

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM FÍSICA

---

**Efeitos da Interação na  
Cinemática, Morfologia e Dinâmica  
das Galáxias em Fusão Menor:  
AM 1219-430, AM 2058-381 e  
AM 1228-260\***

José Andrés Hernández Jiménez

---

Tese realizada sob orientação da Professora Dra. Miriani Pastoriza e do Professor Dr. Charles Bonatto e apresentada ao Instituto de Física da UFRGS em preenchimento parcial dos requisitos para a obtenção do título de Doutor em Ciências.

Porto Alegre

Janeiro, 2015

---

\*Trabalho financiado pelo CNPq.

*Para os meus pais, Martha e José.  
Vocês foram essenciais para eu chegar até aqui.*

# Agradecimentos

Este é sem duvida um dos momentos mais especiais da elaboração da tese. Foram muitas as pessoas que de uma ou outra forma contribuíram durante tudo o caminho do doutorado. Quero portanto escrever umas linhas de agradecimento sincero para elas:

- A minha orientadora a Professora Miriani Pastoriza. Pelos seus ensinamentos, preocupação, dedicação, motivação e paciência. Por ajudar-me a “convergir” com tudo esse “monte de dados”. Para mim foi uma experiencia única ter compartilhado durante tudo este tempo com uma excelente pesquisadora.
- Ao meu co-orientador o Professor Charles Bonato. Chave nos momentos importantes. Sobre tudo nas correções dos artigos.
- Ao Professor Irapuan Rodrigues. Pelos seus ensinamentos sobre simulações numéricas e sua generosidade em compartilhar os seus códigos. Minha visita na UNIVAP foi de grande aprendizado e produtividade.
- As Professoras Cláudia Winge e Ângela Krabbe, que fizeram o processo de redução dos dados, e que pacientemente resolveram todas minhas dúvidas sobre os dados observados.
- Aos meus colegas e amigos que me ajudaram de alguma maneira no trabalho, em particular ao Daniel Ruschel pela sua valiosa ajuda na correção do texto. Também pelas discussões científicas no quadro da sala e claro pelo culto ao PYTHON; ao David Sanmartim pela ajuda na redução de dados, espectroscopia, discussões sobre resultados, procedimentos, e pela amizade; ao Daniel Drehmer pelas discussões sobre estatística e estimativas de erro; a Natacha Dametto por convidar-me para colaborar no seu artigo; ao Guilherme Couto pelas discussões sobre modelos de choques e diagramas diagnósticos, e por ser junto com Natacha os anfitriões nas entretenidas e divertidas jogatinas; a Eduardo Balbinot

e Guilherme Ferrari pelas discussões sobre PYTHON e coisas computacionais; Rogério Riffel e Dinalva Aires pelas discussões sobre temas de trabalho.

- Aos meus colegas e amigos da UFRGS, em particular a David, Daniel, Jáderson, Guilherme, Natacha, Ane, Balbinot, Guilherme Ferrari, Rodrigo, Daniel Drehmer, Dinalva, Cíntia, Andressa, Cris, Pablo, Marialex, Camilo, Alejandra, Álvaro, Pablo Valverde. Aos meus amigos e colegas do departamento de Astronomia. Aos meus colegas da sala M204, a sala mais divertida da Pós!, obrigado pelos tantos momentos descontraídos e de confraternização durante meu tempo de mestrado e doutorado, muito obrigado amigos.
- Aos programadores e desenvolvedores de PYTHON e seus mais valiosos pacotes, como NUMPY, SCIPY e MATPLOTLIB. A toda a comunidade Linux, em especial aos desenvolvedores de Ubuntu, prestam um inestimável serviço à humanidade. Muito Obrigado Mesmo!!
- Ao Governo Brasileiro pela oportunidade de estudo. Eternamente grato a esta terra, o Brasil é minha segunda Casa. Obrigado Brasil!!
- A minha namorada Paola pela acompanhamento, paciência, compressão, apoio, animo e amor durante estes 4 anos. Foi tudo mais fácil por estar tu ao meu lado, Obrigado Honey!!
- A minha Família, meus Pais Martha e José. Sem eles não houvesse chegado até aqui, sem duvida seu amor e apoio foram uma fonte inesgotável de energia durante tudo este período. O mais difícil foi ficar longe de vocês. Gracias Mamá, Gracias Papá los amo!!!!.

José Andrés Hernández Jiménez

*Universidade Federal do Rio Grande do Sul  
Janeiro 2015*

# Resumo

Apresentamos a investigação das características morfológicas, cinemáticas e dinâmicas das interações menores AM 1219-430, AM 2058-381 e AM 1228-260. Estas características foram obtidas através de uma nova metodologia desenvolvida durante o trabalho de doutorado, para o estudo de sistemas em interação menor. As observações utilizadas são imagens nas bandas  $g'$  e  $r'$ , e espectros com fenda longa no intervalo obtidos com o *Gemini Multi-Object Spectrograph* do Telescópio Gemini Sul.

As magnitudes aparentes e absolutas das componentes A e B dos pares estudados foram calculadas. A razão de luminosidade entre as componentes do par AM 1219-430 é de 1:3, de AM 2058-381 é de 1:5, e de AM 1228-260 é de 1:20. Detectamos e quantificamos diferentes tipos de estruturas de maré nos pares estudados. No par AM 1219-430, foram encontrados uma ponte de interação conectando as galáxias, além de longas caudas de maré na galáxia secundária. Para a galáxia principal de AM 2058-381 foram encontradas duas longas caudas de maré. No sistema AM 1228-260, encontramos uma estrutura de maré envolvendo as duas componentes. Utilizamos um método de simetrização para separar as partes assimétricas e simétricas das galáxias dos pares estudados. As estruturas encontradas nas imagens assimétricas podem ser associadas às perturbações morfológicas causadas pela interação. Por outro lado, as imagens simétricas mostram o que pode ser considerado como o “disco original” e o padrão espiral não perturbado. Empregando as imagens simétricas das galáxias dos pares, fizemos a decomposição do perfil de brilho superficial de cada uma delas. A galáxia AM 1219A foi decomposta nas componentes bojo e disco. Porém, seu perfil de brilho superficial tem um excesso de luz de  $\sim 53\%$ . Por outro lado, a decomposição do brilho superficial de AM 1219B, além de conter as componentes do bojo e o disco, revela a existência de uma lente. A decomposição do perfil de brilho superficial das galáxias principais dos pares AM 2058-381 e AM 1228-260 também apresenta subestruturas, como barras e anéis. Enquanto o perfil de brilho das galáxias secundárias só foi decomposto nas componentes bojo e disco. As escalas de comprimento e as magnitudes centrais da componente do disco das galáxias estudados concordam com os valores médios derivados para galáxias isoladas. No entanto, os discos das galáxias principais dos pares AM 2058-381 e AM 1228-260 estão fora da correlação entre estes parâmetros. Por outro lado, os índices de Sérsic ( $n$ ) são menores que 2 para todas as galáxias, valores típicos de pseudo-bojos.

Os perfis de velocidade radiais (PVRs) são derivados das linhas de emissão do gás ionizado. Eles apresentam irregularidades em todas as galáxias. Em particular, as galáxias principais dos pares AM 1219-430, AM 2058-381 têm PVRs assimétricos, com um aumento de velocidade dos lados próximos às galáxias secundárias. Por outro lado, há uma forte evidência que a galáxia secundária do par AM 2058-381 sofreu uma inversão do seu eixo de rotação, enquanto que o PVR de AM 1228B está totalmente perturbado.

Utilizamos um método de força bruta para explorar todas as possíveis distribuições entre as matérias estelar e escura nas galáxias principais dos pares estudados. Os parâmetros do halo ( $M_{200}$  and  $c$ ) encontrados para AM 1219A e AM 2058A são similares aos reportados para a Via láctea, entretanto, os parâmetros de AM 1228A são totalmente diferentes. As massas dos halos das galáxias AM 1219A e AM 2058A são  $\sim 10$  vezes maiores que o halo de AM 1228A. As razões  $M/L_r$  encontradas para as galáxias AM 1219A, AM 2058A, e AM 1228A são 2.19, 3.05 e 1.37, respectivamente. O valor encontrado de  $M/L_r$  para AM 2058A está de acordo com o valor médio,  $M/L_r = 4.5 \pm 1.8$ , reportado para galáxias isoladas do tipo tardio estudadas por Broeils & Courteau (1997). Os baixos valores de  $M/L_r$  para as galáxias AM 1219A e AM 1228A podem ser devidos à intensa atividade de formação estelar desencadeada pela interação.

Foi reconstruída a historia dinâmica do sistema AM 1219-430 através de simulações numéricas de N-corpos e hidrodinâmicas usando o código GADGET-2. A órbita que melhor reproduz as características observadas é uma órbita parabólica com uma passagem perigaláctica de  $q = 9.2$  kpc; O estágio atual do sistema indica que este pode estar a  $\sim 220$  Myr depois da passagem perigaláctica.

# Abstract

We present an observational study of the interaction effect on the photometric, morphology and dynamics of the minor mergers AM 1219-430, AM 2058-381 and AM 1228-260. This work is based on  $r'$  and  $g'$  images and long-slit spectra obtained with the Gemini Multi-Object Spectrograph at the Gemini South Telescope.

Apparent and absolute magnitudes were determined for the A and B components of the pairs. The luminosity ratio between A and B components of AM 1219-381 is 1:3, of AM 2058-381 is 1:5, and of AM 1228-260 is 1:20. We detected different kind of tidal structures in these pairs. We detected tidal tails in AM 1219B and a bridge of material connecting the galaxies. Tidal features in the form of a common surface brightness envelope for AM 1228-260 and two long symmetric tails for AM 2058A, were detected. It was applied a method to separate both the two-fold symmetric and non-symmetric parts of the spiral galaxy pattern. The decomposition of the surface brightness profile is performed in the symmetrized images. The surface brightness profile of AM 1219A was decomposed into bulge and disk components. The profile shows a light excess of  $\sim 53\%$ . On the other hand, the surface brightness profile of AM 1219B shows a lens structure in addition to the bulge and disk. The surface brightness profiles of the main galaxies of the pairs AM 2058-381 e AM 1228-260 show a bar and a ring structures in addition to the bulge and disk, while the secondary galaxies of these pairs are decomposed only in bulge and disk structures. The scale lengths and central magnitudes of the disk structure of all the studied galaxies agree with the average values derived for galaxies with no sign of ongoing interaction or disturbed morphology. The Sérsic index ( $n < 2$ ) and the effective and scale radii of the bulge of the 6 galaxies are typical of pseudo-bulges.

The observed radial velocities profiles (RVPs) derived from the emission line of ionized gas present several irregularities. The RVP of AM 1219A is quite asymmetric, suggesting a gas perturbed by interaction. The receding side of the RVP of AM 2058A is displaced with respect to the velocity field model, which can be interpreted as if this part of the galaxy is speeding up, and/or as if it is being deviated from the galactic plane due to interaction with AM 2058B, while there is a strong evidence that the latter galaxy is a tumbling body rotating along its major axis. The RVPs for AM 1228A indicate a misalignment between the kinematic and photometric major axes. The RVP for AM 1228B is quite perturbed, very likely due to the interaction with AM 1228A.

We explore all possible values of stellar mass and dark matter. The overall best-fitting solution for the halo parameters ( $M_{200}$  and  $c$ ) for both AM 1219A and AM 2058A are similar to those of the Milky Way and M 31. The halo mass of AM 1228A is roughly ten times smaller than those of AM 1219A and AM 2058A. We derive mass-to-light (M/L) ratios of 2.19, 3.05 and 1.37 for AM 1219A, AM 2058A and AM 1228A, respectively. The M/L of AM 2058 agrees with the mean value derived

for late-type spirals, while the low M/L values for AM 1219A and AM 2058A may be due to the intense star formation ongoing in those galaxies.

We reconstructed the history of the AM 1219-430 system through numerical N-body/hydrodynamical simulations by using GADGET-2 code, with the result indicating that the current stage of the merger would be about 220 Myr after perigalactic passage.



# Sumário

<b>Agradecimentos</b> . . . . .	<b>ii</b>
<b>Sumário</b> . . . . .	<b>viii</b>
<b>Lista de Tabelas</b> . . . . .	<b>xi</b>
<b>Lista de Figuras</b> . . . . .	<b>xiii</b>
<b>Lista de Abreviaturas</b> . . . . .	<b>xvi</b>
<b>1 Introdução</b> . . . . .	<b>8</b>
1.1 Estruturas de maré . . . . .	9
1.2 Formação estelar . . . . .	12
1.3 Perturbações na cinemática . . . . .	12
1.4 Interações menores . . . . .	13
1.5 Motivação e Objetivos . . . . .	16
1.6 Seleção dos pares de estudo . . . . .	17
1.6.1 AM 1219-430 . . . . .	18
1.6.2 AM 2058-381 . . . . .	19
1.6.3 AM 1228-260 . . . . .	20
<b>2 Observação e redução dos dados</b> . . . . .	<b>23</b>
2.1 Redução das imagens . . . . .	23
2.1.1 Calibração fotométrica . . . . .	26
2.1.2 Determinação do nível de fundo do céu . . . . .	27
2.2 Restauração das imagens das galáxias . . . . .	29
2.3 Redução das observações espectroscópicas com fenda longa . . . . .	31

<b>3</b>	<b>Análise fotométrica</b>	<b>38</b>
3.1	Estruturas de maré	38
3.2	Luminosidades das galáxias e suas estruturas de maré	41
3.3	Método Elmegreen	44
3.3.1	Inclinação dos discos galácticos	48
3.4	Análise do perfil de brilho das galáxias	51
3.5	Resultado da decomposição do perfil de brilho das galáxias	54
3.5.1	Parâmetros do disco	57
3.5.2	Parâmetros do bojo	60
3.5.3	Parâmetros das estruturas secundárias	63
3.5.4	Relações bojo e disco	63
<b>4</b>	<b>Cinemática das galáxias dos pares estudados</b>	<b>66</b>
4.1	Medidas das linhas de emissão	66
4.2	Curvas de rotação	68
<b>5</b>	<b>Dinâmica das galáxias principais dos pares</b>	<b>83</b>
5.1	Modelos de massa	83
5.1.1	Modelo de bojo	84
5.1.2	Modelo do disco	85
5.1.3	Modelo do halo	86
5.1.4	Curva de rotação final	87
5.2	Distribuição da Matéria Escura e Massa Estelar	90
5.2.1	Resultados do ajuste	92
5.2.2	Projeções do campo de velocidade modelado sobre os perfis de velocidades radiais	96
5.2.3	Curva de rotação final	99
5.2.4	Razões massa-luminosidade	101
<b>6</b>	<b>Simulação do par AM 1219-430</b>	<b>102</b>
6.1	Vínculos para simulações numéricas	111
6.1.1	Estruturas de maré	112
6.1.2	Estruturas bojo-disco	114
6.1.3	Distribuição de matéria bariônica e escura das componentes dos pares	115

<b>7 Conclusões e perspectivas</b> . . . . .	<b>117</b>
7.1 Sumário . . . . .	117
7.2 Legado . . . . .	121
7.3 Perspectivas . . . . .	122
<b>Referências</b> . . . . .	<b>124</b>
<b>Artigos referente a este trabalho</b> . . . . .	<b>141</b>
<b>Artigo em colaboração</b> . . . . .	<b>142</b>

# Lista de Tabelas

2.1	Informações gerais das observações com imagens . . . . .	25
2.2	<i>Seeing</i> das imagens . . . . .	25
2.3	Constantes de calibração para as imagens . . . . .	27
2.4	Níveis do fundo do céu . . . . .	28
2.5	Informações gerais das observações com fenda longa . . . . .	34
2.6	Velocidades sistêmicas para cada galáxia . . . . .	35
2.7	Distâncias adotadas para os sistemas estudados. . . . .	37
3.1	Magnitudes e luminosidades das galáxias dos pares estudados . . . . .	42
3.2	Ângulos de posição e de inclinação dos discos das galáxias estudadas. . . . .	49
3.3	Parâmetros estruturais do disco . . . . .	57
3.4	Parâmetros estruturais do bojo . . . . .	61
3.5	Parâmetros estruturais das componentes secundárias . . . . .	64
3.6	Luminosidades das componentes principais e secundárias . . . . .	65
4.1	Velocidade radial dos espectros da fenda com AP=162° sobre AM 1219A	76
4.2	Velocidade radial dos espectros da fenda com AP=350° sobre AM 2058A	77
4.3	Velocidade radial dos espectros da fenda com AP=42° sobre AM 2058A	78
4.4	Velocidade radial dos espectros da fenda com AP=350° sobre AM 2058B	79
4.5	Velocidade radial dos espectros da fenda com AP=319° sobre AM 1228A	80
4.6	Velocidade radial dos espectros da fenda com APs de 10° e 20° sobre AM 1228A . . . . .	81
4.7	Velocidade radial dos espectros da fenda com AP=315° sobre AM 1228B	82
5.1	Parâmetros cinemáticos do modelo fenomenológico. . . . .	90
5.2	Intervalos explorados para os modelos dinâmicos. . . . .	91
5.3	Parâmetros dinâmicos para os modelos de melhor ajuste de AM 1219A, AM 2058A e AM 1228A. . . . .	92

5.4	Parâmetros geométricos para os modelos de melhor ajuste de AM 2058A e AM 1228A . . . . .	93
5.5	Comparação dos parâmetros do halo derivados para as galáxias principais com os de outras galáxias . . . . .	94
5.6	Massas acumuladas das componentes das galáxias principais . . . . .	101
6.1	Parâmetros das simulações . . . . .	109

# Lista de Figuras

1.1	Exemplos clássicos de sistemas com caudas e ponte de maré . . . . .	10
1.2	Exemplos das simulações de Toomre & Toomre (1972) . . . . .	11
1.3	Árvore de função de simulações de formação galáctica . . . . .	14
1.4	Imagem de AM 1219-430 principais características morfológicas . . . . .	19
1.5	Imagem de AM 2058-381 principais características morfológicas . . . . .	20
1.6	Imagem de AM 1228-260 principais características morfológicas . . . . .	21
2.1	Curva de transmissão espectral dos filtros do SDSS . . . . .	24
2.2	Regiões seleccionadas para o cálculo do céu e seu histograma . . . . .	28
2.3	Imagens antes (esquerda) e depois (direita) do processo de restauração para as galáxias do sistema AM 1219-430 . . . . .	31
2.4	Imagens antes (esquerda) e depois (direita) do processo de restauração para as galáxias do sistema AM 2058-381 . . . . .	32
2.5	Imagens antes (esquerda) e depois (direita) do processo de restauração para a galáxia AM 1228B . . . . .	32
2.6	Curva de transmissão espectral da rede B600_G5323 . . . . .	33
2.7	Exemplo de uma imagem bidimensional espectral . . . . .	35
2.8	Aberturas extraídas ao longo das fendas observadas nas galáxias estudadas	36
3.1	Estruturas de maré de AM 1219-430 . . . . .	39
3.2	Estruturas de maré de AM 2058-381 e AM 1228-260 . . . . .	40
3.3	Método Elmegreen aplicado às galáxias de AM 1219A . . . . .	46
3.4	Método Elmegreen aplicado às galáxias dos pares AM 2058-381 e AM 1219-260 . . . . .	47
3.5	Contornos das isofotas externas utilizadas para calcular o ângulo de posição e a inclinação dos discos galácticos . . . . .	50

3.6	Decomposição do perfil de brilho superficial das galáxias AM1219A e AM1219B . . . . .	55
3.7	Decomposição do perfil de brilho superficial das galáxias AM2058A, AM2058B, AM1228A e AM1228B . . . . .	56
3.8	Distribuição de valores do raio de escala de uma amostra de galáxias isoladas e em interação/fusão <i>edge-on</i> . . . . .	58
3.9	A magnitude superficial central ( $\mu_0$ ) versus o comprimento de escala do disco ( $h$ ) . . . . .	59
3.10	Perfil de brilho superficial do disco da galáxia AM2058A dado como exemplo da mudança que poderia ter sofrido por causa da interação .	60
3.11	Magnitude superficial efetiva ( $\mu_e$ ) versus o raio efetivo ( $re$ ) . . . . .	62
4.1	Ajuste de gaussianas sobre linhas de emissão na galáxia AM1219A . .	67
4.2	Ajuste de gaussianas sobre linhas de emissão na galáxia AM1219B . .	67
4.3	Cinemática ao longo da fenda com AP=162° da galáxia AM1219A . .	69
4.4	Cinemática ao longo da fenda com AP=25° da galáxia AM1219B . .	69
4.5	Cinemática ao longo das fendas com APs 350°, 125°e 42° da galáxia AM2058A . . . . .	71
4.6	Cinemática ao longo das fendas com APs 350°e 94°da galáxia AM2058B	72
4.7	Cinemática ao longo das fendas com APs 319°, 10°e 20°da galáxia AM1228A . . . . .	73
4.8	Cinemática ao longo das fendas com AP 315 da galáxia AM1228B . .	74
4.9	Evolução da curva de rotação para simulação de uma fusão menor . .	75
5.1	Projeção do espaço de $\chi^2$ sobre os planos $\log(M_{200}/M_*)-c$ e $\Upsilon_b-\Upsilon_d$ . .	95
5.2	Modelo do campo de velocidades para AM2058A . . . . .	97
5.3	Modelo do campo de velocidades para AM1228A . . . . .	98
5.4	Modelos das curvas de rotação . . . . .	100
6.1	Modelos das curvas de rotação para a simulação . . . . .	104
6.2	Modelos da orientação do disco de AM1219A e AM1219B . . . . .	105
6.3	órbita prógrada . . . . .	106
6.4	Capturas da evolução temporal do sistema AM1219-430 em orbitas testes . . . . .	107
6.5	Gráfico da órbita que melhor reproduz o sistema . . . . .	108
6.6	Capturas da evolução temporal do sistema AM1219-430 . . . . .	110

6.7	Comparação entre a curva de rotação numérica e observada . . . . .	111
6.8	Exemplo de órbita para o sistema . . . . .	113
7.1	4 pares da nossa amostra de Winge (2015) . . . . .	123



# Lista de Abreviaturas

**AGN** *active galactic nucleus*

**GMOS** *Gemini Multi-Object Spectrograph*

**IRAF** *Image Reduction and Analysis Facility*

**NASA** *National Aeronautics and Space Administration*

**NED** *NASA Extragalactic Database*

**LIRG** *Luminous Infrared Galaxy*

**PVR** *Perfil de Velocidade Radial*

**AP** *Ângulo de Posição*

# Capítulo 1

## Introdução

Vorontsov-Velyaminov (1959) e Arp (1966) foram os primeiros a classificar “galáxias peculiares” no hemisfério Norte. Muitos desses objetos formam parte de pares ou grupos de galáxias em interação ou fusão. Em um trabalho posterior, Arp & Madore (1987) estenderam o catálogo para galáxias do hemisfério Sul. A partir desses trabalhos, o número de estudos sobre esses objetos tem aumentado exponencialmente. Hoje, sabemos que os eventos em interação e fusões representam importantes mecanismos na evolução de galáxias (ver a revisão de Struck 2006). As interações entre pares de galáxias podem ser divididas em maiores ou menores, de acordo com a razão de massa entre elas. São classificadas como menores as interações que envolvem uma razão de massa maior que 3. Estas interações são de particular interesse, pois ocorrem com uma frequência pelo menos uma ordem de magnitude maior que as interações maiores (Hernquist & Mihos, 1995). O melhor exemplo deste tipo de interação é a Via Láctea que, junto com as Nuvens de Magalhães, forma um pequeno grupo de interação – a massa da Via Láctea é da ordem de 10 vezes maior que a da Grande Nuvem de Magalhães (Schwarzkopf & Dettmar, 2000).

No catálogo de Arp & Madore (1987), os pares são classificados em diferentes categorias; dentro dessa classificação estamos interessados em interações menores que estejam na categoria 1 (galáxias com uma companheira interagente) e na categoria

9 (galáxias tipo M51). Segundo o catálogo Arp & Madore (1987), pode-se resumir as características destes grupos como segue:

- Categoria 1: cada galáxia tem uma pequena companheira próxima que parece estar causando uma perturbação ou ela mesma se apresenta perturbada.
- Categoria 1a (forte interação com braços espirais): as espirais tem braços bem resolvidos, permitindo observar facilmente o efeito da interação.
- Categoria 1b (forte interação com a galáxia principal): todas as galáxias mostram uma forte interação. Na maioria dos casos, distorções de maré podem ser observadas nas duas galáxias.
- Categoria 1c : a galáxia principal está geralmente bastante perturbada, porém, as galáxias companheiras estão a uma distância relativamente grande.
- Categoria 1d (perturbações menores): estas galáxias frequentemente estão separadas por uma distância maior que nas anteriores subcategorias.
- Categoria 9 (galáxias de tipo M51): galáxias que apresentam a companheira unida à estrutura espiral. Estes pares são classificados de acordo com o tamanho relativo da companheira, a resolução dos braços espirais e o tipo de companheira.

A seguir, faremos um breve resumo das principais características dos sistemas em interação: perturbações morfológicas, incremento na atividade de formação estelar, e perturbações no campo de velocidade das estrelas e do gás das galáxias interagentes.

## 1.1 Estruturas de maré

As perturbações morfológicas mais comuns nas interações de galáxias são as estruturas filamentosas, como as caudas de maré ou as pontes de interação, compostas de gás, poeira e estrelas (ver a revisão de Duc & Renaud 2013). Na Fig. 1.1 são apresentados

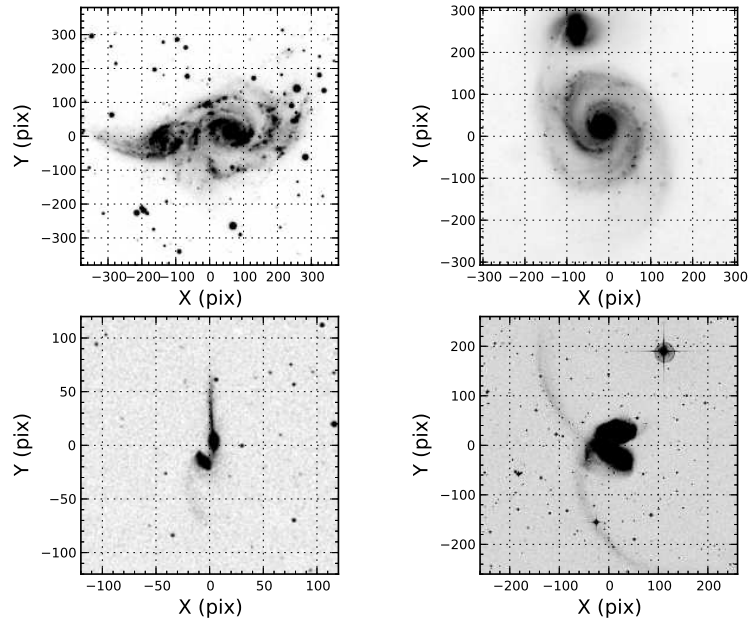


Figura 1.1: Acima, da esquerda à direita, NGC 2207/IC 2163 e M 51 (*Whirlpool*); abaixo: NGC 4676/77 (*Mice*) e NGC 4038/39 (*Antennae*). Objetos do catálogo de Arp (1966), as imagens estão disponíveis no *NASA/IPAC Extragalactic Database (NED)*, *Level 5*.

sistemas em interação famosos por esse tipo de fenômenos; como NGC 2207/IC 2163, M 51 (*Whirlpool*), NGC 4676/77 (*Mice*), e NGC 4038/39 (*Antennae*). Em um trabalho fundamental para o entendimento destes fenômenos, os irmãos Toomre (Toomre & Toomre, 1972) utilizaram simulações numéricas rudimentares para mostrar que este tipo de estrutura é causado pelo campo de maré das galáxias interagentes. Neste estudo, as galáxias são representadas como massas pontuais rodeadas por anéis de partículas teste (com massa nula). Uma vez definida a órbita de colisão das galáxias, o centro de massa das mesmas move-se seguindo as leis de Kepler. As partículas teste sofrem a ação do potencial gravitacional líquido, e portanto, seus movimentos são afetados pelo campo de maré. Eles notaram que passagens próximas das massas pontuais (galáxias) podiam induzir deformação do disco (partículas testes), possibilitando a criação de caudas e/ou pontes. Fazendo “experimentos” com diferentes valores para inclinação do disco e excentricidade da órbita, eles mostraram que

a interação gravitacional é suficiente para reproduzir as estruturas observadas nas galáxias em interação (ver por exemplo a Fig. 1.2).

Por outro lado, observações indicam que nas caudas de maré podem se formar três tipos de estruturas (Duc et al., 2004): superaglomerados de estrelas, complexos de regiões H II e galáxias anãs formadas nas pontas das caudas. Superaglomerado de estrelas têm sido observados, por exemplo, nas caudas de maré das galáxias NGC 7319 e NGC 7318B/A do quinteto de Stephan (Gallagher et al., 2001), bem como nas pontes de interação, como os superaglomerados detectados no sistema *Whirlpool* (Lee et al., 2012). Também são encontrados nas regiões centrais de galáxias em fusão como, por exemplo, os detectados na galáxia NGC 1275 (Holtzman et al., 1992) e nos sistemas NGC 2207/IC 2163 (Kaufman et al., 2012) e *Antennae* (Whitmore et al., 1999). A segunda estrutura, os complexos de regiões H II, são regiões de formação estelar mais luminosas que as encontradas em galáxias isoladas. Podemos citar como exemplo os descobertos por Weibacher et al. (2003) nas caudas de maré em uma amostra de 14

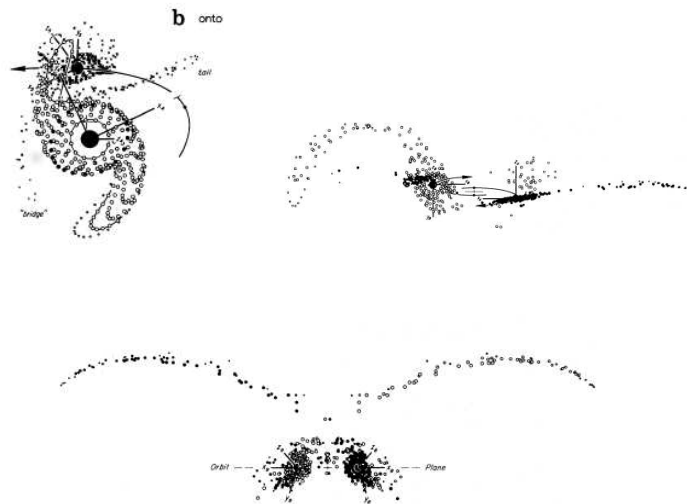


Figura 1.2: Simulações restritas de Toomre & Toomre (1972) para M 51, NGC 4676/77 e NGC 4038/39. Vê-se que os pares são reproduzidos com sucesso em suas características morfológicas considerando só a interação de maré. As imagens observadas dos sistemas são mostradas na Fig. 1.1.

galáxias em interação. Por último, as galáxias anãs de maré, objetos que tem uma massa aparente e tamanhos típicos de galáxias anãs, têm sido relatadas em vários estudos de sistemas em interação; um exemplo clássico é a galáxia anã encontrada no sistema *Antennae* (Mirabel et al., 1992).

## 1.2 Formação estelar

A primeira evidência de que interações de galáxias apresentam aumento na formação estelar foi detectada mediante observações fotométricas por Larson & Tinsley (1978). Eles demonstraram que as galáxias interagentes do catálogo Arp (1966) têm intervalos mais amplos de cores do que as galáxias isoladas. Desde então, muitos estudos confirmaram estes resultados, especialmente nas regiões centrais, com observações no ótico (e.g., Kennicutt & Keel, 1984, Bushouse, 1986, Kennicutt et al., 1987, Donzelli & Pastoriza, 1997, Barton Gillespie et al., 2003, Woods & Geller, 2007, Ellison et al., 2008, Freedman Woods et al., 2010, Lambas et al., 2012), no infravermelho (e.g., Joseph & Wright, 1985, Sekiguchi & Wolstencroft, 1992, Geller et al., 2006, Ellison et al., 2013) e no rádio (e.g., Hummel, 1981). Este aumento na formação estelar em sistemas em interação pode ser explicado pelos campos de maré que induzem torques gravitacionais, causando a perda de momento angular do gás, e originando assim um fluxo dele em direção às regiões centrais das galáxias, fornecendo deste modo, combustível para a atividade de formação estelar (Mihos & Hernquist, 1996). Além disso, este fluxo origina turbulência no gás e, portanto, um aumento na massa de Jeans e na eficiência de formação estelar, ingredientes chave para o aumento da taxa de formação estelar em galáxias em interação (Bournaud, 2010).

## 1.3 Perturbações na cinemática

Além das estruturas de maré e do aumento na formação estelar desencadeados pela interação, as curvas de rotação das galáxias interagentes podem apresentar assimetrias

nos raios exteriores. Estas assimetrias consistem no aumento ou diminuição de velocidade num dos lados da curva de rotação. Como exemplo, temos galáxias em ambientes de alta densidade, as curvas assimétricas observadas em algumas galáxias do aglomerado de Virgem (Rubin et al., 1999), ou em uma amostra de 500 galáxias pertencentes a aglomerados de galáxias estudados por Dale et al. (2001). Também observa-se este tipo de irregularidade em pares de galáxias em interação, como em NGC 5427/26 (Fuentes-Carrera et al., 2004) ou em NGC 5953/5954 (Hernández-Toledo et al., 2003) onde um lado das curvas de rotação decai para raios exteriores. Este tipo de perturbação no campo de velocidade, chamada de bifurcação, tem sido predita por simulações numéricas de galáxias em interação (Kronberger et al., 2006, Pedrosa et al., 2008). Delas sabemos que a resposta do gás depende da distribuição de massa das galáxias e, portanto, as irregularidades no campo de velocidade do gás podem traçar perturbações no potencial gravitacional das galáxias. No entanto, nessas simulações não são observadas distorções muito intensas após aproximadamente um bilhão de anos da primeira passagem perigaláctica entre as galáxias.

## 1.4 Interações menores

Os modelos de formação hierárquica de galáxias predizem que o crescimento galáctico acontece por meio da acreção de outras galáxias, com maior frequência de companheiras menores (e.g., Cole et al., 2000, Wechsler et al., 2002, Bedorf & Portegies Zwart, 2013). Como exemplo, mostramos a árvore de fusão das simulações de Wechsler et al. (2002) na Fig. 1.3. As fusões ou interações menores ocorrem com frequências pelo menos uma ordem de magnitude maior que as interações com galáxias maiores (Hernquist & Mihos, 1995). Uma vez que interações menores acontecem com maior frequência no universo local e são importantes para a evolução de galáxias, observações fotométricas de tais objetos são fundamentais para a detecção de perturbações morfológicas (como caudas de maré, pontes, etc.). Observações cinemáticas são relevantes para o estudo da dinâmica do par e para a detecção de irregularidades no campo de

velocidade. Portanto, observações fotométricas e cinemáticas são chave para o entendimento dos efeitos que a interação produz em cada componente do par. Por exemplo, na análise fotométrica, a decomposição do brilho superficial em duas componentes (Fathi et al., 2010), bojo e disco, permite inferir a distribuição da massa estelar da galáxia. Esta informação, junto com a curva de rotação, é utilizada como vínculo para a determinação da distribuição de matéria escura na galáxia (van Albada et al., 1985, Carignan, 1985, Kent, 1987, Blais-Ouellette et al., 2001). Esses dados são imprescindíveis para comprovar predições de simulações genéricas de interações menores, ou para construir a história dinâmica do par (e.g., Salo & Laurikainen 1993, Mihos & Bothun 1997, Theis & Kohle 2001, Krabbe et al. 2008, 2011; ver Barnes & Hibbard 2009 para uma lista parcial de sistemas modelados).

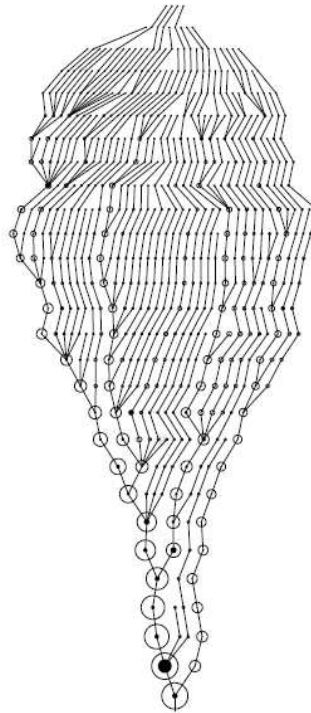


Figura 1.3: Arvore estrutural de fusão da formação de um halo (Wechsler et al., 2002). Os círculos representam o raio virial do halo em escala, e as linhas unem os halos descendentes com seus halos progenitores. A evolução temporal da arvore é de cima para baixo.



Para ajudar a compreender os efeitos da interação na cinemática e na fotometria das componentes de interações menores, neste trabalho escolhemos 3 pares do catálogo de Arp & Madore (1987). Os dados para análise consistem em imagens e observações espectroscópicas com fenda longa do Telescópio Gemini Sul. A seguir são descritos o objetivo geral e objetivos específicos deste trabalho. Por último, são explicados os critérios de seleção dos pares, as suas características e resultados de trabalhos anteriores sobre eles.

## 1.5 Motivação e Objetivos

O fenômeno de galáxias em interação tem sido investigado principalmente com uma abordagem estatística, através do estudo de propriedades específicas (formação estelar, atividade nuclear, perturbações morfológicas, etc.) de uma amostra representativa de galáxias em interação, ou pelo desenvolvimento de modelos numéricos (Struck, 2006, Bournaud, 2010). Esses estudos ajudam na compreensão do fenômeno, mas não focalizam em detalhe os mecanismos específicos relacionados com alterações na estrutura das galáxias membro. Neste trabalho, nós focaremos no estudo das interações menores, que acontecem frequentemente no universo local e são dominantes a alto *redshift*.

Esta tese tem como objetivo principal, analisar os efeitos de interação na morfologia, cinemática e dinâmica das galáxias de pares de interações menores, utilizando observações de imagens nas bandas  $g'$  e  $r'$  e espectros de fenda longa observados com o espectrógrafo GMOS (*Gemini Multi-Object Spectrograph*) do telescópio *Gemini South* de 8 m. Os objetivos específicos deste trabalho são:

- Analisar as estruturas de maré das galáxias em interação.
- Obter o perfil de brilho superficial das galáxias interagentes, nas bandas  $g'$  e  $r'$ , para determinar as subestruturas (bojo, disco, barra, etc.). Analisar os parâmetros fotométricos das subestruturas e comparar com galáxias normais.
- Estudar a cinemática das galáxias dos pares para obter a curva de rotação das galáxias. Verificar se tem perturbações ou irregularidades.
- Determinar a distribuição de matéria, estelar e escura, das galáxias interagentes a partir da modelagem da curva de rotação. Comparar com galáxias normais.
- Reconstruir a história dinâmica dos pares através de simulações numéricas.

## 1.6 Seleção dos pares de estudo

Donzelli & Pastoriza (1997) estudaram 49 pares de galáxias em interação, selecionadas do catálogo de Arp & Madore (1987). Nesta amostra, as galáxias membro mostraram em média uma taxa de formação estelar maior que a observada em galáxias isoladas, sendo que a taxa de formação estelar é ainda maior nas componentes menores do par. Os valores médios observados das larguras equivalentes (EW) das linhas em emissão  $H_\alpha$  e  $[N II]$  são comparáveis com as observadas em uma amostra de galáxias em interação forte ou em fusão. Em um estudo posterior, Ferreiro & Pastoriza (2004) fizeram uma análise fotométrica (bandas B, V, I) de onze pares da amostra de Donzelli & Pastoriza (1997). Eles encontraram que os discos das galáxias principais são mais luminosos dos que as galáxias normais. Em adição a esse trabalho, Ferreiro et al. (2008) estudaram as regiões H II desses 11 pares, e determinaram que 62% delas têm  $M_B \leq -15$ , que é um limite superior para regiões H II gigantes observadas em galáxias de tipo Sa/Sb. Eles também encontraram que 41% das regiões H II têm taxas de formação estelar ( $SFR$ ) típicas de galáxias anãs de maré ( $SFR \geq 0.1 M_\odot yr^{-1}$ ). Em um estudo recente, Krabbe et al. (2014) estudaram a densidade eletrônica ( $N_e$ ) de 8 pares da amostra de Donzelli & Pastoriza (1997), e encontraram que a densidade eletrônica obtida nas regiões H II destas galáxias tem um intervalo maior do que encontrado nas galáxias isoladas. A média de densidade eletrônica nestes pares está num intervalo  $24 < N_e < 532 \text{ cm}^{-3}$ , enquanto que a obtida para galáxias normais está num intervalo  $40 < N_e < 137 \text{ cm}^{-3}$ . Para este mesmo conjunto de pares, Rosa et al. (2014) investigaram o gradiente de metalicidade, encontrando que os gradientes são mais rasos comparados com os de galáxias isoladas.

Como apresentado previamente, os pares do catálogo de Arp & Madore (1987) são classificados de acordo com o grau de interação. Para a tese selecionamos: dois pares da categoria 9 (galáxias tipo M51) da mostra de Donzelli & Pastoriza (1997), e um par da categoria 1 (galáxias com uma companheira interagente) de uma amostra nova (Winge, 2015) de 49 pares do catálogo de Arp & Madore (1987). Estes pares são

ótimos para nosso estudo, pois suas galáxias principais apresentam uma inclinação (i) entre  $30^\circ \leq i \leq 70^\circ$ , e suas estruturas espirais estão bem definidas. Além disso, estes sistemas apresentam diferentes separações entre as componentes, distorções morfológicas e possivelmente estágios de interação.

### 1.6.1 AM 1219-430

O par AM 1219-430 é apresentado na Fig. 1.4. A galáxia principal (daqui em diante AM 1219A) deste sistema tem um braço normal enrolado em direção Sudoeste, e um forte braço de maré enrolado na direção Nordeste com muitas regiões de formação estelar ao longo dele. Há intensas regiões H II no núcleo e no Norte, onde o braço de maré se curva na direção Sul. Por outro lado, a galáxia secundária (AM 1219B) tem um núcleo brilhante, com suaves braços espirais. A distância projetada no plano do céu entre os centros das duas galáxias é de  $\sim 34$  kpc ( $\sim 3$  diâmetros da galáxia principal<sup>1</sup>). Este par está entre os que têm intensa atividade de formação estelar na amostra de Donzelli & Pastoriza (1997). De fato, a análise de população estelar baseada nas larguras equivalentes e distribuição do contínuo mostra que as duas componentes têm uma forte contribuição de populações estelares mais novas que  $10^8$  anos (Pastoriza et al., 1999). Além disso, Kewley et al. (2001) calcularam a luminosidade no infravermelho ( $L_{IR}$ ) da galáxia principal, e encontraram que é uma galáxia tipo LIRG (*Luminous Infrared Galaxies*) com  $L_{IR} = 1.26 \times 10^{11} L_\odot$ . Recentemente, Krabbe et al. (2014) estudaram a densidade eletrônica ( $N_e$ ) do sistema. A distribuição de densidade eletrônica de AM 1219A exibe uma ampla variação ao longo da galáxia, com um intervalo  $85 < N_e < 1073 \text{ cm}^{-3}$  e um valor médio  $N_e = 532 \pm 56 \text{ cm}^{-3}$ . Por outro lado, o valor médio encontrado para AM 1219B é  $N_e = 1408 \pm 282 \text{ cm}^{-3}$ . Os valores médios em ambas galáxias são altos comparados com os de galáxias isoladas. O gradiente de metalicidade em AM 1219A é raso comparado com o de galáxias espirais isoladas (Rosa et al., 2014). Este efeito já tem sido encontrado em várias galáxias em interação (e.g., Krabbe et al., 2008, Kewley et al., 2010, Krabbe et al., 2011,

---

<sup>1</sup>O diâmetro é medido a partir da isofota mais externa da galáxia.

Rosa et al., 2014), e como dito na introdução, pode ser o resultado do *inflow* de gás para partes internas da galáxia causado pela interação (Dalcanton, 2007, Perez et al., 2011).

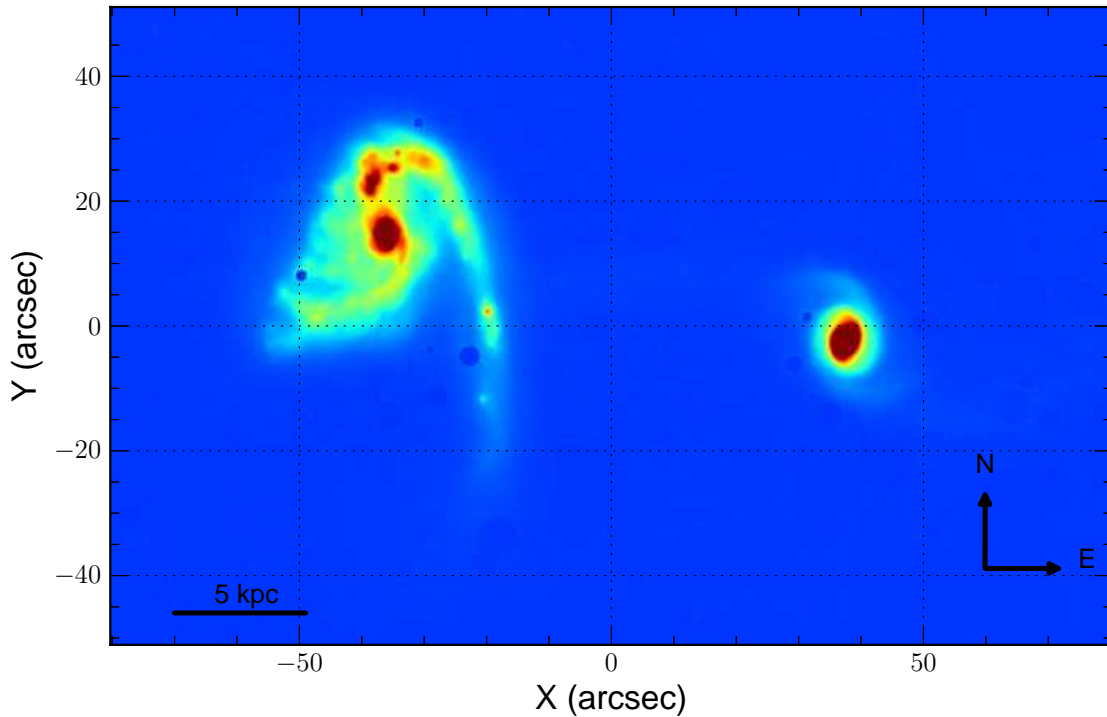


Figura 1.4: Imagem na banda  $r'$  do par AM 1219-430.

