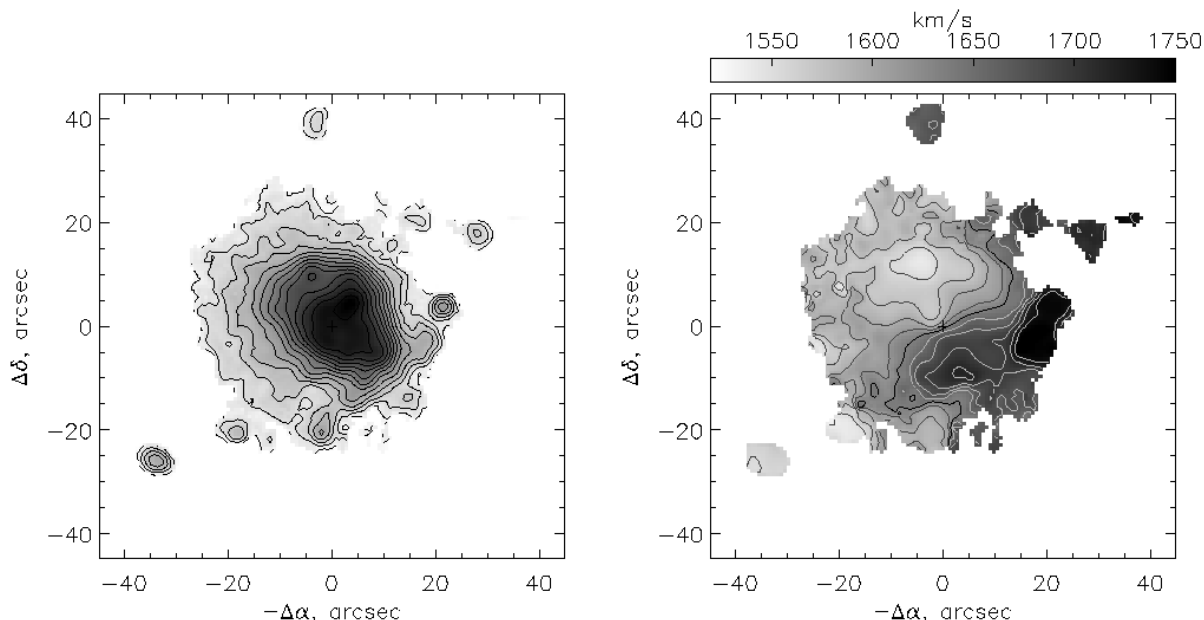
В Табл. 1 даны параметры ориентации внутреннего диска галактики, полученные из поля скоростей в предположении, что  $PA$ ,  $i$  и  $V_{sys}$  не меняются вдоль радиуса (модель чисто кругового вращения в одной плоскости). В пределах приведенных ошибок, соответствующих отклонению  $3\sigma$ , они совпадают с величинами, найденными в [9] для поля скоростей диска молекулярного газа на  $r \leq 15''$ .

### 4.2. Модель квазикругового вращения

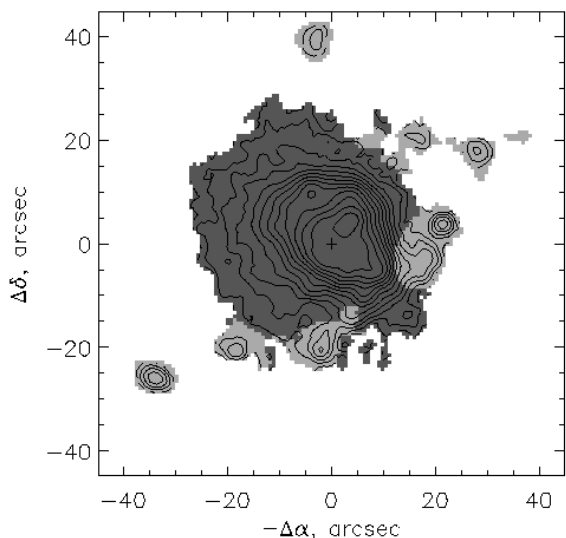
#### 4.2.1. Внутренний диск

Для уточнения вышеизложенной модели использовалось квазикруговое приближение, позволяющее учесть некруговые движения, изгиб диска и т.п. Здесь предполагалось, что газ вращается по круговым орбитам, у которых  $V_{sys}$  и  $PA_{kin}$  меняются с радиусом. Результаты анализа показаны на Рис. 4. Вариации системной скорости не превышают  $\pm 10$  км/с от найденного выше среднего значения. Кривая вращения внутренней части диска близка к данным по молекулярному газу, пересчитанным к принятому нами значению  $i_0$ . Но есть и систематические отличия. Во-первых, значительно более резкий градиент скорости вращения ионизованного газа, скорее всего, обусловлен тем, что пространственное разрешение радионаблюдений [9] было в 2.5 раза ниже. Во-вторых, максимальная скорость вращения молекулярного газа несколько выше скорости вращения ионизованного газа, хотя и согласуется с ней в пределах ошибок измерения. Возможно, это различие вызвано асимметричным дрейфом, т.е. различием в дисперсии скоростей изучаемых компонент. Действительно, дисперсия скоростей ионизованного газа за пределами  $r > 10''$  превышает 50 км/с, что говорит о дополнительном увеличении хаотических движений, вызванных мощной вспышкой звездообразования [16].

На  $r = 13-30''$  заметен систематический рост величины  $PA_{kin}$ , полная амплитуда его изменений превышает  $30^\circ$ . Наиболее естественное объяснение этого — изгиб внешних областей диска. К сожалению, из-за сравнительно небольшой величины  $i_0$ , применяемый метод анализа оказывается неустойчивым по параметру  $i(r)$  — углу наклона диска к картинной плоскости внутри каждого узкого кольца. Поэтому, в рамках этой модели не удается определить, как меняется наклон изогнутой части диска к лучу зрения.



**Рис. 2.** Результаты наблюдений Aps 212 в линии H $\alpha$ : распределение интенсивности в логарифмической шкале (слева) и поле лучевых скоростей (справа). Начало координат соответствует центру изофот континуума.



**Рис. 3.** Схема разделения галактики на область внутреннего диска (выделено темным) и внешние филаменты (выделено светлым). Наложены изофоты изображения в линии H $\alpha$ .

