

МОИСЕЕВ Алексей Валерьевич

СТРУКТУРА И ЭВОЛЮЦИЯ ГАЛАКТИК ПО НАБЛЮДЕНИЯМ
ИХ ВНУТРЕННЕЙ КИНЕМАТИКИ

(01.03.02 - астрофизика и звездная астрономия)

ДИССЕРТАЦИЯ

на соискание ученой степени
доктора физико-математических наук

Цели и задачи исследования

Основной целью данной работы является детальное изучение движений ионизованного газа и звезд в близких галактиках для решения вопроса о влиянии окружения (прежде всего - маломассивных спутников) на возникновение и эволюцию различных структур как в самих галактических дисках так и за их пределами. С другой стороны, предполагается рассмотреть различные наблюдательные свидетельства воздействия процессов текущего звездообразования на межзвездную среду галактик с целью понять причины возникновения в ней высокоскоростных и турбулентных движений. Для решения этих задач необходимо получить и проанализировать обширный наблюдательный материал по спектроскопии газовой и звездной подсистем близких галактик.

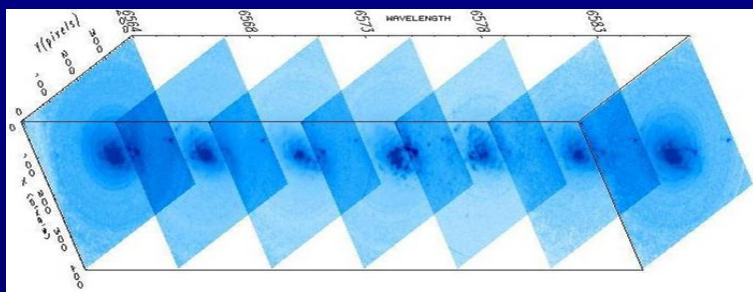
Диссертация состоит из Введения, семи глав, и Заключения, содержит 78 рисунков, 8 таблиц. Список цитируемой литературы включает 370 наименований.

Общий объем диссертации - 347 страниц

Глава 1. Методика наблюдений и обработки данных....

Сканирующий интерферометр Фабри-Перо (ИФП) в многорежимном спектрографе **SCORPIO**

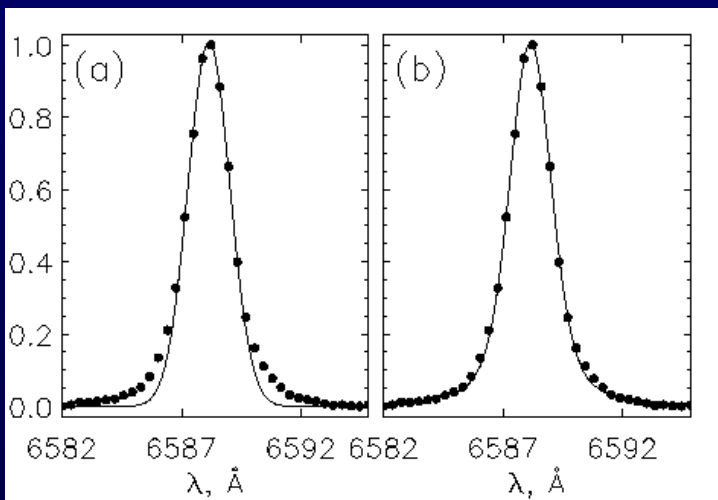
(Афанасьев, Моисеев 2005; Afanasiev & Moiseev, 2011)



Кинематика ионизованного газа (поля скоростей и дисперсии скоростей) в отдельных линиях (H α , H β , [OIII], [SII], [NII])

1) Разработка методов редукции данных ИФП (Моисеев, 2002)

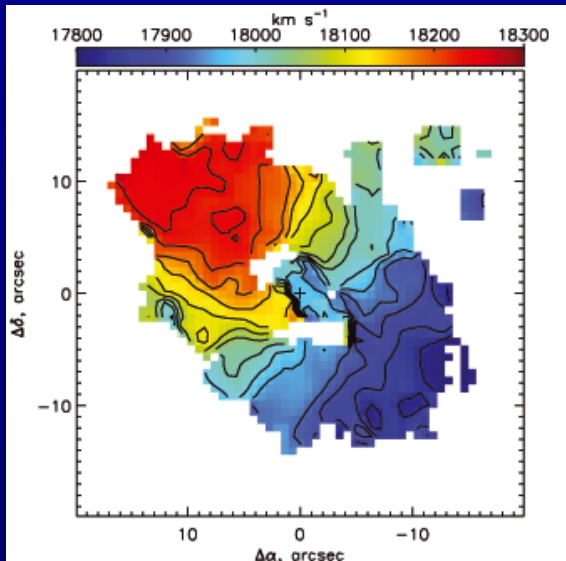
2) Карты дисперсии скоростей (Моисеев, Егоров, 2008)



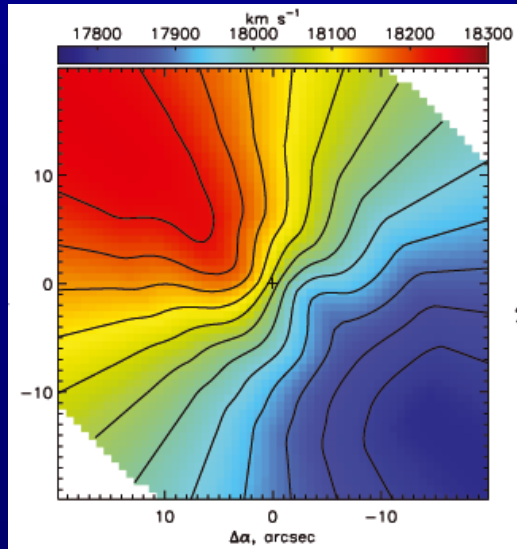
Правильный учет формы и вариация аппаратного профиля ИФП позволяет избежать систематики в измерении дисперсии скоростей для $\sigma > 2-3$ км/с

Глава 1. ...методы анализа полей скоростей

Наблюдения

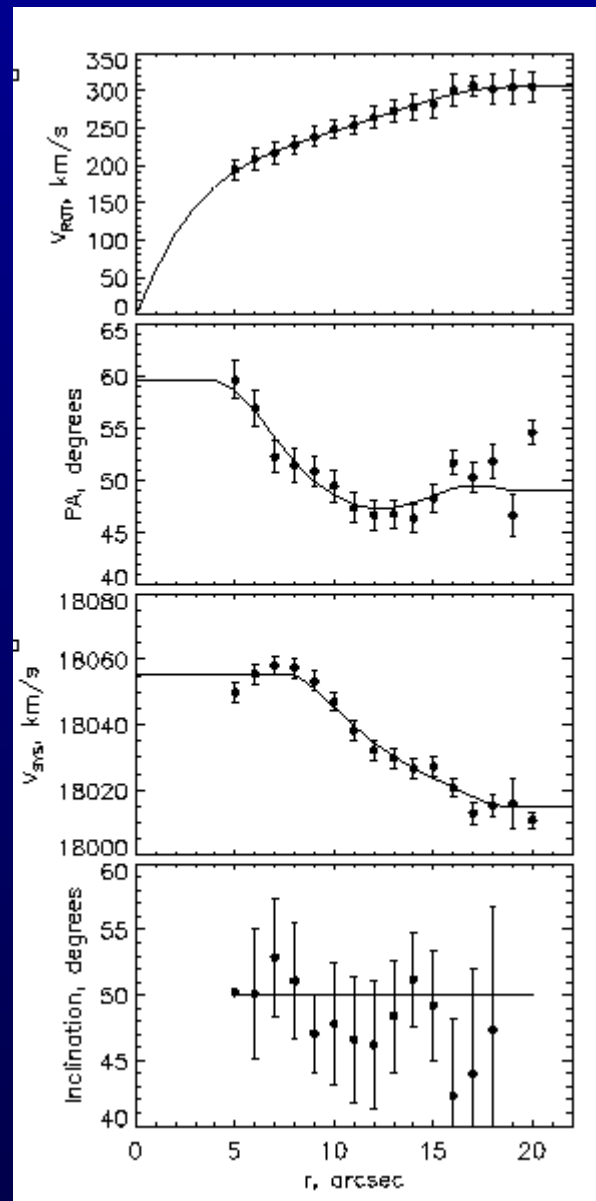


Модель

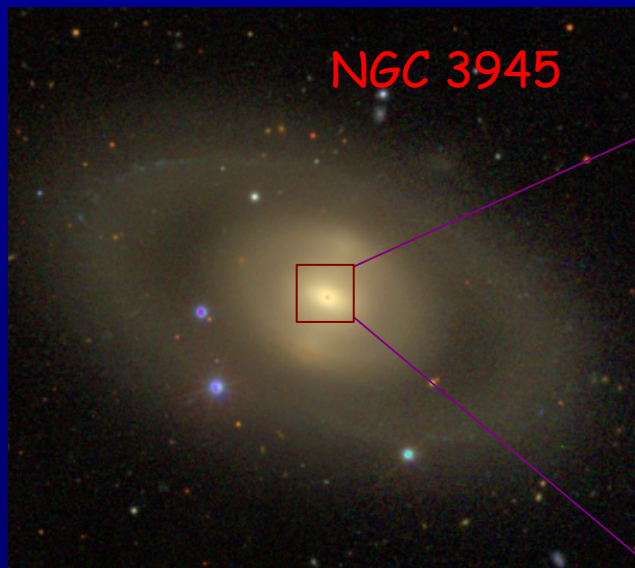


Определение параметров 2D-моделей изогнутых галактических дисков.

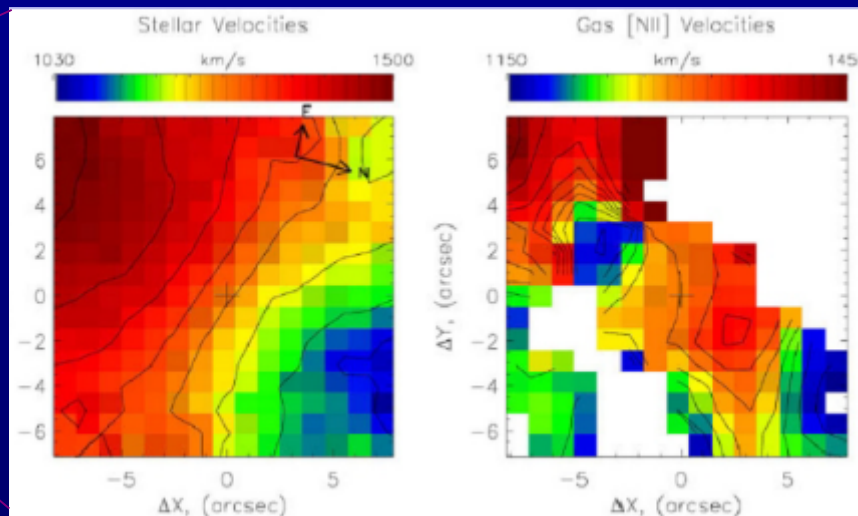
Учет вклада от расширяющихся оболочках в карликовых галактиках



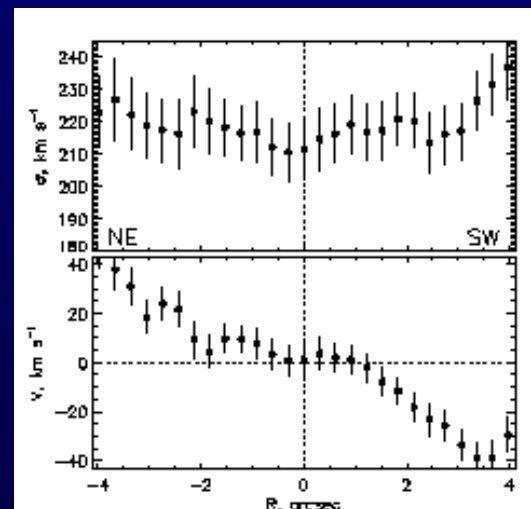
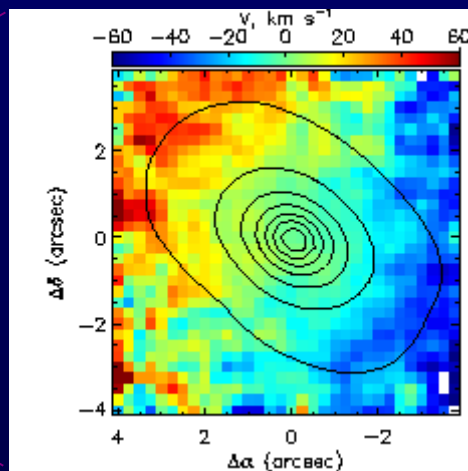
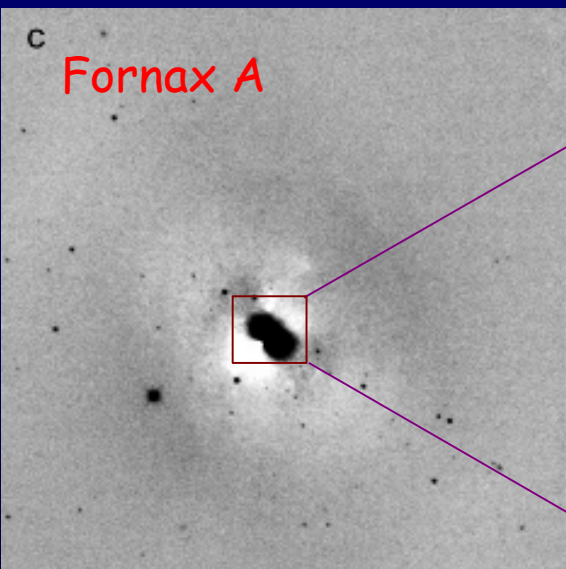
Глава 2. Противовращение в дисках галактик...



Газовый диск, $r < 500$ пк (Moiseev et al., 2004, A&A)

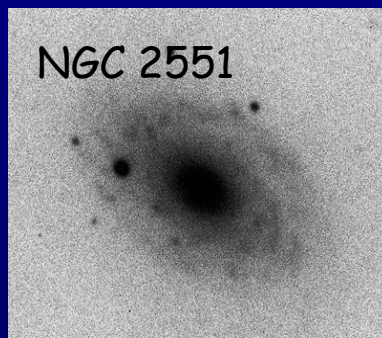


Звездный диск, $r < 200$ пк (Beletsky et al., 2011, MNRAS)



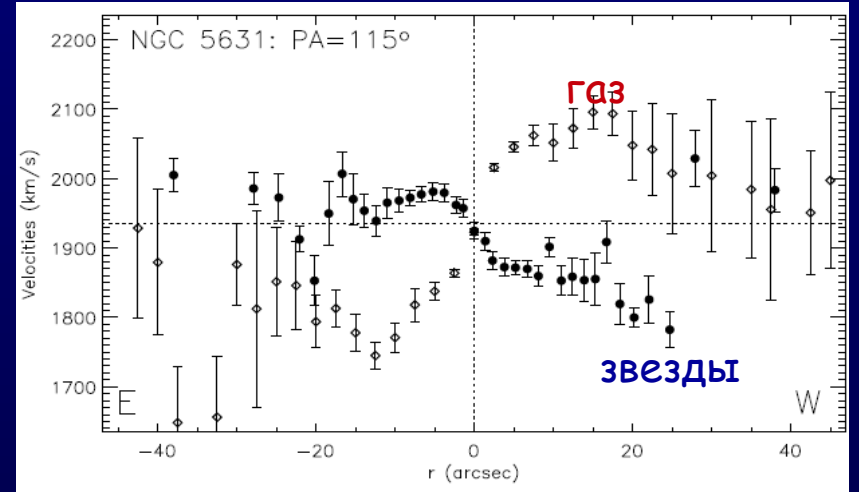
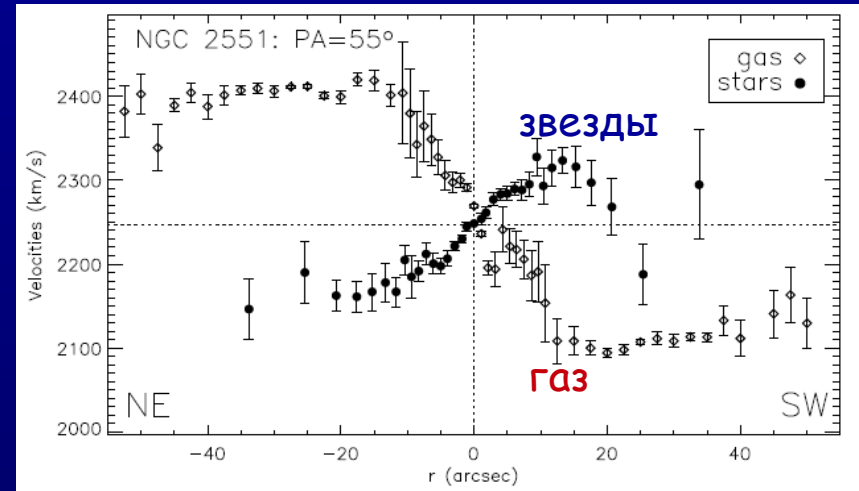
Глава 2 ...крупномасштабные противовращающиеся диски