### 1.6.2 AM 2058-381

O par AM 2058-381 é apresentado na Fig. 1.5. Este sistema está constituído por uma galáxia principal com dois braços espirais (daqui em diante AM 2058A), e uma pequena companheira em forma de amendoim (daqui em diante AM 2058B). A distância projetada no plano do céu entre os centros das duas galáxias é de  $\sim 43.3$  kpc ( $\sim 4.4$  diâmetros da galáxia principal). Ferreiro & Pastoriza (2004) encontraram que AM 2058A apresenta brilhantes regiões H II distribuídas ao longo dos braços. As idades destas regiões estão no intervalo  $5.2 \times 10^6 < t < 6.7 \times 10^6$  anos (Ferreiro et al., 2008). As cores integradas das galáxias AM 2058A e AM 2058B são bastante

azuis, com  $(B-V) = 0.6$  e  $(B-V) = 0.4$ , respectivamente, indicando um aumento de formação estelar em ambas galáxias. Recentemente, Krabbe et al. (2014) estudaram a densidade eletrônica do sistema. AM 2058A tem uma ampla variação de densidade eletrônica ao longo da galáxia, com  $33 < N_e < 911 \text{ cm}^{-3}$ . Por outro lado, para AM 2058B a densidade eletrônica é relativamente baixa, com um valor médio de  $N_e = 86 \pm 33 \text{ cm}^{-3}$ , o qual é compatível com os valores encontrados para regiões H II extragalácticas. O gradiente de metalicidade em AM 2058A é raso comparado com o gradiente de galáxias espirais isoladas (Rosa et al., 2014).

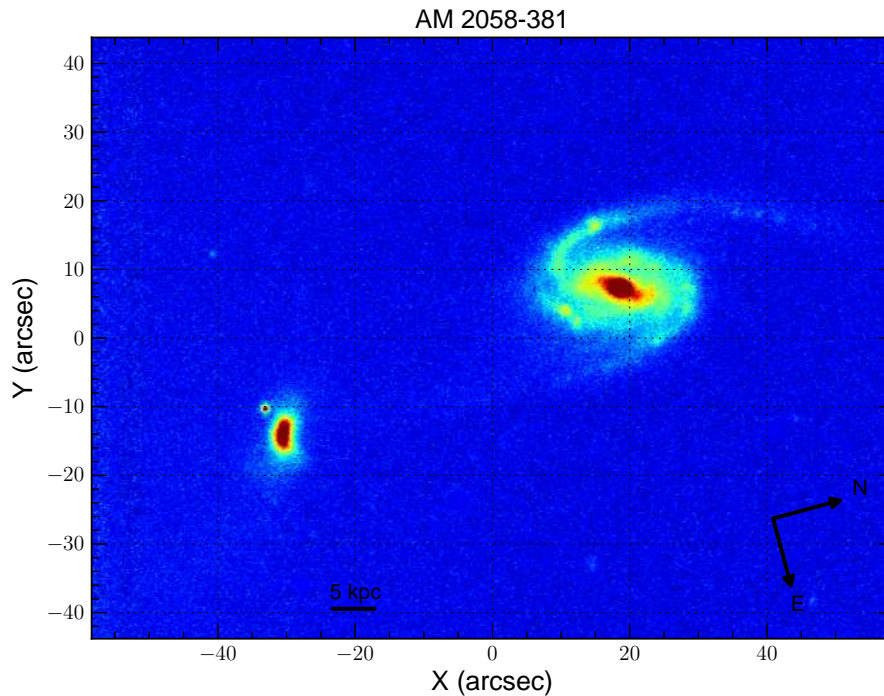


Figura 1.5: Imagem na banda  $r'$  do par AM 2058-381.

### 1.6.3 AM 1228-260

O par AM 1228-260 é apresentado na Fig. 1.6. A galáxia principal (daqui em diante AM 1228A) deste sistema é uma espiral barrada, e a galáxia secundária é uma anã (daqui em diante AM 1228B). A distância projetada entre as galáxias é de  $\sim 11.9 \text{ kpc}$  ( $\sim 2$  diâmetros da galáxia principal). AM 1228A é classificada como uma galáxia

extrema no catálogo IRAS (*Infrared Astronomical Satellite*) (van den Broek et al., 1991), com uma luminosidade no infravermelho de  $L_{FIR} = 4 \times 10^{10} L_{\odot}$ , e uma razão de luminosidade alta,  $L_{FIR}/L_B \sim 8$ , indicando intensa atividade de formação estelar. De fato, imagens em  $H_{\alpha}$  deste sistema mostram regiões H II ao longo dos braços espirais, enquanto que AM1228B apresenta duas regiões H II muito luminosas. Ambas as galáxias são bastante azuis com  $(B-V) = 0.52$  e  $(B-V) = 0.66$  para AM1228A e AM1228B, respectivamente, confirmando que as duas galáxias têm uma intensa atividade de formação estelar.

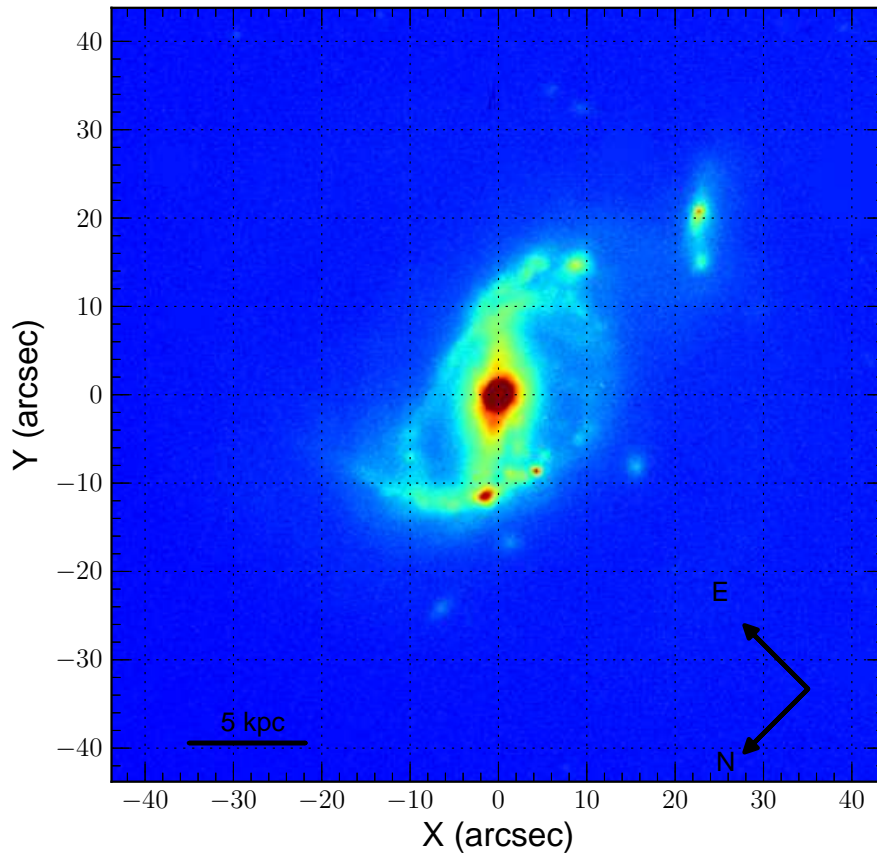


Figura 1.6: Imagem na banda  $r'$  do par AM1228-260.

Esta tese está organizada da seguinte forma: no Capítulo 2 são dados detalhes do processo de observação e redução de dados, calibração fotométrica e determinação do fundo do céu. No Capítulo 3 é realizada a análise fotométrica: os cálculos das

luminosidades das estruturas de maré e das galáxias membros dos pares, a explicação do processo de restauração de imagens, do método de simetrização para separar as componentes simétricas e não simétricas das galáxias, e a decomposição do perfil de brilho superficial. No Capítulo 4 descrevemos a cinemática do gás e determinaremos a curva de rotação de cada galáxia. No Capítulo 5 apresentamos os modelos de massa para o bojo, disco e halo, assim como o ajuste da curva de rotação para a determinação da distribuição de matéria em AM 1219A. No Capítulo 6 é apresentada a simulação numérica do par AM 1219-430, e são discutidos novos vínculos encontrados durante o trabalho para serem aplicados em simulações numéricas. Por fim, no Capítulo 7 são apresentados os resultados mais importante da tese, e as perspectivas do trabalho.



## Capítulo 2

# Observação e redução das imagens e espectros

Este trabalho está baseado em imagens nas bandas  $g'$  e  $r'$  e em espectros de fenda longa observados com o espectrógrafo GMOS (*Gemini Multi-Object Spectrograph*) do telescópio *Gemini South* de 8 m. Estas observações são parte dos programas de tempo ruim GS-2007A-Q-76 e GS-2011A-Q-90<sup>1</sup>. A seguir detalharemos as observações, a redução dos dados e o seu tratamento. Este capítulo está dividido em duas partes: a primeira parte aborda o processo de redução aplicado às imagens; a segunda parte trata da redução das observações espectroscópicas com fenda longa.

### 2.1 Redução das imagens

As imagens do GMOS cobrem um campo de  $5.5' \times 5.5'$ . Este instrumento tem uma escala de  $0.073''$  por pixel. Os filtros usados pelo GMOS ( $u'$ ,  $g'$ ,  $r'$ ,  $i'$  e  $z'$ ) são semelhantes aos utilizados pelo *Sloan Digital Sky Survey* (*SDSS*). Uma descrição detalhada

---

<sup>1</sup>O principal investigador destes programas de observação foi a Dra. Cláudia Winge, que faz parte do Observatório *Gemini South*, e foi colaboradora dos trabalhos publicados durante esta tese. O foco principal desses projetos era a busca de candidatas a galáxias anãs de maré numa amostra de interações menores.

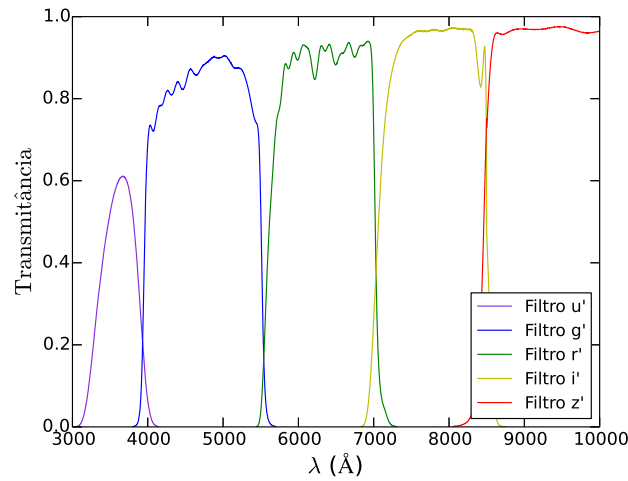


Figura 2.1: Curvas de transmissão espectral dos filtros do SDSS.

do sistema fotométrico do SDSS é apresentada em Fukugita et al. (1996). Na Fig. 2.1 são apresentadas as curvas de transmissão espectral dos filtros do SDSS.

As imagens foram adquiridas no modo de leitura rápida e de curto tempo de exposição (30 – 40 sec). Para um maior ganho em sinal-ruído, a configuração instrumental foi escolhida de modo que as imagens tivessem uma amostragem espacial de  $2 \times 2$  pixels, o que resulta em uma escala espacial de  $0.146'' \text{ pixel}^{-1}$ . Na Tabela 2.1 estão listadas as principais características do turno de observação: as datas, o tempo e o número de exposições, o comprimento de onda central [ $\lambda_C(\text{\AA})$ ] e a cobertura espectral em cada filtro [ $\Delta\lambda(\text{\AA})$ ].

A redução das imagens foi realizada com ajuda dos pacotes do IRAF<sup>2</sup> (*Image Reduction and Analysis Facility*) e aqueles específicos desenvolvidos para os dados do telescópio Gemini, em particular do instrumento GMOS, disponíveis no pacote GEMINI.GMOS e GEMINI.GEMTOOLS. Os procedimentos para a redução dos dados estão listados nas rotinas GMOSINFOIFU e GMOSEXAMPLES, que seguem o padrão para o tratamento e redução de imagens astronômicas. Os passos básicos são: seccionamento

<sup>2</sup>IRAF é distribuído pela *National Optical Astronomy Observatories*, a qual é operada pela *Association of Universities for Research in Astronomy, Inc.* (AURA), sob acordo de cooperação com a *National Science Foundation*.

Tabela 2.1: Informações sobre as datas, tempo e número de exposições, e filtros usados durante as observações.

Par	Datas (UT)	Tempo de Exp. (sec)	Filtro	$\lambda_C(\text{\AA})$	$\Delta\lambda(\text{\AA})$
AM 1219-430	2007/12/02	$5 \times 30$	$g'$ (G0325)	4750	3980-5520
	2007/12/02	$4 \times 30$	$r'$ (G0326)	6300	4562-6980
AM 2058-381	2007/05/11	$3 \times 40$	$r'$ (G0326)	6300	4562-6980
AM 1228-260	2011/03/20	$2 \times 30$	$r'$ (G0326)	6300	4562-6980
	2011/03/29	$1 \times 30$	$r'$ (G0326)	6300	4562-6980
	2011/04/14	$2 \times 30$	$r'$ (G0326)	6300	4562-6980
	2011/04/15	$1 \times 30$	$r'$ (G0326)	6300	4562-6980

Tabela 2.2: *Seeing* estimado para as imagens.

Par	Filtro	<i>seeing</i> (arcsec)
AM 1219-430	$g'$	1.0
	$r'$	1.3
AM 2058-381	$r'$	0.8
AM 1228-260	$r'$	0.8

da imagem, que exclui as bordas dos CCDs; subtração da imagem de *bias*, que elimina a leitura de ponto zero do CCD; divisão por *flat-field*, para compensar a diferença de resposta pixel-a-pixel; remoção de raios cósmicos e, por fim, combinação para obter as imagens finais.

O *seeing* das imagens foi calculado usando a tarefa GEMSEEING do pacote GEMINI.GMOS. Esta tarefa calcula, ajustando um perfil de Moffat, a largura à meia altura das estrelas de campo na imagem. Na Tabela 2.2 são listados os *seeing* medidos para cada imagem final.

### 2.1.1 Calibração fotométrica

Como uma estrela padrão não foi observada na mesma noite das observações, para calibrar as imagens, foram selecionadas estrelas de campo brilhantes e isoladas nas imagens, e que tivessem fotometria no catálogo estelar USNO-B<sup>3</sup> (Monet et al., 2003).

Foram realizados dois tipos de fotometria, num primeiro momento fotometria por abertura (aplicada às imagens nas bandas  $g'$  e  $r'$  do par AM1219-430) e depois fotometria por PSF (*Point Spread Function*) (aplicadas às imagens nas bandas  $r'$  dos pares AM 2058-381 e AM 1228-260). Os passos iniciais para os dois tipos de fotometria são iguais: *i*) a tarefa DAOFIND é usada para achar as estrelas de campo da imagem. DAOFIND procura pelo máximo de densidade local, isto é, por um pico de amplitude várias vezes maior que o desvio padrão ( $\sigma$ ) do céu na vizinhança. Um limite inferior de  $10\sigma$  foi usado, para selecionar as estrelas mais brilhantes. *ii*) a tarefa PHOT é usada para fazer a fotometria dos objetos encontrados com DAOFIND. PHOT faz fotometria por abertura; que consiste em integrar o fluxo (número de contagens pela unidade de tempo) dentro de uma abertura circular centrada na estrela e subtrair a contribuição do céu subjacente. Para o cálculo do céu é usado um anel concêntrico à estrela. *iii*) a tarefa PSELECT é usada para escolher as estrelas de melhor qualidade, isto é, que sejam isoladas, brilhantes e sem nenhum pixel ruim na vizinhança ou na própria estrela. Neste passo a fotometria por abertura está finalizada. Para a fotometria por PSF restam mais dois passos. *iv*) a tarefa PSF é usada para criar uma PSF sintética a partir das estrelas selecionadas. Este processo, *grosso modo*, consiste em primeiro escolher uma forma analítica para o modelo de PSF, neste caso foi adotada uma gaussiana elíptica; depois, os parâmetros do modelo são calculados ajustando simultaneamente, com a técnica não linear de mínimos quadrados, as estrelas selecionadas pesadas pelas suas respectivas razões sinal-ruído. *v*) a tarefa PEAK é usada para ajustar o modelo da PSF nas estrelas selecionadas, e calcular suas respectivas magnitudes.

---

<sup>3</sup>O catálogo USNO-B é uma compilação da digitalização de vários levantamentos do céu com placas fotográficas usando *Precision Measuring Machine* (PMM), localizada na estação de Flagstaff do *US Naval Observatory*. O catálogo USNO-B está baseado em diferentes tipos de filtros fotográficos como: 103a-O (O), 103a-E (E), IIIa-J (J), IIIa-F (F) e IV-N (N). O catálogo USNO-B apresenta as posições, movimentos próprios, magnitudes para 1 042 618 261 objetos entre estrelas e galáxias.

Tabela 2.3: Constantes de calibração das imagens .

Par	Filtro	$m_{zp}$	Método	Num. de estrelas
AM 1219-430	$g'$	$28.52 \pm 0.12$	Abertura	7
	$r'$	$28.29 \pm 0.09$	Abertura	7
AM 2058-381	$r'$	$27.28 \pm 0.08$	PSF	9
AM 1228-260	$r'$	$27.83 \pm 0.09$	PSF	9

Uma vez obtidas as magnitudes instrumentais das estrelas selecionadas, são determinadas as constantes de calibração, comparando com suas respectivas magnitudes no catálogo USNO. As magnitudes fotográficas,  $J$  e  $F$  neste catálogo, são transformadas nas magnitudes  $g'$  e  $r'$  do sistema SDSS, usando as equações dadas por Monet et al. (2003):

$$g' = J - 0.05 - 0.066(J - F), \quad \sigma_g = 0.31. \quad (2.1)$$

$$r' = F + 0.076 + 0.092(J - F), \quad \sigma_r = 0.24. \quad (2.2)$$

Na Tabela 2.3 são listadas as constantes de calibração ( $m_{zp}$ ) determinadas para cada imagem, o tipo de fotometria, e o número de estrelas usadas no cálculo. A equação genérica de calibração para cada imagem é :

$$m_{g,r} = m_{zp} - 2.5 \log(C/t) \quad (2.3)$$

Onde  $m_{g,r}$  é a magnitude do objeto integrado na banda  $g'$  ou  $r'$  dependendo do caso,  $C$  o fluxo instrumental integrado dele, e  $t$  é o tempo de exposição da imagem.

### 2.1.2 Determinação do nível de fundo do céu

Tomamos como nível de fundo do céu das imagens nas bandas  $g'$  e  $r'$ , o valor médio do céu de regiões livres de qualquer emissão residual das estrelas de campo e das galáxias em interação. Estas regiões são retângulos de  $60 \times 60$  pixel<sup>2</sup>. Como exemplo, no painel

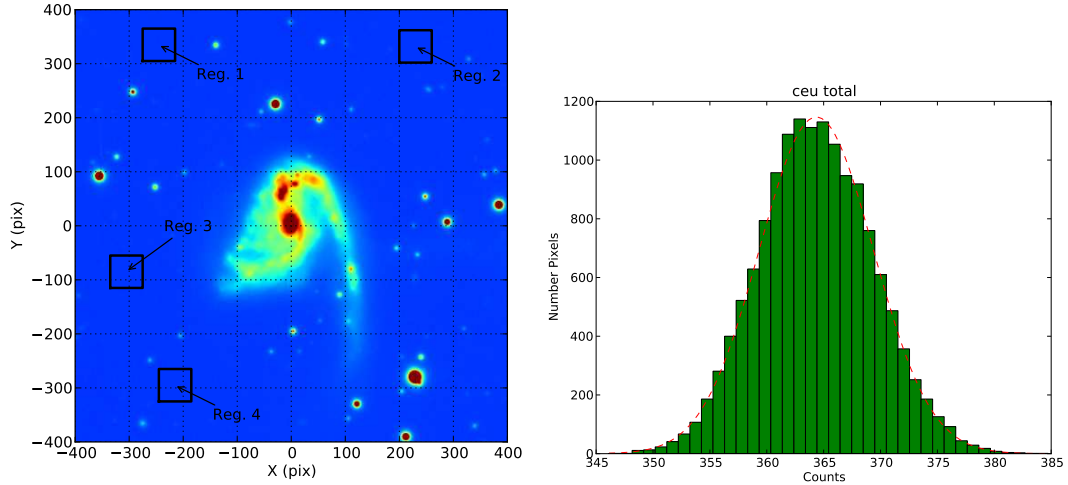


Figura 2.2: Painel esquerdo: Regiões tomadas para o cálculo do céu na imagem da banda  $r'$  da galáxia AM 1219-430. As mesmas regiões foram tomadas para a imagem em  $g'$ . Painel direito: Histograma da soma de todas as regiões analisadas para o cálculo do céu na imagem da banda  $r'$ .

Tabela 2.4: Níveis do fundo do céu

Par	filtro	$1\sigma$	$2\sigma$	$3\sigma$
AM 1219-430	$g'$	26.09	25.34	24.89
	$r'$	26.05	25.30	24.86
AM 1228-260	$r'$	23.32	22.57	22.13
AM 2058-381	$r'$	22.91	22.16	21.72

esquerdo da Fig. 2.2 mostramos algumas regiões escolhidas na imagem do sistema AM 1219-430, e no painel direito o histograma das contagens dos pixels dentro dessas regiões. Também calculamos o desvio-padrão ( $\sigma$ ) do fundo do céu em torno do valor médio para estas regiões. O  $\sigma$  é uma estimativa do ruído do céu, e o valor de  $1\sigma$  foi assumido como o limite físico para a extensão da galáxia. É importante salientar, que esse é o limite de detecção de nossas observações e não o limite intrínseco das galáxias. Na Tabela 2.4 listamos os limites de detecção em  $1$ ,  $2$  e  $3\sigma$  em magnitudes por arco-segundo quadrado, das imagens observadas.

## 2.2 Restauração das imagens das galáxias

A fim de melhorar a identificação das regiões H II e das estruturas morfológicas nas galáxias, usamos o algoritmo de Lucy-Richardson (LR) (Richardson, 1972, Lucy, 1974) para corrigir o efeito causado pela refração atmosférica (*seeing*) nas imagens nas bandas  $g'$  e  $r'$ . O algoritmo de LR gera uma imagem restaurada (ou de-convoluída) através de um método iterativo auto-consistente. A essência do método de LR é explicada a seguir: no final de cada iteração, a  $n$ -ésima imagem restaurada é convoluída com a PSF da imagem, e comparada com a imagem observada. O desvio entre a imagem obtida pelo modelo e a observada é medido pela razão entre a imagem observada e a PSF convoluída com sua  $n$ -ésima imagem restaurada. Esta informação é utilizada para refinar a estimativa da imagem restaurada durante a próxima iteração. O processo de comparação e correção é repetido até que a imagem restaurada já não é mais alterada significativamente (Pogge & Martini, 2002), isto é, quando o  $\chi^2$  reduzido entre as imagens restaurada e observada chega a um certo limite, o qual tomamos como 1. Em termos matemáticos o método de LR está dado pela seguinte equação iterativa (Snyder et al., 1993):

$$I^{n+1}(x, y) = I^n(x, y) \left[ \left( \frac{I^{obs}(x, y)}{I^n(x, y) * PSF(x, y)} \right) * PSF(-x, -y) \right], \quad (2.4)$$

onde  $I^n(x, y)$  é a  $n$ -ésima imagem restaurada,  $I^{obs}(x, y)$  é a imagem observada,  $PSF(x, y)$  é a PSF do sistema, e o operador  $*$  representa a convolução. A imagem inicial do processo é simplesmente uma imagem de valor constante, cujo valor é a média da imagem observada. A imagem restaurada é propriamente normalizada, e o fluxo integrado se conserva. Portanto, o fluxo de cada galáxia deve ser também conservado.

Uma vez que a principal componente do método de LR é a PSF do sistema, usamos a PSF sintética construída a partir das estrelas de calibração (ver Seção 2.1.1). Após obtermos o modelo para a PSF aplicamos o algoritmo de LR utilizando a tarefa LUCY do pacote STSDAS (Snyder et al., 1993). Contudo, como qualquer

técnica de restauração, o algoritmo LR pode introduzir informações espúrias. Um dos bem conhecidos artefatos é o aparecimento de fossos negativos em torno de fontes pontuais muito brilhantes (Pogge & Martini, 2002). Este efeito constitui um problema para imagens com núcleos galácticos ou estrelas fortemente saturadas, como é o caso do núcleo de AM1228A, portanto a imagem desta galáxia não foi restaurada. É importante notar, que o algoritmo LR tem uma base estatística, i.e., é derivado da expressão da máxima verossimilhança (*likelihood*) para dados com uma distribuição de ruído Poissonica (e.g., imagens astronômicas), portanto as estruturas recuperadas através deste método, são as mais prováveis, porém não necessariamente as estruturas verdadeiras.

Nas figs. 2.3, 2.4 e 2.5 são apresentadas as imagens na banda  $r'$  antes e depois do processo de restauração para as galáxias dos sistemas AM 1219-430, AM 2058-381 e AM 1218-260, respectivamente. Como podemos ver, o procedimento através do método de LR, é bastante útil para imagens com galáxias com uma intensa formação estelar, resolvendo regiões H II gigantes em vários complexos menores, e ressaltando estruturas internas das galáxias. Como exemplo, na imagem restaurada da galáxia AM 1219A (painel direito da Fig. 2.3), o núcleo galáctico é resolvido em várias regiões H II, bem como os braços espirais perto dele. Por sua vez, a região H II gigante do braço do Nordeste, na imagem observada, se resolve em vários complexos de regiões H II na imagem restaurada. Da mesma forma, as regiões de formação estelar são acentuadas na imagem restaurada da galáxia AM 2058A, assim como é realçada uma barra interna (Fig. 2.4). Por outro lado, as imagens restauradas das galáxias secundárias não mostram grande diferença com respeito a suas imagens originais (apenas estruturas um pouco mais definidas), isto se deve à suave distribuição de luz nestas galáxias, e ao pequeno número de regiões H II.



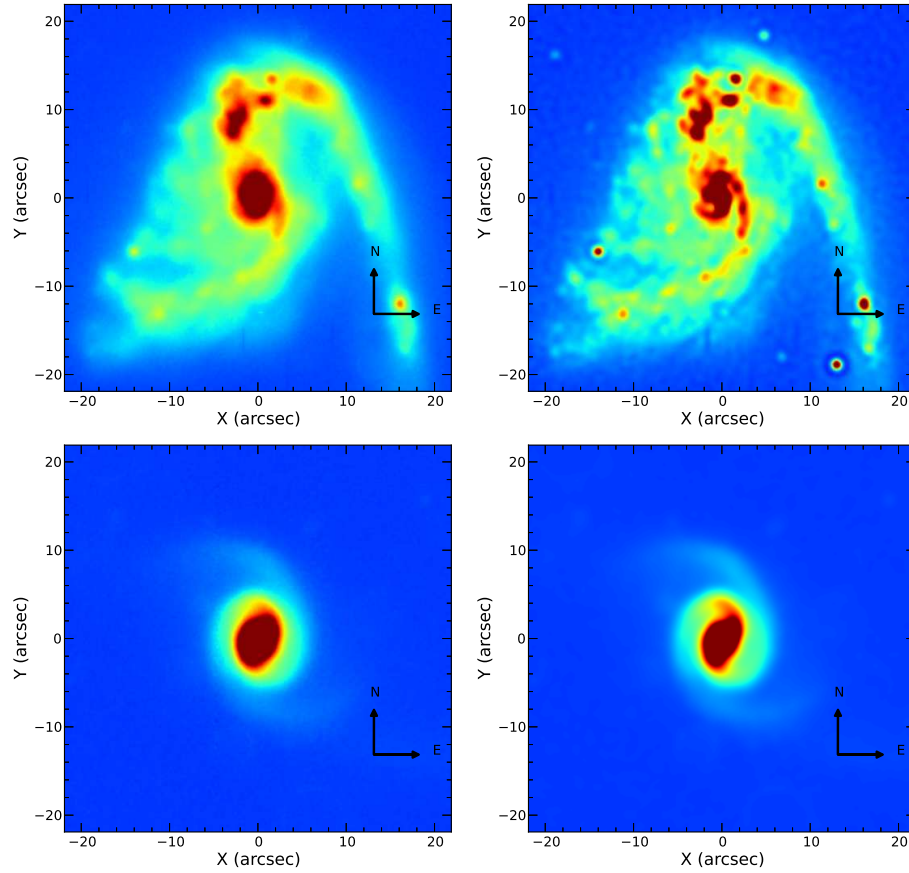


Figura 2.3: Imagens antes e depois do processo de restauração usando o algoritmo LR para as galáxias do sistema AM 1219-430, nos painéis superiores as imagens da galáxia principal e nos inferiores as imagens da galáxia secundária.

## 2.3 Redução das observações espectroscópicas com fenda longa

O instrumento GMOS do telescópio *Gemini South* pode também ser configurado para obtenção de espectros com fenda longa. Assim, dados espectroscópicos dos pares estudados foram obtidos utilizando uma fenda com uma largura de  $1''$  e comprimento de  $108''$ , além da rede B600-G5323. Na Fig. 2.6 é apresentada a curva de transmissão espectral desta rede, ela tem um comprimento de *blaze* de  $4610 \text{ \AA}$  e um poder resolutor de 1680. Para um maior ganho em sinal-ruído, a configuração instrumental foi escolhida de modo que as imagens espectrais tivessem uma amostragem  $2 \times 4$  píxeis

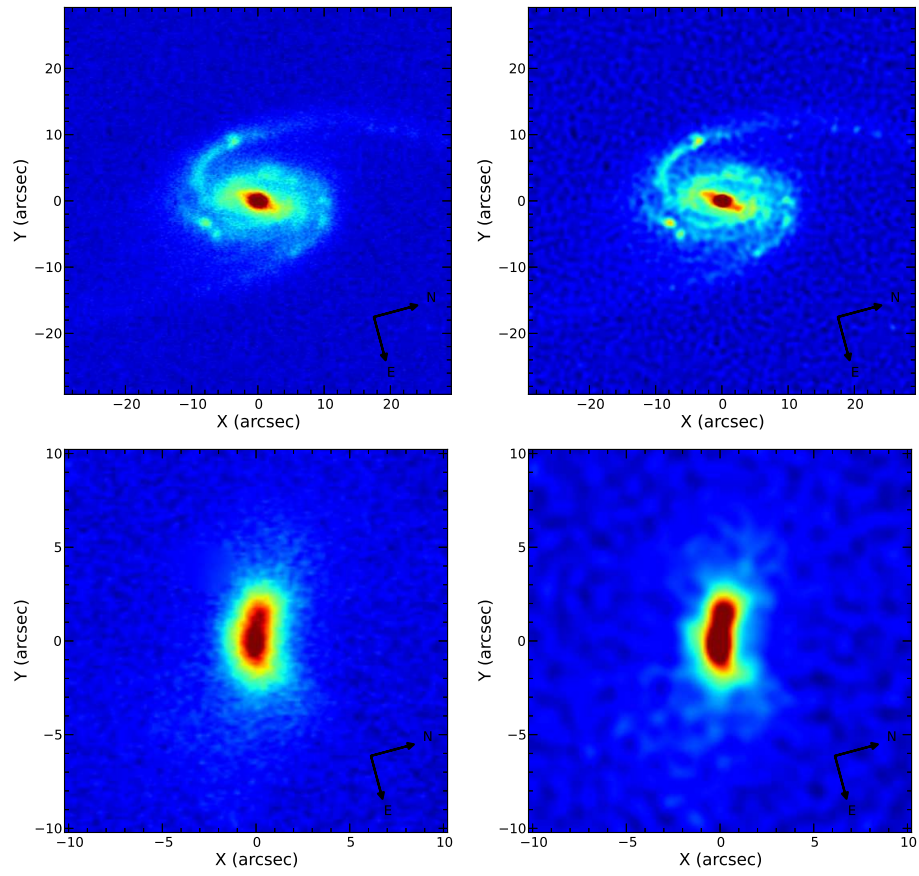


Figura 2.4: Igual à Fig. 2.3 para o sistema AM 2058-381.

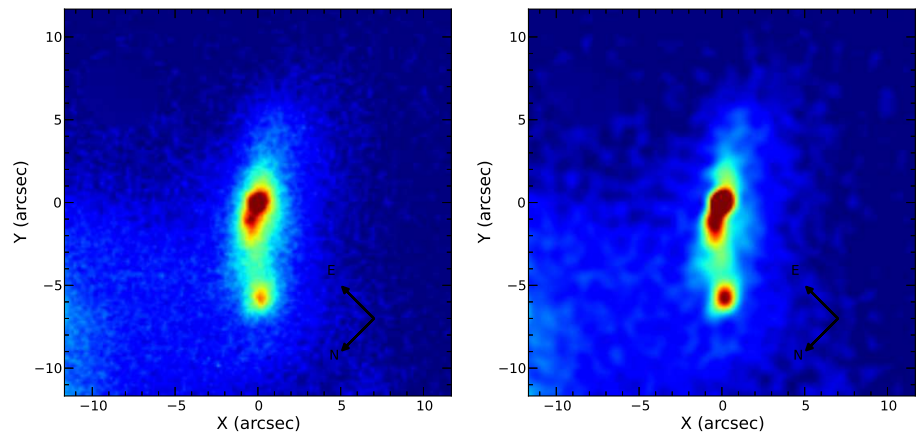


Figura 2.5: Igual à Fig. 2.3 para AM 1228B.

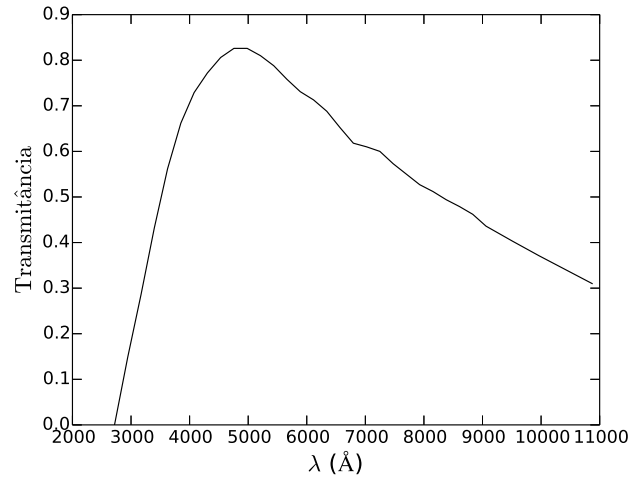


Figura 2.6: Curva de transmissão espectral da rede B600\_G5323S.

nas direções espacial e de comprimento de onda, respectivamente. Por conseguinte, as escalas espacial e de dispersão resultantes são  $0.288'' \text{ pixel}^{-1}$  e  $0.9 \text{ \AA pixel}^{-1}$ , respectivamente. O tempo de cada exposição foi limitado entre 600 – 900 segundos para minimizar os efeitos dos raios cósmicos. Os dados espectroscópicos da fenda longa foram obtidos em diferentes orientações para as galáxias principais e ao menos em uma orientação nas galáxias secundárias. Foram feitas várias exposições para cada orientação de fenda longa para obter sinal-ruído  $> 50$  nas linhas de emissão. Na Tabela 2.5 são listadas, para cada componente dos sistemas estudados, as informações relevantes das observações: datas de observação, os tempos e o número de exposições, os ângulos de posição (AP), e a cobertura espectral  $[\Delta\lambda (\text{\AA})]$  da rede usada.

A redução das observações com fenda longa, bem como a redução das imagens, foi realizada com ajuda dos pacotes do IRAF e o pacote GEMINI.GMOS. A espectroscopia produz uma imagem bidimensional, na qual o eixo  $x$  é a dispersão espectral e o eixo  $y$  a informação espacial, como se mostra na Fig. 2.7 (Pág. 35). Portanto, os primeiros passos de redução dos dados de fenda longa são semelhantes aos das imagens: seccionamento da imagem espectroscópica, subtração da imagem de bias, divisão por *flat-field*; remoção de raios cósmicos. Além desses passos, são

Tabela 2.5: Informações sobre as datas, tempo e número de exposições, filtros usados durante as observações e AP das fendas.

Par	Datas (UT)	Tempo de Exposição (sec)	AP (°)	$\Delta\lambda(\text{Å})$
AM 1228A	2007-05-23	4×700	162	4280-7130
AM 1228B	2007-05-23	4×700	25	4280-7130
AM 2058A	2007-05-20	4×600	42	4280-7130
AM 2058A	2007-05-24	4×600	125	4280-7130
AM 2058A-B	2007-05-30	4×600	350	4280-7130
AM 2058B	2007-05-26	4×600	94	4280-7130
AM 1228A	2011-03-20	2×900	319	4449-7312
AM 1228A	2011-03-29	2×900	20	4449-7312
AM 1228A	2011-04-14	2×900	10	4449-7312
AM 1228B	2011-03-20	2×900	315	4449-7312

necessários outros próprios à natureza da fenda longa. A seguir uma breve descrição deles: subtração do campo de céu, para descontar a luz emitida pelo céu próximo ao objeto observado; calibração em comprimento de onda e fluxo; correção por refração atmosférica, para corrigir o deslocamento espacial causado pela refração atmosférica diferencial ao longo do comprimento de onda e por fim, a co-adição das exposições obtidas para cada posição da fenda. Depois disso, são extraídos espectros unidimensionais ao longo do eixo espacial ( $y$ ) a cada quatro linhas, para incrementar o sinal-ruído. Portanto, cada espectro foi extraído com uma abertura de  $1'' \times 1.17''$ . Na Fig. 2.8 (Pág. 36) são desenhadas as posições das fendas e as aberturas extraídas ao longo delas sobre as imagens das galáxias estudadas.

A velocidade sistêmica, adotada para cada galáxia, é a velocidade radial medida no espectro da abertura mais próxima ao centro galáctico. Na Tabela 2.6 são listadas as velocidades sistêmicas e o AP da fenda sobre as quais foram medidas, indicadas com a legenda 0.0 kpc na Fig. 2.8 (Pág. 36). As velocidades sistêmicas derivadas para as galáxias dos pares AM1219-430 e AM2058-381, estão de acordo com os valores previamente determinados para elas por Donzelli & Pastoriza (1997). Esta informação é fornecida pela primeira vez na literatura para as galáxias do sistema AM 1228-260.

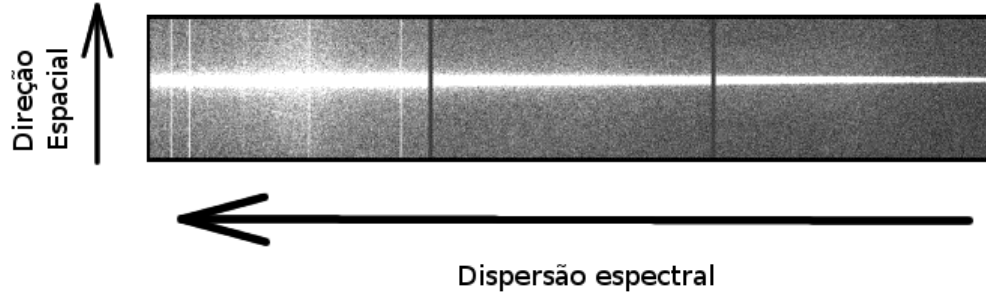


Figura 2.7: Exemplo de uma imagem bidimensional espectral.

Tabela 2.6: Velocidades sistêmicas para cada galáxia

Galáxia	Velocidade Sistêmica ( $\text{km s}^{-1}$ )	AP da fenda ( $^{\circ}$ )
AM 1219A	$6932 \pm 5$	162
AM 1219B	$6985 \pm 4$	25
AM 2058A	$12174 \pm 5$	350
AM 2058B	$12309 \pm 4$	94
AM 1228A	$5844 \pm 3$	319
AM 1228B	$5937 \pm 3$	4

As diferenças de velocidades sistêmicas entre as galáxias dos pares AM 1219-430, AM 2058-381 e AM 1228-260 são  $\sim 53 \text{ km s}^{-1}$ ,  $\sim 135 \text{ km s}^{-1}$  e  $\sim 92 \text{ km s}^{-1}$ , respectivamente. Portanto, isto confirma que são pares físicos, i.e, são galáxias que de fato interagem gravitacionalmente.

As distâncias adotadas para os sistemas estudados foram calculadas a partir das velocidades sistêmicas das galáxias principais, assumindo uma constante Hubble de  $73 \text{ km s}^{-1} \text{ Mpc}^{-1}$  (Spergel et al., 2007). Na Tabela 2.7 (Pág. 37) são listadas as distâncias e as escalas em  $\text{kpc arcsec}^{-1}$  para cada par.

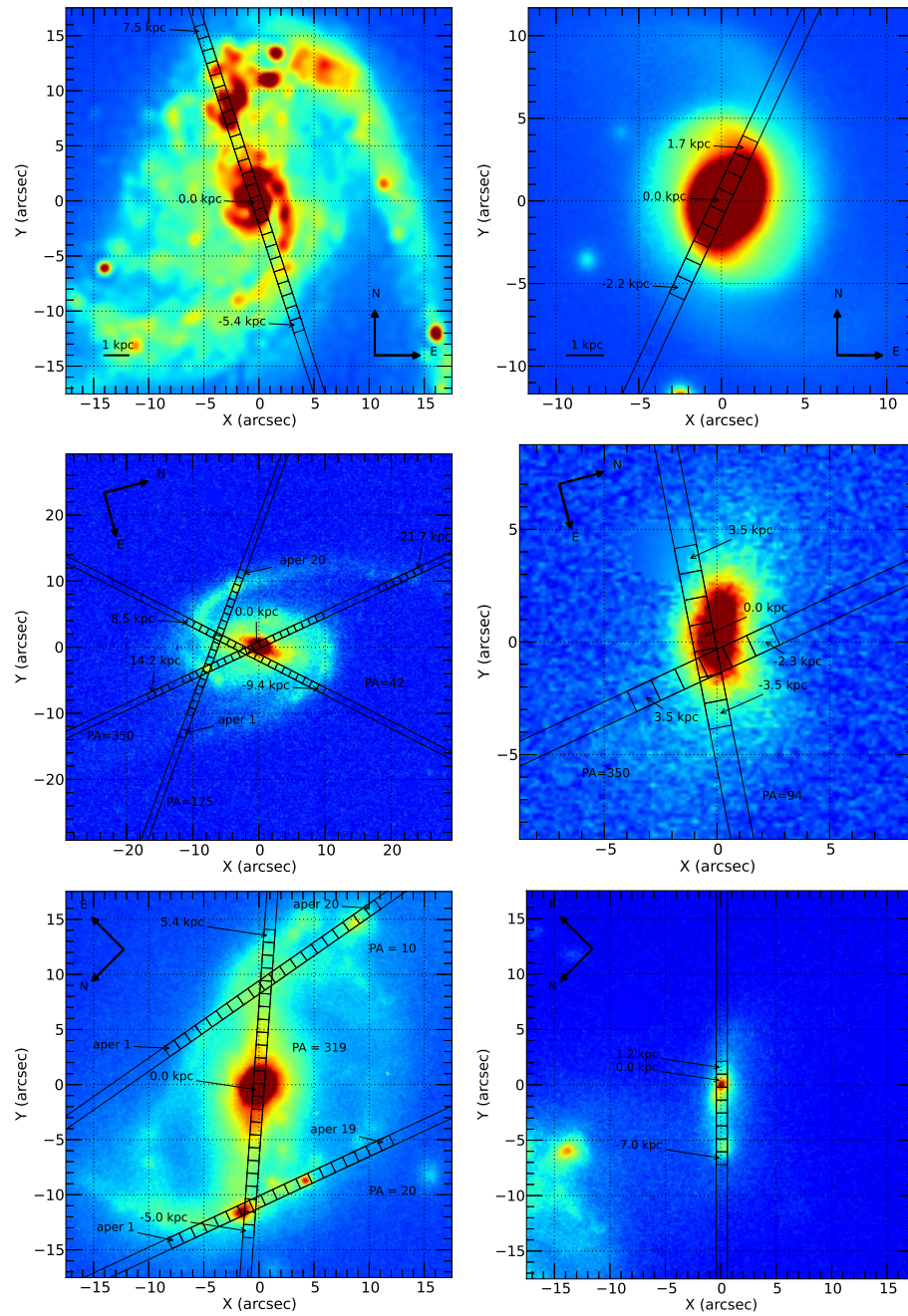


Figura 2.8: Aberturas extraídas ao longo das fendas observadas sobre as galáxias principais e secundárias dos pares AM 1219-430 (painéis superiores), AM 2058-381 (meios) e AM 1228-260 (inferiores) são mostradas nos painéis esquerdos e direitos, respectivamente.

Tabela 2.7: Distâncias adotadas para os sistemas estudados.

