МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
имени М.В.Ломоносова
Физический факультет
Астрономическое отделение
Кафедра экспериментальной астрономии

# КИНЕМАТИКА И ФОТОМЕТРИЯ ВНУТРЕННИХ ОБЛАСТЕЙ СПИРАЛЬНЫХ ГАЛАКТИК.

Дипломная работа
студента 6-го курса
**Моисеева А. В.**
Научный руководитель
профессор **А.В. Засов**

Допущен к защите
« » января 1999 г.
Зав. кафедрой экспериментальной
астрономии
академик РАН **А.А. Боярчук**

Москва 1999

"Такой же чернотой зияли прогалины между спиральными, разлохмаченными на концах ветвями... Плоские звездные поля перемежались с облаками и полосами черной остывшей материи. Снимок был сделан из неудобного поворота – Галактика пришлась сильно вкось и сверху, так что центральное ядро едва выступало горящей выпуклой массой в середине узкой чечевицы..."

(И.А. Ефремов)

# Содержание

# 1 Введение

"Принимаясь за дело, соберись с духом."
(Козьма Прутков)

## 1.1 Постановка проблемы

Долгое время основное внимание астрономов, изучающих процессы проходящие в центральных областях далеких звездных систем (галактик) было прежде всего прикованно к так называемым Активным Галактическим Ядрам (галактикам Сейферта, радиогалактикам, квазарам и т.д.), отличающимся мощным энерговыделением в широком спектральном диапазоне, выбросами облаков ионизованного газа и релятивистских частиц. Однако, наблюдения последнего десятилетия показали, что даже в случае "нормальных галактик", не отличающихся заметной ядерной активностью, центральные области часто представляют из себя особые, выделенные подсистемы, в общей структуре галактик. Здесь и далее, под "центральной областью" мы будем подразумевать регионы , находящиеся на расстояниях до 1-2 кпк от центра галактики (поэтому эти области часто и называют "центральным килопарсеком").

Наблюдения вращения ионизованного газа во внутренних областях дисковых галактик показывают, что на эти расстояниях часто наблюдаются центральные максимумы на кривой вращения – динамически выделенные ядра (Афанасьев и др 1988-1992). Следует заметить, что подобные "пики" на кривых вращения, могут быть связаны и с некруговыми движениями газа, внутри перемычки (бара) в центральной области галактики (см к примеру Lindbland,&Linbland,1993 ). Вообще, тщательный анализ движений газа в галактиках, описанных в работах Афанасьева и др., дает возможность делать выводы о сложной динамической структуре околоядерных областей дисковых галактик. Практически в половине всех исследованных галактик обнаружены "мини-бары" – короткие перемычки с размерами 0.5-1.5 кпк (Buta&Crocer,1993;Zasov&Sil'chenko,1996).

Применение в последние годы панорамных цифровых приемников излучения на крупных телескопах, работающих в ближнем инфракрасном диапазоне (1-2 мкм), позволило выявить в центральных областях спиральных галактик бароподобные структуры, "скрытые" в оптическом диапазоне сложным распределением пыли и областей звездообразования (Freidli et al.1996;Seigar&James,1998) Наблюдения показывают, что многие галактики, обладают барами, видимыми только в ИК-диапазоне, или проявляющими себя динамически (Bonnarel et al.,1988;Keel&Byrd,1996; Zasov&Sil'chenko,1996 и др).

Изучение баров в галактиках важно для правильного понимания характера течения газа в центральных областях, объяснения ядерных вспышек звездообразования и активности ядер. В околоядерных регионах сейфертовских галактик движения ионизованного газа очень сложное, наблюдается несколько динамических подсистем: круговое вращение газа, радиальные потоки вдоль бара к центру, истечения из активного ядра (Afanasiev&Sil'chenko 1991; Afanaisev et.al 1996;Hjelm&Linbland, 1996). Однако, представляется, что при наблюдениях "нормальных" галактик, лучше видны движения газа непосредственно связанные с баром. А понимание этих процессов, в свою очередь может помочь разобраться и с движением газа в активных галактиках!

При изучении и интерпретации сложной структуры центральных областей галактик необходимо использовать как двумерные распределения яркости и показателей цвета, позволяющие проследить морфологию пыли и звездной составляющей, так и данные двумерной спектроскопии, позволяющие изучить кинематику ионизованного газа с высоким угловым разрешением (1-2$''$).[1]. В России только в САО РАН имеется необходимая для панорамной спектроскопии

[1] Заметим, что если данные по кинематике нейтрального водорода имеют (для крупнейших интерферометров VLA и WSRT) более низкое разрешение 10-20$''$, то разрешение при наблюдениях в радиолиниях молекул CO практически "дотягивается" до углового разрешения при оптических наблюдениях, что дает возможность для детального рассмотрения динамики молекулярного водорода в центральном килопарсеке

Таблица 1: Параметры исследуемых галактик

| NGC | T (RC3) | D, Мпк | $R_{25}$, $''$ | $R_{25}$, кпк | $L_B$, $L_\odot$ | $L_{FIR}$, $L_\odot$ | $M_{HI}$ | $M_{H_2}$ |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 972 | SAab | 21.9 | 99 | 10.6 | $9.5 \cdot 10^9$ | $2.5 \cdot 10^{10}$ | $1.3 \cdot 10^9$ | $3.6 \cdot 10^9$ |
| 1084 | SA(s)c | 18.5 | 95 | 8.5 | $1.2 \cdot 10^{10}$ | $1.7 \cdot 10^{10}$ | $2.3 \cdot 10^9$ | $3.4 \cdot 10^9$ |
| 4100 | (R')SA(rs)bc | 15.5 | 161 | 12.1 | $7.1 \cdot 10^9$ | $4.1 \cdot 10^9$ | $5.8 \cdot 10^9$ | $2.2 \cdot 10^9$ |

NGC – номер галактики по каталогу NGC; T – тип галактики по каталогу Vaucouleurs et al.(1991), далее – **RC3**; D – принятое расстояние до галактики, для $H_0 = 75$ км/с $\cdot$ Мпк;$R_{25}$, – радиус галактики до изофоты $25^m/\square''$ в полосе B по RC3; $L_B$ – полная светимость в полосе B по RC3; $L_{FIR}$ – инфракрасная светимость в полосе 40-120 мкм;$M_{HI}$ – масса атомарного водорода; $M_{H_2}$ оценка массы молекулярного водорода при "стандартном" факторе конверсии.

аппаратура, успешно конкурирующая с лучшими мировыми аналогами.

В данной работе, рассматриваются три спиральные галактики, для которых имеется богатый (и разнообразный) фотометрический материал, и двумерные поля скоростей ионизованного газа. На их примере демонстрируется комплекс методик изучения структуры центральных областей галактик, основанный на совместном анализе и сопоставлении результатов получаемых по кинематике и фотометрии галактик, с привлечением данных моделирования газовых течений в галактиках с перемычками.

### 1.2 Описание изучаемых галактик

В таблице 1 даны основные характеристики исследуемых галактик – морфологический тип, размеры, светимость масса молекулярного и атомарного водорода. На рис.1 приведены прямые ПЗС-изображения этих галактик в полосе $R_C$ (журнал наблюдений и обработка описаны в следующей главе). Кратко перечислим некоторые **общие** характеристики галактик:

- Это спиральные галактики "поздних" типов ( с учетом того, что тип NGC 972 был пересмотрен в работах Засова и Моисеева(1998) (далее – ЗМ98) и Mayya et al.(1998), спиральный узор в этой галактике виден только в K-полосе, свободной от пылевого поглощения)

- галактики одиночные, без спутников и явных следов взаимодействия.

- активность ядер отсутствует. Об этом можно судить по двум каналам. Во-первых, спектры ядерных областей приведенные в работе (Ho et al.1995) и проанализированные в работе Ho et al.(1997), показывают, что отношение эмиссионных линий соответствуют их возбуждению полем излучения молодых звезд ("HII nucleus"). Отсутствие избытка нетеплового радиоизлучения так же дало возможность Condon&Brederic(1991) по анализу отношения радио и FIR светимостей классифицировать ядра NGC 972 и 1084 по механизму излучения как "starburst" т.е. их излучение связанно только с молодыми звездами[2]. В таком случае, можно считать, что темп звездообразование пропорционален светимости в линии $H_\alpha$ (Kennicutt,1983) или в FIR-диапазоне (Thronson&Telesco,1986;Засов,1995)

- во всех галактиках по данным RC3 отсутствуют видимые перемычки ("бары"). Однако, анализ спектральных наблюдения проведенных на 6-м телескопе (Афанасьев и др,1989,1992;Zasov&Sil'chenko,1996) говорит о наличии в центральных областях динамически выделенных подсистем – мини-баров или наклонных дисков.

Рассмотри эти галактики подробнее.

[2]для NGC 4100 анализ не проводился

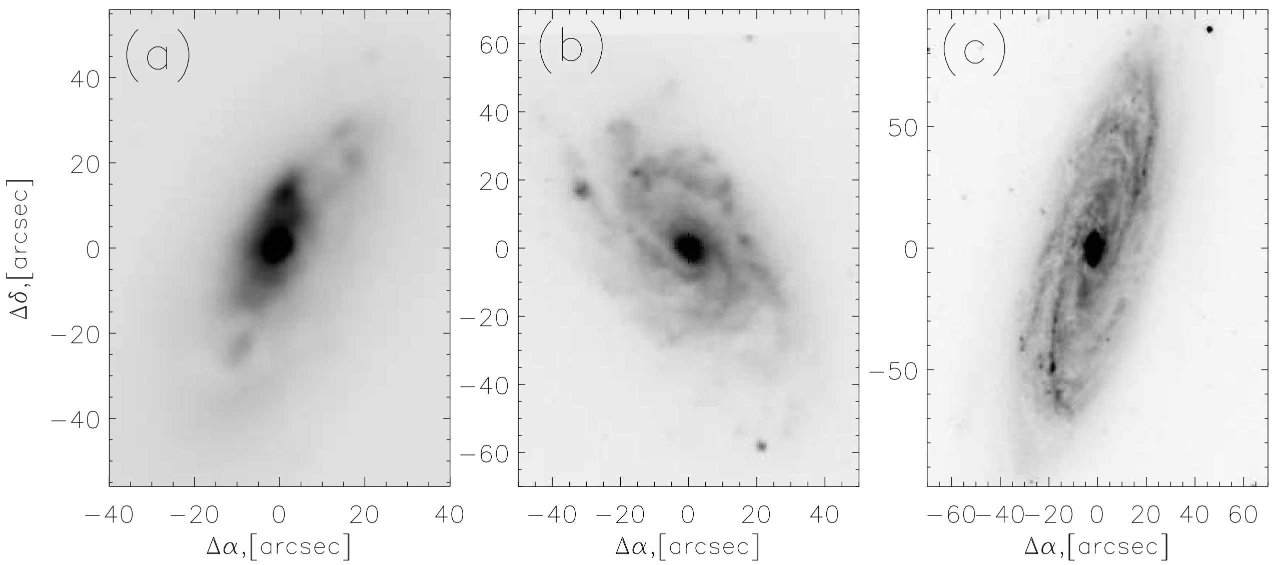


рис.1 Изображения исследуемых галактик в полосе $R_C$ :(a) – NGC 972 ("Цейсс-1000",САО) (b) NGC 1084 ("Цейсс-1000",САО), (c) NGC 4100 (INT, La Palma)

**NGC 972** Галактика с довольно необычной структурой, что видно на рис.1 и на фотографиях из Хаббловского Атласа галактик (Sandage, 1961) и из работы Burbidge et al. (1965) по определению кривой вращения . Внутренняя яркая часть галактики имеет диаметр около $80''$ и сильно напоминает балдж по внешнему виду. Она необычна тем, что содержит многочисленные пылевые полосы, вкрапления и прожилки. На оптическом изображении галактики не заметно спиральной структуры, хотя форма полос дает некоторый намек на ее присутствие. Мощная клочковатая пылевая полоса окаймляет внутреннюю часть галактики с юго-западной стороны, свидетельствуя о том, что данная сторона галактики - ближняя к нам. Многочисленные пылевые вкрапления делают NGC 972 похожей, по замечанию Сендиджа, на близкую к нам галактику M82. За пределами яркой внутренней области наблюдается аморфное свечение протяженного диска без каких-либо четких деталей, что роднит галактику с линзовидными системами S0. Все это делает морфологическую классификацию NGC 972 крайне неопределенной. В каталоге ярких галактик Vaucouleurs&Vaucouleurs (1964) она классифицируется как I0, в каталоге RC3 как - Sab, Sandage (1961) приводит ее как пример Sb- галактик, а по классификации van den Bergh (1976) это - Sbc/Abc.

Как видно из таб.1 интегральная светимость галактики имеет достаточно типичное значение для спиральных галактик. Галактика сравнительно богата газом, причем масса $H_2$ в 3 раза превышает HI! Наличие многочисленных пылевых прожилок в галактике естественно связать с большой массой молекулярного газа, сконцентрированного в непрозрачные облака.

Поверхностная фотографическая фотометрия галактики в диапазонах $UBVR$ была описана в работе Blackman (1979). Анализ усредненного профиля яркости галактики привел автора к выводу о том, что в галактике выделяется два экспоненциальных диска с радиальными шкалами в полосе $R$ $5''$ и $24''$. Фотометрический балдж при этом отсутствует.

Подробное исследование вращения галактики, по трем спектральным разрезам с длинной щелью, приведено в работе Афанасьева и др. (1991). При $r = 10'' - 20''$ кривая вращения выходит на "плато" или очень медленно возрастает. Результаты этих наблюдений были частично пересмотрены в работе ЗМ98, были уточнены параметры, описывающие ориентацию диска.

В этой же статье нами были описаны результаты $VR_C\ I_C$ - фотометрии NGC 972. Подтверждается результат о двух экспоненциальных дисках со шкалами $6''$ и $18''$ в полосе $I_C$ , и практическом отсутствии фотометрического балджа. Причем и кривая вращения может быть интерпретирована без учета балджа! Использование методики построения карт Q-параметра, свободного от пылевого поглощения (см. главу 3) позволило предсказать наличие кольца в линии $H_\alpha$ , на расстоянии около 3 кпк от центра, связанного с усиленным звездообразованием. Делался вывод и о значительном относительном вкладе молодых О-звезд в светимость ядра NGC 972. Авторы подчеркивают трудности однозначной классификации NGC 972 имеющей признаки как галактик S0-Sab ("красные", показатели цвета, отсутствие четких спиралей, внешний диск низкой яркости, массивное темное гало), так и "поздних" галактик Sc-Ir (незначительный балджа, большая относительная масса газа). Внутренняя и внешняя части галактики словно принадлежат к разным морфологическим типам!

Эти выводы были подтверждены в работе Ravindranath&Prabnu(1998) (далее – RP98), где кроме широкополосной фотометрии анализировалось и распределение $H_\alpha$ по диску. Действительно, все HII- области сосредоточены в диске радиусом 3.4 кпк, а светимость ядра в линии $H_\alpha$ сравнима с ядрами известных starburst-galaxies NGC 253 и M82 и соответствует ионизации газа излучением от 1000 О-звезд! Показано, что по отношению эмиссионных линий спектр ядра соответствует ядерной вспышке звездообразования, возраст которой оценивается в $5 \cdot 10^6$ лет, ядро отличается и высокой металличностью ($Z=2\ Z_\odot$). Все звездообразование сосредоточено в 3-кпк диске, темп звездообразования по излучению в $H_\alpha$ : $SFR \approx 3M_\odot$/год. А оценка SFR по FIR-светимости (таб.1) с использованием формулы из работы Засов (1995) дает оценку $\approx 10M_\odot$/год для звезд с массами 0.1-100 $M_\odot$! Таким образом, по темпы звездообразования сравнимы с галактиками Sc-Sd!

В последующей работе Mayya et al.(1998) анализировалось изображения в JHK-полосах, свободных от пылевого поглощения. Сравнение с оптическими изображениями позволило говорить об исключительно высоком количестве пыли в центральном диске (оптическая толща в B $\tau > 11$). На изображении в K видна двухрукавная спираль, "скрытая" в оптике пылью и небольшой бар внутри $R < 10''$. Здесь следует заметить, что измерения лучевых скоростей газа во внутренней области NGC 972 проведенные на БТА с мультизрачковым спектрометром, показали, что позиционный угол динамической большой оси в ядерной области испытывает поворот, достигающий $45^o$ на расстоянии нескольких угловых секунд от центра. На этом основании Zasov&Sil'chenko (1996) сделали вывод, что галактика обладает либо ядерным баром (мини-баром) с длиной несколько сотен парсеков, либо наклонным ядерным диском того же размера.

Mayya et al.(1998) так же как и ЗМ98 пересмотрели морфологический тип NGC 972 и предложили в дальнейшем считать его SABd pec. Таким образом все вновь вернулись к заключению Sandage (1961):"Пекулярная галактика типа M82"! Mayya et al.(1998) рассматривают гипотезу падения на NGC 972 небольшого спутника ( карликовой галактики), индуцировавшего вспышку звездообразования в ядре и центральном диске. Большое количество пыли и газа ($M_{H2}/M_{HI} \approx 3$) роднит NGC 972 со взаимодействующими системами, однако 972 – изолированная галактика. Поэтому Mayya et al.(1998) склоняются к мысли, что скорее всего "упала" не галактика, а газовое облако (хотя ничего подобного вблизи NGC 972 пока не обнаружено)

**NGC 1084** Красивая спиральная галактика с хорошо развитым спиральным узором. На $R = 50'' - 60''$ к северо-востоку от центра наблюдается "отрог" из областей звездообразования, практически перпендикулярный спиральному рукаву. Кинематика галактики изучалось неоднократно и с разным успехом. Burbidge et al.(1963) получили по результатам наблюдений с длиннощелевым спектрографом кривую вращения ионизованного газа в линии $H_\alpha$ . По этим данным скорость вращения достигает максимума на $R \approx 30''$ и потом начинает падать с радиусом. Однако, точность измерений скорости была довольно низкая, уверенно определялась только максимальная скорость вращения 130-140 км/с. Тоже можно сказать и об аналогичных наблюдениях Кязумова (1981), хотя точность измерений здесь была несколько выше, все равно форма кривой вращения определялась довольно неуверенно.

Значительно более интересные выводы были получены в работе Афанасьев и др.(1988a), по результатам наблюдений на 6-м телескопе со спектрографом UAGS с цифровым приемником. По линиям $H_\alpha$ ,[NII] и [SII] была построена средняя кривая вращения, которая начиная с $R \approx 10-15''$ достигает слабого максимума и далее выходит на плато. Высокая точность измерений позволила сделать вывод о наличии областей с некруговыми движениями.

Во-первых, на расстояниях $R < 5''$ от центра, скорости вращения, измеренные по запрещенным линиям ([NII],[SII]) заметно меньше, чем по $H_\alpha$ . Авторы предположили, что эта аномалия связана с наличием низкоконтрастного мини-бара в центре NGC 1084.

Во-вторых, область вблизи "отрога" на периферии спирального рукава оказалась динамически выделенной. Здесь были обнаружены локальные отличия лучевых скоростей на 30 км/с от средней скорости вращения.

В 1995 г. NGC 1084 вновь наблюдалась на БТА, но уже с интерферометром Фабри-Перо. Было получено полное поле скоростей в линии $H_\alpha$ и частично в линии $[NII]_{6583}$ (которая попала из соседнего порядка). Поле скоростей анализировалось в моей курсовой работе в 1997 г. и основные результаты готовятся к публикации (Moiseev et al.). В районе "отрога", между HII-областями обнаружены несколько подсистем ионизованного газа, движущегося со скоростями $\pm 100-150$ км/с на масштабах 1-2 Кпк, движение сопровождается возбуждением линии [NII] на кромках ударных волн.

Кинематические и фотометрические данные говорят о наличии в галактике бароподобной структуры с радиусом до 2 кпк, которая прежде всего проявляет себя по полю скоростей. Кроме того, тщательный анализ показал, что NGC 1084 является галактикой со сложной спиральной структурой – интерференцией мод с 2 и 3 рукавами!

В данном дипломном проекте приводятся новые наблюдения этой странной галактики.

**NGC 4100** Галактика входит в состав скопления Ursa Major (Odenwald,1986), однако в окрестностях галактики нет заметных близких соседей – расстояние до ближайшего яркого члена скопления – галактики NGC 4085 составляет не менее 210 Кпк (см карту скопления у Tully et.al 1996).

Поверхностная фотометрия NGC 4100 впервые проводилась Watanabe (1983). На распределении поверхностной яркости, приведенном в этой работе выделяется яркий балдж, и диск с очень медленно меняющейся яркостью в пределах $r \approx 70''$. Дальше от центра падение яркости практически экспоненциальное со шкалой около $20''$, профиль поверхностной яркости представляет собой классический пример профиля типа II по Freeman (1970).

Результаты более высокоточной CCD - фотометрии этой галактики были опубликованы в работе Heraudeau & Simien (1996). Наблюдения были выполнены в фотометрических полосах $R_C$ и $I_C$, хотя и при не очень хорошем качестве изображений ($seeing \approx 5''$). Построенные авторами средние профили яркости демонстрируют более сложную картину поведения поверхностной яркости, чем простой экспоненциальный закон падения яркости в диске. На $r \approx 70-100''$ яркость довольно резко падает на $\approx 2^m/\square''$, но на $r \approx 110-140''$ она меняется более плавно, и на больших расстояниях градиент вновь возрастает.

Сложный ход изменения поверхностной яркости демонстрируют профили в полосах B,$R_C$ ,$I_C$ и $K'$ полученные Tully et al (1996) при глубоком фотометрировании скопления UMa на 2.24-м телескопе (Hawaii). Удалось провести профили почти до $1.5R_{25}$ и во всех фильтрах – от B до $K'$ на профилях выделяется центральная "ступенька" (линза) на $R \approx 15-70''$. Из рис.1(c) видно, что на этих расстояниях находятся яркие туго закрученные спиральные рукава. За пределами центральной "линзы" яркость резко падает, хотя во внешних частях диска заметны два низкоконтрастных симметричных рукава. Большой наклон плоскости галактики к лучу зрения (по разным оценкам $i = 70 - 77^o$) в сочетании с тугозакрученными ветвям и резкими изменениями яркости диска создает некоторое подобие кольцевых структур. В работе Buta & Crocker (1983) в NGC 4100 было отождествленно по (фотографическим данным) два таких "псевдокольца" с радиусами $r = 96''$ и $137''$ и внутреннее "ядерное" кольцо с $r \approx 6''$.

Как следует из наблюдений на WSRT (Verheijen, 1996), газовый диск галактики на $r > 150''$ заметно искривлен. Наклон диска уменьшается примерно на $5^o$ и сопровождается небольшим поворотом динамической оси во внешних частях диска. В этой работе приведено поле скоростей HI в линии 21 см и построена кривая вращения, которая выходит на плато на $r \approx 90''$ достигая скорости вращения $V_{MAX} \approx 200$ км/с. Начиная с $r \approx 150''$ – намечается тенденция к уменьшению скорости вращения. К сожалению низкое пространственное разрешение этих данных ($beam = 30'' \times 30''$) не дает возможности исследовать кинематику центральной области по наблюдениям в HI.

Кинематика ионизованного газа изучалась Афанасьевым и др.(1988б,1992) на 6-м телескопе БТА (САО РАН) со светосильным спектрографом с длинной щелью UAGS. Всего было получено 5 спектральных разрезов в различных позиционных углах и построена кривая вращения в линии $H_\alpha$ до $r \approx 65''$ (5 Кпк). На этом расстоянии кривая вращения достигает 165 км/с и продолжает расти, что в целом согласуется с данными по HI Verheijen (1996). Однако в центральной части вращение более сложное. На кривой распределения лучевых скоростей вдоль большой оси симметрично относительно ядра на $r \approx 5''$ располагаются два максимума, градиент скорости между которыми около 300 км/с/кпк ! Далее скорость вращения резко падает на $r \approx 7''$, хотя глубину этого околоядерного минимума уверенно определить не удалось. Был сделан вывод о необычно концентрированном распределении плотности в балдже (Афанасьев и др 1988б).

Следует заметить, что центральная область галактики, заключенная в радиусе R= $12'' - 15''$ притягивает интерес по нескольким причинам. В работе Buta&Crocer (1993) на R= $6''$ было отмечено околоядерное кольцо, выделяющееся "голубым" показателем цвета. Pogge (1987) изучая поверхностное распределение эмиссии в $H_\alpha$ + [NII] сделал вывод, что в околоядерной области NGC 4100 сосредоточено более 20% всего потока в $H_\alpha$ . Ho et.al.(1997) показали что в ядре NGC 4100 $[NII]_{6583}/H_\alpha = 0.35$, и галактика не является сейфертом или LINER. Таким образом, увеличение эмиссии в $H_\alpha$ в ядре связанно с большими темпами звездообразования в ядре по сравнению с диском.

Анализ зависимости градиента лучевой скорости от позиционного угла PA (Афанасьев и др., 1992) показал, что в центральной области на $r < 5'' - 6''$ динамическая ось повернута почти на $25^o$. относительно ориентации внешних изофот. Такое поведение объяснялось присутствием минибара в центральной области NGC 4100. Но подобный поворот динамической оси может дать и изменение параметров ориентации внутреннего диска – "наклонный ядерный диск" (Zasov&Sil'chenko,1996). Окончательный ответ на вопрос, что именно имеет место в данном конкретном случае, может дать применение методов панорамной спектроскопии и сопоставление кинематических и фотометрических данных.

# 2 Наблюдения и обработка

## 2.1 Фотометрия

Все сведения по имеющейся фотометрии собраны в таб.2. Изображения NGC 972 и 1084 были получены с помощью ПЗС-фотометра, установленного в кассегреновском фокусе телескопа 1-м телескопа "Цейсс-1000" (САО РАН). Наблюдатели – В.О. Чавушян, В.В.Власюк, А.В.Моисеев и Н.И. Серафимович. Набор широкополосных фильтров реализует фотометрическую систему, близкую к системе Джонсона (Johnson) для B, V и систему Казинса (Cousins) для $R_C$ ,$I_C$ .

Таблица 2: Журнал фотометрических наблюдений

| NGC | телескоп | дата | фильтр | пиксель | FWHM |
|---|---|---|---|---|---|
| 972 | "Цейсс-1000" | 4.08.97 | V,$R_C$ ,$I_C$ | $0\farcs37$ | $3\farcs0$-$3\farcs5$ |
| | HST (NICMOS2) | 24.11.97 | F110W F160W | $0\farcs075$ | $0\farcs15$-$0\farcs2$ |
| | UKIRT | 25.12.97 | K | $0\farcs29$ | $< 1''$ |
| 1084 | "Цейсс-1000" | 13-15.01.95 | B,V,$R_C$ ,$I_C$ | $0\farcs49$ | $2\farcs0$-$2\farcs5$ |
| | JKT | 24.09.87 | B,V,$R_C$ ,$I_C$ | $0\farcs4$ | $2\farcs0$ |
| | UKIRT | 25.12.97 | K | $0\farcs29$ | $1''$ |
| 4100 | INT | 26.12.95 | $R_C$ | $0\farcs66$ | $1\farcs4$ |
| | JKT | 11.01.96 | $I_C$ | $0\farcs3$ | $1\farcs2$ |

Наблюдения этих же галактик в K-полосе ($\lambda \approx 2$мкм) выполнены S.Ryder на инфракрасном телескопе UKIRT (Гаваи).

Кроме того, использовались данные из открытого архива обсерватории La Palma – Isaak Newton Group (ING, http:
archive.ast.cam.ac.uk/ingarch). Это наблюдения на 1-м телескопе JKT и 2.5-м телескопе INT. Система фильтров аналогична используемой на "Цейсс-1000".

Из архива Космического Телескопа им. Хаббла (HST) мы взяли изображения центральной части NGC 972 (поле $19'' \times 19''$) полученное с новой инфракрасной камерой NICMOS 2 в двух фильтрах. Фильтр F110W имеет эффективную длины волны $\lambda_{eff} = 1.1$мкм и ширину $\delta\lambda = 0.16$мкм, а фильтр F160W $\lambda_{eff} = 1.6$мкм и $\delta\lambda = 0.12$мкм соответственно.