Крупномасштабные (до $0.8R_{25} > 5-7$ кпк) диски ионизованного газа



Ранее было известно всего пять галактик, в которых **ВСЬ** газ вращается в противоположном направлении

Лучевые скорости (SCORPIO)



Глава 2 ...крупномасштабные противовращающиеся диски



Низконтрастный звездный компонент с противовращением

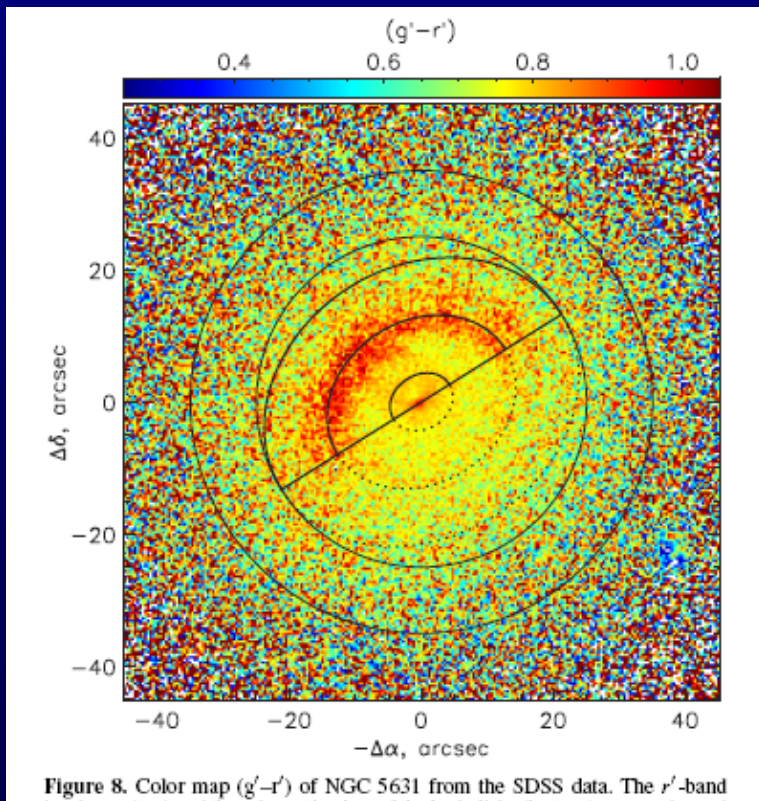
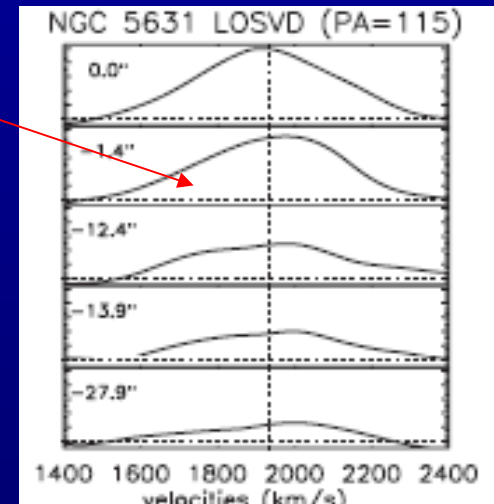


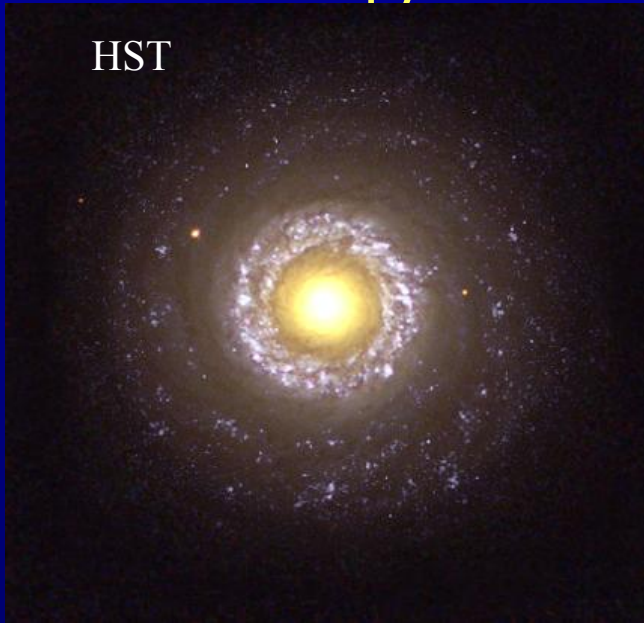
Figure 8. Color map $(g'-r')$ of NGC 5631 from the SDSS data. The r' -band

Газовый диск изогнут, взаимный наклон достигает $\Delta i=10-15^\circ$, т.е. еще только прецессирует к плоскости галактики.

Ударная ионизация газа ($[NII]/Ha > 1$)
(аналогичная картина, с наклоненным до $\Delta i=33-56^\circ$ — в NGC 7743
(Kotkov, Moiseev, Silchenko, 2011, ApJ)

В дальнейшем — формирование противовращающегося звездного диска

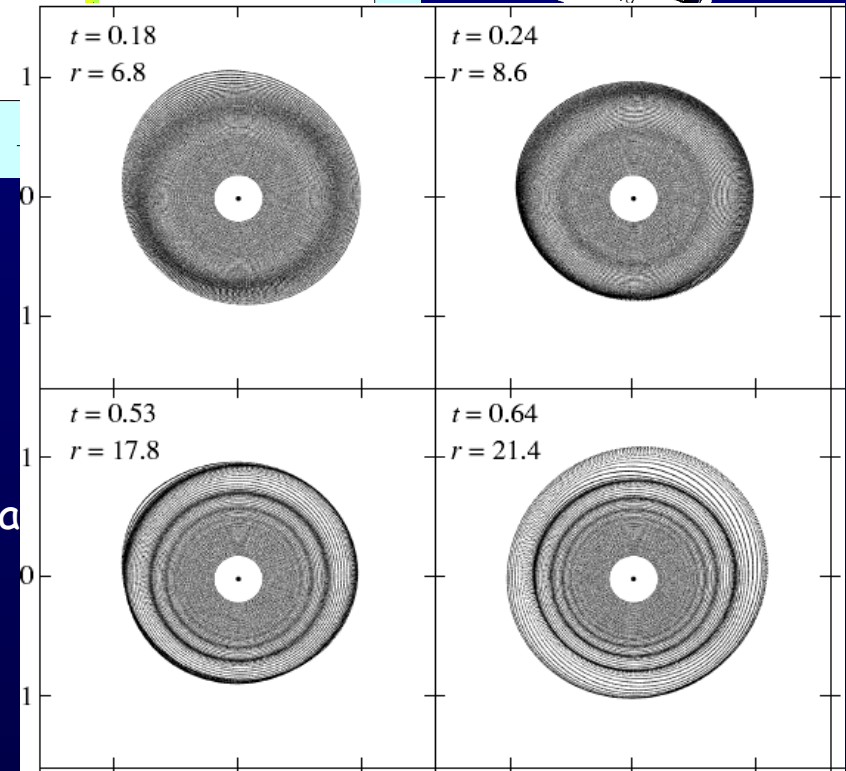
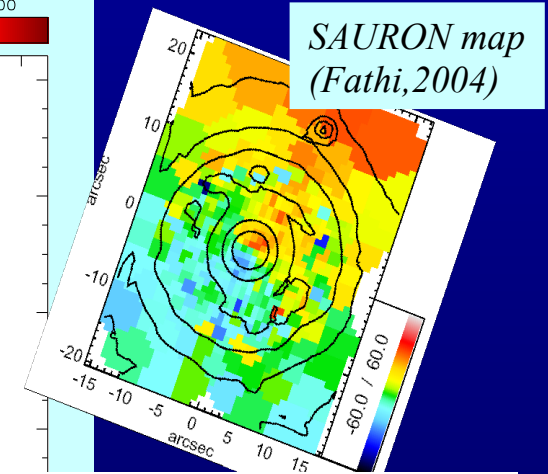
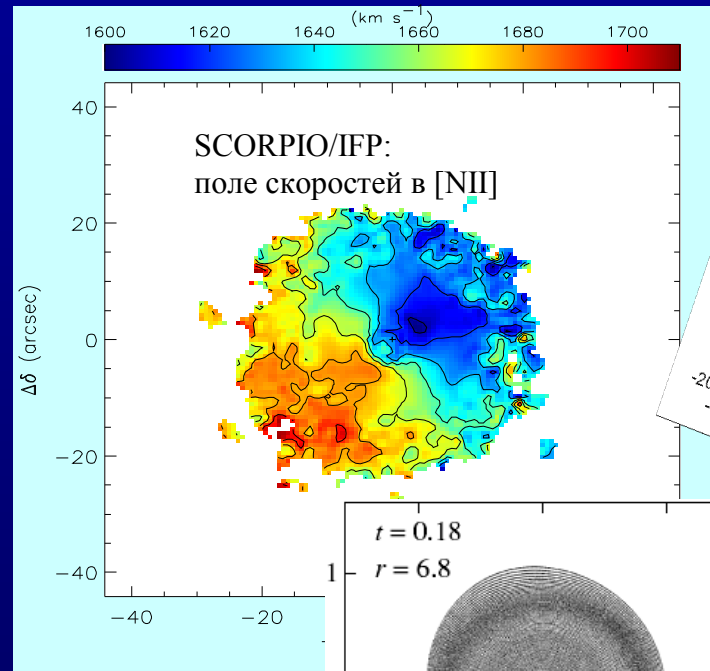
Глава 2 ...крупномасштабные противовращающиеся диски



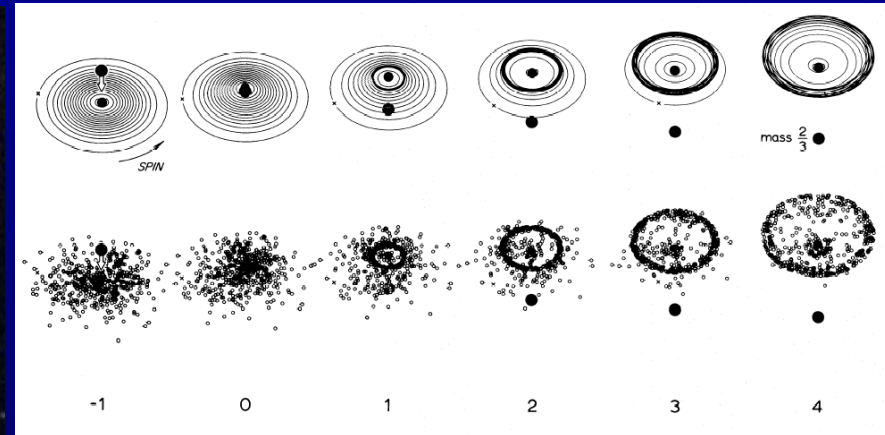
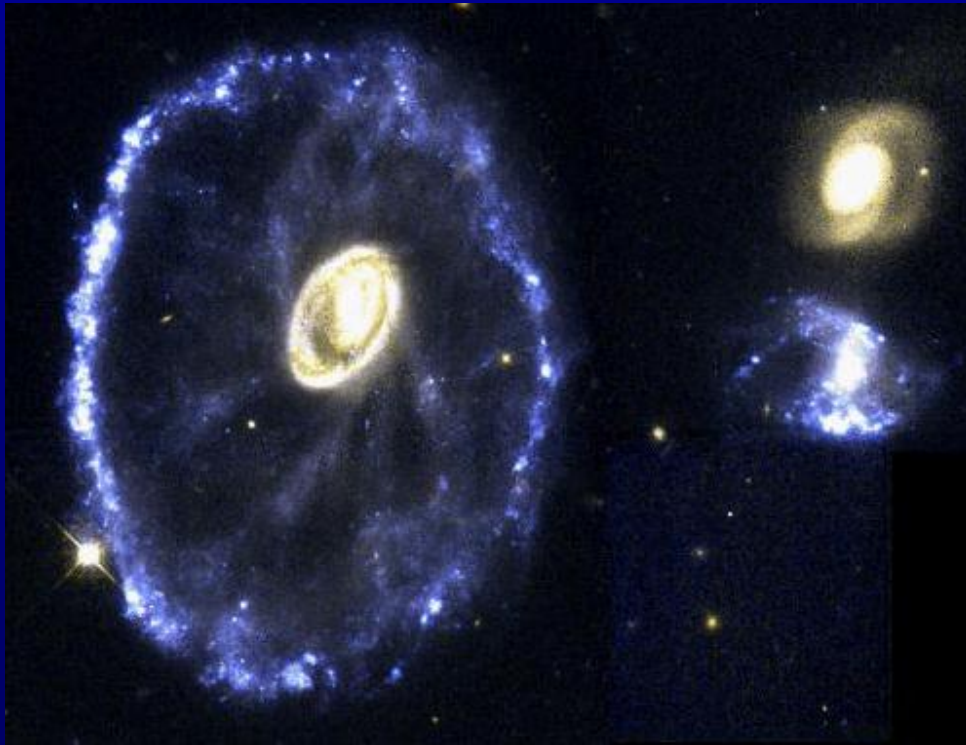
Sil'chenko & Moiseev (2006)

Гравитационное возмущение во время недавнего взаимодействия со спутником привело к образованию резонансного кольца

Качественное согласие с результатами расчета движения спутника в экваториальной плоскости против направления вращения исследуемой галактики (Тутуков и Федорова, 2006)



Глава 3. Любовые столкновения галактик....



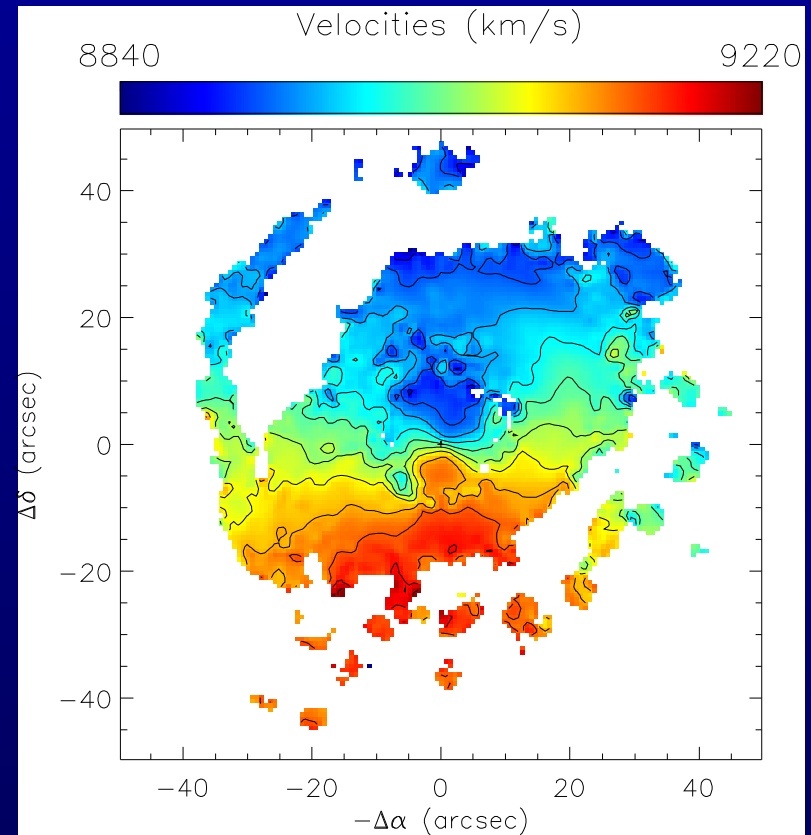
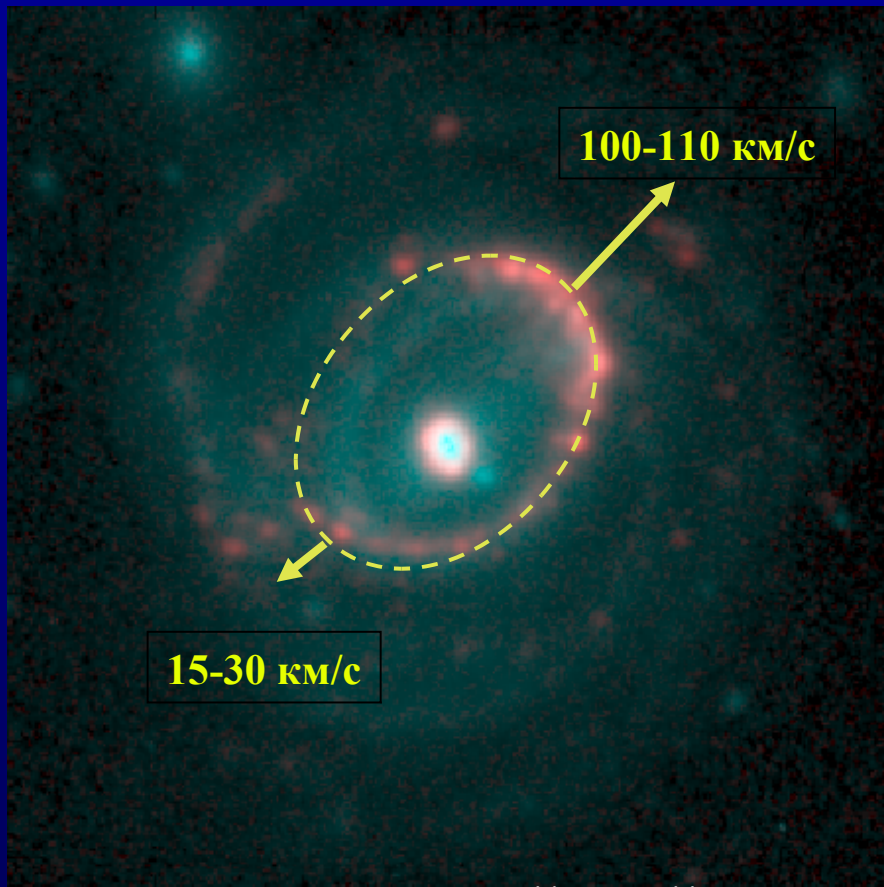
(Lynds and Toomre, 1976).