Sistema	Distância (Mpc)	Escala (kpc arcsec <sup>-1</sup> )
AM 1219-430	95	0.460
AM 2058-381	167	0.808
AM 1228-260	80	0.388

## Capítulo 3

# Análise fotométrica

### 3.1 Estruturas de maré

As estruturas de maré encontradas em galáxias em interação são pistas importantes para desvendar o encontro galáctico, uma vez que sua forma, tempo de duração e intensidade dependem dos parâmetros orbitais da colisão, da razão de massa entre as galáxias, e da estrutura interna delas. A fim de detectar estruturas de maré nos sistemas estudados, traçamos isofotas nas imagens em diferentes níveis de desvio-padrão ( $\sigma$ ) do fundo do céu (ver Seção 2.1.2, pág. 27). Na Fig. 3.1 estão desenhadas as isofotas para o par AM 1219-430, e na Fig. 3.2 para os pares AM 2058-381 (painel superior) e AM 1228-260 (inferior).

No sistema AM 1219-430 é detectada uma ponte de interação entre as duas galáxias ao nível de  $2\sigma$ , além das caudas de maré da galáxia secundária. A ponte de interação projetada no céu tem  $\sim 15$  kpc de comprimento e  $\sim 4.3$  kpc de largura. A partir do nível  $8\sigma$ , esta estrutura é quebrada em isofotas individuais para cada galáxia. A área total do sistema<sup>1</sup> projetada no céu (a partir de um nível de  $2\sigma$ ) é de  $\sim 780$  kpc<sup>2</sup>, sendo que a galáxia principal ocupa  $\sim 44\%$  ( $\sim 340$  kpc<sup>2</sup>) dessa área (a

---

<sup>1</sup>Este é um limite inferior da área do sistema, pois vai depender da inclinação ( $i$ ) da galáxia (se é tipo disco ou esferoidal) ou das estruturas de maré com respeito ao plano do céu, por um fator  $\cos(i)$ .



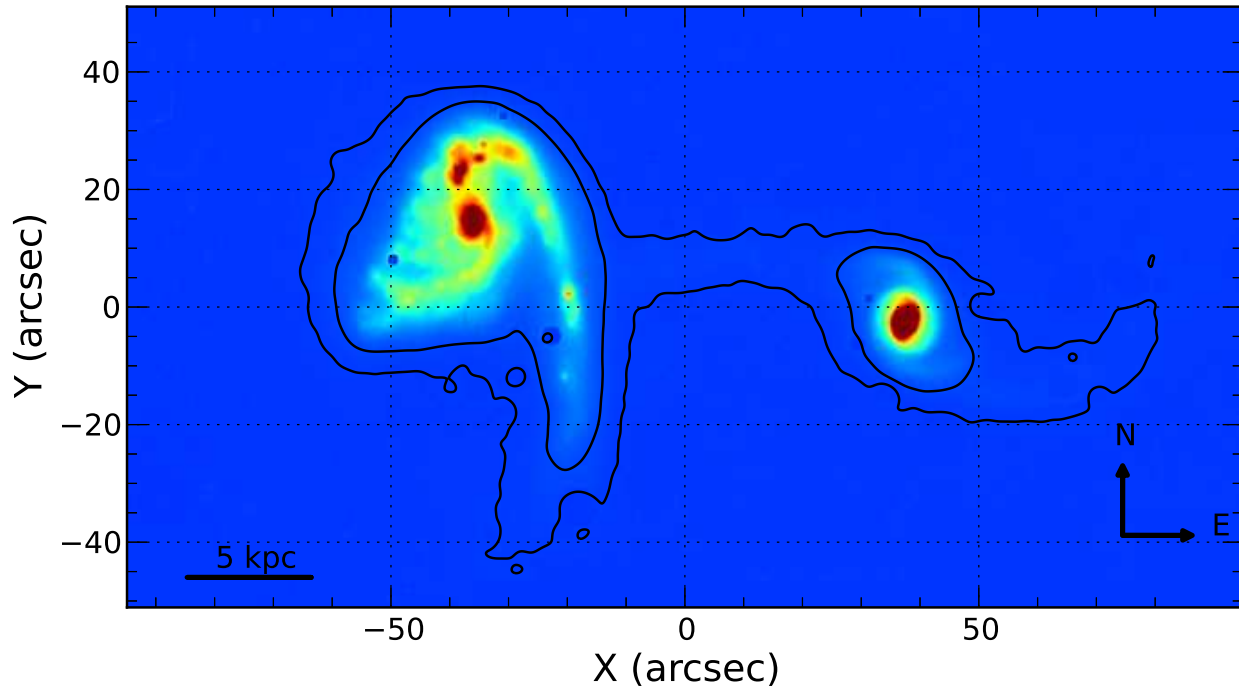


Figura 3.1: Imagem na banda  $r'$  do par AM 1219-430. Sobre a imagem são desenhadas as isofotas com  $2\sigma$  e  $8\sigma$  acima do valor do céu da imagem. As isofotas revelam uma ponte de interação entre as galáxias, e caudas de maré na galáxia secundária.

partir de  $8\sigma$ ), a secundária  $\sim 10\%$  ( $\sim 80 \text{ kpc}^2$ , a partir de  $8\sigma$ ), e a estrutura de maré  $\sim 46\%$  ( $\sim 360 \text{ kpc}^2$ , entre  $2$  e  $8\sigma$ ).

Por outro lado, o par AM 2058-381 não mostra nenhum tipo de estrutura ligando as duas galáxias a um nível de  $1\sigma$ . No entanto, relaxando nosso critério de detecção a um nível de  $0.5\sigma$ , descobrimos que a galáxia principal mostra duas longas caudas de maré neste nível (ver painel Superior da Fig. 3.2). Estas caudas se estendem por  $\sim 23 \text{ kpc}$  desde o centro galáctico de AM 2058A. A área total projetada no céu deste sistema é  $\sim 628 \text{ kpc}^2$  (a partir de um nível de  $0.5\sigma$ ), sendo que a galáxia principal ocupa  $\sim 65\%$  ( $\sim 402 \text{ kpc}^2$ , a partir de  $1\sigma$ ), a secundária  $\sim 15\%$  ( $\sim 94 \text{ kpc}^2$ , a partir de  $1\sigma$ ), e as caudas  $\sim 20\%$  ( $\sim 132 \text{ kpc}^2$ , entre  $0.5$  e  $1\sigma$ ).

No par AM 1228-260 encontramos, a um nível de  $1\sigma$  mais brilhante do que o fundo do céu, uma isofota comum envolvendo os dois membros. Esta estrutura de maré é quebrada em um nível de  $5\sigma$  em isofotas individuais para cada galáxia. A

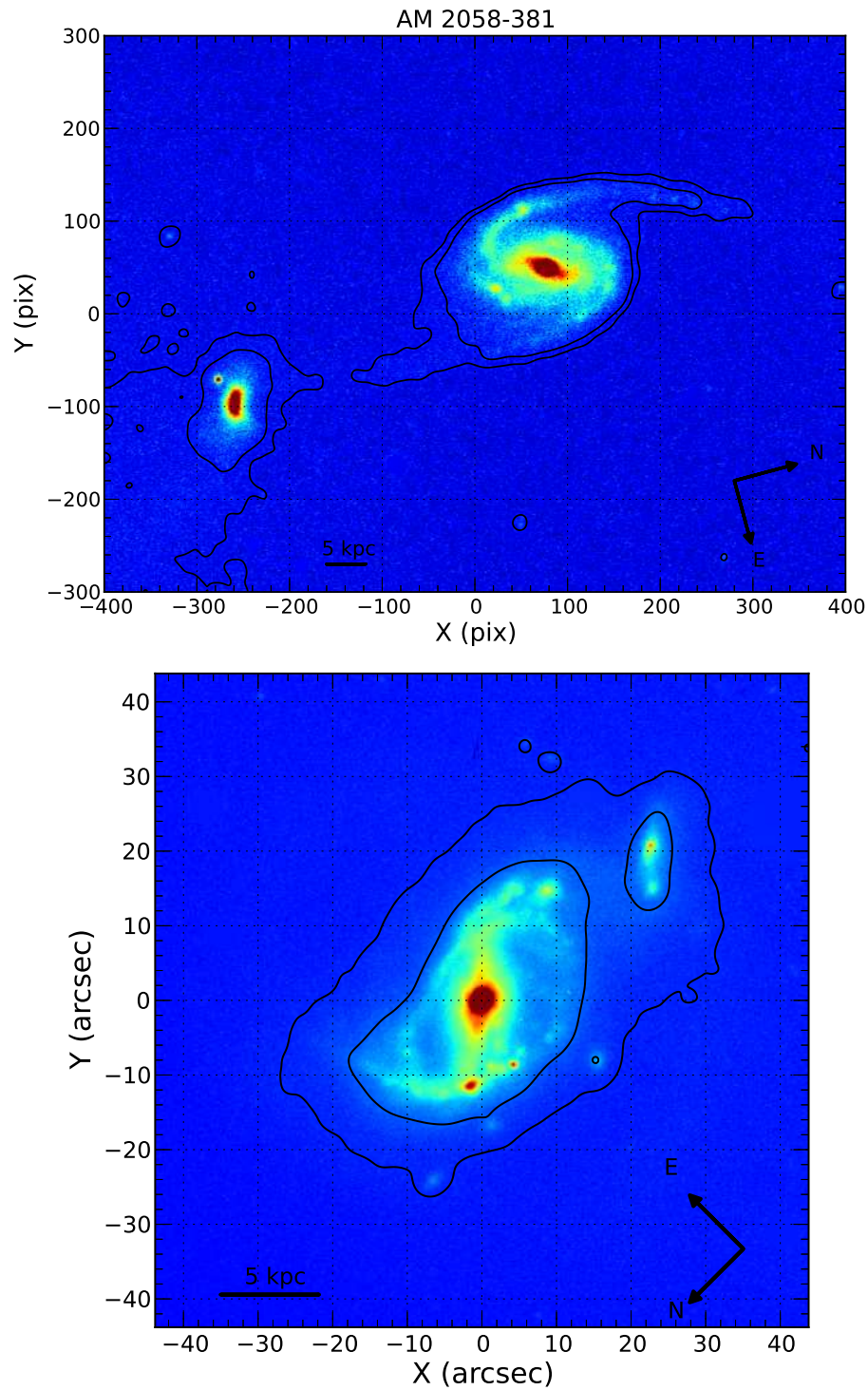


Figura 3.2: Imagens na banda  $r'$  do par AM 2058-381 (painel superior) e AM 1228-260 (inferior). Sobre a imagem de AM 2058-381 são desenhadas as isofotas com  $0.5\sigma$  e  $1\sigma$  acima do valor do céu da imagem. Enquanto que na imagem de AM 1228-260 são desenhadas as isofotas com  $1\sigma$  e  $5\sigma$ .

área total projetada no céu deste par é  $\sim 265 \text{ kpc}^2$  (a partir de um nível de  $1 \sigma$ ), sendo que a estrutura de maré ocupa  $\sim 58\%$  dessa área ( $\sim 154 \text{ kpc}^2$ , entre  $1$  e  $5 \sigma$ ), a AM 1228A  $\sim 39\%$  ( $\sim 103 \text{ kpc}^2$ , a partir de  $5 \sigma$ ) e a AM 1228B  $\sim 3\%$  ( $\sim 8 \text{ kpc}^2$ , a partir de  $5 \sigma$ ).

Comparando as áreas projetadas das galáxias principais dos três pares, vemos que a AM 2058A ( $\sim 402 \text{ kpc}^2$ ) e AM 1219A ( $\sim 340 \text{ kpc}^2$ ) são de tamanhos comparáveis, sendo muito maiores que AM 1228A; de fato AM 2058A é  $\sim 4$  vezes maior, enquanto que AM 1219A é perto de  $3$  vezes. Também, chama a atenção, o fato que as porcentagens das áreas das galáxias secundárias estão anti-correlacionadas com as porcentagens das estruturas de maré: as participações das galáxias secundárias nos sistemas AM 1228-260, AM 1219-430 e AM 2058-381 são  $\sim 3\%$ ,  $\sim 8\%$  e  $\sim 15\%$ , enquanto que as das estruturas maré são  $\sim 58\%$ ,  $\sim 46\%$  e  $\sim 20\%$ , respectivamente.

## 3.2 Luminosidades das galáxias e suas estruturas de maré

Na Tabela 3.1 são listadas as magnitudes integradas ( $m_T$ ), as magnitudes absolutas ( $M_T$ ) e luminosidades ( $L/L_\odot$ ) das galáxias membros dos pares estudados. Para o par AM1219-260 as magnitudes das componentes A e B foram calculadas integrando o fluxo<sup>2</sup> dentro da isofota de um nível de  $8 \sigma$  acima do valor do céu, excluindo a contribuição das caudas e da ponte de maré. Para AM2058-381 as magnitudes dos seus membros foram calculadas integrando o fluxo dentro da isofota de  $1 \sigma$ , enquanto que para as componente A e B do par AM1228-260 dentro da isofota de  $5 \sigma$ . O brilho superficial dessas isofotas limites ( $\mu_{lim}$ ) também é dado na Tabela 3.1. As magnitudes absolutas são corrigidas pela extinção da Galáxia na direção particular dos sistemas (Schlafly & Finkbeiner, 2011). Por outro lado, as luminosidades foram estimadas a partir das magnitudes absolutas solares ( $M_\odot$ ) nas bandas  $g'$  (5.45) e  $r'$  (4.76) (Blanton et al., 2003).

---

<sup>2</sup>Para este cálculo é descontada a contribuição do valor do céu para toda a área integrada.

Tabela 3.1: Magnitudes e luminosidades das galáxias dos pares estudados. Os valores de <sup>(a)</sup> tomados de Robotham et al. (2012).

Galáxia	Banda	$m_T$	$M_T$	$L/L_\odot$	$\mu_{lim}$ (mag/arcsec <sup>2</sup> )
AM 1219A	$g'$	14.48	-20.76	$3.07 \times 10^{10}$	25.31
	$r'$	13.43	-21.71	$3.87 \times 10^{10}$	23.78
AM 1219B	$g'$	16.00	-19.25	$7.57 \times 10^9$	25.25
	$r'$	14.84	-20.30	$1.05 \times 10^{10}$	24.01
Estruturas de maré	$r'$	16.35	-18.79	$2.63 \times 10^9$	24.01
AM 2058A	$r'$	14.09	-22.14	$5.73 \times 10^{10}$	22.91
AM 2058B	$r'$	15.88	-20.35	$1.10 \times 10^{10}$	22.91
Caudas de maré	$r'$	16.74	-19.19	$3.80 \times 10^9$	23.63
AM 1228A	$r'$	13.24	-21.46	$3.08 \times 10^{10}$	21.58
AM 1228B	$r'$	16.58	-18.12	$1.42 \times 10^9$	21.58
Envelope	$r'$	14.27	-20.06	$8.48 \times 10^9$	23.32
MW <sup>(a)</sup>	$r'$	-	-21.17	$2.34 \times 10^{10}$	-
LMC <sup>(a)</sup>	$r'$	-	-18.60	$2.21 \times 10^9$	-
SMC <sup>(a)</sup>	$r'$	-	-17.20	$6.08 \times 10^8$	-

Como ponto de comparação para as luminosidade medidas nas componentes dos sistemas estudados, na Tabela 3.1 são listadas as magnitudes e luminosidades absolutas do melhor caso conhecido de interação menor, a Via Láctea (MW) e a Grande e Pequena Nuvens de Magalhães (LMC e SMC, respectivamente). Vemos que a galáxia AM 1219A tem uma luminosidade similar à MW, enquanto que AM 1219B é cerca de cinco vezes mais luminosa que a LMC. Com respeito ao par AM 2058-381, encontramos que a galáxia principal é duas vezes mais luminosa que a MW, enquanto que a secundária é cerca de cinco vezes mais luminosa que a LMC. Portanto, este par é bastante luminoso comparado com o sistema da MW. Em contraste com os pares anteriores, as componentes A e B do sistema AM 1228-260 têm luminosidades semelhantes às da MW e LMC, respectivamente.

Comparando a luminosidade entre as componentes dos sistemas, encontramos que AM 1219B tem  $\sim 30\%$  da luminosidade de AM 1219A. Se assumimos uma razão de massa-luminosidade igual para os dois sistemas, a razão de massas deste sistema está quase no limite de nossa definição para iterações menores, que é de 1/3 entre

as galáxias principal e secundária. Para o sistema AM 2058-260 encontrou-se que a galáxia secundária tem  $\sim 20\%$  da luminosidade da principal. No par AM 1228-260 a componente B é a menos luminosa, quando comparada à componente A, apresentando apenas 5% da luminosidade da galáxia principal. Os dois primeiros sistemas, AM 1219-430 e AM 2058-381, podem ser classificados como sistemas tipo M 51 (ver Fig. 1.1, pág. 10); constituídos por uma galáxia principal com uma estrutura espiral bem definida, e apresentando caudas ou pontes de maré em direção da galáxia companheira menor. Além da semelhança em morfologia, estes sistemas também são comparáveis em termos de luminosidade e distância projetada; a razão de luminosidade entre as componentes de M 51 é  $\sim 2.6$ , e a distância projetada entre elas é de  $\sim 20$  kpc (Schweizer, 1977, Salo & Laurikainen, 2000). Por outro lado, o sistema AM 1228-260 pode ser comparado com o par formado pela galáxia espiral NGC 1097 e sua pequena companheira (NGC 1097B). Neste sistema a galáxia principal é barrada e a secundária está a uma distância projetada de  $\sim 12$  kpc (ou perto de 2 diâmetros da galáxia principal, García-Barreto et al., 2003), em termos de luminosidade, a secundária só tem  $\sim 2\%$  da luminosidade da principal (Lin et al., 2013).

Na Tabela 3.1 também estão listadas as magnitudes das estruturas de maré dos pares estudados. A luminosidade da ponte junto com as caudas de maré do par AM 1219-430 são calculadas integrando o fluxo dentro das isofotas com níveis entre 2 e  $8\sigma$  acima do valor do céu. Para o sistema AM 2058-381 as luminosidades das caudas de maré da galáxia principal foram calculadas integrando entre 0.5 e  $1\sigma$ , e para a estrutura de maré comum do par AM 1228-260 foi integrado entre 2 e  $5\sigma$ . As contribuições das estruturas de maré para as luminosidades totais dos sistemas AM 1219-430, AM 2058-260 e AM 1228-260 são  $\sim 5\%$ ,  $\sim 5\%$  e  $\sim 20\%$ , respectivamente. No sistema *Antennae* suas famosas caudas de maré (ver Fig. 1.1, pág. 10) contribuem com  $\sim 15\%$  da luminosidade total do sistema (Hibbard et al., 2001). Assim, a contribuição estimada das estruturas de maré do sistema AM 1228-260 é similar à de *Antennae*. Estes parâmetros são importantes, por fornecerem um forte vínculo para as simulações numéricas, uma vez que podem ser descartadas as órbitas que não

reproduzam bem a forma das estruturas de maré e sua contribuição ao sistema (e.g., Salo & Laurikainen, 1993, Mihos & Bothun, 1997, Rodrigues et al., 1999, Díaz et al., 2000, Krabbe et al., 2008, 2011).

### 3.3 Decomposição das partes simétrica e assimétrica das galáxias

Com o objetivo de determinar as distorções morfológicas causadas pela interação nas galáxias dos pares, aplicamos o método de simetrização de Elmegreen et al. (1992). Este método é baseado no conceito de simetria *m-fold*: se a estrutura espiral permanece invariante sob uma rotação de  $2\pi/m$  em torno do núcleo ( $m$  é o número de braços), teremos uma simetria *m-fold* ou rotacional de ordem  $m$ . Nesta simetria as galáxias tem um número  $m$  dominante de braços. Na maioria das galáxias a simetria dominante é  $m = 2$ . Seguindo este método, é possível separar as componentes simétrica e não simétrica de galáxias espirais, fazendo sucessivas rotações e subtrações das imagens. A imagem não simétrica  $A_2$ , é obtida subtraindo a imagem observada por ela mesma rotada previamente  $\pi$  radianos. Se  $I(r, \theta)$  é a imagem observada em coordenadas polares, então

$$A_2 = [I(r, \theta) - I(r, \theta + \pi)]_T, \quad (3.1)$$

onde o sufixo  $T$  indica o truncamento, isto é, os pixels com valores negativos são tomados como zero. A imagem  $A_2$  mostra regiões de formação estelar não simétricas e irregularidades dos braços espirais. De outro lado, a imagem simétrica  $S_2$ , é obtida subtraindo a imagem não simétrica da imagem observada. Matematicamente, a imagem simétrica é obtida a partir da seguinte equação:

$$S_2 = I(r, \theta) - [I(r, \theta) - I(r, \theta + \pi)]_T. \quad (3.2)$$

A imagem  $S_2$  mostra o que poderia ser o “disco original” e o padrão espiral não perturbado. É importante salientar que a imagem  $S_2$  ressalta todos os detalhes brilhantes na imagem original que tem contrapartida de detalhes igualmente brilhantes e diametralmente opostos na galáxia. Desta forma estamos ressaltando emissão simétrica, tais como regiões de formação estelar, braços espirais, etc. Porém, ao mesmo tempo poderíamos estar introduzindo informações espúrias, como estruturas em absorção. Por exemplo, se somente um dos braços espirais tem uma faixa de poeira, apenas a parte brilhante dos braços espirais é ressaltada na imagem  $S_2$ , dando a falsa impressão de que os dois braços têm faixa de poeira.

O método de Elmegreen et al. (1992) é aplicado nas imagens restauradas das galáxias estudadas, com a exceção da imagem da galáxia AM 2058A<sup>3</sup>, na qual é aplicado diretamente sobre a imagem original. Os resultados são apresentados na Fig. 3.3 para as galáxias do sistema AM 1219-430, e na Fig. 3.4 para as galáxias membros dos pares AM 2058-381 e AM 1228-260. Os painéis da esquerda mostram as imagens restauradas das galáxias na banda  $r'$ , os painéis centrais as imagens  $A_2$ , e os painéis da direita as imagens  $S_2$ .

A imagem  $A_2$  da galáxia AM 1219A mostra ao longo de um braço espiral, várias regiões H II. Em contraste, a imagem  $S_2$  “recupera” o padrão espiral não perturbado da galáxia AM 1219A. Por outro lado, a imagem  $A_2$  da galáxia AM 1219B não mostra qualquer assimetria significativa, com exceção de uma pequena sobre-densidade no braço Noroeste, portanto, a imagem  $S_2$  é bastante similar à imagem reconstruída da galáxia AM 1219B.

Para AM 2058A a imagem  $A_2$  mostra um braço de maré à Oeste, e um pseudo-anel situado no meio do disco, bem como três luminosos complexos de regiões H II. O mais brilhante está sobre o braço de maré, enquanto que os outros estão na parte Sudeste do anel. Por outro lado, a imagem  $S_2$  apresenta dois braços simétricos, a partir da parte exterior do disco, bem como um anel de baixa intensidade ao redor

---

<sup>3</sup>Como se explicou na Sec. 2.2 (pag. 29) a imagem da galáxia AM 2058A não foi restaurada, devido ao brilho muito intenso do núcleo galáctico, o que introduziria informação espúria no processo de restauração.

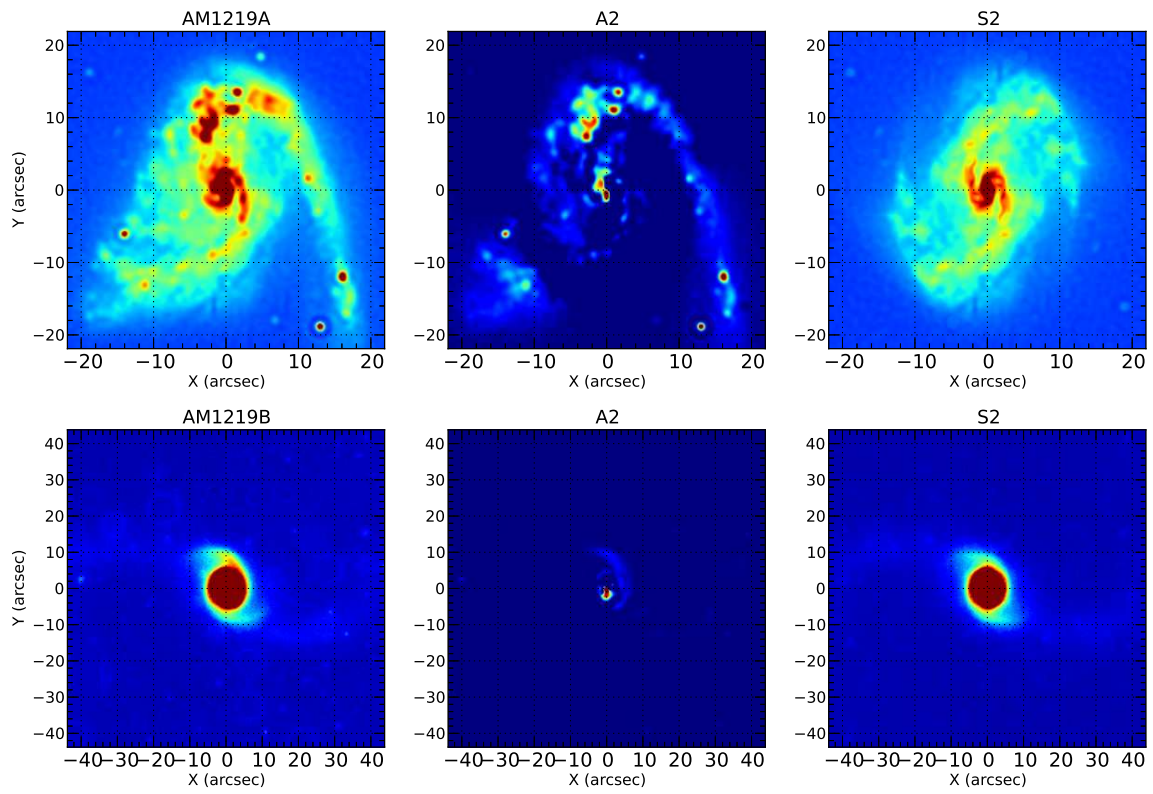


Figura 3.3: Método Elmgreen aplicado às galáxias AM 1219A e AM 1219B. Painéis esquerdos mostram as imagens restauradas das galáxias na banda  $r'$ , os painéis centrais as imagens assimétricas  $A_2$ , e os painéis direitos as imagens simétricas  $S_2$ .



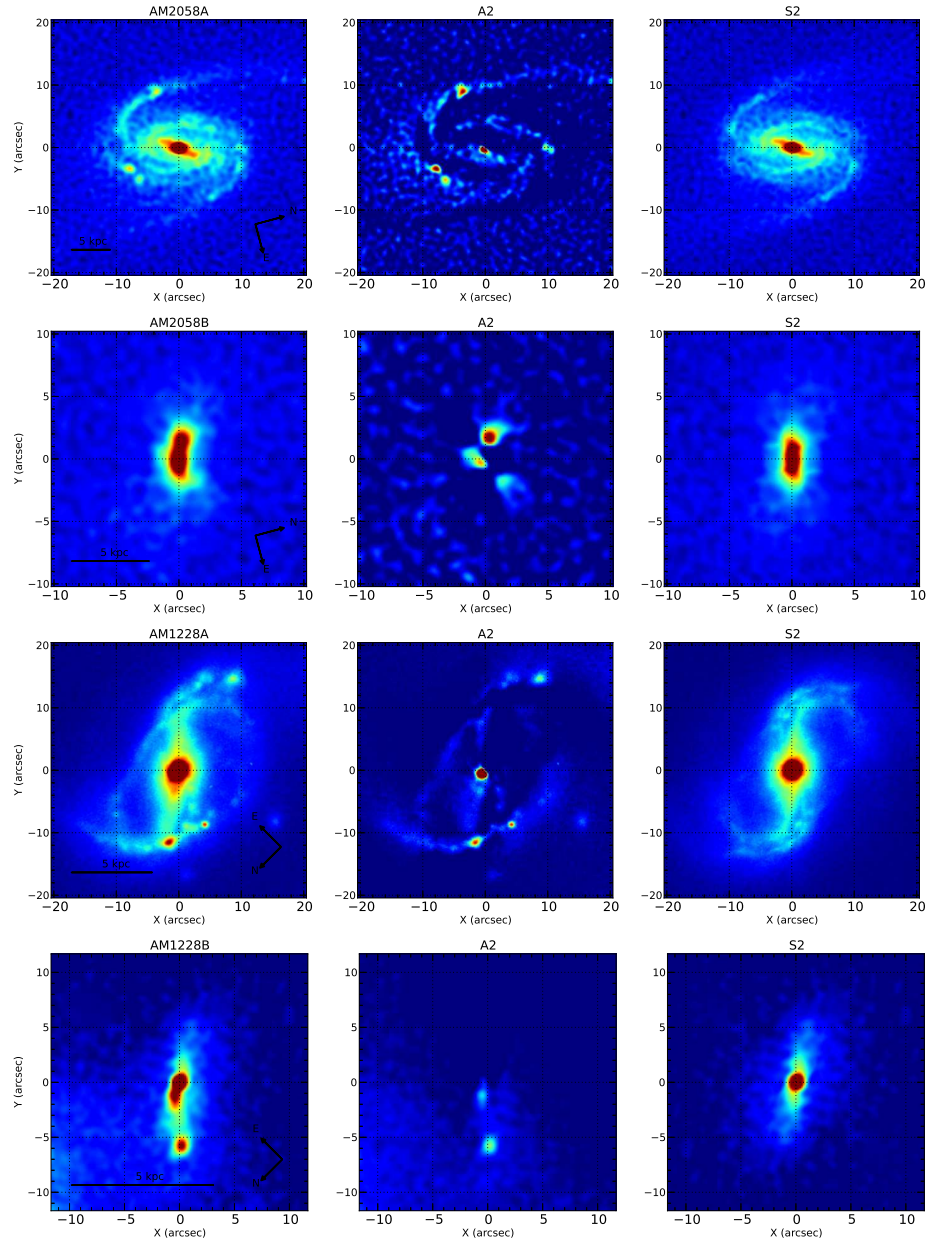


Figura 3.4: Método Elmegreen aplicado às galáxias dos pares AM2058-381 e AM1219-260. Painéis esquerdos mostram as imagens restauradas das galáxias na banda  $r'$ , os painéis centrais as imagens assimétricas  $A_2$ , e os painéis direitos as imagens simétricas  $S_2$ .

da barra. Como veremos na Secção 3.4, a decomposição do perfil de brilho superficial confirma a existência dessa estrutura. A imagem  $A_2$  de AM 2058B revela três brilhantes nodos de regiões H II nesta galáxia. O complexo na direção Oeste, a  $\sim 1.4$  kpc do centro galáctico, é muito luminoso comparado com os outros dois. Por outro lado, a imagem  $S_2$  desta galáxia revela a estrutura do disco e um pseudo-bojo em forma de *boxy*.

O imagem  $A_2$  de AM 1228A mostra um pseudo-anel em torno da barra, bem como um excesso de densidade na parte Noroeste da barra. Há também uma sobre-densidade na parte norte do bojo galáctico, que pode ser vista como uma região H II gigante. A imagem  $S_2$  desta galáxia, revela a barra, os braços espirais e o disco galáctico não perturbados. A imagem  $A_2$  de AM 1228B mostra dois complexos de regiões H II, um deles bastante brilhante a  $\sim 2,7$  kpc do núcleo em direção Noroeste. Observamos também na parte Norte desta imagem parte da estrutura comum entre AM 1228A e AM 1228B. Por último, a imagem  $S_2$  de AM 1228B recupera o disco subjacente e o bojo desta galáxia.

### 3.3.1 Inclinação dos discos galácticos

A correta determinação da inclinação e orientação de uma galáxia é sempre uma tarefa difícil. Por exemplo, Grosbol (1985) aplicou transformada de Fourier unidimensional no perfil de brilho azimutal da parte externa dos discos galácticos, adotando como ângulo de deprojeção aquele que maximiza o coeficiente de Fourier bisimétrico ( $m = 2$ ). Por sua vez, Barberà et al. (2004) aplicou análise de Fourier bidimensional nas imagens das galáxias, escolhendo os ângulos de deprojeção que maximizam a contribuição das componentes axissimétricas do espectro de Fourier. Estes tipos de métodos são aplicáveis em galáxias isoladas, porém seus princípios falham em galáxias em interação devido às perturbações morfológicas presentes nestes objetos. Uma vantagem do método de simetrização é que as imagens  $S_2$  revelam o disco subjacente das galáxias, permitindo determinar seus ângulos de posição (AP) e inclinação  $i$ , apenas assumindo o valor médio do AP e  $i$  das isofotas mais externas. Os valores de

Tabela 3.2: Ângulos de posição e de inclinação dos discos das galáxias estudadas.

Galáxia	$i$ (graus)	AP (graus)
AM 1219A	$39.8^\circ \pm 1.3^\circ$	$29.0^\circ \pm 0.6^\circ$
AM 1219B	$49.3^\circ \pm 0.5^\circ$	$-42.0^\circ \pm 0.7^\circ$
AM 2058A	$58.1^\circ \pm 0.2^\circ$	$198.9^\circ \pm 0.5^\circ$
AM 2058B	$70.2^\circ \pm 0.2^\circ$	$289.0^\circ \pm 0.1^\circ$
AM 1228A	$63.6^\circ \pm 0.7^\circ$	$162.1^\circ \pm 0.5^\circ$
AM 1228B	$69.4^\circ \pm 0.2^\circ$	$151.3^\circ \pm 0.1^\circ$

AP e  $i$  calculados para todas as galáxias são listados na Tabela 3.2, e na Fig. 3.5 são desenhados os contornos das isofotas tomadas para o cálculo de cada galáxia.

Outra vantagem das imagens  $S_2$  é que podemos facilmente classificar o tipo morfológico das galáxias estudadas. Assim, as galáxias principais dos pares AM 1228A, AM 2058A e AM 1228A podem ser classificadas como espirais de tipo tardio Sc, Sc e SBc, respectivamente. Enquanto as galáxias secundárias AM 1219B, AM 2058B e AM 1228B podem ser classificadas como de tipo Sa, S0 e Sd, respectivamente.

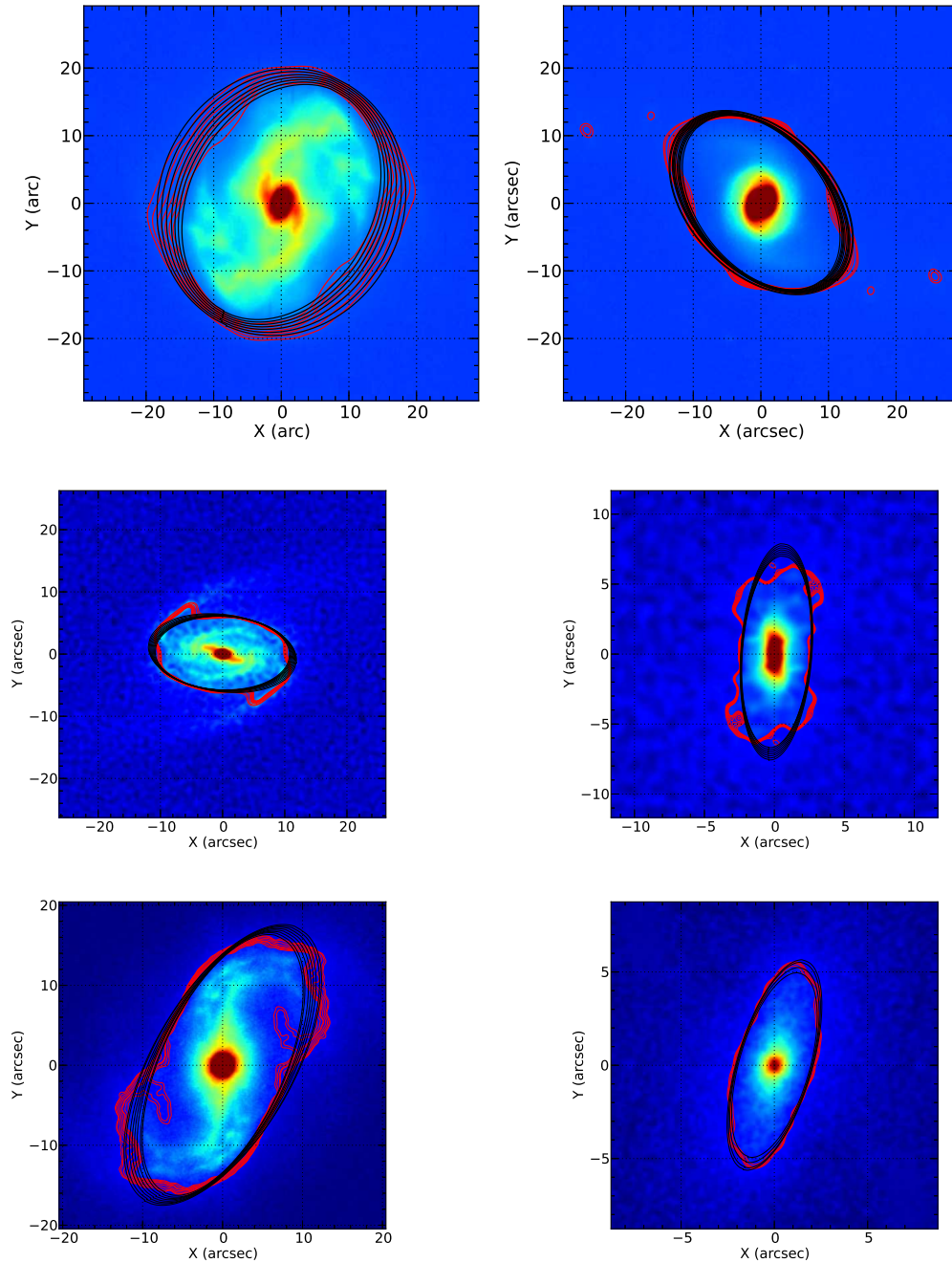


Figura 3.5: Contornos das isofotas externas utilizadas para calcular os ângulos de posição e de inclinação dos discos galácticos. Nos painéis superiores as componentes A (esquerda) e B (direita) do par AM 1219-430, nos intermediários as componentes A e B do par AM 2058-381, e nos inferiores os membros do par AM 1228-260.

### 3.4 Análise do perfil de brilho das galáxias

A partir das imagens simétricas ( $S_2$ ) de cada galáxia derivamos o seu respectivo perfil de brilho superficial, para isto, utilizamos a tarefa ISOPHOTE do pacote STSDAS (Jedrzejewski, 1987). Esta tarefa opera de forma iterativa: dado um comprimento do semieixo maior ( $r$ ) e sua respectiva isofota, é feita uma tentativa inicial com uma elipse para ajusta-la. A elipse é parametrizada usando os seus valores de ângulo de posição, elipticidade, e coordenadas do centro. O centro fotométrico da galáxia é tomado como o centro da elipse, e mantido fixo, enquanto que os demais parâmetros são livres. A imagem é amostrada ao longo do caminho da elipse, obtendo um perfil de brilho azimutal ( $I_r$ ) em função do ângulo de anomalia excêntrica ( $E$ ). Durante o processo de amostragem, a fim de evitar distorções na isofota devido a uma eventual região de formação estelar, adotamos um fator de corte de 20%, para excluir os pixels mais brilhantes de cada anel. A distribuição harmônica do  $I_r(E)$  é ajustada usando a seguinte função:

$$I_r(E) = I_0 + \sum_{n=1}^{n=4} [A_n \cos(nE) + B_n \sin(nE)]. \quad (3.3)$$

Se a elipse inicial segue exatamente o contorno isofotal, todos os coeficientes de Fourier se anulam. A desvio da isofota em relação à forma elíptica pode ser quantificada a partir dos coeficientes de Fourier: os parâmetros  $A_1$ ,  $B_1$  estão associados à posição do centro da elipse, os parâmetros  $A_2$  e  $B_2$  estão associados ao ângulo de posição e elipticidade, enquanto que o conjunto de parâmetros  $A_3$ ,  $B_3$ ,  $A_4$ , e  $B_4$  estão relacionados com a forma da isofota, se é do tipo *disky* ou *boxy* (Jedrzejewski, 1987, Cabrera-Lavers & Garzón, 2004). Portanto, a partir da amplitude dos coeficiente de Fourier é possível calcular o fator de correção para os parâmetros da elipse, e atualizá-los para uma nova tentativa na próxima iteração. Este procedimento segue até que todos os coeficiente de Fourier sejam anulados, ou até que o coeficiente de Fourier com maior amplitude seja menor que uma fração do RMS (*root mean square*) residual

entre o  $I_r(E)$  e a função de ajuste. Este processo é repetido para cada comprimento do semieixo maior ( $r$ ) até que seja varrida radialmente a galáxia.

Uma vez obtido o perfil de brilho superficial para cada uma das galáxias estudadas, fazemos sua decomposição dele. Para isto, assumimos que o perfil de brilho superficial é o resultado da soma das componentes principais, bojo e disco, e em algumas galáxias de componentes secundárias, tais como barras, anéis e lentes. Para o modelamento de cada uma dessas componentes usamos um perfil de brilho específico: os discos são ajustados com um perfil exponencial (Freeman, 1970), os bojos com um perfil de Sérsic (Sérsic, 1968), as barras com um perfil elíptico (Freeman, 1966), os anéis com um perfil Gaussiano (Buta, 1996), e as lentes com um perfil quadrático (Duval & Athanassoula, 1983). Na continuação, cada perfil é descrito .

As formas analíticas para modelar os perfis do disco e bojo estão dadas pelas seguintes equações:

$$I(r) = I_0 \exp \left[ - \left( \frac{r}{h} \right) \right], \quad (3.4)$$

$$I(r) = I_b \exp \left[ -k_n \left( \frac{r}{r_e} \right)^{\frac{1}{n}} \right], k_n = 2n - 0.324. \quad (3.5)$$

A primeira equação corresponde ao perfil de Freeman, onde  $I_0$  é a intensidade central e  $h$  é o comprimento de escala do disco. A segunda equação corresponde ao perfil de Sérsic, onde  $I_b$  é a intensidade central e  $r_e$  é o raio efetivo. O termo  $k_n$  é definido de forma tal que  $r_e$  inclui a metade da luminosidade total do bojo, e  $n$  é o chamado índice de Sérsic, e define a forma do perfil. O parâmetro  $k_n$  pode ser estimado para  $n \geq 1$  com um erro menor que 0.1% (Ciotti, 1991). No caso em que  $n$  é igual a 4, temos a conhecida lei de de Vaucouleurs (de Vaucouleurs, 1948), enquanto que  $n = 1$  nos fornece uma lei exponencial semelhante ao perfil de Freeman.

A forma analítica para modelar o perfil de uma barra (Freeman, 1966) é :

$$I(r) = I_{bar} \left[ 1 - \left( \frac{r}{r_{bar}} \right)^2 \right]^{1/2}, \quad (3.6)$$

onde  $I_{bar}$  é o brilho central da barra e  $r_{bar}$  seu comprimento. A forma analítica para modelar o perfil de um anel é uma função gaussiana (Buta, 1996) :

$$I(r) = I_{ring} \exp \left[ -\frac{1}{2} \left( \frac{r - r_{ring}}{\sigma_r} \right)^2 \right], \quad (3.7)$$

onde  $I_{ring}$  é a intensidade máxima do anel,  $r_{ring}$  é o raio central e  $\sigma_r$  é uma medida da largura do anel. Por último, a forma analítica usada para modelar uma estrutura tipo lente (Duval & Athanassoula, 1983) é :

$$I(r) = I_l \left[ 1 - \left( \frac{r}{r_l} \right)^2 \right], \quad (3.8)$$

onde  $I_l$  é o intensidade central e  $r_l$  é o raio de escala da estrutura tipo lente.

Para o ajuste do perfil de brilho, em termos gerais, seguimos a metodologia descrita por Prieto et al. (2001) e Cabrera-Lavers & Garzón (2004). Em primeira aproximação, assumimos que o perfil de brilho superficial é a soma das componentes bojo e disco. Depois, identificamos através da análise do perfil de brilho os intervalos dominantes de cada componente. Os parâmetros do bojo e do disco são ajustados dentro desses intervalos utilizando o método de *regressão de distância ortogonal* (Boggs & Rogers, 1990). Em seguida, iniciamos um processo iterativo, primeiro ajustamos o disco, depois, o subtraímos do perfil de brilho e ajustamos aos resíduos a componente do bojo. Após o bojo ser ajustado, o subtraímos do perfil de brilho e ajustamos aos resíduos a componente do disco de novo. O processo é repetido várias vezes, até que os parâmetros do bojo e do disco não mudem mais que o valor das suas incertezas de uma iteração a outra. Para algumas galáxias uma simples decomposição bojo-disco não é suficiente, pois algumas delas apresentam estruturas secundárias, tais como barras, anéis e lentes. Portanto, para o ajuste do perfil destas galáxias, uma vez feita uma estimativa inicial do bojo e disco, estes são subtraídos do perfil de brilho,

e as componentes secundárias são ajustadas aos resíduos, iniciando novamente um processo iterativo, até que os parâmetros convirjam. A fim de fazer este processo de forma automática desenvolvemos um código em PYTHON.

Os parâmetros fotométricos derivados do ajuste do perfil de brilho são usados para calcular a luminosidade de cada componente, usando a seguinte equação:

$$L = \int_{r_{min}}^{r_{max}} I(r) 2\pi r dr, \quad (3.9)$$

onde  $I(r)$  é o perfil de brilho de qualquer componente acima definida, e os limites de integração,  $r_{min}$  e  $r_{max}$ , são os raios mínimos e máximos do perfil de brilho superficial observado para cada galáxia. Na Tabela 3.6 (Pág. 65) são listadas as luminosidades encontradas para cada componente e as suas contribuições à luminosidade total da respectiva galáxia.