Обработка всех данных по B,V,$R_C$ ,$I_C$ фотометрии проводилась в пакете FORTC, разработанном В.В.Власюком (САО). Последовательность обработки довольно подробно описана в работе ЗМ98. Калибровка наблюдений на "Цейсс-1000" проводилась по стандартным звездам из списков Majewski et al. (1994) и Landolt (1992). Точность калибровки для NGC 972 составляет $0.^m05$ в полосе V и $0.^m03$ в фильтрах $R_C$ и $I_C$ . Для NGC 1084[3] точность калибровки около $0.^m01$ в фильтрах V,$R_C$ ,$I_C$ и около $0.^m12$ в B.

Для NGC 4100 калибровка в полосе $I_C$ проводилась по стандарту PG 0231 из списка Landolt(1992), снятому в ту же ночь и на том же зенитном расстоянии, что и галактика. Формальная точность определения нуль-пункта составила $\pm 0.^m01$. В полосе $R_C$ – не было снято стандарта, мы не нашли данных по апертурной фотометрии и для калибровки использовали результаты работы Tully et.al(1996). Здесь для NGC 4100 приведены радиусы эллипсов в которых сосредоточено 20, 50 и 80 % от общей светимости в $R_C$ и $I_C$ . Сравнения наших оценок потоков в эллипсах тех же радиусов с ожидаемыми потоками по Tully et.al(1996) дало возможность определить нуль-пункт в $R_C$ с формальной точностью $0.^m06$. В самых внешних областях возможно отличие наших цветов от реальных, так как мы исправляли только нуль-пункт и не могли определить другие коэффициенты в цветовом уравнении. Однако, в центральных частях калибровка выполнена уверенно.

Обработка наблюдений в K полосе с UKIRT проводилась S.Ryder в пакете IRAF. Нуль-пункт калибровки определялся по стандартной звезде, снятой на том же зенитном расстоянии, что и галактики. Точность калибровки около $0.^m05$..

## 2.2 Поля скоростей

Поля скоростей ионизованного газа в исследуемых галактиках были получены на 6-м телескопе САО по заявкам А.В.Засова и А.М. Фридмана.

[3]Предварительная редукция данных для NGC 1084 выполнена О.К.Сильченко

Таблица 3: Журнал наблюдений с Фабри-Перо на БТА

| NGC | дата | детектор | линия | пиксель | порядок | $\Delta\lambda, \mathring{A}$ | $\delta\lambda, \mathring{A}$ | FWHM |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 972 | 07.10.94 | IPCS | $[NII]_{6583}$ | $0''.91$ | 501 в $H_\alpha$ | 13 | 0.41 | $1''.5$ |
| | 21.02.98 | CCD | $H_\alpha$ | $0''.68$ | 235 в $H_\alpha$ | 28 | 1.2 | $3''$ |
| 1084 | 26.10.95 | IPCS | $H_\alpha$ | $0''.92$ | 501 в $H_\alpha$ | 13 | 0.41 | $2''$ |
| | 30.08.98 | CCD | $[NII]_{6583}$ | $0''.68$ | 235 в $H_\alpha$ | 28 | 1.2 | $3''$ |
| 4100 | 21.03.96 | IPCS | $H_\alpha$ | $0''.77$ | 501 в $H_\alpha$ | 28 | 1.2 | $2''$ |

Наблюдения проводятся в первичном фокусе БТА с фокальным редуктором. В параллельный пучок за коллиматором устанавливается интерферометр Фабри-Перо (схема CIGALE). Расстояние между пластинами интерферометра меняется с заданным шагом (сканируется). При каждом положении пластин производится накопление сигнала (изображения). Во время цикла сканирования последовательно устанавливаются все требуемые значения воздушных промежутков между пластинами эталона.

Узкий интерференционный фильтр с полушириной $15-25\mathring{A}$ вырезает требуемый спектральный диапазон вокруг исследуемой эмиссионной линии ($H_\alpha$ или [NII]), что позволяет работать в нужном порядке интерференции эталона. Для получения кривой пропускания фильтра производилось накопление засветки подкупольного пространства (или крышек зеркала) кварцевой лампой.

В качестве приемника использовался двумерный телевизионный счетчик фотонов IPCS $512 \times 512$ элементов, для уменьшения шумов пиксели складывались по 4 ("биннинг") и в результате размер приемника оказывался $256 \times 256$ элементов. В наблюдениях 1998 г. счетчик был заменен ПЗС-матрицей TK1024 $1024 \times 1024$ элемента, или $522 \times 522$ пикселя после "биннинга". Журнал наблюдений приведен в таб. 3 где указаны и характеристики используемых эталонов Фабри-Перо ($\Delta\lambda$ –свободный спектральный диапазон, $\delta\lambda$ – размер спектрального канала.)

Наблюдательные данные представляет из себя так называемые "кубы данных", так как кроме двух пространственных координат присутствует и третья координата – спектральная (32 спектральных канала для 501-го эталона и 24 для 235-го эталона), в каждом пикселе имеется отдельный спектр. Для учета фазового сдвига наблюдается эмиссионная линия калибровочной He-Ne-Ar лампы.

Редукция данных (исправление за фазовый сдвиг, вычитание спектра ночного неба, построение поля скоростей, карт в линии и в континууме) проводилось с использованием пакета ADHOC разработанного в Marseille Obsevatory (Boulesteix,1993). Для наблюдений на ПЗС использовалась более точная процедура редукции за фазовый сдвиг по программам написанным В.В.Власюком.

В целях повышения отношения S/N проводилась оптимальная фильтрация данных – спектральное сглаживание гауссианой с FWHM=1.5 канала и пространственное – с FWHM порядка качества изображений.

Спектральное разрешение для эталона работающего в 501 порядке – около 50 км/с, а для эталона в 235 порядке – около 100-150 км/с. Однако так как скорость определяется по барицентру линии (или из гаусс-анализа), то в случае симметричного профиля линии точность определения скорости значительно выше и определяется точностью фазовой калибровки. Она контролируется по кубу спектра сравнения и составляет 10-15 км/с для данных с IPCS и 3-10 км/с для данных полученных с ПЗС приемником.

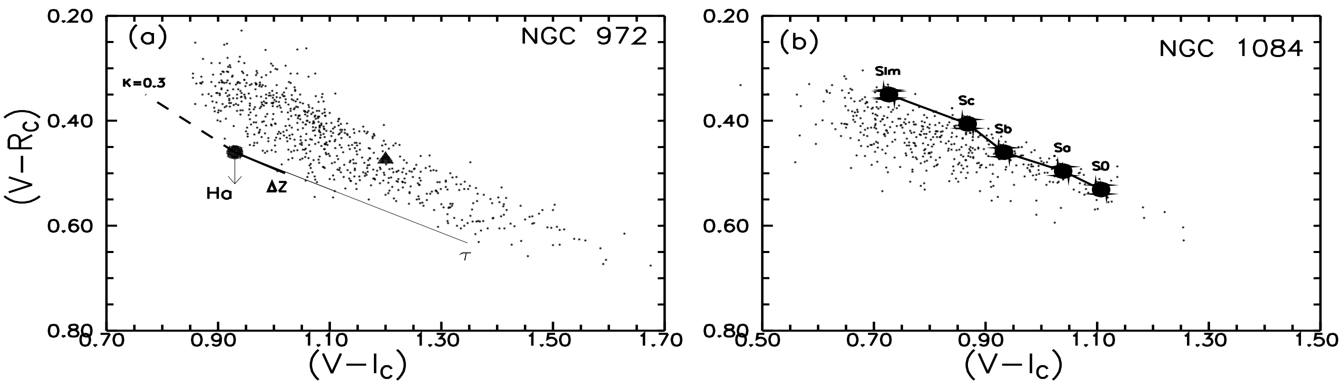


рис.2 Двухцветные диаграммы. Каждая точка – среднее значение цвета на площадке $7 \times 7$ px.(a): NGC 972 (b) NGC 1084

# 3 Методы двумерного анализа наблюдательных данных

Существует множество углов зрения, под которыми человеческий разум вглядывается во Вселенную.

(А. Дж. Тойнби)

Кроме "классических", хорошо известных методов анализа фотометрии (средние профили яркости, анализ ориентации изофот) в данной работе используются и некоторые "нетрадиционные" методы, разработанные в последние годы, в том числе и с участием автора. Остановимся на них подробнее.

## 3.1 Использование индекса $Q_{VRI}$ в поверхностной фотометрии галактик

На рис.8(b) и рис.16(b) приведены карты показателя цвета $(V-R_C)$ (исправленные за поглощение в Галактике) для NGC 972 и 1084. Присутствие пыли и неоднородность ее распределения (особенно в случае NGC 972) делает необходимым для интерпретации цветовых различий одновременно использование обоих показателей цвета.

На рис. 2 показано положение различных областей в дисках галактик на двухцветной диаграмме. Каждая точка соответствует среднему цвету площадки $7 \times 7$ пикселей

На рис 2.(b) приведена нормальная последовательность цветов галактик различных морфологических типов (Buta&Williams, 1995). Кружочек на рис.2(a) показывает положение галактик типа Sb. Сдвиг точек NGC 972 относительно нормальной последовательности "вверх" может быть связан как с тем, что интегральные цвета сами обладают значительной дисперсией относительно средней линии цветовой последовательности, так и с возможной систематической ошибкой в оценке $R_C$ для внешних областей областей NGC 972, связанной с неопределенностью уровня фона .

Наблюдаемые показатели цвета наиболее "красных" эллиптических галактик составляют $(V-R_C)_T \approx 0.^m6$, $(V-I_c)_T \approx 1.^m3$ (Buta&Williams, 1995). Следовательно, длинный "хвост", образуемый более красными областями галактики NGC 972 на рис.2(a) - характеризует не особенности звездного населения, а избытки цвета $E(V-I_C) \geq 0.^m3$ ( $A_V \geq 1^m$), связанные с селективным поглощением света пылью.

Как было отмечено у Buta&Williams,(1995) , пыль "сдвигает" точки на двухцветной диаграмме практически вдоль нормальной последовательности цветов. Это обстоятельство затрудняет оценку содержания пыли по измеренным показателям цвета. К тому же количественная оценка оптической толщины пылевого диска по известному избытку цвета сильно зависит от характера распределения пыли относительно звездной составляющей диска. На рис.2(a) двумя тонкими стрелками показано изменение показателей цвета при оптической толщине вдоль луча зрения $\tau_V = 1$. Длина стрелок характеризует изменение цвета для двух предельных случаев: когда пыль равномерно перемешена со звездным населением (избытки цвета в этом случае меньше), и когда вся пыль сосредоточена перед галактикой. Весь "хвост" точек на диаграмме для NGC 972 объясняется селективным поглощением света пылью с оптической толщиной достигающей $\tau_v \approx 3-5$ (для случая "перемешанного" пылевого слоя, что по-видимому и наблюдается в NGC 972). Эта оценка согласуется с данными Mayya et al.(1998) об аномально больших значениях пылевого поглощения в диске и особенно в ядре NGC972.

Для оценки отношений избытков цвета использовалась аппроксимация закона ослабления света по работе Cardelli et al.(1989). Для параметра $\mathbf{R_V} = 3.1$ получаем, $E_{V-R_C}/E_{V-I_C} \approx 0.41$, причем это значение практически не зависит от вида распределения пыли, и мало меняется с изменением $\tau_v$ (ЗМ98).

Считая отношение постоянным, можно, используя наблюдаемые значения $(V-R_C)_o$ и $(V-I_C)_o$, получить комбинированный показатель цвета $Q_{VRI}$ , значение которого не будет зависеть от избытков цвета: $Q_{VRI} = (V-R_C) - \frac{E_{V-R_C}}{E_{V-I_C}}(V-I_C)$ Эта идея давно применялась в звездной фотометрии (Страйжис,1977), но в поверхностной фотометрии реализована недавно (Засов и Моисеев, 1998).

На рис.8(d) и рис.16(d) приведены карты индекса $Q_{VRI}$ по диску галактик. Сравнение с распределением $(V-I_C)$ наглядно показывает, что распределение цвета стало более однородным, исчезли мощные пылевые прожилки в NGC 972 и узкая "красная" полоса в NGC 1084. Поскольку по разные стороны от большой оси галактик влияние пыли не одинаково по величине, переход от показателей цвета к $Q_{VRI}$ сглаживает цветовые различия. Величина $Q_{VRI}$ является количественной мерой "сдвига" точки на двухцветной диаграмме от нормальной цветовой последовательности. Поэтому наиболее интересны **относительные** изменения $Q_{VRI}$ по диску, а не смещения всей галактики как целого на двухцветной диаграмме.

Рассмотрим распределение $Q_{VRI}$ для NGC 972. Отчетливо выделяется ядерная область с пониженным $Q_{VRI}$ (назовем ее условно "голубой"), отдельные "голубые" пятна в пределах $20'' - 30''$ от центра, и сравнительно "красная" внешняя область.

В работе ЗМ98 подробно рассмотрены факторы, влияющие на локальные изменения $Q_{VRI}$ : изменение оптических свойств пыли, различие в содержании тяжелых элементов в звездах, вспышка звездообразования и излучение в линии $\mathrm{H}_\alpha$ . Показано, что реально влияют только два последних фактора.

Резкое возрастание числа молодых звезд, и прежде всего голубых сверхгигантов, возникающих при вспышке звездообразования, приводит не только к общему "поголубению" звездного населения галактики (оно вообще может не наблюдаться из-за пыли), но и к уменьшению $Q_{VRI}$ , поскольку уярчение оказывается самым сильным в более коротковолновой полосе $V$. На рис.2(a) показано направление сдвига при добавлении к звездам галактики O- звезд (пунктирная стрелка). Показатели цвета O- звезд в системе Касинса принимались равными $(V-R_C) = -0.^m144,\ (V-I_C) = -0.^m336$ (Taylor, 1986).

Длина стрелки соответствует интегральной светимости O- звезд, составляющей долю $k = 0.3$ (в полосе $V$) от светимости "основного" звездного населения, обусловленного преимущественно излучением более старых звезд. Значение комбинированного показателя цвета при $k = 0.3$ уменьшается на $\Delta Q_{VRI} = 0.037$, но при $k \sim 1-1.5$ изменение $Q_{VRI}$ будет примерно соответствовать всему интервалу его значений.

При лучевой скорости галактики 1540 км/с длина волны $\mathrm{H}_\alpha$ близка к $\lambda_{eff}$ для фильтра $\mathrm{R}_C$ , что, при наличии эмиссионного излучения газа приводит к вертикальному смещению точек на двухцветной диаграмме. Вертикальный сдвиг, иллюстрируемый на рис.2(a) стрелкой "$\mathrm{H}_\alpha$ ", соответствует эквивалентной ширине $\approx 100$ $\mathring{A}$. Реальное изменение $Q_{VRI}$ при этом составляет $\sim 0.^m07$, что позволяет объяснить цвет "красных" областей.

И действительно, сравнение с изображением в $\mathrm{H}_\alpha$ (рис.8(c)) подтверждает, что внешнее кольцо в $Q_{VRI}$ совпадает с кольцом HII-областей, а внутреннее "псевдокольцо" (области

N9,11,12,13,14 на (рис.8(c)) совпадает с аналогичной структурой в карте $Q_{VRI}$ . А "синие" в $Q_{VRI}$ области (молодые сверхгиганты в пыли) наблюдаются в самом ядре и в центре гигантской сверхассоциации (N15). Действительно, оценки RP98, говорят о вспышке звездообразования в этих областях с возрастом около $5 \cdot 10^6$ лет, и значительном поглощении (около $3^m$ в $H_\alpha$ ) в ядре.

По карте $Q_{VRI}$ размер (WFHM) "синих" областей около $3 - 4''$, а на карте в K (рис.8(a)) здесь яркие точки с $FWHM \approx 1''$, видимо связанные с красными сверхгигантами, дающими заметный вклад в светимость, в этом диапазоне ( вне областей звездообразования основной вклад в K дает старое звездное население). Размеры совпадают с качеством изображений при наблюдениях (таб.2), следовательно эти области – неразрешенные, очень маленькие! Только на картинках с HST (рис.14) центры областей звездообразования разрешаются и имеют размер $0''.3 - 0''.4$ (30-40 пк), то есть это действительно – центры звездных ассоциаций!

Карта в $Q_{VRI}$ для NGC 1084 (рис.16(a)) менее выразительна, здесь нет столь мощного (и молодого) звездообразования, о чем можно судить и по тому что отношение $L_{FIR}/L_B$ здесь в 2 раза меньше, чем в NGC 972 (таб.1). Несколько крупных области HII выделяются более "красным" значением индекса $Q_{VRI}$ , что связанно с мощной эмиссией в $H_\alpha$ газа, нагретого молодыми звездами. Однако здесь нет большого количества молодых О-звезд и $Q_{VRI}$ ¿0 по всем диску. Пылевая полоса к западу от ядра полностью исчезает в Q, что не уже не удивительно в свете всего вышеизложенного.

Таким образом, использование индекса $Q_{VRI}$ для анализа характера звездообразования в диске галактик вполне оправданно, прекрасно согласуется с данными в $H_\alpha$ и K, но требует значительно меньших наблюдательных усилий!

## 3.2 Двумерная декомпозиция поверхностной яркости

При изучении распределения поверхностной яркости в галактиках важно уметь определять некоторые общие параметры его характеризующие. В большинстве случаев используют классическое разложение радиального профиля поверхностной яркости на тонкий экспоненциальный диск (Freeman,1970) и сферический компонент (балдж), для описания которого часто используют эмпирический закон Вокулера. В подавляющем большинстве случаев анализируется одномерный профиль яркости, раскладываемый на компоненты.

Однако, каждый из методов выделения и анализа профиля яркости обладает своими недостатками, которые сказываются на результате разделения на балдж и диск. Подробно этот вопрос обсуждается в работе Byun,Freeman (1995), в которой доказывается необходимость применения двумерного разделений на компоненты, то есть построения модельного изображения галактики, наиболее близкого к наблюдаемому с ПЗС-матрицами. Действительно, если в результате ПЗС-наблюдений мы имеем двумерную информацию о распределении яркости, то имеет смысл построить и двумерную модель! На большом количестве модельных изображений Byun,Freeman (1995) показали , что двумерный метод имеет значительно большую точность при определении параметров балджа и диска по сравнению с одномерным методом.

В последние годы появилось еще несколько статей, посвященных двумерной декомпозиции поверхностной яркости. Так в работе de Jong (1996) проанализированы ПЗС-изображения 86 спиральных галактик. Hunt et.al.(1998) использовали двумерный метод для изучения структуры сейфертовских галактик и галактик со вспышками звездообразования в ядре. Кроме диска и балджа авторы выделяют звездообразное ядро. Moriondo et al.(1998) применяют двумерную технику для декомпозиции 14 галактик ранних типов с мощными балджами.

Если в галактике существует перемычка (бар), то встает вопрос о правильном определении интегральной светимости и показателя цвета бара, его пространственной ориентации. De Jong (1996) при использовании двумерной декомпозиции для описания поверхностной яркости в баре использует эмпирический закон Фримана (Freeman,1966). Такой подход позволяет учесть вклад бара в общую светимость при двумерном методе анализа поверхностной яркости, но не дает возможности определить точную ориентацию бара в плоскости галактики.

Поэтому автором был разработан и реализован двумерный метод декомпозиции поверхностной яркости, ориентированный прежде всего на анализ структуры галактик с барами и с двойными барами (Моисеев,1998). Использовалась модель распределения поверхностной яркости состоящая из пяти компонентов: ядра (для сейфертовских галактик), балджа, диска и двух баров.

Распределение яркости в центральном звездообразном ядре представляется двумерной гауссовской функцией:

$$I_{core} = I_{0C} \exp(-2.773 r(x,y)^2/w^2) \tag{1}$$

где $I_{OC}$ - центральная интенсивность, $w$ - полная ширина на половине интенсивности, близкая по величине к размеру изображений звезд во время наблюдений, $r(x,y) = \sqrt{x^2+y^2}$ – расстояние в картинной плоскости до центра изображения. Здесь и далее принимается, что $x$ и $y$ – оси декартовой системы координат, начало отсчета совпадает с фотометрическим центром изображения, ось $x$ – направлена на запад, $y$ – на север.

При построении модели балджа мы использовали два вида распределения поверхностной яркости. Закон Вокулера:

$$I_{bulge}(x,y) = I_{0B} \exp(-7.67[(r(x,y)/r_e)^{0.25} - 1]) \tag{2}$$

Где $I_{0B}$ – поверхностная яркость на расстоянии $r_e$ от центра. Внутри эффективного радиуса $r_e$ сосредоточена половина общей светимости балджа.

Закон Кинга:

$$I_{bulge}(x,y) = I_{0B} \frac{1}{1+(r(x,y)/r_c)^2}, \qquad r < r_t \tag{3}$$

где $I_{0B}$ - центральная яркость, $r_c$ шкала длин балджа (полуширина на половине интенсивности). Если $r > r_t$ то $I_{bulge}(x,y) = 0$, это необходимо, чтобы не получать бесконечно большой суммарной светимости Кинговского балджа.

Распределение яркости в диске представлялось классическим экспоненциальным законом:

$$I_{disk}(x,y) = I_{OD} \exp(-r'(x,y)/r_0) \tag{4}$$

здесь $I_{0D}$ – центральная яркость диска, а $r_0$ – его экспоненциальная шкала длин, причем $r'(x,y) = \sqrt{([x\cos PA + y \sin PA]\cos i)^2 + (-x \sin PA + y \cos PA)^2}$ – расстояние до центра в плоскости галактического диска. Угол наклона диска к картинной плоскости равен $i$, позиционный угол линии узлов диска – $PA$.

Бары галактик являются заведомо трехмерными структурами, поэтому важно, что бы при моделировании распределения яркости результат имел бы физический смысл с точки зрения теории гравитационного потенциала. Наиболее простым предположением является представление о баре как о системе вложенных соосных эллипсоидов, при этом, как и для сферического слоя, будет выполняться теорема Ньютона – гравитационный потенциал в точке внутри бара не будет зависеть от распределения массы вне эллиптического слоя. В теоретических расчетах часто используется Ферреровская модель распределения пространственной плотности для трехосного бара (Binney, Tremaine 1987):

$$\rho(x',y',z') = \begin{cases} \rho_0(1-m^2)^n, & \text{если} \quad m^2 \le 1 \\ 0, & \text{если} \quad m^2 > 1 \end{cases} \\ \text{где} \quad m^2 = \frac{x'}{a}^2 + \frac{y'}{b}^2 + \frac{z'}{c}^2 \tag{5}$$

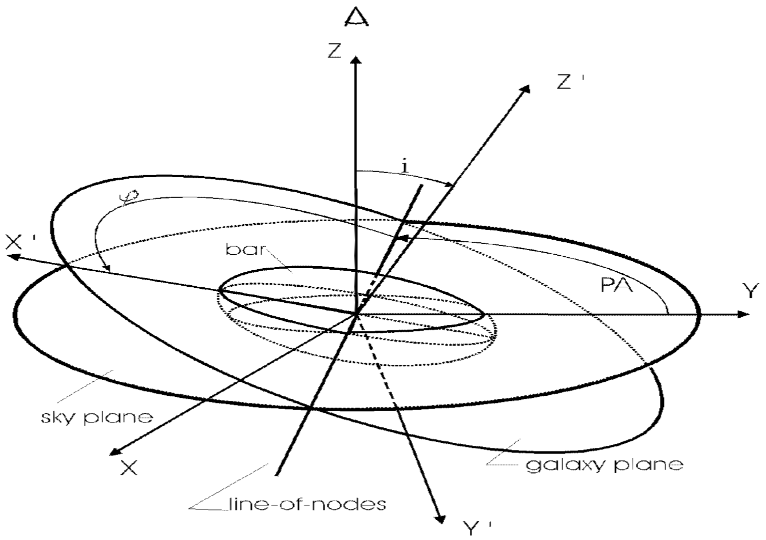


рис.3. Параметры ориентации бара в плоскости галактики.

Здесь $\rho_0$– центральная яркость в расчете на единицу объема, $a$,$b$ и $c$ – полуоси бара, оси декартовой системы координат $(x', y', z')$ идут вдоль соответствующих осей бара. Параметр $n$ принимает целые значения. Пусть $(x, y, z)$ - система координат определенная так, что ось $z$ направлена на наблюдателя, оси $x$ и $y$ лежат в картинной плоскости и направлены соответственно на запад и север (рис 3.). Предполагая, что бар лежит в плоскости галактического диска можно показать, что наблюдаемая яркость определяются параметрами бара $a$,$b$,$c$,$\rho_0$, $n$, углом $\phi$ между линией узлов и большой осью бара и параметрами ориентации плоскости галактики: наклоном $i$ и позиционным углом линии узлов $PA$.

На языке-интерпретаторе IDL 4.0.1 был написан пакет программ GIDRA ( Galaxies Interactiv DRAwing) для автоматического поиска параметров распределения поверхностной яркости. Минимизация проводилась методом Дэвидона-Флетчера-Пауэра, с помощью стандартной IDL-процедуры DFPMIN. Для наиболее сложного случая (пятикомпонентная модель) всего имеется 18 параметров, по которым проводится минимизация: $I_{0C}, w, I_{0B}, r_e$( или$r_c$),$I_{0D}, r_0$,$\rho_{01}, a_1, b_1, c_1, \phi_1$,$\rho_{02}, a_2, b_2, c_2, \phi_2$, $PA$ и $i$ . Индексы 1 и 2 обозначают параметры основного (большего по размерам ) и вложенного баров соответственно.

Начальные значения параметров распределения яркости определяются из анализа одномерного профиля яркости, усредненной в эллиптических кольцах, с ориентацией соответствующей внешним изофотам. Ориентация внешних изофот и предварительная ориентация баров определялись из анализа изменения позиционного угла $PA$ и эллиптичности $e = 1 - b/a$ изофот с радиусом.

В работе Моисеева (1998) метод декомпозиции был подробно протестирован. На модельных изображениях оценивалась точность нахождения различных параметров распределения яркости и ошибки, вносимые из-за недоучета конечного пространственного разрешения. Показано, что хотя и существует неопределенность при независимом определении параметров баров $\rho_0$ и $c$, но интегральная светимость баров определяется с точностью, в несколько раз более высокой. Возможности метода продемонстрированы на примере сейфертовской галактики с двумя барами Mkn 573. Уточнены параметры ориентации диска, которые не противоречат кинематическим данным.

### 3.3 Метод анализа полей скоростей "наклонные кольца"

Если вращение газового диска чисто круговое, то достаточно только измерить лучевые скорости вдоль двух разрезов проходящих через центр (не по малой оси!), что бы **однозначно** определить параметры ориентации диска и выделить кривую вращения (Афанасьев и др.1988-1992; Засов,1993). Однако в спиральных галактиках имеют место крупномасштабные отклонения от кругового вращения на $20 - 30$км/с, связанные прежде всего со спиральным узором. Ситуация значительно усложняется и простое усреднение **полного** поля скоростей газа не дает возможности выделить круговую компоненту вращения. В работе Ляховича и др. (1996) показано, что разлагая наблюдаемое поле скоростей в фурье ряд по азимутальному углу $\phi$ можно выделить компоненту, связанную с чисто круговым вращением и восстановить полную трехмерную картину движения газа в галактике.

Однако, в галактиках с барами радиальные потоки газа вдоль бара, ударные волны на кромках бара создают значительные отклонения от круговых скоростей и не дают однозначно интерпретировать фурье-спектр. Если бар небольшой, то количество точек с измеренными скоростями часто недостаточное для полного фурье-анализа.

Присутствие бара вызывает поворот динамической оси (линии максимального градиента лучевой скорости) относительно линии узлов галактики (Афанасьев и др.1992; Zasov&Moiseev, 1998) и этот поворот можно проследить без помощи фурье-анализа. Известен метод анализа поля скоростей называемый "tilted-rings" (Begeman,1989). Основная идея – анализ поля скоростей галактики в узких эллиптических кольцах. Опишем эту процедуру подробнее.