Устойчивость дисков: (не разрушаются при столкновениях, но и гало не настолько массивно чтобы подавить неустойчивость)

Альтернативные модели формирования колец:

- 1) Кольцевая волна плотности (Toomre, 1974, Moore et al. 1996)
- 2) «Лесной пожар» (Korchagin et al., 1998)

Глава 3. Лобовые столкновения галактик.... Arp 10



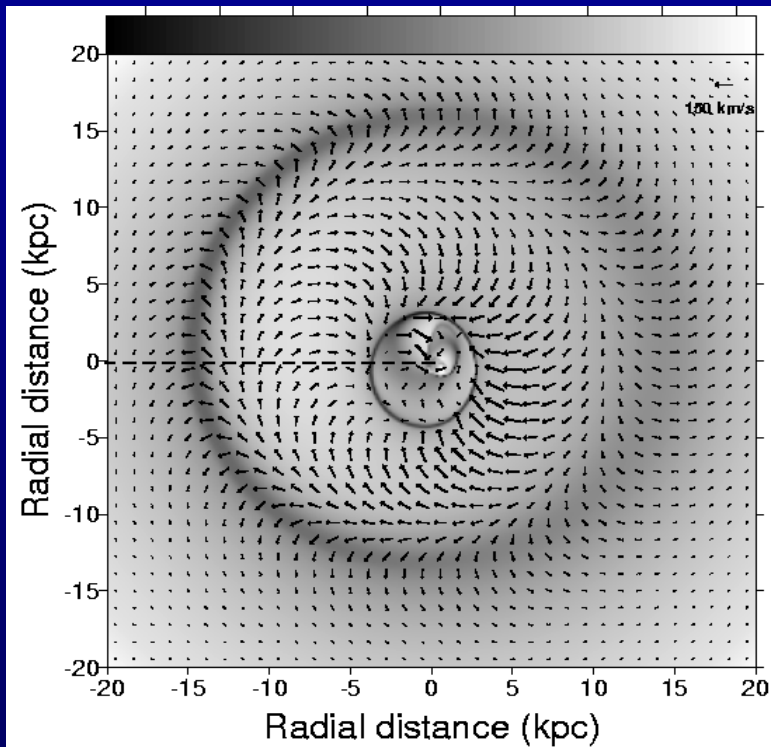
Два кольца диаметром 7'' и 45'' (4 и 26 кпк)

Гипотезы о происхождении колец:

Лобовое столкновение с галактикой-спутником (но где же сам спутник?)

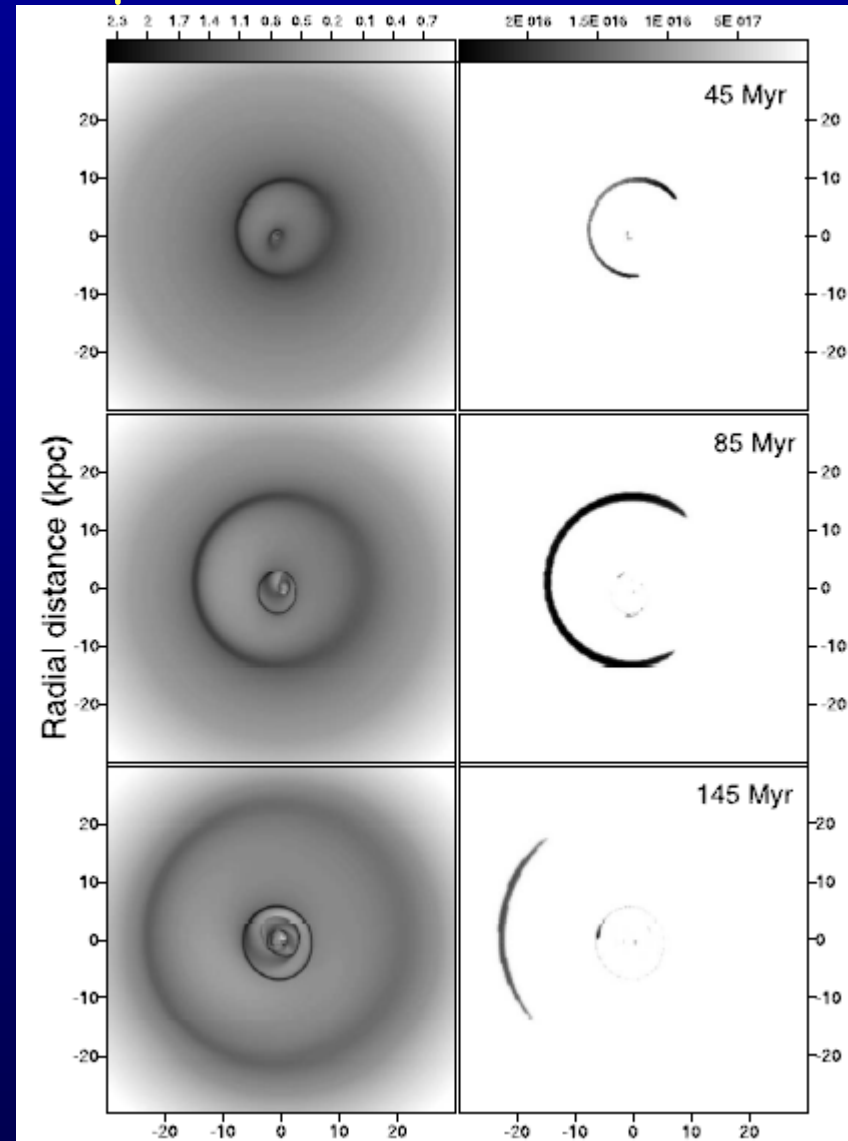
Приливное разрушение карликового спутника

Глава 3. ...Арп 10: численное моделирование.



Кольцевая структура сформировалась в результате нецентрального столкновения с массивным спутником 85 млн лет назад.

Скорость спутника в момент столкновения — около 800 км/с



Глава 3. ... Mrk 334: пролет спутника через газовый диск

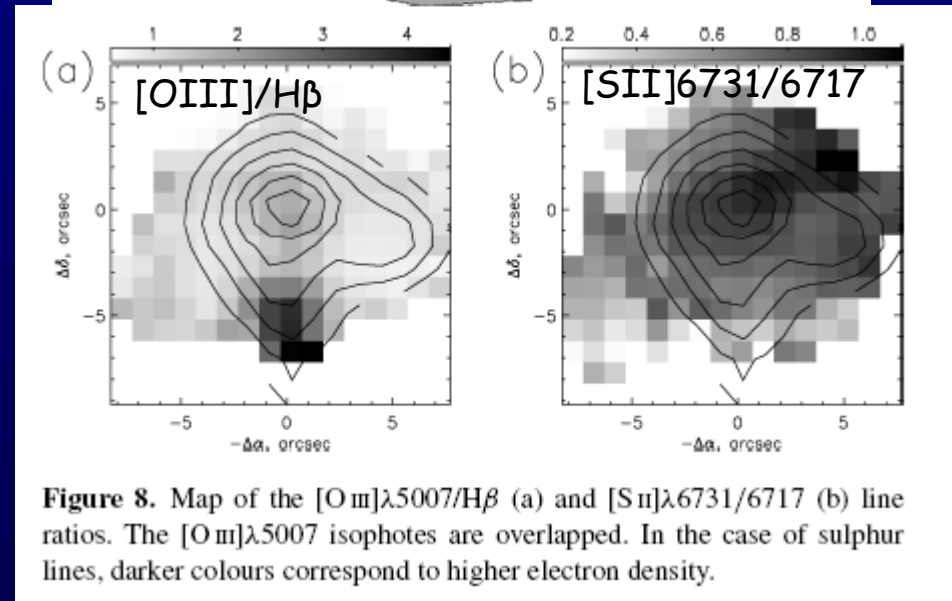
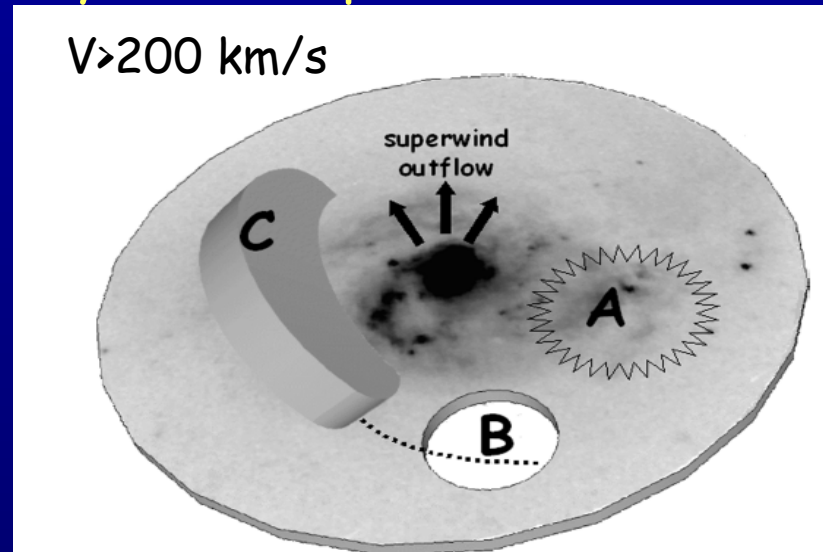
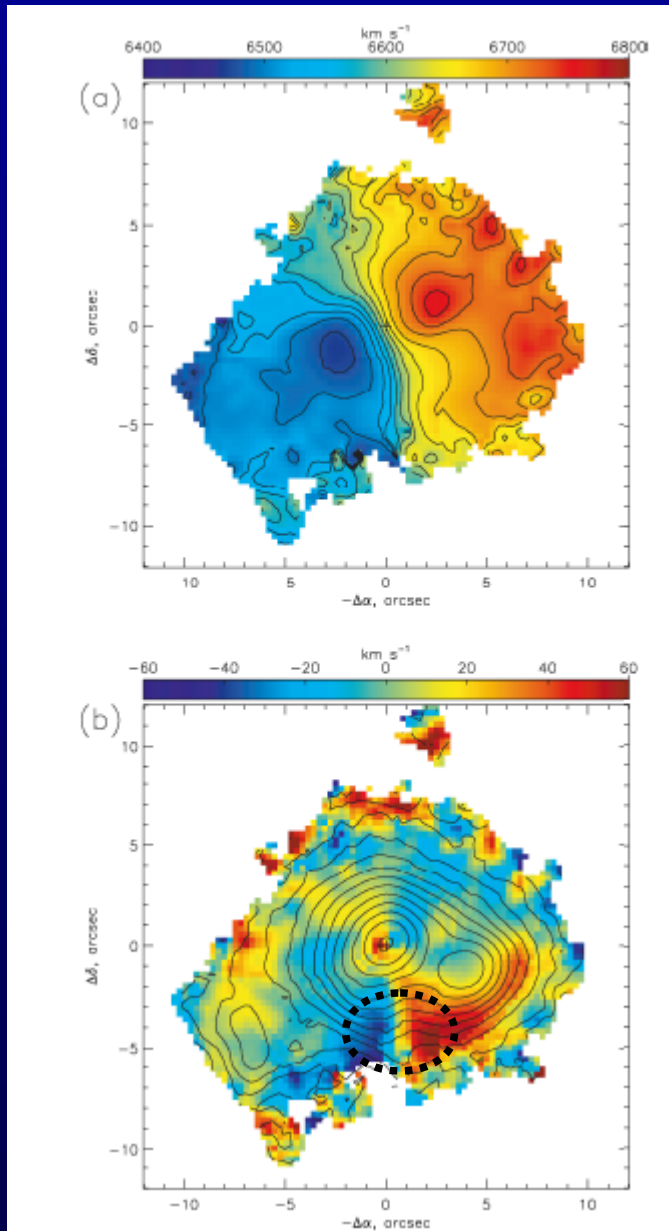
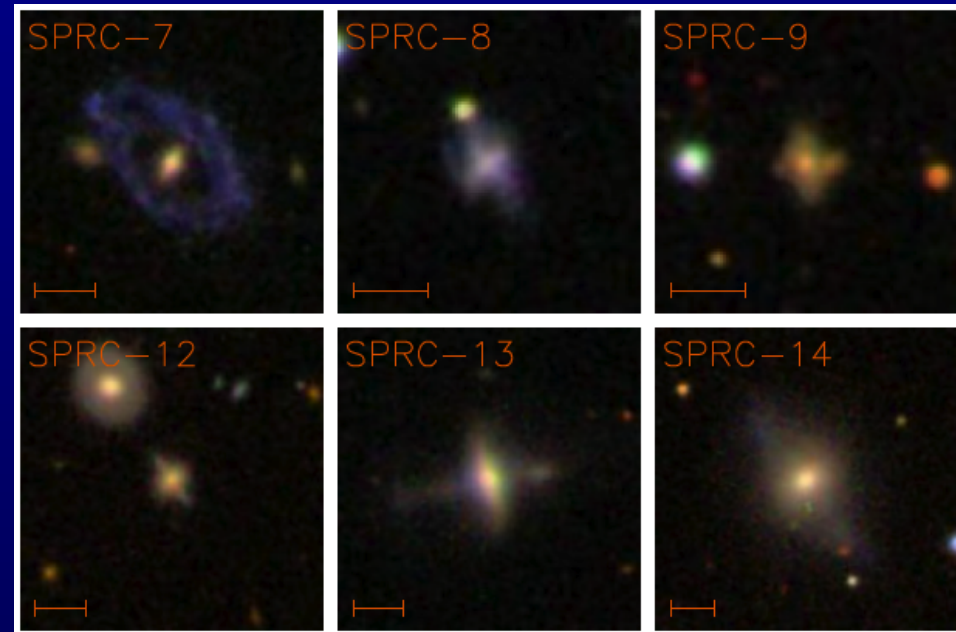
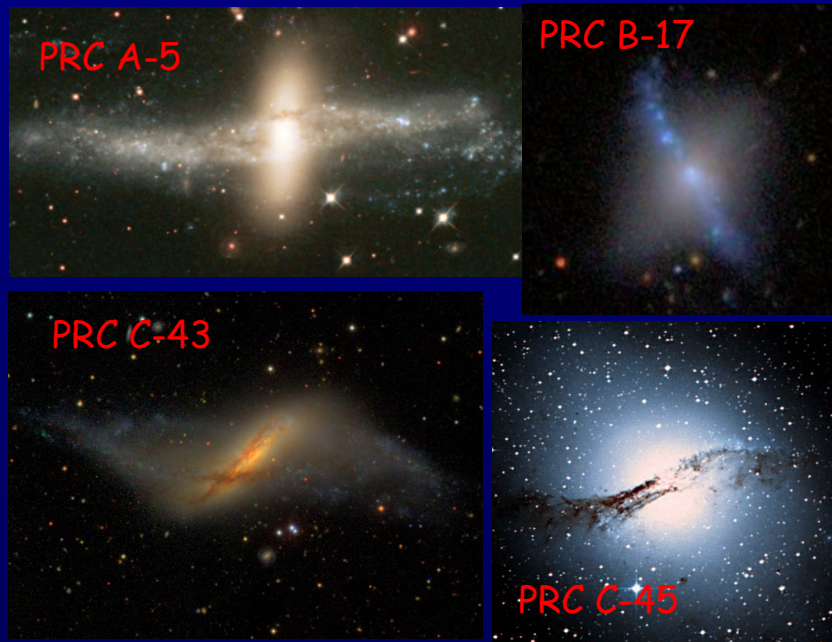


Figure 8. Map of the $[\text{O III}]\lambda 5007/\text{H}\beta$ (a) and $[\text{S II}]\lambda 6731/6717$ (b) line ratios. The $[\text{O III}]\lambda 5007$ isophotes are overlapped. In the case of sulphur lines, darker colours correspond to higher electron density.