### 3.5 Resultado da decomposição do perfil de brilho das galáxias

Nos painéis esquerdos da Fig. 3.6 apresentamos o ajuste do perfil de brilho superficial nas bandas  $g'$  e  $r'$  de AM1219A. O perfil de brilho para esta galáxia foi decomposto em duas componentes, bojo e disco. A soma destas componentes ajusta-se ao início e ao final do perfil, porém, no intervalo entre  $2.9''$  ( $\sim 1.3$  kpc) e  $20.7''$  ( $\sim 9.5$  kpc) existe um excesso de luz. Para quantificar este excesso, integramos o perfil de brilho, e subtraímos dele os perfis integrados do bojo e do disco (usando a equação 3.9). O excesso resultante, que é de  $\sim 53\%$ , pode ser explicado pela contribuição das regiões de formação estelar ao longo dos braços espirais desta galáxia (ver a Fig. 3.3). Em galáxias normais são reportados também excessos de luz no perfil de brilho, mas em menor intensidade. O alto valor pode ser devido à alta taxa de formação estelar detectada nesta galáxia (Pastoriza et al., 1999).



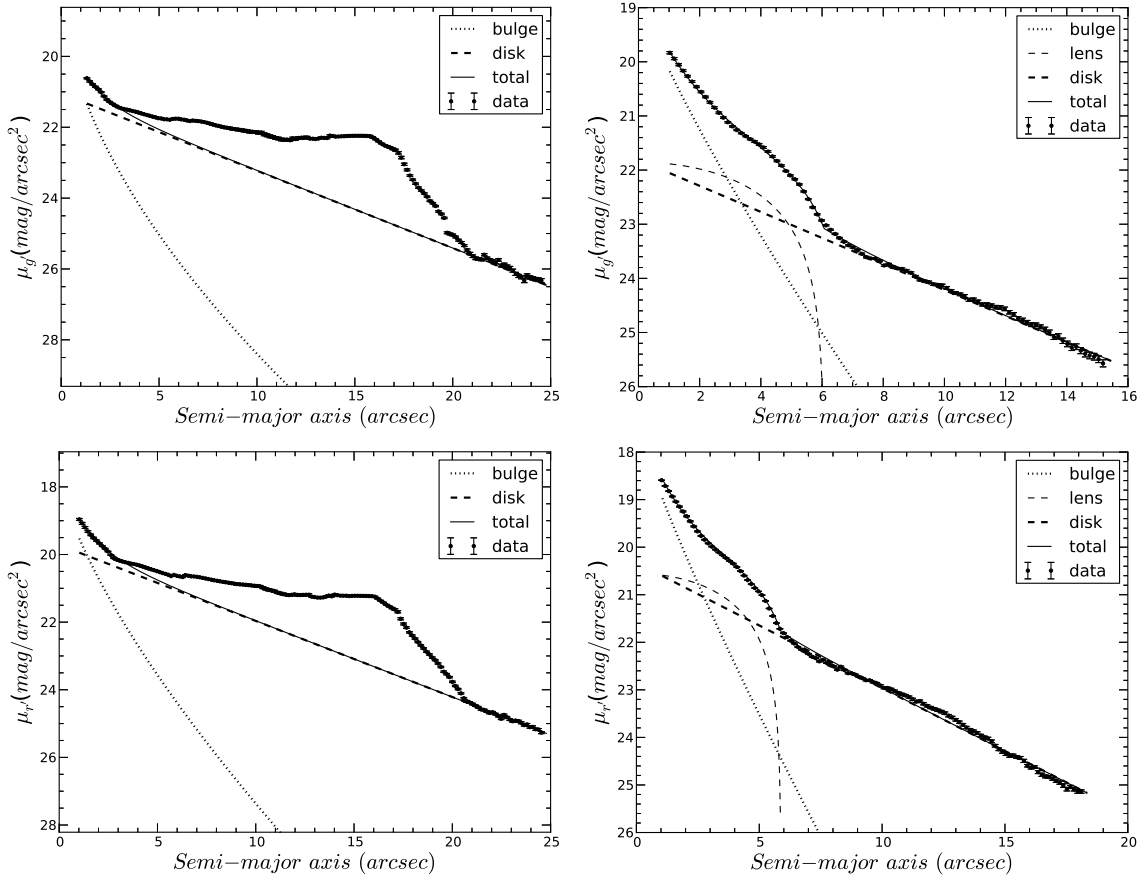


Figura 3.6: Decomposição estrutural do perfil de brilho superficial das imagens simétricas  $S_2$  das galáxias AM 1219A (painéis esquerdos) e AM 1219B (direitos), nas bandas  $g'$  e  $r'$ .

Nos painéis direitos da Fig. 3.6 apresentamos o ajuste do perfil de brilho superficial nas bandas  $g'$  e  $r'$  de AM 1219B. Para a decomposição do perfil desta galáxia, além das estruturas clássicas bojo e disco, foi necessária a introdução de uma lente. Esta estrutura é ressaltada na Fig. 3.5 (Pág. 50), onde se vê claramente sua morfologia tipo “lente” circundando o bojo galáctico.

A decomposição do perfil de brilho na banda  $r'$  das galáxias principais dos sistemas AM 2058-381 e AM 1219-430 estão nos painéis esquerdos da Fig. 3.7. Uma simples decomposição de bojo-disco não foi suficiente para o ajuste dos perfis destas duas galáxias. Como observamos na Seção 3.3, as imagens simétricas de AM 2058A e AM 1228A revelam a presença de barras e anéis na sua morfologia. Desta forma, além

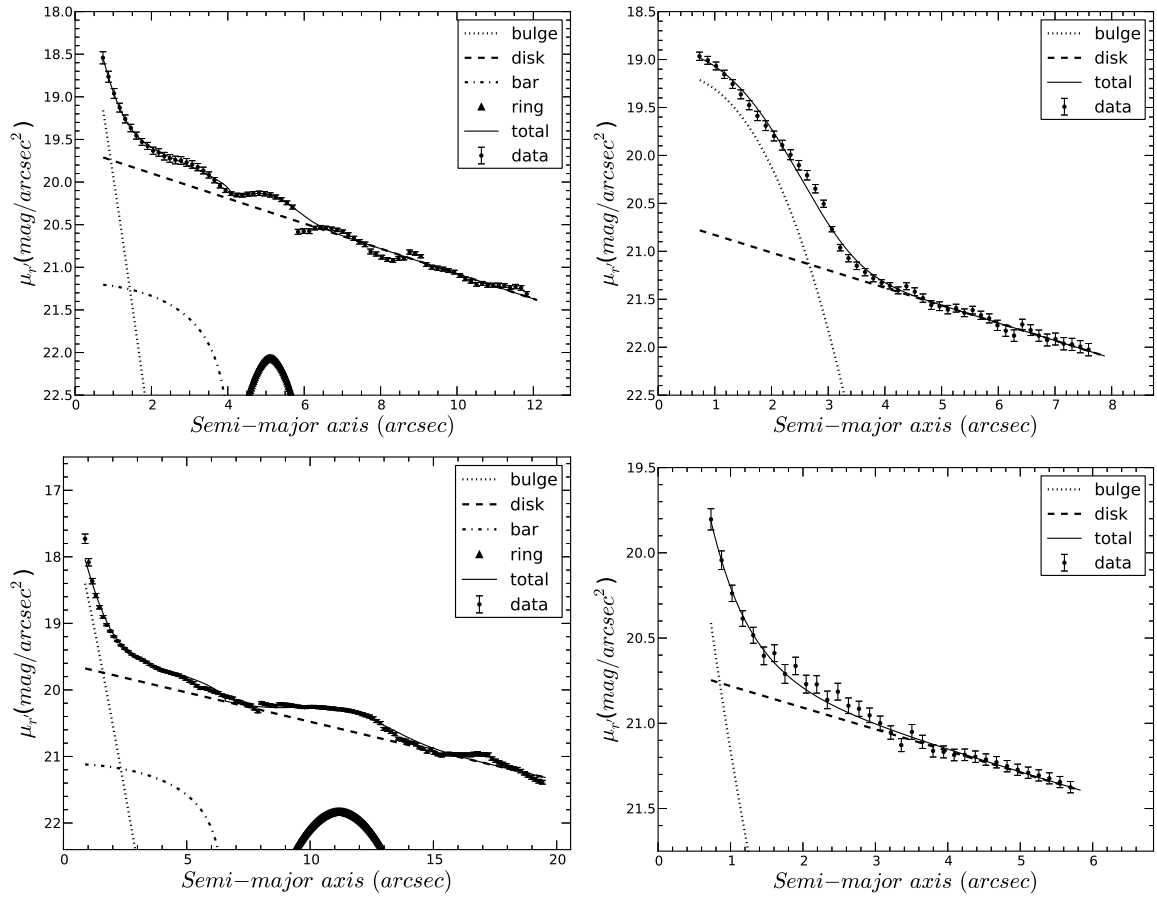


Figura 3.7: Decomposição estrutural do perfil de brilho superficial das imagens simétricas  $S_2$  nas banda  $r'$  das galáxias AM 2058A (painel superior esquerdo), AM 2058B (superior direito), AM 1228A (inferior esquerdo) e AM 1228B (inferior direito).

dos perfis bojo-disco adicionamos ao ajuste os perfis de barra e anel. Como se vê, na Fig. 3.7, os ajustes dos perfis destas duas galáxias são bastantes bons, seguindo os “desvios” do perfil de brilho causados pelas estruturas secundárias (barras e anéis).

O ajuste dos perfis de brilho na banda  $r'$  das galáxias secundárias AM 2058B e AM 1219B são apresentados nos painéis direitos da Fig. 3.7. Os perfis destas duas galáxias têm uma decomposição simples, somente as componentes bojo e disco, sendo os ajustes muito bons ao longo de todos os raios.

### 3.5.1 Parâmetros do disco

Os parâmetros estruturais do disco ajustados para todas as galáxias são listados na Tabela 3.3. Na coluna [1] são dadas as magnitudes superficiais centrais<sup>4</sup> ( $\mu_0$ ) em  $mag/arcsec^2$ . Os comprimentos de escala ( $h$ ) são dados em arco-segundos e kpc nas colunas [2] e [3], respectivamente. Os valores encontrados para o raio de escala e a magnitude superficial central nas galáxias dos pares estudados estão de acordo com os valores médios,  $h = 3.8 \pm 2.1$  kpc e  $\mu_0 = 20.2 \pm 0.7 mag/arcsec^2$ , encontrados para uma amostra de 30 000 galáxias não interagentes (Fathi et al., 2010, Fathi, 2010). Isto indica que a interação entre as galáxias membros dos sistemas estudados não afetou a estrutura do disco estelar das galáxias. Resultados similares foram encontrados por Laurikainen & Salo (2001) para uma mostra de 21 galáxias em interação, do tipo M 51, na qual os discos galácticos na banda R têm valores médios de  $h = 3.72 \pm 1.83$  kpc e  $\mu_0 = 20.38 \pm 0.92 mag/arcsec^2$ . De fato, Schwarzkopf & Dettmar (2000) encontraram que a distribuição de valores do raio escala em galáxias em interação segue a mesma forma que a de galáxias isoladas, como se mostra na Fig. 3.8.

Na literatura é bem conhecida a correlação, apesar de uma alta dispersão, que existe entre os parâmetros  $\mu_0$  e  $h$  em galáxias isoladas (e.g. de Jong, 1996, Graham

<sup>4</sup>A relação entre magnitude e intensidade central é dada por  $\mu_0 = 2.5 \log(I_0/A)$ , onde  $A$  é área em  $arcsec^2$  de um pixel.

Tabela 3.3: Parâmetros estruturais do disco

Galáxia	Filtro	$\mu_0$ ( $mag/arcsec^2$ ) [1]	$h$ ( $arcsec$ ) [2]	$h$ (kpc) [3]
AM 1219A	$g'$	$21.04 \pm 2.21$	$4.97 \pm 0.92$	2.28
	$r'$	$19.72 \pm 0.27$	$4.82 \pm 0.11$	2.22
AM 1219B	$g'$	$21.81 \pm 0.07$	$4.51 \pm 0.05$	2.07
	$r'$	$20.33 \pm 0.08$	$4.11 \pm 0.04$	1.89
AM 2058A	$r'$	$19.60 \pm 0.11$	$7.37 \pm 0.26$	5.96
AM 2058B	$r'$	$20.66 \pm 0.08$	$6.00 \pm 0.19$	4.86
AM 1228A	$r'$	$19.60 \pm 0.28$	$12.36 \pm 1.05$	4.80
AM 1228B	$r'$	$20.66 \pm 0.07$	$8.58 \pm 0.47$	3.33

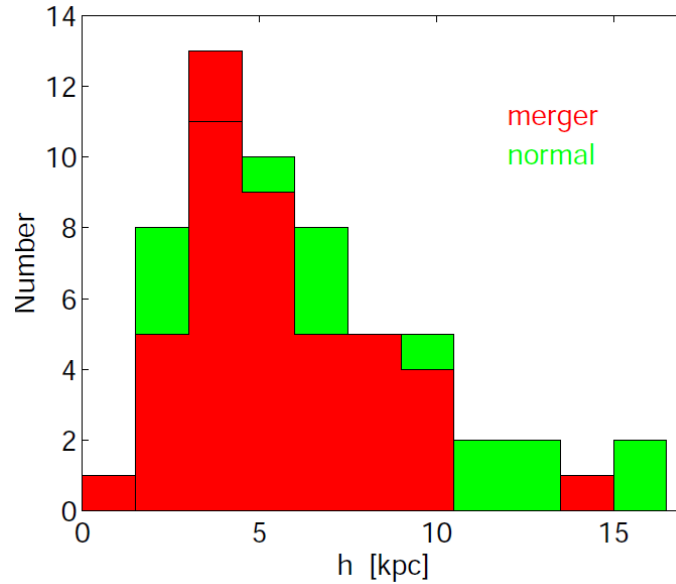


Figura 3.8: Distribuição de valores do raio de escala de uma amostra de galáxias isoladas e em interação/fusão *edge-on* (Tomada de Schwarzkopf & Dettmar (2000)).

& de Blok, 2001, Gadotti, 2009, Fathi et al., 2010); para valores brilhantes de  $\mu_0$  geralmente correspondem valores pequenos de  $h$  e vice-versa. A fim de explorar se esta relação se mantém nas galáxias estudadas, na Figura 3.9 é apresentado o gráfico de  $\mu_0$  vs  $h$ . Junto com os valores das galáxias estudadas, estão também os derivados para uma amostra de 1000 galáxias isoladas na banda  $r'$  de Gadotti (2009). Podemos observar que as posições dos discos galácticos das galáxias AM 1219A, AM 1219B, AM 2058B e AM 1228B mostram a mesma tendência das galáxias isoladas, entretanto, as posições dos discos das galáxias AM 2058A e AM 1228A estão afastadas dela. Ferreira & Pastoriza (2004) também reportaram este tipo de comportamento para as galáxias principais da sua amostra de interações menores, onde para um determinado valor de  $h$  do disco das galáxias principais existe um  $\mu_0$  mais brilhante comparado com as normais.

As posições dos discos galácticos de AM 2058A e AM 1228A podem ser atribuídas a dois tipos de efeitos, ilustrados na Fig. 3.10. No primeiro, o brilho superficial do disco pode ter aumentando uniformemente, devido a um aumento da formação estelar

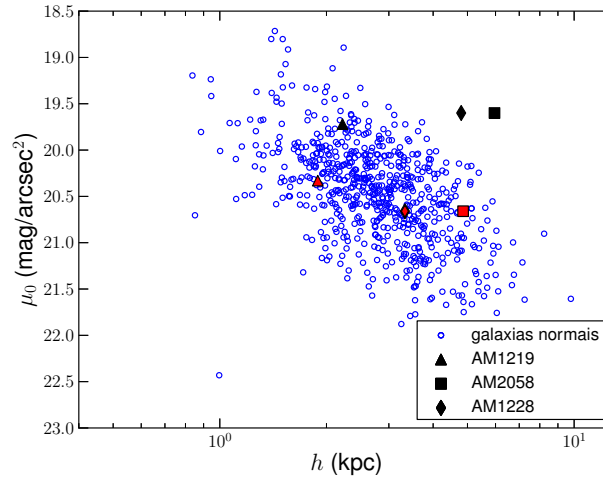


Figura 3.9: A magnitude superficial central ( $\mu_0$ ) versus o comprimento de escala do disco ( $h$ ). As galáxias secundárias são representadas com os mesmos símbolos que as principais, mas em uma cor vermelha. Os círculos azuis abertos são os valores encontrados para uma amostra de galáxias isoladas (Gadotti, 2009).

em todo o disco como consequência da interação. No segundo, o comprimento de escala do disco galáctico pode ter sido aumentado pela interação, devido à transferência de momentum angular da galáxia secundária. De fato, em um estudo sobre como a estrutura bojo-disco é afetada em fusões menores, Scannapieco & Tissera (2003) encontraram que depois da fusão, o comprimento de escala do disco pode encolher, no entanto, durante a fase de interação, os comprimento de escala são aumentados. Por outro lado, é importante salientar que, se os dois mecanismos agissem ao mesmo tempo, seus efeitos se cancelariam, e o disco galáctico não apresentaria nenhum desvio da correlação dos parâmetros  $\mu_0-h$ , e sim um deslocamento para a parte superior esquerda do gráfico  $\mu_0-h$ . Este poderia ser o caso da galáxia AM 1219A, na qual seu disco encontra-se no extremo da distribuição (Fig. 3.9).

Por último, os valores  $\mu_0$  na banda  $r'$  das galáxias principais são mais brilhantes que os das galáxias secundárias, e os perfis de brilho dos discos das principais menos concentrados ( $r_d$  maiores) que os das galáxias secundárias. Uma tendência similar foi

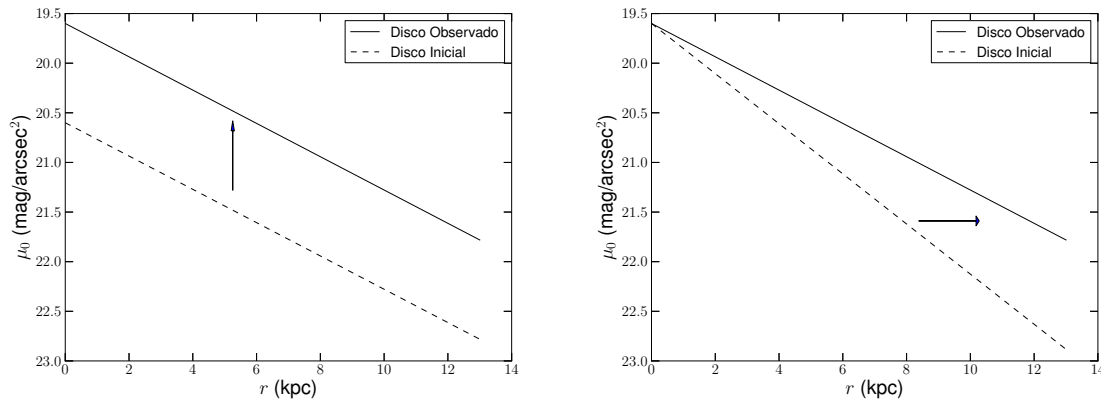


Figura 3.10: Perfil de brilho superficial do disco da galáxia AM 2058A dado como exemplo da mudança que poderia ter sofrido por causa da interação. Na esquerda, o cenário se o brilho superficial do disco houvesse sido aumentando uniformemente durante a interação. Na direita, o cenário se o comprimento de escala do disco houvesse sido aumentado pela interação. As setas indicam a direção da evolução do disco.

também reportada por Ferreira & Pastoriza (2004) para uma amostra de interações menores.

### 3.5.2 Parâmetros do bojo

Na Tabela 3.4 são listados os parâmetros estruturais do bojo ajustados para cada uma das galáxias. Na coluna [1] estão as magnitudes centrais superficiais ( $\mu_b$ ) em  $mag/arcsec^2$ , nas colunas [2] e [3] estão os raios efetivos ( $r_e$ ) em arco-segundos e kpc, respectivamente, e na coluna [4] os índices de Sérsic ( $n$ ). Observa-se que os valores de  $n$  dos bojos das galáxias são menores que 2, caindo dentro da categoria dos chamados pseudo-bojos (Kormendy & Kennicutt, 2004, Kormendy, 2013). AM 2058B tem um valor de  $n$  levemente maior do que 2, porém está dentro do limite da classificação. O nome de pseudo-bojo é devido a que, embora seja uma estrutura nuclear, não segue o perfil de brilho dos bojos clássicos ( $I(r) \propto r^{1/4}$ ). Apresentando um perfil aplanado, de tipo disco (quase exponencial), com um índice de Sérsic em torno de 1, e portanto, conhecidos também como bojos de tipo *disky*. Do ponto de vista dinâmico os pseudo-bojos também são diferentes dos clássicos, sendo suportados pela

Tabela 3.4: Parâmetros estruturais do bojo

Galáxia	Filtro	$\mu_b$ ( $mag/arcsec^2$ ) [1]	$r_e$ ( $arcsec$ ) [2]	$r_e$ (kpc) [3]	$n$ [4]
AM 1219A	$g'$	$18.11 \pm 0.91$	$1.47 \pm 0.25$	0.68	$1.74 \pm 0.17$
	$r'$	$17.60 \pm 0.70$	$1.64 \pm 0.04$	0.75	$1.41 \pm 0.16$
AM 1219B	$g'$	$18.74 \pm 1.81$	$1.76 \pm 0.34$	0.81	$1.20 \pm 0.47$
	$r'$	$17.33 \pm 1.57$	$1.48 \pm 0.12$	0.68	$1.17 \pm 0.34$
AM 2058A	$r'$	$17.27 \pm 0.58$	$0.63 \pm 0.025$	0.51	$0.90 \pm 0.08$
AM 2058B	$r'$	$19.13 \pm 0.07$	$1.56 \pm 0.01$	1.27	$0.41 \pm 0.02$
AM 1228A	$r'$	$17.07 \pm 1.08$	$0.99 \pm 0.06$	0.38	$0.86 \pm 0.16$
AM 1228B	$r'$	$15.83 \pm 5.9$	$0.60 \pm 0.13$	0.23	$2.08 \pm 0.95$

rotação e não pela dispersão de velocidade ( $V/\sigma > 1$ ). Com respeito à morfologia, os pseudo-bojos contêm frequentemente espirais nucleares, anéis e barras. Além disso, eles têm intensa atividade de formação estelar (Kormendy & Kennicutt, 2004, Fisher & Drory, 2010, e demais referências). Estas características de formação estelar, na região nuclear, são vistas nas imagens  $S_2$  das galáxias estudadas (ver Figs. 3.3 e 3.4, nas Págs. 46, respectivamente).

O cenário de formação dos pseudo-bojos em galáxias isoladas acontece através de um processo secular (Kormendy & Kennicutt, 2004, Gadotti, 2009, Kormendy, 2013), onde estruturas não axissimétricas, tais como barras e braços espirais, conduzem *inflows* de gás para regiões internas da galáxia, via choques e torques gravitacionais. Este *inflow* pode ser seguido por uma subsequente formação estelar, e ainda formar uma estrutura estelar compacta (com  $V/\sigma > 1$ ), conhecida como pseudo-bojos. Em galáxias em interação, o *inflow* pode ser causado por estruturas não axissimétricas, originadas pela interação de maré da galáxia secundária (e.g., Quinn et al., 1993, Mihos & Hernquist, 1994, Hernquist & Mihos, 1995), ou pelo torque gravitacional causado sobre o gás pela companheira (Gadotti, 2009). Portanto, é bem provável que os pseudo-bojos encontrados nas galáxias dos sistemas AM 1219-430, AM 2058-381 e AM 1228-260 sejam originados pela interação gravitacional entre as componentes dos pares.

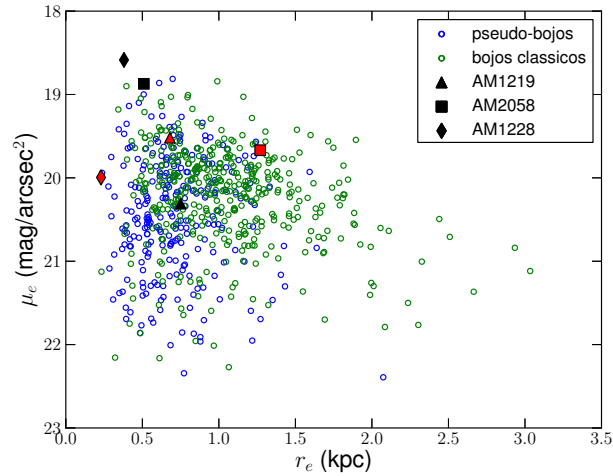


Figura 3.11: Magnitude superficial efetiva ( $\mu_e$ ) versus o raio efetivo ( $r_e$ ). As galáxias secundárias são representadas com os mesmos símbolos que as principais, mas em cor vermelha. Os círculos azuis e verdes abertos são os valores encontrados para uma amostra de galáxias isoladas (Gadotti, 2009) com pseudo bojo e bojo clássico, respectivamente.

Os parâmetros do bojo,  $\mu_e$  e  $r_e$ , não estão correlacionados (de Jong, 1996, Gadotti, 2009), no entanto, a fim de comparar os parâmetros dos bojos das galáxias estudadas com a distribuição dos valores dos bojos clássicos e pseudo bojos das galáxias isoladas, na Fig. 3.11 apresentamos o gráfico  $\mu_e$  versus  $r_e$ . Os bojos das galáxias AM 1219A, AM 1219B, AM 2058B estão no meio da distribuição, enquanto que os bojos das galáxias principais AM 2058A, AM 1228A e a galáxia secundária AM 1228B estão nas bordas. Os valores de  $\mu_e$  de AM 2058A e AM 1228A são os mais brilhantes da distribuição, enquanto que o valor de  $r_e$  de AM 1228B é uns dos mais pequenos. É importante observar, que os altos valores para  $\mu_e$  dos bojos das galáxias AM 2058A e AM 1228A devem estar correlacionados com a peculiaridade apresentada nos seus respectivos discos, como mencionado na seção anterior.



### 3.5.3 Parâmetros das estruturas secundárias

Na Tabela 3.5 são listados os parâmetros ajustados para estruturas secundárias. O comprimento das barras das galáxias AM 2058A e AM 1228A são 3.3 kpc e 2.54 kpc, respectivamente. Estes valores estão de acordo com os encontrados para galáxias espirais do tipo tardio (e.g., Elmegreen & Elmegreen, 1985, Gadotti, 2009). A contribuição das barras à luminosidade total de suas respectivas galáxias é similar,  $\sim 4\%$  (ver Tabela 3.6). Porém, a barra da galáxia AM 2058A é quase um fator de 1,5 mais luminosa que a barra de AM 1228A, seguindo a mesma proporção de seus tamanhos. Com respeito à contribuição do anel à luminosidade total destas galáxias, observamos que o anel de AM 1228A contribui com  $\sim 6\%$ , enquanto que em AM 2058A, o anel contribui somente com  $\sim 2\%$ . Em luminosidade, o anel de AM 1228A é quase duas vezes mais brilhante do que o anel de AM 2058A. Devido, provavelmente, à diferença de largura entre os anéis, o anel de AM 1228A tem um  $\sigma_r \sim 0.7$  kpc, enquanto que a galáxia AM 1228B tem um  $\sigma_r \sim 0.5$  kpc. A galáxia secundária do sistema AM 1219-430 apresenta uma lente. Esta estrutura é bastante luminosa, tendo uma contribuição de  $\sim 25\%$ , levemente superior à contribuição do bojo ( $\sim 22\%$ ). De fato, a soma das duas componentes é quase a metade da luminosidade desta galáxia.

### 3.5.4 Relações bojo e disco

Os parâmetros estruturais do disco e do bojo não têm uma dependência com o tipo morfológico, com exceção do brilho superficial do bojo (de Jong, 1996, Gadotti, 2008). Ao contrario, as razões de luminosidade bojo-disco ( $B/D$ ) e bojo-luminosidade total ( $B/T$ ) têm uma forte correlação com o tipo morfológico (e.g., de Jong, 1996, Graham & Worley, 2008, Fathi et al., 2010). A fim de verificar se as razões  $B/D$  e  $B/T$  das galáxias estudadas são afetadas pela interação, estas foram comparadas com os valores médios das galáxias isoladas do mesmo tipo morfológico. Na Tabela 3.6 são listadas as razões  $B/D$  e  $B/T$  para todas as galáxias estudadas. As razões  $B/T$  obtidas para as galáxias principais, com valores menores que 1, são consistentes com a média

Tabela 3.5: Parâmetros estruturais das componentes secundárias

Galáxia	Filtro [1]	Barra		
		$\mu_{bar}$ ( $mag/arcsec^2$ ) [2]	$r_{bar}$ (arcsec) [3]	
AM 2058A	$r'$	$21.19 \pm 0.11$	$4.09 \pm 0.18$	
AM 1228A	$r'$	$21.11 \pm 0.44$	$6.57 \pm 1.11$	
	[1]	Anel		
		$\mu_{ring}$ ( $mag/arcsec^2$ ) [2]	$r_{ring}$ (arcsec) [3]	$\sigma$ [4]
AM 2058A	$r'$	$22.07 \pm 0.01$	$5.11 \pm 0.01$	$0.63 \pm 0.01$
AM 1228A	$r'$	$21.83 \pm 0.04$	$11.18 \pm 0.06$	$1.73 \pm 0.08$
	[1]	Lente		
		$\mu_l$ ( $mag/arcsec^2$ ) [2]	$r_l$ (arcsec) [3]	
AM 1219B	$g'$	$21.01 \pm 0.07$	$6.07 \pm 0.16$	
	$r'$	$20.56 \pm 0.33$	$5.89 \pm 0.06$	

das galáxias do tipo Sc (e.g., Fisher & Drory, 2008, Weinzirl et al., 2009). Para as galáxias secundárias de tipo *early*, AM 1219B (Sa) e AM 2058B (S0), os valores da razão B/T são similares aos encontrados para galáxias isoladas do mesmo tipo morfológico (Fisher & Drory, 2008).

Com respeito as razões  $B/D$ , os valores encontrados para as galáxias principais também concordam com os valores médios,  $\log(B/D) = -1.07_{-0.30}^{0.45}$ , reportados para galáxias tipo Sc por Graham & Worley (2008). Similarmente os razões  $B/T$  determinadas para as galáxias secundárias, AM 1219A, AM 2058A e Am 1228B, estão de acordo com os valores médios reportados para seus respectivos tipos morfológico,  $\log(B/D) = -0.28_{-0.08}^{0.47}$  para galáxias Sa,  $\log(B/D) = -0.34_{-0.07}^{0.10}$  para S0, e  $\log(B/D) = -1.38_{-0.50}^{0.47}$  para Sd (Graham & Worley, 2008).

Concluimos que a interação destes sistemas não afetou significativamente a estrutura principal das galáxias, embora os pseudo-bojos presentes em todas as galáxias

Tabela 3.6: Luminosidades das componentes principais e secundárias

Galáxia	Bojo		Disco		Barra		Anel		Lente		B/T	B/D
	$L_r/L_\odot$ [1]	% [2]	$L_r/L_\odot$ [3]	% [4]	$L_r/L_\odot$ [5]	% [6]	$L_r/L_\odot$ [7]	% [8]	$L_r/L_\odot$ [9]	% [10]		
AM1219A	$1.80 \times 10^9$	4.7	$1.64 \times 10^{10}$	42.4	-	-	-	-	-	-	0.05	0.11
AM1219B	$2.69 \times 10^9$	22.5	$6.53 \times 10^9$	55.4	-	-	-	-	$2.96 \times 10^9$	25.2	0.23	0.41
AM2058A	$1.75 \times 10^9$	2.8	$5.78 \times 10^{10}$	90.8	$2.77 \times 10^9$	4.3	$1.36 \times 10^9$	2.1	-	-	0.03	0.03
AM2058B	$5.73 \times 10^9$	34.6	$1.10 \times 10^{10}$	65.4	-	-	-	-	-	-	0.34	0.52
AM1228A	$1.38 \times 10^9$	3.0	$3.88 \times 10^{10}$	85.2	$1.93 \times 10^9$	4.2	$2.84 \times 10^9$	6.2	-	-	0.03	0.04
AM1228B	$1.53 \times 10^8$	6.6	$2.15 \times 10^9$	92.4	-	-	-	-	-	-	0.07	0.07

estudadas, assim como as irregularidades dos discos de AM 2058A e AM 1228A, podem ser uma consequência direta da interação, afetando sua evolução dentro da sequência de Hubble. Por outro lado, a interação pode afetar as galáxias, em especial a distribuição de gás e populações estelares jovens, como temos visto nas estruturas de maré detectadas nestas galáxias, nas assimetrias morfológicas apresentadas, e nas intensas regiões H II.

## Capítulo 4

# Cinemática das galáxias dos pares estudados

### 4.1 Medidas das linhas de emissão

As velocidades radiais foram derivadas a partir da medida do centróide das curvas Gaussianas ajustadas aos perfis das linhas de emissão mais intensas: [N II] ( $\lambda 6548.04$ ),  $H\alpha$  ( $\lambda 6563$ ), [N II] ( $\lambda 6584$ ) e [S II] ( $\lambda 6717$ ). Como exemplo, nas Figs. 4.1 e 4.2 são apresentados os ajustes das linhas  $H\alpha$  e [N II] ( $\lambda 6584$ ) para os espectros extraídos das aberturas centrais ( $1'' \times 1.17''$ ) das galáxias AM 1219A e AM 1219B, respectivamente. A velocidade radial final para cada espectro foi obtida calculando a média dos centróides das linhas de emissão ponderada por seus fluxos, enquanto que as incertezas foram tomadas como sendo o desvio padrão ponderado ao redor da média. Para espectros com uma única linha de emissão medida, utilizou-se a expressão de Keel (1996) para a determinação da incerteza. As Tabelas 4.1–4.7 (págs. 76–82) listam para cada uma das fendas observadas as velocidades radiais das linhas de emissão e a respectiva velocidade final do espectro extraído de cada abertura ao longo da respectiva fenda. As posições espaciais das aberturas das fendas nas galáxias AM 1219A, AM 1219B, AM 2058A, AM 2058B, AM 1228A, e AM 1228B, são apresentadas nas

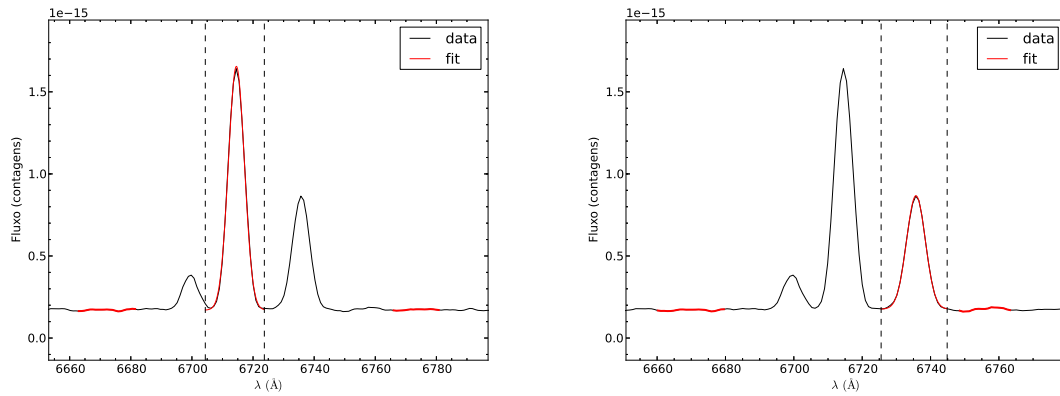


Figura 4.1: Ajuste de gaussianas sobre linhas de emissão  $H\alpha$  e  $[N II]$  ( $\lambda = 6584 \text{ \AA}$ ) no espectro extraído da abertura central da galáxia AM 1219A.

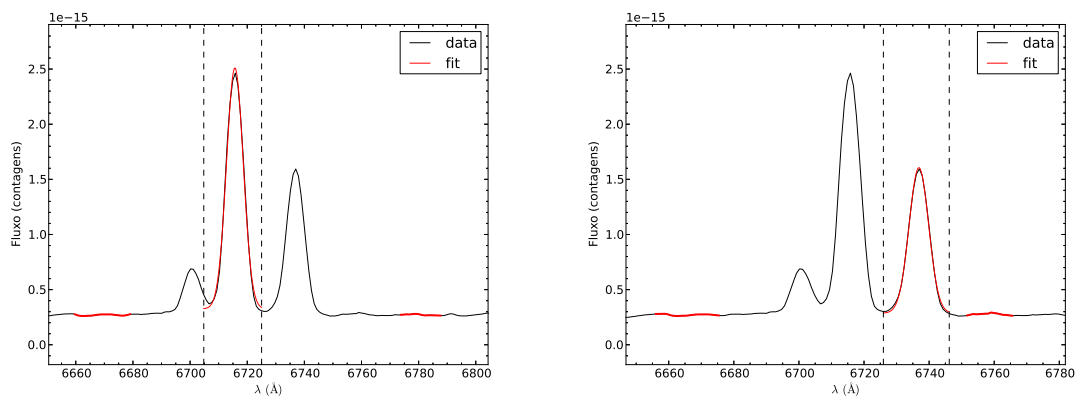


Figura 4.2: Ajuste de gaussianas sobre linhas de emissão  $H\alpha$  e  $[N II]$  ( $\lambda = 6584 \text{ \AA}$ ) no espectro extraído da abertura central da galáxia AM 1219B.

Figs. 4.3 (Pág. 69), 4.4 (Pág. 69), 4.5 (Pág. 71), 4.6 (Pág. 72), 4.7 (Pág. 73) e 4.8 (Pág. 74), respectivamente.

Para obter o perfil de velocidade radial (PVRs) para uma determinada galáxia e poder investigar sua cinemática, subtraímos das velocidades radiais finais de cada espectro a respectiva velocidade sistêmica da galáxia (ver Tabela 2.6, pág. 35). As velocidades radiais corrigidas ( $V_r - V_{sys}$ ) são dadas também nas Tabelas 4.1–4.7 (Págs. 76–82).

## 4.2 Curvas de rotação

O painel esquerdo da Fig. 4.3 apresenta PVR de AM1219A. Como podemos ver, o PVR é completamente assimétrico, com o lado Sudeste (S-E) sendo típico de uma curva de rotação de galáxias tipo disco, aumentando a velocidade desde o centro até atingir um pico (em  $\sim 3.2$  kpc), tornando-se plana ao final (com uma velocidade de  $\sim -84$  km  $s^{-1}$ ). Por outro lado, na parte Noroeste (N-W), o PVR possui um comportamento similar ao do lado S-E até o raio  $\sim 3.5$  kpc, a partir desse raio a velocidade aumenta até o último ponto de observação em 8.2 kpc, onde a velocidade atinge  $\sim 250$  km  $s^{-1}$ . As altas velocidades nesse lado do PVR coincidem espacialmente com os complexos de regiões H II (compare os dois painéis na Fig. 4.3). Comportamentos assimétricos nos PVR têm sido observados em outras galáxias em interação (e.g., Rubin et al., 1991, 1999, Dale et al., 2001, Mendes de Oliveira et al., 2003, Fuentes-Carrera et al., 2004, Presotto et al., 2010) e são preditos pelas simulações numéricas de Pedrosa et al. (2008) e Kronberger et al. (2006) para galáxias em interações menores e maiores, respectivamente.

O PVR observado para a galáxia AM1219B é apresentado no painel esquerdo da Fig. 4.4. Vemos claramente que a galáxia secundária não apresenta rotação definida, com valores oscilando em torno de zero, ao longo da posição da fenda. Na Subseção 3.4 foi demonstrado que a decomposição do perfil de brilho da galáxia AM1219B é típico de uma galáxia espiral. Portanto, o fato de não se observar rotação

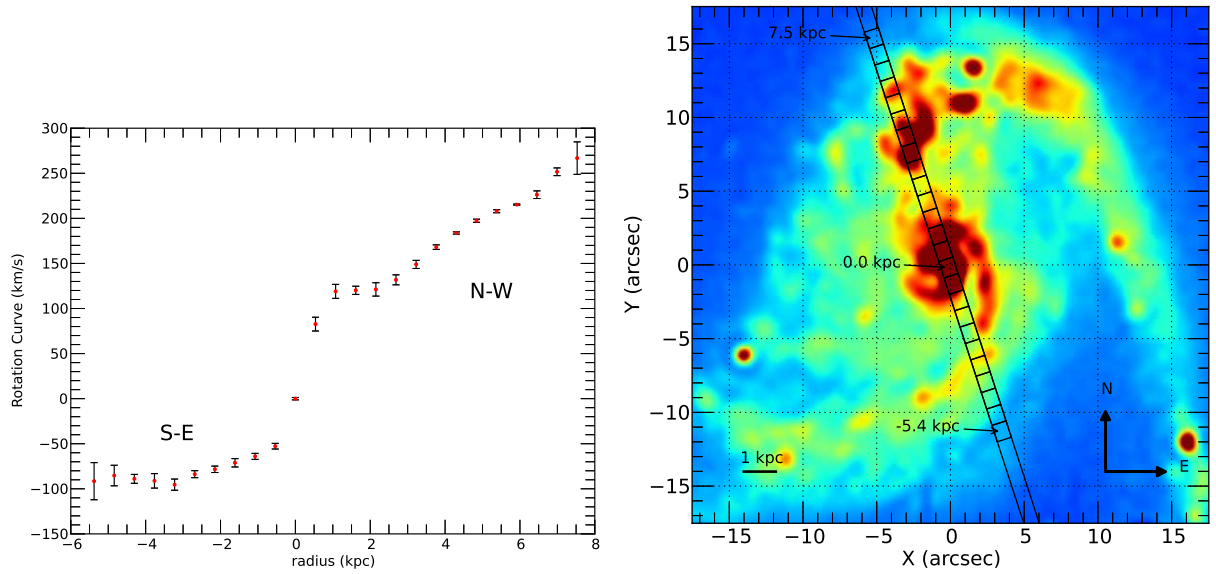


Figura 4.3: Esquerda: Perfil de velocidade radial ao longo da fenda com  $AP=162^\circ$  na galáxia AM 1219A. As velocidades correspondem aos valores observados depois da subtração da velocidade sistêmica da galáxia, sem correção pela inclinação da mesma no plano do céu. Direita: Aberturas extraídas ao longo da fenda sobre a imagem de AM 1219A na banda  $r'$ .

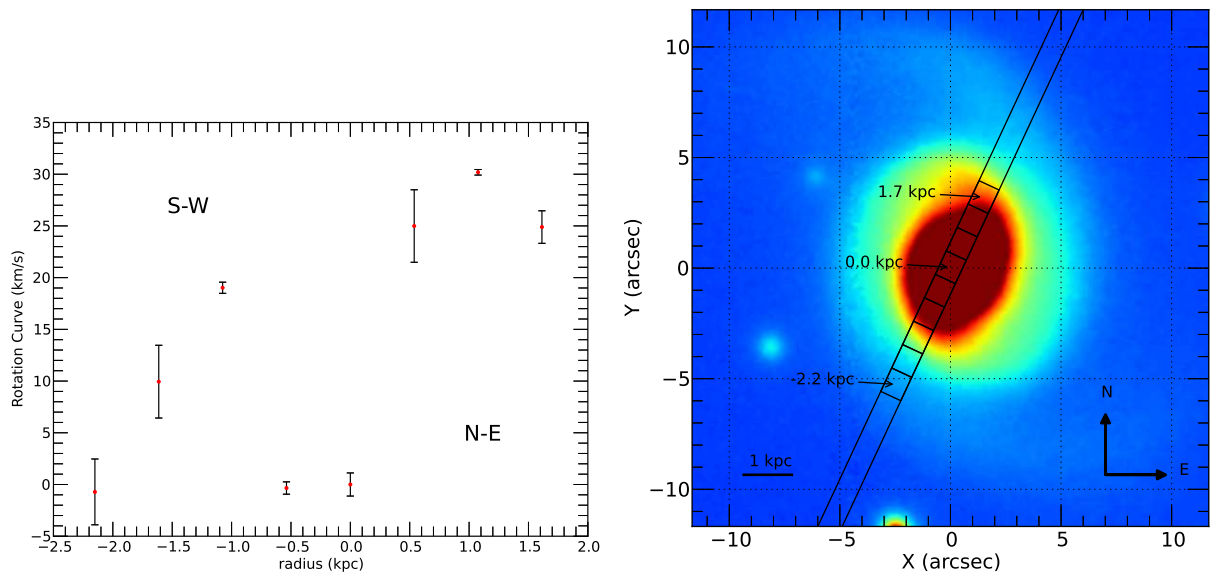


Figura 4.4: Igual à Fig. 4.3, para a galáxia AM 1219B (painel direito) e o perfil de velocidade radial ao longo da fenda com  $AP=25^\circ$  (esquerdo).

deve-se à posição da fenda ( $AP = 25^\circ$ ) quase perpendicular à linha de nodos (eixo maior cinemático), a qual estaria alinhada com o eixo maior do disco, com um AP de  $\sim -42^\circ$  (ver as isofotas usadas para a determinação do AP do disco na Fig. 3.5, na Pág. 50).