На языке IDL 4.0.1 автором был написан пакет DetKA. Идея программы близка к процедуре ROTCUR пакета известного пакета GIPSY применяемом в основном для обработки радиоданных. Наша программа адаптирована для работы с полями скоростей в $H_\alpha$ , которые, как правило, значительно менее "гладкие" и часто содержат "дыры", хотя и отличаются лучшим пространственным разрешением. Анализ поля скоростей проводится в несколько этапов:

1) Определение координат центра вращения. При поиске положения динамического центра используется предположение о симметрии относительно него наблюдаемого поля скоростей. Для каждой точки из заданной окрестности определяются величины отклонений поля от симметрии относительно этой точки. Так где эти ошибки минимальны и находится возможный динамический центр. Положение центра фиксируется при дальнейших процедурах анализа.

2) Грубое определение средних параметров ориентации. Введем в картинной плоскости полярную систему координат $(r, PA)$: $r$– видимое расстояние от центра вращения и $PA$– позиционный угол. В предположении чисто кругового вращения, наблюдаемая лучевая скорость $V_{OBS}$ определяется выражением:

$$V_{OBS}(r, PA) = V_{SYS} + V_{ROT}(R(r))\frac{\cos(PA - PA_0)\sin i}{(1 + \sin^2(PA - PA_0)\tan^2 i)^{1/2}} \tag{6}$$

а расстояние до центра вращения в плоскости галактики:

$$R(r) = r(1 + \sin^2(PA - PA_0)\tan^2 i)^{1/2} \tag{7}$$

где $V_{SYS}$ – системная скорость центра , $V_{ROT}$ – скорость кругового вращения, $PA_0$ – позиционный угол линии узлов, $i$ – наклона галактики к лучу зрения.

В процессе работы наблюдаемое поле скоростей разбивается на эллиптические кольца, задаваемые уравнением (7) для $R = const$. *Ширина колец для всех случаев , рассмотренных в данной работе принималась равной 1.5 пикселя.* В каждом кольце проводится аппроксимация наблюдаемой зависимости $V_{OBS}(PA)$ модельной кривой (6) с помощью нелинейного МНК.

В каждом кольце эта процедура выполняется в два этапа. Вначале строится модельное приближение (6) и определяются отклонения каждой точки от модели.

На втором этапе аппроксимация повторяется вновь, но точки уклоняющиеся больше, чем за $3\sigma$ игнорируются в расчете. В каждом кольце радиуса $R$ определяются параметры модели ( $V_{SYS}$, $V_{ROT}$, $PA_0$, $i$) и их ошибки в МНК.

При нахождении средних параметров ориентации кольца в которых проводится аппроксимация делаются "свободными" – границы очередного кольца находятся по формуле (7) при использовании параметров ориентации определенных в предыдущем (более близком) кольце. В результате получается грубая картина изменения параметров ориентации – $PA_0$ и $i$ с радиусом.

3). Анализ изменения параметров ориентации. Исходя из "грубой" картины изменения $PA_0$ и $i$ определяются средние их значения для данных интервалов радиусов и в дальнейшем ориентация колец фиксируется на данном интервале радиусов. Аппроксимация повторяется аналогично пункту 2), но при фиксированных границах эллиптических колец.

Следует, однако, заметить, что если $PA_0$ определяется вполне однозначно по положению экстремумов функции (6), то с оценкой $i$ ситуация менее определенная. Так, если наклон $i$ мал ( галактика "face-on"), то знаменатель в (6) стремится к 1 и невозможно разделить вклад в наблюдаемую скорость от $V_{ROT}$ и $i$, однозначно определяется только $V_{ROT}\sin i$. Begeman (1989) специально исследовавший этот вопрос, на примере обработки радиоданных показал, что критическим значением наклона являются $i < 40^o$.

4). Получение кривой вращения. Параметры $PA_0$ и $i$ фиксируются и определяется "круговая" скорость вращения. Здесь главное – правильно выбрать $PA_0$ и $i$, как правило на больших расстояниях от центра они не меняются (если нет изгиба диска). Если же в центре имеют место сильные некруговые движения, и меняется ориентация динамической оси, то полученная "кривая вращение" несет весьма смутное представление о характере круговых скоростей в этой области.

Видимо наиболее корректный путь преодолеть эту трудность – строить подробную модель течения газа в баре конкретной галактике, опираясь на потенциал, полученный из ИК-фотометрии, и уже само модельное поле сравнивать с наблюдениями. Работа это чрезвычайно сложная, требует хорошей теории и большого количества наблюдательного материала. Пожалуй только для двух гранд-дизайн галактик с большими барами – NGC 1300 и NGC 1365 метод реализован в полном объеме (Lindblad, 1996), но многие вопросы все равно остаются открытыми.

# 4 Моделирование движения газа в галактиках с перемычками

-Во что... поиграем? – осторожно спросил я.
-Померяемся силами – сказал полковник – Битва умов. На моделях. Вы говорили, что вам это нравится.

(Дж. Дарелл)

## 4.1 Описание модели

Детальное моделирование газовых течений в барах пока возможно только методами численных гидродинамических расчетов. Действительно численные эксперименты с взаимодействующими N-точками (начиная с работ Miller&Prendergast(1968) и до современных Combes(1994) и т.п. ), позволяют делать некоторые выводы об образовании и эволюции звездных баров, однако недостаточное количество точек по сравнению с реальным числом звезд и газовых облаков не дает возможности описать поле скоростей, получить ударные волны на кромках бара. Метод вычисления орбит звезд и газовых облаков развиваемый с работ Contopoulos&Papayannopoulos(1980) позволил сделать ряд важных выводах о семействах орбит в барных галактиках, границах бара. Оказалось, что стабильные орбиты либо параллельны (семейство $x_1$), либо перпендикулярны бару (семейство $x_2$).

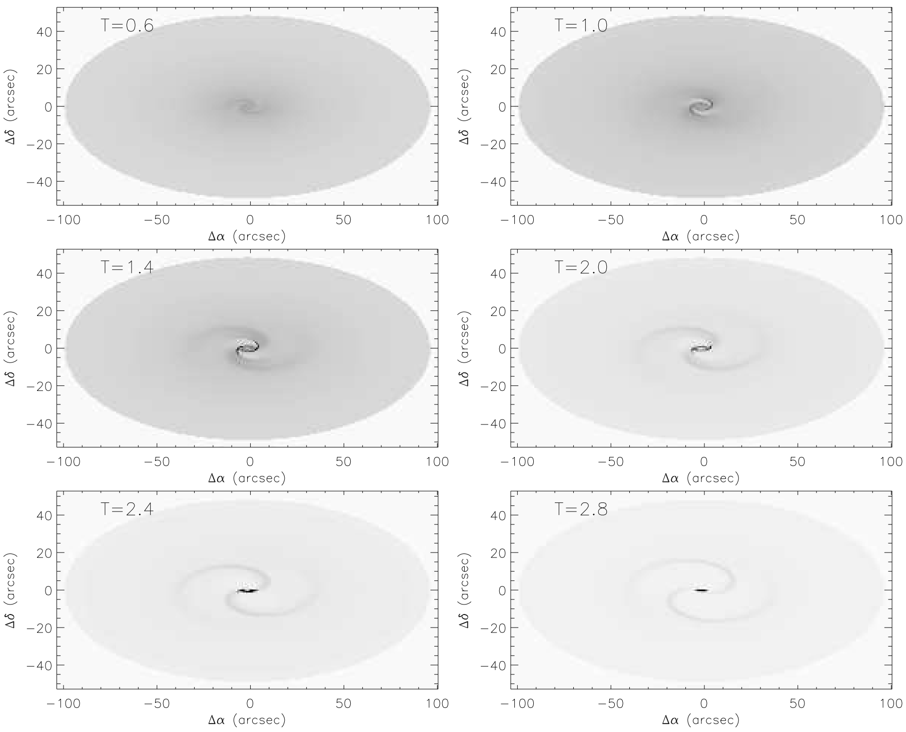


рис.4. Распределение поверхностной плотности газа для различных моментов безразмерного времени T. Бар расположен вдоль большой оси.$i = 60^o$

Однако наиболее полные выводы о характере влияния бара на газовый диск галактики получены в численных гидродинамических расчетах, где уравнения гидродинамики выписываются для "газа" из газовых облаков. Нет смысла описывать все различные схемы модельных расчетов, обзор которых можно найти в работе Lindblad (1996). Общим результатом можно считать то, что присутствие бара является прекрасным механизмом отвода углового момента газа, часть газа начинает двигаться вдоль бара к центру, теряя энергию на ударных кромках бара (Levy et.al,1996 и масса других работ). При этом наблюдаемые изовелы (линии равной скорости) искажаются, поворачиваясь вдоль бара, а динамическая ось соответственно должна поворачиваться в противоположную сторону. Подобный вывод о взаимном поведении фотометрической и динамической осей является скорее качественным (Zasov&Moiseev,1998), к своему удивлению, автор не нашел в литературе количественных оценок наблюдаемого "рассогласования" этих осей для современных моделей баров.

В то же время эффект поворота динамической оси может дать, к примеру, наклонный диск в центре галактики (Zasov&Sil'chenko,1996;Zasov&Moiseev,1998). Однако в этом случае, так как в диске с круговым вращением динамическая ось совпадает с линией узлов, то и поворот фотометрической и динамической оси должен происходить в одну сторону. Но это вывод, как говорится "на пальцах". Необходимы конкретные расчеты – возможно, эффект проекции в совокупности с радиальными потоками газа в баре может дать эффект, аналогичный наклонному диску.

Для этого необходимо прежде всего построить из модельных полей скоростей "наблюдаемые" – учесть конечное пространственное и спектральное разрешение приборов, эффект проекции. Мы использовали результаты расчетов, проведенных на физфаке ВолГУ. В основе моделирования лежит численное решение уравнений газовой динамики во внешнем гравитационном поле звездных подсистем (диск, балдж, гало). Неосесимметричное возмущение (звездная бармода) включается плавно и постепенно выводиться на фиксированный уровень. При этом наблюдается своеобразный квазипериодический режим прокачки газа через бар (Levy et al.,1994 и 1996). Интересно то, что газовые потоки в баре бисимметричные, кроме основного потока газа вдоль бара к центру, имеет место и обратное движение – газ "проскакивает" через потенциальную яму внутри и возвращается обратно, в ядре возникает "седловая точка". Развитие бара порождает двухрукавную спиральную структуру в диске.

Мы использовали результаты эксперимента в целом аналогичного описанному в (Levy etal.,1996), за исключением того, что распределение потенциала выбиралась таким, что бы кривая вращения была близка к кривой вращения нашей Галактики. Максимальная скорость вращения – около 300 км/с, шкала длин диска 3 кпк, радиальная шкала бара около 1 кпк, радиус расчетной области 10 кпк. При получении "искусственных полей" предполагалось, что расстояние до галактики 20.6 Мпк, так что $1''$соответствует 0.1 кпк, что приблизительно верно для рассматриваемых реальных галактик (см. таб. 1)

Результатом расчетов являются распределения поверхностной плотности газа $\rho_{gas}$, радиальной ($V_r$) и азимутальной ($V_\phi$) компонент скорости газовых частиц. Размер ячеек расчетной сетки в полярных координатах:$\Delta\phi = 2^o$, $\Delta R = 0.016 - 0.2$ кпк в зависимости от расстояния до центра. Используя эти данные мы строили "наблюдаемые кубы" по следующей схеме.

1. Расчет наблюдаемой лучевой скорости в каждой точке $(R, \phi)$:

$$V_{OBS} = V_{SYS} + V_r \sin\phi \sin i + V_\phi \cos\phi \sin i \tag{8}$$

   где значение системной скорости принималось равным $V_{SYS} = 1500$ км/с, позиционный угол линии узлов $PA_0 = 90^o$. Расчеты проводились для значений $i = 30^o$, $60^o$ (как не странно, большое количество полей скоростей имеется для галактик с наклоном близким к этому "оптимальному" значению), и $70^o$ (для рассмотрения случая NGC 4100). Затем распределение $V_{OBS}(R, \phi)$ и $\rho_{gas}(R, \phi)$ интерполировалось на сетке декартовских координат с размером ячеек 0.02 кпк ($0\overset{''}{.}2$ ) – $V_{OBS}(x, y)$ и $\rho_{gas}(x, y)$.

2. В каждой точке $(x, y)$ строился спектр линии. Он представлялся гауссианой с центром соответствующим $V_{OBS}(x, y)$ и полушириной $FWHM = 130$ км/с, что примерно соответствует спектральному разрешению используемого эталона Фабри-Перо, работающего в 235 порядке в $H_\alpha$ с finness=10, с 24 спектральными каналами. Из-за грубого спектрального разрешения, мы пренебрегали влиянием дисперсией скоростей газовых облаков на ширину линии. Интенсивность линии пропорциональна $\rho_{gas}(x, y)$. Таким образом получался куб с размером пикселя $0\overset{''}{.}2$.

3. Делался биннинг $4 \times 4$ так что размеры пикселей – $0\overset{''}{.}8$, близки к реальным (таб. 3). После этого в каждом канале проводилось пространственное сглаживание гауссианой с $FWHM = 2''$, что типичному качеству изображений во время наблюдений.

4. По спектрам сглаженного куба строились поле скоростей и изображение в линии (наблюдаемое распределение поверхностной плотности газа) и определялись параметры ориентации по методике описанной в разделе 3.3.

Автором был написан пакет DEMIURG реализующий вышеописанный схему и проанализированы модельные поля для разных стадий развития бара (рис.4). Угол между линией узлов и баром менялся с шагом $15^o$. Всего было построено более 400 "искусственных галактик"!

### 4.2 Анализ результатов

На рис.5 показано распределение наблюдаемой плотности газа и изовелы поля скоростей для разных углов ориентации бара. Эта типичная картина для моментов $T < 3 - 4$ (где T=1 соответствует одному обороту бара), затем бар выходит на насыщение, а спирали вырождаются

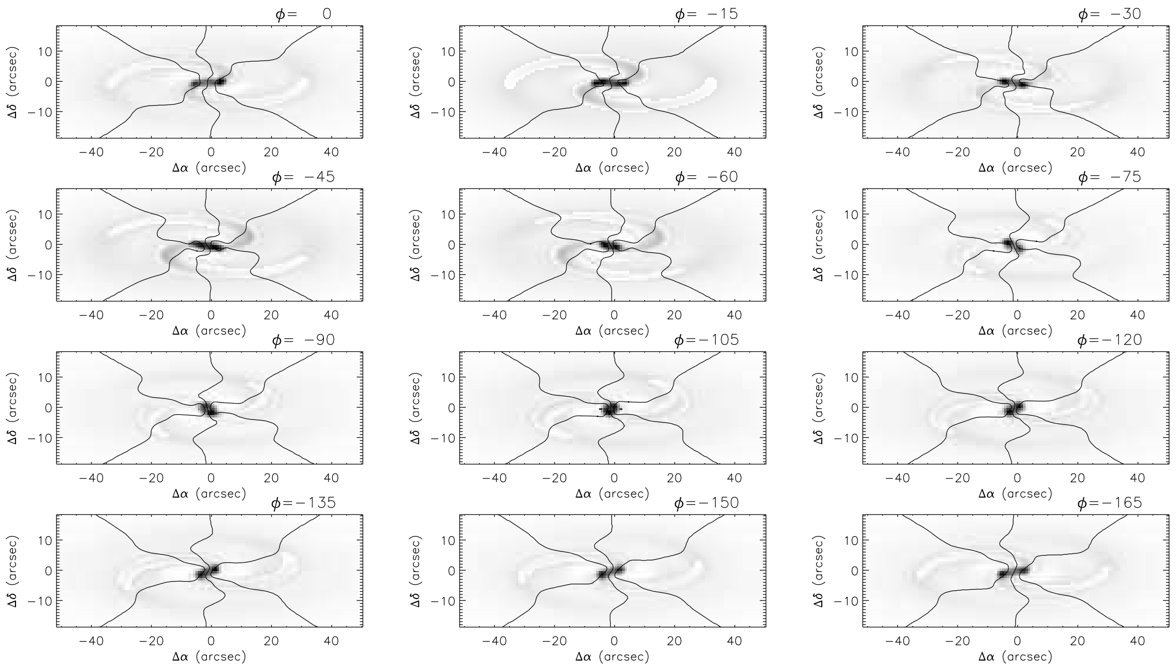


рис.5. Распределение поверхностной плотности газа в центральном регионе для разных углов $\phi$ поворота бара. Контурами отмечены изовелы модельного поля скоростей 1400,1500 ($V_{SYS}$) и 1600 км/с. Наклон диска $i = 70^o$ T=2.0

в псевдокольцо, с довольно сложными движениями газа (Levy et.al,1996). Но этот случай нам неинтересен, поскольку мы рассматриваем галактики с четкой спиральной структурой. Внутри $R < 10'' - 15''$ повороты изовелл связаны с баром, а на больших радиусах их искажения от чисто кругового движения определяются движениями в рукавах. В центре видна характерная "S-образная" форма изовелл. Интересно, что изовелы в баре искажаются даже если бар расположен вдоль большой оси галактики ($\phi = 0$). Формально, в этом случае проекция радиальных скоростей равна нулю, но реально бар имеет конечную ширину, а возмущения скорости имеют и азимутальную компоненту, которая вносит свой вклад в наблюдаемую скорость.

На рис. 6 приведены типичные результаты анализа ориентации динамической оси для видимого угла наклона $i = 70^o$. Поведение позиционного угла довольно сложное. В самом центре динамическая ось заметно отклоняется от $PA_0 = 90^o$ из-за влияния бара. (кроме $\phi \approx 0^o$, и $-90^o$ – положений вблизи большой и малой оси). Начиная с $R \approx 5''$ отклонение уменьшается, и на $R \approx 10''$ (вблизи границы бара) оно очень незначительно. Далее поворот идет в другую сторону от линии узлов и только на $R > 20''$ искажения прекращаются.

При развитии бара на его **лидирующей** кромке образуется ударная волна, особенно хорошо заметная на картах распределения давления – газ здесь сильно сжат. Такое расположение ударных фронтов согласуется как с наблюдением пылевых полос в барах так и с другими теоретическими расчетами (Athanassoula ,1992). "Биения" вокруг $PA_0$ связаны со сложной картиной скоростей на концах бара, когда область ударной волны переходит с лидирующей кромки бара на внутреннюю стороны отстающих рукавов (поскольку радиус коротации лежит в районе $R \approx 19'' - 20''$). Картина изменения $PA$ не точно симметрична относительно $\phi = -90$, ведь у нас имеется выделенное направление отсчета угла – направление закрутки спиральной волны плотности, противоположное направлению вращения галактики (отстающая волна).

Толстым отрезком на рис.6 показана ориентация бара полученная в результате формальной депроекции отрезка с данным $\phi$ на картинную плоскость. Видно, что несмотря на сложный характер изменения $PA$ с радиусом, поворот динамической оси в баре ( $R < 10''$) **всегда**

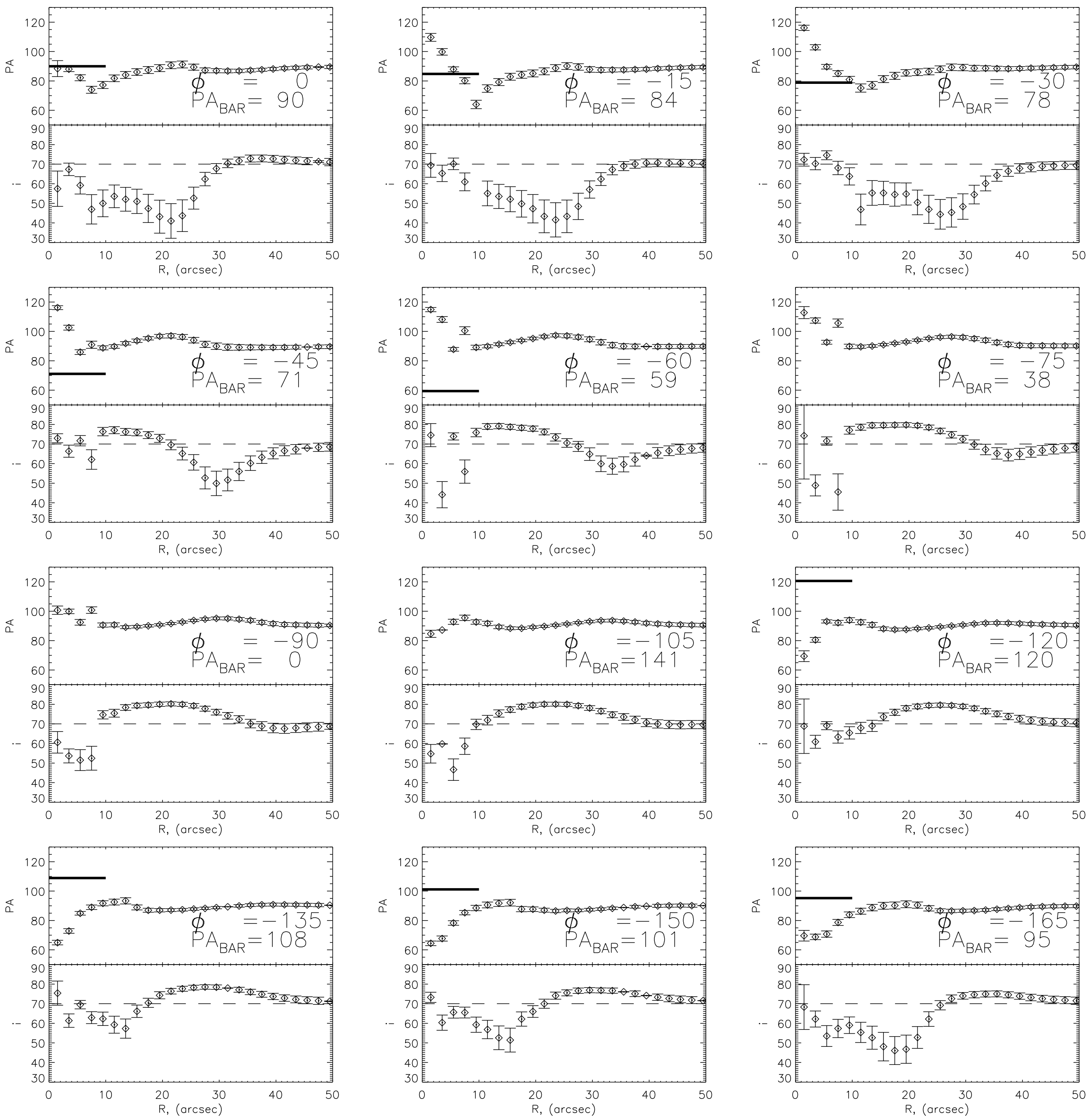


рис.6. Результаты анализа модельных полей скоростей. Радиальные изменения ориентации динамической оси $PA$ и наклона $i$. На графиках для $PA$ жирной линией указан позиционный угол бара в проекции на плоскость неба (этой же ориентации соответствует и надпись "PA=..." на каждом графике). На графиках $i$ пунктиром показан наклон диска $i = 70^o$.

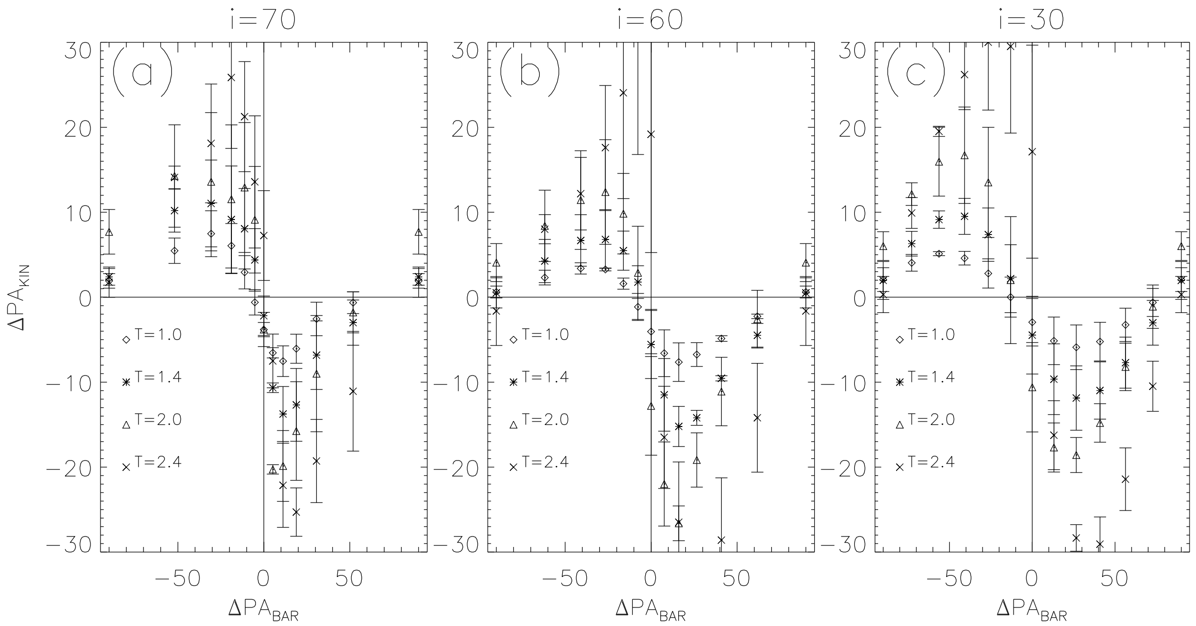


рис.7. Зависимость среднего отклонения позиционного угла динамической оси от линии узлов в области бара $\Delta PA_{KIN}$ от позиционного угла бара $\Delta PA_{BAR}$, для разных наклонов $i$. Разные значки соответствуют разным моментам развития бара.

происходит в противоположном направлении от линии узлов, по сравнению с фотометрической осью бара, они расходятся в "противофазе"! Этот вывод верен для всех построенных полей с разными $i$, $\phi$ и T.

Что бы лучше продемонстрировать этот эффект на рис.7 показаны зависимости ориентации динамической оси (среднее по всем точкам с R¡6" ) от ориентации бара. Амплитуды поворота динамической оси здесь несколько сглажены усреднением, однако общая тенденция видна для всех наклонов и разных стадий развития бара.

До $\phi \approx \pm 45^o$ (этому соответствует при разных значения наклона $PA = \pm(30^o - 45^o)$) динамическая ось поворачивается практически точно в противофазе с ориентацией бара. С ростом угла между баром и линией узлов, динамическая ось начинает "отставать", меняется не столь резко как фотометрия и при $\phi \approx \pm 90^o$ практически совпадает с линией узлов, однако всегда отклонения ее противоположны по знаку повороту бара. "Отставание" динамической оси является следствием комбинации эффекта проекции с тем очевидным фактом, что бар не полностью "останавливает" газ (контраст потенциала бара в этом эксперименте 30%), кроме радиальной всегда есть и азимутальная компонента скорости.

Внимательнее рассмотрим поведение изменений угла наклона $i$, формально определяемого по полю скоростей (рис.6). В области бара радиальные движения искажают зависимость (6), которая должна быть при чисто круговом вращении. Поэтому, определяемое на этих радиусах значение наклона может заметно отличаться от истинного наклона диска! Амплитуды изменения $i$ достигают $20^o - 30^o$ и часто довольно хаотичные, но замечена одна интересная тенденция. В экспериментах с наклоном диска $i = 60^o$ и $70^o$ (в этом случае эффект заметнее) особенно при $\phi < 30$ ($\phi > 150$) формальное определяемое значение наклона в области бара практически выходит на постоянное Создается впечатление, что в центре находится выделенный диск с наклоном к картинной плоскости на $15^o - 25^o$ меньше чем "внешний" диск галактики!