Глава 4. Галактики с полярными кольцами....

Долгое время основной источник информации — каталог Whitmore et al (1990), содержащий 157 кандидатов из которых 33 — «уверенные» + «хорошие» ~25 кинематически подтвержденных



Почему это интересно?

- 1) Темп взаимодействия галактик
- 2) Трехмерная форма темного гало
- 3) «Холодная» аккреция газа

Новый каталог, основанный на SDSS:
275 кандидатов,
из них 185 — «уверенные» + «хорошие»

Moiseev et al. (2011, MNRAS)

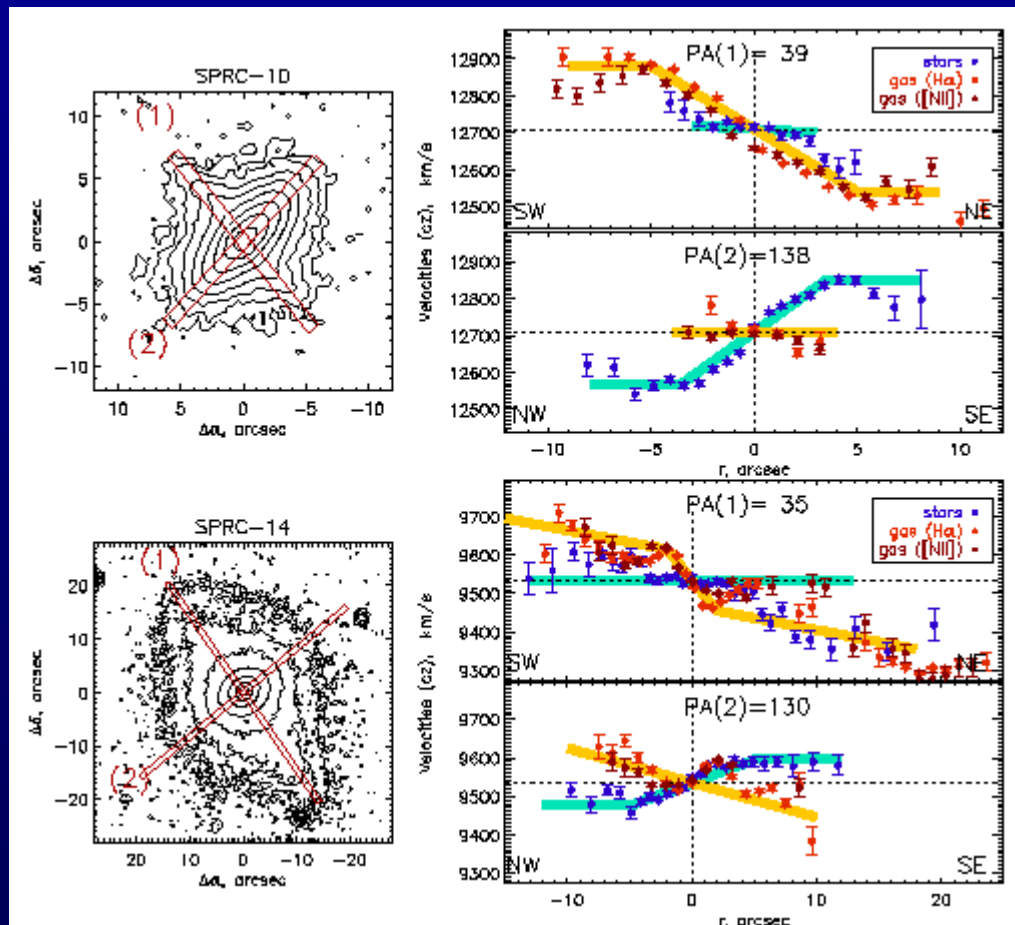
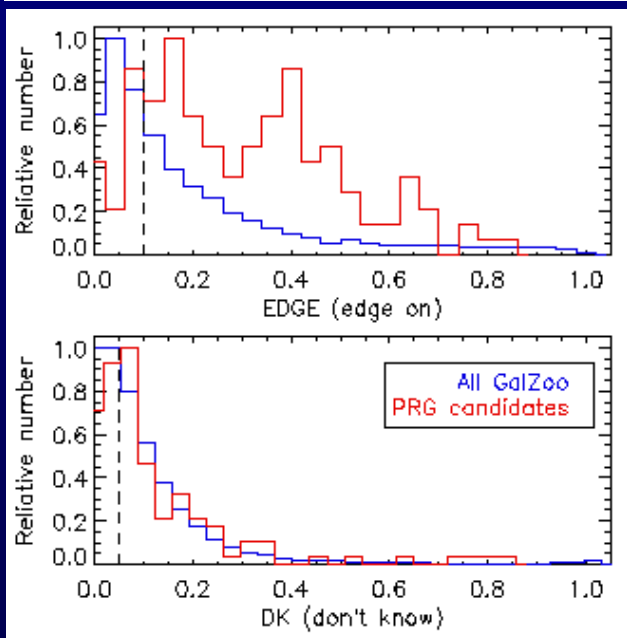
Глава 4. НОВЫЙ каталог (SPRC, Moiseev et al)

Типы GalaxyZoo (Lintott, et al 2010)

Class	Button	Description
1	●	Elliptical galaxy
2	⌚	Clockwise/Z-wise spiral galaxy
3	⌚	Anti-clockwise/S-wise spiral galaxy
4	⊙	Spiral galaxy other (eg. edge on)
5	✦	Star or Don't Know (eg. artefact)
6	☾	Merger

Table 1. Galaxy Zoo classification categories showing schematic symbols

$EDGE \geq 0.1, MG \geq 0.05, DK \geq 0.05$

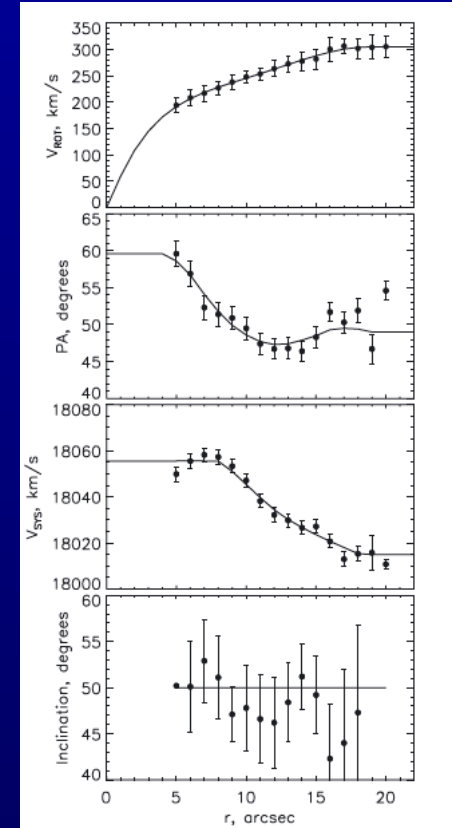
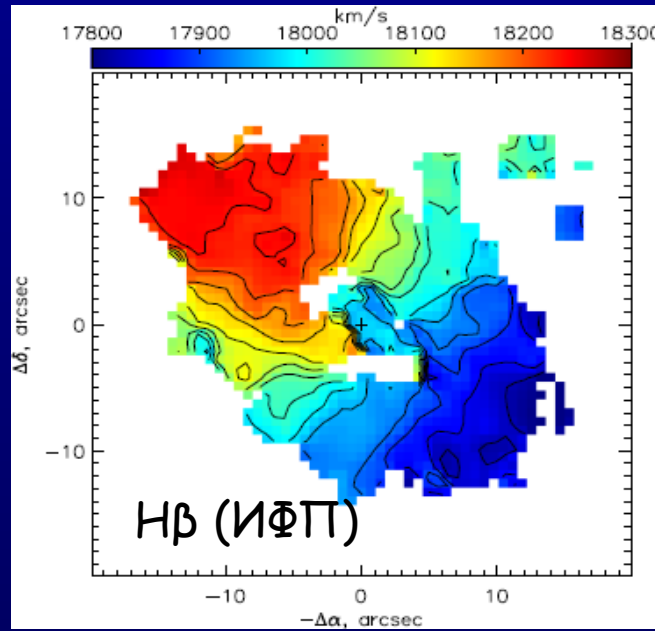


Спектральные наблюдения на БТА:
Из 6 кандидатов в 5 подтверждены полярные кольца

Данные форума + просмотр
41958 изображений

Глава 4. SDSS J075234.33+292049.8

Подтвержденное полярное кольцо на $z=0.06$

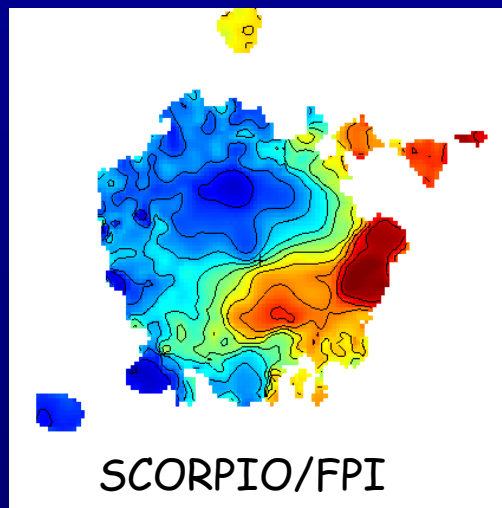
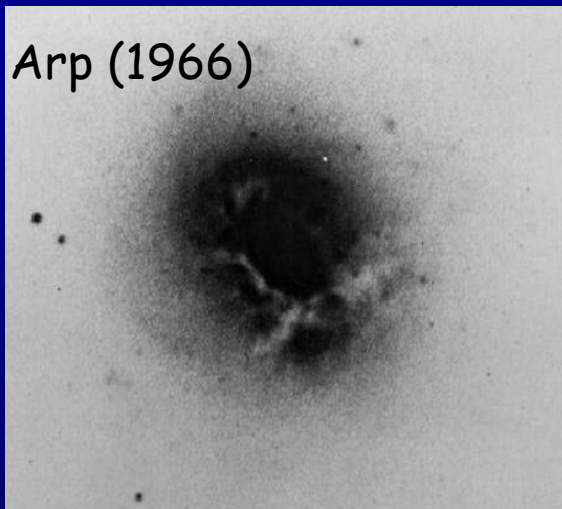


Далекий и гигантский аналог NGC4650A?



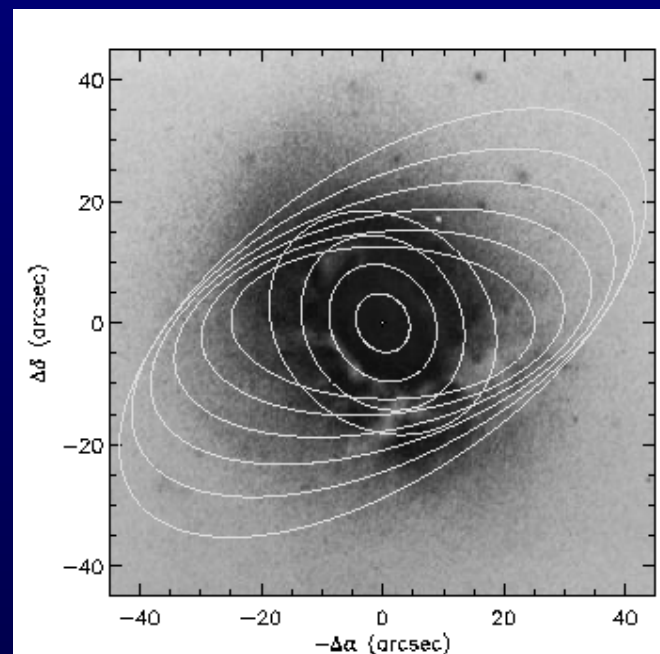
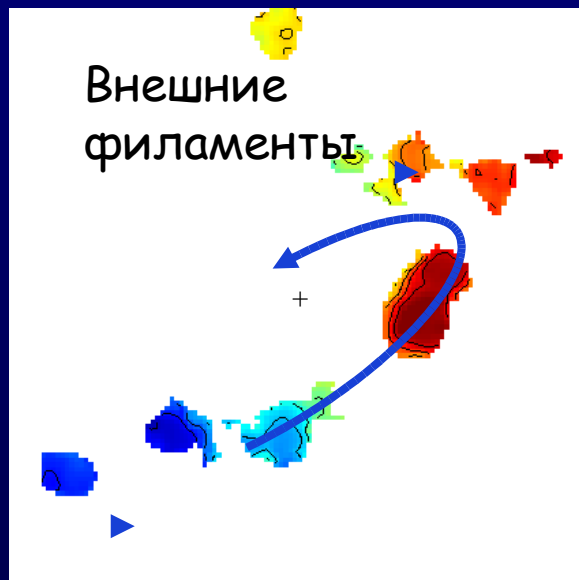
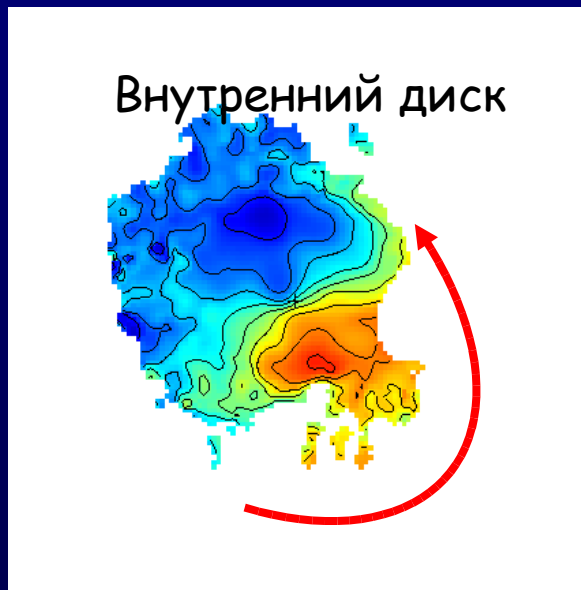
Гигантский ($D=48$ кpc) звездно-газовый диск, наклоненный на $\Delta i = 73 \pm 12^\circ$ относительно центральной S0 галактики.
 $M/L=20$

Глава 4. ... Изогнутый диск в Arp 10 ..