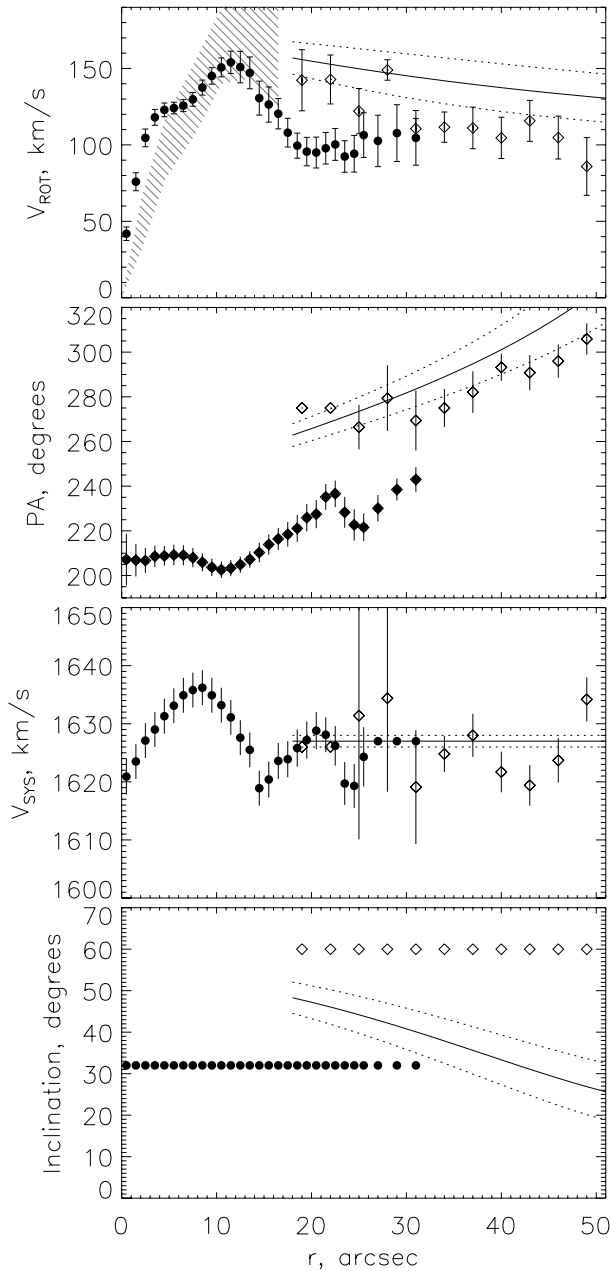
#### 4.2.2. Внешние области

На Рис. 5 слева показана карта остаточных скоростей (наблюдаемые минус модельные), при этом модель экстраполировалась и в область внешних филаментов. Остаточные скорости во внутреннем диске в основном не превышают  $\pm 20$  км/с. В то же время во внешних областях НП они в несколько раз

больше, причем демонстрируют явно систематический характер, плавно меняясь от  $+100$  км/с на северо-западе до  $-75$  км/с на юго-востоке. Картина распределения скоростей внешних филаментов напоминает вращение наклонного диска с параметрами ориентации заметно отличающимися от параметров внутренней области.

Параметры модели вращения внешних областей определялись в рамках чисто круговой модели, аналогично тому, как это было сделано выше для внутреннего диска и приведены в последней колонке Табл. 1. Системные скорости обоих кинематических компонент совпадают, в то время как  $PA_0$  и  $i_0$  сильно различаются. Положение центра вращения внешних областей располагается на расстоянии менее  $1''$  от центра внутреннего диска, т.е. совпадает с ним.

Результаты анализа поля скоростей филаментов в квазикруговом приближении показаны ромбиками на Рис. 4. Анализ проводился в предположении постоянного по радиусу угла  $i$ . Определить вариации  $i(r)$  вновь не удается, на этот раз из-за сравнительно малого числа точек внутри каждого узкого кольца. Позиционный угол линии узлов для круговых орбит филаментов меняется с радиусом, так что во внешних частях разворот  $PA$  относительно внутреннего диска достигает  $90^\circ$ , заметно превышая величину  $PA_0$  из Табл. 1. Обычно вариации  $PA_{kin}$  относительно среднего значения интерпретируют либо как некруговые движения в плоскости диска, либо как изменение ориентации (изгиб) диска относительно луча зрения. Первое предположе-



**Рис. 4.** Изменение кинематических параметров вдоль радиуса, характеризующих поле скоростей ионизованного газа (сверху вниз): скорость кругового вращения, позиционный угол, системная скорость, наклон к лучу зрения. Черные кружки соответствуют внутреннему диску, белые ромбы — внешним эмиссионным областям. Штриховкой на верхнем графике показана скорость вращения молекулярного газа из [9], с учетом ошибок измерения. Сплошными линиями показаны результаты расчета кинематических параметров в двумерной модели изогнутого диска (раздел 5). Пунктиром указан интервал  $3\sigma$ , вычисленный по величинам ошибок модельных параметров из Табл. 2.

**Таблица 1.** Средние кинематические параметры газовых подсистем.

Параметр	Внутренний диск	Внешние филаменты
	(на $r = 0 - 20''$ )	(на $r = 25 - 50''$ )
$PA_0$ ( $^\circ$ )	$211 \pm 6$	$275 \pm 15$
$i_0$ ( $^\circ$ )	$32 \pm 8$	$60 \pm 10$
$V_{sys}$ (км/с)	$1627 \pm 5$	$1626 \pm 6$

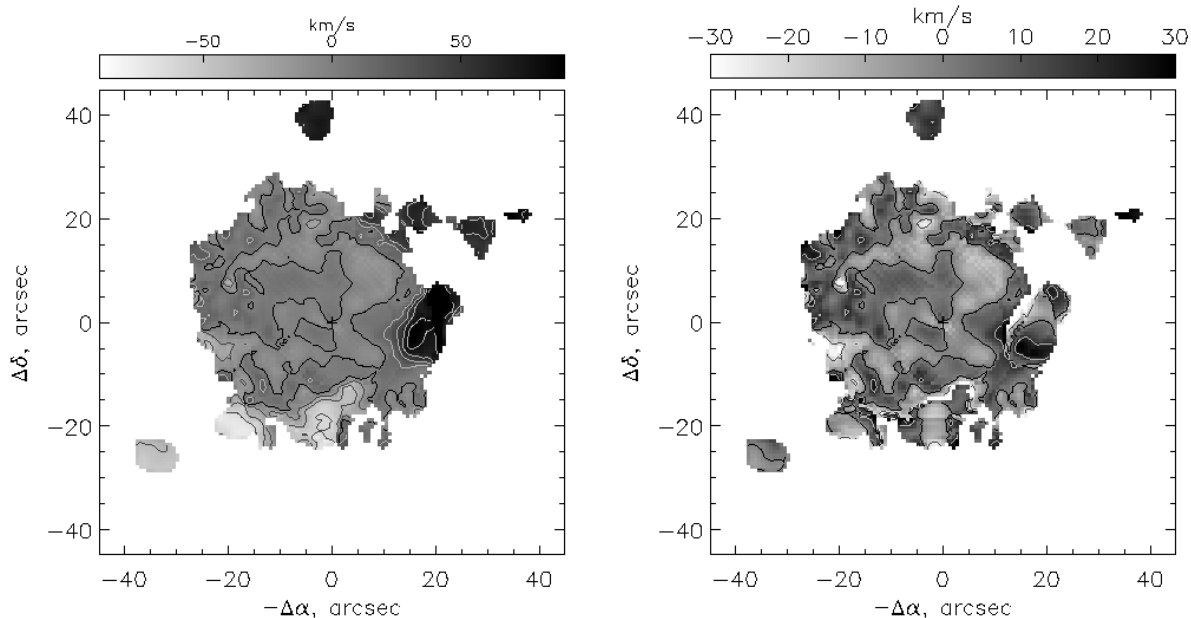
**Таблица 2.** Параметры двумерной модели.

Параметр	Величина
$\delta_0$ ( $^\circ$ )	$29 \pm 3$
$\delta_1$ ( $^\circ''$ )	$0.40 \pm 0.06$
$\gamma_0$ ( $^\circ$ )	$51 \pm 5$
$\gamma_1$ ( $^\circ''$ )	$0.94 \pm 0.15$
$V_{max}$ (км/с)	$89 \pm 7$
$R_h$ ( $''$ )	$-46 \pm 25$
$V_{sys}$ (км/с)	$1627 \pm 1$

ние представляется нам маловероятным, поскольку для наблюдаемого разворота  $PA_{kin}$  на десятки градусов в случае плоского диска требуется значительные радиальные и азимутальные движения (более 50 км/с), сравнимые со скоростью кругового вращения. Такая ситуация иногда наблюдается в галактиках с перемычками, но не характерна для внешних областей диска, поскольку требует значительной асимметричности в распределении гравитационного потенциала (спиральные волны плотности или бар). Второй вариант интерпретации (разворот плоскости круговых орбит) нам представляется наиболее реальным. Тем более, что изгиб (warp) внешнего газового диска — явление распространенное, особенно во взаимодействующих системах. Далее мы рассмотрим возможные ориентации изогнутого диска относительно плоскости галактики.

