

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL  
INSTITUTO DE FÍSICA

---

**Caracterização das Estruturas Espirais em  
Galáxias Discoidais Grand Design \***

Antonio José Farias Nóbrega

---

Tese realizada sob orientação do Professor Dr.  
Horacio Alberto Dottori e apresentada ao Ins-  
tituto de Física da UFRGS em preenchimento  
parcial dos requisitos para a obtenção do tí-  
tulo de Doutor em Ciências.

Porto Alegre

Novembro, 2007

---

\*Trabalho parcialmente financiado pela Universidade Comunitária Regional de Chapecó (UNO-CHAPECÓ/Santa Catarina)

# Resumo

Neste trabalho analisamos imagens nas cores  $g$  (ou  $r$ ) e  $i$  de 18 galáxias *grand design*, obtidas com telescópios no Monte Palomar, USA e nas ilhas Canárias, Espanha. As bandas espectrais das imagens das galáxias foram escolhidas porque na banda  $i$  se destaca o padrão espiral ou perturbação original do disco, enquanto que a banda  $g$  está dominada pela emissão dos aglomerados ionizantes e as estrelas jovens, formados pela ação do padrão perturbador.

Caracterizamos as estruturas espirais através de métodos objetivos com fundamentação matemática. O primeiro é o de transformada de Fourier bi-dimensional com uma base de espirais logarítmicas, o segundo o método de simetrização de Elmegreen, Elmegreen e Montenegro (1992) (doravante EEM92) e finalmente a transformada de Fourier unidimensional de perfis azimutais dos braços espirais. A posição da ressonância de corotação é determinada, entre outras propriedades. Optamos preferencialmente por galáxias vistas de frente (*face-on*) ou com pequeno ângulo de inclinação em relação ao plano do céu para minimizar o efeito da deprojeção e porque a metodologia não contempla o uso de dados cinemáticos. Além da posição da ressonância de corotação, as transformadas de Fourier bi-dimensionais e o método de simetrização EEM92 fornecem outras informações, tais como a presença de diversos padrões, a extensão e importância relativa dos mesmos, etc. Por serem as galáxias da amostra vistas de frente, praticamente não existem curvas de rotação para as mesmas. Esta é uma tarefa de extrema dificuldade, que deveria ser atacada para aquelas galáxias que apresentam alguma possibilidade de serem estudadas cinematicamente.

Devido ao grande número de figuras necessárias à análise de cada galáxia, apresentamos as figuras impressas somente para cinco casos que consideramos paradigmáticos. As outras treze galáxias são apresentadas como apêndice no CD em anexo.

# Abstract

In this work we analyze  $g$  and  $i$  images of 18 grand design galaxies, obtained with telescopes in Monte Palomar, at the USA and at the Canary islands, Spain. These photometric bands were chosen because the  $i$  band dettachs the spiral pattern density wave or original disk perturbation, while the  $g$  band is dominated by the emission of the ionizing clusters and young stars, formed by the action of this perturbation on the molecular clouds.

We characterized the spiral structures through objective mathematical methods. The first one is that of bi-dimensional Fourier transform with a base of logarithmic spirals, the second one is the method of simetrization of Elmegreen, Elmegreen and Montenegro (1992, from now on EEM92) and finally, the third one is that of one-dimensional Fourier transform of the spiral arms azimuthal profiles. We preferentially treated face-on galaxies or galaxies with small inclination angle in relation to the plan of the sky to minimize the effect of deprojection and because the methodology does not use kinematic data. Besides the position of the corotation resonance, we can discriminate the presence of several spiral patterns, when present, the intensity, extension and relative importance of these patterns. There are no rotation curves for the galaxies of the sample. It would be be an important contribution to determine rotation curves for the galaxies that present some inclination.

Due to the large number of illustrations for each galaxy, we illustrate five paradigmatic cases, and the other thirteen galaxies are shown as appendices in an attached CD.

# Agradecimentos

Há muitas pessoas que estão em meu pensamento e em meu coração que de uma forma ou de outro colobararam conosco nessa caminhada. Apesar de muitas delas não estarem aqui mencionadas, elas continuarão fazendo parte do resto de nossa caminhada...