Внутренний диск ($r < 3.5$ кпк) - совпадает с плоскостью звездного диска

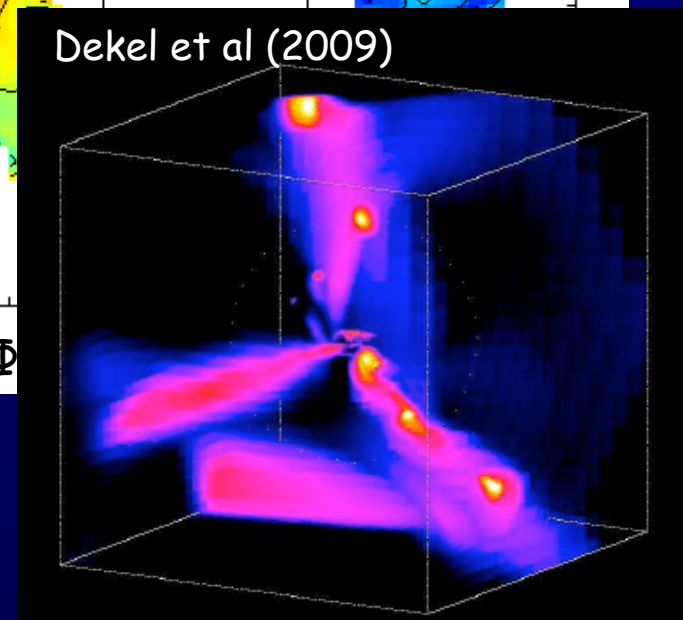
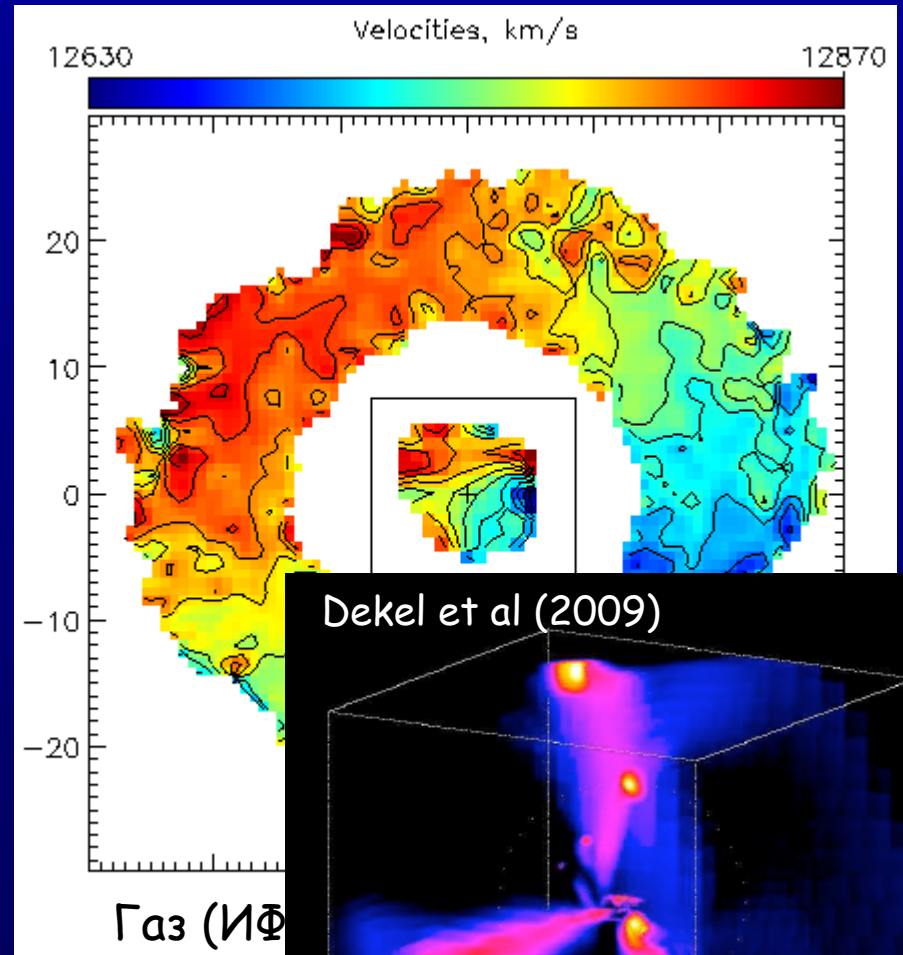
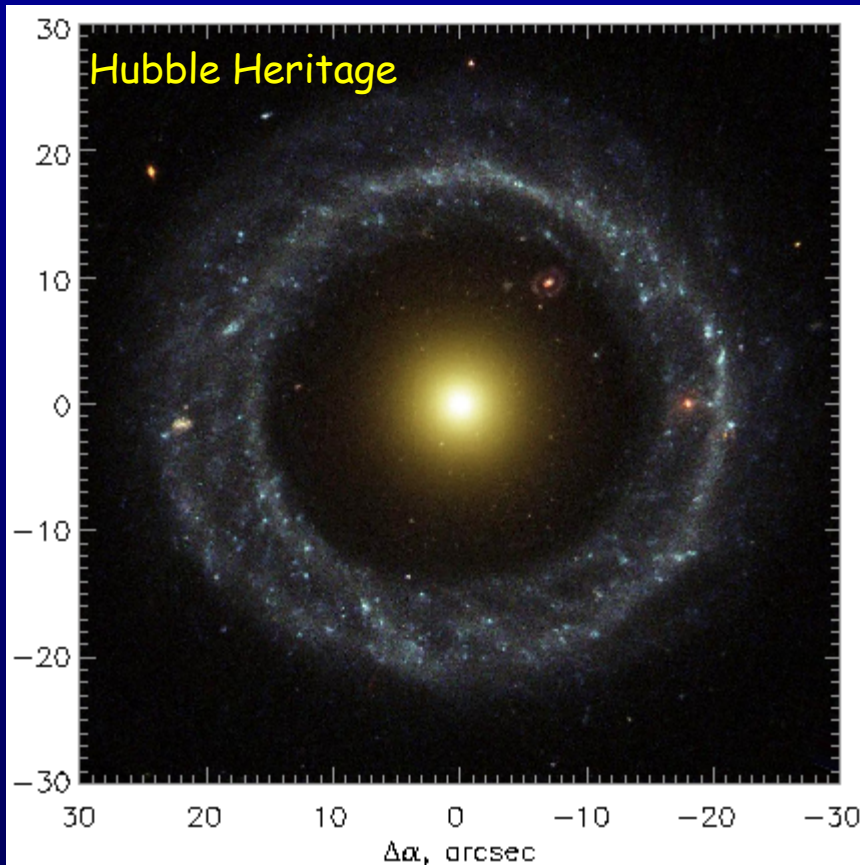
Внешние области ($r = 2-5.7$ кпк) - изогнутый диск, который с ростом расстояния приближается к полярной плоскости



аккреции HI с богатого газом спутника UGC12549

Moiseev (2008, AstroBul)

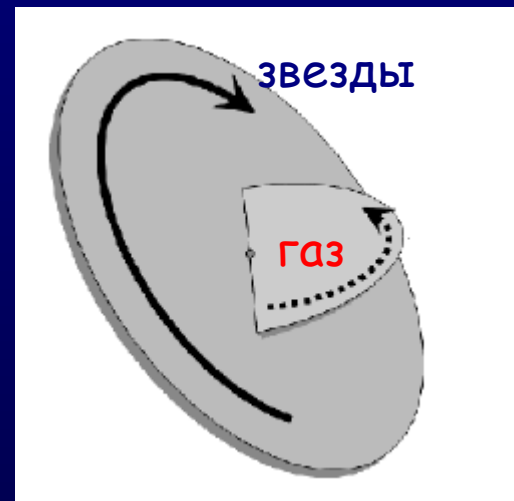
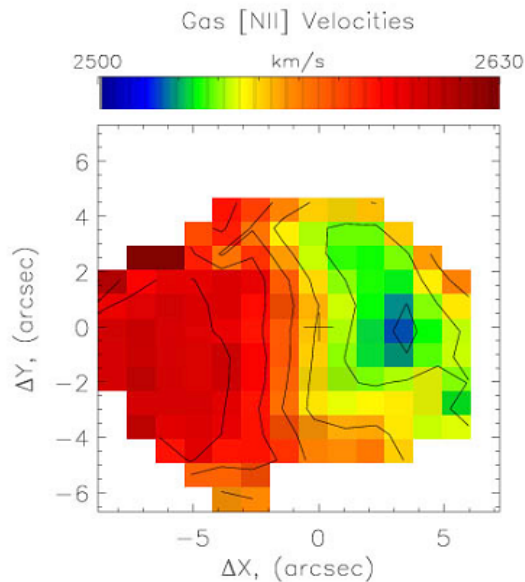
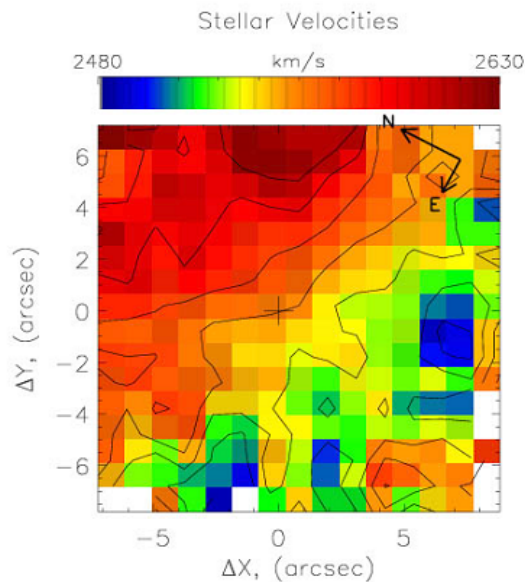
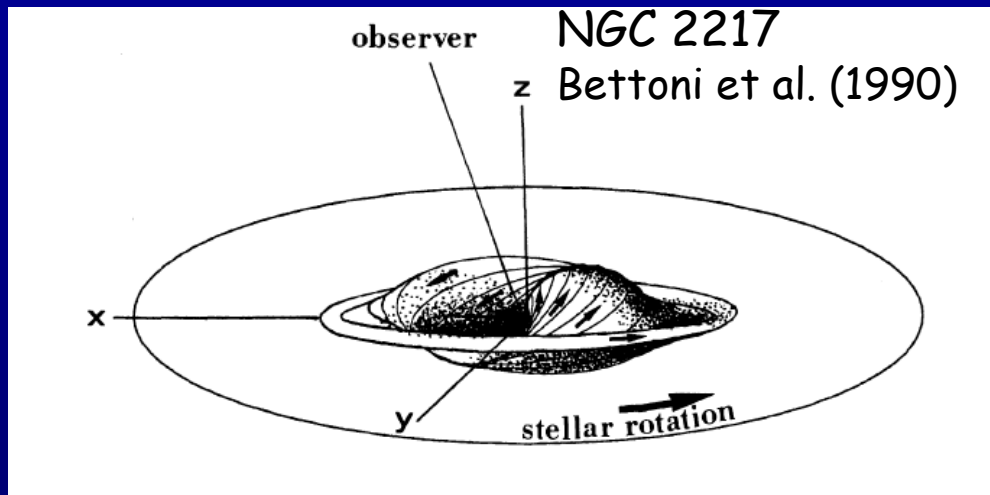
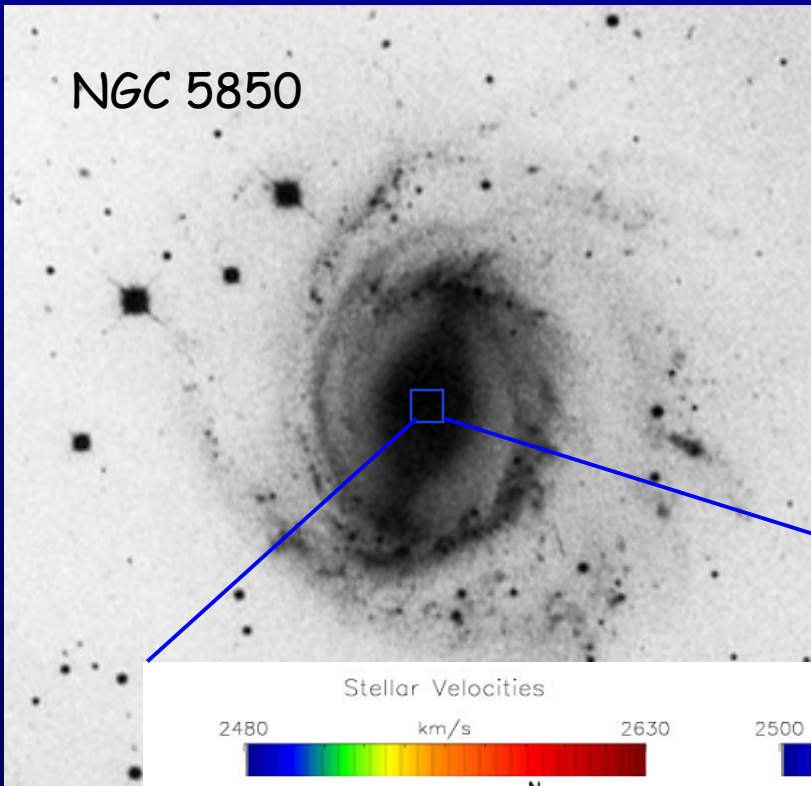
Глава 4. ... Hoag's object



Фотометрия + кинематика + анализ возраста
звездного населения центра и кольца:
Образование кольца в результате
продолжительной «холодной» аккреции газа
из филаментов межгалактической среды
примерно 5 млрд. лет назад

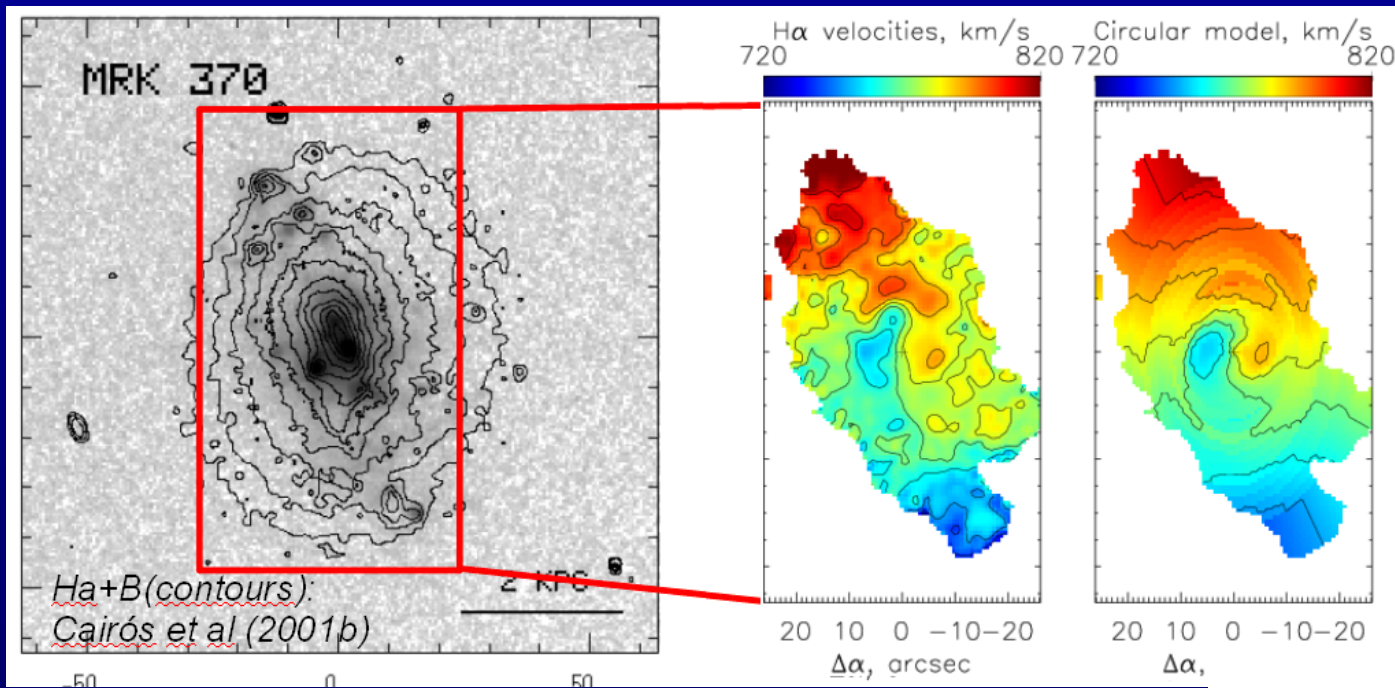
Глава 5. Внутренние полярные кольца и диски

NGC 5850

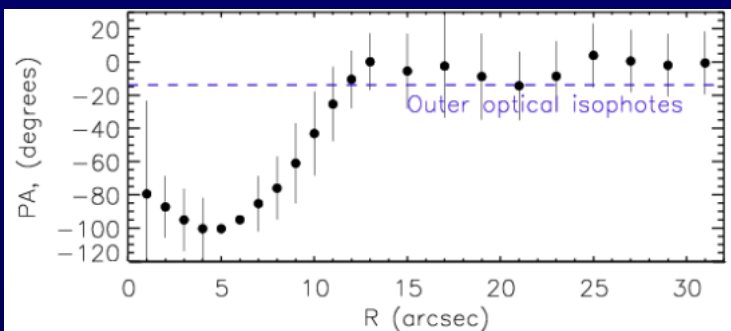


Moiseev, et al (2004, A&A)

Глава 5. ... Mrk 370: внутренний диск в BCDG



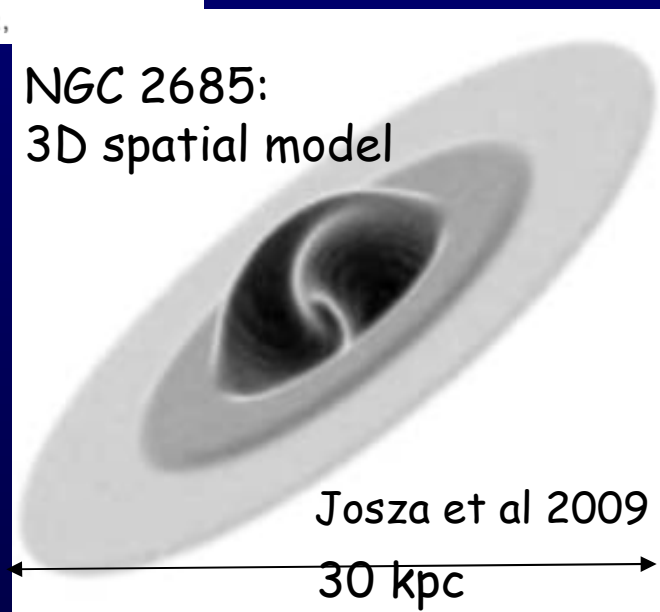
Moiseev
(2011, EAS proc.)