### 4.3. Пространственная ориентация орбит

Существенные различия параметров ориентации внутренней и внешней газовых подсистем (Табл. 1) указывают на то, что плоскость вращения внешних филаментов значительно наклонена к



**Рис. 5.** Карты остаточных лучевых скоростей (наблюдаемые минус модельные): при использовании круговой модели вращения для внутреннего диска (слева) и для случая отдельного учета вращения внутренних и внешних областей (справа).

плоскости внутреннего диска. Угол  $\delta$  между плоскостями определяется скалярным произведением между их направляющими векторами и выражается соотношением:

$$\cos \delta = \pm \cos(PA_2 - PA_1) \sin i_1 \sin i_2 + \cos i_1 \cos i_2.$$

Здесь индексами “1” и “2” помечены наблюдаемые параметры ориентации обоих дисков. Неопределенность со знаком в первом слагаемом связана с тем, что позиционный угол большой оси  $PA$  и наклон  $i$ , определенные из анализа кинематики, не полностью характеризуют положение плоскости относительно наблюдателя — необходимо еще знать, какая сторона диска ближняя, а какая дальняя. Чтобы внести однозначность, формулу следует записать в виде:

$$\cos \delta = \cos(PA_2 - PA_1) \sin i_1 \sin i_2 + \cos i_1 \cos i_2, \quad (1)$$

уточнив правило отсчета наклона  $i$ , и учтя направление вращения дисков. Если вектор углового момента направлен на наблюдателя, то  $i < 90^\circ$ , если же направление углового момента противоположное, то наклон определяется как  $180^\circ - i$ .

Пылевые полосы, составляющие упоминавшееся в разделе 2 пылевое кольцо, наиболее заметны в южной и юго-восточной сторонах диска галактики (см. изображение на Рис. 1). Карты показателей цвета из [12] так же указывают на то, что юго-восточная половина галактики отличается более

красным цветом, что связано с влиянием пылевого поглощения. Этот вывод подтверждается картами бальмеровского декремента, приведенными в [13]. Из наблюдаемой асимметрии в распределении поглощения следует, что юго-восточная часть звездного диска Агр 212 является ближайшей к нам, а из вида его поля скоростей — что вектор углового момента вращения направлен в нашу сторону.

Из Рис. 3 видно, что большинство внешних эмиссионных областей сосредоточено в юго-западной стороне галактики, а в диапазоне  $PA \approx 0-130^\circ$  области III с аномальными (относительно внутреннего диска) скоростями вообще отсутствуют. Разумно предположить, что эта часть внешнего диска скрыта от наблюдателя звездным диском галактики. Тогда юго-западная часть орбит эмиссионных филаментов является ближайшей к нам, а вектор углового момента направлен к наблюдателю.

С учетом вышеприведенных соображений об ориентации дисков относительно наблюдателя, для  $i_1 = 32^\circ$ ,  $i_2 = 60^\circ$ ,  $PA_1 = 211^\circ$ , принимая изменения  $PA_2$  с радиусом согласно Рис. 4, вычисляем по (1) угол между плоскостями. А именно,  $\delta = 45 \pm 11^\circ$  для внутренней части изогнутого диска ( $r = 20''$ ), с ростом расстояния от центра угол увеличивается и достигает  $68 \pm 10^\circ$  на  $r = 50''$ .

## 5. ДВУМЕРНАЯ МОДЕЛЬ

Проведенное выше рассмотрение кинематики газа методом “наклонных колец” является тради-



ционным подходом к анализу поля скоростей галактических дисков. Несмотря на то, что нам удалось сделать ряд количественных оценок и выводов о поведении внешних газовых филаментов, у этого подхода есть и недостаток. Из-за недостаточного заполнения поля скоростей точками на различных позиционных углах пришлось предположить, что наклон к лучу зрения орбит во внешнем диске не меняется с радиусом. В то же время мы показали, что этот диск является заметно изогнутым, так что угол наклона орбит относительно внутренних областей, меняется с радиусом. В качестве более адекватной модели, описывающей поведение такого диска, мы попробовали использовать двумерную модель изогнутого диска, описанную в работе [24]. Здесь диск разбивается на узкие кольца, ориентация  $n$ -го кольца относительно основной плоскости галактики задается вертикальным углом<sup>1)</sup>  $\delta_n$  и азимутальным углом  $\gamma_n$ . Нами было принято предположение о линейном законе изменения этих углов с галактоцентрическим расстоянием  $r_n$ :

$$\delta_n(r_n) = \delta_0 + \delta_1 r_n, \quad \gamma_n(r_n) = \gamma_0 + \gamma_1 r_n. \quad (2)$$

Для кривой вращения диска было принято широко используемое приближение [24, 25]:

$$V_{rot}(r_n) = \frac{2}{\pi} V_{max} \arctan \frac{r_n}{R_h}. \quad (3)$$

Выражения (2) и (3) неплохо аппроксимируют результаты, полученные в рамках модели, описанной в предыдущем разделе.

Для каждого кольца рассчитывалось распределение лучевых скоростей, согласно кривой вращения (3), все необходимые выражения приведены в [24]. Вклад каждого кольца в суммарное поле скоростей считался одинаковым. В отличие от [24] мы не занимались одновременной аппроксимацией распределения поверхностной яркости изогнутого диска, из-за его “клочковатого” вида.

Принципиальным отличием данного подхода от методов раздела 4 является то, что здесь мы строим модель сразу всего поля скоростей и подгоняем ее под наблюдения. Модельное поле скоростей сверялось с двумерной гауссианой, с полушириной, соответствующей пространственному разрешению в наших данных.

Результатом  $\chi^2$ -минимизации являются 7 параметров, полностью характеризующих изогнутый диск:  $\delta_0$ ,  $\delta_1$ ,  $\gamma_0$ ,  $\gamma_1$ ,  $V_{max}$ ,  $R_h$  и системная скорость  $V_{sys}$ . Для моделирования нами был написан пакет программ WARPWID, сама нелинейная минимизация выполнялась с помощью пакета MPFIT,

<sup>1)</sup>Для удобства мы, по возможности, сохраняем обозначения, принятые в [24].

написанного Марквардом (B. Markwardt) на языке IDL<sup>2)</sup>. В качестве начального приближения для параметров были получены оценки в рамках модели “наклонных колец” из раздела 4. Полученные величины параметров приводятся в Табл. 2, указанные ошибки соответствуют отклонению  $3\sigma$ . Эксперименты с программой показали, что полученное решение устойчиво воспроизводится и мало зависит от начальных условий.