Причина этого кроется в том, что зависимость (6) при $i > 50^o - 60^o$ сильно отличается от косинусоидальной, но радиальные движения, максимум проекции которых вдоль малой оси галактики, искажают зависимость (6) так, что она становиться ближе к косинусоиде, и соот-

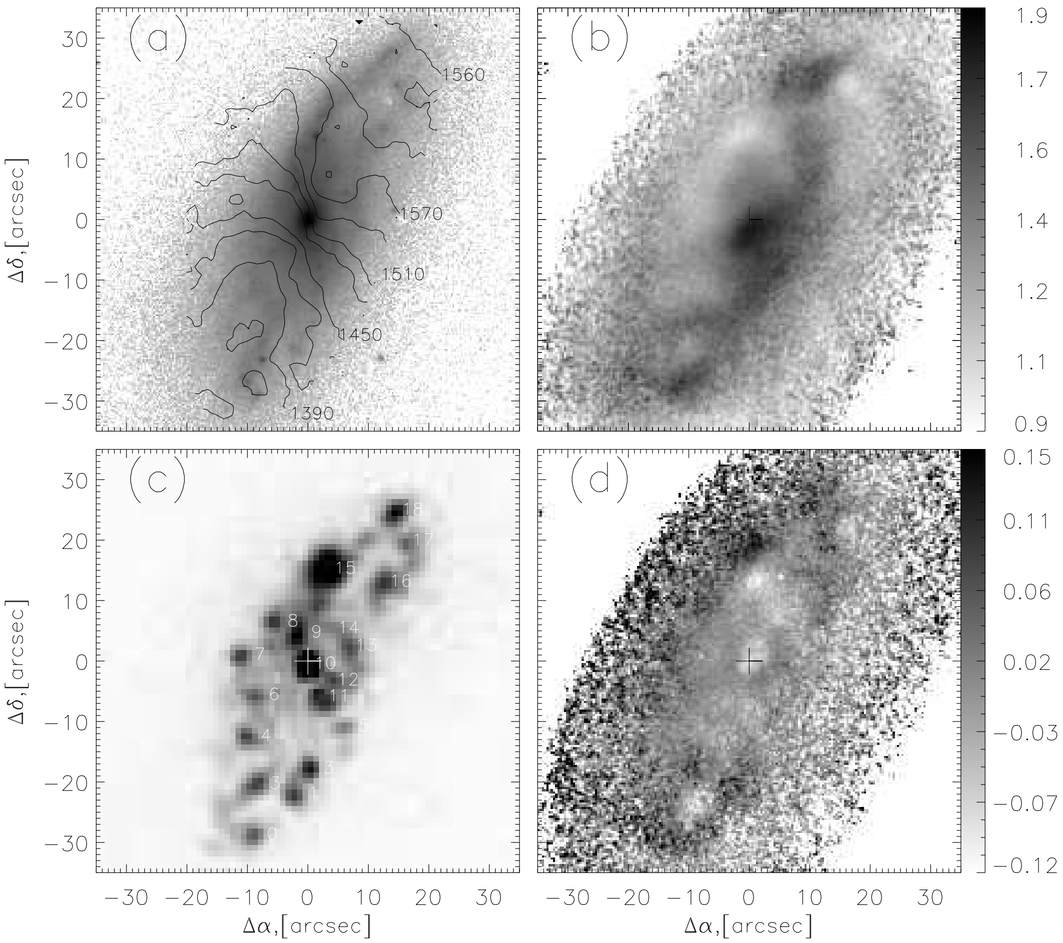


рис.8. Результаты по NGC 972, крестиком отмечен фотометрический центр :(a) – изовелы поля скоростей в линии $H_\alpha$ наложенные на изображение в K-полосе;(b) – распределение показателя цвета $(V-R_C)$ ;(c) – изображение в линии [NII] (поскольку для данных в $H_\alpha$ хуже угловое разрешение) нумерация HII-областей соответствует RP98; (d) – распределение по диску $Q_{VRI}$ -параметра

ветствует меньшим значениям $i$. Можно сделать ошибочный вывод: "мы наблюдаем движение по круговым орбитам для меньших значений наклона". Однако, на самом деле это просто эффект проекции на луч зрения суммы круговых и не круговых движений в баре! Так как и в случае реального наклонного диска должен наблюдаться поворот динамической оси, то анализ одного только поля скоростей может привести к неправильным выводам. Но в случае наклонного диска динамическая ось должна поворачиваться в ту же сторону, что и фотометрическая (Zasov&Moiseev,1998). И сравнение $PA$ полученного из анализа поля скоростей с фотометрическим данными может ответить на вопрос, что мы видим – наклонный диск или бар?

# 5 Изучение отдельных галактик

"Всякая вещь есть форма проявления беспредельного разнообразия."
(Козьма Прутков)

Предварительно следует сделать одно небольшое замечание. Для каждой галактики разного рода данные (поля скоростей, изображения) получены на различных телескопах, в разном масштабе и имеют часто разную ориентацию. Для приведения к одной ориентации в качестве

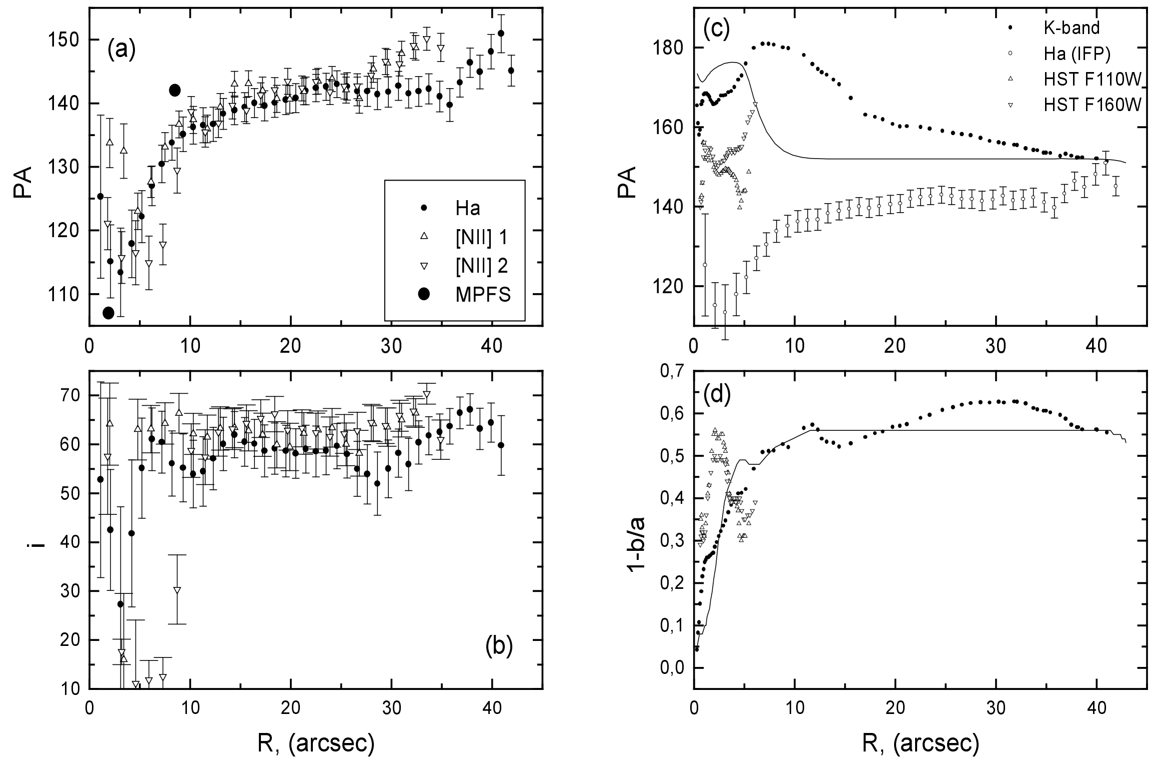


рис.9. Радиальные зависимости параметров ориентации диска NGC 972. (a)– позиционный угол динамической оси по разным наблюдениям (MPFS– по Zasov&Sil'chenko,1996).(b)– наклон диска. Анализ эллиптических изофот по ИК наблюдениям. Сплошная линия соответствует изофотам двумерной модели изображения в K: (c)– позиционный угол, для сравнения показана динамическая ось по полю в $H_\alpha$ . (d) – эллиптичность изофот.

реперных точек использовались 7-10 звезд фона, а если их было недостаточно то и HII-области в самой галактике. На качестве изображений повороты почти не сказывались, но поля скоростей от поворотов могут заметно измениться – "замываются" резкие градиенты и возникают проблемы по краям галактики. Поэтому разворачивался и масштабировался весь спектральный куб а уже потом вновь строилось поле скоростей.

## 5.1 NGC 972

Для этой галактики поле скоростей в линии $[NII]_{6583}$ было получено при двух ориентациях поворотного стола (PA-вертикали $12^o$ и $30^o$ ). В дальнейшем эти поля будем именовать как $[NII]_1$ и $[NII]_2$ соответственно. HII-области в галактике сосредоточены в пределах диска с $R \approx 40''$, за его пределами диффузная эмиссия очень мала и поля скоростей получены только для этой, центральной области.

Наблюдения в $H_\alpha$ – со значительно меньшими шумами чем в [NII], поле несколько более протяженное, но в [NII] – лучше пространственное и спектральное разрешение (таб.3). На поле скоростей в $H_\alpha$ , показанном на рис.8(a), обращает внимание поворот изовелл в центральных 10" – здесь изовелы практически параллельны бару, видимому в K-полосе. Стоит напомнить, что бар в этой галактике был впервые заподозрен именно по кинематике (Zasov&Sil'chenko,1998)!

Но и на больших расстояниях изовелы заметно искажены, что видимо связанно с влиянием

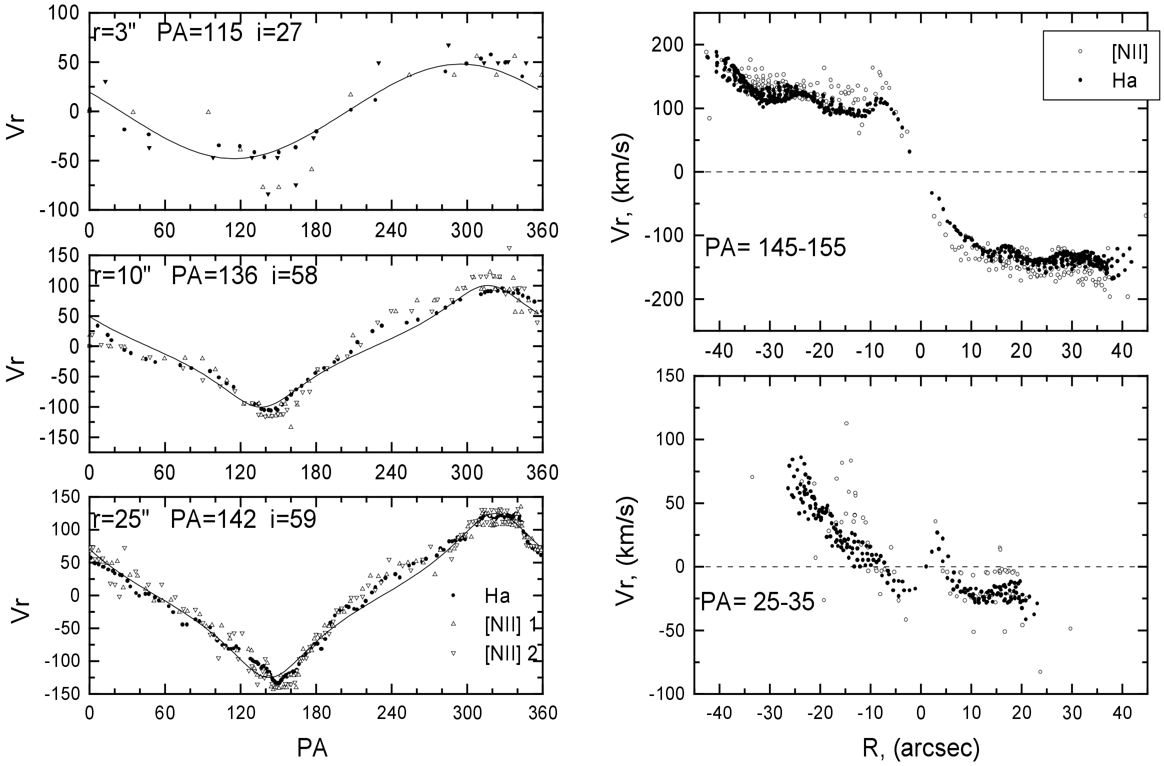


рис.10. Некруговые движения в баре NGC 972. *Слева* – зависимости наблюдаемой лучевой скорости (за вычетом системной скорости центра 1532 км/с) от позиционного угла в кольцах разных радиусов. Ширина колец 1.5 пикселя. Сплошная линия – аппроксимация по формуле (6) для наблюдений в $H_\alpha$ , ей соответствуют подписанные параметры ориентации. Ориентация колец фиксированная – $PA = 150^o$, $i = 64^o$. *Справа* – примеры лучевых скоростей вдоль узких разрезов. $PA = 145^o - 155^o$ – разрез по большой оси, $PA = 25^o - 35^o$ – перпендикулярно динамической оси в баре.

двухрукавной спирали в K. Анализ параметров ориентации полученных из поля скоростей по методике описанной в пункте 3.3, позволяет сделать следующие выводы (рис.9(a)-(b)). В области $R < 5''$ динамическая ось поворачивается на $40^o$ по сравнению с внешними областями, далее позиционный угол резко меняется и начиная с $R \approx 10 - 12''$ выходит на среднее значение $142^o$, что совпадает с оценкой ЗМ98 $143 \pm 1$.

Однако, последующий на $R > 30'' - 35''$ поворот до $150^o$ неоднозначен. Так как форма заполненной эмиссией области несколько несимметрична и напоминает туфельку (рис. 8(c)), то начиная с этих расстояний эллиптические кольца неравномерно заполняются точками поля скоростей и локальные отклонений от кругового вращения на одной "половинке" галактики могут внести систематику в определение $PA$. Но, во-первых подобный эффект незаметен в наклоне $i$ (рис.9(b)), хотя практика показывает, что $i$ значительно чувствительнее к неравномерностям вращения, чем $PA$. Во-вторых ориентация внешних изофот в $VR_C$ $I_C$ для $R > 65''$ составляет $PA = 151^o \pm 0.^o5$ (ЗМ98).

Кроме того, анализ изофот в K-полосе дает $PA = 150 - 152^o$ для $R = 40''$. У Mayya et al(1998) профиль $PA$ тянется до $70''$и эти авторы дают значение $PA = 152^o$. С учетом всего вышеизложенного была принята ориентация линии узлов галактики $PA = 150^o$ как согласующееся со всеми данными.

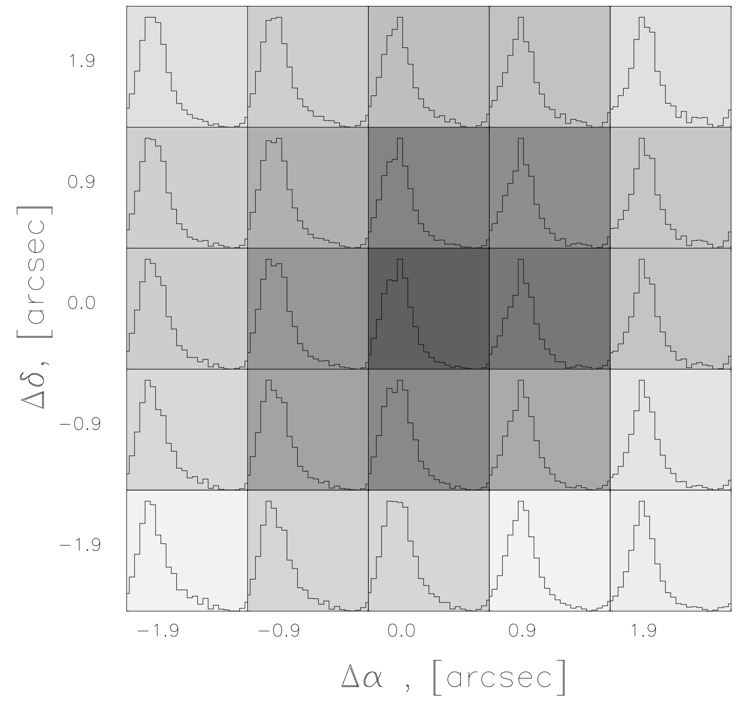


рис.11. Двойные профили $H_\alpha$ вблизи центра NGC 972, наложенные на изображение в континууме рядом с $H_\alpha$ .

Мы применили метод двухмерной декомпозиции яркости (пункт 3.2) к изображению в K. Предварительный анализ среднего профиля яркости подтвердил вывод ЗМ98 и Mayya et al.(1998) об отсутствии фотометрического балджа. Примечательно, что если в оптике профиль диска представляется двумя экспонентами со шкалами 6" и 18" в $I_C$ (ЗМ98), то в K достаточно одной экспоненты со шкалой $10''.2$ по оценкам Mayya et al.(1998)! Это видимо связан со сложным и неравномерным распределением пыли во внутреннем диске, что и дает "ступеньку" на профиле яркости в оптических полосах и не влияет на "свободную от пыли" полосу K.

Двумерная модель яркости включала в себя диск, ферреровский бар ($n = 1$) и гауссиану, описывающую яркое ядро со вспышкой звездообразования. В результате получены следующие параметры. Ядро: $I_{0C} = 14^m.3$, $w = 1.''8$. Диск: $I_{OD} = 15^m.3$,$r_0 = 12''.2$ с ориентацией $PA = 152^o$, $i = 64^o$. Бар: $a = 9''.6$, $b = 3.''6$, $c = 1''.2$, $\rho_0 = 21.1^m/(arcsec)^3$, $\phi = 61^o$. Причем ферреровский бар неплохо, без сильных систематических отклонений, аппроксимирует наблюдения.

На рис. 9(c)-(d) представлены результаты изофотного анализа инфракрасных изображений (UKIRT и HST/NIC2[4]). Сплошной линией отмечены аналогичные результаты полученные по модельному изображению, предварительно сглаженному гауссианой с $FWHM = 1''$ для учета конечного пространственного разрешения.

Если ход эллиптичности модели примерно соответствует наблюдаемому в K, то на рисунке для $PA$ бросается в глаза различие между модельным и наблюдаемым профилем на $R > 10''$, там где нет фотометрического бара. В то же время, модельный профиль является почти зеркальным отражением поворотов динамической оси! Такое расхождение "в противофазе" как раз и характерно для баров (см. главу 4). Причем поворот динамической оси по амплитуде даже превосходит поворот по фотометрии. Это говорит о большом контрасте потенциала бара

[4]Результаты NICMOS сильно отличаются и от модели и от изображения, так как центральные изофоты бара снятого с высоким разрешением, вообще говоря заметно не эллиптические. Коэффициент $a_4 \approx -6\%$, это говорит о "ящикообразных изофотах", что дополнительно говорит в пользу бара.

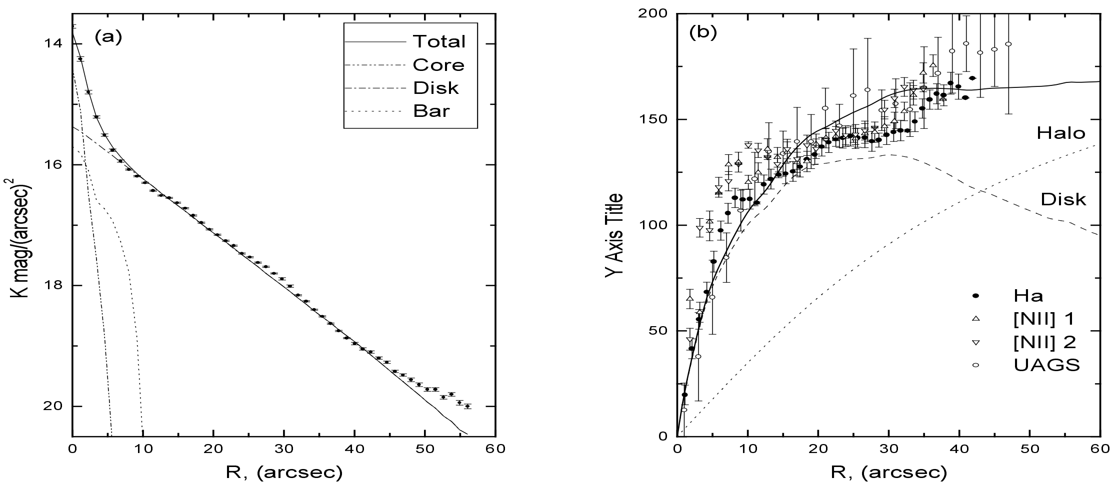


рис.12. (a)– Разложение среднего радиального профиля в K-полосе. (b)–Кривая вращения построенная в разных линиях для $PA = 150^o$, $i = 64^o$. UAGS – данные из ЗМ98 , по наблюдениям Афанасьева и др.(1991). Сплошная линия – модельная кривая. Показано разложение на компоненты

в сравнении с 30% контрастом в гидродинамических моделях, где нет столь сильных поворотов (рис.6 и 7).

Поворот изофот за границей бара связан с двухрукавной спиралью, которая "разворачивает "аппроксимирующие эллипсы. В таком случае, отклонения динамической оси от линии узлов на $10^o$ на $R = 10'' - 35''$ видимо являются результатом возмущения поля скоростей спиралью, но точный ответ может дать только фурье-анализ...

Среднее значение наклона по кинематике в обеих линиях $i = 64^o$, что прекрасно согласуется с оценкой из ЗМ98 и с результатами в K-полосе. Интересно, что данные по $\mathrm{H}_\alpha$ систематически дают несколько меньшее значение, чем [NII] (рис 9(b)). Значения $i = 10^o - 49^o$ для области $R < 9''$ говорят о влиянии радиальных движений в области бара, как было показано в главе 4. Сложный характер некруговых движений хорошо заметен на рис.10, где приведены зависимости между лучевой скоростью и $PA$ для разных расстояний от центра.

Кроме изменения позиционного угла и наклона, заметны и локальные отклонения от средних зависимостей, соответствующих чисто круговым движениям (сплошные линии). Даже для $R = 10''$, где заканчивается фотометрический бар, заметны отклонения от круговой модели на $20 - 40$ км/с вблизи малой оси, где максимален вклад радиальных движений в лучевую скорость. На больших расстояниях $R = 25''$ видно, что экстремумы зависимости $PA(V_r)$ идут не точно через $180^o$ (расхождение между модельным и реальным экстремумами вблизи $PA = 150^o$), что связано с возмущениями, вносимыми двухрукавной спиралью.

Справа на рис.10 приведены примеры изменения лучевых скоростей вдоль разрезов в узких секторах с $\Delta PA = 10^o$, имитирующих наблюдения с длинной щелью. На разрезе вдоль линии узлов видно, что кинематика в линиях $\mathrm{H}_\alpha$ и [NII] в области бара заметно различается – лучевые скорости в [NII] систематически больше (по абсолютному значению) на $20-40$ км/с. Подробнее этот эффект обсудим при рассмотрении поля остаточных скоростей, а пока обратим внимание на разрез с $PA = 25^o - 35^o$, сделанный практически вдоль изовелл в баре (перпендикулярно динамической оси на $R < 5''$). Мощные радиальные потоки газа вдоль бара создают картину кажущегося "противовращения" в области бара.

Судя по карте $(V - I_C)$ (рис.8 (b)), отражающей распределение пыли, юго-западная поло-

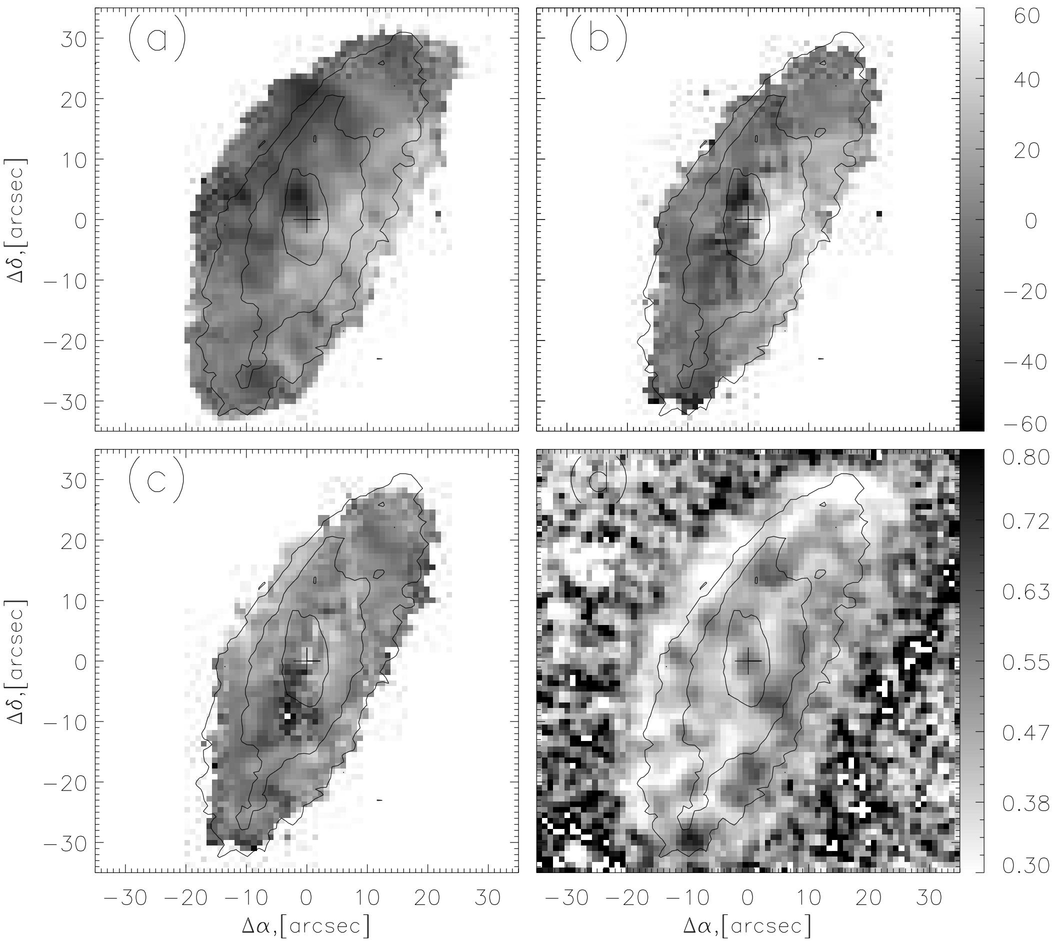


рис.13. Сравнение кинематики в разных линиях. Контуры – изофоты в K на уровнях 16,17 и 18 $^m/\square''$. Остаточные скорости:(a) скорости в $H_\alpha$ минус средняя кривая вращения по $H_\alpha$ , (b) – скорости по $[NII]_1$ минус средняя кривая вращения по $H_\alpha$ . Шкала справа – в км/с относится к (a),(b),(c). (c) – поле скоростей в $[NII]_1$ минус поле в $H_\alpha$ . (d) – карта отношения линий $[NII]_6583/H_\alpha$ , и шкала в абсолютных единицах.

винка диска является ближайшей к нам ( в таком случае и спираль в K является "отстающей"). Так как для этой половинки на разрезе $PA = 25^o - 35^o$ "противовращению" соответствуют скорости $V_r > 0$, т.е. движение от наблюдателя, то это – движения к центру вдоль бара, что и предсказывают модельные эксперименты!

Вообще, определение лучевой скорости по барицентру линии не корректно для самого центра $R < 2 - 3''$. Как видно из рис. 11 профиль линии $H_\alpha$ имеет сложную, скорее всего двухкомпонентную структуру. Низкое спектральное разрешение не позволили проделать корректный гаусс-анализ линий, но исходя из характера газовых течений можно предположить, что один компонент соответствует круговому вращению, а второй – радиальным течениям. Поскольку в самом ядре происходит вспышка звездообразования (RP98) то возможно, что радиальные потоки здесь связаны уже не с самим баром, а с движениями газа "расталкиваемого" сверхновыми[5].