Аналог сильно
изогнутого диск
в NGC 2685 ?

На $r < 800$ pc, внутренний наклон
диск ионизованного газа меняется на
 $\Delta i = 55 - 70$ deg

NGC 2685:
3D spatial model



Josza et al 2009

30 kpc

Глава 5. ... список подтвержденных структур

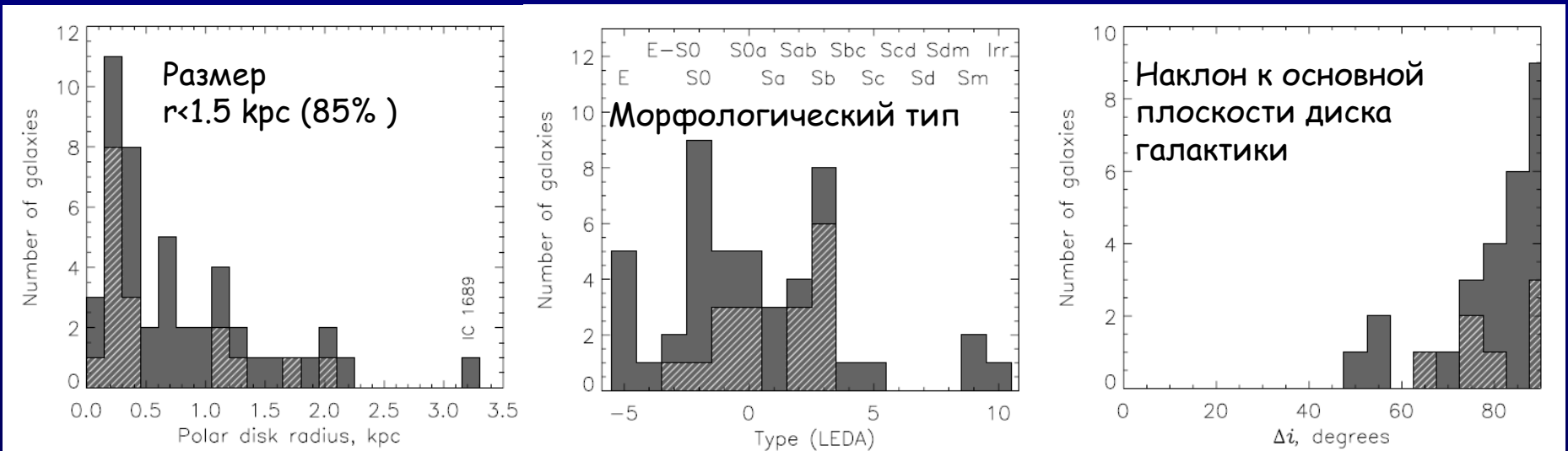
Corsini et al. (2003): список из 17 галактик

Sil'chenko & Afanasiev (2004): еще 8

В данной диссертации — обнаружено и исследовано 8 галактик

По литературе составлен новый список из 47 галактик

(из них 60% — найдено или подтверждено на 6-м телескопе)



Распространенность внутренних полярных структур:

- встречаются в галактиках ВСЕХ морфологических типов (от E до Irr)
- одинаково часто как в галактиках с перемычками, так и без них. Но если есть бар - то полярный диск ему перпендикулярен (стабилизация в трехосном потенциале)

Глава 5. ... связь с окружением...

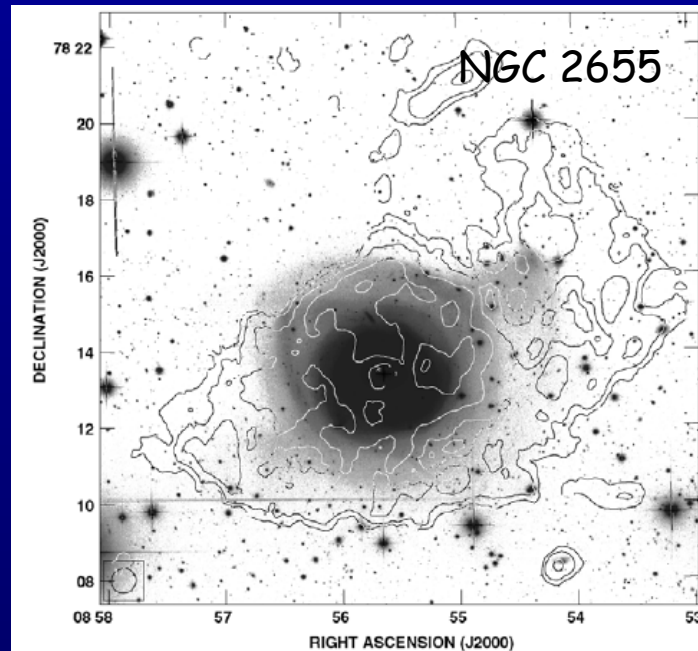
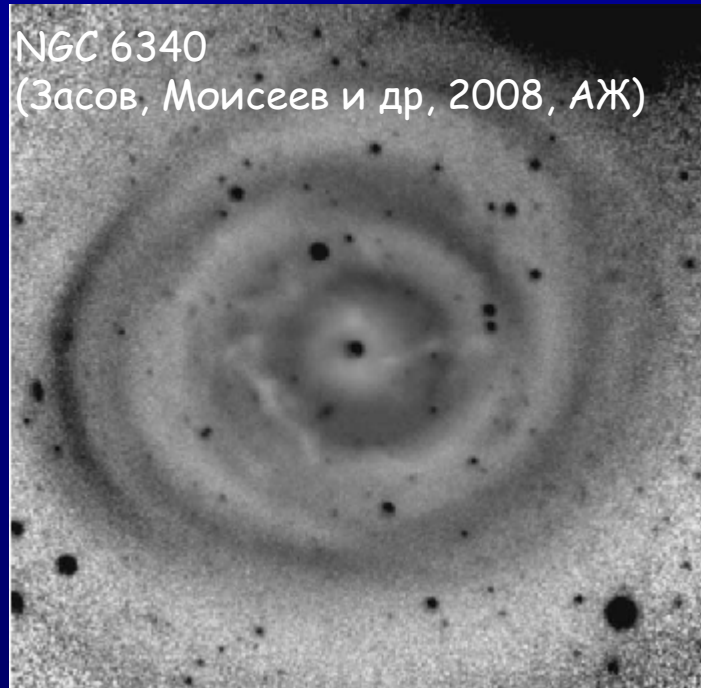
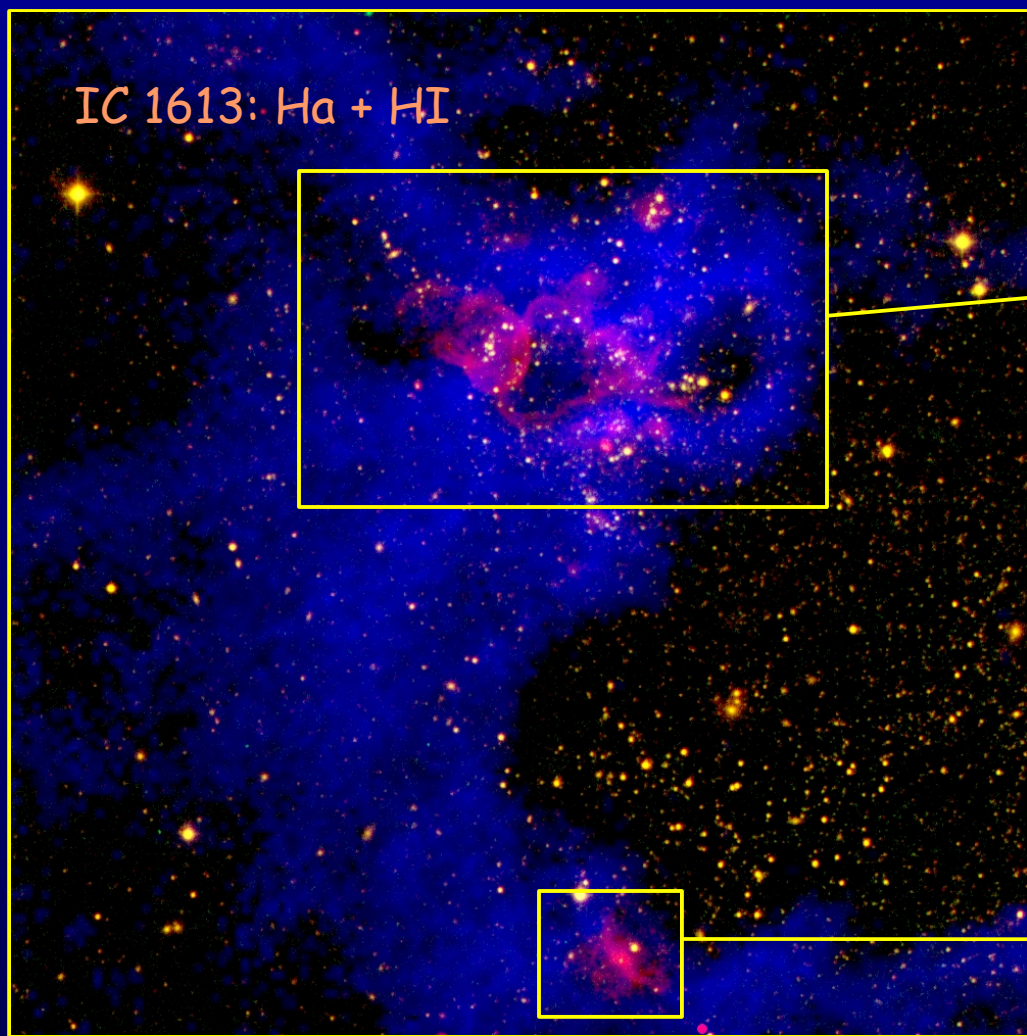


Figure 7. Total H I emission around NGC 2655 integrated over velocity.

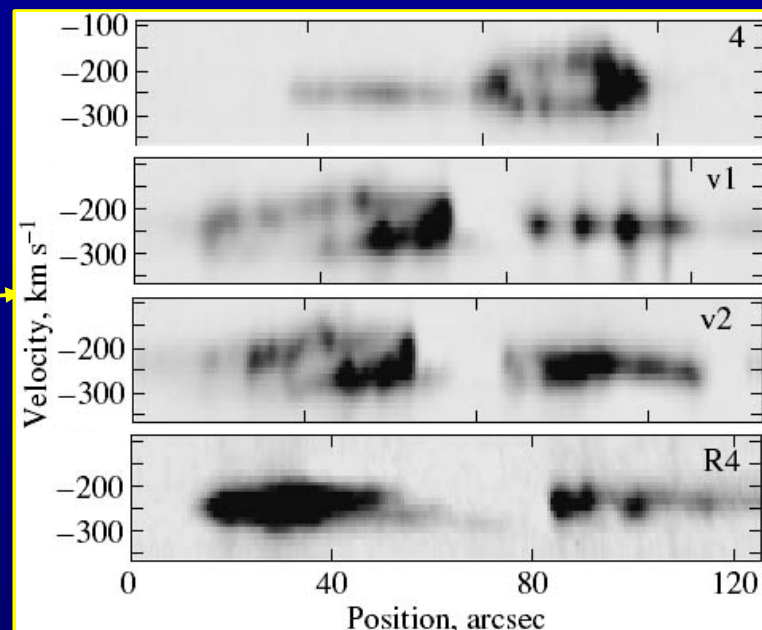
Противовращение газа/звезд: 9
Приливные структуры, взаимодействие,
внешние облака HI: 27

В $70 \pm 7\%$ галактик внутренние полярные структуры связаны с взаимодействием (поглощение спутников)

Глава 6. Истечения и оболочки в областях звездообразования

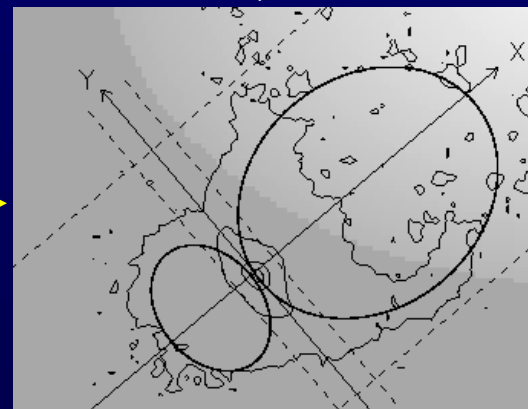


IC 1613: H α + H I



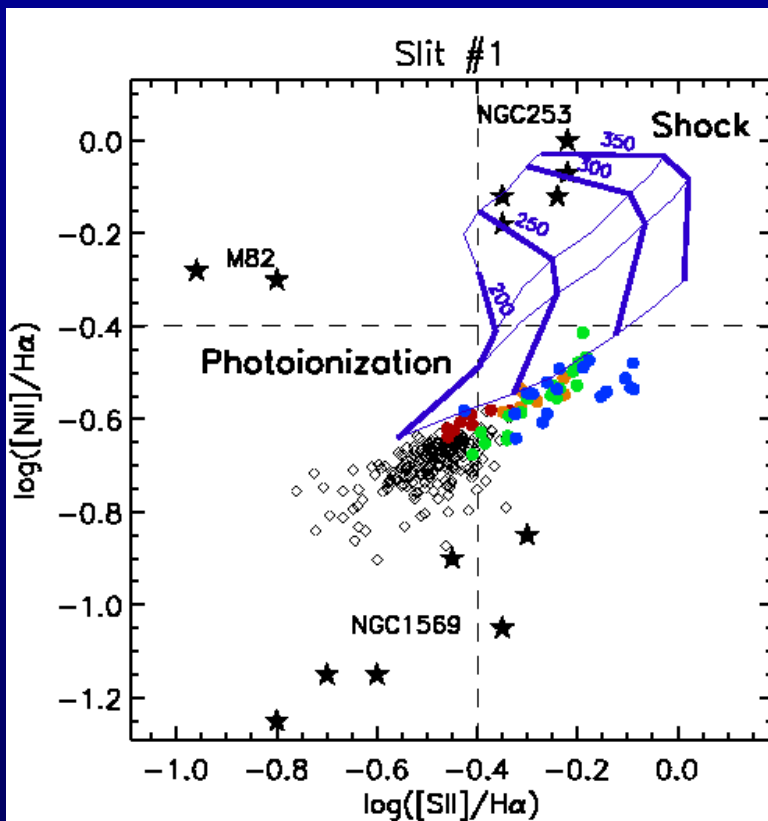
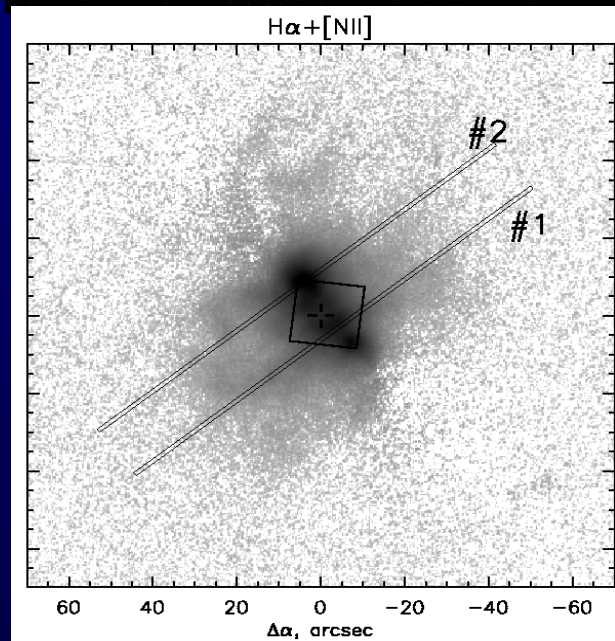
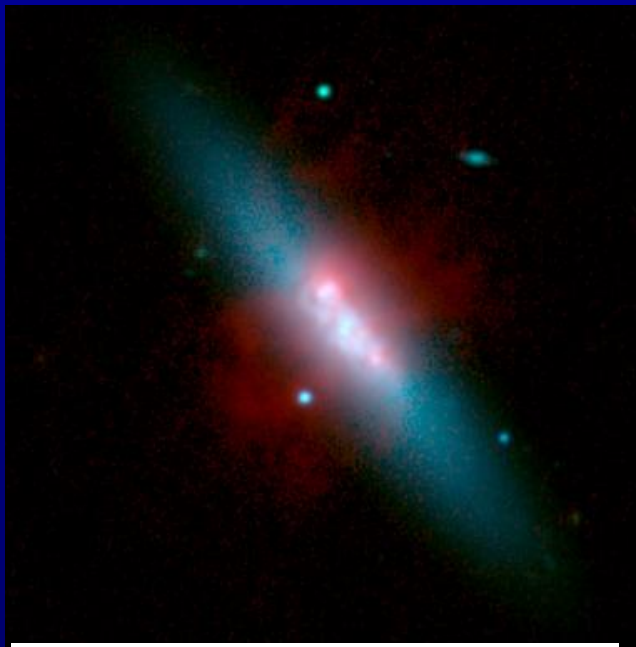
Возраст оболочек