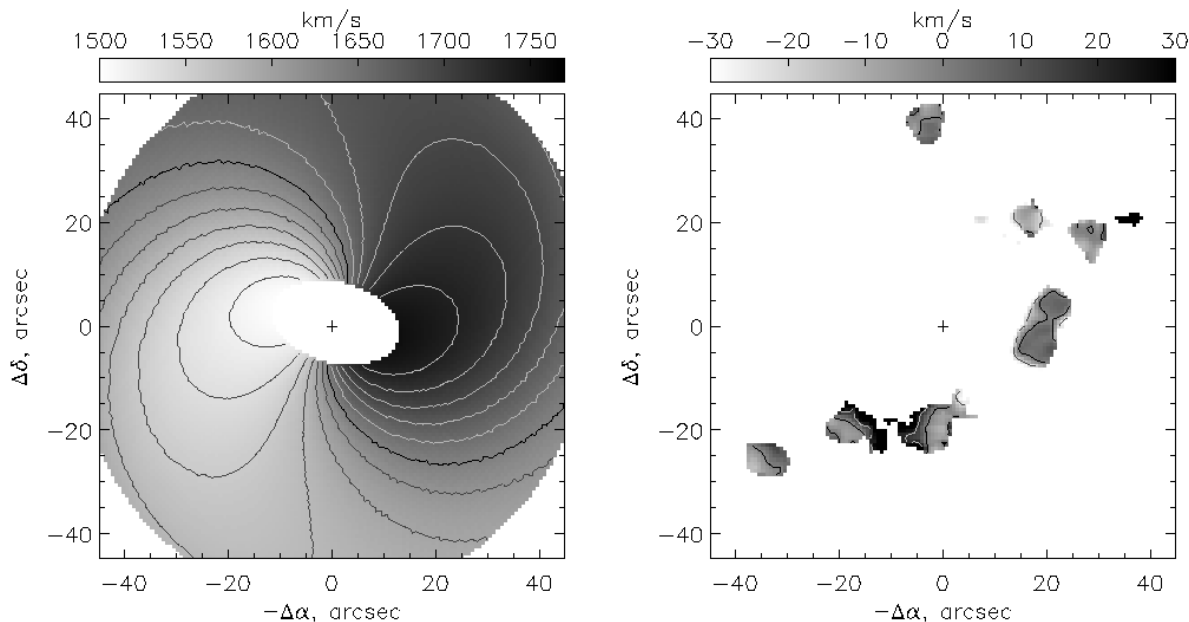
Модельное поле скоростей показано на Рис. 6, здесь же приводится поле остаточных лучевых скоростей для внешних филаментов. Отклонения наблюдаемых скоростей от модельных несколько меньше, чем на Рис. 5. Исключения составляют только внутренние границы двух областей III к югу от ядра, где остаточные скорости превышают 25–30 км/с. Скорее всего, эти точки относятся к переходной области, к которой на луч зрения одновременно проецируются скорости внутреннего диска и внешних областей III.

На Рис. 4 сплошными линиями показаны результаты расчета радиальных зависимостей кинематических параметров в рамках нашей двумерной модели: кривая вращения, позиционный угол орбит в изогнутом диске и их наклон к картинной скорости, системная скорость (постоянная с радиусом). Видно, что  $V_{sys}$  и  $PA$  в пределах ошибок совпадают с результатами, полученными в приближении “наклонных колец”<sup>3)</sup>. Скорость вращения в двумерной модели мало меняется с радиусом, но примерно на 30% выше, чем получалось в приближении “наклонных колец”. Соответственно и наклон круговых орбит к картинной плоскости, в случае двумерной модели, сильно отличается от принятого в разделе 4, он заметно уменьшается с радиусом. Отметим, что при этом угол между внутренним и изогнутым дисками, согласно параметрам из Табл. 2, составляет  $\delta = 37 \pm 3^\circ$  на  $r = 20''$ , и достигает  $49 \pm 4^\circ$  для  $r = 50''$ . Таким образом, и в двумерной модели этот угол растет с расстоянием, хотя и несколько медленнее, чем для приближения “наклонных колец”.

Отметим главное различие между рассматриваемыми кинематическими моделями. В приближении “наклонных колец” для описания поля скоростей внешних эмиссионных филаментов приходится использовать более тридцати параметров:

<sup>2)</sup>Последняя версия пакета MPFIT доступна по адресу <http://cow.physics.wisc.edu/~craigm/idl/idl.html>

<sup>3)</sup>Заметим, что модельные зависимости, показанные линиями на Рис. 4, не являются аппроксимацией результатов расчетов в приближении “наклонных колец”. Дело в том, что в рамках каждой из моделей рассмотренных в разделах 4 и 5 одной и той же точке в картинной плоскости соответствуют разные галактоцентрические расстояния в пространстве, поскольку ориентация орбит в этих моделях различна.



**Рис. 6.** Поле скоростей в двумерной модели изогнутого диска (слева) и поле остаточных лучевых скоростей во внешних филаментах (справа).

общий угол наклона  $i$  и по три параметра ( $PA_{kin}$ ,  $V_{rot}$ ,  $V_{sys}$ ) для каждого узкого кольца. Из-за малого числа точек с измеренными скоростями внутри каждого кольца и их неравномерного распределения по позиционному углу не удастся измерить вариации  $i$  с радиусом — модель оказывается неустойчивой. В двумерной модели для описания поля скоростей используется всего 7 параметров. Эта модель оказывается значительно более устойчивой, но ее слабым местом является априорное задание кривой вращения и закона изменения углов ориентации с помощью соотношений (2) и (3). Эти соотношения были предложены на основании результатов анализа методом “наклонных колец”, т.е. построенная нами двумерная модель по своей сути является следующим приближением к описанию кинематики газового диска, уточняющим и дополняющим результаты раздела 4. Поэтому далее, говоря о кинематике внешнего газового диска, мы будем обращаться к результатам именно двумерной модели, считая ее наиболее близкой к реальности.

## 6. ОБСУЖДЕНИЕ

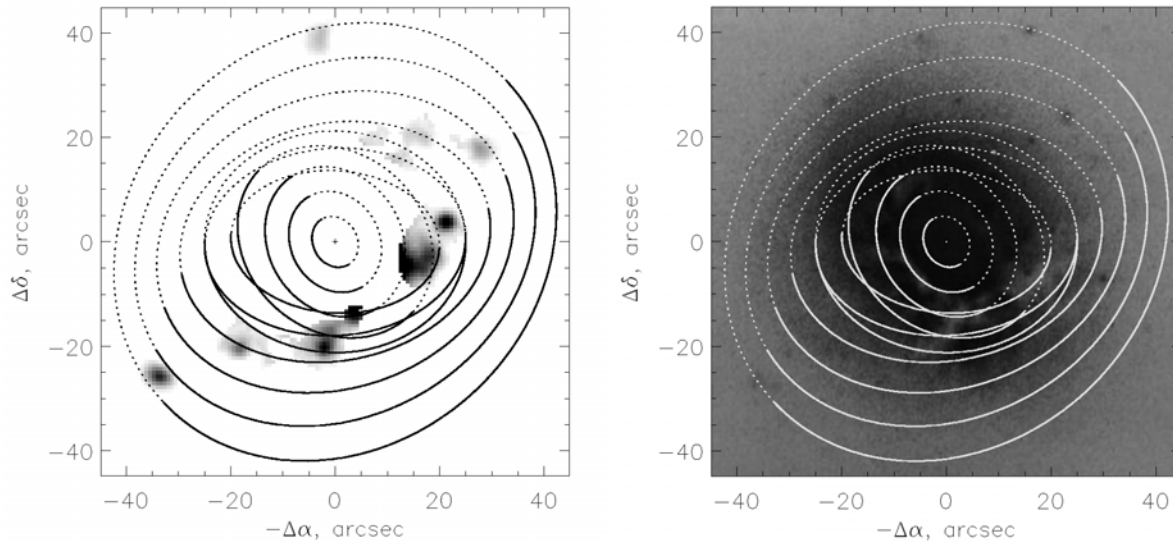
### 6.1. Трехмерная структура газовой подсистемы *Agr 212*

То, что лучевые скорости внешнего диска хорошо согласуются с приближением круговой модели, учитывающей изгиб плоскости вращения, а системная скорость совпадает с таковой для внутреннего диска, указывает на то, что мы наблюдаем стационарную картину вращения газа. Этого не

было бы в случае, если бы упомянутые эмиссионные области принадлежали приливному хвосту, как это предполагалось в [12]. На Рис. 7 показана проекция орбит на картинную плоскость как для внутреннего диска ( $r < 25''$ ) в плоскости галактики, так и для внешних областей ( $r=20-50''$ ). В диапазоне радиусов  $r=20-30''$  (2.0–3.5 кпк) сосуществуют оба типа подсистем — внутренний плоский диск и внешний изогнутый, а, значит, их орбиты должны пересекаться. В таком случае, возможны столкновения газовых облаков в области пересечений. Как это хорошо видно из правой части Рис. 7, мощное пылевое кольцо на изображении галактики наблюдается как раз в этом диапазоне радиусов. Повидимому, оно соответствует области столкновения газовых дисков, где увеличение плотности в ударной волне приводит к образованию молекулярных и пылевых облаков, подобно тому, как это происходит в галактической спиральной ударной волне. Анализ ионизационного состояния внутренних областей галактики также указывает на возможный вклад ударных волн в ионизацию газа на  $r \geq 15''$ , там где начинается пылевое кольцо [13].