Радиальный профиль яркости в полосе K приведен на рис. 12(a), усреднение проводилось в эллипсах с $PA = 150^o$, $i = 64^o$. В таких же эллипсах усреднялось и изображение каждого из фотометрических компонентов, полученных в результате двумерной декомпозиции. "Суммарный" профиль так же есть результат усреднения полной фотометрической модели. Видно, что

[5]Причем сама вспышка звездообразования может индуцироваться прокачкой газа через бар (Ho et al.,1996 )

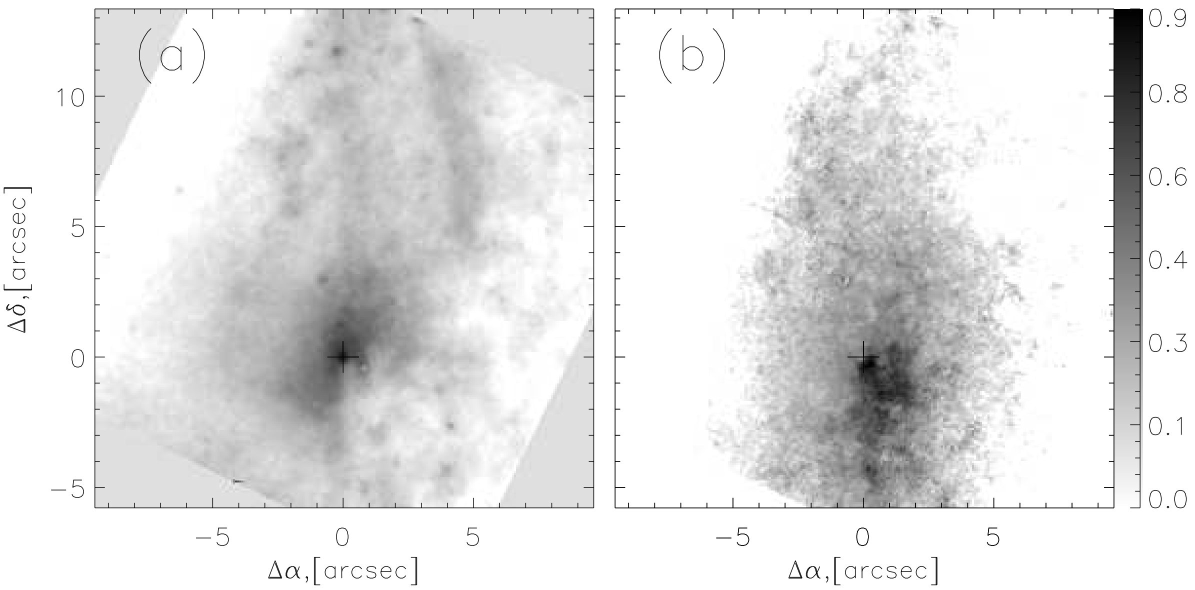


рис.14 Центральная область NGC 972 по наблюдениям на HST/NICMOS. Крестик – фотометрический центр. (a) – изображение в фильтре F110W в логарифмической шкале. (b) – карта показателя цвета (F110W-F160W).

экспоненциальный диск действительно хорошо описывает распределения яркости для $R > 10''$. Шкала диска $12''.2$ на 10% больше значения $10''.2$ из работы Mayya et al.(1998), но эти авторы использовали одномерную декомпозицию. В центре основной вклад дает излучение starburst-ядра, вклад бара в поверхностную яркость составляет около 50% от яркости диска в центре.

Построение модельной кривой вращения проводилось программой GR (автор – А.Н.Бурлак). Модель двухкомпонентная – изотермическое гало и диск с постоянным отношением $M/L$. В качестве распределения плотности в диске мы брали усредненное в эллипсах изображение в K после вычитания ядра и бара. Как уже неоднократно упоминалось, фотометрический балдж отсутствует, введение его в динамическую модель не улучшает ситуации на $R < 101 - 12''$ (рис. 12(b)), где наблюдаемые скорости ( особенно в [NII]) на $30 - 40$ км/с превышают модельные. В этой области усреднение радиальных движений в баре искажает "круговую" скорость, и вообще-то в модели надо учитывать еще и притяжения самого бара, поверхностная плотность которого сравнима с диском на этих расстояниях.

Подтверждается вывод работы ЗМ98 о большом вкладе гало в общую массу, вообще модельная кривая вращения мало отличается от приведенной в этой статье. Даже в области $R < 3.6$ кпк где сосредоточено все звездообразование, масса диска $1.1 \cdot 10^{10} M_{\odot}$, гало – $.9 \cdot 10^{9} M_{\odot}$. Отношение масса-светимость диска при этом $M/L = 0.21$ в полосе K, чему соответствует $M/L = 1.4$ для полосы B.

Из полей скоростей вычиталась средняя кривая вращения, полученная для фиксированной ориентации $PA = 150^{o}$, $i = 64^{o}$, карты остаточных скоростей приведены на рис 13(a) и (b). Средняя кривая кругового вращения строилась по скоростям в $H_{\alpha}$ которые имеют меньший разброс и ближе к модельной кривой (рис.12(b)). На карта остаточных скоростей в $H_{\alpha}$ хорошо выделяются радиальные движения вдоль бара – два пятна, симметричных относительно центра, "красное" пятно на "синей" половинке галактики и "синее" на "красной" половинке. Амплитуда остаточных скоростей здесь $\pm 40 - 50$ км/с, с учетом проекции на луч зрения по формуле (8) для $i = 64^{o}$ и $\phi = 61^{o}$ (результат декомпозиции яркости) получаем $V_R = 50 - 60$ км/с, если радиальные движения направлены вдоль бара.

Интересно, что на карте остаточных скоростей в $H_{\alpha}$ выделяются и некоторые HII-области (номера 0,4,6,15 на рис 8(c)). Причем остаточные скорости здесь отрицательные

$-(15-20)$ км/с, скорее всего мы наблюдаем расширяющиеся газовые оболочки вокруг областей звездообразования. Так как внутренний трехкилопарсековый диск NGC 972 охвачен недавней вспышкой звездообразования (RP98) то повышенное количество молодых и сверхновых звезд "расшвыривают" газ из HII-регионов, а мы видим только приближающуюся часть оболочек, так как удаляющиеся закрыты от нас пылью в области звездообразования.

Эту картину дополняет карта отношения линий $[NII]_{6583}/H_\alpha$ (рис 13.(d)). При ее построении моно-картина в [NII] была сглажена гауссианой $\sigma = 1.0$ пикселя для приведения к одному пространственному разрешению с $H_\alpha$ . Мы откалибровали карту отношений руководствуясь тем фактом что в самом ядре $[NII]_{6583}/H_\alpha = 0.42$ (Ho et al.,1997). В работе RP98 показано, что это отношение линий соответствует ионизации большим количеством молодых О-звезд. Видно, что и все остальные HII-области выделяются такими же значениями $[NII]_{6583}/H_\alpha = 0.5 - 0.7$, а в области N 0 отношение достигает 0.7! Внутренний диск "кипит", весь охваченный звездообразованием! В работе ЗМ98 говориться о возмущении пылевого слоя в этой галактике, что так же может быть следствием общей нестационарности процесса звездообразования.

Особенно интересен гигантский HII-регион N!15, к северу от ядра. Он излучает в $H_\alpha$ даже больше чем ядро и имеет диаметр около 600-700 пк. На карте индекса $Q_{VRI}$ кроме "синей" точки (соответствующей О-звездам в пыли) и совпадающей с уярчением в K(красные сверхгиганты) видна еще и "красная" кромка (мощное излучение в $H_\alpha$ ). А на карте $[NII]/H_\alpha$ вокруг комплекса просматривается подковообразная оболочка.

Любопытно, что остаточные скорости в [NII] заметно отличаются от $H_\alpha$ в области бара (рис 13(b)). Картина более зашумлена, но создается впечатление, что на южной стороне бара, кроме движений к радиусу существуют и движения от центра! Особенно это бросается в глаза на карте разности скоростей $V_{[NII]} - V_{H_a}$ на рис 13(c). На северо-западной и юго-восточной кромках бара лучевые скорости в разных линиях различаются на $\pm(30 - 50)$ км/с, что при усреднении и дает эффект более быстрого вращения в азоте (рис.12). Ниже мы подробнее остановимся на причинах различия кинематики в разных линиях, пока же заметим, интересную деталь. Эти кромки бара – отстающие, в то время как ударная волна (где могут различаться скорости по $H_\alpha$ и по [NII], излучаемой за фронтом ), должна в случае сильного бара быть на лидирующей кромке! Тем более интересно, что классический индикатор ударной волны – пылевая полоса, действительно лежит на лидирующей кромке, правда только на одной – на юго-западной.

Это видно на инфракрасных изображениях, полученных с высоким разрешением на HST (рис 14). Привлекает внимание центральная $\pm 5''$ область бара, причем изофоты явно отличаются от эллипсов, они "ящикообразные" (рис 14(a)), что является еще одним независимым аргументом в пользу того, что в NGC 972 – бар а не наклонный диск. На карте инфракрасного показателя цвета (b) резко выделяется красная пылевая полоса к юго-западу от центра.

Тот факт, что пыль заметна даже в диапазоне $1 - 1.6$мкм, возможно говорит не столько о ее большем общем количестве (данные IRAS показывают, что отношение масс "теплой" пыли и газа нормальное для спиральных галактик, см. ЗМ98), сколько о неоднородности ее распределения, особенно в области ударных фронтов на кромках бара. На изображениях NICMOS разрешается ядрышко NGC 972 с диаметром по FWHM $0''.37$ (40 пк). Такой же размер имеет и точечная область в $3''$от центра, заметная только после вычитания эллиптических изофот. Напомним, что в этом диапазоне 1-2 мкм кроме старого населения большой вклад дают красные сверхгиганты – центры областей недавнего звездообразования (Rix&Rieke,1993)!

Пылевая прожилка уверенно наблюдаемая на HST, выделяется и на данных с телескопа UKIRT. На рис 15.(a) приведены остаточные яркости в K после вычитания только осесимметричных компонентов – ядра и диска. В южной половинке бара заметно резкое уменьшение яркости, связанное с пылевой полосой. Интересна двухрукавная спираль, выходящая из концов бара. Для подробного изучения хода спирали изображение разбивалось на эллиптические

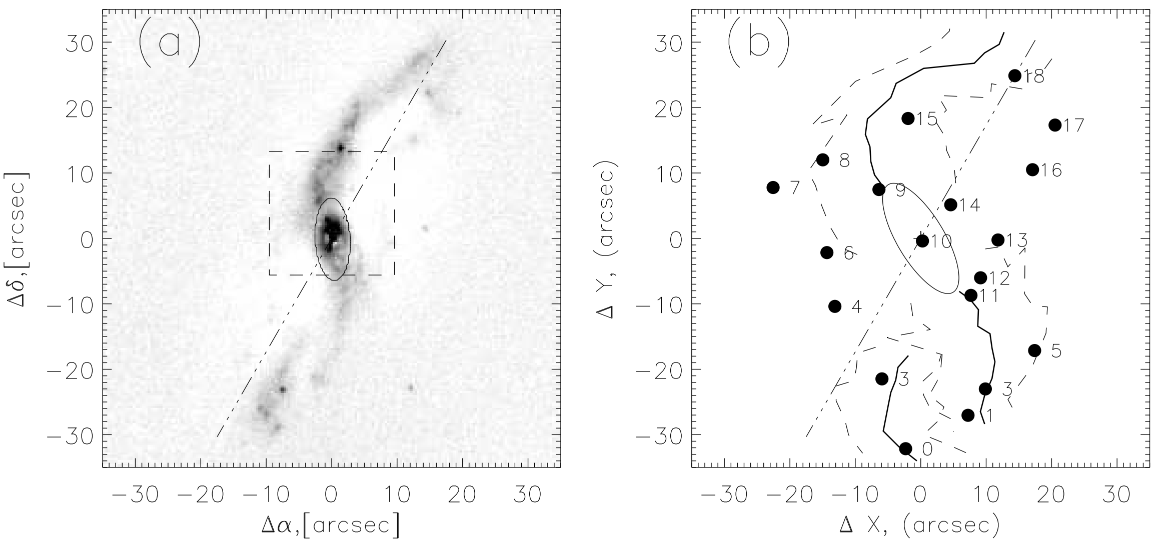


рис.15 Спиральная структура в полосе K. (a) – остаточные яркости после вычитания осесимметричного компонентов (ядро+диск). Эллипсом показаны границы модельного бара, пунктиром выделена область показанная на рис. 14, штрихпунктир – линия узлов $PA = 150^o$. (b) – рисунок в плоскости галактики (положение face-on). Сплошными линиями выделен модельный бар и спирали, пунктиром – границы спиралей по по уровню 50% от центральной яркости . Точки соответствуют HII-областям, нумерация как на рис. 8.

кольца с $PA = 150^o$, $i = 64^o$ шириной $1''$ и с шагом $2''$ в диапазоне $R = 10'' - 34''$. В каждом кольце строилась зависимость интенсивности от азимутального угла в плоскости галактики $\phi$. Вычитался средний уровень яркости между спиралями а в пики яркостей (спирали) вписывались гауссианы с помощью пакета ORIGIN 4, определялись их положение и ширина. Распределение яркости поперек спиралей практически гауссовское, без заметных систематических отклонений. Результат такого анализа – на рис. 15(b).

Здесь, кроме центров яркостей спиралей пунктиром отмечены их границы по FWHM, средняя ширина рукавов $FWHM = 700 \pm 150$ пк, т.е. рукава относительно узкие, хотя основной вклад в этой полосе должны давать старые звезды (но 20-40% светимость в K может приходиться и на молодые сверхгиганты (Rix&Rieke,1993 ). Интересно, что если в южной половине галактики HII-регионы расположены вдоль спирального рукава, то северная ветвь слабо коррелирует с областями звездообразования, которые образуют в плоскости галактики подобие псевдокольца!

На концах бара находятся две области звездообразования N 9 и 11, довольно частое явление для галактик с перемычками (ссылка). RP98 утверждали, что области 11,12,13,14 образуют ядерное "полукольцо", но на рисунке в плоскости галактики (рис 15(b)) оно почти не выделяется. Авторы позже предположили (Mayya et.al,1998 ), что это кольцо находиться не в плоскости галактики и возможно является остатком упавшего спутника! Однако мы видели что лучевые скорости здесь мало отличаются от круговых в плоскости галактики!

Спираль в диске практически симметрична относительно бара до $R = 25 - 30''$ где раздваивается южный рукав, но при этом форма ее сильно отличается от классической логарифмической волны плотности. Малая ширина спирали, ее странная форма заставляют задуматься над вопросом о том, является ли такая спираль стационарной волной, или же это сильно нелинейное образование, отражающее общую нестационарность процессов идущих в диске NGC 972 – галактики с противоречивой структурой, морфологией и динамикой?

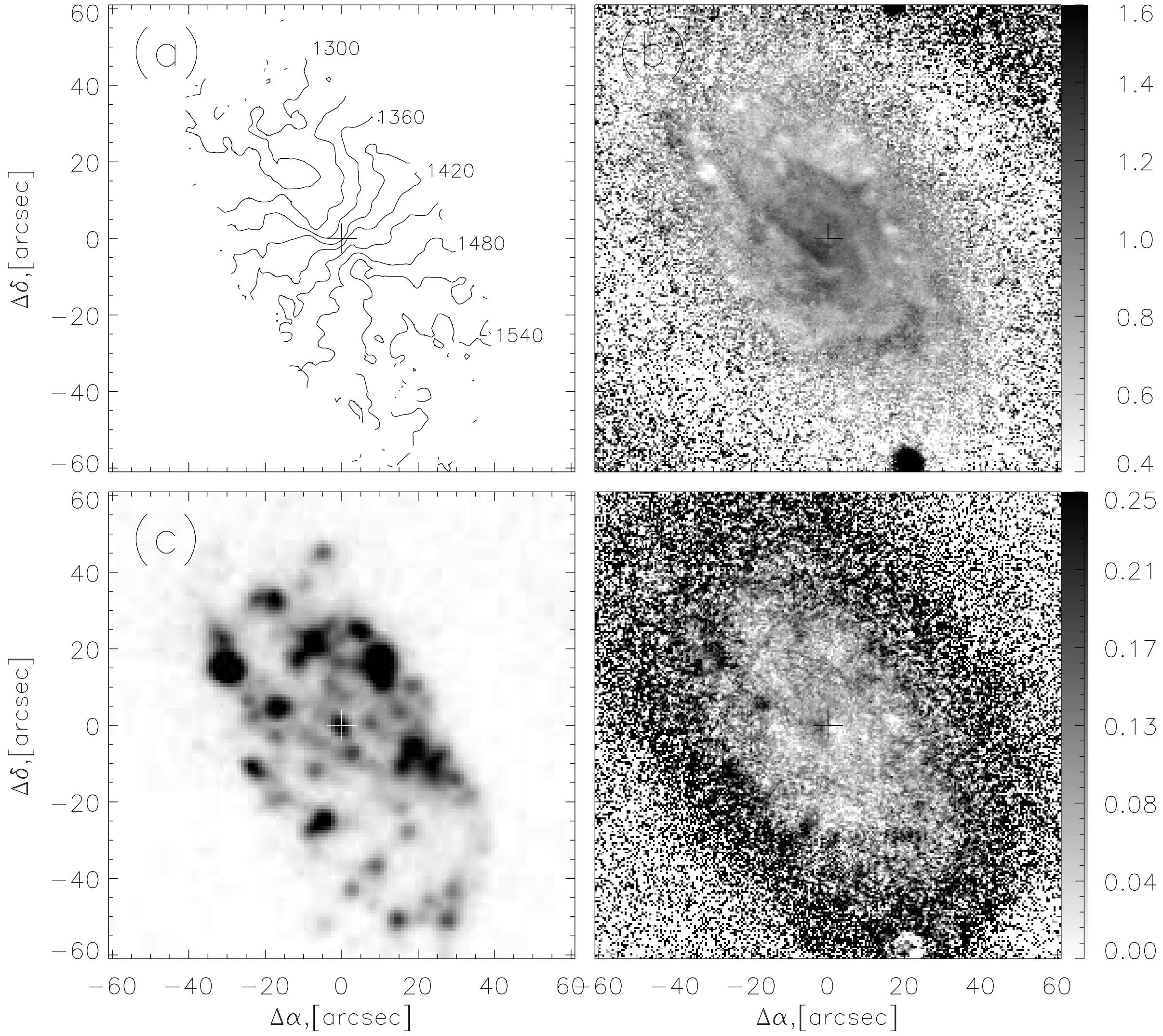


рис.16 Результаты по NGC 1084, крестиком отмечен фотометрический центр :(a) – изовелы поля скоростей в линии $H_\alpha$ ;(b) – распределение показателя цвета $(V - R_C)_O$ ;(c) – изображение в линии $H_\alpha$ ; (d) – распределение по диску $Q_{VRI}$ -параметра

## 5.2 NGC 1084

При наблюдениях с Фабри-Перо в 1995 г. в рабочий спектральный диапазон кроме линии $H_\alpha$ попала и линия $[NII]_{6583}$ из соседнего порядка. Часто это мешает наблюдениям, но в конкретном случае удалось сделать ряд выводов о различии кинематики в разных линиях вблизи "отрога", о сложной структуре ударных волн вокруг областей звездообразования (Zasov&Moiseev,1998;Moiseev et al).

В области "отрога" интенсивность [NII], часто превосходит $H_\alpha$ , что сбивает работу алгоритма построения поля скоростей. Чтобы обойти эту неприятность, по среднему полю скоростей в каждом пикселе строились "спектральные маски", выделяющие области вокруг каждой из эмиссионных линий. Построенное таким образом поле скоростей и моно-изображение в $H_\alpha$ приведено на рис.16 (a),(c). Линия [NII] на "красной" половинке галактики попадает в крыло порядкоразделительного фильтра, что делает неуверенным определение скоростей в [NII] вдали от "отрога". Новые наблюдения в линии [NII] подтвердили наличие предсказанных особенностей, но поскольку они относятся к периферии галактики и прямо несвязаны с темой

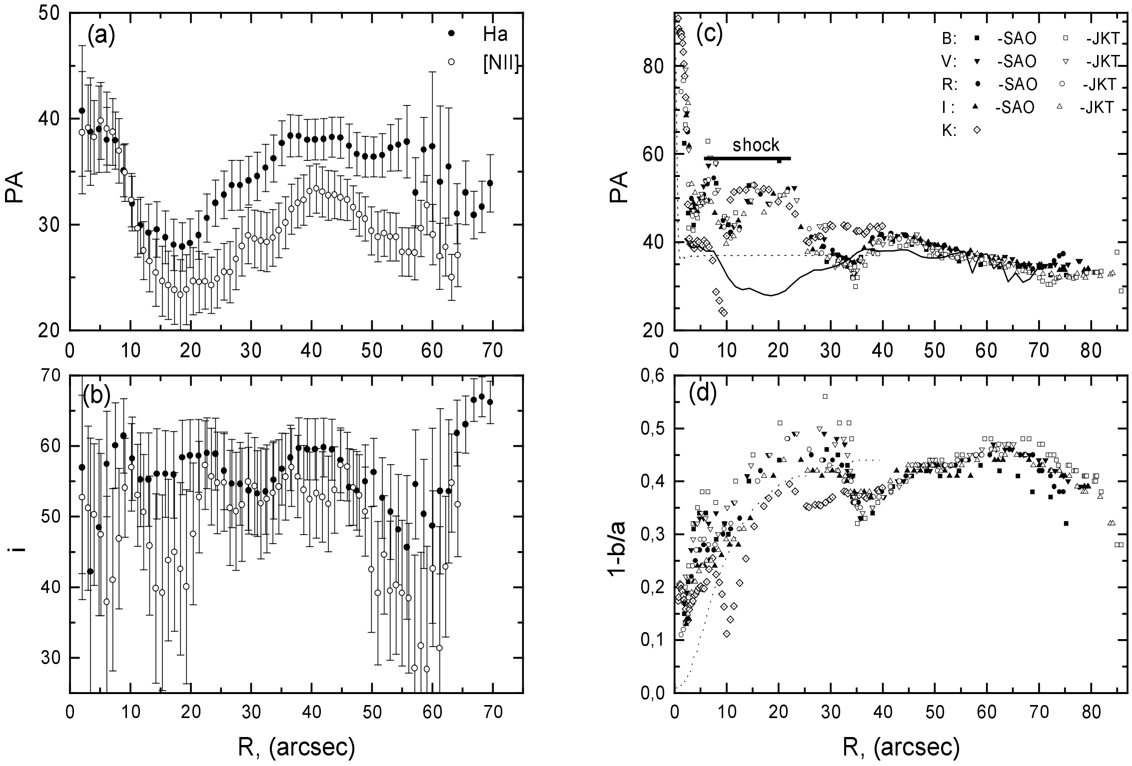


рис.17 Радиальные зависимости параметров ориентации NGC 1084. (a)– позиционный угол динамической оси по разным наблюдениям.(b)– наклон диска. Анализ эллиптических изофот по BV$R_C I_C$K- наблюдениям. Пунктирная линия соответствует изофотам двумерной модели изображения в K: (c)– позиционный угол, сплошной линией показана динамическая ось по полю в $H_\alpha$ . Жирным отрезком показано положение северной половинки ударного фронта в поле скоростей. (d) – эллиптичность изофот.

диплома, то мы их рассматривать здесь не будем ( к большому сожалению для автора).

Поле скоростей на рис.16(a) не так сильно искажено как в NGC 972, но заметны небольшие повороты и "сжатие изовелл в пучки" на $R < 10'' - 20''$. Анализ поля в "наклонных кольцах" показывает следующее (рис.17(a),(b)). До расстояния $7'' PA$ практически постоянный и в каждой из линий равен примерно $39^o$, затем резкий поворот, причем в [NII] достигается значение $PA = 23^o$, но в $H_\alpha$ только $28^o$. И далее положение динамической оси в линии [NII] систематически на $4^o - 6^o$ отличается от $H_\alpha$ , даже обратного поворота на $R = 35'' - 40''$. И только на расстояниях больше $55''$обе оценки динамической оси совпадают в пределах ошибок около $PA = 33^o - 35^o$. Такое расхождение оценок в разных линиях удивительно, так как точность поворота между полями скоростей около $0^o.5$, HII- области в $H_\alpha$ и [NII] хорошо совпадают! Несколько различаются и оценки наклона $i$, но в пределах ошибок они лежат вблизи среднего значения в $H_\alpha$ $i = 57^o \pm 0.^o5$.

Интересно ведет себя и фотометрическая ось на рис.17 (c). Резкий поворот более чем на $40^o$ внутри $R < 5''$ кажется малозначимым, если бы не тот факт, что в свободной от пыли полосе K эллиптичность не падает до 0 а равна примерно 0.2! Однако, надо честно признаться, что наблюдения в K были довольно неудачными, сигнал значительно более слабый, чем в случае NGC 972, уверенная эмиссия видна только для $R < 40''$. К тому же это изображение не гидировалось и "эллиптическое ядро" в самом центре скорее всего есть следствие плохого

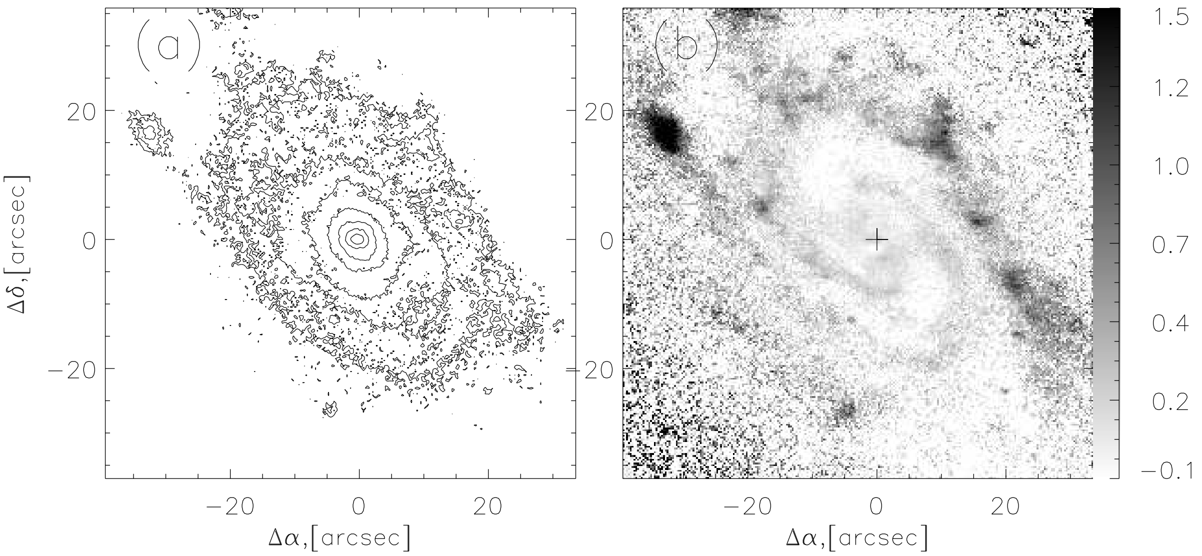


рис.18 Морфология NGC 1084 в полосе К. (a) – изофоты изображения в полосе К. Контуры проведены с шагом $0.5^m/\Box''$ , центральная изофота – $14.5^m/\Box''$ . (b) – остаточные яркости в зв.вел., результат вычитания изображения из двумерной модели (в единицах зв.вел.). Шкала – справа, темные области соответствуют превышениям яркости над моделью. Крестиком отмечен фотометрический центр

гидирования. Уверенно можно говорить, только о пике эллиптичности в К на $R = 5 - 10''$.

Разброс точек на рис 17(c),(d) дает представление о реальной ошибки оценки параметров, вносимой влиянием пыли в разных полосах. В таком случае на $R \approx 5'' - 22''$ для $PA$ фотометрической оси около $50^o$, и только на больших расстояниях происходит поворот к линии узлов. Для $R > 60''$ мы оценили угол линии узлов как $PA_0 = 34^o \pm 1^o$ по совокупности кинематических и фотометрических данных. Видно, что на $R \approx 10'' - 28''$ повороты фотометрической и динамической осей идут точно в противофазе, причем на этих расстояниях просматривается и слабый пик эллиптичности. Все это может говорит о наличии бара, который однако невиден на прямых оптических снимках (см рис.1 и работу Zasov&Moiseev,1998), что видимо связано со сложным распределением пыли и областей звездообразования в центре.