- Em primeiro lugar, ao Dr. Horacio A. Dottori pela sua orientação, incentivos, paciência e dedicação ao longo desses anos. Muito lhe agradecemos.
- A Universidade Federal do Rio Grande do Sul e a Fundação Universidade do Desenvolvimento do Oeste de Santa Catarina, em nome de seus dirigentes, para a realização deste trabalho. A Coordenadora Márcia Barbosa do IF pelo seu especial apoio.
- Aos Drs. Reinaldo Ramos de Carvalho e Rubén Diaz pela aquisição de imagens que tornaram possível a realização deste trabalho. Ao Drs. Ivanio Puerari e Nelson Vera-Villamizar na utilização dos códigos usados neste trabalho. Ao Dr. Nelson, em especial, pela suas contribuições relevantes e sugestões a este trabalho.
- Aos professores, colaboradores, ex-colaboradores e colegas do Departamento de Astronomia, pela importante troca de informações e amizade nestes anos, e que de alguma forma nos apoiaram nessa jornada: Ângelo Fausti, Antonio Endler, Basilio Santiago, Charles Bonatto, Eduardo Bica, Eduardo Lutz, Fatima Saraiva, Fausto Kuhn, Irapuan Rodrigues, José Eduardo Costa, Kepler Oliveira, Mauro Rickes, Miriani Pastoriza, Rogemar Riffel e Rogério Riffel.
- Aos colegas e amigos da Unochapecó que, por várias vezes, ao longo desses anos, se esforçaram e nos apoiaram de diferentes formas: Alex Murillo, Claudio Jacoski, Neila Rupolo, Paulo Innocente, Plínio Seidler e Radamés Pereira.
- A minha esposa Lourdes, e aos meus filhos Igor, Heloiza, Alice e Bárbara. Com certeza, o amor e paciência de cada um deles, tornou possível a realização deste trabalho. Aos meus irmãos David, Débora e Thiago. A minha sogra Benta. Os amarei sempre.
- Em memória eterna dos entes queridos: Natanael Nóbrega, Longino Prim, Antonio P. Farias e Débora Nóbrega.

# Sumário

<b>Sumário</b> . . . . .	<b>iv</b>
<b>Lista de Figuras</b> . . . . .	<b>vii</b>
<b>1 Introdução</b> . . . . .	<b>1</b>
<b>2 Métodos de análise</b> . . . . .	<b>12</b>
2.1 Métodos de Análise . . . . .	12
2.1.1 Teoria de Ondas de Densidade de Lin e Shu . . . . .	12
2.1.2 Transformada de Fourier unidimensional . . . . .	14
2.1.3 Diagramas de Fase e de Diferença de Fase . . . . .	15
2.1.4 Transformada de Fourier bidimensional . . . . .	16
2.1.5 Método de Elmegreen de simetrização de imagens . . . . .	20
2.2 Tratamento das Imagens . . . . .	21
2.2.1 Redimensionamento das imagens . . . . .	21
2.2.2 Subtração de raios cósmicos . . . . .	22
2.2.3 Subtração das estrelas de campo . . . . .	22
2.2.4 Deprojeção das imagens . . . . .	23
2.2.5 Contraste das estruturas espirais . . . . .	23
2.3 A estrutura espiral extensiva . . . . .	24
2.3.1 <i>Pitch Angle</i> . . . . .	25
2.3.2 Caráter <i>leading</i> e <i>trailing</i> . . . . .	27
2.3.3 Frequência epicíclica e Ressonâncias de Lindblad . . . . .	27
2.3.4 O Método de Canzian . . . . .	28
2.4 Amostra de galáxias espirais Gran-Design . . . . .	32
<b>3 Análise de IC2421</b> . . . . .	<b>37</b>
<b>4 Análise de NGC0622</b> . . . . .	<b>49</b>
<b>5 Análise de NGC7479</b> . . . . .	<b>59</b>