Возможно, что здесь корректнее говорить не о прямом столкновении, а о “выпадении” газа из внешнего изогнутого диска на основной диск галактики, поскольку угол между ними уменьшается с приближением к центру, т.е. прецессирующие орбиты газовых облаков во внешнем диске приближаются к звездному диску галактики и облака падают на него.

Рассматривая газовую подсистему, к которой принадлежат внешние эмиссионные области, мы



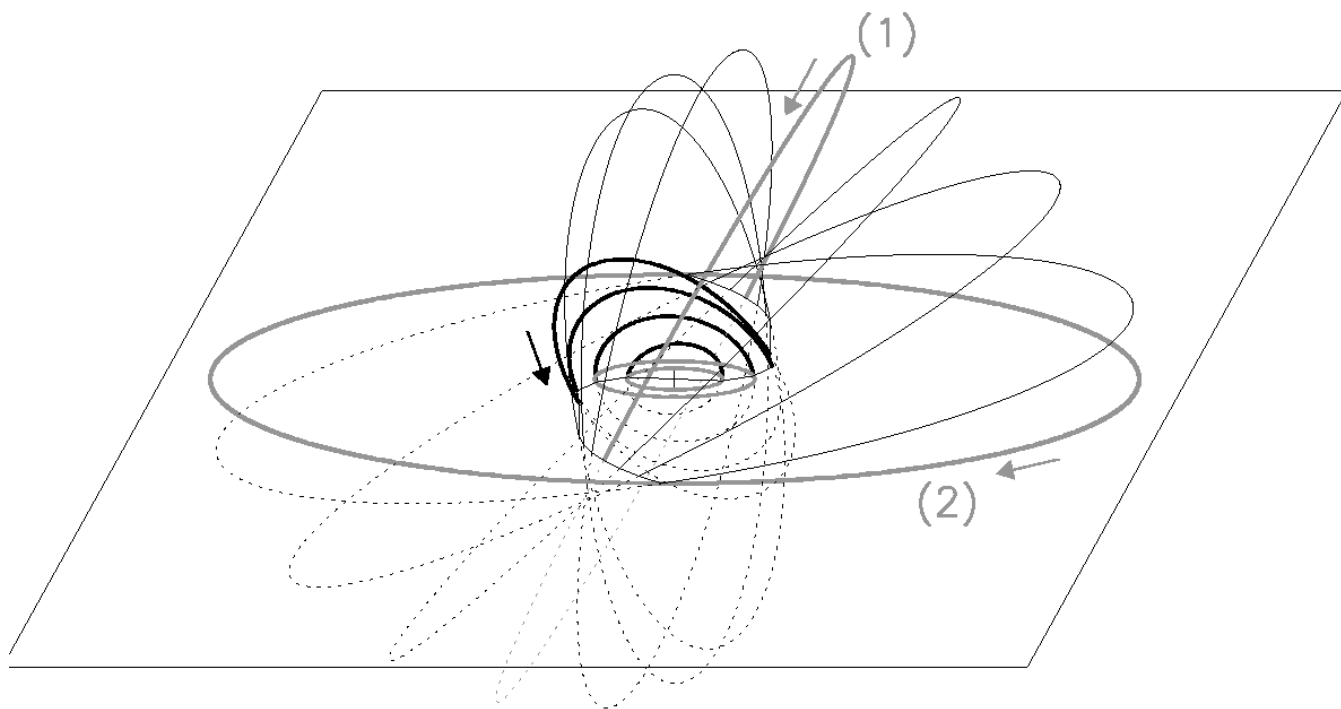
**Рис. 7.** Изображение в линии H $\alpha$  областей, располагающихся в изогнутом внешнем диске галактики (слева) и фотография галактики из атласа Арпа [14] в красных лучах (справа). Эллипсами показаны проекции круговых орбит (с шагом по радиусу 5''), пунктиром отмечены части орбит, находящиеся за картинной плоскостью. Показаны как орбиты во внутреннем диске (в плоскости галактики), так и во внешнем изогнутом диске (кольце).

обычно говорили “изогнутый диск”, но, строго говоря, речь идет о “кольце”, поскольку на  $r < 2$  кпк наблюдается только газ, вращающийся в плоскости галактики. Таким образом, внешние области НII располагаются в широком и тонком газовом кольце, угол наклона которого к основному диску растет с радиусом и достигает  $50^\circ$  на расстоянии  $50''$  (5.8 кпк) от центра, что как раз соответствует оптическому радиусу  $R_{25}$ . Это подтверждает предположение Уайтмора с соавторами [3] о том, что Aгр 212 это объект “родственный галактикам с полярными кольцами”. Aгр 212 можно уверенно отнести к этому классу галактик, с учетом того, что кольца в ГПК не всегда являются строго полярными, часто встречаются изогнутые наклонные кольца. Известный пример — галактика NGC 660, в которой внешнее кольцо наклонено примерно на  $60^\circ$  к основному диску [26]. Однако, в отличие от классических ГПК, в Aгр 212 полярное кольцо не видно на оптических снимках (за исключением вышеупомянутых областей НII) и представлено, в основном, только в нейтральном водороде.

На Рис. 8 изображено пространственное расположение изогнутого кольца относительно плоскости галактики. Мы строили кинематическую модель только для ионизованного газа, однако очевидно, что мы имеем дело с более глобальным газовым диском, в который вкраплены отдельные области современного звездообразования. Они отслеживают кинематику диска нейтрального водорода, поверхностная плотность которого внутри оптиче-

ского радиуса достаточно высока [9]. Наблюдения в линии 21 см [9] указывают на то, что от центра до самых внешних областей на  $r \approx 20-22$  кпк мы видим единую газовую структуру. К сожалению, низкое угловое разрешение не позволяет детально рассмотреть движение газа за пределами оптического диска, а ионизованный газ здесь уже не наблюдается. Единственный более-менее уверенный вывод относительно кинематики газа во внешних областях, который можно сделать на основании данных [9], это то, что на  $r \geq 15$  кпк вращение газа вновь происходит вокруг оси, близкой к оси вращения галактики, но в противоположном, относительно внутренних областей, направлении.

Попробуем экстраполировать поведение газового диска за пределы оптического радиуса. Разумно предположить, что внешний диск (кольцо) на  $r > 50''$  продолжает изгибаться. В таком случае его плоскость достаточно быстро станет полярной к звездному диску галактики (положение (1) на Рис. 8). Продолжение изгибания газового кольца на этих расстояниях является не только экстраполяцией нашей кинематической модели, но и согласуется с известными наблюдательными данными о ГПК с сильным изгибом диска, например, NGC 2655 [5]. Считается, что подобное искажение формы полярного кольца вызывается прецессией орбит в несферическом гравитационном потенциале. В случае Aгр 212, если изгибание будет продолжаться в том же направлении, то с дальнейшим ростом  $r$  угол между плоскостью орбиты и галактической плоскостью начнет уменьшаться, так что



**Рис. 8.** Ориентация круговых орбит в изогнутом газовом кольце относительно основной плоскости галактики. Жирными черными линиями выделены орбиты, рассчитанные с использованием двумерной модели поля скоростей. Тонкие черные линии — возможный изгиб диска на больших расстояниях. Серыми эллипсами показаны орбиты внутреннего диска ионизованного газа в плоскости галактики, а также предполагаемая ориентация внешних областей диска HI ((1) и (2)). Стрелочки отмечают направление вращения. Пунктиром показаны части орбит ниже основной плоскости. Вращение внутренних областей основного диска происходит против часовой стрелки.