H I: 5.3-5.6 млн. лет, H II: 0.6-2.2 млн. лет



Оболочка вокруг WO звезды: скорости расширения пузырей: 50 и 70 км/с, Td=0.1-1 млн.лет

Глава 6. ... галактический ветер в NGC 4460



Shock+precursor
(Allen et al., 2008)

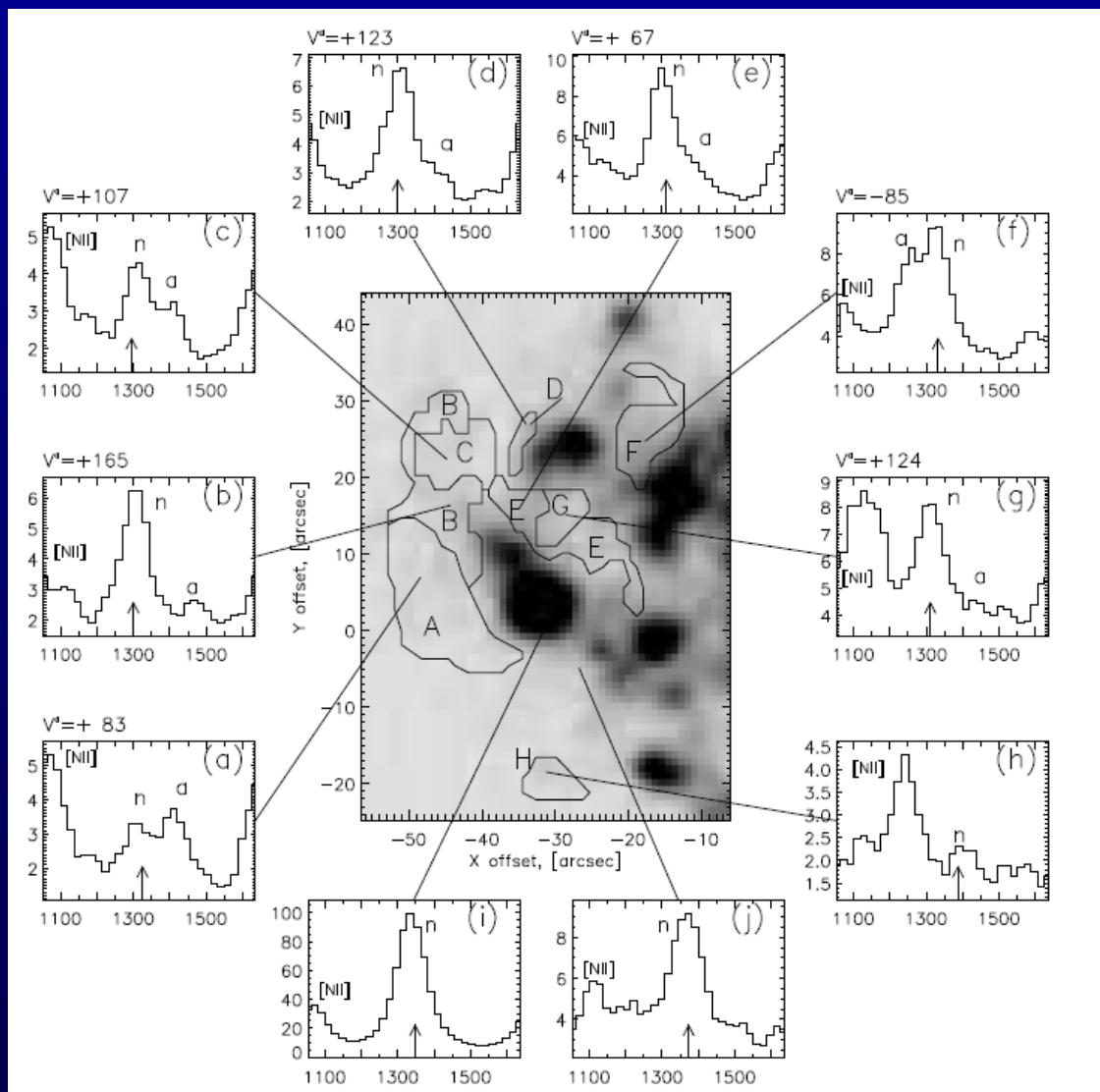
Параметры туманности объясняются выбросом газа над плоскостью галактики:

$V(\text{out})=100\text{-}130 \text{ km/s}$

$M(\text{wind})=1.7 \times 10^5 M_{\odot}$

$\tau(\text{dyn})=10 \text{ Myr}$

Глава 6. ... выбросы газа в NGC 1084



- размеры пекулярных областей: 1-3 кпк
- лучевые скорости: 100-200 км/с
- $[NII]/Ha > 1$ (ударное возуждение)

Обнаружены в 5 из 15 близких спиральных галактик, наблюдавшихся с ИФП на БТА.

“Галактические фонтаны”?

Moiseev (2000, A&A)
Fridman et al (2005, A&A)

Глава 7. Турбулентные движения газа в карликовых галактиках

Хаотические движения во внегалактических гигантских областях HII значимо сверхзвуковые, т.е. $\sigma_{\text{HII}} > 10-20 \text{ km/s}$ (Skillman & Balick, 1984; Melnik et al., 1987)

Механизмы уширения линий областей HII:

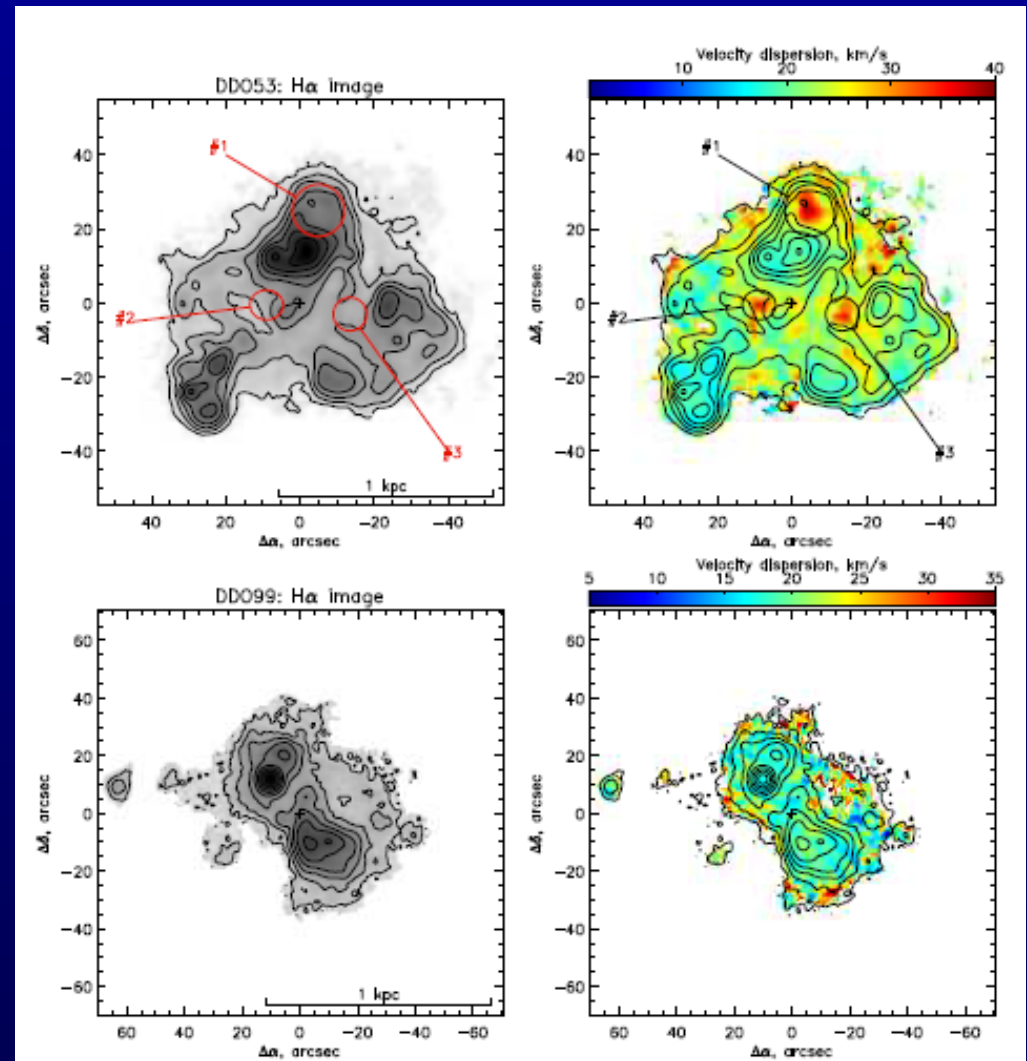
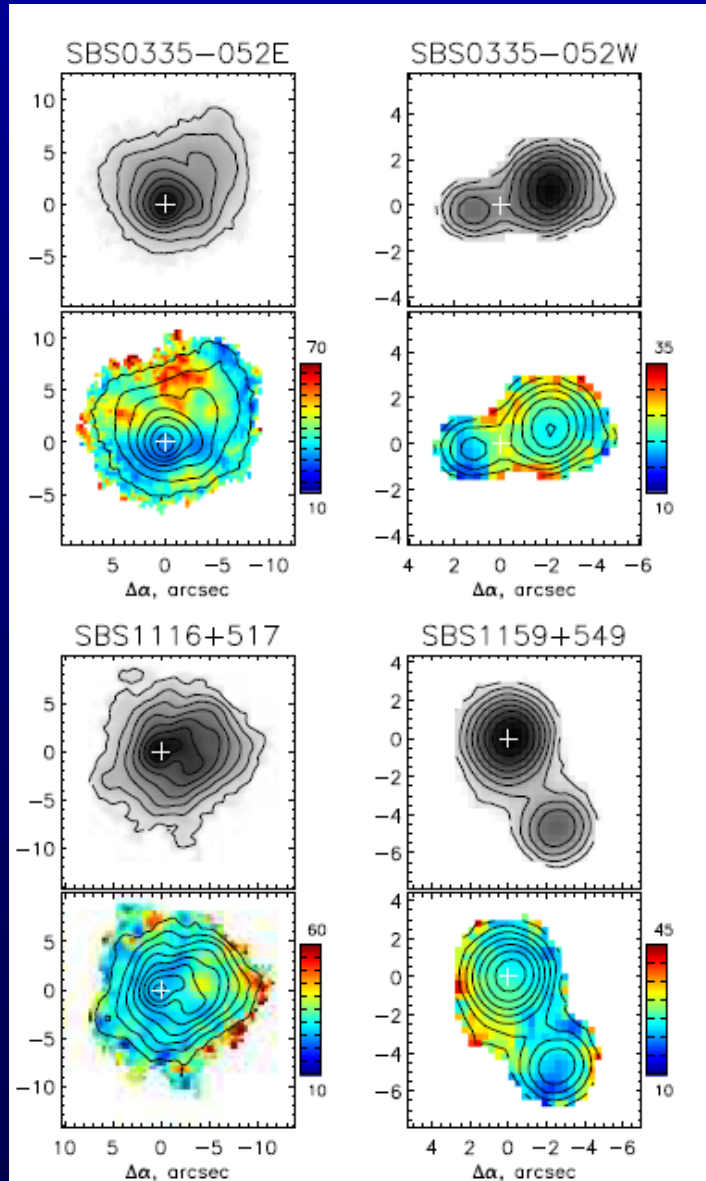
- (1) Тепловое уширение в областях HII $\sigma(\text{HII})=9.7 \text{ km/s}$ для $T=10000 \text{ K}$
- (2) Гравитация: вириальные движения газовых облаков и звезд, их ионизирующих (а также ветер с маломассивных звезд, дисперсия скоростей которых целиком определяется суммарным гравитационным потенциалом, Tenorio-Tagle, 1993)

Наблюдения интегральных свойств гигантских областей HII и голубых компактных галактик свидетельствуют в пользу именно этого механизма? (Terlevich & Melnick, 1981; Melnick et al., 1987-2000)

- (3) Кинетическая энергия от звездообразования: звездный ветер, вспышки сверхновых, расширяющиеся "пузыри" и оболочки.

Свидетельства в пользу связи SFR- σ : Dib et al (2006), Green et al (2010), и наши работы: Moiseev, Pustilnik, Kniazev (2010), Moiseev & Lozinskaya (2012)

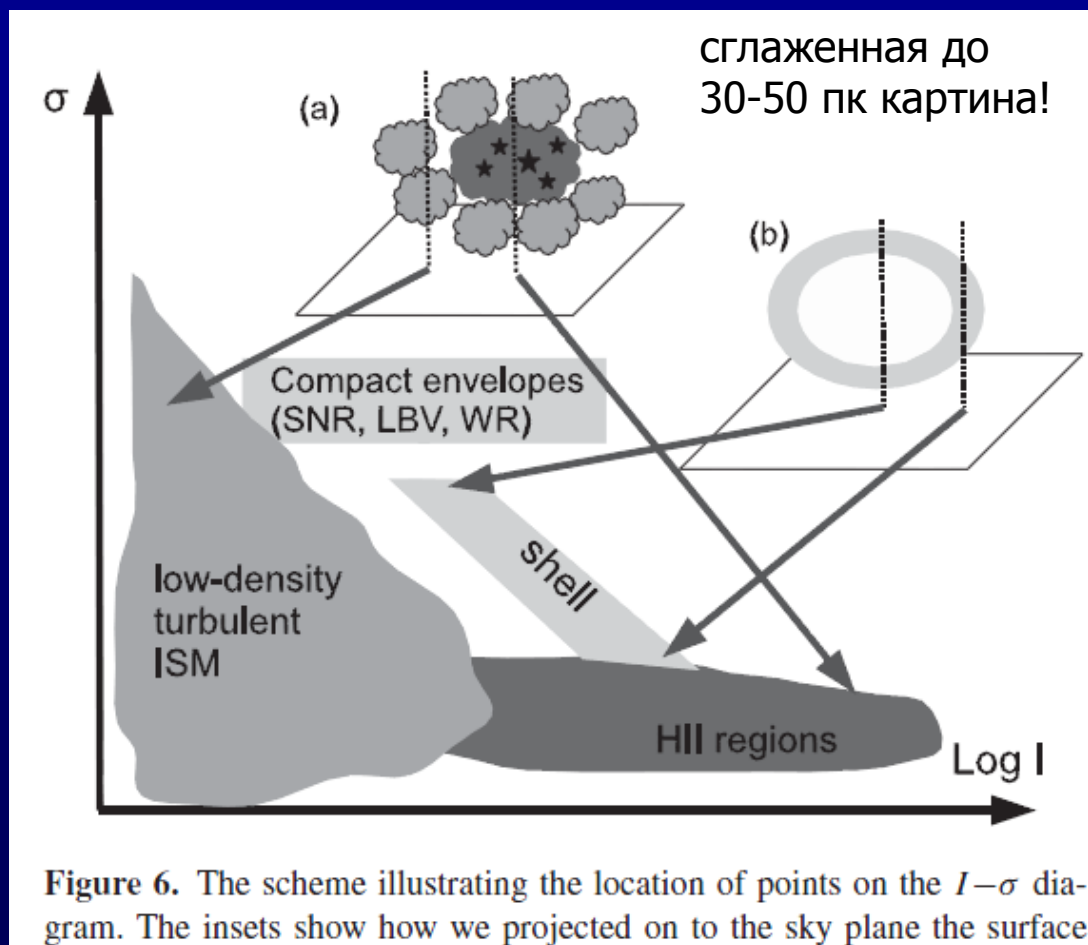
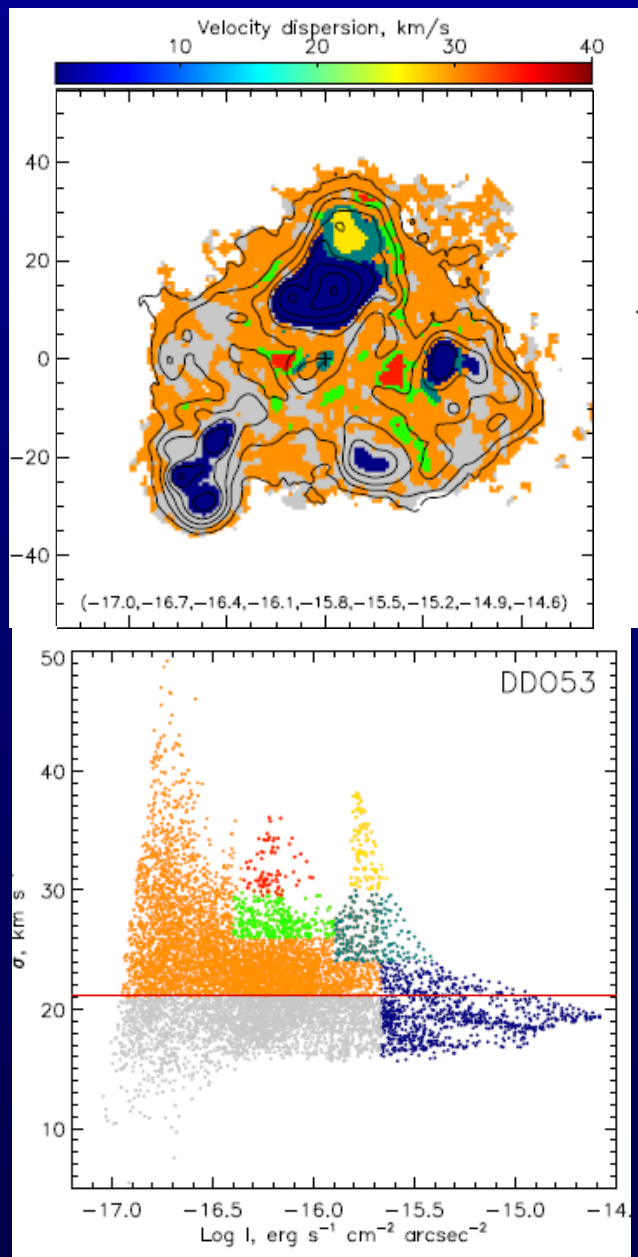
Глава 7. ...карты дисперсии скоростей в 22 галактиках