<b>6</b>	<b>Análise de NGC7678</b>	<b>69</b>
<b>7</b>	<b>Análise de NGC7753</b>	<b>80</b>
<b>8</b>	<b>Conclusões</b>	<b>91</b>
8.1	Estrutura dos braços espirais	94
8.1.1	Análise do número de componentes	94
8.1.2	Caracterização da função de densidade ( $m = 2$ )	94
8.1.3	Espectros de frequência mais relevantes	95
8.2	Discussão do diagrama $\log(R) \times \theta$	95
8.3	Discussão das ressonâncias de corrotação	95
8.3.1	Ressonâncias detectadas	95
8.3.2	Ressonâncias de corrotação em galáxias barradas	96
8.4	Probabilidade de ocorrência das CR's para $m = 2$	96
8.4.1	Posição das CR's nas estruturas espirais	96
8.4.2	Comparação com os parâmetros de Canzian	97
8.4.3	Posição média relativa das CR's	97
8.5	Perspectivas	97
	<b>Referências Bibliográficas</b>	<b>99</b>
	<b>Apêndice A Scripts</b>	<b>103</b>
A.1	Alinhamento de imagens de NGC7479	103
A.2	Obtendo as imagens nos filtros $g$ e $i$ para IC0167	104
A.3	Criando estrutura de diretórios para NGC0622	106
A.4	Escrevendo dimensão das imagens em seus arquivos textos: cata.sh	108
A.5	Script utilizado nas rotações EEM92 para galáxia NGC1073	109
	<b>Apêndice B Análise das 13 Galáxias Adicionais da Amostra</b>	<b>113</b>
B.1	Análise IC0167	114
B.2	Análise IC0267	114
B.3	Análise thesis-n0019	114
B.4	Análise thesis-n0036	114
B.5	Análise thesis-n0047	114
B.6	Análise thesis-n0060	114
B.7	Análise thesis-n0070	114
B.8	Análise thesis-n0753	114
B.9	Análise thesis-n0772	114
B.10	Análise thesis-n1073	114
B.11	Análise thesis-n2336	114

B.12 Análise thesis-n6951 . . . . .	114
B.13 Análise thesis-n7741 . . . . .	114

# Lista de Figuras

1.1	( <i>Imagem superior</i> ) Órbitas elípticas de estrelas alinhadas. ( <i>Imagem inferior</i> ) Efeito da rotação das órbitas elípticas por um ângulo $\theta$ . Nota-se a formação de um padrão espiral de densidade. . . . .	5
1.2	O padrão espiral da Via-Láctea: modelo de Roberts (1969). Nota-se a presença de estrelas recém-formadas e de regiões HII no lado interno do braço espiral observado. . . . .	6
1.3	Distribuição de regiões de formação estelar muito jovens (pontos azuis) em relação ao máximo de emissão na banda $K$ (linha tracejada) para NGC 5247. Imagens obtidas com o NTT do ESO (Grosbol & Dottori, 2007.) . . . . .	7
2.1	Esquema que mostra o deslocamento de fase nas bandas $g$ (frente de choque) e $i$ (onda de densidade espiral). . . . .	15
2.2	A posição da frente de choque (linha grossa) com respeito à ODE (linha fina) para espirais do tipo S: (a) leading e (b) trailing; e espirais do tipo Z: (c) leading e (d) trailing. Em cada caso, as setas indicam o sentido de rotação do disco. . . . .	16
2.3	Comportamento relativo da fase $\Theta(r)$ da ODE (linha tracejada) e da frente de choque (linha contínua) para os casos mostrados na figura anterior (P&D, 1997). . . . .	17
2.4	Diagramas de diferença de fase construídos a partir da fig. 2.3. . . . .	17
2.5	Espirais de periodicidades angulares $m = 1, 2, 3$ . . . . .	25
2.6	Definição de <i>pitch angle</i> ( $\alpha$ ) nos braços espirais. A figura mostra que um braço mais enrolado tem um menor valor de $\alpha$ (à esquerda), enquanto um braço menos enrolado fornece um maior valor de $\alpha$ (à direita). . . . .	26
2.7	Padrões espirais: à esquerda, <i>leading</i> e à direita, <i>trailing</i> . A seta aponta o sentido de rotação do disco da galáxia. . . . .	27