Однако и в "свободной от пыли " полосе К крупномасштабного бара не видно, хотя как сказано выше, фотометрия в К оставляет желать лучшего ( рис.18(a)). Для двумерной декомпозиции яркости использовалась простая осесимметричная модель: Кинговский балдж, диск и ядро, вклад которого незначителен. Остатки яркости от модели приведены на рис.18(b). Интересно, что если в оптических полосах B,V,$R_C$ ,$I_C$ они имеют трехрукавную структуру (Moiseev. et.al), то в К морфология остатков скорее двухрукавная, причем в центральных 10-12$''$намек на малоконтрастную перемычку с $PA = 45^o - 50^o$! О существовании отклонений от осесимметричной модели говорят и результаты изофотного анализа модели (пунктир на рис.17(c) и (d)). Модельные $PA$ и $e$ систематически отличаются от наблюдаемых, в симметричной модели нет ни поворота изофот, ни резкого пика эллиптичности, наблюдаемого в К на $R = 5'' - 10''$.

Азимутально усредненный профиль диска в К, заметно отличается от экспоненциального $m_{OD} = 16^m.4$ и $r_0 = 17''$ (рис 19(a)), полученного в результате двумерной декомпозиции. Этот факт находиться в согласии с оптической фотометрией. На профилях V,R,I только для $R > 50''$ видна чистая экспонента, на меньших расстояниях профиль довольно сложен, включает "линзу" и возможную центральную депрессию диска (Moiseev et.al). Что бы получить профиль яркости диска в К мы вычитали из изображения двумерную модель балджа, а остаток приписали диску. Полученный профиль экстраполировался до $R_{25}$ и использовался при анализе кривой вращения на рис 19(b).

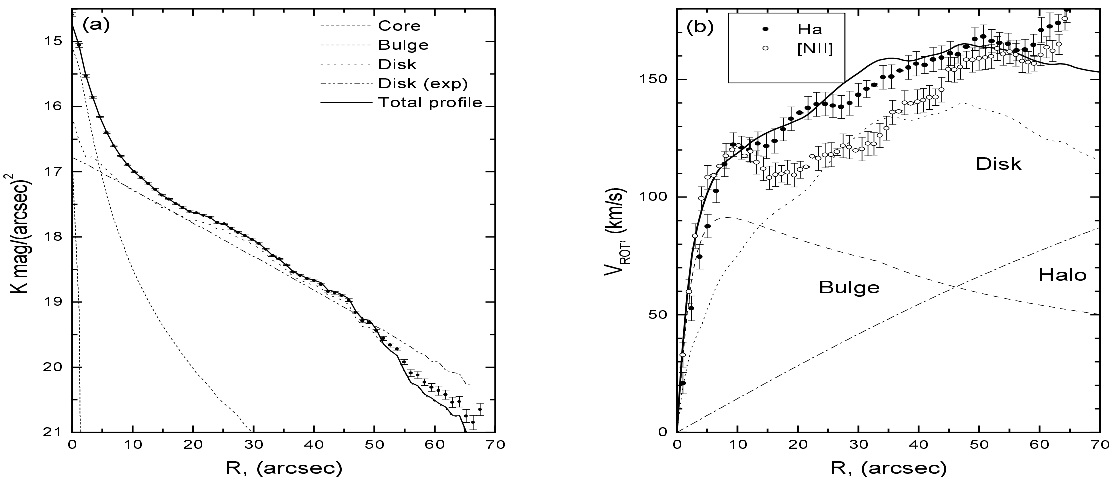


рис.19 (a)– Разложение среднего радиального профиля в K-полосе на компоненты. Disk(exp) – экспоненциальный диск, Disk – "реальный" диск, результат вычитания из изображения моделей бара и ядра. (b)–Кривая вращения построенная в разных линиях, $PA = 34^o$, $i = 57^o$. Сплошная линия – модельная кривая. Показано разложение на компоненты

Поражает различие между средними кривыми вращения в разных линиях. В области $R = 15'' - 40''$ скорости определенные по [NII] систематически на $15 - 20$ км/с меньше, чем по $H_\alpha$ . Если взглянуть на старые данные с UAGS (Афанасьев и др.,1988a), то несмотря на более низкую точность, здесь так же заметно различие в скоростях по $H_\alpha$ и [NII]. Подобное поведение видимо связано с усилением [NII] за фронтом ударной волны, о которой сказано ниже, однако поражает крупномасштабность отклонений. Поэтому, модельная кривая вращения строилась только по $H_\alpha$ и состоит из Кинговского балджа, диска с $M/L = 0.4$ (в K ) и гало, относительная масса которого составляет 54% от полной внутри $R_{25}$. Вклад может быть и меньше, если отношение $M/L$ растет с радиусом, что часто и наблюдается. Во всяком случае для балджа $M/L$ растет, так как его шкала в K $1''.6$, а по кинематике – $2''.8$. Полная масса галактики в пределах $R_{25}$ составляет $4.2 \cdot 10^{10}\ M_\odot$.

Некоторые особенности кинематики проясняются после рассмотрения профиля линий $H_\alpha$ и [NII] в данных 1995 г., где спектральное разрешение раза в 3 лучше чем в 1998 г. На $R < 5'' - 6''$ профили каждой линии допускают разложение на две гауссианы, разности скоростей компонентов в каждой линии совпадают с точностью до ошибок аппроксимации. Назовем более интенсивный компонент "основным", а более слабый – "некруговым". В модели кругового вращения центральный градиент наблюдаемой лучевой скорости $dV_r/dR$ зависит от $PA$ по косинусоидальному закону. Анализ показывает (Moiseev et al.), что основной компонент (в обеих линиях) следует этой зависимости, причем позиционный угол динамической оси составляет $PA = 23^o - 25^o$, и близок к линии узлов.

Второй, более слабый компонент не может быть уверенно аппроксимирован косинусоидой, кроме того, экстремумы его сдвинуты относительно линии узлов на $\sim 70^o$ ,и на линии узлов $dV_r/dR \approx 0$. Это говорит о том, что некруговой компонент линий соответствует **радиальным движениям** ионизованного газа.

Кроме поля скоростей построенного по барицентру линии $H_\alpha$ , мы сделали поле скоростей, определенных только по трем самым ярким каналам в линии, т.е. практически по максимуму интенсивности. Это позволяет делать более заметными изменения скоростей в случае

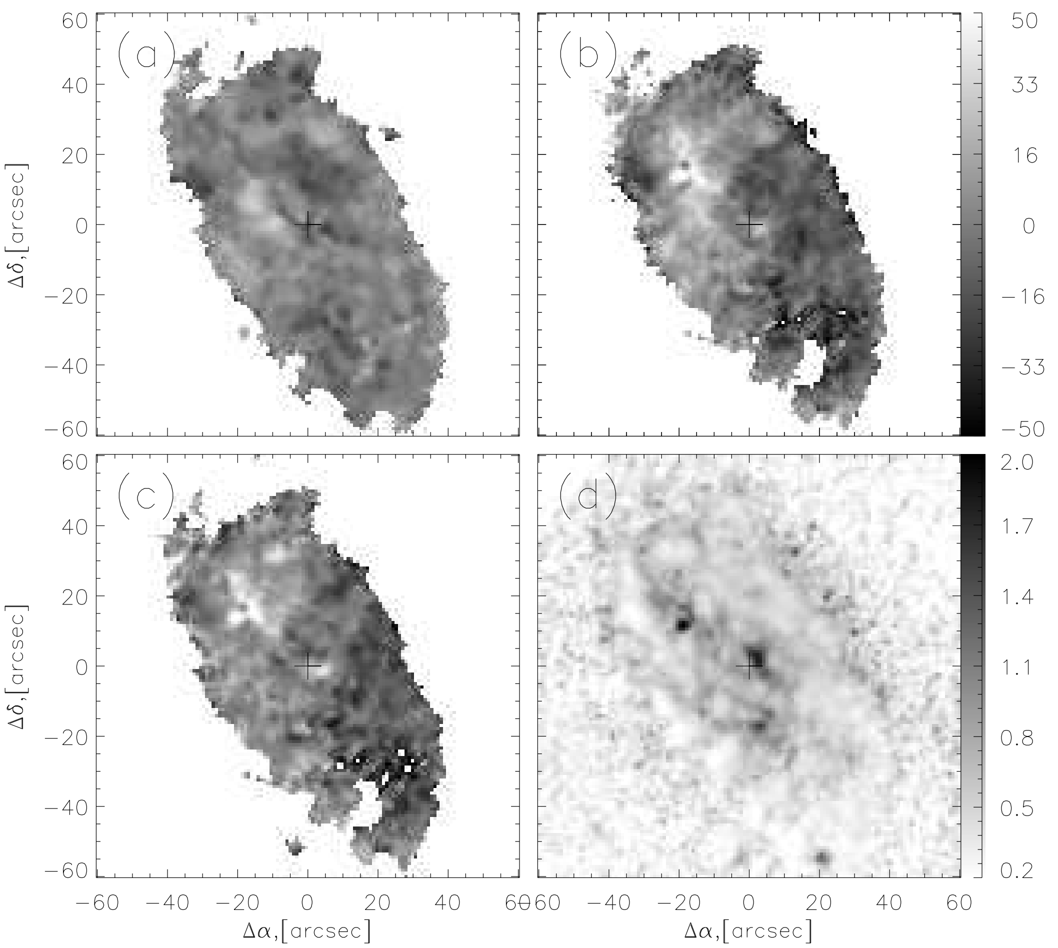


рис.20 Сравнение кинематики в разных линиях для NGC1084. Остаточные скорости:(a) скорости в $H_\alpha$ (по максимуму линии) минус средняя кривая вращения по $H_\alpha$ , (b) – скорости по $[NII]_1$ минус средняя кривая вращения по $H_\alpha$ . Шкала справа – в км/с относится к (a),(b),(c). (c) – поле скоростей в $[NII]_1$ минус сглаженное поле в $H_\alpha$ . (d) – карта отношения линий $[NII]_{6583}/H_\alpha$ , абсолютные единицы.

многокомпонентного профиля, так как отслеживается только "основной" компонент. Карта остаточных скоростей построенная таким образом приведена на рис. 21 (a).

Локальные отклонения с амплитудой остаточных скоростей $\pm(20-30)$ км/с ( при дисперсии скоростей pixel-to-pixel 10 km/s) видимо связаны с торможением газа в спиральных рукавах, однако вблизи центра вращения картина более сложная и интересная. В направлении $PA \approx 60^o$ ( т.е.$\approx$ $30^o$ от линии узлов ) через центр тянется линия наиболее заметных отклонений от среднего вращения. Остаточные скорости по разные стороны от этой границы составляют $\pm(40-50)$ км/с, но наиболее впечатляют масштабы изменения скорости - на протяжении $\sim 3-5''$ перпендикулярно границе скорость меняется на $(80-100)$ км/с! И вновь рассмотрение профилей линий проясняет ситуацию.

Каждая из линий раскладывается на две гауссианы, при перемещении перпендикулярно границы "удара" ( ибо мы, очевидно имеем дело с ударным фронтом), один из компонентов усиливается, а другой- ослабляется. Расстояние между компонентами меняется мало, поэтому разность скоростей между наиболее яркими компонентами в каждой точке так сильно меняется при пересечении фронта.

Мы снова встречаемся с двумя динамическими подсистемами, при этом "разрыв" скорости на фронте ударной волны оказался сглаженным из-за конечного пространственного разреше-

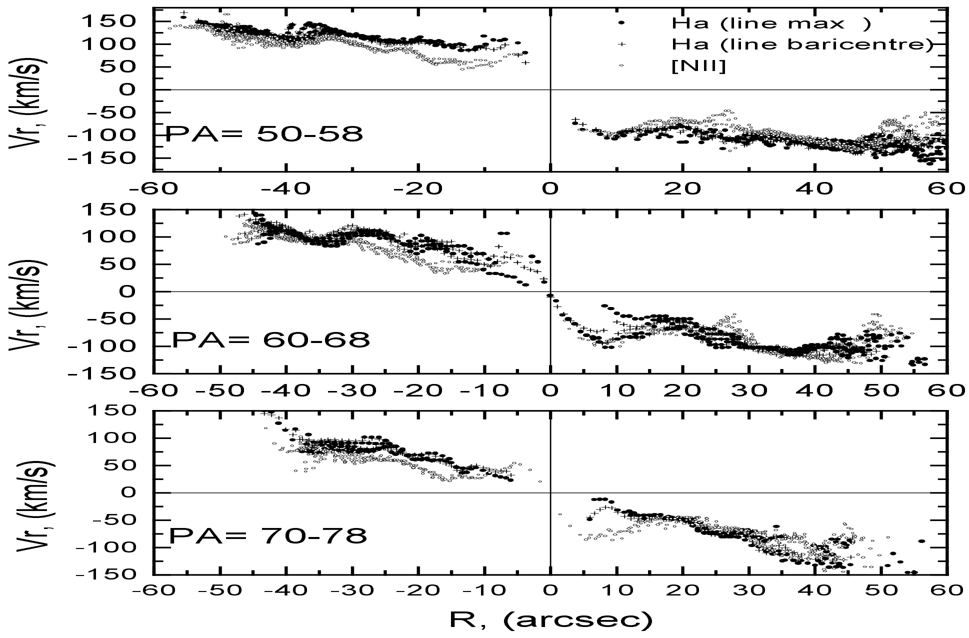


рис.21 Примеры лучевых скоростей вдоль узких разрезов (аналог наблюдений с длинной щелью) вблизи ударной кромки NGC 1084. Данные по $H_\alpha$ представлены в двух вариантах: скорости определенные по трем самым ярким каналам и по барицентру всей линии.

ния, поэтому относительные интенсивности компонент в действительности должны различаться сильнее.

На рис.20 приведены примеры узких разрезов по полю скоростей через динамический центр вблизи границы ударного фронта. На разрезе проходящем через саму ударную кромку $PA = 60^o - 68^o$ видны обе подсистемы ионизованного газа для скоростей построенных по максимуму в $H_\alpha$ . Уменьшение скорости связано с торможением газ за фронтом ударной волны. Скорости определенные по данным с худшим пространственным разрешением совпадают со скоростями соответствующими "основному" (круговому) компоненту. Ближе к линии узлов $PA = 50^o - 58^o$ только этот компонент и наблюдается. На разрезе проходящем ближе к малой оси ($PA = 70^o - 78^o$) в $H_\alpha$ виден протяженный твердотельный участок – замедлившийся газ за кромкой, а в лучевые скоростях по [NII] возможно значительный вклад вносит радиальная компонента скорости. Но ориентация галактики такова ( если спиральные ветви – отстающие), что это радиальные потоки **от центра**, а не к центру, как в случае NGC 972.

Вообще, карта разности скоростей в линиях [NII] и $H_\alpha$ еще более загадочна, чем для NGC 972! Что бы избежать ошибок, связанных со сложной структурой профиля линий, в $H_\alpha$ искусственно загрублялось спектральное разрешение. Но все равно, глобальные отличия скоростей на рис. 20(c) бросаются в глаза. "Красное" пятно в $5''$к западу от ядра как раз и соответствует "радиальным потокам в азоте". Многие локальные отличия в скоростях на $\pm(15 - 20)$ км/с, видимо связаны с мощным спиральным рукавом на северо-востоке, т.е. с замедлением вращения газа в запрещенных линиях, связанным с ударной волне на внутренней стороне рукава. В северо-западной половинке диска на $R > 20'' - 30''$ виден ряд областей с замедлением скоростей в [NII] на $30 - 50$ км/с,расположенных **между** HII-областями "отрога" и спиральным рукавом. Этот результат совпадает с предварительными выводами (Moiseev et.al) о сложной кинематике газа в области "отрога".

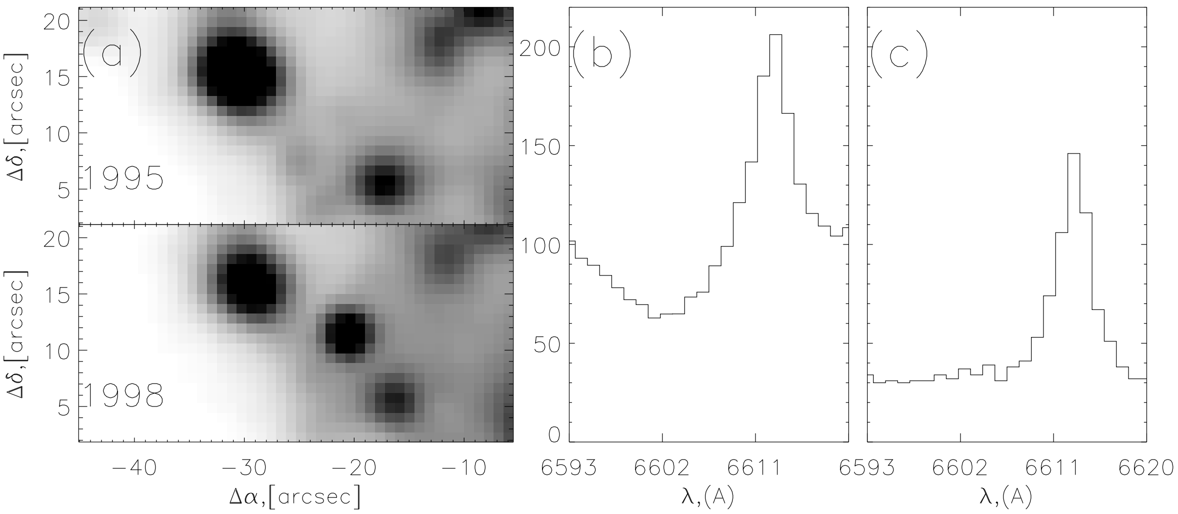


рис.22 Сверхновая SN1998dl. (a) вверху – сумма каналов в кубе наблюдений 1995 г., внизу – то же для наблюдений 1998 г. где видна сверхновая. Координаты – относительно центра.(b) – суммарный спектр сверхновой+галактика. (c) – пример спектра галактики рядом со сверхновой.

Сложная кинематика дополняется и нетривиальным распределением отношения $[\mathrm{NII}]_{6583}/H_\alpha$ по диску[6] на рис. 20(d). Интересна "ячеистая структура" вокруг многих HII-областей, особенно в районе "отрога" – относительное увеличение светимости в запрещенной линии азота сопровождаемое сильными некруговыми движениями в этой линии, что видимо говорит о сложной структуре фронтов ударных волн вокруг областей звездообразования. Поскольку подобная же картина наблюдается и для отношении $[\mathrm{NII}]/\mathrm{H}_\alpha$ построенного по наблюдениям 1995 г. (после описанного в начале главы "разделения" эмиссионных линий), то "ячеистая структура" на рис. 20(d) действительно существует, а не является артефактом, из-за возможного недоучета пространственного разрешения.

К западу от центра на $R = 5 - 15''$ видна вытянутая деталь с $[NII]/H_\alpha > 1$. Она совпадает с юго-западной половинкой ударного фронта, а самый максимум отношения $[NII]/H_\alpha \approx 2$ практически приходиться на область радиальных движений в [NII]. Вблизи наиболее контрастной северо-восточной ударной кромки максимум яркости в [NII] не столь хорошо выражен, но некоторая структура видна.

Как можно интерпретировать весь комплекс наблюдаемых структур в центре NGC 1084? Резкий поворот изофот (на $\approx 45^circ$) в самом центре галактики ($R < 5'' - 8''$) допускает неоднозначную трактовку. Поворот может свидетельствовать о существовании минибара на этих масштабах. Однако, как следует из нашего разложения кривой вращения, на этих расстояниях значительна относительная масса принадлежит сферическому компоненту. Резкое уменьшение эллиптичности до 0, наблюдаемое на этих расстояниях так же говорит о большой роли сферического компонента и в фотометрии, что вообще говоря, видно и из разложения профилей поверхностной яркости. В таком случае изменение PA логично связать с трехосным балджем. Фотометрическое разделение вкладов трехосного балджа, диска и минибара оказывается очень неоднозначным и представляется чрезвычайно затруднительным.

На помощь приходят кинематические данные. В центральном регионе ($R < 5'' - 7''$) гаусс-анализ профилей линий указывает на наличие 2-х газовых подсистем. Характерно, что динамическая ось более интенсивного, основного компонента близка к ориентацией линии узлов,

[6]Для калибровки отношений линий использовались неопубликованные наблюдения области "отрога" на БТА со спектрографом UAGS в 1997 г., обработанные автором. В сверхассоциации в основании "отрога" $[\mathrm{NII}]_{6583}/H_\alpha = 0.26$.

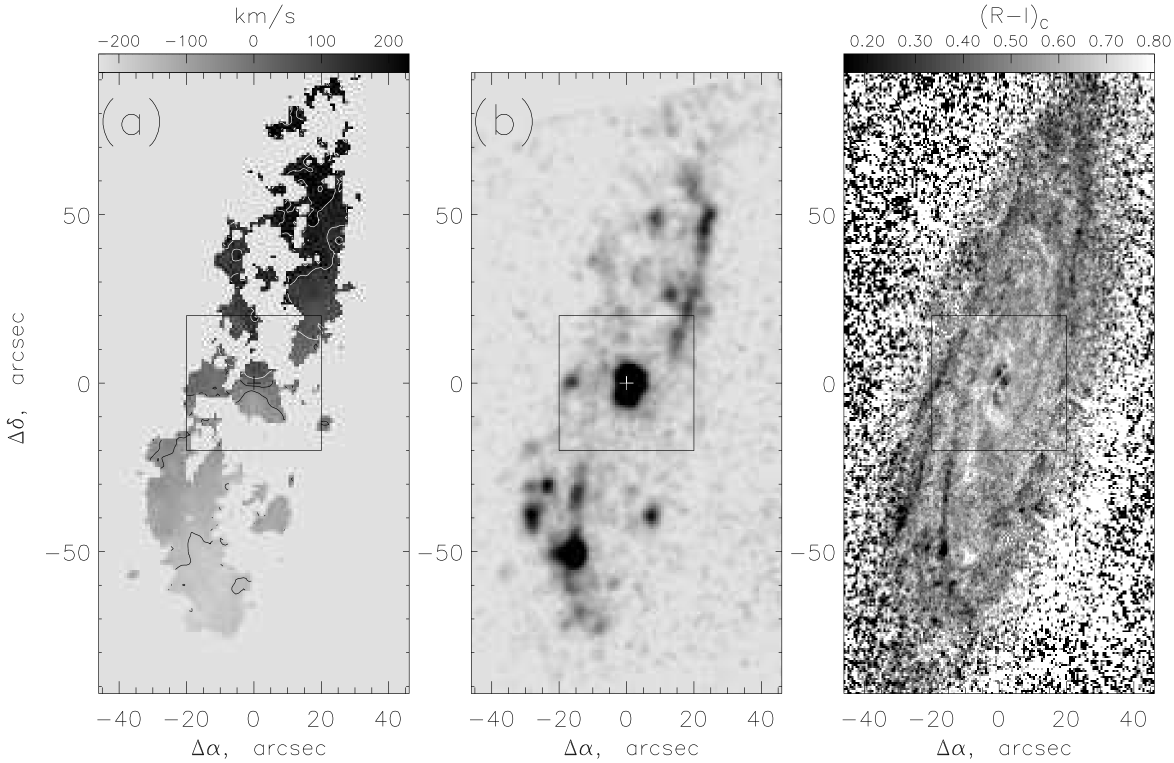


рис.23 Результаты по NGC 4100. Крестик показывает положение динамического центра, квадрат выделяет центральную область, в увеличенном виде показанную на рис.25. (a) – поле скоростей в линии $H_\alpha$ , изовелы, соответствуют скоростям $0, \pm 50, \pm 100, \pm 150, \pm 200$ км/с относительно системной скорости.(b) – изображение в линии $H_\alpha$ . (c) – карта показателя цвета $(R-I)_C$.

отклоняется от нее менее чем на $8^o$ , в то время как по судя по фотометрии поворот значительно больше. Видимо контраст триаксиальной структуры в центральных 5" действительно невелик, что подтверждается и наблюдениями в K-полосе и ее правильнее назвать "трехосным балджем". Второй же компонент, вообще говоря, указывает не на поворот динамической оси ( так как систематически отклоняется от косинусоиды), а на радиальные движения. Они, видимо, являются следствием более мощных радиальных движений на кромке ударной волны.

Если спиральные ветви – отстающие, то галактика вращается в сторону увеличения PA, в таком случае ударная волна на $PA \approx 60^o \pm 5^o$ лежит на лидирующей кромке фотометрического бара ("балджа" ?)размером $R = 20{-}25''$ (см. рис. 17(c) ). На самой кромке имеют место сильные некруговые движения (рис.21), сопровождаемые усилением свечения в запрещенных линиях на ударных фронтах (рис. 17(c) ). Поэтому медленное вращение перед кромкой (рис.21) может интерпретироваться как замедления газа за фронтом ударной волны ( так как бар вращается медленнее и газ диска "догоняет его" втекая в бар с внутренней стороны.

Картина несколько противоречивая, получается, что на низкоконтрастном ( но крупномасштабном! ) баре ударная волна оказывается достаточно сильной, что бы ударный фронт сместился на лидирующую кромку бара. Но в главе 4.2 мы видели, что даже 30% контраст потенциала хватает, что бы удар был на лидирующей кромке. К сожалению отношение сигнал/шум на нашем K-изображении слишком мало для каких-либо заключений о контрасте потенциала бара.

На карте $[NII]/H_\alpha > 1$ интересна "яркая" точка в $20''$ к западу от центра. Это сверхно-

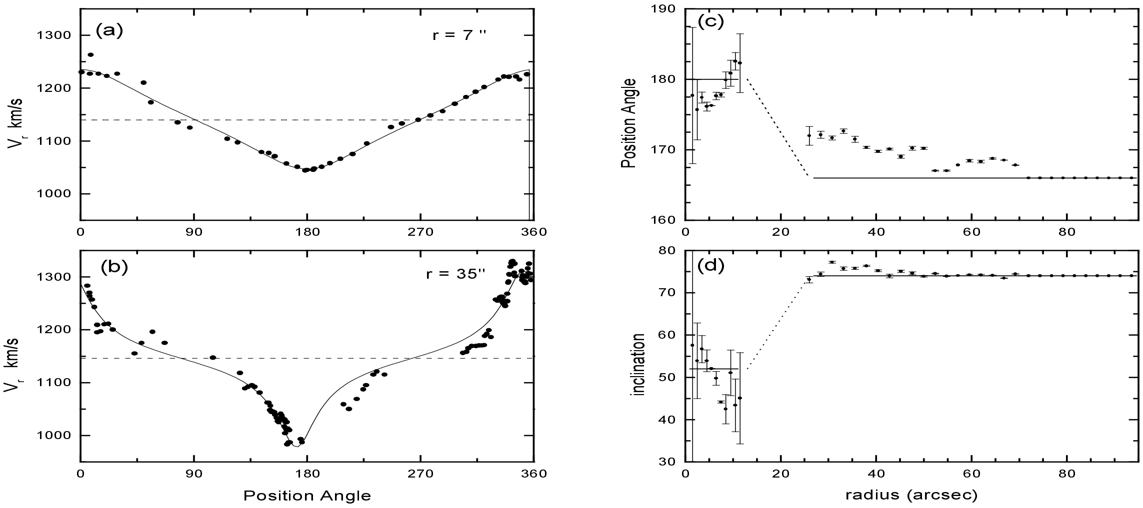


рис. 24 Анализ поля скоростей NGC 4100. Зависимости лучевой скорости от позиционного угла для различных расстояний от динамического центра: (a) – для $r = (7 \pm 0.5)''$ (область внутреннего наклонного диска), (b) – для $r = (35 \pm 1)''$ (основной диск). (c) – изменение позиционного угла динамической оси, (d) – изменение наклона газового диска. Сплошные линии показывают значения средних параметров ориентации использовавшихся для фиксации границ эллиптических колец в которых производился анализ. Пунктирная линия соответствует "переходной области" между центральным и основным диском.