полярное кольцо “опрокидывается” в плоскость галактики (положение (2) на Рис. 8). Из этого же рисунка видно, что направление вращения внешних областей при таком “опрокидывании” будет противоположно направлению вращения внутренней части диска, что согласуется с наблюдениями в HI.

Однако можно усомниться в реальности сценария (2). Если внешний газ располагается близко к плоскости галактики, то получается, что в результате прецессии направление орбитального момента меняется на противоположное. Достаточно необычная картина, поскольку обычно прецессия является следствием отъема или перераспределения углового момента, а здесь необходимо придумать механизм, передающий газовым облакам значительный угловой момент, чтобы изменить направление вращения на противоположное. Такой механизм должен быть очень специфичен, так как обычно в ГПК столь сложный изгиб дисков (колец) не наблюдается. Конечно, можно предположить, что в Aгр 212 мы наблюдаем две независимые системы нейтрального водорода — одна породила полярное кольцо, а другая — противорвращающийся внешний диск. Но представляется очень маловероятной гипотеза о том, что мы застали галактику в стадии взаимодействия сразу с двумя

различными газовыми подсистемами. Более того, имеющиеся наблюдения HI указывают скорее на существование единой структуры в распределении нейтрального водорода.

Поэтому сценарий (1), в котором внешние части кольца HI располагаются вблизи полярной плоскости, представляется нам более реальным, кроме того, он согласуется с данными наблюдений. Действительно, согласно [9], внешние изолинии плотности HI заметно вытянуты вдоль  $PA_2 \approx 25^\circ$ , с отношением полуосей порядка  $2/3$  (см. также Рис. 9), что соответствует  $i_2 \approx 50^\circ$  в случае проекции тонкого диска. Считая западную часть HI-диска ближней к нам и, помня о том, что в его северной половине наблюдается сдвиг скоростей в красную сторону, получим из формулы (1), что внешние части кольца нейтрального водорода находятся под углом  $\delta = 82^\circ$ , это хорошо согласуется с предположением о полярном диске. Слабым местом наших рассуждений является то, что мы не знаем точных параметров кинематики газового диска на  $r > 50''$ , здесь необходимы дополнительные наблюдения.

Подобное поведение изогнутого полярного кольца может быть объяснено, если предположить, что распределение гравитационного потенциала в

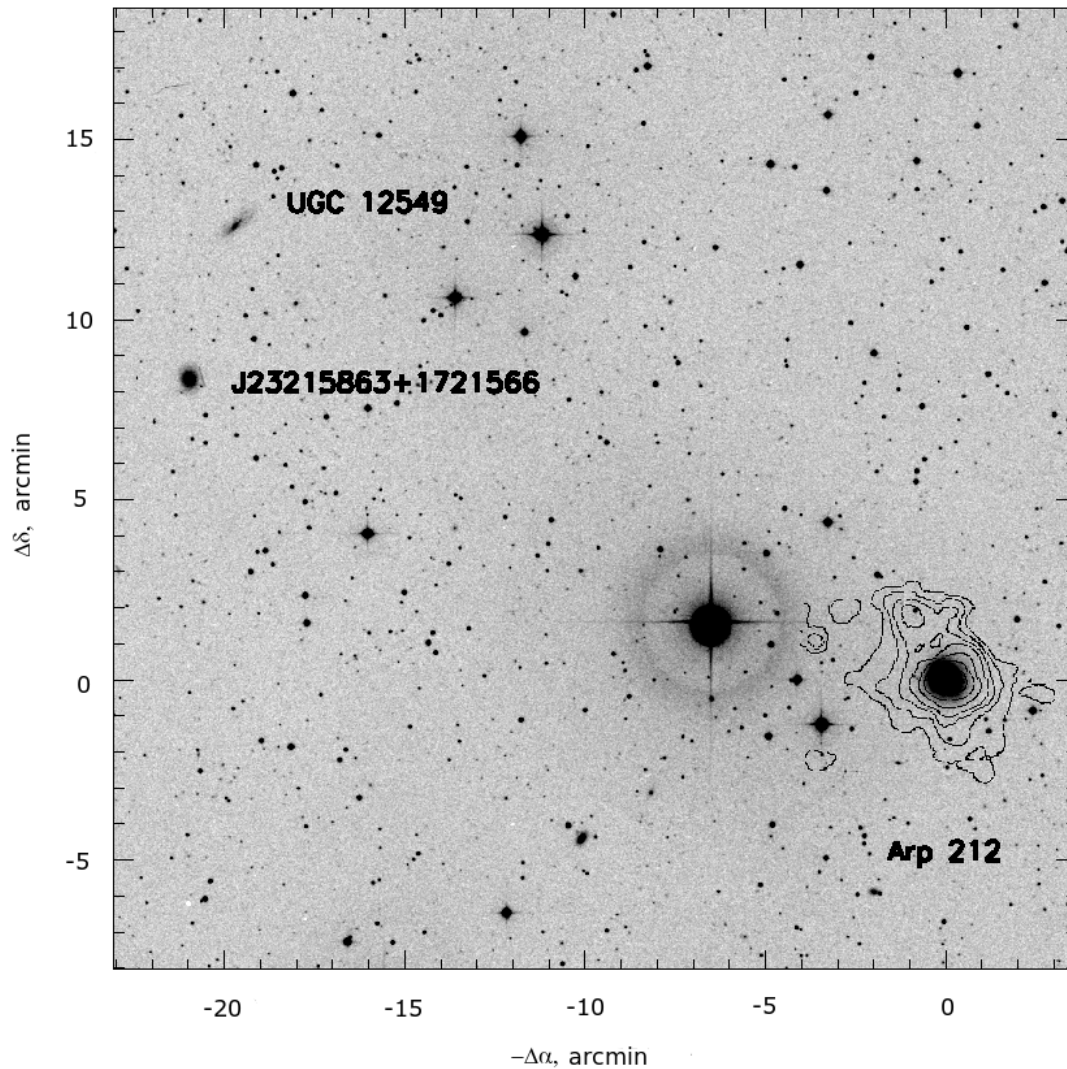


Рис. 9. Поле вокруг Arp 212 по данным POSS2 с изолиниями плотности HI из [9]. Отмечены два возможных спутника.

галактике отлично от сферического. В таком случае возникает прецессия орбит полярного компонента. Красивый пример сильного изгиба полярного кольца наблюдается в одной из известнейших ГПК — NGC 2685, в которой кинематика HI объясняется отклонением распределения потенциала от сферически-симметричного случая [27]. Неоднократно обсуждался вопрос об устойчивости газовых дисков в гравитационном потенциале трехосных галактик. Здесь устойчивыми являются диски, лежащие в плоскостях перпендикулярных большой или малой осям системы. Рассмотренный в [28] пример газового диска в эллиптической галактике Cen A несколько напоминает ситуацию

изогнутого диска в Arp 212. А именно, во внутренней области газовый диск ортогонален звездному телу галактики, но на больших расстояниях газовый диск в Cen A изгибается, так что его внешние части стараются расположиться в плоскости вращения звездной подсистемы и вращаются при этом в противоположном направлении. Однако в Arp 212 ситуация противоположная, в том смысле, что в полярной плоскости расположены внешние части диска, а с уменьшением радиуса, орбиты прецессируют и приближаются к плоскости звездного диска. Тем не менее, предположение о том, что внешние части полярного кольца находятся в одной из основных плоскостей трехосного гало

(вклад диска в потенциал на  $2R_{25}$  мал) выглядит разумным, хотя мы и отдаем себе отчет в том, что данных для уверенного заключения о трехосном распределении потенциала пока недостаточно. Отметим также, что внутри оптического радиуса можно найти свидетельства сплюснутости распределения потенциала (oblate). Действительно, из Рис. 4 следует, что скорости вращения внешних областей НП в модели изогнутого диска несколько выше, чем во внутреннем диске. Это не удивительно, поскольку на этих расстояниях от центра сплюснутый звездный диск должен давать заметный вклад в суммарный гравитационный потенциал.