2.8	Esquema mostrando as frequências angulares (em unidades arbitrárias) para uma curva de rotação plana. A <i>frequência de rotação angular</i> é $\Omega$ , e a <i>frequência epicíclica</i> é $\kappa$ . A <i>velocidade do padrão</i> é $\Omega_p$ . Ressonância de corrotação (CR) e ressonâncias interna (ILR) e externa (OLR) de Lindblad são identificadas (Canzian, 1998). . . . .	30
2.9	Pares de imagens da amostra. Na seqüência à esquerda: IC0167, IC0267, IC2421 e NGC0019, e à direita: NGC0036, NGC0047, NGC0060 e NGC0070.	35
2.10	Pares de imagens da amostra. Na seqüência à esquerda: NGC0622, NGC0753, NGC0772, NGC1073, NGC2336, e à direita: NGC6951, NGC7479, NGC7678, NGC7741, NGC7753. . . . .	36
3.1	Imagem IC2421 extraído do NED na banda I, $\lambda = 6450\text{\AA}$ . . . . .	37
3.2	IC2421 nas bandas $g$ e $i$ . (1) Imagens originais deprojetadas e sem as estrelas; (2) Imagens obtidas das anteriores em que foi subtraído o disco médio; (3) Imagens anti-transformada de Fourier (combinadas as dez componentes). . . . .	41
3.3	Coeficientes $A(p, m)$ da transformada bidimensional de Fourier na imagem $g$ e $i$ de IC2421, obtidos segundo o processo descrito no capítulo 2. A variável $p$ está relacionada com o <i>pitch angle</i> $\alpha$ por $p = -m/\tan \alpha$ . . . . .	42
3.4	Funções de densidade radial nas bandas $g$ e $i$ . . . . .	42
3.5	IC2421 Espirais sintéticas nas bandas $g$ e $i$ . Componentes (1), (2) e (3). . . . .	43
3.6	IC2421 Elmegreen nas bandas $g$ e $i$ . Componentes (1), (2) e (3). . . . .	44
3.7	Imagens retificadas $g$ e $i$ das componentes originais, subtraído o disco médio.	45
3.8	Imagens retificadas $g$ e $i$ para a componente 2 do método EEM92. . . . .	45
3.9	Imagens retificadas $g$ e $i$ da anti-transformada de Fourier (combinadas as 10 componentes). . . . .	45
3.10	[ <b>Diferenças de Fase (<i>graus</i>) <math>\times</math> Raio (<i>kpc</i>)</b> ]. Os gráficos correspondem às componentes $m = 1, 2$ relativos às imagens originais, método EEM92 e antitransformada. . . . .	46
3.11	O círculo indica a posição da ressonância de corrotação da componente $m = 1$ .	47
3.12	O círculo indica a posição da ressonância de corrotação da componente $m = 2$ .	48
4.1	Imagem NGC0622 extraído do NED, no comprimento de onda $6480\text{\AA}$ . . . . .	49
4.2	NGC0622 nas bandas $g$ e $i$ . (1) Imagens originais deprojetadas e sem as estrelas; (2) Imagens obtidas das anteriores em que foi subtraído o disco médio; (3) Imagens anti-transformada de Fourier (combinadas as dez componentes).	52
4.3	Coeficientes $A(p, m)$ da transformada bidimensional de Fourier na imagem $g$ e $i$ de NGC0622, obtidos segundo o processo descrito no capítulo 2. A variável $p$ está relacionada com o <i>pitch angle</i> $\alpha$ por $p = -m/\tan \alpha$ . . . . .	53
4.4	Funções de densidade radial nas bandas $g$ e $i$ . . . . .	53