вая SN1998dl. Открыта она была всего за 10 дней до наблюдений на БТА, а сама вспышка произошла не позднее 2-го августа 1998 г.(King et al.,1998). На рис 22(a). приведены изображения окрестности сверхновой по наблюдениям на БТА в 1995 и 1998 годах. Таким образом, по чистой случайности, удалось получить спектр сверхновой вблизи линии $[\mathrm{NII}]_{6583}$ с высоким спектральным разрешением (рис 22 (b)).

Наблюдаемый спектр несколько напоминает профиль типа P Cyg, однако ширины линий раз в 10 уже, чем обычно наблюдаемые в SN. Сравнение со спектром областей рядом со сверхновой (c) показало, что эмиссионный компонент профиля – целиком является "родной" эмиссией [NII] диска и HII-областей галактики. А кажущаяся "абсорбция" (как показало сравнение с имеющимися спектрами других сверхновых 2-го типа) является на самом деле красным крылом широкой эмиссионной линии $\mathrm{H}_\alpha$ . Интересно, что это уже третья сверхновая которая наблюдается в этой галактике, причем как и SN1996an – это SNII(Fillippenko,1998), т.е. связанная с молодыми звездами. Обе сверхновые II типа вспыхнули в северном спиральном рукаве, вблизи "отрога". Столь активное современное звездообразование (хотя две SN – это еще не статистика !) вновь напоминает о сложной структуре ударных фронтов в диске NGC 1084, возможно порожденных другими сверхновыми.

## 5.3 "NGC 4100

Поле скоростей, приведено на рис 23.(a), где скорости даны относительно системной скорости центра 1130 км/с. На рис. 23 (b) приведено изображение галактики в эмиссионной линии $\mathrm{H}_\alpha$ . К сожалению, в поле скоростей присутствуют значительные "дыры" где линия теряется в шумах. Эмиссия в основном наблюдается в центральном диске с радиусом около $10''$ и в наиболее ярких частях спиральных рукавов. Однако, количество точек в поле вполне достаточно для последующего анализа. При построении распределения цвета по диску, изображение $\mathrm{I}_C$ с JKT

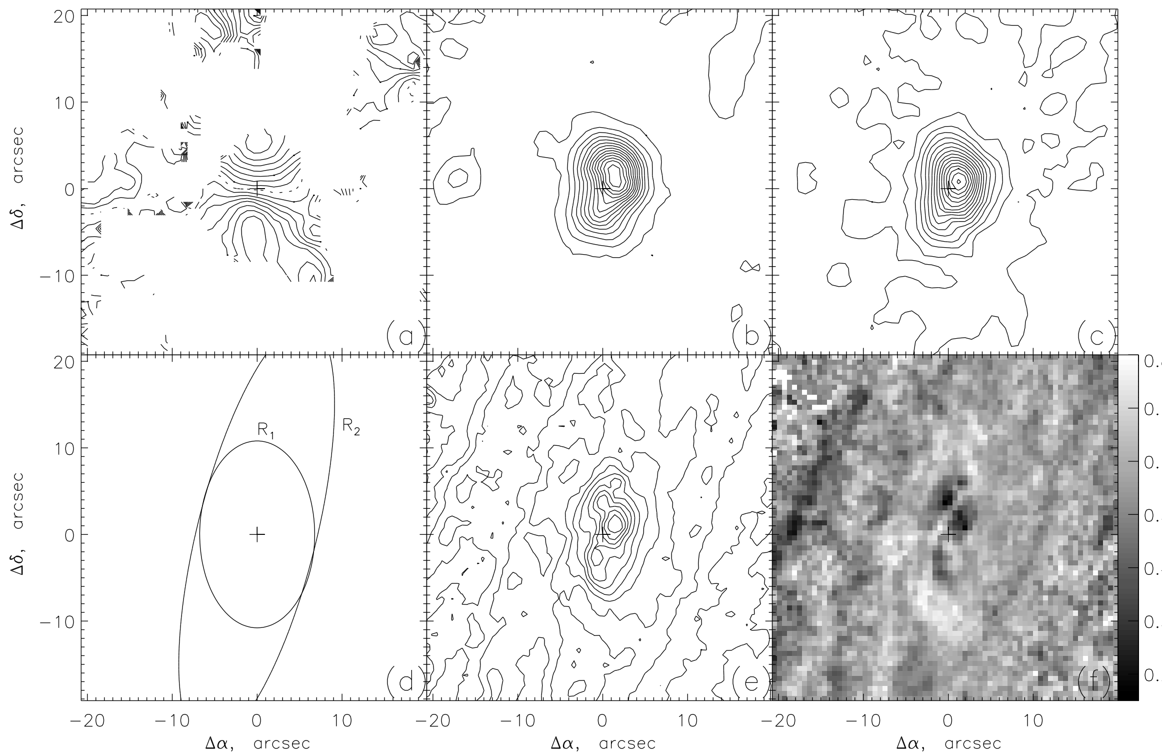


рис.25 Центральная область NGC 4100, крестик везде отмечает положение динамического центра. (a) – поле скоростей ионизованного газа. Изовелы проведены через 12 км/с, пунктиром отмечена "нулевая скорость". (b) – Изофоты изображения в линии $H_\alpha$ . (c) – Изофоты изображения в континууме вблизи $H_\alpha$ . (d) – Взаимная ориентация дисков. Внутреннее кольцо радиусом ($R_1 = 11''$) с $i = 52^o$ и $PA = 180^o$ соответствует внешней границе наклонного диска. Внешнее кольцо с ($R_2 = 25''$), $i = 74^o$ и $PA = 166^o$ – соответствует внутренней границе основного диска. Между $R_1$ и $R_2$ заключена "переходная область". (e) - изофоты изображения в полосе $R_C$ (INT). Шаг изофот – $0.3^m/\Box''$ , центральная изофота соответствует уроню $17.4^m/\Box''$ (f) – карта показателя цвета $(R-I)_C$.

приводилось к тому же размеру пикселя, что и на INT, после чего строилась карта показателя цвета $(R-I)_C$, изображенная на рис.23(c)

Картина содержит удивительно резкие чередующиеся между собой "синие" и "красные" спиралевидные полосы. Если "синие" полосы соответствуют спиральным рукавам галактики, то "красные" – это межспиральные промежутки с пылевыми полосами. В наиболее контрастных областях узора показатель цвета меняется от 0.2 для ветвей до 0.7 между спиралями.

В случае с NGC 4100, наклон которой к лучу зрения более $70^o$, скорость вращение и $i$ однозначно разделяются (в предположении кругового вращения). На рис. 24 (a),(b) показана зависимость $V$ от $PA$ и аппроксимация ее функцией (6) для двух значений радиуса : $7''$ и $35''$. В центральной области имеет место не только поворот динамической оси по отношению к внешним изофотам, отмеченный Афанасьевым и др (1992), но и изменение наклона, которое отражается в различной форме модельной кривой на рис 24.

На рис 24(c) и (d) приведена зависимость параметров ориентации диска от расстояния до динамического центра. Сплошные линии показывают положение центров колец, в которых проводилась аппроксимация. Для внешнего ("основного") диска галактики на $r = 25 - 95''$: средние значения $PA = 166^o \pm 1^o$, $i = 74^o \pm 0.5^o$, что совпадает с характерными параметрами определенными из фотометрии ( см ниже). Внутренний диск – на $r < 11''$: $PA = 180^o \pm 2^o$, $i = 52^o \pm 2^o$ , что видно по рис.24. Эти параметры близки к значениям $PA = 180$ и $i = 65$,

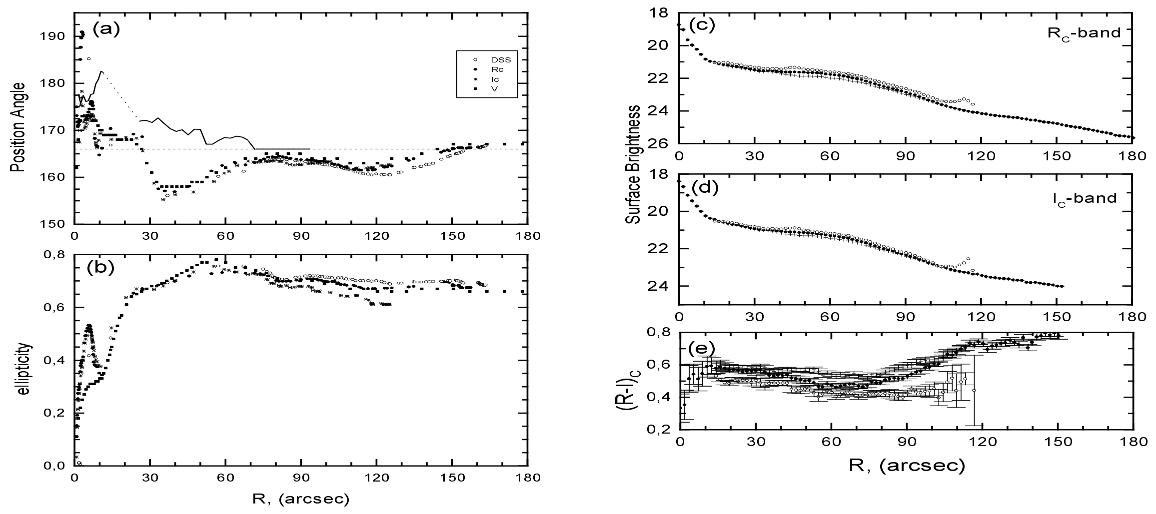


рис.26 Анализ поверхностной фотометрии NGC 4100. (а) – изменение позиционного угла эллиптических изофот в разных полосах. Горизонтальной пунктирной линией отмечено положение внешних изофот – $166^o$. Сплошной линией показано изменение ориентации динамической оси (пунктир – "переходная область"). (с),(d) – усредненный по азимуту профиль поверхностной яркости в различных полосах. Поверхностная яркость исправлена за эффект наклона, учтено поглощение в нашей галактике. Заполненные кружки – усреднение по всей галактике, открытые кружки – усреднение производилось только в спиральных рукавах. Крестики – усреднение только в "межрукавных областях". (с) – радиальные изменение показателя цвета.

полученным в работе Афанасьев и др(1992). Область $r = 11'' - 25''$ является "переходной". Эллипсы с радиусом $R_1 = 11'$ (и ориентацией как у внутреннего диска) и эллипсы с $R_2 = 25'$ ( и с ориентацией как у внешнего диска) – соприкасаются, что показано на рис 25.(d).

Возникает проблема какие $PA$ и $i$ приписывать точкам находящимся между $R_1$ и $R_2$ в секторах к N и к S от центрального диска. В поле скоростей здесь всего около десятка точек на разных расстояниях от центра, по ним не удается уверенно определить параметры ориентации. Поэтому "переходная" область в расчетах игнорировалась. На рис. 24 она отмечена пунктирными линиями.

Все данные по морфологии центральной ($\pm 20''$) области приведены на рисунке 25. Отметим, что во-первых сложная "грушевидная " картина изофот в центре независимо подтверждается наблюдениями Pogge (1987) на 1-м телескопе (Lick Observatory). В статье приведен прямой снимок в линии $\mathrm{H}_\alpha$ и форма ядра аналогична полученной нами. Во-вторых, динамический центр ( отмечен крестиком на рис. 25) расположен симметрично относительно максимумов на поля скоростей, но сдвинут относительно максимума яркости как в линии так и в континууме примерно на $1.''5$ к SE. Динамический центр сдвинут и относительно центра симметрии на карте в $R_C$ и в распределении показателе цвета – не совпадая с наиболее яркой область звездообразования.

Как было показано в главе 4 аналогичное поведение лучевых скоростей – поворот динамической оси и уменьшение наклона в центре может быть связано с наличием бара. Что бы отличить наклонный диск от бара необходим анализ фотометрии. На рис 26. приведены результаты изофотного анализа изображений NGC 4100 в полосах $R_C$, $I_C$ и взятого из цифрового Паломарского обзора (DSS). Черными квадратиками показан результат Heradeau&Simien(1996) для полосы (V). Отсутствие явно выраженного центрального пика эллиптичности в данных этих авторов видимо связано с неблагоприятными условиями наблюдений ($seeing \approx 5''$). Пунктиром

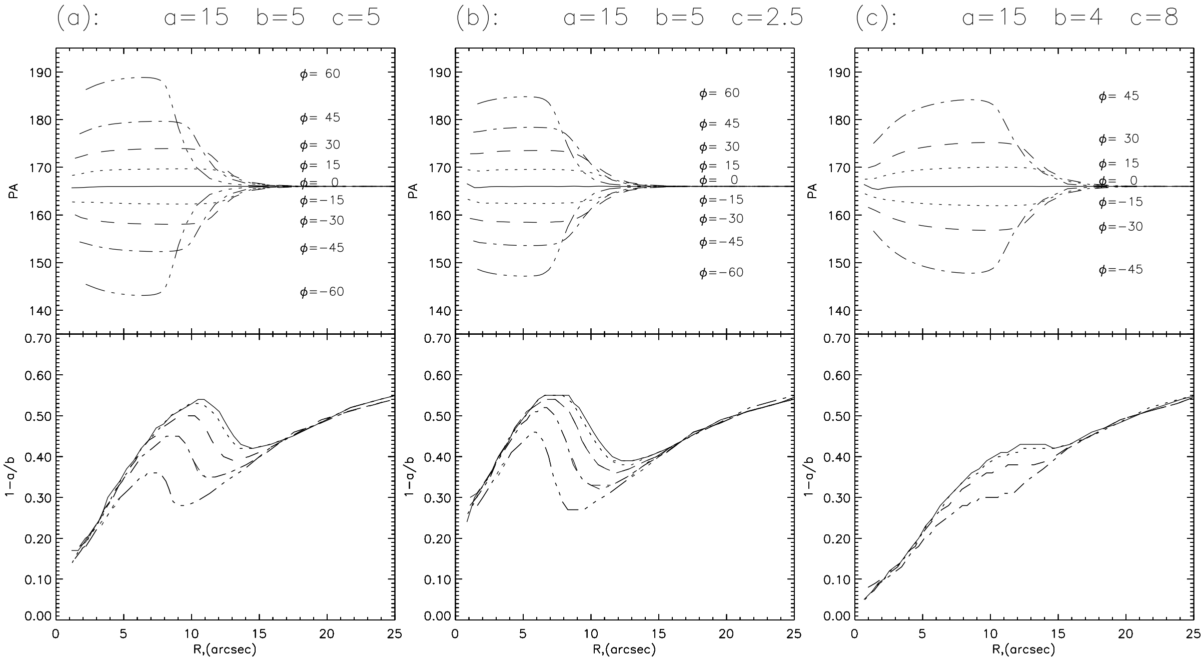


рис.27 Изофотный анализ моделей распределения яркости в случае присутствия бара. (a)-(c) соответствуют разным отношениям осей бара, около кривых подписано соответствующее значение угла $\phi$ между баром и линией узлов в плоскости галактики.

отмечен $PA$ внешних изофот на $r > 150''$: PA= $166 \pm 0.^{\circ}5$, что прекрасно совпадает с полученной нами из поля скоростей ориентацией "основного" (внешнего) диска. Более ранние работы дают примерно то же значение ($166^o$ у Heradeua& Simien(1996), $164^o$ у Tully et.al(1996), причем последний результат относится к более удаленным областям $r > 200'$). [7]

Сплошной линией показано изменение ориентации динамической оси. Характерно, что в области центрального диска $r = 0'' - 11''$ изофоты во всех фильтрах поворачиваются в ту же сторону, относительно внешних изофот, что и динамическая ось, достигая $PA = 170 - 190^o$. Может ли подобную картину дать бар? Сложный профиль диска, нагромождение ярких областей звездообразования в сочетании с пылевыми прожилками делают невозможным корректное проведение двумерной декомпозиции яркости в рамках простой модели из главы 3.2. Что бы разобраться с поворотами изофот мы построили серию моделей включавших диск и кинговский балдж (с параметрами примерно соответствующими центральному распределению яркости в NGC 4100) и бар. Большая ось бара $a = 15''$m, $b/aapproc0.3$, а отношение $b/c$ варьировалось в пределах от 0.5 до 2.0.

На рис. 27 приведены результаты изофотного анализа моделей для разных углов поворота бара $\phi$. Наблюдаемое среднее значение $PA$ внутри $R < 15''$ составляет около $174^o$ (rms=$6^o$.). В наших моделях этому соответствует угол $\phi = 20^o - 35^o$, в зависимости от отношения осей бара. В то же время, анализ модельных полей скоростей для наклона $i = 70^o$ показывает, что наблюдаемому повороту динамической оси на $10^o - 15^o$ соответствует углы $\phi = -(25^o - 50^o)$, в зависимости от стадии развития бара (рис.7(a)). Этот результат находиться резко противоречит фотометрическим моделям, бар по кинематике и по фотометрии должен находиться по

[7]Однако, как видно из рисунка, на $r < 150''$ PA заметно отклоняется от среднего значения, причем одинаково для наблюдений в разных полосах, что подчеркивает значимость этих отклонений. На участках $r = 28'' - 70''$ и $r = 100'' - 140''$ PA достигает соответственно значений 156 и 161. На прямом снимке в R (рис 1) видно, что на $r \approx 30'' - 70''$ расположены мощные спиральные ветви и двухрукавный узор "захватывает" эллиптические изофоты. И на $r \approx 120''$ присутствуют слабые спиральные ветви ("псевдокольцо" у Buta&Crocker,1993).

разные стороны от линии узлов!

Таким образом есть смысл говорить именно о **наклонном диске**. Изменение наклона диска приводит к синхронному изменению ориентации динамической и фотометрической осей, что и наблюдается в центральной области NGC 4100. Интересно, что в "переходной зоне" $r = 11'' - 25''$ PA практически не меняется и близок к ориентации внешних изофот. Это доказывает, что на этих расстояниях находится область "нормального" (основного) диска.

По эллиптичности внешних изофот получаем фотометрический наклон основного диска $i = 71^o$, что близко к значению найденному по полю скоростей. В области центрального диска – резкий пик эллиптичности с $e \approx 0.5$ на $r = 6''$ , видимо это и есть "ядерное кольцо" определенное у Buta&Crocker(1993). В $(R-I)_C$ (рис 25,(f)) здесь локализуются "синие" области звездообразования. К сожалению на таких малых расстояниях доминирует светимость балджа и нельзя уверенно определить наклон внутреннего диска по фотометрии.

Азимутально усредненные профили яркости приведены на рис.26(c)-(e). Как и в ранее опубликованных данных разных авторов, профили демонстрируют "ступеньку" на $r = 25'' - 70''$. Было интересно проверить можно ли связать ее только с увеличением яркости в рукавах. Для этого мы попробовали "убрать" спиральные рукава, применяя методику, описанную у Beckman et.al(1996).

Изображение в $\mathrm{I}_C$ где спирали более гладкие, чем в $\mathrm{R}_C$ делилось на среднее распределение яркости, аппроксимированное эллиптическими изофотами. Области где яркость более чем на 10% превосходит среднее значение считались нами за "спиральные рукава" ( за исключением области ядерного диска). Показатель цвета $(R-I)_C$ заметно меняется, однако "ступенька" на среднем профиле яркости остается даже если профиль строить только по "межрукавным" точкам, хотя контраст ее значительно ослабевает. Возможно старое звездное население все же дает в рукавах более заметный в суммарное излучение[8].

Так как яркости в диске не описывается экспоненциальным законом, то при разложении профиля в полосе $\mathrm{I}_C$ мы аппроксимировали центральную часть профиля яркости балджем кинга, а остаток яркости в межрукавных областях приписали диску ( рис. 28 (b)). Формально в диске получалась "дыра" в самом центре на $r < 0.7$ Кпк, но так как оценка параметров этого падения плотности очень неустойчива и зависит от принятого закона распределения яркости балджа, то мы положили поверхностную яркость равную константе $(70L\odot/pc^2)$ на расстояниях меньших чем 1 Кпк.

При построении кривой вращения параметры ориентации фиксировались: $PA_0 = 180^o$, $i = 52^o$ на $r = 0 - 11''$ и $166^o$, $74^o$ для $r = 25 - 95''$. Кривая вращения приведена на рис. 28. Общий ее ход согласуется с данными Афнасьева и др (1992), хотя тянется она дальше – до 7.5 Кпк. Отсутствие яркой эмиссии вблизи "переходной зоны" не дает возможности уверенно определить глубину минимума на кривой вращения на $r \approx 9 - 11''$, на границе центрального диска.

Этот минимум не удается получить и в модельном разложении кривой вращения (рис.28(a)). Возможно, распределение массы здесь более концентрированно к центру по сравнению с балджами Кинга или Вокулера (Афанасьев и др., 1988б). Твердотельный участок кривой вращения на $R < 6''$ хорошо описывается балджем Кинга с $r_0 = 3''$ (0.22 кпк), в согласии с фотометрической оценкой на рис.28(b). Следует заметить, что выделенный нами профиль диска в полосе $\mathrm{I}_C$ при $M/L = 4.4$ лучше описывает ход кривой вращения, по сравнению с чисто экспоненциальным диском. Масса галактики внутри $R_{25}$ $1.2 \cdot 10^{11}$ $M_\odot$. В области наклонного диска ($R < 0.8$ кпк) сосредоточена масса $3 \cdot 10^9$ $M_\odot$, причем 78% ее приходиться на балдж.

Итак, центральная область галактики ($R < 11''$, 0.8 кпк), представляет собой динамически обособленный диск, угол наклона которого к картинной плоскости (в предположении кругового

[8]Этот же эффект может быть связан с изменение пылевого поглощения в межрукавном пространстве. Необходимо использование данные фотометрии хотя бы в 3-х цветах, что бы разобраться с неопределенностью.

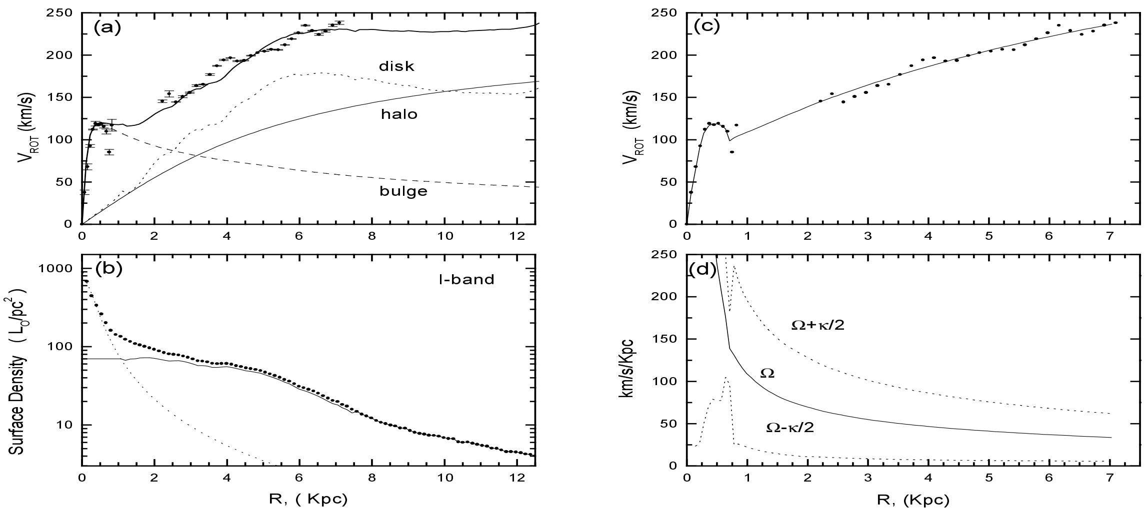


рис.28 (a) – разложение кривой вращения на компоненты. (b) – разложение профиля яркости в полосе $I_C$ на фотометрические компоненты – балдж и диск. Локализация Линдбладовских резонансов: (c) – аппроксимация кривой вращения. Аппроксимированная кривая использовалась для расчета угловой скорости $\Omega$ и эпициклической частоты $\kappa$ (d).

вращения) на $\sim 22^\circ$ отличается от угла наклона основного диска, так что он представляется более "раскрытым" для наблюдателя. Область $11''-25''$ оказывается переходной, ее параметры не определяются из поля скоростей однозначно. Это наглядно иллюстрируется на рис. 25(d), где упрощенно представлена ориентация дисков. Эллипсы с радиусом $R_1 = 11'$ (и ориентацией как у внутреннего диска) и эллипсы с $R_2 = 25'$ ( и с ориентацией как у внешнего диска) – касаются, что показано на рис 4.(d). Выше было показано, что фотометрические параметры ориентации указывают на то, что "переходная область" – соответствует основному (внешнему) диску NGC 4100.

Как же внутренний диск может быть ориентирован относительно плоскости основного диска? Из простых геометрических соображений получаем, что если $PA_1$ и $i_1$ - позиционный угол линии узлов и наклон центрального диска относительно плоскости неба, а $PA_2$ и $i_2$ - то же для основного диска, то угол между ними $\Delta i_{12}$ определяется выражением:

$$\Delta i_{12} = \pm \sin i_1 \sin i_2 \cos(PA_1 - PA_2) + \cos i_1 \cos i_2 \tag{9}$$

Если спиральные рукава – отстающие, то, сравнивая направление закрутки рукавов с полем скоростей убеждаемся, что основной диск галактики ориентирован так, что E-половика диска NGC 4100 – ближайшая к наблюдателю. В таком случае, подставляя в (9) значения $PA_1 = 180$, $i_1 = 52$, $PA_2 = 166$ и $i_2 = 74$ получаем два возможных решения:

$$\Delta i_{12} = \begin{cases} 25^\circ & \text{если к наблюдателю ближе E-сторона внутреннего диска} \\ 87^\circ & \text{если к наблюдателю ближе W-сторона внутреннего диска} \end{cases}$$

В обоих случаях, так как $PA_1$ и $PA_2$ не сильно различаются, то E-половинка внутреннего диска относительно наблюдателя лежит "за" плоскостью основного диска.

При наклоне $\Delta i_{12} = 87^\circ$ мы имеем дело уже с полярным диском (не кольцом!), что может говорить об исключительной особенности галактики. Но следует заметить, что это конфигурация является значительно более устойчивой по сравнению с диском наклоненным на $25^o$, поскольку время жизни такого слабо наклоненного диска видимо не превышает нескольких периодов обращения вокруг центра галактики (см. главу 5.4)

Если принять гипотезу о полярном диске, то объясняется довольно сложное распределение яркости в центральной области галактики (рис 25). Действительно, при таком угле наклона E-половинка внутреннего диска оказывается для наблюдателя за "основным диском". В то же время W-половинка внутреннего диска "приподнята" над плоскостью основного диска и не испытывает поглощения в основном диске. В таком случае можно ожидать, что центр яркости будет смещен относительно истинного центра галактики к западу. Подобный сдвиг динамического центра относительно фотометрического действительно имеет место, о чем упоминалось выше и рис.25 иллюстрирует этот факт. Причем сдвиг заметен и в эмиссионной линии, и в континууме.

Мы попробовали, использую полученную нами кривую вращения для определения положения резонансов ( рис28(d)) Кривая вращения аппроксимировалась двумя полиномами: на $r = 0 - 0.83$ Кпк – полиномом 8 степени, на $r = 0.83 - 7.5$ Кпк – полиномом 3 степени. По аппроксимированной кривой рассчитывалась угловая скорость $\Omega = dV/dR$ и эпициклическая частота $\kappa^2 = R\frac{d\Omega^2}{dR} + 4\Omega^2$.

Резкое падение скорости на $R \approx= 11''$ приводит к тому, что область внутреннего линдбладовского резонанса (ILR) примерно соответствует внешней границе околоядерного диска. Причем этот результат слабо зависит от принятого радиуса коротации, возможен широкий диапазон его значений от 2 до 6 Кпк ! Заметим, что если принять моду спирального узора (число рукавов) m = 3 - 4 вместо 2, заменив $\kappa/2$ на $\kappa/m$, то положение максимума функции $\Omega - \kappa/2$, а следовательно и ILR, практически не изменится. В области ILR не заметно присутствия ядерного кольца повышенной яркости, однако с ней совпадает широкая красная полоса, окаймляющая ядро с восточной стороны (см. рис. 25). Возможно, здесь в галактике имеется пылевое кольцо, западная половина которого не просматривается, поскольку мы наблюдаем ее сквозь околоядерный диск.