Na Figura 4.5 são apresentadas para a galáxia AM 2058A os PVRs ao longo das posições das fendas com APs de  $350^\circ$ ,  $125^\circ$  e  $42^\circ$ . O PVR ao longo do  $AP=350^\circ$  passa através do centro galáctico. Os lados Norte (N) e Sul (S) (os lados de *approaching* e *receding*, respectivamente) deste PVR são bastante simétricos e seguem o comportamento típico de curvas de rotação em galáxias espirais; com uma subida íngreme em raios internos ( $\lesssim 10$  kpc) alcançando um comportamento plano nas regiões externas da galáxia (com uma velocidade de  $\pm 150$  km s $^{-1}$ ). O PVR ao longo do  $AP=42^\circ$  na direção Sudeste (SW)–Noroeste (NE), que passa próximo do centro galáctico, é bastante suave, porém assimétrico em velocidades; atingindo uma velocidade máxima de  $\sim 200$  km s $^{-1}$  na direção SW, enquanto que na direção NE chega até  $\sim -120$  km s $^{-1}$ . Por outro lado, o PVR ao longo do  $AP=125^\circ$  atravessa parte do disco e do braço espiral ao SW. Este PVR apresenta um comportamento oscilante entre máximos e mínimos de velocidade. Um fenômeno similar é observado no campo de velocidades na vizinhança dos braços espirais em galáxias em interação (Alfaro et al., 2001). Este comportamento é semelhante à cinemática esperada pela interação entre a onda de densidade do braço espiral e o disco galáctico.

Para a galáxia AM 2058B foram observadas duas posições de fenda, os PVRs para estas fendas são apresentados na Fig. 4.6 (Pág. 72). Estes PVRs têm poucos pontos devido ao pequeno tamanho angular desta galáxia. Nenhum dos dois atravessa o centro galáctico. O PVR ao longo do  $AP=350^\circ$  é completamente simétrico e tem um comportamento linear com uma pequena inclinação. Ambos lados, *approaching* (parte Sul) e *receding* (Norte), atingem uma velocidade máxima de  $\pm 40$  km s $^{-1}$ . Em contraste, o PVR ao longo de  $AP=94^\circ$  parece estar alinhado com a linha de velocidade-zero desta galáxia. Este resultado é bastante surpreendente, porque a linha de nodos da galáxia deveria estar alinhada com o eixo maior do disco galáctico ( $AP=79^\circ$ ) e não



com o eixo menor dele, como é o caso desta galáxia. Poderia AM2058B ter mudado seu eixo de rotação e estar rotando ao longo do eixo maior? Para responder esta questão seria necessário analisar todo o campo de velocidade desta galáxia (e.g., com espectroscopia de campo integral). Porém, se AM2058B está rotando como um corpo rígido, com velocidade angular constante, isto poderia explicar o comportamento linear do PVR ao longo do AP= $350^\circ$ . Outra questão interessante seria: pode ser este desalinhamento do eixo de rotação de AM2058B causado pela galáxia companheira? Num recente trabalho, Cen (2014) estudou a evolução do momentum angular das

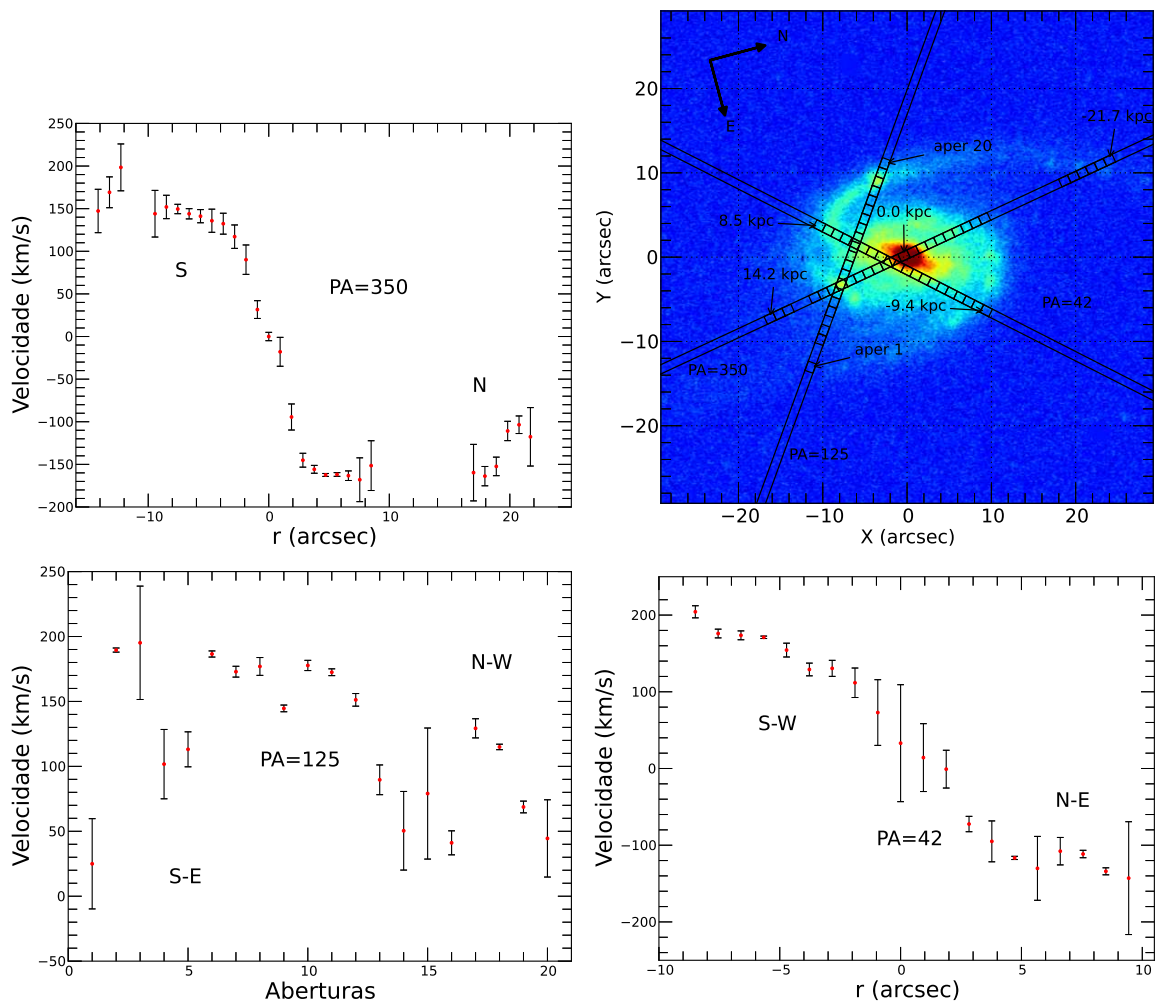


Figura 4.5: Igual à Fig. 4.3, para a galáxia AM 2058A (painel superior direito) e os perfis de velocidades radiais ao longo das fendas com APs  $350^\circ$  (superior esquerdo),  $125^\circ$  (inferior esquerdo) e  $42^\circ$  (inferior direito).

galáxias em simulações cosmológicas, e encontrou que o spin delas muda frequentemente devido à interação de maré com vizinhos próximos, podendo também ser o caso de AM2058B. Portanto, este efeito na cinemática da galáxia AM2058B seria um importante vínculo para futuras simulações numéricas do par AM2058-381.

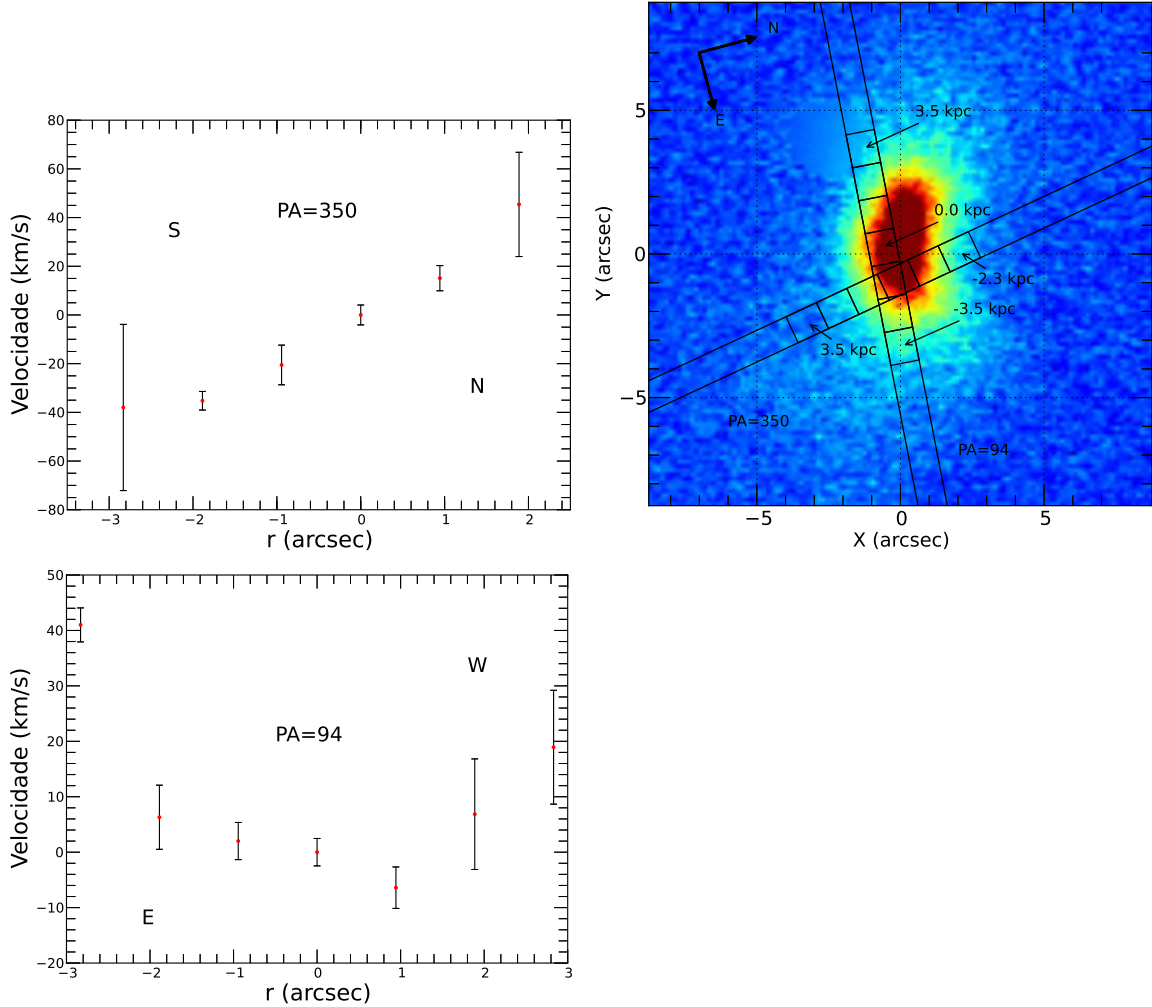


Figura 4.6: Igual à Fig. 4.3, para a galáxia AM2058B (painel superior direito) e os perfis de velocidades radiais ao longo das fendas com APs 350° (superior esquerdo) e 94° (inferior esquerdo).

A Fig. 4.7 apresenta os PVRs de AM1228A ao longo das fendas com APs de 319°, 10° e 20°, e as aberturas extraídas sobre a imagem da galáxia. O PVR ao longo do AP=319° parece estar próximo da linha de velocidade zero da galáxia, apresentando um perfil oscilante entre as velocidades de  $0 \text{ km s}^{-1}$  e  $50 \text{ km s}^{-1}$ . De

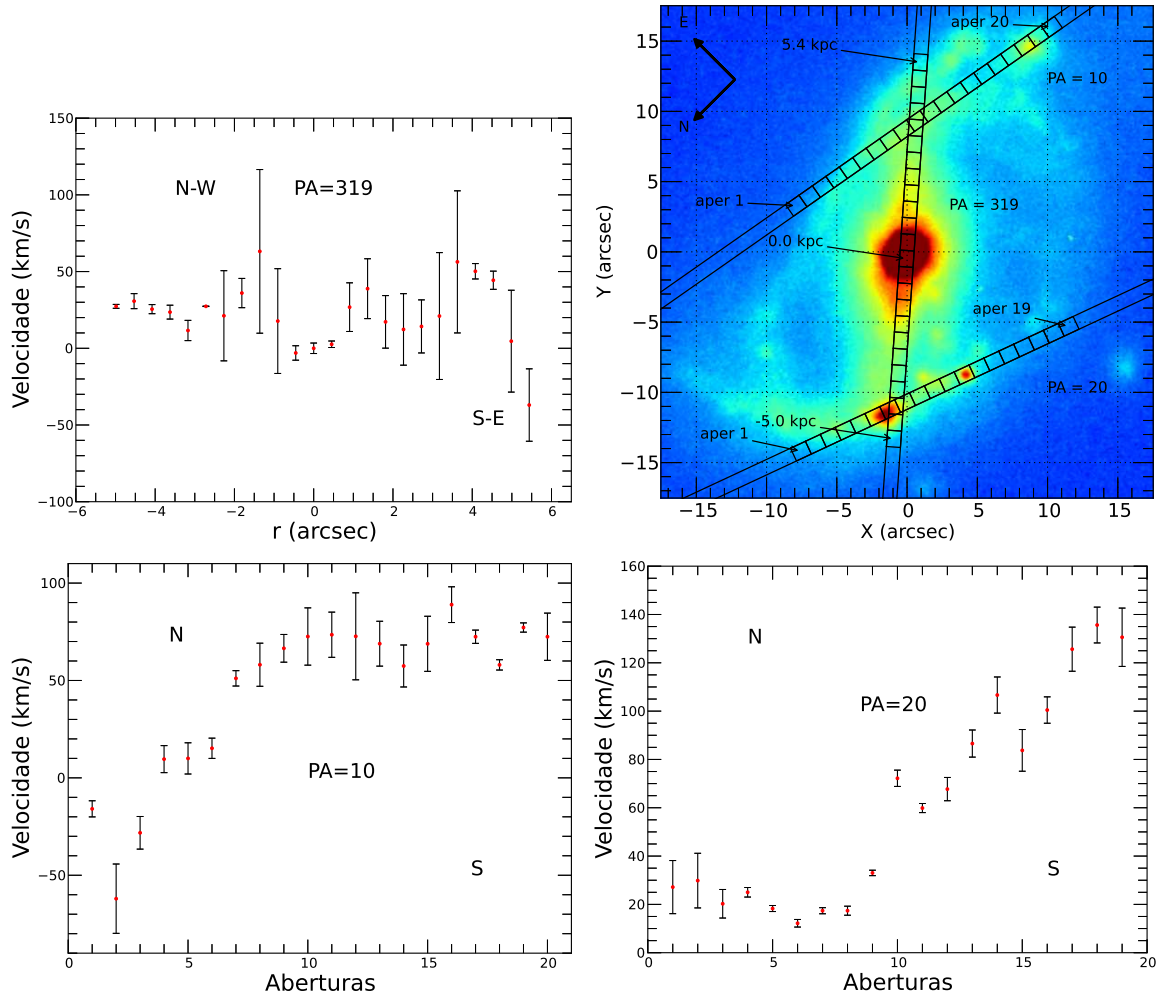


Figura 4.7: Igual à Fig. 4.3, para a galáxia AM 1228A (painel superior direito) e os perfis de velocidades radiais ao longo das fendas com APs 319° (superior esquerdo), 10° (inferior esquerdo) e 20° (inferior direito).

fato, como veremos no próximo capítulo, há um desalinhamento entre o eixo maior cinemático e o fotométrico, como na galáxia AM 2058B. Por outro lado, o PVR ao longo do AP=10° na parte Norte tem um incremento de velocidade, desde  $-60 \text{ km s}^{-1}$  até  $80 \text{ km s}^{-1}$ , enquanto que no lado Sul, o PVR tem um comportamento plano. Contrariamente, o PVR ao longo do AP=20° tem um comportamento plano na parte Norte (com pequenas oscilações, não maiores que  $10 \text{ km s}^{-1}$ ) com uma velocidade  $\sim 20 \text{ km s}^{-1}$ , aumentando linearmente na parte Sul até uma velocidade de  $130 \text{ km s}^{-1}$ .

O PVR ao longo de AM1228B é mostrado na Fig. 4.8. Similarmente às galáxias AM1219B e AM2058B, o PVR tem poucos pontos devido ao pequeno tamanho angular de AM1228B. Este PVR apresenta um comportamento bastante irregular: inicia na direção NW com uma velocidade de  $60 \text{ km s}^{-1}$ , imediatamente cai até  $\sim 15 \text{ km s}^{-1}$ , e daí tem um incremento linear até  $\sim 50 \text{ km s}^{-1}$  a  $\sim 1 \text{ kpc}$  do centro galáctico. Finalmente, na direção SE, cai de novo até uma velocidade de  $\sim -10 \text{ km s}^{-1}$ .

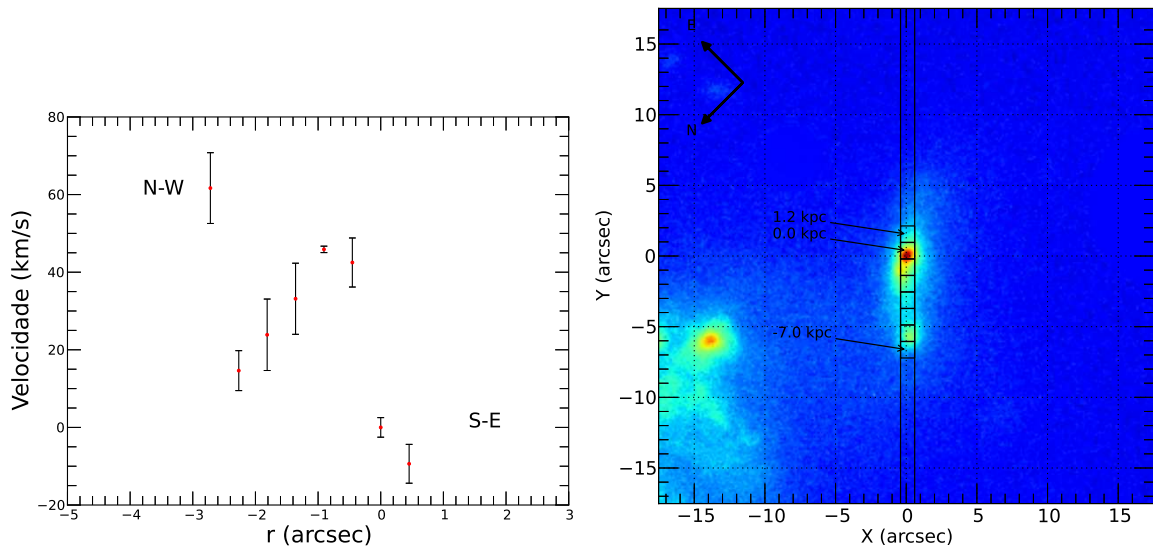


Figura 4.8: Igual à Fig. 4.3, para a galáxia AM1228B (painel direito) e o perfil de velocidade radial ao longo da fenda com  $AP=315^\circ$  (esquerdo).

Todos PVRs das galáxias dos pares estudados apresentam algum tipo de perturbação. Os PVRs das galáxias principais AM1219A e AM2058A apresentam assimetrias nas suas curvas de rotação, enquanto que os PVRs de AM1228A são bastante irregulares e pouco suaves. Kronberger et al. (2006) estudaram as perturbações no campo de velocidades de interações menores, eles encontraram que o grau de assimetria nos PVRs depende do estado da interação, sendo fortes durante a primeira passagem peri-galáctica e diminuindo gradualmente, até desaparecer quase  $\sim 1$  Giga-anos depois, já havendo completado o processo de fusão. Na Fig. 4.9 mostra-se a evolução da curva de rotação para um dos sistemas modelados por Kronberger et al. (2006), com uma razão de massas 1:8. Comparando os PVRs de AM1219A e

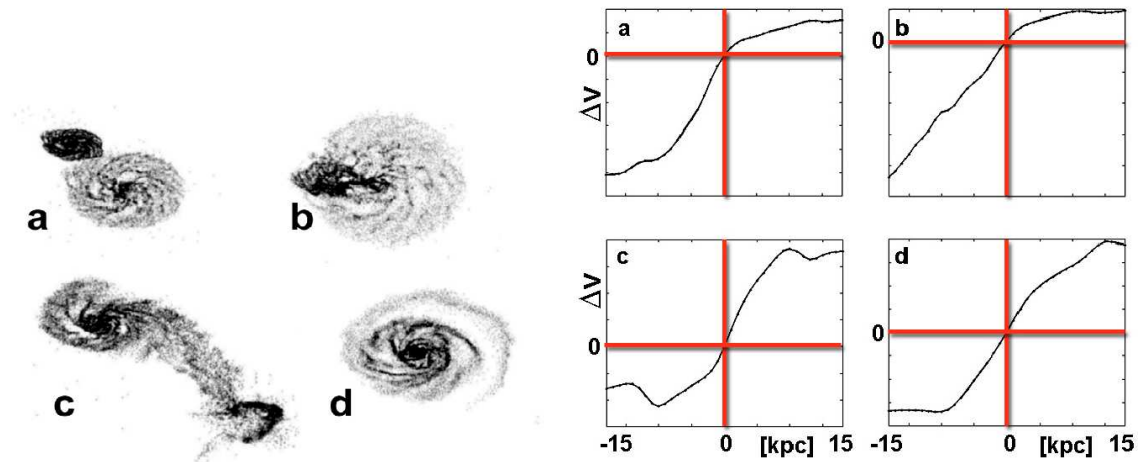


Figura 4.9: Painel esquerdo: Sequencia de imagens correspondente a diferentes passos do processo de fusão: a) representa 0,5 Giga-anos, b) 0,6 Giga-anos, c) 1 Giga-anos, e d) 2 Giga-anos desde o início da interação; o peri-galáctico acontece na marca dos 0,6 Giga-anos. Painel Direito: A evolução das curvas de rotação da galáxia principal em cada uma das etapas da simulação. Imagens tomadas do trabalho de Kronberger et al. (2006).

AM2058A com *snapshots* de evolução da simulações, vemos que há uma semelhança com os *snapshots* (a) e (b), então, podemos inferir que os pares de AM1219-430 e AM2058-381 tenham tido sua passagem peri-galáctica há  $<0.4$  Giga-anos. É importante salientar que estes são limites grosseiros do tempo de evolução da interação para os pares. Porém, vemos que o grau de simetria das curvas de rotação constitui um vínculo importante na hora de modelar numericamente estes sistemas. Por outro lado, os PVRs das galáxias secundárias encontram-se bastante afetados, a galáxia AM2058B aparentemente sofreu uma inversão do seu eixo de rotação, enquanto que o PVR de AM1228B está totalmente perturbado.

Tabela 4.1: Velocidade radial determinada a partir das linhas de emissão dos espectros extraídos ao longo da fenda com AP=162°.

Abertura	[N II] (km/s)	H $\alpha$ (km/s)	[N II] (km/s)	[S II] (km/s)	V <sub>r</sub> (km/s)	V <sub>r</sub> - V <sub>sys</sub> (km/s)
AP=162° ao longo da galáxia AM 1219A						
1	...	6841	...	...	6841 ± 22	-92 ± 22
2	...	6847	...	...	6848 ± 11	-85 ± 11
3	6849	6841	...	...	6844 ± 5	89 ± 5
4	6850	6838	6851	...	6843 ± 8	90 ± 8
5	6844	6834	6845	6839	6837 ± 6	95 ± 6
6	6852	6847	6857	6844	6849 ± 4	84 ± 4
7	6853	6855	6857	6841	6854 ± 4	78 ± 4
8	6858	6862	6874	6850	6861 ± 5	72 ± 5
9	6867	6869	6877	6859	6868 ± 4	64 ± 4
10	6879	6881	6886	6869	6880 ± 3	53 ± 3
11	6934	6932	6933	6937	6933 ± 1	0 ± 1
12	7005	7020	7014	7024	7015 ± 8	83 ± 8
13	7043	7056	7042	7065	7052 ± 8	120 ± 8
14	7047	7056	7052	...	7053 ± 5	121 ± 5
15	7047	7054	7070	...	7054 ± 7	121 ± 7
16	7061	7064	7078	...	7065 ± 5	131 ± 5
17	7080	7080	7094	7088	7082 ± 4	149 ± 4
18	7099	7100	7108	7103	7101 ± 2	168 ± 2
19	7115	7117	7119	7117	7117 ± 1	184 ± 1
20	7128	7131	7129	7129	7130 ± 2	197 ± 2
21	7139	7141	7137	7142	7141 ± 2	208 ± 2
22	7148	7148	7147	7146	7148 ± 1	215 ± 1
23	7163	7160	7147	7158	7159 ± 4	226 ± 4
24	7180	7184	...	7191	7184 ± 4	252 ± 4
25	...	7200	...	...	7200 ± 19	267 ± 19
AP=25° ao longo da galáxia AM 1219B						
1	6981	6986	...	...	6984 ± 3	-2 ± 3
2	6991	6996	6988	...	6994 ± 4	8 ± 3
3	7003	7004	7006	7011	7004 ± 2	18 ± 3
4	6984	6984	6989	6998	6985 ± 3	-1 ± 3
5	6986	6984	6994	7010	6986 ± 6	0 ± 3
6	7006	7011	7022	...	7010 ± 5	24 ± 3
7	7014	7015	7037	...	7017 ± 7	31 ± 3
8	7010	7008	...	...	7009 ± 2	24 ± 3

Tabela 4.2: Velocidade radial determinada a partir das linhas de emissão dos espectros extraídos ao longo da fenda com AP=350°. sobre a galáxia AM 2058A

Abertura	[N II] (km/s)	H $\alpha$ (km/s)	[N II] (km/s)	[S II] (km/s)	$V_r$ (km/s)	$V_r - V_{sys}$ (km/s)
-21.71 S	...	12056	...	...	12056 $\pm$ 34	-118 $\pm$ 34
-20.76 S	...	12070	...	...	12070 $\pm$ 10	-104 $\pm$ 10
-19.82 S	...	12062	...	...	12062 $\pm$ 11	-111 $\pm$ 11
-18.87 S	...	12021	...	...	12021 $\pm$ 11	-152 $\pm$ 11
-17.93 S	...	12009	...	...	12009 $\pm$ 11	-164 $\pm$ 11
-16.99 S	...	12014	...	...	12014 $\pm$ 33	-160 $\pm$ 33
-8.49 S	...	12022	...	...	12022 $\pm$ 29	-151 $\pm$ 29
-7.55 S	...	12019	11981	...	12005 $\pm$ 26	-168 $\pm$ 26
-6.61 S	...	12013	12004	...	12010 $\pm$ 6	-163 $\pm$ 6
-5.66 S	12014	12013	12009	12008	12011 $\pm$ 2	-162 $\pm$ 2
-4.72 S	12009	12010	12012	12014	12011 $\pm$ 2	-162 $\pm$ 2
-3.77 S	12025	12015	12023	12014	12017 $\pm$ 5	-156 $\pm$ 5
-2.83 S	12024	12027	12036	12005	12028 $\pm$ 8	-145 $\pm$ 8
-1.89 S	...	12069	12091	...	12079 $\pm$ 15	-94 $\pm$ 15
-0.94 S	12171	12164	12136	...	12155 $\pm$ 17	-18 $\pm$ 17
0.00	12174	12177	12168	...	12173 $\pm$ 5	0 $\pm$ 5
0.94 N	12221	12197	12212	...	12205 $\pm$ 10	32 $\pm$ 10
1.89 N	...	12252	12276	...	12263 $\pm$ 17	90 $\pm$ 17
2.83 N	12319	12290	12297	12274	12290 $\pm$ 14	117 $\pm$ 14
3.77 N	12328	12307	12288	12310	12306 $\pm$ 12	132 $\pm$ 12
4.72 N	12305	12309	12292	12329	12309 $\pm$ 14	136 $\pm$ 14
5.66 N	12302	12311	12316	12330	12314 $\pm$ 8	141 $\pm$ 8
6.61 N	12303	12317	12316	12328	12317 $\pm$ 6	144 $\pm$ 6
7.55 N	12304	12323	12324	12328	12323 $\pm$ 6	150 $\pm$ 6
8.49 N	...	12319	12345	12318	12325 $\pm$ 14	152 $\pm$ 14
9.44 N	...	12317	...	...	12317 $\pm$ 27	144 $\pm$ 27
12.27 N	...	12372	...	...	12372 $\pm$ 27	198 $\pm$ 27
13.21 N	...	12342	...	...	12342 $\pm$ 18	169 $\pm$ 18
14.16 N	...	12320	...	...	12320 $\pm$ 25	147 $\pm$ 25

Tabela 4.3: Velocidade radial determinada a partir as linhas de emissão dos espectros extraídos ao longo da fenda com APs de  $42^\circ$  e  $125^\circ$  sobre a galáxia AM 2058A

Abertura	[N II] (km/s)	H $\alpha$ (km/s)	[N II] (km/s)	[S II] (km/s)	$V_r$ (km/s)	$V_r - V_{sys}$ (km/s)
AP= $42^\circ$						
-9.44 S-W	...	...	12031	...	$12031 \pm 74$	$-143 \pm 74$
-8.49 S-W	...	12042	12040	12031	$12040 \pm 5$	$-134 \pm 5$
-7.55 S-W	12064	12065	12060	12053	$12062 \pm 5$	$-111 \pm 5$
-6.61 S-W	...	12072	...	12039	$12066 \pm 18$	$-108 \pm 18$
-5.66 S-W	...	12044	...	...	$12044 \pm 42$	$-130 \pm 42$
-4.72 S-W	12053	12058	...	...	$12057 \pm 2$	$-117 \pm 2$
-3.77 S-W	...	12079	...	...	$12079 \pm 27$	$-95 \pm 27$
-2.83 S-W	...	12103	12110	12086	$12101 \pm 10$	$-72 \pm 10$
-1.89 S-W	12187	12174	12142	12197	$12173 \pm 25$	$-1 \pm 25$
-0.94 S-W	12199	12199	12129	12228	$12188 \pm 44$	$14 \pm 44$
0.00	...	...	12158	12266	$12207 \pm 76$	$33 \pm 76$
0.94 N-E	...	...	12220	12281	$12247 \pm 43$	$73 \pm 43$
1.89 N-E	...	...	12275	12304	$12286 \pm 19$	$112 \pm 19$
2.83 N-E	12274	12304	12306	12327	$12304 \pm 10$	$131 \pm 10$
3.77 N-E	12280	12303	12311	12301	$12303 \pm 8$	$129 \pm 8$
4.72 N-E	12316	12330	12335	12306	$12328 \pm 9$	$154 \pm 9$
5.66 N-E	12341	12346	12344	...	$12345 \pm 2$	$171 \pm 2$
6.61 N-E	12363	12348	12344	12339	$12347 \pm 6$	$174 \pm 6$
7.55 N-E	12367	12349	12345	12350	$12350 \pm 6$	$176 \pm 6$
8.49 N-E	12399	12376	12374	12377	$12378 \pm 8$	$204 \pm 8$
AP= $125^\circ$						
1 S-E	...	12164	12216	...	$12182 \pm 35$	$25 \pm 35$
2 S-E	...	12347	12345	...	$12347 \pm 2$	$190 \pm 2$
3 S-E	...	12352	...	...	$12352 \pm 44$	$195 \pm 44$
4 S-E	12215	12267	...	...	$12259 \pm 27$	$102 \pm 27$
5 S-E	12265	12261	12285	12285	$12270 \pm 13$	$113 \pm 13$
6 S-E	12340	12343	12346	12347	$12344 \pm 2$	$187 \pm 2$
7 S-E	12327	12332	12324	12335	$12330 \pm 4$	$173 \pm 4$
8 S-E	12331	12336	12326	12346	$12334 \pm 7$	$177 \pm 7$
9 S-E	12299	12302	12300	12308	$12302 \pm 3$	$145 \pm 3$
10 N-W	12326	12336	12333	12342	$12335 \pm 4$	$178 \pm 4$
11 N-W	12323	12330	12331	12333	$12330 \pm 3$	$172 \pm 3$
12 N-W	12294	12309	12311	12314	$12309 \pm 5$	$151 \pm 5$
23 N-W	12249	12240	12262	12243	$12247 \pm 11$	$90 \pm 11$
14 N-W	12256	12193	12235	12165	$12208 \pm 30$	$50 \pm 30$
15 N-W	12333	12240	12241	12172	$12236 \pm 50$	$79 \pm 50$
16 N-W	12217	12203	12186	12198	$12198 \pm 9$	$41 \pm 9$
17 N-W	12287	12291	12283	12273	$12287 \pm 7$	$129 \pm 7$
18 N-W	12271	12273	12269	12271	$12272 \pm 2$	$115 \pm 2$
19 N-W	12213	12226	12223	12233	$12226 \pm 5$	$69 \pm 5$
20 N-W	12137	12186	12219	12239	$12202 \pm 30$	$45 \pm 30$



Tabela 4.4: Velocidade radial determinada a partir das linhas de emissão dos espectros extraídos ao longo da fenda com AP=350° sobre a galáxia AM 2058B

Abertura	[N II]	H $\alpha$	[N II]	[S II]	$V_r$	$V_r - V_{sys}$
	(km/s)	(km/s)	(km/s)	(km/s)	(km/s)	(km/s)
AP=350°						
-1.89 S	12348	12346	12392	...	12354 $\pm$ 21	45 $\pm$ 21
-0.94 S	12328	12322	12319	12333	12324 $\pm$ 5	15 $\pm$ 5
0.00	12319	12307	12306	12315	12309 $\pm$ 4	0 $\pm$ 4
0.94 N	12328	12285	12293	12293	12288 $\pm$ 8	-21 $\pm$ 8
1.89 N	12248	12273	12277	12275	12273 $\pm$ 4	-35 $\pm$ 4
AP=94°						
-2.83 E	...	12345	12351	...	12346 $\pm$ 3	41 $\pm$ 3
-1.89 E	12321	12308	12322	12317	12311 $\pm$ 6	6 $\pm$ 6
-0.94 E	12302	12305	12315	12309	12307 $\pm$ 3	2 $\pm$ 3
0.00	12302	12304	12306	12310	12305 $\pm$ 2	0 $\pm$ 2
0.94 W	12308	12298	12302	12292	12298 $\pm$ 4	-6 $\pm$ 4
1.89 W	...	12313	12322	12295	12311 $\pm$ 10	7 $\pm$ 10
2.83 W	...	12321	12344	...	12323 $\pm$ 10	19 $\pm$ 10

Tabela 4.5: Velocidade radial determinada a partir das linhas de emissão dos espectros extraídos ao longo da fenda com AP=319° sobre a galáxia AM 1228A

Abertura	[N II] (km/s)	H $\alpha$ (km/s)	[N II] (km/s)	[S II] (km/s)	$V_r$ (km/s)	$V_r - V_{sys}$ (km/s)
-4.99 N-W	...	5872	5870	...	5872 $\pm$ 1	27 $\pm$ 1
-4.53 N-W	5865	5876	5870	5882	5875 $\pm$ 5	31 $\pm$ 5
-4.08 N-W	5875	5871	5865	5870	5870 $\pm$ 3	26 $\pm$ 3
-3.63 N-W	...	5870	5862	5871	5868 $\pm$ 5	24 $\pm$ 5
-3.17 N-W	...	5859	5850	...	5856 $\pm$ 7	12 $\pm$ 7
-2.72 N-W	...	5872	5872	...	5872 $\pm$ 0	27 $\pm$ 0
-2.27 N-W	5904	5845	5884	...	5866 $\pm$ 29	21 $\pm$ 29
-1.81 N-W	5890	5875	...	...	5880 $\pm$ 10	36 $\pm$ 10
-1.36 N-W	5888	5860	5955	...	5908 $\pm$ 53	63 $\pm$ 53
-0.91 N-W	5824	5844	5893	...	5862 $\pm$ 34	18 $\pm$ 34
-0.45 N-W	5841	5840	5846	5832	5841 $\pm$ 5	-3 $\pm$ 5
0.00	5841	5846	5844	5835	5844 $\pm$ 3	0 $\pm$ 3
0.45 S-E	5843	5848	5846	5852	5847 $\pm$ 2	3 $\pm$ 2
0.91 S-E	5857	5865	5871	5914	5871 $\pm$ 16	27 $\pm$ 16
1.36 S-E	5825	5892	5885	...	5883 $\pm$ 20	39 $\pm$ 20
1.81 S-E	...	5870	5865	5828	5862 $\pm$ 17	17 $\pm$ 17
2.27 S-E	...	5837	5870	...	5857 $\pm$ 23	12 $\pm$ 23
2.72 S-E	...	5843	5868	...	5859 $\pm$ 17	14 $\pm$ 17
3.17 S-E	...	5896	5838	...	5865 $\pm$ 41	21 $\pm$ 41
3.63 S-E	...	5934	5869	...	5901 $\pm$ 46	56 $\pm$ 46
4.08 S-E	...	5898	5891	...	5895 $\pm$ 5	50 $\pm$ 5
4.53 S-E	...	5892	5884	...	5889 $\pm$ 6	44 $\pm$ 6
4.99 S-E	...	5822	5870	...	5849 $\pm$ 33	5 $\pm$ 33
5.44 S-E	...	5807	...	...	5807 $\pm$ 24	-37 $\pm$ 24

Tabela 4.6: Velocidade radial determinada a partir das linhas de emissão dos espectros extraídos ao longo das fendas com APs de 10° e 20° sobre a galáxia AM 1228A

Abertura	[N II]	H $\alpha$	[N II]	[S II]	$V_r$	$V_r - V_{sys}$
	(km/s)	(km/s)	(km/s)	(km/s)	(km/s)	(km/s)
AP=10°						
-3.63 N	...	5825	5831	...	5828 $\pm$ 4	-16 $\pm$ 4
-3.17 N	5821	5772	5796	...	5782 $\pm$ 18	-62 $\pm$ 18
-2.72 N	5828	...	5811	5814	5816 $\pm$ 8	-28 $\pm$ 8
-2.27 N	5864	5850	5862	5845	5854 $\pm$ 7	10 $\pm$ 7
-1.81 N	5863	5855	5857	5834	5854 $\pm$ 8	10 $\pm$ 8
-1.36 N	5847	5859	5864	5855	5859 $\pm$ 5	15 $\pm$ 5
-0.91 N	5892	5898	5890	5895	5895 $\pm$ 4	51 $\pm$ 4
-0.45 N	5899	5911	5896	5883	5902 $\pm$ 11	58 $\pm$ 11
0.00 S	5920	5909	5903	5918	5911 $\pm$ 7	67 $\pm$ 7
0.45 S	5928	5916	5906	5945	5917 $\pm$ 15	73 $\pm$ 15
0.91 S	5952	5912	5920	...	5917 $\pm$ 12	73 $\pm$ 12
1.36 S	5851	5932	5911	5907	5917 $\pm$ 22	73 $\pm$ 22
1.81 S	5869	5917	5913	5907	5913 $\pm$ 12	69 $\pm$ 12
2.27 S	5873	5901	5912	5893	5901 $\pm$ 11	57 $\pm$ 11
2.72 S	5887	5924	5903	5912	5913 $\pm$ 14	69 $\pm$ 14
3.17 S	5918	5937	5924	5945	5933 $\pm$ 9	89 $\pm$ 9
3.63 S	5915	5917	5913	5925	5916 $\pm$ 3	72 $\pm$ 3
4.08 S	5902	5901	5901	5910	5902 $\pm$ 3	58 $\pm$ 3
4.53 S	5928	5920	5921	5924	5921 $\pm$ 2	77 $\pm$ 2
4.99 S	5947	5913	5912	5914	5916 $\pm$ 12	72 $\pm$ 12
AP=20°						
-2.72 N	5852	5878	5864	5881	5871 $\pm$ 11	27 $\pm$ 11
-2.27 N	5900	5872	5871	5863	5874 $\pm$ 11	30 $\pm$ 11
-1.81 N	5866	5867	5862	5850	5864 $\pm$ 6	20 $\pm$ 6
-1.36 N	5871	5870	5866	5867	5869 $\pm$ 2	25 $\pm$ 2
-0.91 N	5865	5863	5861	5862	5862 $\pm$ 1	18 $\pm$ 1
-0.45 N	5861	5856	5855	5856	5856 $\pm$ 2	12 $\pm$ 2
0.00	5865	5861	5860	5862	5861 $\pm$ 1	17 $\pm$ 1
0.45 S	5863	5861	5861	5866	5861 $\pm$ 2	17 $\pm$ 2
0.91 S	5880	5877	5877	5876	5877 $\pm$ 1	33 $\pm$ 1
1.36 S	5918	5918	5913	5908	5916 $\pm$ 3	72 $\pm$ 3
1.81 S	5898	5905	5904	5902	5904 $\pm$ 2	60 $\pm$ 2
2.27 S	5900	5911	5913	5921	5912 $\pm$ 5	68 $\pm$ 5
2.72 S	5921	...	5933	5931	5931 $\pm$ 6	87 $\pm$ 6
3.17 S	5945	5956	5942	5943	5951 $\pm$ 7	107 $\pm$ 7
3.63 S	5907	5930	5923	5939	5928 $\pm$ 9	84 $\pm$ 9
4.08 S	5946	5945	5937	5953	5944 $\pm$ 5	100 $\pm$ 5
4.53 S	5973	5975	5957	5964	5970 $\pm$ 9	126 $\pm$ 9
4.99 S	5977	5984	5977	5965	5980 $\pm$ 7	136 $\pm$ 7
5.44 S	5968	5984	5971	5953	5975 $\pm$ 12	131 $\pm$ 12

Tabela 4.7: Velocidade radial determinada a partir das linhas de emissão dos espectros extraídos ao longo da fenda com AP  $315^\circ$  sobre a galáxia AM 1228B

Abertura	[N II] (km/s)	H $\alpha$ (km/s)	[N II] (km/s)	[S II] (km/s)	$V_r$ (km/s)	$V_r - V_{sys}$ (km/s)
-2.72 N-W	...	5996	6014	...	$5998 \pm 9$	$62 \pm 9$
-2.27 N-W	5950	5949	5962	5958	$5951 \pm 5$	$15 \pm 5$
-1.81 N-W	...	5963	...	5945	$5960 \pm 9$	$24 \pm 9$
-1.36 N-W	...	5967	5987	5965	$5970 \pm 9$	$33 \pm 9$
-0.91 N-W	...	5983	5981	5982	$5982 \pm 1$	$46 \pm 1$
-0.45 N-W	6004	5979	5974	5975	$5979 \pm 6$	$42 \pm 6$
0.00	5946	5937	5933	5934	$5937 \pm 3$	$0 \pm 3$
0.45 S-E	...	5926	5926	5939	$5927 \pm 5$	$-9 \pm 5$

## Capítulo 5

# Dinâmica das galáxias principais dos pares

Neste capítulo explicaremos a metodologia empregada para modelar a cinemática das galáxias principais dos pares AM 1219-430, AM 2058-381 e AM1228-260, e a posterior derivação da respectivas massas totais. As galáxias secundárias foram excluídas desta análise, pois como se viu no capítulo anterior seus tamanhos angulares são pequenos, e portanto têm pouca informação cinemática para restringir os modelos dinâmicos. O capítulo está dividido em duas partes: na primeira são apresentados os modelos de massa e as respectivas curvas de rotação das componentes bojo, disco e halo das galáxias; na segunda parte, é descrita a estratégia no ajuste da cinemática das galáxias observadas.

### 5.1 Modelos de massa

A distribuição de massa de uma galáxia em geral é modelada como a soma das componentes bojo, disco e halo. Para as componentes bojo e disco, podemos assumir que suas distribuições de luminosidade seguem as respectivas distribuições de massa, com uma dada razão massa luminosidade (M/L) (Kent, 1987). Se adotarmos essa hipótese, podemos obter a distribuição de massa de cada componente a partir dos

perfis de brilho superficial do bojo (perfil de Sérsic) e do disco (perfil de Freeman), com suas respectivas razões M/L. Uma vez obtida a distribuição de massa das componentes “luminosas” da galáxia, a distribuição de massa do halo (componente “escura”) pode ser parametrizada ou derivada da curva de rotação observada. Abaixo segue uma descrição dos modelos de massa e as respectivas velocidades circulares ( $V_c$ ) de cada componente.