4.5	Espirais sintéticas nas bandas $g$ e $i$ , e componentes (1), (2) e (3). . . . .	54
4.6	Imagens simetrizadas nas bandas $g$ e $i$ , e componentes (1), (2) e (3). . . . .	55
4.7	Imagens retificadas $g$ e $i$ das componentes originais, subtraído o disco médio. . . . .	56
4.8	Imagens retificadas $g$ e $i$ para a componente 2 do método EEM92. . . . .	56
4.9	Imagens retificadas $g$ e $i$ da anti-transformada de Fourier. . . . .	56
4.10	[ <b>Diferenças de Fase (<i>graus</i>) <math>\times</math> Raio (<i>kpc</i>)</b> ]. Os gráficos correspondem à componente $m = 2$ relativos às imagens originais, método EEM92 e anti-transformada. . . . .	57
4.11	O círculo indica a posição da ressonância de corrotação da componente $m = 2$ . As imagens são na cor $g$ . . . . .	58
5.1	Galáxia NGC7479. Imagem adquirida no NED no comprimento de onda 4050Å, e telescópio Palomar 200 inch., 1994. . . . .	59
5.2	NGC7479 nas bandas $g$ e $i$ . (1) Imagens originais deprojetadas e sem as estrelas; (2) Imagens obtidas das anteriores em que foi subtraído o disco médio; (3) Imagens anti-transformada de Fourier (combinadas as dez componentes). . . . .	62
5.3	Coefficientes $A(p, m)$ da transformada bidimensional de Fourier na imagem $g$ e $i$ de NGC7479, obtidos segundo o processo descrito no capítulo 2. A variável $p$ está relacionada com o <i>pitch angle</i> $\alpha$ por $p = -m/\tan \alpha$ . . . . .	63
5.4	Funções de densidade radial nas bandas $g$ e $i$ . . . . .	63
5.5	Espirais sintéticas nas bandas $g$ e $i$ , e componentes (1), (2) e (3). . . . .	64
5.6	Imagens simetrizadas nas bandas $g$ e $i$ , e componentes (1), (2) e (3). . . . .	65
5.7	Imagens retificadas $g$ e $i$ das componentes originais, subtraído o disco médio. . . . .	66
5.8	Imagens retificadas $g$ e $i$ para a componente 2 do método EEM92. . . . .	66
5.9	Imagens retificadas $g$ e $i$ da anti-transformada de Fourier. . . . .	66
5.10	[ <b>Diferenças de Fase (<i>graus</i>) <math>\times</math> Raio (<i>kpc</i>)</b> ]. Os gráficos correspondem à componente $m = 2$ relativos às imagens originais, método EEM92 e anti-transformada. . . . .	67
5.11	Os círculos indicam as posições das ressonâncias de corrotação da componente $m = 2$ . As imagens são na cor $g$ . . . . .	68
6.1	Imagem extraída do NED, na banda J e $\lambda = 1.25 \mu m$ . . . . .	69
6.2	NGC7678 nas bandas $g$ e $i$ . (1) Imagens originais deprojetadas e sem as estrelas; (2) Imagens obtidas das anteriores em que foi subtraído o disco médio; (3) Imagens anti-transformada de Fourier (combinadas as dez componentes). . . . .	72
6.3	Coefficientes $A(p, m)$ da transformada bidimensional de Fourier na imagem $g$ e $i$ de NGC7678, obtidos segundo o processo descrito no capítulo 2. A variável $p$ está relacionada com o <i>pitch angle</i> $\alpha$ por $p = -m/\tan \alpha$ . . . . .	73
6.4	Funções de densidade radial nas bandas $g$ e $i$ . . . . .	73

6.5	Espirais sintéticas nas bandas $g$ e $i$ , e componentes (1), (2) e (3). . . . .	74
6.6	Imagens simetrizadas nas bandas $g$ e $i$ , e componentes (1), (2) e (3). . . . .	75
6.7	Imagens retificadas $g$ e $i$ das componentes originais, subtraído o disco médio. . . . .	76
6.8	Imagens retificadas $g$ e $i$ para a componente 2 do método EEM92. . . . .	76
6.9	Imagens retificadas $g$ e $i$ da anti-transformada de Fourier. . . . .	76
6.10	[ <b>Diferenças de Fase (<i>graus</i>) <math>\times</math> Raio (<i>kpc</i>)</b> ]. Os gráficos correspondem às componentes $m = 1$ e $m = 2$ relativos às imagens originais, método EEM92 e antitransformada. . . . .	77
6.11	Os círculos indicam as posições das ressonâncias de corrotação para a componente $m = 1$ . . . . .	78
6.12	Os círculos indicam as posições das ressonâncias de corrotação para a componente $m = 2$ . . . . .	79
7.1	Imagem NGC7753 extraída do NED, na banda B e $\lambda = 4360\text{Å}$ . . . . .	80
7.2	NGC7753 nas bandas $g$ e $i$ . (1) Imagens originais deprojetadas e sem as estrelas; (2) Imagens obtidas das anteriores em que foi subtraído o disco médio; (3) Imagens anti-transformada de Fourier (combinadas as dez componentes). . . . .	83
7.3	Coeficientes $A(p, m)$ da transformada bidimensional de Fourier na imagem $g$ e $i$ de NGC7753, obtidos segundo o processo descrito no capítulo 2. A variável $p$ está relacionada com o <i>pitch angle</i> $\alpha$ por $p = -m/\tan \alpha$ . . . . .	84
7.4	Funções de densidade radial nas bandas $g$ e $i$ . . . . .	84
7.5	Espirais sintéticas nas bandas $g$ e $i$ , e componentes (1), (2) e (3). . . . .	85
7.6	Imagens simetrizadas nas bandas $g$ e $i$ , e componentes (1), (2) e (3). . . . .	86
7.7	Imagens retificadas $g$ e $i$ das componentes originais, subtraído o disco médio. . . . .	87
7.8	Imagens retificadas $g$ e $i$ para a componente 2 do método EEM92. . . . .	87
7.9	Imagens retificadas $g$ e $i$ da anti-transformada de Fourier. . . . .	87
7.10	[ <b>Diferenças de Fase (<i>graus</i>) <math>\times</math> Raio (<i>kpc</i>)</b> ]. Os gráficos correspondem às componentes $m = 1$ e 2 relativos às imagens originais, método EEM92 e antitransformada. . . . .	88
7.11	O círculo indica a posição da provável CR para a componente 1 em $\sim 12.1 \pm 1.3 \text{ kpc}$ . As imagens são na cor $g$ . . . . .	89
7.12	O círculo indica a posição da provável CR para a componente 2 em $\sim 14.8 \pm 0.5 \text{ kpc}$ . As imagens são na cor $g$ . . . . .	90