Moiseev & Lozinskaya (2012, MNRAS)

Moiseev, Pustilnik, Kniazev (2010, MNRAS)

Глава 7. ...диаграммы I-σ: короны горячего газа



“...поведение наблюдаемых распределений σ объясняется наличием у гигантских областей HII корон возмущенного газа низкой плотности с высокими турбулентными скоростями...”

Глава 7. ...поиск уникальных объектов

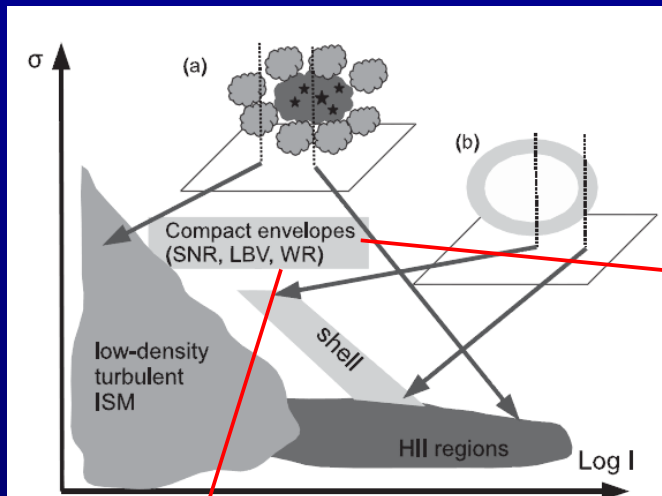
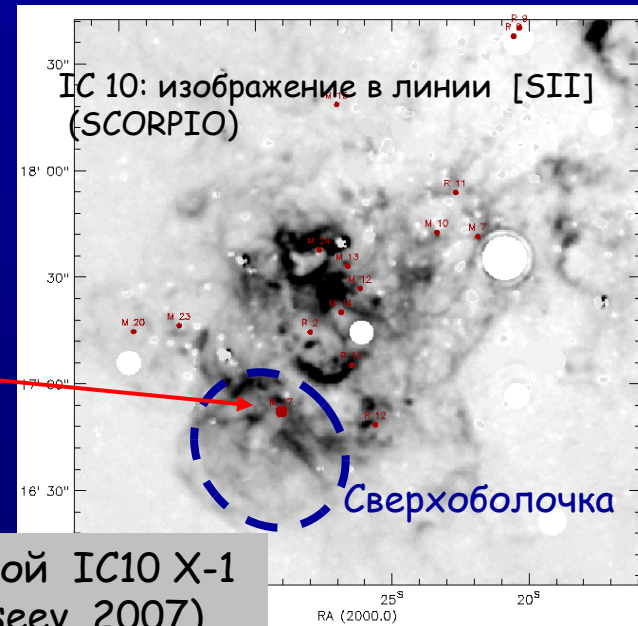
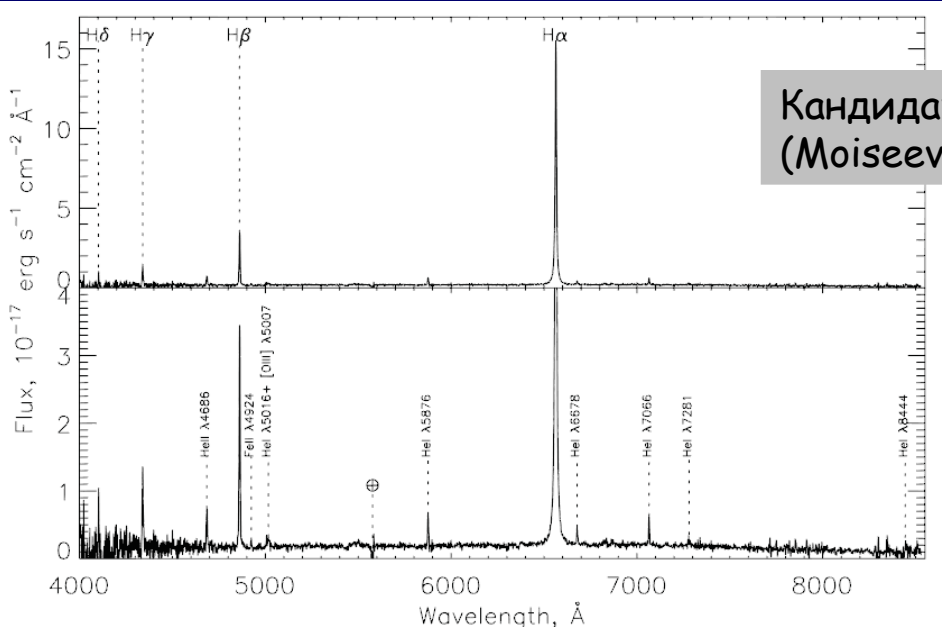
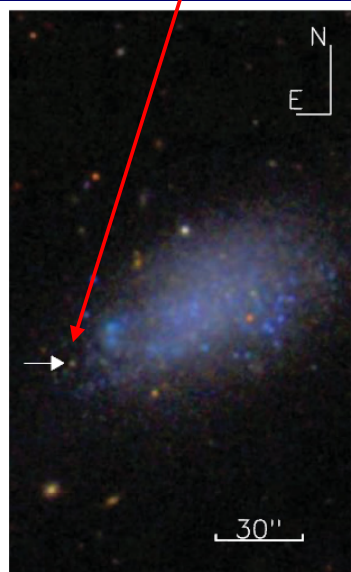


Figure 6. The scheme illustrating the location of points on the $I-\sigma$ diagram. The insets show how we projected on to the sky plane the surface



Остаток гиперновой IC10 X-1 (Lozinskaya & Moiseev, 2007)



Кандидат в LBV в UGC8508 (Moiseev & Lozinskaya, 2007)

Результаты, выносимые на защиту (1):

- 1) **Методика наблюдения и анализа данных**, позволяющая с помощью сканирующего интерферометра Фабри-Перо картировать распределение дисперсии скоростей ионизованного газа в галактиках и эмиссионных туманностях.
- 2) **Обнаружение противовращающихся компонент в ряде галактик ранних типов**: околядерных газовых и звездных дисков в NGC 1316 и NGC 3945, крупномасштабных газовых дисков в NGC 2551, NGC 5631 и NGC 7742. Вывод об ударной ионизации газа в случаях, когда плоскость вращения газового компонента наклонена под небольшим углом к звездному диску. Вывод об образовании противовращающихся компонент этих галактик в результате захвата богатых газом спутников. Наблюдательных свидетельства в пользу идеи генерации резонансных колец звездообразования в ходе такого взаимодействия.
- 3) **Результаты изучения галактик, испытавших лобовое столкновение с массивным компаньоном**. Обнаружение расширения и вертикальных движений в кольцах пекулярной галактики Arp 10, доказательства того, что кольцевые волны в диске являются результатом центрального столкновения со спутником, определение параметров столкновения. Наблюдательные аргументы, показывающие, что область аномальной ионизации в галактике Mrk 334 является местом недавнего столкновения с ядром разрушенной галактики-спутника.
- 4) **Результаты детального изучения кинематики газа в галактиках с внешними полярными или сильно наклоненными подсистемами**: в Arp212 обнаружен внешний газовый диск со сложной геометрией, а в SPRC-7 - гигантский звездно-газовый полярный диск. **Новый каталог галактики с полярными кольцами**, позволивший в несколько раз увеличить число надежных кандидатов в такие объекты. На основании наблюдений на 6-м телескопе САО РАН подтверждено существование внешних полярных колец в пяти галактиках каталога.

Результаты, выносимые на защиту (2):

- 5) Результаты изучения морфологии и кинематики уникальной кольцевой галактики - объекта Хога. Объяснение пекулярной структуры этой галактики холодной аккрецией газа из межгалактической среды на прародительницу -- эллиптическую галактику.
- 6) Обнаружение окооядерных газовых и звездно-газовых полярных и наклонных дисков в ряде галактик как ранних, так и поздних морфологических типов. Результаты статистического изучения наблюдаемых характеристик внутренних полярных структур. Наблюдательные аргументы в пользу их внешнего происхождения в результате поглощения галактик-спутников.
- 7) Результаты анализа внутренней кинематики ионизованного газа в ряде карликовых галактик Местного Объемы. Определение характеристик различных структур, образованных в результате воздействия молодых звездных группировок на межзвездную среду: гигантских расширяющихся оболочек в карликовых галактиках, биполярной туманности в IC 1613, возможного остатка Гиперновой в IC 10, галактического ветра в NGC 4460. Обнаружение высокоскоростных движений ионизованного газа вокруг областей звездообразования ряда близких спиральных галактик. Объяснение наблюдаемого распределения дисперсии скоростей ионизованного газа в карликовых галактиках наличием у областей HII корон возмущенного газа низкой плотности с высокими турбулентными скоростями.

Апробация

Результаты диссертации опубликованы в **57 работах**

Из них в **рецензируемых журналах** списка ВАК: **41**

MNRAS (12), ApJ (4), AJ(3), A&A (3), Rev Mex A&A (1)

ТАЖ (7), АЖ (4) Astro Bul. (7)

Основные результаты диссертации докладывались автором на семинарах и конкурсах научных работ в САО РАН, семинарах ГАИШ МГУ, ИКИ РАН, университета Тадуи, Канарского института астрофизики, Рурского университета Бохума, Южной европейской обсерватории, а также **на 11 всероссийских и 20 международных конференциях**, в том числе, в форме приглашенных докладов и лекций на следующих конференциях:

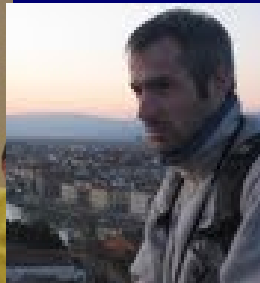
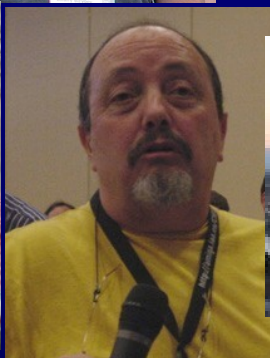
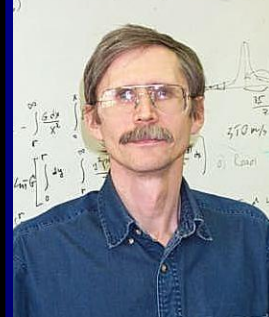
- 1) "First Byurakan International Summer School for Young Astronomers Observational Astrophysics", (Бюракан, 2006)
- 2) "6th Serbian Conference on Spectral Line Shapes in Astrophysics", (Сремски Карловцы, 2007)
- 3) "7th Serbian Conference on Spectral Line Shapes in Astrophysics", (Зренианин, 2009)
- 4) "Всероссийская астрономическая конференция" ВАК-2010, (Н. Архыз, 2010)
- 5) "Dynamics and evolution of disc galaxies", (Пушино, 2010)
- 6) "8th Serbian Conference on Spectral Line Shapes in Astrophysics", (Дивчибаре, 2011)
- 7) "Minor merging as a driver of galaxy evolution", JENAM-2011 (Санкт-Петербург, 2011)

Избранные публикации

- 1) **Moiseev A.V.** *Strong non-circular motions of gas in the spiral galaxy NGC 1084*, 2000, *A&A*, 363, 843
- 2) Лозинская Т.А., **Моисеев А.В.**, Афанасьев В.Л., Вилкотс Э., Госс М. ``Межзвездная среда вокруг WO звезды в галактике IC 1613: новые наблюдения в оптическом и радио диапазонах'', 2001, *АЖ*, 78, 235
- 3) **A.V.Moiseev** ``Reduction of the CCD-observations with scanning interferometer Fabry-Perot'', 2002, *Bull SAO*, 2002, v.54, p.74
- 4) **Moiseev A.V.**, Valdes J.R., Chavushyan V.H., ``Structure and kinematics of candidate double-barred galaxies'', 2004, *A&A*, 421, 433
- 5) Афанасьев В.Л., **Моисеев А.В.**, ``Универсальный редуктор светосилы 6-м телескопа SCORPIO'', 2005, *ПАЖ*, 31, с. 214
- 6) Sil'chenko O.K., **Moiseev A.V.**, ``Nature of nuclear rings in unbarred galaxies: NGC 7742 and NGC 7217'', 2006, *AJ*, 131, 1336
- 7) D.V. Bizyaev, **A.V. Moiseev**, E.I. Vorobyov, ``Propagating star formation in the collisional ring galaxy Arp 10'', 2007, *ApJ*, 662, 304
- 8) **Моисеев А.В.**, Егоров О.В. , ``Обработка ПЗС-наблюдений со сканирующим интерферометром Фабри-Перо. II Дополнительные процедуры'', 2008, *Астр. Бюлл.*, 63, 193
- 9) **Моисеев А.В.**, ``Изогнутое полярное кольцо в галактике Arp 212'', 2008, *Астр. Бюлл.*, 63, 215
- 10) Sil'chenko O.K., **A.V. Moiseev**, V.L. Afanasiev ``Two more disk galaxies with global gas counterrotation'', 2009, *ApJ*, 694, 1550
- 11) Brosch N., Kniazev A., **Moiseev A.**, Pustilnik S., ``On the Nature of the Apparent Ring Galaxy SDSS J075234.33+292049.8'', 2010, *MNRAS*, 401, 2067
- 12) Smirnova A., **Moiseev A.** ``3D spectroscopy of merger Seyfert galaxy Mrk 334: nuclear starburst, superwind and the circumnuclear cavern'', 2010, *MNRAS*, 401, 307
- 13) **A.V. Moiseev**, I.D. Karachentsev, S.S. Kaisin, ``Ionized gas outflow in the isolated S0 galaxy NGC 4460'', 2010, *MNRAS*, 403, 1849
- Katkov I. Yu., **Moiseev A.V.**, Sil'chenko O.K. , ``Stars and ionized gas in S0 galaxy NGC 7743: an inclined large-scale gaseous disk'', 2011, *ApJ*, 740, 83
- Moiseev A.V.**, Smirnova K.I., Smirnova A.A., Reshetnikov V.P. ``A new catalogue of polar-ring galaxies selected from the SDSS.'', 2011, *MNRAS*, 418, p. 244

СПАСИБО ЗА ВНИМАНИЕ !





Огромное спасибо всем, чей труд продолжает поддерживать работу Большого Азимутального Телескопа!