### 5.1.1 Modelo de bojo

Usando a integral de Abel (Binney & Tremaine, 1987, Simonneau & Prada, 2004) podemos derivar o perfil de densidade radial  $[\rho(r)]$  do bojo a partir do seu perfil de brilho superficial  $[I(r)]$  ver Eq. 3.5 na Pág. 52] e assumindo uma razão M/L ( $\Upsilon_b$ ), como segue:

$$\rho(s) = \frac{1}{\pi} \frac{k_n}{n} I_b \Upsilon_b \int_s^\infty \frac{\exp[-k_n z^{\frac{1}{n}}] z^{\frac{1}{n}-1}}{\sqrt{z^2 - s^2}} dz, \quad (5.1)$$

onde  $I_b$ ,  $r_e$ ,  $n$  e  $k_n$  são os mesmo parâmetros do perfil de Sérsic (Eq. 3.5), e  $s = (r/r_e)$ . Esta integral não tem solução analítica. No entanto, usando a substituição introduzida por Simonneau & Prada (2004),  $z = s/(1+x^2)^{n/n+1}$ , o cálculo da integral se torna numericamente fácil com qualquer grau de precisão requerido. Empregando essa substituição, a integral fica da forma,

$$\rho(s) = \frac{k}{\pi} \frac{2}{n-1} \frac{1}{s^{\frac{n-1}{n}}} I_b \Upsilon_b \int_0^1 \frac{\exp[-ks^{\frac{1}{n}}(1-x^2)^{-\frac{1}{n-1}}]}{\sqrt{1-(1-x^2)^{-\frac{2n}{n-1}}}} x dx. \quad (5.2)$$

Desta maneira a Eq. 5.2 pode ser resolvida com a regra de quadratura de Gauss. A partir do perfil densidade radial, pode-se calcular o perfil de massa acumulada  $[M(r)]$ , usando a seguinte integral:

$$M(r) = 4\pi \int_0^r r^2 \rho(r) dr. \quad (5.3)$$

Como a distribuição de densidade do perfil de Sérsic é esférica, pode calcular-se de maneira direta a velocidade circular do bojo ( $V_b$ ), igualando a força centrífuga com a força gravitacional:

$$V_b^2(r) = G \frac{M(r)}{r}. \quad (5.4)$$

### 5.1.2 Modelo do disco

A distribuição de massa do disco é tomada como sendo a de um disco exponencial fino. Assim, seguindo o método de Toomre (1963), o perfil de superfície de densidade de massa  $\Sigma(r)$  para disco fino pode ser dado por meio de uma integral de Bessel (Freeman, 1970, Binney & Tremaine, 1987):

$$\Sigma(r) = -\frac{1}{2\pi G} \int_0^\infty S(k) J_0(kr) k dk, \quad (5.5)$$

onde  $S(k)$  é uma função arbitrária e  $J_n$  é uma função de Bessel de primeira espécie. A equação 5.5 é uma transformação de Hankel de  $2\pi G\Sigma$ . Assim como as transformações de Fourier, as transformações de Hankel também têm sua antitransformada:

$$S(k) = -2\pi G \int_0^\infty J_0(kr) \Sigma(r) r dr. \quad (5.6)$$

O potencial do disco está dado pela integral:

$$\Phi(r, z) = \int_0^\infty S(k) J_0(kr) e^{-k|z|} dk. \quad (5.7)$$

Se a galáxia tem um perfil de brilho exponencial tipo Freeman (ver Eq. 3.4, na Pág. 52) e a razão de M/L ( $\Upsilon_d$ ) é constante ao longo do disco, podemos assumir que a distribuição superficial de massa [ $\Sigma(r)$ ] tem também um perfil exponencial multiplicado pela constante  $\Upsilon_d$ . Desta maneira,  $\Sigma(r) = \Upsilon_d I_d \exp\left[-\left(\frac{r}{r_d}\right)\right]$ . Para obter o potencial deste tipo de distribuição de massa, precisamos primeiro substituir  $\Sigma(r)$  na equação 5.6 :

$$S(k) = -\frac{2\pi G\Upsilon_d I_d r_d^2}{[1 + (kr_d)^2]^{\frac{3}{2}}}, \quad (5.8)$$

e depois substituir  $S(k)$  na equação 5.7:

$$\Phi(r, z) = -2\pi G\Upsilon_d I_0 r_d^2 \int_0^\infty \frac{J_0(kr)e^{-k|z|}}{[1 + (kr_d)^2]^{\frac{3}{2}}} dk. \quad (5.9)$$

O potencial no plano do disco ( $z = 0$ ), fica da seguinte forma:

$$\Phi(r, 0) = -\pi G\Upsilon_d I_0 r [I_0(y)K_1(y) - I_1(y)K_0(y)], \quad (5.10)$$

onde  $y \equiv \frac{r}{2r_d}$ ,  $I_n$  e  $K_n$  são as funções modificadas de Bessel de primeira e segunda espécie, respectivamente.

A partir do potencial no plano, podemos calcular a velocidade circular ( $V_d$ ) para o disco exponencial, igualando as forças centrífuga e gravitacional, de forma que  $V_d$  fica como:

$$V_d^2(r) = 4\pi G\Upsilon_d I_d r_d y^2 [I_0(y)K_0(y) - I_1(y)K_1(y)]. \quad (5.11)$$

Por último, o perfil de massa acumulada de um disco exponencial é dado pela seguinte expressão (Binney & Tremaine, 1987) :

$$M(r) = 2\pi\Upsilon_d I_d r_d^2 [1 - \exp(-r/r_d)(1 + r/r_d)]. \quad (5.12)$$

### 5.1.3 Modelo do halo

Para a distribuição de massa do halo de matéria escura utilizamos o perfil de densidade NFW, proposto por Navarro et al. (1995, 1996, 1997). Sua forma analítica é a seguinte:

$$\rho(r) = \frac{\rho_0 \rho_c}{\left(\frac{r}{r_s}\right)\left(1 + \frac{r}{r_s}\right)}, \quad (5.13)$$



onde  $r_s$  é o raio de escala do halo,  $\rho_0$  é uma densidade característica do halo e  $\rho_c = 3H_0^2/8\pi G$  é a densidade crítica do universo ( $H_0$  é o valor atual da constante de Hubble). Embora o perfil NFW seja definido para os parâmetros  $r_s$  e  $\rho_0$ , na literatura ele é parametrizado usando as grandezas  $M_{200}$  e  $c$ ;  $M_{200}$  é a massa interior em um raio ( $r_{200}$ ) no qual a densidade média é 200 vezes a densidade crítica do Universo, matematicamente :  $M_{200} = 200\rho_c\frac{4}{3}\pi r_{200}^3$ ;  $c$  é o chamado parâmetro de concentração do halo, definido como:  $c \equiv r_{200}/r_s$ . O parâmetro  $\rho_0$  está relacionado com  $c$  pela seguinte equação (Navarro et al., 1996):

$$\rho_0 = \frac{200}{3}g(c); \quad g(c) = \frac{c^3}{[\ln(1 + c - c/(1 + c))]} \quad (5.14)$$

A velocidade circular ( $V_h$ ) para o perfil NFW em função dos parâmetros  $M_{200}$  e  $c$ , está dada pela seguinte expressão:

$$V_h^2(r) = \frac{GM_{200}}{g(c)r} \left[ \ln(1 + cr/r_{200}) - \frac{cr/r_{200}}{1 + cr/r_{200}} \right]. \quad (5.15)$$

A massa acumulada do halo, pode ser obtida substituindo o perfil de densidade [ $\rho(r)$ ] na Eq. 5.3.

### 5.1.4 Curva de rotação final

O modelo de curva de rotação final ( $V_c$ ) é computado pela soma dos quadrados das velocidades circulares do bojo, disco e halo:

$$V_c^2(r) = V_b^2(r) + V_d^2(r) + V_h^2(r). \quad (5.16)$$

Esta equação tem 9 parâmetros, 5 fotométricos e 4 dinâmicos. Os parâmetros fotométricos foram determinados para o bojo ( $I_b, r_e, n$ ) e para o disco ( $I_d, r_d$ ) na seção 3.4, e são parâmetros fixos. Usaremos os parâmetros fotométricos obtidos na banda  $r'$ , pois esta banda sofre menos extinção interestelar do que a banda  $g'$ , e portanto as suas imagens traçam melhor a distribuição de massa estelar. Por outro lado, os

parâmetros dinâmicos são as razões massa-luminosidade do bojo e do disco,  $\Upsilon_b$  e  $\Upsilon_d$ , e os parâmetros do halo,  $M_{200}$  e  $c$ . Estes parâmetros são livres.

A equação 5.16 tem só uma variável ( $r$ ), e é útil quando temos uma única observação com fenda longa, como no caso da galáxia AM1219A (ver Fig. 2.8, na pág. 36). Por outro lado, no caso de várias observações de fenda longa, como nas galáxias AM2058A e AM1228A (ver Fig. 2.8, pág. 36), convém fazer um ajuste bidimensional da projeção no céu de  $V_c$ . A velocidade radial  $[V(R, \phi)]$  dada uma posição no plano do céu está relacionada com a velocidade circular  $[V_c(r)]$  por meio das equações (Elmegreen, 1998, Palunas & Williams, 2000)

$$V(R, \phi) = V_{sys} + V_c(r) \sin i \left[ \frac{\cos i \cos(\phi - \phi_0)}{\sqrt{1 - \sin^2 i \cos^2(\phi - \phi_0)}} \right], \quad (5.17)$$

e

$$r = R \sqrt{1 + \sin^2(\phi - \phi_0) \cos^2 i}, \quad (5.18)$$

onde  $i$  é a inclinação do disco galáctico com respeito ao plano do céu,  $\phi_0$  é o AP do eixo maior do disco, e  $V_{sys}$  é a velocidade sistêmica. O centro cinemático ( $R_c, \phi_c$ ) são dois parâmetros implícitos. É importante notar que o termo entre colchetes é igual a 1 quando  $V_c$  é medida ao longo do eixo maior, neste caso,  $r = R$ . A equação 5.17 introduz 5 parâmetros adicionais, a saber:  $i$ ,  $\phi_0$ ,  $V_{sys}$ ,  $R_c$  and  $\phi_c$ . Os dois primeiros parâmetros são determinados pelo ajuste das isofotas mais externas do disco galáctico (Sect. 3.3.1, pág. 48), e portanto, são parâmetros fixos. Entretanto, os restantes 3 parâmetros são livres dentro do modelo.

Uma suposição implícita no modelo acima é que os eixos maiores fotométrico e cinemático estão alinhados. Porém, como vimos no Capítulo 4, no caso da galáxia AM2058B há um dramático desalinhamento entre os dois eixos. De fato, em um recente trabalho, Barrera-Ballesteros et al. (2014) estudaram os campos de velocidade de uma amostra de mais de 80 galáxias isoladas, encontrando que  $\sim 10\%$  dessas galáxias apresentam desalinhamentos maiores que  $20^\circ$ . Como o  $\phi_0$  é um parâmetro fundamental na modelagem da cinemática, é importante determinar esse parâmetro

de forma independente. Para isso, foi utilizado um modelo fenomenológico da  $V_c$  (Bertola et al., 1991), dado pela seguinte equação:

$$V_c^2(r) = \frac{Ar}{(r^2 + c_0^2)^{p/2}}, \quad (5.19)$$

onde  $A$ ,  $c_0$ , e  $p$  são parâmetros que definem a forma e a amplitude da curva de rotação. A projeção da  $V_c$  no plano do céu para este modelo é :

$$V(r, \phi) = V_{sys} + \frac{AR \cos(\phi - \phi_0) \sin i \cos^p i}{(R^2 \eta + c_0^2 \cos^2 i)^{p/2}}, \quad (5.20)$$

onde

$$\eta \equiv [\sin^2(\phi - \phi_0) + \cos^2(i) \cos^2(\phi - \phi_0)], \quad (5.21)$$

os parâmetros  $V_{sys}$ ,  $\phi_0$ ,  $i$ ,  $R_c$  e  $\phi_c$ , são iguais aos definidos na equação 5.17. O parâmetro  $i$  é mantido constante, devido à conhecida limitação de determinar a inclinação do disco através da cinemática.

Este modelo é aplicado somente para AM2058A e AM1228A, que como foi mostrado acima são galáxias com várias observações de fenda longa. Os parâmetros obtidos no ajuste são listados na Tabela 5.1. Em vez dos parâmetros  $\phi_0$  e  $R_c$ , são dadas as diferenças entre os centros fotométricos e cinemáticos no plano do céu,  $\Delta x$  e  $\Delta y$ . Na Tabela 5.1 são dados também a diferença ( $\Delta\theta$ ) entre os APs dos eixos maiores fotométrico e cinemático ( $\phi_0$ ). Com respeito aos resultados, o parâmetro  $p$  para ambas galáxias é próximo de 1, o qual é o valor esperado para curvas de rotação planas (Bertola et al., 1991). Os valores de  $V_{sys}$  estão de acordo com as observações. As duas galáxias têm um *offset* entre os centros fotométrico e cinemático de  $\sim 0.1$  kpc e  $\sim 0.4$  kpc para AM 2058A e AM 1228A, respectivamente. No entanto, estes *offsets* são menores que o tamanho dos *seeings* para cada galáxia (0.94 kpc e 0.45 kpc, respectivamente). Para a galáxia AM 2058A, há uma boa concordância na orientação dos eixos maiores fotométrico e cinemático, enquanto que para AM 1228A, há um desalinhamento de  $59^\circ$  entre os eixos. Uma possível explicação é que o AP fotométrico derivado do ajuste das isofotas mais externas da imagem simétrica AM 1228A (ver Sec.

Tabela 5.1: Parâmetros cinemáticos do modelo fenomenológico.

Galaxy	A (km s <sup>-1</sup> )	c (kpc)	p	V <sub>sys</sub> (km s <sup>-1</sup> )	Δx (kpc)	Δy (kpc)	ϕ <sub>0</sub>	AP	Δθ
AM 2058A	823±208	46±3	1.2±0.1	12164±1	-0.02±0.06	0.07±03	195°±1	199°	4°
AM 1228A	106±53	15±3	0.9±0.1	5887±1	0.42±0.09	-0.15±0.06	221°±1°	162°	59°

3.3.1, pág. 48), pode estar afetado pela estrutura de maré comum entre AM 1228A e AM 1228B. Uma outra possibilidade seria a forma “S” da curva zero de velocidade que é vista nos campos de velocidades de galáxias barradas (e.g., Peterson & Huntley, 1980, García-Barreto & Rosado, 2001, Emsellem et al., 2006, Barrera-Ballesteros et al., 2014). Não obstante, este efeito introduziria assimetrias no campo de velocidades, mais do que um desalinhamento entre o eixo fotométrico e cinemático. No ajuste da cinemática de AM 1228A será usado o valor de  $\phi_0$  derivado do modelo fenomenológico.

## 5.2 Distribuição da Matéria Escura e Massa Estelar

A literatura apresenta basicamente dois enfoques para o estudo da distribuição de massa nas galáxias, estes são: o método do disco máximo (van Albada et al., 1985, Carignan, 1985, e referências) e o método do melhor ajuste (Kent, 1987, e referências). O primeiro, assume que a componente estelar (bojo+disco) domina na parte interna da galáxia. Portanto, as razões M/L do bojo e do disco são restritas pela parte crescente da curva de rotação. Qualquer excesso na curva de rotação em raios grandes é, então, atribuído à componente do halo. Entretanto, o segundo enfoque busca, através de um ajuste da curva de rotação com todos os parâmetros livres, sem nenhum tipo de restrição física, determinar a melhor distribuição possível da matéria.

Neste trabalho adotamos um método mais geral, que inclui todas possíveis distribuições entre matéria “luminosa” e “escura”. Para isso, exploramos o espaço de parâmetros gerado pela razões M/L do bojo ( $\Upsilon_b$ ) e do disco ( $\Upsilon_d$ ), e os parâmetros do

halo ( $M_{200}, c$ ). No caso do modelo bidimensional da curva de rotação, além desses parâmetros são explorados os parâmetros geométricos ( $V_{sys}, \phi_0, R_c$ ). Cada ponto deste espaço representa um modelo da curva de rotação (uni- ou bi-dimensional, dado pelas equações 5.16 ou 5.17, respectivamente), e tem associado um valor de  $\chi^2$  como medida da concordância entre o modelo e a curva observada. Para percorrer este espaço, foi desenvolvido um código em PYTHON, no qual, dados os quatro (ou sete) parâmetros de um ponto do espaço, calcula-se o modelo da curva de rotação e seu respectivo  $\chi^2$ .

Os intervalos explorados para os parâmetros  $\Upsilon_b, \Upsilon_d, M_{200}, c, \phi_0$  and  $R_c$  são dados na Tabela 5.2, de novo o centro cinemático é dado em termos do *offset* com respeito ao centro fotométrico,  $\Delta x$  e  $\Delta y$ . A escolha dos parâmetros do halo é baseada nos valores encontrados em simulações cosmológicas para o perfil de NFW (Navarro et al., 1996, Bullock et al., 2001). Com respeito aos valores das razões M/L bojo e disco, foram explorados os valores entre uma componente estelar mínima (modelo do disco mínimo) e uma componente máxima (modelo do disco máximo) (e.g., van Albada et al., 1985, Carignan, 1985, Kent, 1987). Por outro lado, para o modelo bidimensional da curva de rotação, usado para o ajuste dos campos de velocidade de AM 2058A e AM 1228A, foram explorados os centros cinemáticos dentro da “caixa” dos respectivos *seeings*. Enquanto que para os valores  $V_{sys}$  destes modelos, foram explorados 5 valores: as velocidades radiais da abertura central e suas aberturas adjacentes e os valores médios entre elas.

Tabela 5.2: Intervalos explorados para os modelos dinâmicos.

Parâmetros	Valor min.	Valor max.	Passo $\Delta$
$\Upsilon_b$	0.00	3.6	0.10
$\Upsilon_d$	0.00	3.6	0.10
$\log(M_{200}/10^{12} M_{\odot})$	-1.30	1.00	0.03
$c$	5.0	60.0	1.00
$\Delta x, y$ (kpc) for AM 1228A	-0.94	0.94	0.470
$\Delta x, y$ (kpc) for AM 2058A	-0.45	0.45	0.225

Para o ajuste do modelo da curva de rotação da galáxia AM1219A foram tomados apenas os pontos do lado S-E do PVR. Isto deve-se, como foi discutido na Sec. 4.2, ao fato de que o lado N-W do PVR está significativamente perturbado pela presença da galáxia companheira AM1219B. No entanto, o lado S-E do PVR parece não perturbado. Este PVR foi deprojetado para obter a curva de rotação observada, usando a inclinação do disco ( $i = 40^\circ$ ) e a diferença angular entre o AP da fenda longa ( $162^\circ$ ) e o AP do disco ( $29^\circ$ ) (ver Tabela 3.2, pág. 49). Para o modelo de curva de rotação de AM2058A são usados os PVRs ao longo das fendas AP= $350^\circ$  e AP= $42^\circ$ . O PVR ao longo da fenda AP= $125^\circ$  foi excluído da análise, devido às irregularidades que apresenta por passar pelo braço N-W (ver Fig. 4.5, pág. 71). Por outro lado, todos PVRs observados para AM1228A são usados no modelamento da curva de rotação.

### 5.2.1 Resultados do ajuste

Os parâmetros dinâmicos para o melhor modelo de distribuição de matéria para as galáxias principais são listados na Tabela 5.3. Estes parâmetros correspondem ao mínimo global nos seus respectivos espaços de  $\chi^2$ . As incertezas a  $1\sigma$  de confiança (68%) são dadas também. Na Tabela 5.4 são listados os parâmetros geométricos para os modelos das galáxias AM2058A e AM1228A.

Tabela 5.3: Parâmetros dinâmicos para os modelos de melhor ajuste de AM1219A, AM2058A e AM1228A.

Galáxia	$\Upsilon_b$	$\Upsilon_d$	$c$	$M_{200}/M_\odot$	$\chi^2$
AM 1219A	$2.8^{+0.4}_{-0.4}$	$2.4^{+0.3}_{-0.2}$	$16.0^{+1.2}_{-1.1}$	$2.0^{+0.5}_{-0.4} \times 10^{12}$	3
AM 2058A	$0.00^{+0.28}_{0.00}$	$1.06^{+0.32}_{-0.32}$	$17.5^{+2.0}_{-2.0}$	$0.902^{+0.463}_{-0.275} \times 10^{12}$	212
AM 1228A	$0.00^{+0.04}_{0.00}$	$0.84^{+0.08}_{-0.16}$	$39.0^{+3.0}_{-3.0}$	$0.102^{+0.043}_{-0.019} \times 10^{12}$	906

A fim de ilustrar o mínimo global e seus padrões de convergência, nos painéis da Fig. 5.1 (Pág. 95) apresentamos as projeções do espaço de  $\chi^2$  sobre os planos  $\log(M_{200}/M_*)-c$  e  $\Upsilon_b-\Upsilon_d$  para os modelos das galáxias principais. Podemos ver nos

Tabela 5.4: Parâmetros geométricos para os modelos de melhor ajuste de AM 2058A e AM 1228A

Galaxy	$V_{sys}$ (km s <sup>-1</sup> )	$\Delta x$ (kpc)	$\Delta y$ (kpc)
AM 2058A	12157.3	0.47	0.94
AM 1228A	5894.4	0.45	-0.225

gráficos da Fig. 5.1 que os padrões de convergência são suaves e os mínimos são facilmente identificáveis em todos os casos. A forma dos contornos indica o grau de relação entre os parâmetros. Por exemplo, nos gráficos dos painéis esquerdos observamos que os contornos têm a conhecida forma de “banana”, a qual indica uma forte correlação entre os parâmetros  $M_{200}$  e  $c$ , pois há uma degenerescência entre eles: uma diminuição no valor  $c$  é compensada com um aumento em  $M_{200}$ , e vice-versa. Esta degenerescência é originada pela definição do perfil do NFW. A forma de banana é mais evidente na projeção do espaço do  $\chi^2$  de AM 1219A, e menos definida na projeção para AM 1228A. Contudo, os padrões de convergência nas projeções do espaço do  $\chi^2$  no plano  $\log(M_{200}/M_*)$ - $c$  são definidos e bastante profundos, sobretudo nos casos de AM 2058A e AM 1228A.

As projeções do espaço do  $\chi^2$  no plano  $\Upsilon_b$ - $\Upsilon_d$  somente mostram correlação no projeção para AM 1219A, onde para valores grandes de  $\Upsilon_b$  há compensação com valores pequenos de  $\Upsilon_d$ , e vice-versa. Por outro lado, é interessante notar que os parâmetros de M/L do bojo e do disco para o modelo de AM 1219A são maiores se comparados com os valores derivados para as galáxias AM 2058A e AM 1228A. Em AM 1219A teríamos o caso do disco máximo, onde as componentes luminosas são dominantes no interior do disco com respeito a matéria escura, enquanto que nas duas últimas teríamos o caso do disco mínimo, onde a matéria escura domina todos os raios da galáxia. Outro ponto importante para salientar, é que as razões M/L do bojo para os modelos de AM 2058A e AM 1228A são nulas. Estes resultados não são totalmente surpreendentes, pois nestas duas galáxias as componentes do bojo só têm  $\sim 3\%$  do brilho total das suas respectivas galáxias (ver Tabela 3.6, pág. 65), enquanto que o

bojo de AM 1219A tem  $\sim 5\%$ , que é um fator de 1.7 maior. Em geral, na literatura estes tipos de galáxias tardias (todas classificadas como Sc) têm sua distribuição de massa modelada sem bojo (e.g., van Albada et al., 1985, Carignan, 1985, Begeman, 1989, Kuzio de Naray et al., 2008), se bem que no caso da galáxia AM 1219A este é uma componente bastante importante.

Na Tabela 5.5 os parâmetros do halo encontrados para as galáxias principais AM 1219A, AM 2058A e AM 1228A são comparados com os valores reportados para a Via Láctea, Andrômeda (M 31), e um modelo de formação de galáxia de tipo tardio. Observa-se que os parâmetros das galáxias AM 1219A e AM 2058A são da mesma ordem (dentro das barras de erro) dos encontrados na Via láctea e M 31, que são consideradas galáxias espirais típicas, entretanto, os parâmetros de AM 1228A são totalmente diferentes. As massas dos halos das galáxias AM 1219A e AM 2058A são 10 vezes maiores que o halo de AM 1228A. Uma possível explicação para esta disparidade, pode estar relacionada com a diferença de tamanho físico entre estas galáxias, as isofotas mais externas de AM 1219A e AM 2058A têm raios de 10.6 kpc e 11.6 kpc, respectivamente, enquanto que a isofota externa de AM 1228A tem um raio de apenas 5.7 kpc.

Tabela 5.5: Comparação dos parâmetros do halo derivados para as galáxias principais com os de outras galáxias. Os valores tomados de <sup>(a)</sup> Battaglia et al. (2005), <sup>(b)</sup> Tamm et al. (2012) e <sup>(c)</sup> simulação ERIS para formação de galáxias de tipo tardio (Guedes et al., 2011).

Galaxy	$c$	$R_{200}$ (kpc)	$M_{200}/M_{\odot}$
AM 1219A ( $\chi_{\min}^2$ )	16	184	$2.0_{-0.4}^{+0.5} \times 10^{12}$
AM 2058A ( $\chi_{\min}^2$ )	17	194	$0.902_{-0.275}^{+0.463} \times 10^{12}$
AM 1228A ( $\chi_{\min}^2$ )	39	94	$0.102_{-0.019}^{+0.043} \times 10^{12}$
Milky Way <sup>(a)</sup>	18	186	$0.8_{-0.2}^{+1.2} \times 10^{12}$
M 31 <sup>(b)</sup>	13	200	$1.04 \times 10^{12}$
Simulation Sc <sup>(c)</sup>	22	239	$0.79 \times 10^{12}$



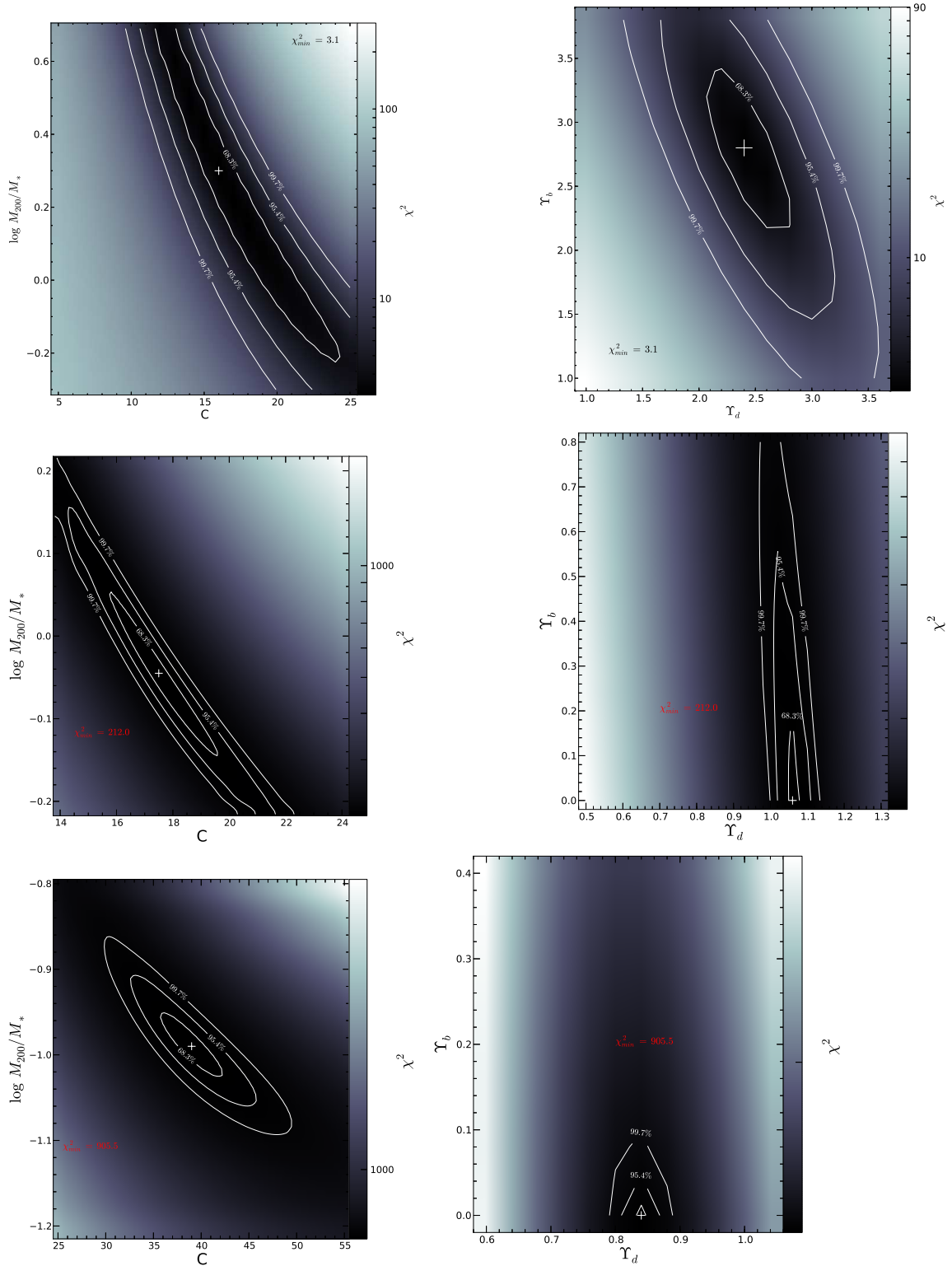


Figura 5.1: Painéis esquerdos: projeção do espaço de  $\chi^2$  sobre o plano  $\log(M_{200}/M_*)$ - $c$  para AM1219A (sup.), AM2058A (int.) e AM1228A (inf.). Painéis Direitos: Projeção do espaço de  $\chi^2$  sobre o plano  $\Upsilon_b$ - $\Upsilon_d$  para AM1219A (sup.), AM2058A (int.) e AM1228A (inf.). Os iso-contornos de  $\Delta\chi^2$  correspondem à probabilidade de 68.3, 95.4 e 99.7 % ( $1\sigma$ ,  $2\sigma$ ,  $3\sigma$ ) para um grau de liberdade. O símbolo + indica o mínimo global.

### 5.2.2 Projeções do campo de velocidade modelado sobre os perfis de velocidades radiais

A Figura 5.2 apresenta o campo de velocidade projetado no céu (usando a equação 5.17) do melhor modelo de curva de rotação para AM 2058A, além das suas projeções sobre os PVRs ao longo dos  $AP=350^\circ$ , e  $AP=42^\circ$ . Em termos gerais, há uma boa concordância com as observações, em particular para o PVR ao longo do  $AP=42^\circ$ . Na projeção do modelo sobre o PVR ao longo do  $AP=350^\circ$ , observa-se um excelente ajuste no lado de *approaching*, enquanto no lado de *receding* há um afastamento entre o modelo e as observações. O deslocamento em velocidade é da ordem  $\Delta V \sim 20 \text{ km s}^{-1}$ . Pode-se interpretar este afastamento como se a parte Sul da galáxia (cf., Fig. 4.5, pág. 71) estivesse acelerando e/ou se estivesse desviando do plano galáctico devido à interação com AM 2058B. Comportamentos assimétricos deste tipo tem sido reportados em outros pares em interação (e.g., Rubin et al., 1991, Márquez et al., 2002, Fuentes-Carrera et al., 2004, Presotto et al., 2010), e em galáxias em ambientes de alta densidade, como aglomerados de galáxias (Dale et al., 2001). Finalmente, a projeção do modelo sobre o PVR ao longo do  $AP=42^\circ$  segue a tendência da curva observada. Porém, alguns pontos têm desvios  $\Delta V > 50 \text{ km s}^{-1}$ . Contudo, como comentado na Seção 4.2, este é um comportamento esperado devido à fenda atravessar o braço N-W (ver Fig. 4.5, pág. 71).

A Figura 5.3 apresenta o melhor modelo para o campo de velocidades de AM 1228A, e suas projeções sobre os PVR. Os dados observados são bem representados pelo modelo. A projeção do PVR ao longo do  $AP=319^\circ$  segue a tendência da curva de rotação, com alguns pontos tendo desvios de velocidade  $\Delta V > 30 \text{ km s}^{-1}$ . Estes desvios podem ser devidos a movimentos não circulares, por esta linha estar próxima à linha de velocidade zero do campo de velocidades (ver o painel superior-esquerdo da Fig. 5.3). As projeções do modelo sobre os PVRs ao longo dos  $AP=10^\circ$

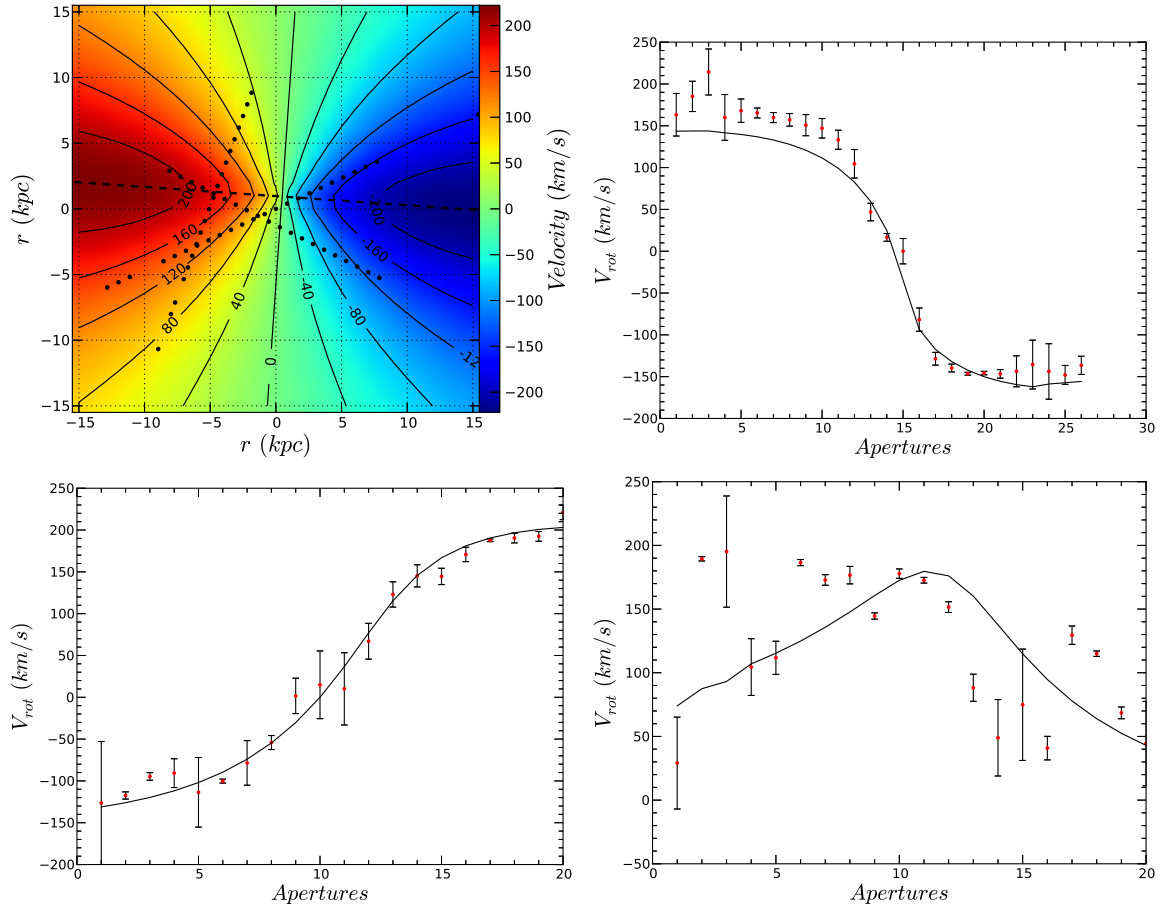


Figura 5.2: O campo de velocidade (painel superior direito) do melhor modelo para AM 2058A, e suas projeções sobre os perfis de velocidade radial ao longo dos AP=350°(superior-direito), AP=125°(inferior-esquerdo) e AP=42°(inferior-direito). As linhas contínuas representam os modelos do perfil de velocidade radial. Os triângulos vermelhos são os dados observados.

e AP=20° também seguem as tendências das curvas, porém, os modelos não reproduzem completamente as partes planas destas curvas, lado Sul e Norte, respectivamente.

Em ambos os modelos das curvas de rotação, tanto da galáxia AM 2058A quanto da AM 1228A, o centro cinemático encontrado está deslocado com respeito ao centro geométrico (ver Tabela 5.4). Este efeito está de acordo com os resultados encontrados em simulações numéricas de fusões menores, feitos por Kronberger et al. (2006), e pode ser explicado, como segue: quando a componente B se aproxima, a

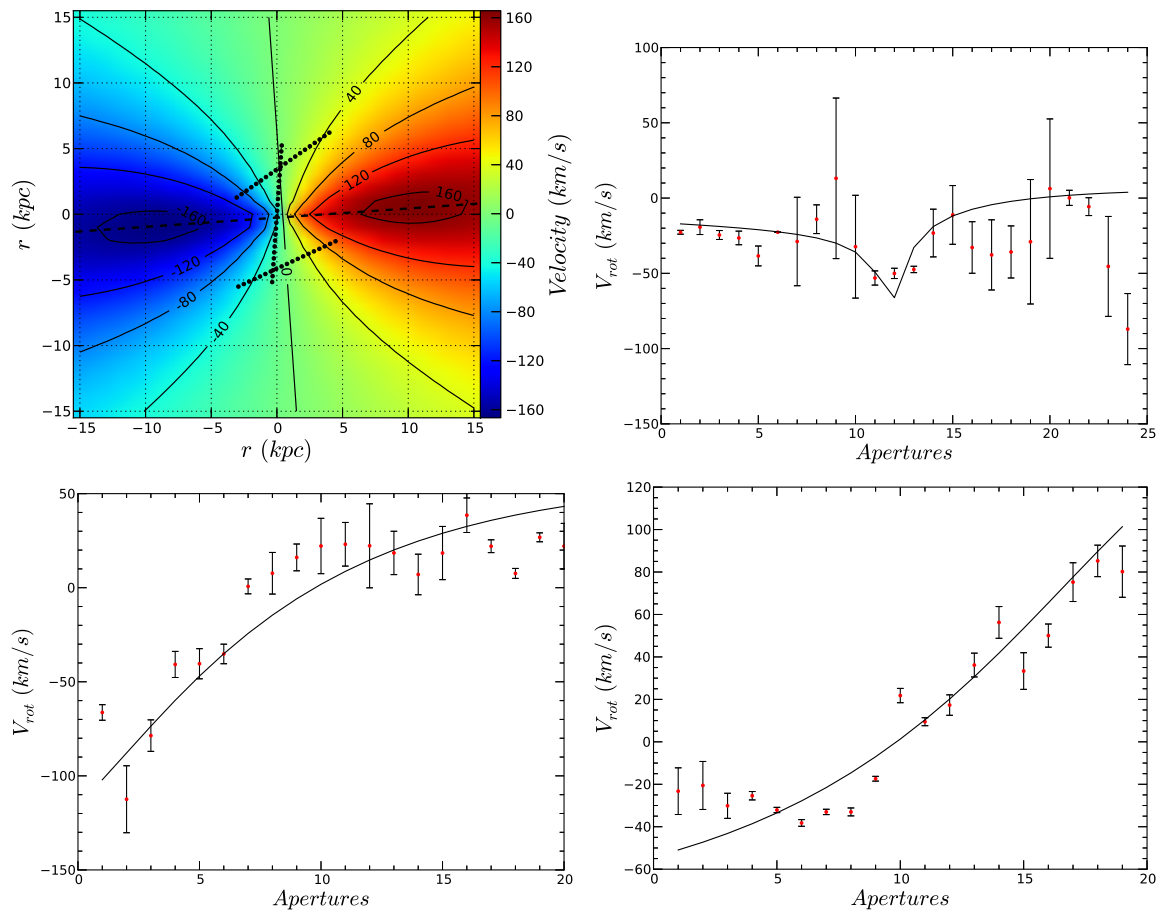


Figura 5.3: Igual à Fig. 5.2 para o melhor modelo de AM1228A, e as fendas com AP=319°(superior-direito), AP=10°(inferior-esquerdo) e AP=20°(inferior-direito).

galáxia principal sofre uma aceleração em direção ao centro de massa do sistema. Esta aceleração afeta o campo de velocidade, de tal forma que as velocidades relativas ao centro galáctico são aumentadas na direção da galáxia secundária e enfraquecidas no lado oposto. Em outras palavras, o centro cinemático da galáxia é deslocado com respeito ao centro geométrico do disco. Isto também explica o porque as assimetrias das curvas de rotação, tanto da galáxia AM 1229A como AM 2058, estarem nas direções das galáxias secundárias.

### 5.2.3 Curva de rotação final

Na Figura 5.4 é apresentada para a galáxia AM 1219A a deprojeção da curva de rotação observada e seu respectivo modelo junto com suas componentes (bojo, disco e halo). O modelo mostra uma boa concordância com a curva observada ao longo de todos os raios, com um  $\chi^2$  de 3.1. Observa-se que a componente do bojo domina a parte interna ( $r \lesssim 1.5$  kpc) da curva de rotação. Entretanto, na parte intermediária ( $1.5 \lesssim r \lesssim 3.5$  kpc), o disco e o halo têm a mesma preponderância, e na parte final ( $r \gtrsim 3.5$  kpc), como é de se esperar, a componente halo se torna dominante. Na mesma Figura são apresentadas as curvas de rotação para as galáxias AM 2058A e AM 1219A, juntamente com as curvas das componentes disco e halo. Para AM 2058A as componentes bojo e disco têm peso similar ao longo de todos os raios da curva de rotação, sendo a componente do halo um pouco mais importante que a do disco. Para AM 1219A até a parte intermediária do disco ( $0.0 \lesssim r \lesssim 5.0$  kpc) a curva de rotação é dominada pela componente do halo, entretanto, na parte final a componente do disco começa a ser dominante. É importante ressaltar que esse domínio vai até o pico da curva do disco por volta de  $\sim 10.5$  kpc, depois disso a curva de rotação é dominada totalmente pelo halo.

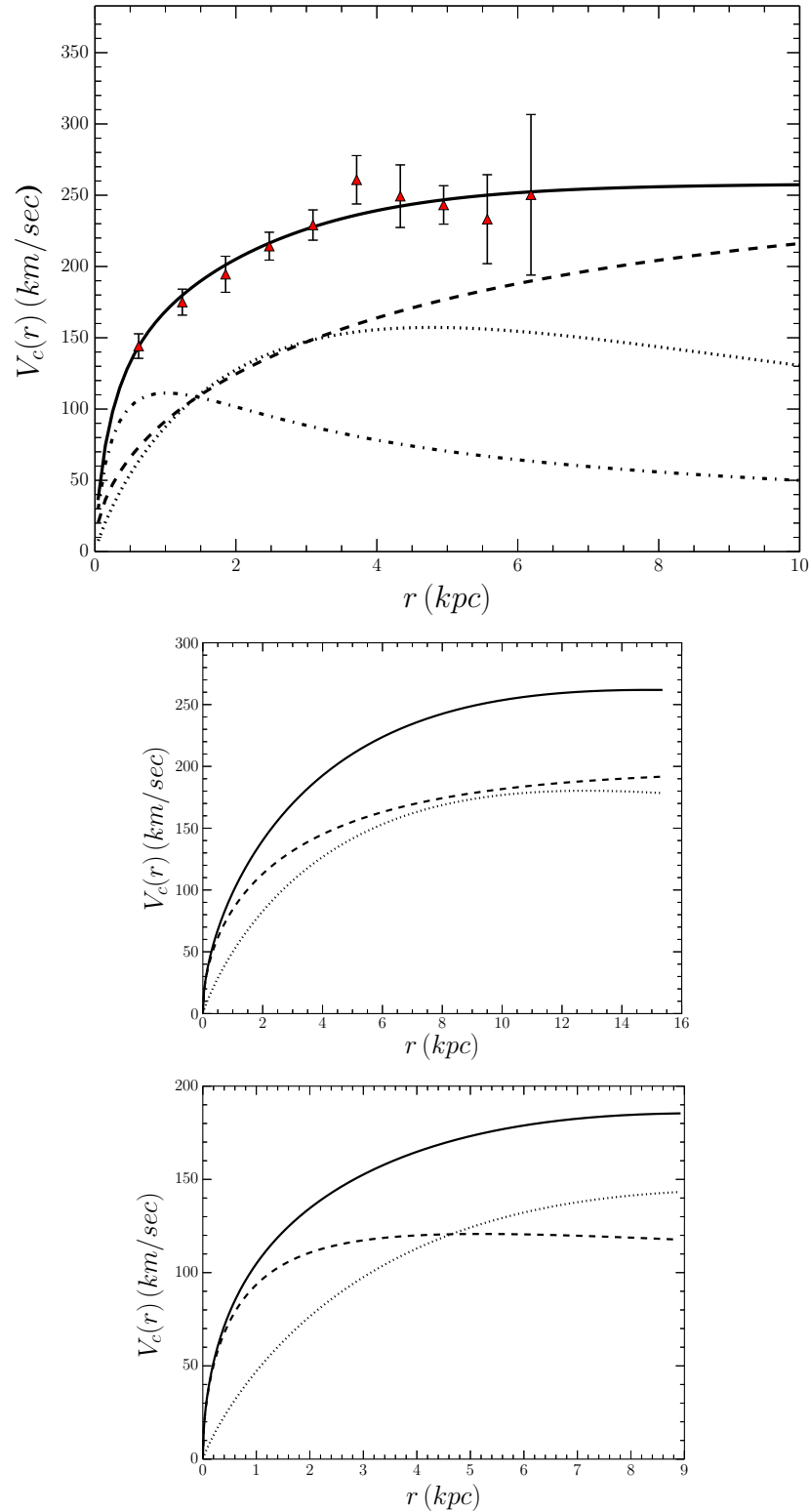


Figura 5.4: Painel superior : a deprojeção da curva de rotação de AM 1219A (pontos com barra de erros) e seu modelo (linha contínua) junto com as componentes: bojo (ponteadas-tracejada), disco (ponteadas) e halo (tracejada). Igual ao painel superior para AM 2058A e AM 1228A nos painéis intermediário e inferior, respectivamente.

### 5.2.4 Razões massa-luminosidade

Os modelos das curvas de rotação, para galáxias principais, são usados para o cálculo das massas acumuladas das componentes da galáxia (bojo, disco e halo) até o raio equivalente<sup>1</sup> da isofota mais externa das respectivas galáxias. Os valores calculados são listados na Tabela 5.6. Da mesma forma que nos halos, as massas acumuladas totais ( $M_t$ ) derivadas para as galáxias AM1219A e AM2058A são um fator de  $\sim 2$  vezes maiores do que a massa da galáxia AM1228, portanto, a razão entre as massas integradas é proporcional ao tamanho físico das respectivas galáxias.

As razões  $M/L_r$  são derivadas usando as massas acumuladas e luminosidades totais das galáxias (Tabela 3.1, pág. 42). As razões  $M/L_r$  encontradas para as galáxias AM1219A, AM2058A, e AM1228A são 2.19, 3.05 e 1.37, respectivamente. O valor encontrado de  $M/L_r$  para AM2058A está de acordo com o valor médio,  $M/L_r = 4.5 \pm 1.8$ , reportado para uma mostra de 290 galáxias isoladas do tipo tardio estudadas por Broeils & Courteau (1997). Os baixos valores da razão  $M/L_r$  de AM1219A e AM1228A estão de acordo com o esperado para galáxias com intensa formação estelar, como foi dito na introdução, a galáxia AM1219A é classificada como *starburst* (Pastoriza et al., 1999), enquanto que AM1228A é classificada como galáxia IRAS extrema (van den Broek et al. 1991).