К сожалению, для NGC 4100 нам не удалось найти информации о распределении газа в центральной области, однако его присутствие очевидно. Об этом говорит интенсивное звездообразование, ответственное за яркое эмиссионное излучение околоядерного диска. Как показано Pogge (1987), в центральной области этой галактики сосредоточено более 20% всей эмиссии в линиях $H_\alpha$+[NII]. Поскольку отношение $H_\alpha/[NII]$ здесь нормальное для областей HII, то излучение не связано с AGN и поток в $H_\alpha$ однозначно связан с количеством молодых звезд. Тогда темп звездообразования в ядерном диске на единицу площади должен быть как минимум на порядок выше, чем в целом по галактике. Об интенсивном звездообразовании свидетельствует и "синий" показатель цвета $(R - I)_C$ в центральном диске.

## 5.4 Обобщение наблюдательных данных по структуре центральных областей

Как было показано в главе 5.1, для NGC 972, обладающей небольшим контрастным баром, удалось оценить скорости радиальных течений газа вдоль бара $V_r = 50 - 60$ км/с. Попробуем оценить темп "прокачки" газа вдоль бара к ядру. Для простоты считаем бар прямоугольным "кирпичом" с полушириной $b$. Легко показать, что за время $t$ через бар (по обеим половинкам относительно центра) пройдет масса $M = 4V_r t b \sigma_g$ где $\sigma_g$ – средняя поверхностная плотность газа. Тогда темп натекания газа:

$$\left(\frac{\dot{M}}{M_\odot/\text{год}}\right) \approx 4.1 \cdot 10^{-5} \left(\frac{V_r}{\text{км/с}}\right)\left(\frac{b}{\text{пк}}\right)\left(\frac{\sigma_g}{M_\odot/\text{пк}^2}\right) \quad (10)$$

Положив $V_r = 50$ км/с, $b = 3''.6 = 380$ пк (результат декомпозиции яркости) и в качестве оценки плотности газа взяв среднее значение плотности газа: $\sigma_g \approx (M_{HI} + H_2)/\pi R_{25}^2 = 14\ M_\odot/\text{пк}^2$

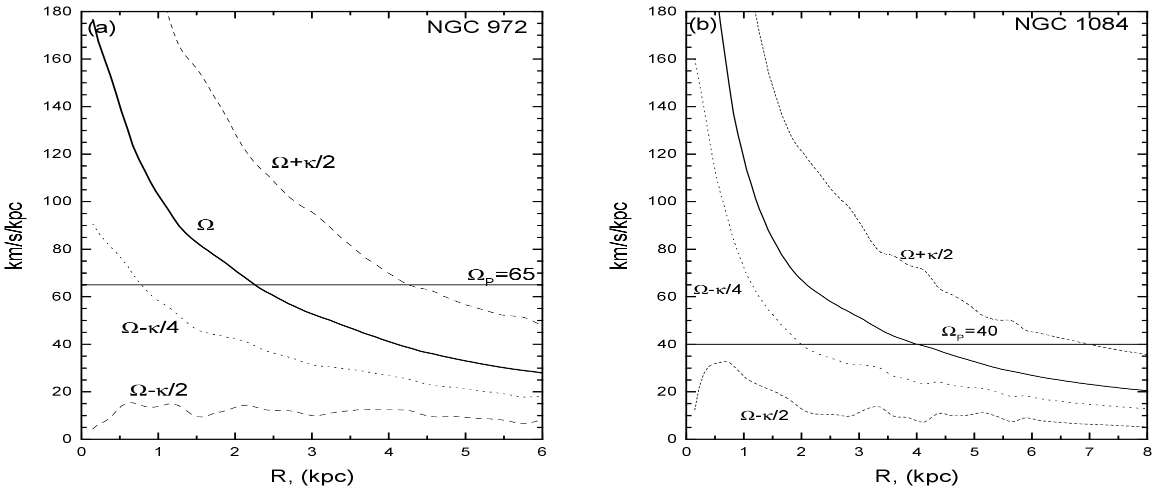


рис. 29 Радиальные изменений угловой скорости $\Omega$, построенные по модельным кривым вращения. Различными линиям показаны радиальные зависимости для $\Omega \pm \kappa/m$, где $\kappa$ - эпициклическая частота, $m = 2, 4$. Указаны возможные значения скорости спирального узора $\Omega_P$ (a) – NGC 972, (b) - NGC 1084

получаем из (10): $\dot{M} \approx 1\ M_\odot$/год или 0.3 $M_\odot$/год только для HI.

Хотя наша оценка темпа натекания газа довольно приближенная, однако она прекрасно согласуется с оценками SFR! RP98 дают для текущего темпа звездообразования в ядре определенного по светимости в $H_\alpha$ : $SFR = 0.35\ M_\odot$/год. Таким образом натекающего газа как раз хватает для поддержания вспышки звездообразования в ядре. В литературе много говориться о важной роли баров в поставке "материала" для вспышек звездообразования и ядерной активности, однако подобных прямых оценок чрезвычайно мало. Стоит отметить работу Regan et al.(1997) , где по наблюдаемому полю скоростей в баре NGC 1530 определен темп поступления газа к центру $\dot{M} \approx 1\ M_\odot$/год Эта величина, совпадает с независимыми оценками темпа звездообразования в ядре, как и в случае с NGC 972.

Изображения бара в NGC 972 хорошо аппроксимируется ферреровскими эллипсоидами (5), это значит, что распределение яркости вдоль большой оси бара "плоское" (по сравнению с экспоненциальным). В работах (Elmegreen&Elmegreen,1985 и 1989;Elmegreen,1996) показано, что подобные бары наблюдаются в "ранних" типах спиралей S0-Sb. "Плоский бар" – еще один пример неоднозначности в определении морфологического типа NGC 972. При этом конец "плоского" бара должен располагаться между коротацией и резонансом 4:1, что подтверждается и в численных экспериментах (Combes,1994) На рис.29 (a) построены радиальные зависимости угловой скорости $\Omega = dV/dR$ и кривые $\Omega \pm \kappa/2$, $\Omega - \kappa/4$. Если скорость вращения спирального узора $\Omega_P \approx 65$ км/с/Мпк, то внешний линдбладовский резонанс (OLR) – точка где $\Omega_P = \Omega + kappa/2$ лежит на $R \approx 4$ кпк, на внешнем кольце звездообразования, радиус коротации ($\Omega_P = \Omega$) составляет 2.2 Кпк, а резонанс 4:1 лежит на 0.8 Кпк. Наблюдаемая длина бара 1.1 Кпк согласуется с подобной расстановкой резонансов.

Спираль в K не наблюдается далее $3.5-4$ Кпк от центра, т.е. внутри OLR, как и следует из теории волн плотности (Засов,1993). Скорость вращения спирального узора $\Omega_P \approx 65$ км/с/Мпк довольно велика, хотя в моделировании Combes(1994) получаются близкие значения $\Omega_P \approx$ 50 км/с/Мпк. И вместе со странной формой спиралей такая скорость вращения заставляет сомневаться в применимости линейного анализа для изучения спиральной структуры NGC 972. Но это уже – поле для дальнейших исследований.

В NGC 1084 наблюдательные данные говорят в пользу крупномасштабного ($R = 1.5 - 2.2$ Кпк) бара. В моей курсовой работе (Моисеев,1997) разными методами оценен радиус коротации в NGC 1084 $R_c \approx 3.5$ Кпк. При некотором напряжении воображения в остаточных скоростях на рис.20(a) можно увидеть внешнюю трехрукавную спираль начиная с $R = 3.5 - 4$ Кпк (оценка коротации по Canzian,1993). В таком случае $\Omega_P \approx= 40$ км/с/Мпк и бар заканчивается на резонансе 4:1 (рис.29(b)).

Контраст бара очень мал (около 10% по яркости в K полосе, судя по рис.18(b)), что больше напоминает не бар, а балдж со слабой триаксиальностью. Но на лидирующих кромках этого слабого бара в поле скоростей видна сильная ударная волна, скорости меняются на $50 - 80$ км/с, а отношение $[\mathrm{NII}]_{6583/H_\alpha} > 1$, что о возбуждении запрещенных линий за фронтом ударной волны. В NGC 972, бар значительно более контрастный, однако таких мощных ударов нет. Скорость газа относительно бара $\Delta V = (\Omega(R) - \Omega_B)R$, где $\Omega_B \approx \Omega_P$ – угловая скорость бара (Afanasiev&Shapovalova,1996). Если для NGC 972 и NGC 1084 на рис.29 посмотреть относительные скорости в точках на половине длины бара (0.5 и 1.0 Кпк соответственно), то получим сравнимые значения $\Delta V \approx 80$км/с в обоих случаях! Но в первом случае удар значительно заметнее, хотя скорость звука должна быть приблизительно одной и той же.

Интересно, что в галактике NGC 2841 (Afanasiev&Sil'chenko,1999) обнаружен триаксиальный балдж, с ударными волнами на кромках, ситуация аналогична NGC 1084. Напрашивается вывод, что в отличии от ударных волн в спиральных рукавах, наличие ударных кромок в барах несвязано напрямую с контрастом потенциала бара (глубиной потенциальной ямы). При моделировании возможных семейств орбит в барах, "ударные кромки" проявляются как места "скучивания" звезд и газовых облаков (Athanassoula,1992). Здесь важен не столько контраст потенциала, сколько существование двух семейств замкнутых орбит – $X_1$ и $X_2$, поворота ориентации орбит вблизи резонансов [9] (Athanassoula,1992;Lindblad,1996).

В NGC 972 и NGC 1084 поражает глобальные различия скоростей, определенных по линиям [NII] и $\mathrm{H}_\alpha$ , достигающие $10 - 50$ км/с в проекции на луч зрения. К своему удивлению автор констатирует, что вопрос о различиях кинематики в разных оптических линиях **практически не исследован**, за исключением течений газа в AGN. Как правило, разные оценки скоростей смело усредняются. На этом фоне выделяется работа Afanasiev&Shapovalova(1996), где рассмотрены поля скоростей в линиях [NII] и $\mathrm{H}_\alpha$ для Mkn 744. Максимальное различие в скоростях достигает $\pm 80$ км/с, положение областей наибольших отклонений совпадают с ударными кромками в баре, где растет отношение $[\mathrm{NII}]/\mathrm{H}_\alpha$ .

На фронтах ударных волн усиливается высвечивание в запрещенных линиях, и в [NII] мы видим динамический компонент, связанный с движениями за фронтом ударных волн, а в линии $\mathrm{H}_\alpha$ видим более спокойный компонент. Конечное пространственное разрешение "размазывает" границу фронта. Такое объяснение может быть верным и для глобальных различий вращения, связанных с ударными волнами в спиральных рукавах – в NGC 1084 вращение в [NII] в среднем более медленное чем в $\mathrm{H}_\alpha$ не только в области бара, но и дальше от центра, где развитая спиральная структура (рис 19(b)).

Природа "радиальных" движений от центра в [NII] в NGC 1084 неясна, так как галактика не обладает сейфертовским ядром. Нечто похожее наблюдали Lindblad et.al.(1996) в баре NGC 1365, приписав второй компонент в профилях линий низкого возбуждения "истечению в конусе". Однако, мы видели, как легко и непринужденно получаются двойные профили в ядерных областях NGC 972 и NGC 1084 чисто из за конечного разрешения при наличии радиальных движений в баре. В общем, вопрос о различии кинематики баров в разных линиях открыт и ждет своего подробного изучения.

Вывод о наличии в NGC 4100 полярного диска с $R = 0.75$ кпк не является неожиданным.

[9]Заметим, что если в NGC 1084 $\Omega_P < 30$ км/с/Мпк (рис.29(b)), то существует два (!) ILR, в отличии от NGC 972, где видимо нет ILR.

Подобные структуры – полярные кольца и диски, наблюдаются и в других галактиках (подробная библиография приведена в работе Zasov&Moiseev,1998). Падение вещества на диск галактики с направлением момента вращения сильно отличным от общегалактического может привести к образованию подобных структур. NGC 4100 – член скопления галактик Ursa Major, так что падение на нее карликового спутника неудивительно, причем эта "катастрофа" инициирует и наблюдаемую вспышку звездообразования в ядерном диске. Главное – насколько долго будет существовать подобная структура? Численные расчеты показывают, что если начальный наклон ядерного диска мал ($I < 50 - 70^o$) то из-за прецессии компонента момента перпендикулярная оси вращения галактики довольно быстро ( за несколько оборотов) теряется и ядерный диск совпадает с плоскостью основного диска.

Существует ряд модельных расчетов, как в модели N-точек, так и гидродинамических (см. к примеру Varnas,1990;Dubinsky&Christodoulou,1994), которые демонстрируют, что если начальный наклон $i > 70 - 80^o$, а гравпотенциал галактики в основном определяется сферическим компонентом, то диск быстро эволюционирует к чисто полярной $i = 90^o$ конфигурации (Dubinsky&Christodoulou,1994). Если нет прямых пересечений столкновений газовых облаков, то эта конфигурация является устойчивой. В NGC 4100 в пределах $R < 0.8$ кпк основной вклад в кривую вращению, т.е. в гравпотенциал, если пренебречь давлением (Засов,1993), вносит сферический компонент (глава 5.3) и полярный диск должен быть устойчивым!

В качестве проверки этого предположения хотелось бы получить поле скоростей звездного компонента. Даже при наличии полярного газового диска звезды, как правило, вращаются в "основной плоскости" (Hagen-Thorn&Reshetnikov,1997;Sil'cheko et al,1997;Sil'chenko,1998) В случае же бара, характер звездных движений отличаются от круговых. Такие наблюдения реально сделать на БТА с мультизрачковым спектрографом MPFS. Также хочется получить снимок галактике в K-полосе, что бы убедиться, что повороты на рис.17(c),(d) не связаны со сложным распределением пыли и областей звездообразования в баре (хотя так как повороты наблюдаются в разных цветах – от V до $I_C$ , автор считает, что они реальны).

# 6 Выводы

"...что есть истина? "
(Евангелие от Иоанна, 18.38)

Теперь попробуем очень кратко сформулировать основные выводы данной работы.

- Разработан (совместно с А.В.Засовым) метод построения карт индекса $Q_{VRI}$ , позволяющий анализировать ход звездообразования по диску галактик и изучать структуры "скрытые" пылевым поглощением. Предсказание в NGC 972 по карте $Q_{VRI}$ вспышки звездообразования в ядре и кольца звездообразования во внутреннем диске подтверждено последующими наблюдениями в $H_\alpha$ и K-полосе.

- Разработан метод двумерной декомпозиции изображений галактик, позволяющий определять параметры баров и их пространственную ориентацию.

- Проанализировано более 400 "искусственных" полей скоростей, построенных по результатам численных расчетов течений газа в барах. Показано, что для наклонов к лучу зрения $i > 60^o - 70^o$ наблюдаемое распределение лучевых скоростей в баре может создавать иллюзию "ядерного наклонного диска". Однако динамическая ось всегда поворачивается в противофазе с фотометрической относительно линии узлов. Это позволяет на основании совместного анализа кинематики и фотометрии отличить бар от наклонного диска.

- Обработаны данные 2-D спектроскопии трех спиральных галактик, построены поля скоростей в линиях $H_\alpha$ и [NII]. Сравнение их с результатами обработки $BVR_CI_CK$ - поверхностной фотометрии говорит о том, что

  - В NGC 972 обнаружен бар с $R = 1$ кпк. В оптических полосах он скрыт пылью и проявляет себя только в K-полосе и в искажениях поля скоростей. Измеренная скорость радиальных течений вдоль бара позволила оценит темп поступления газа к ядру: $\dot{M} \approx 0.3 - 1\ M_{\odot}$/год, что совпадает с оценками темпа современного звездообразования в ядре.

  - В NGC 1084 найден низкоконтрастный бар (или триаксиальный балдж) с размером $R = 1.5 - 2.2$ кпк. На лидирующих кромках этой структуры обнаружены фронты ударных волн. На расстояниях менее 0.5-1 кпк заметную роль играют радиальные потоки газа.

  - В центре NGC 4100 находиться полярный диск радиусом около 0.5 кпк, в котором происходит вспышка звездообразования.

- На примерах NGC 972 и NGC 1084 показана перспективность сравнения кинематики галактик с барами в разных эмиссионных линиях ($H_{\alpha}$ и [NII]). Поскольку запрещенные линии интенсивно высвечиваются на фронтах ударных волн, то сопоставление полей скоростей в разных линиях позволяет подробно изучить влияние бара на газовый диск (замедление вращения, радиальные потоки и т.п.)

## 7 Благодарности

Я благодарен своему научному руководителю проф. **А.В.Засову** за помощь и постоянный интерес к работе. Работа была бы невозможной без наблюдательного материала полученного на телескопе БТА лабораторией СФВО (рук.– к.ф-м.н. **С.Н.Додонов**). Особенно я благодарен наблюдателям ЛСФВО: проф. **В.Л.Афанасьеву** за постановку задачи по двумерной декомпозиции и полезную критику результатов по NGC 4100; к.ф-м.н. **А.Н.Буренкову** и к.ф-м.н. **В.В.Власюку** за то, что научили меня обрабатывать спектры и изображения, всегда отвечая на мои назойливые вопросы. Благодарю к.ф-м.н **В.О.Чавушяна** и **Н.И.Серафимович** за помощь в наблюдениях на "Цейсс-1000" и **В.П. Михайлова** за обсуждение методов анализа фотометрии. Вообще, я благодарен всем сотрудникам **САО РАН** которые так или иначе содействовали написания этой работы. Данные по модельным полям скоростей предоставлены к.ф-м.н**В.В. Мусцевым** которому я обязан многими полезными разъяснениями и комментариями. Спасибо **О.С.Бартунову** за то, что помог разобраться со спектром сверхновой в NGC 1084. Я благодарен член.кор. РАН **А.М. Фридману** за разрешение использовать наблюдательный материал полученный в рамках его программы на БТА. Спасибо **S.Ryder** за предоставление результатов наблюдений в K-полосе, **F.Simien** и **Ph. Heraudeau** за предоставление исправленных профилей яркости NGC 4100. В процессе работы часто приходилось пользоваться замечательной базой данных **NASA/IPAC Extragalactic Datebase(NED)**, открытыми наблюдательными архивами телескопов **Isaak Newton Group** (La Palma) и Космического телескопа им. Хаббла (**HST**). Я благодарю всех своих **друзей, студентов** и **аспирантов** из СПбГУ, РГУ, ВолГУ,КГУ и конечно, из родного ГАИШ! В наше тяжелое время, увы, трудно работать в науке без финансовой поддержки. Поэтому я благодарен администрации **САО РАН** за предоставление **индивидуального гранта** в 1998 г. Настоящая работа была поддержана грантами **РФФИ 98-02-17102, РФФИ 98-15-96029**, грантом **"Ведущие научные школы России" N96648**, и программой **"Интеграция:наземная астрономия".**

И конечно наиболее ценным и полезным разъяснениям , постоянной поддержке и рекомендациям, без которых была бы невозможна эта работа я обязан большому ученому и замечательному человеку д.ф-м.н. **Ольге Касьяновне Сильченко**.

## Список литературы


Афанасьев В.Л.,Буренков А.Н.,Засов А.В.,Сильченко О.К.,1988а,Астрофизика,28,243
Афанасьев В.Л.,Буренков А.Н.,Засов А.В.,Сильченко О.К.,1988б,Астрофизика,29,155
Афанасьев В.Л.,Буренков А.Н.,Засов А.В., Сильченко О.К.,1991,АЖ,68,1134
Афанасьев В.Л.,Буренков А.Н.,Засов А.В.,Сильченко О.К.,1992,АЖ,69,19
Власюк В.В.,1992,Препринт САО РАН,84
Засов А.В.,1993,"Физика Галактик",издание МГУ
Засов А.В.,1995,ПАЖ,21,730
Засов А.В., Моисеев А.В.,1998,ПАЖ,24,677 (ЗМ98)
Кязумов Г.А.,1981,ПАЖ,7,272
Ляхович В.В., Фридман А.М., Хоружий О.В.,1996,АЖ,73,N1?
Моисеев А.В.,1997,курсовая работа,ГАИШ МГУ
Моисеев А.В.,1998,Препринт САО РАН,134
Страйжис В.Л.,1977,"Многоцветная фотометрия звезд. Фотометрические системы и методы.",Вильнюс
Afanasiev V.L.,Burenkov A.N.,Shapovalova A.I.,Vlasyuk V.V.,1996,in:Buta R. et al.(eds), IAU Coll.157, "Barred Galaxies", ASP Con.Ser.,91,218
Afanasiev V.L.,Shapovalova A.I.,1996,in:Buta R. et al.(eds), IAU Coll.157, "Barred Galaxies", ASP Con.Ser.,91,221.
Afanasiev V.L.,Sil'chenko O.K.,1991,Astr.Issledovania,33,p.88,104,114,128,132 and 144
Afanasiev V.L.,Sil'chenko O.K,1999 accepted to Astron. J.,astro-ph 9812390
Athanassoula E,1992,Mon. Not. R. Astron. Soc.,259,328 and 345
Beckman J.E.,Peletier R.F.,Knapen J.K.,Corradi R.L.M. and Gentet L.J.,1996,Astrophys. J.,467,175
Begeman K.G.,1989,Astron. Astrophys.,223,47
Binney J., Tremaine S.,1987,Galactic dynamics,Prenceton University Press
Blackman C.P.,1979,Mon. Not. R. Astron. Soc.,188,93
Bonnarel F.,Boulesteix J.,Georgelin Y.P.,Lecoarer E. et al.,1988,Astron. Astrophys.,189,59
Boulesteix J.,1993,ADHOC Reference Manual. Publ. de l'Observatoire de Marseille
Burbidge E.M., Burbidge G.R., Prendergast K.H.,1963,Astrophys. J.,137,37
Burbidge E.M., Burbidge G.R., Prendergast K.H.,1965,Astrophys. J.,142,649
Buta R., Crocker D.A., 1983,Astron. J.,105,1344
Buta R., Williams K.L.,1995,Astron. J.,109,543
Byun Y.I., Freeman K.C.,1995,Astrophys. J.,448,563
Canzian B.,1993,Publ. Astr. Soc. Pacific,105,661
Cardelli J.A., Geoffrey C.C., Mathis J.S.,1989,Astrophys. J.,345,245
Combes F.,1994,in "The formation and Evolution of Galaxies",ed. Muñoz-Tuñon. C.,Sanchez F.;(Cambridge)
Condon J.J., Brederic J.J.,1991,Astron. J.,102,1663
Contopoulos G., Papayannopoulos T.,1980,Astron. Astrophys.,92,33
De Jong R.S., 1996,Astron. Astrophys. Suppl. Ser.,118,557
De Vaucouleurs G.,1948,Ann.d'Astrophys,**11**,247
Dubinsky J.,Christodoulou D.M.,1994,Astrophys. J.,424,615
Elmegreen B.G, Elmegreen D.M.,1985,Astrophys. J.,288,438
Elmegreen B.G, Elmegreen D.M.,1989,Astrophys. J.,342,677
Elmegreen D.M.,1996,in:Buta R. et al.(eds),IAU Coll.157, "Barred Galaxies", ASP Con.Ser.,91,23
Fillippenko A.V.,1998,IAUC,6994B,1
Freeman K.C.,1966,Mon. Not. R. Astron. Soc.,133,47
Freeman K.C.,1970,Astrophys. J.,169,181
Friedly D.,Wozniak H.,Rieke M.,Martinet L.,Bratschi P.,1996,Astron. Astrophys. Suppl. Ser.,118,461
Hagen-Thorn V.A.,Reshetnikov V.P.,1997,Astron. Astrophys.,319,430
Heraudeau Ph., Simien F.,1996,Astron. Astrophys. Suppl. Ser.,115,407
HjelmM.,Linbland P.O.,1996,Astron. Astrophys.,305,727
Ho L.C.,Fillipenko A.V.,Sargent W.L.W., 1995,Astrophys. J. Suppl. Ser.,98,477
Ho L.C.,Fillipenko A.V.,Sargent W.L.W., 1996,in:Buta R. et al.(eds), IAU Coll.157, "Barred Galaxies", ASP Con.Ser.,91,188
Ho L.C.,Fillipenko A.V.,Sargent W.L.W., 1997,Astrophys. J. Suppl. Ser.,112,315
Hunt L.K.,Malkan M.A., Moriondo G.,Salvati M.,1998,astro-ph/9808168

Keel W.C.,Byrd G.G.,1996,in:Buta R. et al.(eds), IAU Coll.157, "Barred Galaxies", ASP Con.Ser.,91,361
Kennicutt R.C,,1983,Astrophys. J.,272,54
King J.Y.,Modiaz M., et al.,1998,IAUC,6992A,1
Landolt A.U.,1992,Astron. J.,104,340
Levy V.V.,Mustsevoy V.V., Sergienko V.A.,1994,in:King R.(eds),"Physics of the gaseous and stellar disks of teh Galaxy",ASP Con.Ser.,66,93
Levy V.V.,Mustsevoy V.V., Sergienko V.A.,/1996,Astr.Astroph.Trans.,11,1
Lindblad P.A.B.,1996,Ph.D.
Lindblad P.O., Lindblad P.A.B.,1993,in:King R.(eds),"Physics of the gaseous and stellar disks of teh Galaxy",ASP Con.Ser.,66,29
Lindblad P.O.,Hjelm M.,Högbom J. et al.,1996,Astron. Astrophys. Suppl. Ser.,120,403
Majewski S.R., Kron R.G., Koo D.C, Bershady M.A.,1994,Publ. Astr. Soc. Pacific,106,1258
Mayya Y.D.,Ravindranath S, Carrasco L.,1998,Astron. J.,116,1671
Miller R.H., Prendergast K.H.,1968,Astrophys. J.,151,699
Moiseev A.V.,Sil'chenko O.K.,Zasov A.V.,Vlasyuk V.V.,in prep.
Moriondo G., Giovanardi C., Hunt L.K.,1998б Astron. Astrophys. Suppl. Ser.,in press
Odenwald S.F.,1986,Astrophys. J.,320,328
Pogge R.W.,1987,Astrophys. J. Suppl. Ser.,71,433
Ravindranath S.,Prabnu T.P.,1998,Astron. J.,115,2320 (RP98)
Regan M.W., Stuard N.V., Teuben P.J.,1996,Astrophys. J.,482L,143
Rix H.W, Rieke M.J.,1993,Astrophys. J.,418,123
Sandage A.,1961,The Hubble Atlas of Galaxies. Washinton.
Seigar M.C.,James P.A,1998,astro-ph 9803253
Sil'chenko O.K.,1998,Astron. Astrophys.,330,412,1998
Sil'chenko O.K.,Vlasyuk V.V., Burenkov A.N.,1997,Astron. Astrophys.,326,941
Taylor B.J.,1985,Astrophys. J. Suppl. Ser.,60,577
Thronson&Telesco,1986,Astrophys. J.,311,98
Tully R.B.,Verheijen M.A.W.,Pierce M.J.,Huang J-S.,Wainscoat R.J.,1996,Astron. J.,112,2471
Varnas S.R.,1990,Mon. Not. R. Astron. Soc.,247,674
van den Bergh S.,1976,Astrophys. J.,206,883
Vaucouleurs G.de, Vaucouleurs S A.de,1964,Reference Catalogue of Bright Galaxies., Austin. Univ. of Texas Press.
Vaucouleurs G.de, Vaucouleurs A.de, Corwin H. et.al.,1991.,Third Reference Catalogue of Bright Galaxies.NY:Springer-Verlag (RC3)
Verheijen M.A.W,1996,Ph.D.
Watanabe M.,1983,Ann.Tokyo Astron.Obs.,19,121
Zasov A.V., Sil'chenko O.K.1996, in:Buta R. et al.(eds), IAU Coll.157, "Barred Galaxies", ASP Con.Ser.,91,207.
Zasov A.V., Moiseev A.V.,1998, in:Terzian Y. et al.(eds), IAU Symp.194,"Activity in galaxies and related phenomena",astro-ph 9812121