### 6.2. Проблема происхождения внешней газовой подсистемы

В соответствии с современными сценариями, образование полярных колец связано со взаимодействием галактик: их слиянием или аккрецией вещества спутника на главную галактику [1, 2]. Тогда возможно найти в окрестностях галактики либо сам спутник, либо приливные структуры, оставшиеся после его разрушения. Выше мы уже отмечали некоторые аналогии между Aгр 212 и другой галактикой с изогнутым полярным диском NGC 2655. На глубоких снимках этой галактики, представленных в [5], в пределах двух оптических диаметров обнаруживаются приливные структуры низкой яркости. Но на полученном нами снимке Aгр 212 приливные структуры ярче  $25.2^m/\square''$  отсутствуют (раздел 3).

На Рис. 10 показано распределение поверхностной яркости на снимке галактики в фильтре  $R_c$  после вычитания двумерной модели, состоящей из балджа и экспоненциального диска (см. раздел 3). Распределение остаточной яркости в основном обусловлено областями звездообразования и пылевыми полосами в диске. Обнаружить какие-либо звездные приливные структуры, связанные с разрушенным спутником, внутри оптического радиуса нам не удалось. Исключение составляет лишь “волокно” на  $r=20-40''$  к северу от ядра, на которое проецируется одна из внешних областей НП. Но возможно, что это часть спиральной структуры в звездном диске. Единственной структурной особенностью на этом снимке, которая наверняка связана с изогнутым полярным кольцом, является пылевая полоса к югу и юго-западу от ядра, с которой совпадают сразу три внешних области НП. Скорее всего, здесь мы видим пыль внутри полярного кольца. Это предположение согласуется с нашим предыдущим заключением о том, что юго-западная половинка кольца является ближней к наблюдателю. Эта пылевая полоса, как и сами

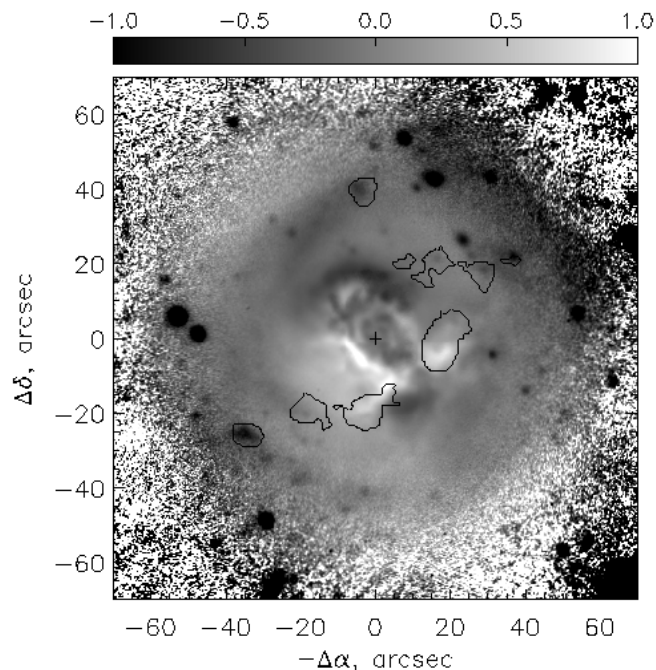


Рис. 10. Остаточные яркости в шкале звездных величин (наблюдения минус модель балджа и диска). Контурами показано положение внешних областей НП, принадлежащих полярному кольцу.

внешние области НП, свидетельствует не об остатках спутника, а о современном звездообразовании, идущем внутри полярного кольца.

Поскольку звездные остатки разрушенного спутника отсутствуют, то возможно, что полярное кольцо образовалось в результате захвата газа от компаньона. Такой процесс образования полярных колец достаточно хорошо изучен, в том числе и методами численного моделирования [1, 29].

Согласно [1], большая часть полярных колец образуется именно в рамках “аккреционного” сценария. В базе данных NED, в области радиусом  $1^\circ$  (414 кпк) в диапазоне лучевых скоростей  $\pm 1000$  км/с относительно Aгр 212 указана только одна галактика — UGC 12549. Она относится к классу Im, практически совпадает с Aгр 212 по системной скорости 1634 км/с, но более чем на  $3^m$  слабее по интегральной величине. Ее расстояние до Aгр 212 в проекции на картинную плоскость —  $23'6$  (163 кпк), т.е.  $15D_{25}$ . Эта галактика очень богата газом: полный поток в линии 21 см у UGC 12549 всего лишь в два раза меньше, чем у Aгр 212 [30]. Тогда полная масса HI достигает в UGC 12549  $10^9 M_\odot$ , а отношение массы HI к полной массе должно быть в несколько раз выше, чем в Aгр 212, где оно составляет около 10%. На Рис. 9 показано изображение обеих галактик по данным цифрового Паломарского обзора неба. В  $4'5$  (31 кпк) к югу от

UGC 12549 видна несколько более яркая галактика 2MASX J23215863+1721566 с неизвестным красным смещением, возможно, что они образуют пару. Из Рис. 9 видно, что изоденсы распределения HI (т.е. проекция внешних области полярного кольца) в Aгр 212 вытянуты именно в направлении этой пары галактик. Возможно, что между галактиками имеется слабый приливной газовый хвост. Но пока отсутствуют данные о распределении нейтрального водорода далее, чем 20–30 кпк от центра Aгр 212. Здесь необходимы новые наблюдения с целью подтвердить или опровергнуть утверждение о том, что галактика UGC 12549 послужила донором при образовании изогнутого полярного кольца в Aгр 212.

В заключение, рассмотрим вопрос о вспышке звездообразования в Aгр 212. Согласно фотометрическим данным, возраст всех областей звездообразования в галактике составляет  $6.1 \pm 0.6$  млн. лет [16], т.е. последняя вспышка звездообразования началась по всей галактике практически одновременно. Динамическое время (время оборота) для внешних эмиссионных филаментов составляет 0.2–0.3, а для внешних областей HI-диска 0.5–1 млрд. лет. Можно предложить, что внешняя газовая подсистема, после ее захвата основной галактикой, образовала полярный диск, газ из которого, в результате прецессии орбит, начал “выпадать” на плоскость звездного диска галактики. После накопления достаточного количества газа началась вспышка звездообразования. Поскольку возраст вспышки значительно меньше динамического возраста газового диска, возможно, что подобные вспышки происходили здесь уже неоднократно.