Tabela 5.6: Massas acumuladas das componentes das galáxias principais

Galáxia	$M_b/M_\odot$	$M_d/M_\odot$	$M_h/M_\odot$	$M_t/M_\odot$
AM1219A	$5.79 \times 10^9$	$2.53 \times 10^{10}$	$5.18 \times 10^{10}$	$8.29 \times 10^{10}$
AM2058A	-	$8.47 \times 10^{10}$	$9.03 \times 10^{10}$	$1.75 \times 10^{11}$
AM1228A	-	$2.27 \times 10^{10}$	$1.94 \times 10^{10}$	$4.21 \times 10^{10}$

<sup>1</sup>O raio derivado a partir da área da isofota,  $r_{eqv} = \sqrt{A/\pi}$ .

## Capítulo 6

# Simulação numérica do par AM 1219-430<sup>1</sup>

Para reconstruir a história do par AM 1219-430 e prever a evolução do encontro, modelamos a interação entre AM 1219A e AM 1219B através de simulações numéricas utilizando o código GADGET-2 de N-corpos e hidrodinâmica (Springel, 2005). As galáxias são modeladas seguindo a receita de Hernquist (1993), na qual os modelos das galáxias são constituídos pelos seguintes componentes: halo de matéria escura, disco estelar, disco de gás, e bojo. A seguir são dados os perfis para cada componente.

O perfil de densidade tanto do disco estelar como o do gás tem um decaimento exponencial ao longo do raio cilíndrico (lei de Freeman), e para a estrutura vertical é adotado o modelo comum de lâminas isotérmicas paralelas ao plano do disco. Portanto, uma forma consistente para o perfil do disco é dada pela função

$$\rho_d(R, z) = \frac{M_d}{4\pi h^2 z_0} \exp(-R/h) \operatorname{sech}^2(z/z_0), \quad (6.1)$$

onde  $M_d$  é massa de disco,  $h$  é o comprimento de escala radial, e  $z_0$  é largura de escala vertical. O parâmetro  $h$  é tomado da análise fotométrica (ver Tabela 3.3, pág. 57), e

---

<sup>1</sup>Esta parte do trabalho foi desenvolvida com a colaboração do Professor Dr. Irapuan Rodrigues. Ele forneceu os códigos para os modelos das galáxias e geração de órbitas. Cronologicamente, os resultados aqui apresentados foram obtidos antes dos resultados do Cap. 5.



o valor de  $z_0$  é tomado como um 1/10 do valor  $h$ . Os discos estão embebidos em um halo de matéria escura auto-consistente, dado pelo perfil de densidade de uma esfera isotérmica truncada:

$$\rho_h(r) = \frac{M_h}{2\pi^{3/2}} \frac{\alpha \exp(-r^2/r_c^2)}{r_c (r^2 + \gamma^2)}, \quad (6.2)$$

onde  $M_h$  é a massa do halo,  $r_c$  é o raio de truncamento, e  $\gamma$  é o raio de escala do halo. A constante de normalização  $\alpha$  é definida como:

$$\alpha = \{1 - \sqrt{\pi}q \exp(q^2)[1 - \text{erf}(q)]\}^{-1}, \quad (6.3)$$

onde  $q = \gamma/r_c$ . Os bojos são modelados como a forma oblata do par potencial-densidade introduzido por Hernquist (1990), e que tem a seguinte forma:

$$\rho_b(m) = \frac{M_b}{2\pi a c^2} \frac{1}{m(1+m)^3}, \quad e \quad m^2 = \frac{x^2 + y^2}{a^2} + \frac{z^2}{c^2}, \quad (6.4)$$

onde  $M_b$  é massa do bojo,  $a$  é o comprimento de escala ao longo do eixo maior, e  $c$  é comprimento de escala ao longo do eixo menor. Trabalhamos com um bojo esférico, tomando  $a = c$ , e usando o valor derivado da análise fotométrica (ver Tabela 3.4, pág. 61)

Para construir modelos de cada componente próximos ao equilíbrio, é necessário inicializar as posições e as velocidades das partículas de acordo à solução da equação não colisional de Boltzmann<sup>2</sup>. As posições das partículas são distribuídas de acordo ao perfil de densidade de cada componente. Enquanto que as velocidades iniciais das partículas são calculadas usando os primeiros dois momentos da equação de Boltzmann (equações de Jeans, Binney & Tremaine, 1987) e assumindo uma distribuição de velocidades gaussiana (Hernquist, 1993).

Os parâmetros para o modelo de AM 1219A estão vinculados à curva de rotação apresentada na Seção 4.2. São feitas várias tentativas para determinar os parâmetros dos modelos não restritos pela fotometria: a massa do disco ( $M_d$ ), os parâmetros

---

<sup>2</sup>também conhecida como equação de Vlasov.

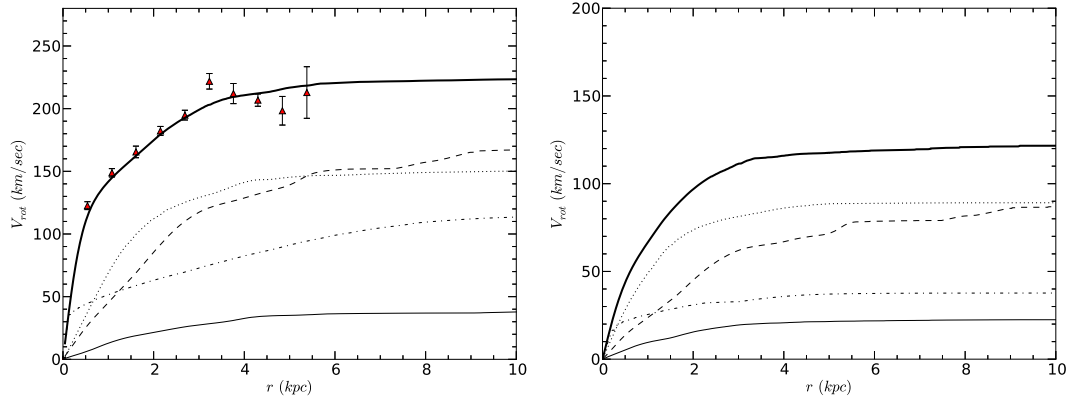


Figura 6.1: Modelos da curva de rotação das galáxias AM1219A (esquerda) e AM1219B (direita). As curvas das componentes individuais do modelo também estão apresentadas: halo (linha tracejada), bojo (tracejada pontuada), disco estelar (pontuada) e gás (solida).

do halo ( $M_h$  e  $r_c$ ), e massa do bojo  $M_b$ . O processo é repetido até conseguir uma concordância com a curva de rotação observada. No painel esquerdo da Fig. 6.1 é apresentado o modelo final obtido para a curva de rotação de AM1219A. É importante salientar que estes modelos são fenomenológicos, e como a distribuição de massa final não está restrita pela fotometria, esta não necessariamente segue a distribuição real de matéria da galáxia.

Como visto na Seção 4.2 a fenda longa com  $AP=25^\circ$  não mostra sinais de rotação, pois está afastada da linha de nodos. Portanto, essa curva não pode ser usada como vínculo para o modelo de AM1219B. Então, a partir da luminosidade da galáxia na banda  $B$  ( $L_B = 4.23 \times 10^9 L_\odot$ ), obtemos uma estimativa da massa da galáxia de  $2.0 \times 10^{10} M_\odot$  utilizando uma razão massa-luminosidade de  $\Upsilon_B = 4.7$ , típica de galáxias tipo Sc (Faber & Gallagher, 1979). O modelo final da curva de rotação de AM1219B é apresentado no painel direito da Fig. 6.1.

Outros parâmetros importantes para os modelos das galáxias são a inclinação e o ângulo de posição dos discos galácticos, além da orientação do spin, o qual indica o sentido de rotação dos discos. A inclinação e o ângulo de posição foram restritos pela fotometria (ver Tabela 3.2, pág. 49). Enquanto que o sentido da rotação foi derivado,

conhecendo os lados de *approaching* e de *receding* do disco, e assumindo que os braços espirais observados em ambas galáxias são *trailing*, isto é, que estão enrolados na mesma orientação da rotação do disco galáctico. As orientações derivadas para ambas galáxias são ilustradas na Fig. 6.2.

Como qualquer estudo desta classe, a recriação da evolução do sistema AM 1219-430 requer resolver o problema inverso de calcular a órbita seguida pelas galáxias a partir das propriedades observadas. Este é um problema não determinado completamente, já que as observações não fornecem toda a informação necessária para univocamente determinar a solução. Portanto, para restringir o espaço de fase das condições iniciais das simulações, primeiro calculamos as órbitas que satisfazem as propriedades observadas das galáxias, como a distância aparente entre elas no plano do céu e a diferença de velocidade radial entre as galáxias, testando diferentes excentricidades e pericentros. Das órbitas resultantes e da morfologia observada, selecionamos algumas para rodar uma simulação completa. Entre estas, a órbita que melhor ajusta

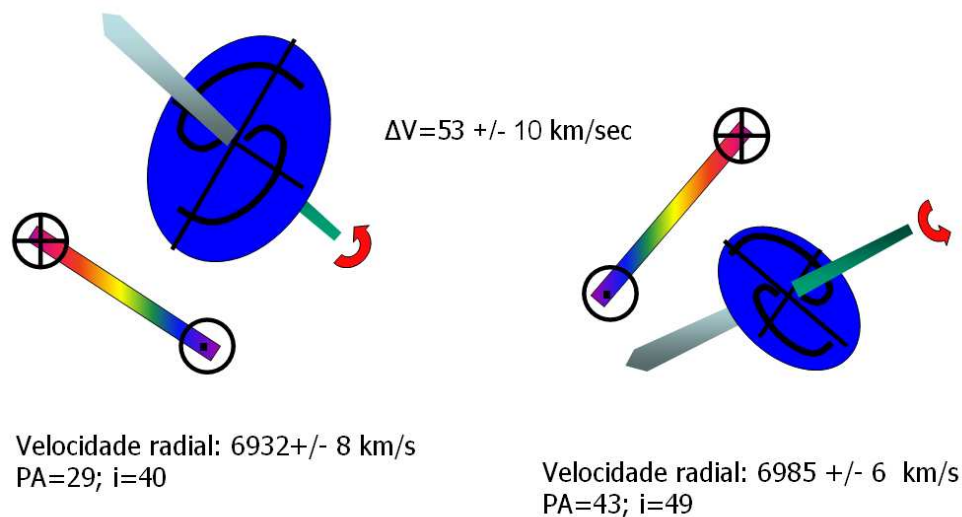


Figura 6.2: Modelos do disco e do spin das galáxias AM 1219A (esquerda) e AM 1219B (direita). As retas ilustram os semi-eixos menor e maior dos discos, e as linhas curvas as formas das espirais. As setas que atravessam o centro do disco indicam a orientação do vetor de spin, enquanto que as barras coloridas indicam os lados *approaching* e *receding* do disco.

às propriedades observadas das galáxias será a escolhida para representar a história dinâmica do par.

As estruturas de maré detectadas no par AM 1219-430 são o principal filtro na escolha de modelos, uma vez que permitem descartar órbitas que não reproduzam bem a forma destas estruturas, e sua contribuição luminosa ao sistema. (e.g., Salo & Laurikainen, 1993, Mihos & Bothun, 1997, Rodrigues et al., 1999, Díaz et al., 2000, Krabbe et al., 2008, 2011). As pontes e caudas de maré observadas no sistema AM 1219-430 (presentes também no sistema AM2058-381) são típicas de órbitas prógradas (e.g., Toomre & Toomre, 1972, Salo & Laurikainen, 1993, Rodrigues et al., 1999, Krabbe et al., 2008, 2011), isto é, quando o sentido de rotação da órbita coincide com o spin da galáxia principal. Na Fig. 6.3 é ilustrado um exemplo deste tipo de órbita. Portanto, somente órbitas prógradas foram testadas para a simulação do par AM 1219-430.

Inicialmente rodamos 38 simulações de baixa resolução ( $1.0 \times 10^5$  partículas) para testar os diferentes parâmetros orbitais. Como exemplo destes testes, na Fig. 6.4 são ilustrados os *snapshots* da evolução das simulações de três tipos diferentes de órbitas, elíptica, parabólica e hiperbólica. Note-se que nenhuma delas reproduz as características morfológicas observadas no estágio atual do sistema AM 1219-430 (cf., Fig. 3.1, pág. 39).

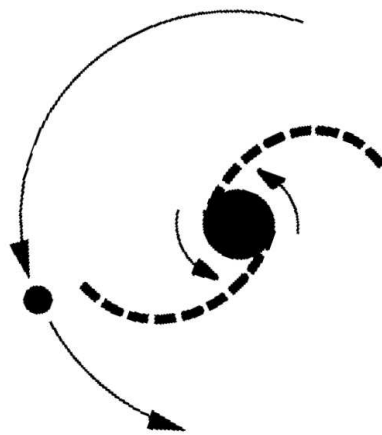


Figura 6.3: Ilustração de uma órbita prógrada (Rodrigues, 1999).

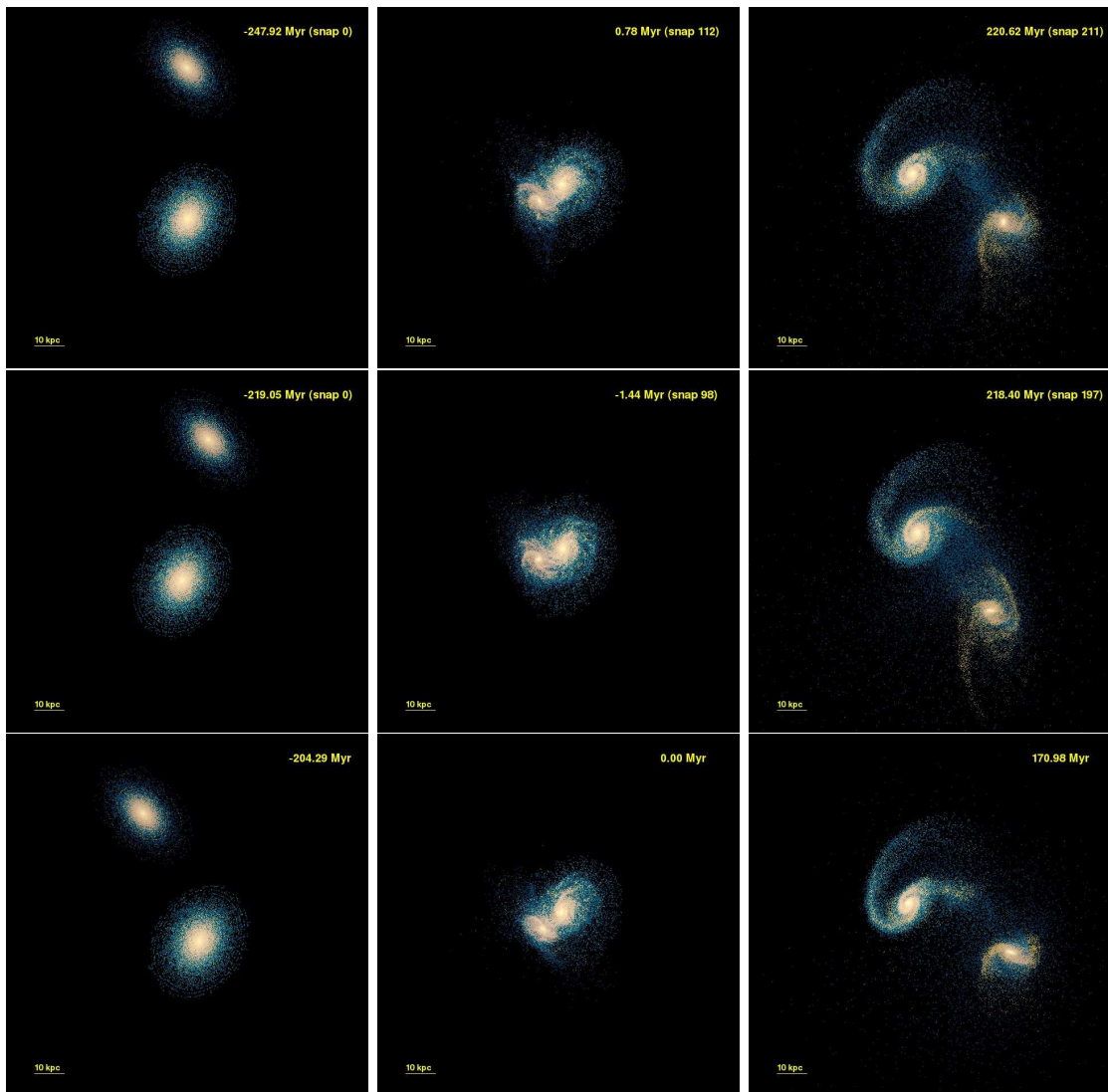


Figura 6.4: Três capturas da evolução temporal do sistema AM1219-430 para três diferentes tipos de órbita: elíptica (painéis superiores), parabólica (intermediários) e hiperbólica (inferiores). O tempo é mostrado em Mega-anos (Myr) no canto superior direito dos painéis. As estrelas são desenhadas em vermelho e o gás em azul. Os painéis esquerdos apresentam as condições iniciais do sistema para cada órbita, os painéis intermediários o sistema no perigaláctico, e os painéis direitos no momento “atual” do sistema.

A simulação que reproduz melhor a morfologia observada de AM 1219-430, foi rodada em alta resolução com  $1.34 \times 10^6$  partículas. Esta simulação tem uma órbita parabólica (excentricidade igual 1.0) com uma distância perigaláctica de  $\sim 9.2$  kpc. O plano da órbita está inclinado  $71^\circ$  com respeito ao plano do céu, e tem um AP de  $81^\circ$ . Na passagem perigaláctica, AM 1219B está a frente de AM 1219A ao longo da linha de visada. A simulação indica que a distância espacial atual entre as galáxias é de 42 kpc (a projetada é 35 kpc). Na Fig. 6.5 é ilustrada a órbita final seguida pela galáxia secundária, observe-se que ela é desviada com respeito à órbita inicial dada, devido à fricção dinâmica causada pelo halo da galáxia principal.

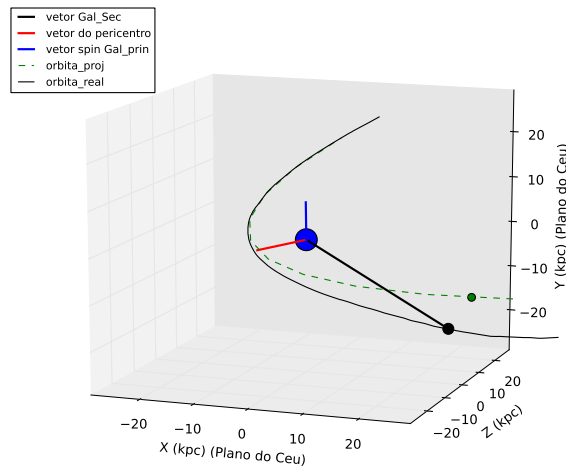


Figura 6.5: Gráfico em 3D da órbita que melhor reproduz o par AM 1219-430. Também é plotada a órbita inicial do sistema (linha tracejada), observe-se que devido à fricção dinâmica que sofre a galáxia secundária, ela é desviada da sua trajetória original.

Os parâmetros finais para os modelos de cada galáxia estão listados na Tabela 6.1. A inclinação final do disco de AM 1219B exigiu vários testes, pois as distorções de maré e o *warping* causado pela interação modificavam a razão axial projetada da galáxia, portanto as simulações com uma inclinação inicial do disco de  $i=49^\circ$  não

coincidiam com a morfologia observada. O melhor resultado foi obtido para uma inclinação inicial do disco de  $i=35^\circ$ .

Tabela 6.1: Parâmetros das simulações

	AM1219A	AM1219B
partículas do disco estelar	170000	45000
massa	0.6	0.16
comprimento de escala	0.6	0.46
escala vertical	0.06	0.046
parâmetro de Toomre (Q)	1.5	1.5
partículas do disco gasoso	170000	45000
massa	0.06	0.016
comprimento de escala	1.0	0.77
escala vertical	0.05	0.05
parâmetro de Toomre (Q)	1.5	1.5
Partículas do bojo	30000	5000
massa	0.1	0.02
comprimento de escala	0.03	0.17
partículas do halo	630000	245000
massa	2.8	0.75
raio de corte do halo	5.7	5.7
raio de de escala	0.6	0.6

**Notas:** As Simulações foram feitas em um sistema de unidades assumindo  $G=1$ . Para converter em unidades físicas, são usadas as seguintes constantes: comprimento: 3.5 kpc, massa:  $5.586 \times 10^{10} M_\odot$ , e tempo : 13.062 Myr.

A Fig. 6.6 mostra a evolução temporal do encontro. O tempo com respeito à passagem perigaláctica é mostrado em Mega-anos (Myr) no canto superior direito de cada painel. A simulação inicia 220 Myr antes do perigaláctico, com as galáxias afastadas em 70 kpc. A situação que melhor reproduz a morfologia e a cinemática de AM1219-430 no estágio atual aconteceu cerca de 220 Myr após a passagem perigaláctica. Algumas características da morfologia e da cinemática coincidem com as observações; por exemplo, a velocidade radial entre as galáxias é correta e a ponte de baixa densidade juntando as galáxias está presente. Porém, as características dos braços espirais da galáxia principal na simulação não coincidem com as observadas;

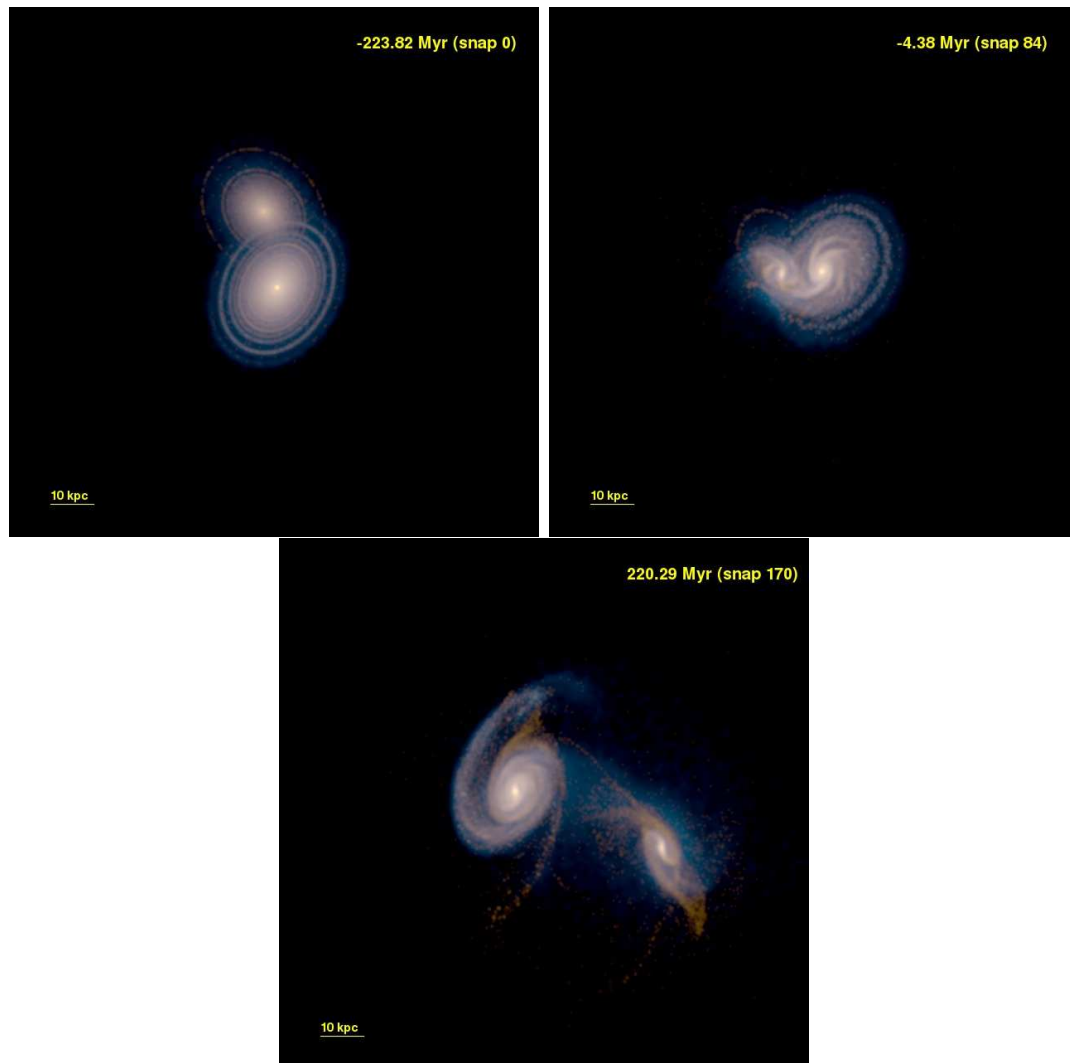


Figura 6.6: Três capturas que apresentam a evolução temporal do sistema AM 1219-430: condição inicial (painel superior esquerdo), passagem perigaláctica (superior direito) e o estágio atual (inferior). O tempo é mostrado em Mega-anos (Myr) no canto superior direito dos painéis. As estrelas são desenhadas em vermelho e o gás em azul. A passagem perigaláctica sucede em 0 Myr (painel central). O melhor ajuste para o estágio atual do sistema foi encontrado  $\sim 220$  Myr após da passagem perigaláctica.



o braço de maré é muito fraco e o braço normal é muito intenso, situação contrária à observada. Além disso, quando comparados à curva de rotação numérica da galáxia AM1219A com a observada (Fig. 6.7), a curva numérica não apresenta as irregularidades observadas na curva real no lado N-W. Concluimos que será necessária a realização de mais testes de forma a encontrar uma órbita que reproduza melhor o sistema real.

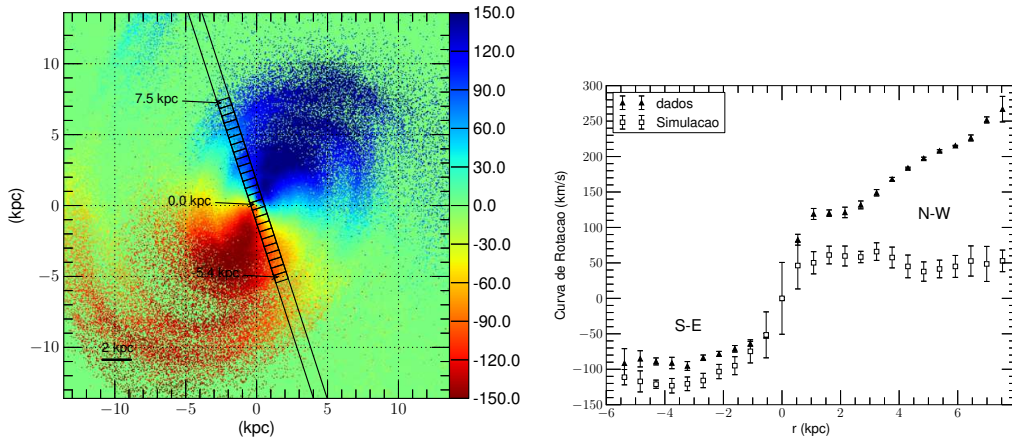


Figura 6.7: Painel esquerdo: Campo de velocidade do gás modelado da galáxia principal, sobre ele são plotadas as aberturas da fenda observada (ver Fig. 4.3, pág. 69). Painel direito: Curva de rotação do modelo de AM 1219A no estágio atual do sistema, ela foi “extraída” imitando a forma da fenda observada. Os quadrados abertos são os pontos da curva numérica (as barras de erro são tomadas da dispersão de velocidades do gás) e os triângulos são os pontos para a curva de rotação observada.

## 6.1 Vínculos para simulações numéricas

Na seção anterior seguimos o procedimento padrão da literatura para simulações numéricas de galáxias em interação (e.g., Salo & Laurikainen, 1993, Rodrigues et al., 1999, Krabbe et al., 2008, 2011). Nesta tese desenvolvemos uma nova metodologia para determinar os parâmetros fotométricos, cinemáticos e dinâmicos destes sistemas. Em particular, esta metodologia foi aplicada aos pares AM 1219-430, AM 2058-381 e AM 1228-260. Ao longo dos capítulos 3, 4, e 5 vimos que cada sistema tem parâmetros

e propriedades específicas (e.g., estruturas de maré, pseudo-bojos, irregularidades nos discos, etc.), as quais, constituem importantes vínculos para simulações numéricas. Portanto, a correta reprodução destas características ajudaria no esclarecimento dos mecanismos físicos que as geram. A seguir discutiremos em detalhe os vínculos associados a estas características.

### 6.1.1 Estruturas de maré

As estruturas de maré detectadas nos pares estudados são importantes restrições na hora de avaliar as simulações numéricas, uma vez que permitem descartar as órbitas que não reproduzam bem as suas formas. Embora o sentido da órbita (prógrada ou retrógrada) possa obter-se facilmente, a determinação do tipo de órbita da colisão (parabólica, elíptica ou hiperbólica) e o ângulo de inclinação do plano da órbita com o plano do disco da galáxia principal, precisa de um longo processo de tentativa e erro. Como mencionado na seção anterior, as pontes e caudas de maré observadas nos sistemas AM 1219-430 e AM 2058-381 são típicas de órbitas prógradas. Por outro lado, ângulos de inclinação do plano da órbita pequenos em relação ao disco favorecem o aparecimento dessas características (Rodrigues et al., 1999). Por exemplo, no caso da simulação de AM 1219-340, a órbita que melhor descreve o sistema tem uma inclinação baixa ( $\sim 20^\circ$ ) com respeito ao disco de AM 1219A. Outro exemplo que podemos citar é a interação menor NGC 7735/36, na qual Salo & Laurikainen (1993) encontraram que a órbita que melhor descreve a colisão deste sistema tem uma inclinação  $20^\circ - 30^\circ$  com respeito ao disco galáctico da galáxia principal e uma excentricidade 0.05–0.15 (ver Fig. 6.8).

Por outro lado, as estruturas de maré, também, restringem o cálculo do tempo da passagem perigaláctica, de fato sua intensidade e forma dependem fortemente da aproximação ou afastamento da galáxia secundária, desenvolvendo-se plenamente depois da passagem perigaláctica (e.g., Fig. 6.4). Por exemplo, as estruturas de maré observadas nos pares AM 1219-430 e NGC 7735/36 correspondem a uma passagem perigaláctica de 200 Myr e 500 Myr (Salo & Laurikainen, 1993), respectivamente. A

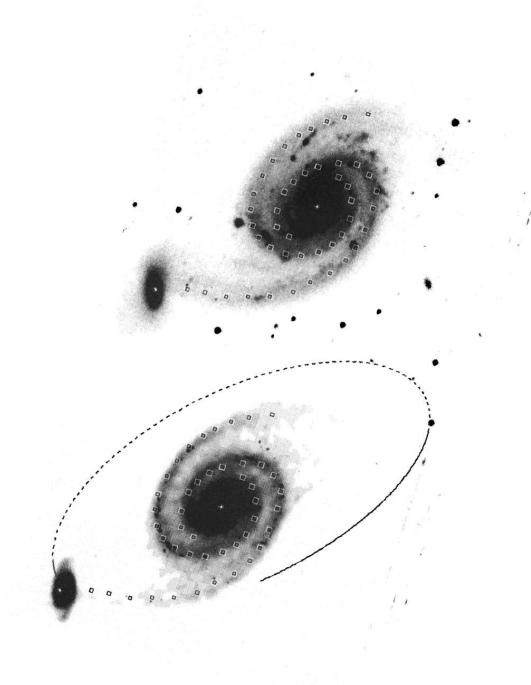


Figura 6.8: Exemplo da órbita encontrada para o sistema NGC 7735/36 (Salo & Laurikainen, 1993), sua estrutura de maré bastante semelhante ao par AM 2058-381. Painel superior: imagem observada do sistema. Painel inferior: imagem da simulação.

semelhança da estrutura de maré de AM2058-381 com as dos pares AM1219-430 e NGC7735/36, sugere que este sistema também está num estágio posterior a sua primeira passagem perigaláctica. A simulação de AM2058-381, permitiria estimar o tempo dessa passagem.

A estrutura de maré observada no par AM1228-260 é muito mais complexa que a discutida nos casos anteriores, pois envolve as duas galáxias. De fato, este tipo de estrutura é observado para estados mais avançados de interação, e.g., numa segunda passagem perigaláctica (Mezcua et al., 2014). O que sugere que este par de galáxias poderia estar num processo de fusão. A simulação numérica deste sistema teria como objetivo confirmar este cenário.

### 6.1.2 Estruturas bojo-disco

Um dos aportes importantes deste trabalho, é que a metodologia proposta possibilita a obtenção dos parâmetros das estruturas bojo e discos nas galáxias dos pares em interação menor. Devido à natureza deste objetos, a obtenção do perfil de brilho e sua decomposição de forma confiável é uma tarefa comumente muito difícil devido à perturbação morfológica presente neles. Por meio do método Elmegreen conseguimos contornar esse problema. A caracterização das estruturas bojo-disco é bem importante, pois elas representam restrições adicionais na hora de modelar o sistema. Por exemplo, no capítulo 3, observamos que os discos das galáxias principais dos pares AM2058A e AM1228A se afastam da correlação  $\mu_0 - h$  encontrada em galáxias normais. Portanto, a simulação numérica da interação destes sistemas, teria como vínculos as características dos discos das galáxias principais. A inclusão dessas restrições permitiria explorar sua a origem (e.g., Fig. 3.10, pág. 60).

Outro vínculo do modelo seria a correta reprodução dos pseudo-bojos presentes em todas as galáxias estudadas. Esta questão seria o clássico dilema do ovo e galinha; os pseudo bojos estavam antes do encontro galáctico? ou foram formados durante a interação?. No entanto, o perfil raso de metalicidade observado nas galáxias principais

dos pares AM1219-430 e AM2058-381 por Rosa et al. (2014), é um forte indício de que estes pseudo-bojos tenham sido originados pela interação.

As barras presentes nas galáxias principais AM2058A e AM1228A também são um vínculo importante para os modelos. Simulações de N-corpos têm mostrado que as barras surgem naturalmente em discos galácticos (Athanasoula, 2005, Binney & Tremaine, 2008), seu crescimento depende da razão de massa halo-disco (medida nas partes internas das galáxias) e da velocidade de dispersão do disco (Athanasoula & Sellwood 1986), sendo favorecido em discos mais massivos e frios. As barras são importantes na distribuição de momentum angular no disco. Sendo que os *inflows* de gás para regiões centrais são muito mais vigorosos com a presença de barras. Não obstante, as interações podem originar barras ou afetar fortemente suas propriedades (e.g. Gerin, Combes & Athanasoula 1990; Miwa & Noguchi 1998; Berentzen et al. 2003, 2004). Por exemplo, interações menores podem gerar barras deslocadas do centro (Athanasoula, Puerari & Bosma 1997). Portanto, as simulações dos pares AM2058A e AM1228A exploraria a origem da barra nas suas galáxias principais.

### 6.1.3 Distribuição de matéria bariônica e escura das componentes dos pares

Outra contribuição importante desta tese foi a derivação, pela primeira vez, da distribuição de matéria bariônica e escura para as galáxias principais dos pares estudados. Embora este seja um procedimento padrão em galáxias isoladas (e.g., van Albada et al., 1985, Carignan, 1985, Begeman, 1989, Kuzio de Naray et al., 2008, Tamm et al., 2012), é pouco aplicado em galáxias em interação, e em todos os casos para interações maiores (e.g., Fuentes-Carrera et al., 2004, 2007, Repetto et al., 2010, 2013). Por outro lado, os modelos da curva de rotação utilizada nas simulações numéricas, geralmente, são ajustados sem considerar as restrições fotométricas (e.g., Salo & Laurikainen, 1993, Mihos & Bothun, 1997, Rodrigues et al., 1999, Díaz et al., 2000, Krabbe et al., 2008, 2011). Isto pode introduzir um erro na simulação porque a distribuição de

matéria bariônica e escura assumida podem diferir da distribuição real. Por exemplo, comparando a distribuição de matéria bariônica e escura de AM 1219A encontrada na seção 6.1 (Fig. 6.1, Pág. 104) com a derivada com os vínculos fotométricos na Seção 5.2 (Fig. 5.4, pág. 100), vemos que existe uma grande diferença. A massa assumida para o halo da galáxia principal ( $0.2 \times 10^{12} M_{\odot}$ ) na simulação foi subestimada num fator de 10 em relação ao derivado fotometricamente ( $2.0_{-0.4}^{+0.5} \times 10^{12} M_{\odot}$ ). Este pode ser um dos motivos pelo qual a simulação não conseguiu reproduzir a cinemática observada para este sistema. Concluimos, portanto, que a distribuição de matéria escura e bariônica derivada na seção 5.2, deve ser um dos parâmetros iniciais para futuras simulações numéricas dos pares estudados.

# Capítulo 7

## Conclusões e perspectivas

### 7.1 Sumário

Neste documento apresentamos a investigação das características morfológicas, cinemáticas e dinâmicas das interações menores AM 1219-430, AM 2058-381 e AM 1228-260. Estas características foram obtidas através de uma nova metodologia desenvolvida durante o trabalho de doutorado, para o estudo de sistemas em interação menor. As observações utilizadas são imagens nas bandas  $g'$  e  $r'$ , e espectros com fenda longa no intervalo  $[4280-7130]\text{\AA}$ , obtidos com o *Gemini Multi-Object Spectrograph* do Telescópio Gemini Sul. Nossos principais resultados são:

1. As magnitudes aparentes e absolutas das componentes A e B dos pares AM 1219-430, AM 2058-381 e AM 1228-260 foram calculadas. Comparando essas luminosidades com o sistema da MW, encontramos que a galáxia principal do par AM 2058-381 é duas vezes mais luminosa que a MW, a secundária é cerca de cinco vezes mais luminosa que a LMC. Enquanto que, os outros dois pares têm luminosidades da mesma ordem que o sistema da MW. A razão de luminosidade entre as componentes do par AM 1219-430 é de 1:3, para AM 2058-381 é de 1:5, e para AM 1228-260 é de 1:20. O que confirma a classificação destes pares como interações menores.

2. Detectamos e quantificamos, pela primeira vez, diferentes tipos de estruturas de maré nos pares estudados. No par AM 1219-430, foram encontrados uma ponte de interação conectando as galáxias do par, além de longas caudas de maré na galáxia secundária a  $2\sigma$  acima do fundo do céu. Em conjunto, toda a estrutura de maré deste par tem  $\sim 5\%$  da luminosidade total do sistema. Para a galáxia principal de AM 2058-381 foram encontradas duas longas caudas de maré a  $0.5\sigma$ , elas têm  $\sim 5\%$  da luminosidade total do sistema. No sistema AM 1228-260, encontramos uma estrutura de maré envolvendo as duas componentes a  $1\sigma$ . Esta estrutura contribui com  $20\%$  da luminosidade total do par.
3. Utilizando o método de Elmegreen et al. (1992), separamos as partes assimétricas e simétricas das galáxias dos pares estudados. As estruturas encontradas nas imagens assimétricas podem ser associadas às perturbações morfológicas causadas pela interação. As galáxias principais mostram um quadro de perturbação maior com muitas regiões de formação estelar e braços espirais deformados. Em contraste, as galáxias secundárias apresentam apenas pequenas perturbações com algumas regiões H II e sobredensidades. Por outro lado, as imagens simétricas mostram o que pode ser considerado como o “disco original” e o padrão espiral não perturbado. A partir delas, calculamos a inclinação e o ângulo de posição do disco para cada galáxia, além de dar uma classificação morfológica para cada uma delas.
4. Empregando as imagens simétricas das galáxias dos pares, fizemos a decomposição do perfil de brilho superficial de cada uma delas. A galáxia AM 1219A foi decomposta nas componentes bojo e disco. Porém, seu perfil de brilho superficial tem um excesso de luz de  $\sim 53\%$ , que provém das intensas regiões de formação estelar nos braços espirais, em concordância com seu status de galáxia *starburst* (Pastoriza et al., 1999) e LIRG (Kewley et al., 2001). Por outro lado, a decomposição do brilho superficial de AM 1219B, além de conter as componentes do bojo e o disco, revela a existência de uma estrutura tipo lente. A



decomposição do perfil de brilho superficial das galáxias principais dos pares AM 2058-381 e AM1228-260 também apresenta subestruturas, como barras e anéis. Enquanto o perfil de brilho das galáxias secundárias destes pares só foi decomposto nas componentes bojo e disco.

5. As escalas de comprimento e as magnitudes centrais da componente do disco nas galáxias dos pares estudados concordam com os valores médios derivados para galáxias normais (Fathi et al., 2010, Fathi, 2010), isto é, sem sinais de interação ou com perturbações morfológicas. No entanto, os discos das galáxias principais dos pares AM 2058-381 e AM 1228-260 estão fora da correlação entre estes parâmetros. Por outro lado, os índices de Sérsic ( $n$ ) são menores que 2 para todas as galáxias, valores típicos de bojos achatados (com perfil exponencial), os quais na literatura são chamados de pseudo-bojos (Kormendy & Kennicutt, 2004, Gadotti, 2009).
6. Foram calculadas as razões B/D e B/T em todas as galáxias dos pares estudados. Os valores encontrados para estas razões, parecem não ter sido afetados pelas interações, seguindo a mesma correlação com respeito ao tipo morfológico apresentado em galáxias isoladas. Os valores da razão B/T para as galáxias de tipo tardio dos pares AM 1219A, AM 2058A, AM 1228A e AM 1228B são  $< 0.1$ , os quais são valores típicos para galáxias normais do mesmo tipo morfológico (e.g., Fisher & Drory, 2008, Weinzirl et al., 2009). Da mesma forma, os valores de 0.23 e 0.34 da razão B/T das galáxias AM 1219B e AM 2058B concordam com os valores meios encontrados para galáxias normais do tipo jovem.
7. Os PVRs são derivados das linhas de emissão do gás ionizado. Eles apresentam irregularidades em todas as galáxias. Em particular, as galáxias principais dos pares AM 1219-430, AM 2058-381 têm PVRs assimétricos, com um aumento de velocidade dos lados próximos às galáxias secundárias. Por outro lado, há uma forte evidência que a galáxia secundária do par AM 2058-381 sofreu uma

inversão do seu eixo de rotação, enquanto que o PVR de AM 1228B está totalmente perturbado.

8. Utilizamos um método de força bruta para explorar todas as possíveis distribuições entre as matérias estelar e escura nas galáxias principais dos pares estudados. Os parâmetros do halo ( $M_{200}$  and  $c$ ) encontrados para AM 1219A e AM 2058A são similares aos reportados para a MW e M 31, entretanto, os parâmetros de AM 1228A são totalmente diferentes. As massas dos halos das galáxias AM 1219A e AM 2058A são  $\sim 10$  vezes maiores que o halo de AM 1228A. As razões  $M/L_r$  encontradas para as galáxias AM 1219A, AM 2058A, e AM 1228A são 2.19, 3.05 e 1.37, respectivamente. O valor encontrado de  $M/L_r$  para AM 2058A está de acordo com o valor médio,  $M/L_r = 4.5 \pm 1.8$ , reportado para uma mostra de 290 galáxias isoladas do tipo tardio estudadas por (Broeils & Courteau, 1997). Os baixos valores de  $M/L_r$  para as galáxias AM 1219A e AM 1228A podem ser devidos à intensa atividade de formação estelar desencadeada pela interação.
9. Foi reconstruída a história dinâmica do sistema AM 1219-430 através de simulações numéricas de N-corpos e hidrodinâmicas. A órbita que melhor reproduz as características observadas é uma órbita parabólica com uma passagem perigaláctica de  $\sim 9.2$  kpc. O estágio atual do sistema indica que este pode estar a  $\sim 220$  Myr depois da passagem perigaláctica. Porém, para uma melhor reprodução dos detalhes observados na morfologia e na cinemática das galáxias do sistema seria necessário, em futuras simulações, introduzir como vínculos as propriedades fotométricas, cinemáticas e dinâmicas, derivadas ao longo deste trabalho. De igual forma, para as futuras simulações dos pares AM 2058-381 e AM 1228-260.

## 7.2 Legado

Durante a tese foi publicado um artigo sobre os resultados do par AM1219-430 (Hernandez-Jimenez et al., 2013), e submetido para publicação um artigo com os resultados obtidos para os pares AM2058-381 e AM1228-260 (Hernandez-Jimenez et al., 2014).

Ao longo do doutorado foram desenvolvidos vários códigos computacionais usando a linguagem PYTHON que otimizaram o processo da análise, e permitiram desta forma atingir os objetivos científicos propostos. Alguns destes códigos renderam a participação na publicação de um artigo de Dametto et al. (2014). A seguir são listados os códigos mais significativos e uma breve descrição da sua utilidade:

- CATALOGO.PY: usado para identificação das estrelas de campo que pertencem ao catálogo USNO-B (pode ser implementado para qualquer outro catálogo de estrelas) no processo da calibração fotométrica.
- SKY.PY: usado para o cálculo do fundo do céu.
- SLIT.PY: usado para desenhar a fenda longa nas imagens, e localizar sua posição exata na imagem por meio da comparação do perfil do contínuo dos espectros extraídos com o perfil da imagem. Este código rendeu a participação em um artigo da análise de população estelar com fenda longa (Dametto et al., 2014).
- ELME.PY: usado para a análise de Elmegreen.
- GRAPH.PY: usado para a análise dos resultados da tarefa STSDAS/ELIPSE.
- SURFACE.PY: usado para o ajuste do perfil de brilho das galáxias. Pode ser implementado para qualquer tipo de perfil, como de Vaucouleurs, ou estrutura, tipo barra.
- PLOT.PY: usado para o ajuste das linhas de emissão, e posterior obtenção da curva de rotação.