## 7. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Нами построено и изучено поле скоростей ионизованного газа в пекулярной галактике Aгр 212. В пределах оптического радиуса обнаружено две кинематически различные подсистемы вращающегося газа — внутренний диск и внешние области HI. Внутренний диск располагается в пределах 3.5 кпк от центра, вращение ионизованного газа в нем происходит в плоскости, совпадающей со звездным диском. При этом внутренняя часть диска ионизованного газа точно совпадает с известным ранее диском молекулярного газа. Вторая подсистема ионизованного газа находится на  $r=2-6$  кпк и состоит из отдельных областей HI, их орбиты располагаются под значительным углом к звездному диску. Полученные нами и имеющиеся в литературе сведения о кинематике молекулярного, ионизованного и нейтрального газа можно объяснить в рамках следующей модели. Большая часть массы нейтрального водорода во внешних областях галактики собрана в широком кольце,

радиусом около 20 кпк. Внешние области кольца вращаются в плоскости, ортогональной к плоскости звездного диска. С уменьшением галактоцентрического расстояния орбиты газовых облаков прецессируют и приближаются к плоскости диска. Причина прецессии — несферичность (возможно, трехосность) в распределении гравитационного потенциала в галактике. Внутренние области изогнутого полярного кольца, в пределах оптического радиуса, охвачены вспышкой звездообразования. Угол между кольцом и плоскостью галактики составляет  $50^\circ$  на  $r = R_{25}$ , с уменьшением радиуса он продолжает уменьшаться, и на  $r \approx 2-3$  кпк газ из кольца попадает в плоскость галактики. Мощное пылевое кольцо в центральных областях галактики является свидетельством выпадения газа из полярного кольца на плоскость звездного диска Aгр 212. Возможная причина образования полярного кольца — взаимодействие с богатой газом карликовой галактикой UGC 12549, но для подтверждения и уточнения этого сценария необходимы новые наблюдения распределения и кинематики нейтрального водорода.

## БЛАГОДАРНОСТИ

Работа основана на наблюдательном материале, полученном на 6-м телескопе САО РАН, финансируемом Миннауки РФ (регистрационный номер 01-43). В процессе работы над статьей использовались ресурсы базы внегалактических данных НАСА/ИПАК (NED) управляемой Лабораторией реактивного движения Калифорнийского технологического института по контракту с Национальным Управлением Аэронавтики и Космонавтики (США). Автор благодарит В.П. Решетникова за ряд ценных замечаний, высказанных по прочтению рукописи статьи. Работа выполнена при поддержке фонда РФФИ, проект 06-02-16825 и гранта Президента Российской Федерации (проект МК1310.2007.2).

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. F. Bournaud and F. Combes, *Astronom. and Astrophys.* **401**, 817 (2003).
2. F. Combes, in *Mass Profiles and Shapes of Cosmological Structures*, Eds.: G. A. Mamon, F. Combes, C. Deffayet, B. Fort, (EAS Publications Series **20**, 2006), p. 97 (astro-ph/0508434).
3. B. C. Whitmore, R. A. Lucas, D. B. McElroy et al., *Astronom. J.* **100**, 1489 (1990).
4. O. K. Sil'chenko and V. L. Afanasiev, *Astronom. J.* **127**, 2641 (2004).
5. L. S. Sparke, G. van Moorsel, P. Erwin and E. M. H. Wehner, *Astronom. J.* **135**, 99 (2008).
6. Л. В. Шаляпина, О. А. Меркулова, В. А. Яковлева, Е. В. Волков, *Письма в АЖ* **33**, 585 (2007).

7. N. Brosch and F. Loinger, *Astronom. and Astrophys.* **249**, 327 (1991).
8. N. Yasuda, K. Fujisawa, Y. Sofue et al., *Publ. Astronom. Soc. Japan* **44**, 1 (1992).
9. J. G. Li, E. R. Seaquist, J. M. Wrobel et al., *Astrophys. J.* **413**, 150 (1993).
10. T. X. Thuan and G. E. Martin, *Astrophys. J.* **247**, 823 (1981).
11. L. M. Cairós, J. M. Vílchez, J.N. González-Pérez et al., *Astrophys. J. Suppl.* **133**, 321 (2001).
12. L. M. Cairós, N. Caon, J. M. Vílchez et al., *Astrophys. J. Suppl.* **133**, 321 (2001).
13. B. García-Lorenzo, L.M. Cairós, N. Caon et al., *Astrophys. J.* **677**, 201 (2008).
14. H. Arp, *Astrophys. J. Suppl.* **14**, 1 (1966).
15. M.-H. Demoulin, *Astrophys. J.* **157**, 69 (1969).
16. I. Martínez-Delgado, G. Tenorio-Tagle, G., C. Muñoz-Tuñón, et al., *Astronom. J.* **133**, 2892 (2007).
17. В. Л. Афанасьев, А. В. Моисеев, *Письма в АЖ* **31**, 269 (2005).
18. А. В. Моисеев, О. В. Егоров, *Астрофизический бюллетень* **63**, 193 (2008).
19. A. V. Moiseev, *Bull. Spec. Astrophys. Obs.* **54**, 74 (2002) (astro-ph/0211104).
20. V. P. Reshetnikov, V. A. Hagen-Thorn and V. A. Yakovleva, *Astronom. and Astrophys.* **278**, 351 (1993).
21. K. G. Begeman, *Astronom. and Astrophys.* **223**, 47 (1989).
22. А. В. Моисеев, В. В. Мусцевой, *Письма в АЖ* **26**, 190 (2000).
23. A. V. Moiseev, J. R. Valdés and V. H. Chavushyan, *Astronom. and Astrophys.* **421**, 433 (2004).
24. L. Coccato, E. M. Corsini, A. Pizzella and F. Bertola, *Astronom. and Astrophys.* **465**, 777 (2007).
25. S. Courteau, *Astronom. J.* **114**, 2402 (1997).
26. M. Arnaboldi and G. Galletta, *Astronom. and Astrophys.* **268**, 411 (1993).
27. G. Józsa, T. Oosterloo and U. Klein, in *Proceedings of "Baryons in Dark Matter Halos", Novigrad, Croatia, 2004*, Eds.: R. Dettmar, U. Klein, P. Salucci, (Published by SISSA, Proceedings of Science, 2004), p. 108.
28. T. S. van Albada, C. G. Kotanyi and M. Schwarzschild, *Monthly Notices Roy. Astronom. Soc.* **198**, 303 (1982).
29. V. Reshetnikov and N. Sotnikova, *Astronom. and Astrophys.* **325**, 933 (1997).
30. C. M. Springob, M. P. Haynes, R. Giovanelli and B. R. Kent, *Astrophys. J. Suppl.* **169**, 149 (2005).

## WARPED POLAR RING IN THE ARP 212 GALAXY

A. V. Moiseev

The Fabry–Perot scanning interferometer mounted on the 6-m telescope of the Special Astrophysical Observatory of the Russian Academy of Sciences is used to study the distribution and kinematics of ionized gas in the peculiar galaxy Arp 212 (NGC 7625, III Zw 102). Two kinematically distinct subsystems—the inner disk and outer emission filaments—are found within the optical radius of the galaxy. The first subsystem, at galactocentric distances  $r < 3.5$  kpc, rotates in the plane of the stellar disk. The inner part of the ionized-gas disk ( $r \approx 1.5$ –2 kpc) exactly coincides with the previously known disk consisting of molecular gas. The second subsystem of ionized gas is located at galactocentric distances 2–6 kpc. This subsystem rotates in a plane tilted by a significant angle to the stellar disk. The angle of orbital inclination in the outer disk increases with galactocentric distance and reaches  $50^\circ$  at  $r \approx 6$  kpc. The ionized fraction of the gaseous disk does not show up beyond this galactocentric distance, but we believe that the HI disk continues to warp and approaches the plane that is polar with respect to the inner disk of the galaxy. Hence Arp 212 can be classified as a galaxy with a polar ring (or a polar disk). The observed kinematics of the ionized and neutral gas can be explained assuming that the distribution of gravitational potential in the galaxy is not spherically symmetric. Most probably, the polar ring have formed via accretion of gas from the dwarf satellite galaxy UGC 12549.