- CURVE.PY: usado no ajuste da curva de rotação, pode ser implementado para qualquer tipo de função de bojo, disco ou halo.
- CHI.PY: usado para varrer o espaço de  $\chi^2$ , e projetá-lo bidimensionalmente ou unidimensionalmente.

### 7.3 Perspectivas

Uma continuação imediata deste trabalho, é a simulação numérica dos pares AM 1219-430 (uma revisão), AM 2058-381 e AM 1228-260, levando em conta todas as restrições fotométricas, cinemáticas e dinâmicas encontradas. Com o objetivo de determinar a evolução dinâmica dos pares e explicar os mecanismos físicos que produzem os parâmetros observados.

Na sequência, será importante, também, aplicar a metodologia desenvolvida para uma amostra maior de galáxias em interação menor. De fato, a amostra de Donzelli & Pastoriza (1997) foi ampliada incluindo novos objetos do catálogo de Arp & Madore (1987), selecionados das categorias 1 (galáxias com uma companheira interagente) e 9 (galáxias tipo M 51), e ativos no infravermelho no catálogo IRAS de 60 e 100  $m\mu$  (Winge, 2015). No total, foram escolhidos 48 pares. Estes objetos já foram observados no Telescópio Gemini Sul (programas GS-2010A-Q-46 e GS-2010A-Q-76). Na fig. 7.1 são apresentados alguns dos pares da amostra. Esta amostra de galáxias em fusão menor tem uma ampla variedade de separações, distorções morfológicas e possivelmente estágios diferentes de interação. Assim, o objetivo deste projeto é aprofundar o estudo destes tipos de fenômenos em interações menores, focando nos efeitos relacionados com alterações na morfologia, cinemática, dinâmica.

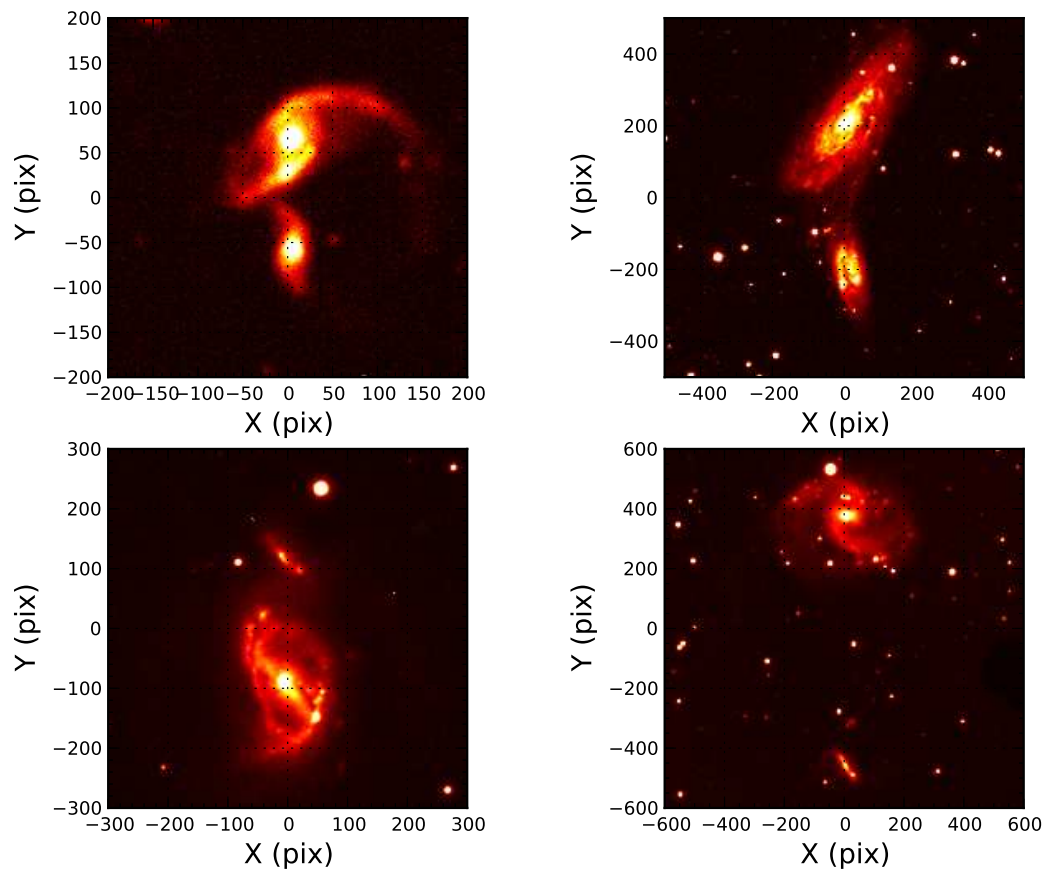


Figura 7.1: Aqui apresentamos 4 pares da nossa amostra de Winge (2015). Na parte superior os pares AM 1058-243 (esquerda) e AM 1132-450 (direita). Na parte inferior os pares AM 1228-260 (esquerda) e AM 1933-422 (direita)

# Referências

- [1] ALFARO, E. J.; PÉREZ, E.; GONZÁLEZ DELGADO, R. M.; MARTOS, M. A.; FRANCO, J. Detection of a corrugated velocity pattern in the spiral galaxy NGC 5427. **Astrophysical Journal**, v. 550, p. 253–260, Mar. 2001.
- [2] ARP, H. C.; MADORE, B. F. **A catalogue of southern peculiar galaxies and associations 2 volume set**: Jun. 1987.
- [3] ARP, HALTON. Atlas of peculiar galaxies. **Pasadena: California Inst. Technology**, 1966.
- [4] ATHANASSOULA, E. Dynamical evolution of barred galaxies. **Celestial Mechanics and Dynamical Astronomy**, v. 91, p. 9–31, Jan. 2005.
- [5] BARBERÀ, C.; ATHANASSOULA, E.; GARCÍA-GÓMEZ, C. Deprojecting spiral galaxies using Fourier analysis. Application to the Frei sample. **Astronomy and Astrophysics**, v. 415, p. 849–861, Mar. 2004.
- [6] BARNES, JOSHUA E.; HIBBARD, JOHN E. IDENTIKIT 1: a modeling tool for interacting disk galaxies. **The Astronomical Journal**, v. 137, n. 2, p. 3071–3090, Feb. 2009.
- [7] BARRERA-BALLESTEROS, J. K.; FALCÓN-BARROSO, J.; GARCÍA-LORENZO, B.; VAN DE VEN, G.; AGUERRI, J. A. L.; MENDEZ-ABREU, J.; SPEKKENS, K.; LYUBENOVA, M.; SÁNCHEZ, S. F.; HUSEMANN, B.; MAST, D.; GARCÍA-BENITO, R.; IGLESIAS-PARAMO, J.; DEL OLMO, A.; MÁRQUEZ, I.; MASEGOSA, J.; KEHRIG, C.; MARINO, R. A.; VERDES-MONTENEGRO, L.; ZIEGLER, B.; MCINTOSH, D. H.; BLAND-HAWTHORN, J.; WALCHER, C. J.; CALIFA COLLABORATION, . Kinematic alignment of non-interacting CALIFA galaxies. Quantifying the impact

of bars on stellar and ionised gas velocity field orientations. **Astronomy and Astrophysics**, v. 568, p. A70, Aug. 2014.

- [8] BARTON GILLESPIE, E.; GELLER, M. J.; KENYON, S. J. Tidally triggered star formation in close pairs of galaxies. II. constraints on burst strengths and ages. **Astrophysical Journal**, v. 582, p. 668–688, Jan. 2003.
- [9] BATTAGLIA, G.; HELMI, A.; MORRISON, H.; HARDING, P.; OLSZEWSKI, E. W.; MATEO, M.; FREEMAN, K. C.; NORRIS, J.; SHECTMAN, S. A. The radial velocity dispersion profile of the Galactic halo: constraining the density profile of the dark halo of the Milky Way. **Monthly Notices of the Royal Astronomical Society**, v. 364, n. 2, p. 433–442, Dec. 2005.
- [10] BEDORF, J.; PORTEGIES ZWART, S. The effect of many minor mergers on the size growth of compact quiescent galaxies. **Monthly Notices of the Royal Astronomical Society**, v. 431, n. 1, p. 767–780, Mar. 2013.
- [11] BEGEMAN, K. G. H I rotation curves of spiral galaxies. I - NGC 3198. **Astronomy and Astrophysics**, v. 223, p. 47–60, Oct. 1989.
- [12] BERTOLA, F.; BETTONI, D.; DANZIGER, J.; SADLER, E.; SPARKE, L.; DE ZEEUW, T. Testing the gravitational field in elliptical galaxies - NGC 5077. **Astrophysical Journal**, v. 373, p. 369–390, Jun. 1991.
- [13] BINNEY, J.; TREMAINE, S. **Galactic dynamics: Second Edition**: Princeton University Press, 2008.
- [14] BINNEY, JAMES; TREMAINE, SCOTT. **Galactic dynamics**. Princeton, 1987.
- [15] BLAIS-OUELLETTE, SÉBASTIEN; AMRAM, PHILIPPE; CARIGNAN, CLAUDE. Accurate determination of the mass distribution in spiral galaxies. II. Testing the shape of dark halos. **The Astronomical Journal**, v. 121, n. 4, p. 1952–1964, Apr. 2001.
- [16] BLANTON, MICHAEL R.; HOGG, DAVID W.; BAHCALL, NETA A.; BRINKMANN, J.; BRITTON, MALCOLM; CONNOLLY, ANDREW J. ET AL. The galaxy luminosity function and luminosity density at redshift  $z = 0.1$ . **The Astrophysical Journal**, v. 592, n. 2, p. 819–838, Aug. 2003.

- [17] BOGGS, P. T.; ROGERS, J. E. Orthogonal distance regression. **Contemporary Mathematics**, v. 112, p. 183, 1990.
- [18] BOURNAUD, F. Star formation and structure formation in galaxy interactions and mergers. In: GALAXY WARS: STELLAR POPULATIONS AND STAR FORMATION IN INTERACTING GALAXIES, Smith, B.; Higdon, J.; Higdon, S.; Bastian, N., editores, v. 423 of **Astronomical Society of the Pacific Conference Series**, p. 177, Jun. 2010.
- [19] BROEILS, A. H.; COURTEAU, S. Modelling the mass distribution in spiral galaxies. In: DARK AND VISIBLE MATTER IN GALAXIES AND COSMOLOGICAL IMPLICATIONS, Persic, M.; Salucci, P., editores, v. 117 of **Astronomical Society of the Pacific Conference Series**, p. 74, 1997.
- [20] BULLOCK, J. S.; KOLATT, T. S.; SIGAD, Y.; SOMERVILLE, R. S.; KRAVTSOV, A. V.; KLYPIN, A. A.; PRIMACK, J. R.; DEKEL, A. Profiles of dark haloes: evolution, scatter and environment. **Monthly Notices of the Royal Astronomical Society**, v. 321, n. 3, p. 559–575, Mar. 2001.
- [21] BUSHOUSE, H. A. Star-formation rates in the nuclei of violently interacting galaxies. **Astronomical Journal**, v. 91, p. 255–270, Feb. 1986.
- [22] BUTA, R. The morphology of barred galaxies. In: IAU COLLOQ. 157: BARRED GALAXIES, Buta, R.; Crocker, D. A.; Elmegreen, B. G., editores, v. 91 of **Astronomical Society of the Pacific Conference Series**, p. 11, 1996.
- [23] CABRERA-LAVERS, A.; GARZÓN, F. An optical study of a sample of spiral galaxies. **The Astronomical Journal**, v. 127, n. 3, p. 1386–1404, Mar. 2004.
- [24] CARIGNAN, C. Light and mass distribution of the Magellanic-type spiral NGC 3109. **The Astrophysical Journal**, v. 299, p. 59, Dec. 1985.
- [25] CEN, R. Frequent spin reorientation of galaxies due to local interactions. **Astrophysical Journal Letters**, v. 785, p. L15, Apr. 2014.
- [26] CIOTTI, L. Stellar systems following the  $R \propto 1/m$  luminosity law. **Astronomy and Astrophysics**, v. 249, p. 99–106, 1991.



- [27] COLE, SHAUN; LACEY, CEDRIC G.; BAUGH, CARLTON M.; FRENK, CARLOS S. Hierarchical galaxy formation. **Monthly Notices of the Royal Astronomical Society**, v. 319, n. 1, p. 168–204, Apr. 2000.
- [28] DALCANTON, J. J. The metallicity of galaxy disks: infall versus outflow. **Astrophysical Journal**, v. 658, p. 941–959, Apr. 2007.
- [29] DALE, DANIEL A.; GIOVANELLI, RICCARDO; HAYNES, MARTHA P.; HARDY, EDUARDO; CAMPUSANO, LUIS E. Signatures of galaxy-cluster interactions: spiral galaxy rotation curve asymmetry, shape, and extent. **The Astronomical Journal**, v. 121, n. 4, p. 1886–1892, Apr. 2001.
- [30] DAMETTO, N. Z.; RIFFEL, R.; PASTORIZA, M. G.; RODRÍGUEZ-ARDILA, A.; HERNANDEZ-JIMENEZ, J. A.; CARVALHO, E. A. Probing the circum-nuclear stellar populations of starburst galaxies in the near-infrared. **Monthly Notices of the Royal Astronomical Society**, v. 443, p. 1754–1778, Sep. 2014.
- [31] DE JONG, R. S. Near-infrared and optical broadband surface photometry of 86 face-on disk dominated galaxies. III. The statistics of the disk and bulge parameters. **Astronomy and Astrophysics**, v. 313, p. 45–64, Sep. 1996.
- [32] DE VAUCOULEURS, G. Recherches sur les nebuleuses extragalactiques. **Annales d’Astrophysique**, v. 11, p. 247, Jan. 1948.
- [33] DÍAZ, R.; RODRIGUES, I.; DOTTORI, H.; CARRANZA, G. Study of MCLeish’s interacting object. **Astronomical Journal**, v. 119, p. 111–118, Jan. 2000.
- [34] DONZELLI, C. J.; PASTORIZA, M. G. Optical spectroscopic properties of a sample of interacting galaxies. **The Astrophysical Journal Supplement Series**, v. 111, n. 1, p. 181–201, Jul. 1997.
- [35] DUC, P.-A.; BOURNAUD, F.; MASSET, F. A top-down scenario for the formation of massive tidal dwarf galaxies. **Astronomy and Astrophysics**, v. 427, p. 803–814, Dec. 2004.
- [36] DUC, PIERRE-ALAIN; RENAUD, FLORENT. **Tides in astronomy and astrophysics**, v. 861 of **Lecture Notes in Physics**. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2013.

- [37] DUVAL, M. F.; ATHANASSOULA, E. Photometry, kinematics, and dynamics of the barred spiral galaxy NGC 5383. **Astronomy and Astrophysics (ISSN 0004-6361)**, v. 121, p. 297–312, 1983.
- [38] ELLISON, S. L.; MENDEL, J. T.; SCUDDER, J. M.; PATTON, D. R.; PALMER, M. J. D. Galaxy pairs in the Sloan Digital Sky Survey - VII. The merger-luminous infrared galaxy connection. **Monthly Notices of the Royal Astronomical Society**, v. 430, p. 3128–3141, Apr. 2013.
- [39] ELLISON, S. L.; PATTON, D. R.; SIMARD, L.; MCCONNACHIE, A. W. Galaxy pairs in the sloan digital sky survey. I. Star formation, active galactic nucleus fraction, and the mass-metallicity relation. **Astronomical Journal**, v. 135, p. 1877–1899, May 2008.
- [40] ELMEGREEN, B. G.; ELMEGREEN, D. M. Properties of barred spiral galaxies. **Astrophysical Journal**, v. 288, p. 438–455, Jan. 1985.
- [41] ELMEGREEN, BRUCE G.; ELMEGREEN, DEBRA M.; MONTENEGRO, LUIS. Optical tracers of spiral wave resonances in galaxies. II - Hidden three-arm spirals in a sample of 18 galaxies. **The Astrophysical Journal Supplement Series**, v. 79, p. 37, Mar. 1992.
- [42] ELMEGREEN, D. M. **Galaxies and galactic structure**: 1998.
- [43] EMSELLEM, E.; FATHI, K.; WOZNIAK, H.; FERRUIT, P.; MUNDELL, C. G.; SCHINNERER, E. Gas and stellar dynamics in NGC 1068: probing the galactic gravitational potential. **Monthly Notices of the Royal Astronomical Society**, v. 365, p. 367–384, Jan. 2006.
- [44] FABER, S M; GALLAGHER, J S. Masses and mass-to-light ratios of galaxies. **Annual Review of Astronomy and Astrophysics**, v. 17, n. 1, p. 135–187, Sep. 1979.
- [45] FATHI, KAMBIZ. Revisiting the scale length– $\mu_0$  plane and the freeman law in the local universe. **The Astrophysical Journal**, v. 722, n. 1, p. L120–L125, Oct. 2010.
- [46] FATHI, KAMBIZ; ALLEN, MARK; BOCH, THOMAS; HATZIMINAOGLOU, EVANTHIA; PELETIER, REYNIER F. Scalelength of disc galaxies. **Monthly**

**Notices of the Royal Astronomical Society**, v. 406, n. 3, p. no–no, May 2010.

- [47] FERREIRO, D. L.; PASTORIZA, M. G. Sample of minor merger of galaxies: Optical CCD surface photometry and HII region properties. **Astronomy and Astrophysics**, v. 428, p. 837–846, Dec. 2004.
- [48] FERREIRO, D. L.; PASTORIZA, M. G.; RICKES, M. Sample of minor merger of galaxies. II. Modelling HII region properties. **Astronomy and Astrophysics**, v. 481, p. 645–649, Apr. 2008.
- [49] FISHER, D. B.; DRORY, N. The Structure of classical bulges and pseudobulges: the link between pseudobulges and SÉRSIC index. **Astronomical Journal**, v. 136, p. 773–839, Aug. 2008.
- [50] FISHER, DAVID B.; DRORY, NIV. Bulges of nearby galaxies with Spitzer : scaling relations in pseudo-bulges and classical bulges. **The Astrophysical Journal**, v. 716, n. 2, p. 942–969, Jun. 2010.
- [51] FREEDMAN WOODS, D.; GELLER, M. J.; KURTZ, M. J.; WESTRA, E.; FABRICANT, D. G.; DELL’ANTONIO, I. Triggered star formation in galaxy pairs at  $z = 0.08-0.38$ . **Astronomical Journal**, v. 139, p. 1857–1870, May 2010.
- [52] FREEMAN, K. C. Structure and evolution of barred spiral galaxies, I. **Monthly Notices of the Royal Astronomical Society**, v. 133, p. 47–62, 1966.
- [53] FREEMAN, K. C. On the disks of spiral and so galaxies. **The Astrophysical Journal**, v. 160, p. 811, Jun. 1970.
- [54] FUENTES-CARRERA, I.; ROSADO, M.; AMRAM, P.; DULTZIN-HACYAN, D.; CRUZ-GONZÁLEZ, I.; SALO, H.; LAURIKAINEN, E.; BERNAL, A.; AMBROCIO-CRUZ, P.; LE COARER, E. The isolated interacting galaxy pair NGC 5426/27 (Arp 271). **Astronomy and Astrophysics**, v. 415, p. 451, Feb. 2004.
- [55] FUENTES-CARRERA, I.; ROSADO, M.; AMRAM, P.; SALO, H.; LAURIKAINEN, E. Kinematics and dynamics of the M 51-type galaxy pair NGC

- 3893/96 (KPG 302). **Astronomy and Astrophysics**, v. 466, p. 847–854, May 2007.
- [56] FUKUGITA, M.; ICHIKAWA, T.; GUNN, J. E.; DOI, M.; SHIMASAKU, K.; SCHNEIDER, D. P. The Sloan Digital Sky Survey photometric system. **The Astronomical Journal**, v. 111, p. 1748, Apr. 1996.
- [57] GADOTTI, D. A. Image decomposition of barred galaxies and AGN hosts. **Monthly Notices of the Royal Astronomical Society**, v. 384, p. 420–439, Feb. 2008.
- [58] GADOTTI, DIMITRI A. Structural properties of pseudo-bulges, classical bulges and elliptical galaxies: a Sloan Digital Sky Survey perspective. **Monthly Notices of the Royal Astronomical Society**, v. 393, n. 4, p. 1531–1552, Mar. 2009.
- [59] GALLAGHER, S. C.; CHARLTON, J. C.; HUNSBERGER, S. D.; ZARITSKY, D.; WHITMORE, B. C. Hubble space telescope images of Stephan’s quintet: star cluster formation in a compact group environment. **Astronomical Journal**, v. 122, p. 163–181, Jul. 2001.
- [60] GARCÍA-BARRETO, J. A.; CARRILLO, R.; VERA-VILLAMIZAR, N. Companions of bright barred Shapley-Ames galaxies. **Astronomical Journal**, v. 126, p. 1707–1719, Oct. 2003.
- [61] GARCÍA-BARRETO, J. A.; ROSADO, M. Fabry-Pérot H $\alpha$  observations of the barred spiral NGC 3367. **Astronomical Journal**, v. 121, p. 2540–2548, May 2001.
- [62] GELLER, M. J.; KENYON, S. J.; BARTON, E. J.; JARRETT, T. H.; KEWLEY, L. J. Infrared properties of close pairs of galaxies. **Astronomical Journal**, v. 132, p. 2243–2259, Dec. 2006.
- [63] GRAHAM, A. W.; DE BLOK, W. J. G. A morphological type dependence in the  $\mu_0$ -log h plane of spiral galaxy disks. **Astrophysical Journal**, v. 556, p. 177–180, Jul. 2001.
- [64] GRAHAM, A. W.; WORLEY, C. C. Inclination- and dust-corrected galaxy parameters: bulge-to-disc ratios and size-luminosity relations. **Monthly Notices of the Royal Astronomical Society**, v. 388, p. 1708–1728, Aug. 2008.

- [65] GROSBOL, P. J. Morphology of spiral galaxies. I - General properties. **Astronomy and Astrophysics Supplement Series**, v. 60, p. 261–276, May 1985.
- [66] GUEDES, JAVIERA; CALLEGARI, SIMONE; MADAU, PIERO; MAYER, LUCIO. Forming realistic late-type spirals in a  $\Lambda$ CDM universe: the ERIS simulation. **The Astrophysical Journal**, v. 742, n. 2, p. 76, Dec. 2011.
- [67] HERNANDEZ-JIMENEZ, J. A.; PASTORIZA, M. G.; BONATTO, C.; RODRIGUES, I.; KRABBE, A. C.; WINGE, C. Photometry and Dynamics of the Minor Mergers AM1228-260 and AM2058-381. **Submitted to Monthly Notices of the Royal Astronomical Society**, Nov. 2014.
- [68] HERNANDEZ-JIMENEZ, J. A.; PASTORIZA, M. G.; RODRIGUES, I.; KRABBE, A. C.; WINGE, C.; BONATTO, C. Photometry and dynamics of the minor merger AM 1219-430 with Gemini GMOS-S. **Monthly Notices of the Royal Astronomical Society**, v. 435, p. 3342–3352, Nov. 2013.
- [69] HERNÁNDEZ-TOLEDO, H. M.; FUENTES-CARRERA, I.; ROSADO, M.; CRUZ-GONZÁLEZ, I.; FRANCO-BALDERAS, A.; DULTZIN-HACYAN, D. NGC 5953/54: BVRIH $\alpha$ JK photometry and [N II] Fabry-Perot interferometry. I. The data. **Astronomy and Astrophysics**, v. 412, p. 669–687, Dec. 2003.
- [70] HERNQUIST, L. An analytical model for spherical galaxies and bulges. **Astrophysical Journal**, v. 356, p. 359–364, Jun. 1990.
- [71] HERNQUIST, L. N-body realizations of compound galaxies. **Astrophysical Journal Supplement Series**, v. 86, p. 389–400, Jun. 1993.
- [72] HERNQUIST, LARS; MIHOS, J. CHRISTOPHER. Excitation of activity in galaxies by minor mergers. **The Astrophysical Journal**, v. 448, p. 41, Jul. 1995.
- [73] HIBBARD, J. E.; VAN DER HULST, J. M.; BARNES, J. E.; RICH, R. M. High-resolution H I mapping of NGC 4038/39 (“The Antennae”) and its tidal dwarf galaxy candidates. **Astronomical Journal**, v. 122, p. 2969–2992, Dec. 2001.
- [74] HOLTZMAN, J. A.; FABER, S. M.; SHAYA, E. J.; LAUER, T. R.; GROTH, J.; HUNTER, D. A.; BAUM, W. A.; EWALD, S. P.; HESTER, J. J.; LIGHT,

- R. M.; LYNDS, C. R.; O'NEIL, E. J., JR.; WESTPHAL, J. A. Planetary Camera observations of NGC 1275 - Discovery of a central population of compact massive blue star clusters. **Astronomical Journal**, v. 103, p. 691–702, Mar. 1992.
- [75] HUMMEL, E. The radio continuum radiation of spiral galaxies in multiple systems. **Astronomy and Astrophysics**, v. 96, p. 111–119, Mar. 1981.
- [76] JEDRZEJEWSKI, R. I. CCD surface photometry of elliptical galaxies. I - Observations, reduction and results. **Monthly Notices of the Royal Astronomical Society (ISSN 0035-8711)**, v. 226, p. 747–768, 1987.
- [77] JOSEPH, R. D.; WRIGHT, G. S. Recent star formation in interacting galaxies. II - Super starburst in merging galaxies. **Monthly Notices of the Royal Astronomical Society**, v. 214, p. 87–95, May 1985.
- [78] KAUFMAN, M.; GRUPE, D.; ELMEGREEN, B. G.; ELMEGREEN, D. M.; STRUCK, C.; BRINKS, E. NGC 2207/IC 2163: A grazing encounter with large-scale shocks. **Astronomical Journal**, v. 144, p. 156, Nov. 2012.
- [79] KEEL, WILLIAM C. Rotation curves and velocity measures for spiral galaxies in pairs. **The Astrophysical Journal Supplement Series**, v. 106, p. 27, Sep. 1996.
- [80] KENNICUTT, R. C., JR.; KEEL, W. C. Induced nuclear emission-line activity in interacting spiral galaxies. **Astrophysical Journal Letters**, v. 279, p. L5–L9, Apr. 1984.
- [81] KENNICUTT, R. C., JR.; ROETTIGER, K. A.; KEEL, W. C.; HULST, J. M. VAN DER ; HUMMEL, E. The effects of interactions on spiral galaxies. II - Disk star-formation rates. **Astronomical Journal**, v. 93, p. 1011–1023, May 1987.
- [82] KENT, STEPHEN M. Dark matter in spiral galaxies. II - Galaxies with H I rotation curves. **The Astronomical Journal**, v. 93, p. 816, Apr. 1987.
- [83] KEWLEY, L. J.; HEISLER, C. A.; DOPITA, M. A.; LUMSDEN, S. Optical classification of southern warm infrared galaxies. **The Astrophysical Journal Supplement Series**, v. 132, n. 1, p. 37–71, Jan. 2001.

- [84] KEWLEY, L. J.; RUPKE, D.; ZAHID, H. J.; GELLER, M. J.; BARTON, E. J. Metallicity gradients and gas flows in galaxy pairs. **Astrophysical Journal Letters**, v. 721, p. L48–L52, Sep. 2010.
- [85] KORMENDY, J. **Secular Evolution in Disk Galaxies**, p. 1. Oct. 2013.
- [86] KORMENDY, JOHN; KENNICUTT, ROBERT C. Secular evolution and the formation of pseudo-bulges in disk galaxies. **Annual Review of Astronomy and Astrophysics**, v. 42, n. 1, p. 603–683, Sep. 2004.
- [87] KRABBE, A. C.; PASTORIZA, M. G.; WINGE, CLÁUDIA; RODRIGUES, I.; DORS, O. L.; FERREIRO, D. L. The effects of the interactions on the kinematics, stellar population and metallicity of AM 2322–821 with Gemini/GMOS. **Monthly Notices of the Royal Astronomical Society**, v. 416, n. 1, p. no–no, Jul. 2011.
- [88] KRABBE, A. C.; PASTORIZA, M. G.; WINGE, CLÁUDIA; RODRIGUES, I.; FERREIRO, D. L. Kinematics and physical properties of southern interacting galaxies: the minor merger AM 2306-721. **Monthly Notices of the Royal Astronomical Society**, v. 389, n. 4, p. 1593–1604, Oct. 2008.
- [89] KRABBE, A. C.; ROSA, D. A.; DORS, O. L.; PASTORIZA, M. G.; WINGE, C.; HÄGELE, G. F.; CARDACI, M. V.; RODRIGUES, I. Interaction effects on galaxy pairs with Gemini/GMOS- I: Electron density. **Monthly Notices of the Royal Astronomical Society**, v. 437, p. 1155–1170, Jan. 2014.
- [90] KRONBERGER, T.; KAPFERER, W.; SCHINDLER, S.; BÖHM, A.; KUTDEMIR, E.; ZIEGLER, B. L. Internal kinematics of modelled interacting disc galaxies. **Astronomy and Astrophysics**, v. 458, n. 1, p. 69–78, Oct. 2006.
- [91] KUZIO DE NARAY, R.; MCGAUGH, S. S.; DE BLOK, W. J. G. Mass models for low surface brightness galaxies with high-resolution optical velocity fields. **Astrophysical Journal**, v. 676, p. 920–943, Apr. 2008.
- [92] LAMBAS, D. G.; ALONSO, S.; MESA, V.; O’MILL, A. L. Galaxy interactions. I. Major and minor mergers. **Astronomy and Astrophysics**, v. 539, p. A45, Mar. 2012.
- [93] LARSON, R. B.; TINSLEY, B. M. Star formation rates in normal and peculiar galaxies. **Astrophysical Journal**, v. 219, p. 46–59, Jan. 1978.

- [94] LAURIKAINEN, E.; SALO, H. BVRI imaging of M51-type interacting galaxy pairs - III. Analysis of the photometric parameters. **Monthly Notices of the Royal Astronomical Society**, v. 324, p. 685–698, Jun. 2001.
- [95] LEE, JOON HYEOP; KIM, SANG CHUL; REE, CHANG HEE; KIM, MINJIN; JEONG, HYUNJIN; LEE, JONG CHUL; KYEONG, JAEMANN. Hubble Space Telescope pixel analysis of the interacting S0 galaxy NGC5195 (M51B). **The Astrophysical Journal**, v. 754, n. 2, p. 80, Aug. 2012.
- [96] LIN, L.-H.; WANG, H.-H.; HSIEH, P.-Y.; TAAM, R. E.; YANG, C.-C.; YEN, D. C. C. Hydrodynamical simulations of the barred spiral galaxy NGC 1097. **Astrophysical Journal**, v. 771, p. 8, Jul. 2013.
- [97] LUCY, L. B. An iterative technique for the rectification of observed distributions. **The Astronomical Journal**, v. 79, p. 745, Jun. 1974.
- [98] MÁRQUEZ, I.; MASEGOSA, J.; MOLES, M.; VARELA, J.; BETTONI, D.; GALLETTA, G. Rotation curves and metallicity gradients from HII regions in spiral galaxies. **Astronomy and Astrophysics**, v. 393, p. 389–407, Oct. 2002.
- [99] MENDES DE OLIVEIRA, C.; AMRAM, P.; PLANA, H.; BALKOWSKI, C. Dynamical effects of interactions and the Tully-Fisher relation for Hickson compact groups. **The Astronomical Journal**, v. 126, n. 6, p. 2635–2643, Dec. 2003.
- [100] MEZCUA, M.; LOBANOV, A. P.; MEDIAVILLA, E.; KAROUZOS, M. Photometric decomposition of mergers in disk galaxies. **Astrophysical Journal**, v. 784, p. 16, Mar. 2014.
- [101] MIHOS, J. C.; HERNQUIST, L. Triggering of starbursts in galaxies by minor mergers. **Astrophysical Journal Letters**, v. 425, p. L13–L16, Apr. 1994.
- [102] MIHOS, J. C.; HERNQUIST, L. Gasdynamics and starbursts in major mergers. **Astrophysical Journal**, v. 464, p. 641, Jun. 1996.
- [103] MIHOS, J. CHRISTOPHER; BOTHUN, GREGORY D. NGC 2442: Tidal encounters and the evolution of spiral galaxies. **The Astrophysical Journal**, v. 481, n. 2, p. 741–751, Jun. 1997.



- [104] MIRABEL, I. F.; DOTTORI, H.; LUTZ, D. Genesis of a dwarf galaxy from the debris of the Antennae. **Astronomy and Astrophysics**, v. 256, p. L19–L22, Mar. 1992.
- [105] MONET, DAVID G.; LEVINE, STEPHEN E.; CANZIAN, BLAISE; ABLES, HAROLD D.; BIRD, ALAN R.; DAHN, CONARD C.; GUETTER, HARRY H. ET AL. The USNO-B catalog. **The Astronomical Journal**, v. 125, n. 2, p. 984–993, Feb. 2003.
- [106] NAVARRO, JULIO F.; FRENK, CARLOS S.; WHITE, SIMON D. M. The assembly of galaxies in a hierarchically clustering universe. **Monthly Notices of the Royal Astronomical Society**, v. 275, n. 1, p. 56–66, 1995.
- [107] NAVARRO, JULIO F.; FRENK, CARLOS S.; WHITE, SIMON D. M. The Structure of cold dark matter halos. **The Astrophysical Journal**, v. 462, p. 563, May 1996.
- [108] NAVARRO, JULIO F.; FRENK, CARLOS S.; WHITE, SIMON D. M. A universal density profile from hierarchical clustering. **The Astrophysical Journal**, v. 490, n. 2, p. 493–508, Dec. 1997.
- [109] PALUNAS, P.; WILLIAMS, T. B. Maximum disk mass models for spiral galaxies. **Astronomical Journal**, v. 120, p. 2884–2903, Dec. 2000.
- [110] PASTORIZA, M. G.; DONZELLI, C. J.; BONATTO, C. Nuclear activity and stellar population of a sample of interacting galaxies. **Astronomy and Astrophysics**, 1999.
- [111] PEDROSA, S.; TISSERA, P. B.; FUENTES-CARRERA, I.; MENDES DE OLIVEIRA, C. Rotation curve bifurcations as indicators of close recent galaxy encounters. **Astronomy and Astrophysics**, v. 484, n. 2, p. 299–302, Jun. 2008.
- [112] PEREZ, J.; MICHEL-DANSAC, L.; TISSERA, P. B. Chemical evolution during gas-rich galaxy interactions. **Monthly Notices of the Royal Astronomical Society**, v. 417, p. 580–590, Oct. 2011.
- [113] PETERSON, C. J.; HUNTLEY, J. M. Observations of the kinematics of barred spiral galaxies. I - NGC 1300. **Astrophysical Journal**, v. 242, p. 913–930, Dec. 1980.

- [114] POGGE, RICHARD W.; MARTINI, PAUL. Hubble Space Telescope imaging of the circumnuclear environments of the CfA Seyfert Galaxies: nuclear spirals and fueling. **The Astrophysical Journal**, v. 569, n. 2, p. 624–640, Apr. 2002.
- [115] PRESOTTO, V.; IOVINO, A.; POMPEI, E.; TEMPORIN, S. SCG0018-4854: a young and dynamic compact group. **Astronomy and Astrophysics**, v. 510, p. A31, Feb. 2010.
- [116] PRIETO, M.; AGUERRI, J. A. L.; VARELA, A. M.; TUÑÓN, C. MUÑOZ . Optical surface photometry of a sample of disk galaxies. **Astronomy and Astrophysics**, v. 367, n. 2, p. 405–427, Feb. 2001.
- [117] QUINN, P. J.; HERNQUIST, L.; FULLAGAR, D. P. Heating of galactic disks by mergers. **Astrophysical Journal**, v. 403, p. 74–93, Jan. 1993.
- [118] REPETTO, P.; MARTÍNEZ-GARCÍA, E. E.; ROSADO, M.; GABBASOV, R. Disk mass-to-light ratio distribution from stellar population synthesis: application to rotation curve decomposition of NGC 5278 (KPG 390 A). **Astrophysical Journal**, v. 765, p. 7, Mar. 2013.
- [119] REPETTO, P.; ROSADO, M.; GABBASOV, R.; FUENTES-CARRERA, I. The interacting galaxy pair KPG 390: H $\alpha$  kinematics. **Astronomical Journal**, v. 139, p. 1600–1613, Apr. 2010.
- [120] RICHARDSON, WILLIAM HADLEY. Bayesian-based iterative method of image restoration. **Journal of the Optical Society of America**, v. 62, n. 1, 1972.
- [121] ROBOTHAM, A. S. G.; BALDRY, I. K.; BLAND-HAWTHORN, J.; DRIVER, S. P.; LOVEDAY, J.; NORBERG, P.; BAUER, A. E.; BEKKI, K.; BROUGH, S.; BROWN, M.; GRAHAM, A.; HOPKINS, A. M.; PHILLIPPS, S.; POWER, C.; SANSOM, A.; STAVELEY-SMITH, L. Galaxy and mass assembly (GAMA): in search of Milky Way Magellanic Cloud analogues. **Monthly Notices of the Royal Astronomical Society**, v. 424, p. 1448–1453, Aug. 2012.
- [122] RODRIGUES, I.; DOTTORI, H.; BRINKS, E.; MIRABEL, I. F. Study of the interacting system NGC 6845. **Astronomical Journal**, v. 117, p. 2695–2708, Jun. 1999.

- [123] RODRIGUES, IRAPUAN. **Interações de sistemas estelares**. 1999. Tese de Doutorado – Universidade Federal do Rio Grande do Sul.
- [124] ROSA, D. A.; DORS, O. L.; KRABBE, A. C.; HÄGELE, G. F.; CARDACI, M. V.; PASTORIZA, M. G.; RODRIGUES, I.; WINGE, C. Interaction effects on galaxy pairs with Gemini/GMOS - II: oxygen abundance gradients. **Monthly Notices of the Royal Astronomical Society**, v. 444, p. 2005–2021, Nov. 2014.
- [125] RUBIN, V. C.; WATERMAN, A. H.; KENNEY, J. D. P. Kinematic disturbances in rotation curves among 89 Virgo galaxies. **American Astronomical Society**, v. 31, 1999.
- [126] RUBIN, VERA C.; HUNTER, DEIDRE A.; FORD, W. KENT. Optical properties and dynamics of galaxies in the Hickson compact groups. **The Astrophysical Journal Supplement Series**, v. 76, p. 153, May 1991.
- [127] SALO, H.; LAURIKAINEN, E. N-body model for M51 - I. Multiple encounter versus single passage? **Monthly Notices of the Royal Astronomical Society**, v. 319, p. 377–392, Dec. 2000.
- [128] SALO, HEIKKI; LAURIKAINEN, EIJA. The interacting system NGC 7753-7752 (Arp 86). II - N-body modeling. **The Astrophysical Journal**, v. 410, p. 586, Jun. 1993.
- [129] SCANNAPIECO, C.; TISSERA, P. B. The effects of mergers on the formation of disc-bulge systems in hierarchical clustering scenarios. **Monthly Notices of the Royal Astronomical Society**, v. 338, p. 880–890, Feb. 2003.
- [130] SCHLAFLY, EDWARD F.; FINKBEINER, DOUGLAS P. Measuring reddening with Sloan Digital Sky Survey Stellar Spectra and recalibrating SFD. **The Astrophysical Journal**, v. 737, n. 2, p. 103, Aug. 2011.
- [131] SCHWARZKOPF, U.; DETTMAR, R.-J. The influence of interactions and minor mergers on the structure of galactic disks I. Observations and disk models. **Astronomy and Astrophysics Supplement Series**, v. 144, p. 85–121, May 2000.
- [132] SCHWEIZER, F. On the rotation and relative mass of NGC 5195, the 'companion of M51'. **Astrophysical Journal**, v. 211, p. 324–328, Jan. 1977.

- [133] SEKIGUCHI, K.; WOLSTENCROFT, R. D. Spectroscopic observations of Arp-Madore interacting galaxies. I - Pairs of comparably sized galaxies. **Monthly Notices of the Royal Astronomical Society**, v. 255, p. 581–593, Apr. 1992.
- [134] SIMONNEAU, E.; PRADA, F. Structural properties of spherical galaxies: a semi-analytical approach. **Revista Mexicana de Astronomía y Astrofísica Vol. 40**, v. 40, p. 69–79, 2004.
- [135] SNYDER, D. L.; HAMMOUD, A. M.; WHITE, R. L. Image recovery from data acquired with a charge-coupled-device camera. **Journal of the Optical Society of America A**, v. 10, p. 1014–1023, May 1993.
- [136] SPERGEL, D. N.; BEAN, R.; DORE, O.; NOLTA, M. R.; BENNETT, C. L.; DUNKLEY, J.; HINSHAW, G.; JAROSIK, N.; KOMATSU, E.; PAGE, L.; PEIRIS, H. V.; VERDE, L.; HALPERN, M.; HILL, R. S.; KOGUT, A.; LIMON, M.; MEYER, S. S.; ODEGARD, N.; TUCKER, G. S.; WEILAND, J. L.; WOLLACK, E.; WRIGHT, E. L. Three year Wilkinson Microwave Anisotropy Probe (WMAP) observations: implications for cosmology. **The Astrophysical Journal Supplement Series**, v. 170, n. 2, p. 377–408, Jun. 2007.
- [137] SPRINGEL, V. The cosmological simulation code GADGET-2. **Monthly Notices of the Royal Astronomical Society**, v. 364, n. 4, p. 1105–1134, Dec. 2005.
- [138] STRUCK, C. **Astrophysics update 2**, Springer Praxis Books: Springer Berlin Heidelberg, 2006.
- [139] SÉRSIC, JOSE LUIS. Atlas de galaxias australes. **Cordoba**, 1968.
- [140] TAMM, A.; TEMPEL, E.; TENJES, P.; TIHHONOVA, O.; TUVIKENE, T. Stellar mass map and dark matter distribution in M31. **Astronomy & Astrophysics**, v. 546, p. A4, Sep. 2012.
- [141] THEIS, CH.; KOHLE, S. Multi-method-modeling of interacting galaxies. **Astronomy and Astrophysics**, v. 370, n. 2, p. 365–383, May 2001.
- [142] TOOMRE, A. On the distribution of matter within highly flattened galaxies. **The Astrophysical Journal**, v. 138, p. 385, Aug. 1963.

- [143] TOOMRE, A.; TOOMRE, J. Galactic bridges and tails. **The Astrophysical Journal**, v. 178, p. 623–666, Dec. 1972.
- [144] ALBADA, T. S.VAN ; BAHCALL, J. N.; BEGEMAN, K.; SANCISI, R. Distribution of dark matter in the spiral galaxy NGC 3198. **The Astrophysical Journal**, v. 295, p. 305, Aug. 1985.
- [145] VAN DEN BROEK, A. C.; VAN DRIEL, W.; DE JONG, T.; GOUDFROOIJ, P.; LUB, J.; DE GRIJP, M. H. K. A study of southern extreme IRAS galaxies. I - Optical observations. **Astronomy and Astrophysics Supplement Series**, v. 91, p. 61–128, Nov. 1991.
- [146] VORONTSOV-VELYAMINOV, B. A. Atlas and catalog of interacting galaxies. 1959, Sternberg Institute, Moscow State University. **Atlas and catalog of interacting galaxies (1959)**, 1959.
- [147] WECHSLER, RISA H.; BULLOCK, JAMES S.; PRIMACK, JOEL R.; KRAVTSOV, ANDREY V.; DEKEL, AVISHAI. Concentrations of dark halos from their assembly histories. **The Astrophysical Journal**, v. 568, n. 1, p. 52–70, Mar. 2002.
- [148] WEILBACHER, P. M.; DUC, P.-A.; FRITZE-V. ALVENSLEBEN, U. Tidal dwarf candidates in a sample of interacting galaxies. II. Properties and kinematics of the ionized gas. **Astronomy and Astrophysics**, v. 397, p. 545–555, Jan. 2003.
- [149] WEINZIRL, T.; JOGEE, S.; KHOCHFAR, S.; BURKERT, A.; KORMENDY, J. Bulge n and B/T in high-mass galaxies: constraints on the origin of bulges in hierarchical models. **Astrophysical Journal**, v. 696, p. 411–447, May 2009.
- [150] WHITMORE, B. C.; ZHANG, Q.; LEITHERER, C.; FALL, S. M.; SCHWEIZER, F.; MILLER, B. W. The luminosity function of young star clusters in “the Antennae” galaxies (NGC 4038-4039). **Astronomical Journal**, v. 118, p. 1551–1576, Oct. 1999.
- [151] WINGE, C. ET AL. Identifying star formation and nuclear activity in interacting galaxies. **In preparation to be submitted to Monthly Notices of the Royal Astronomical Society**, 2015.

- [152] WOODS, D. F.; GELLER, M. J. Minor galaxy interactions: star formation rates and galaxy properties. **Astronomical Journal**, v. 134, p. 527–540, Aug. 2007.

## Artigos referente a este trabalho

“Photometry and Dynamics of the Minor Merger AM 1219-430 with Gemini GMOS-S” Publicado em: Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 2013, Vol. 435, pag. 3342. Este artigo está disponível gratuitamente no reservatório de artigos *arXiv.org* (<http://arxiv.org/abs/1309.5989>)

“Photometry and Dynamics of the Minor Mergers AM1228-260 and AM2058-381” Submetido em: Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 2014, Nov 14.

## Artigo em colaboração

“Probing the Spacial Distribution of the Near-infrared Stellar Population in Starburst Galaxies” Publicado em: Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 2014, Vol. 443, pag. 1754. Este artigo está disponível gratuitamente no reservatório de artigos *arXiv.org* (<http://arxiv.org/abs/1406.6345>)