# Capítulo 1

## Introdução

A primeira classificação morfológica das galáxias, até hoje usada, deve-se a Edwin Hubble (1919). A *classificação de Hubble* reconhece dois tipos fundamentais de objetos, os que apresentam forma elipsoidal e aqueles que apresentam forma discoidal. O principal parâmetro que diferencia estes dois grupos é o seu *Momento Angular Intrínseco*. O momento angular das galáxias discoidais é muito maior que os das elipsoidais e está precisamente concentrado no disco que origina o seu nome. Porém, é importante notar-se que a classificação de Hubble estabelece os sub-tipos a, b e c dentre as galáxias espirais barradas e não barradas, com os quais se vê que há uma relação entre a importância do bojo (*bulge*), o grau de enrolamento (*pitch angle*) e o contraste dos braços espirais. A maior bojo, mais fechados e menos conspícuos são os braços espirais.

de Vaucouleurs<sup>[50]</sup> (1963) aprimorou o sistema de Hubble mantendo os tipos elípticas e espirais puras e barradas, separando tipos intermediários e destacando a presença ou não de anéis. Este autor só se ocupou de afinar a apreciação dos detalhes dos braços espirais, sem procurar vínculos com parâmetros físicos globais, além dos estabelecidos por Hubble.

Van den Berg<sup>[48,49]</sup> (1960 a, b) encontrou uma relação entre a luminosidade absoluta das galáxias e a extensão da estrutura espiral. As galáxias com mais alta luminosidade possuem os braços mais extensos e desenvolvidos, enquanto que espirais menos luminosas têm braços pouco desenvolvidos.

Elmegreen & Elmegreen<sup>[18]</sup> (1987) propuseram uma classificação das galáxias espirais e estabelecem uma separação entre galáxias dependendo do grau de simetria e continuidade da estrutura espiral. A separação é feita em 12 grupos, onde o grupo número 1 apresenta braços espirais não simétricos, fragmentados e caóticos, enquanto que o de número 12 corresponde a galáxias com dois longos braços simétricos que dominam o disco óptico. Os autores reservaram os números 10 e 11 para classificarem espirais com barra e espirais com companheiras próximas. A tabela seguinte mostra um resumo dessa classificação.

Classe dos Braços	Descrição
1 . . . . .	Braços caóticos, fragmentados e assimétricos;
2 . . . . .	Partes fragmentadas de braços espirais sem um padrão regular;
3 . . . . .	Braços fragmentados uniformemente distribuídos em torno do centro da galáxia;
4 . . . . .	Somente um braço proeminente; os demais braços são fragmentados;
5 . . . . .	Braços curtos, bissimétricos, em regiões internas; braços externos irregulares;
6 . . . . .	Braços internos bissimétricos; estrutura externa semelhante a um anel ou tipo <i>pluma</i> ;
7 . . . . .	Braços externos longos, bissimétricos; braços internos irregulares ou tipo <i>pluma</i> ;
8 . . . . .	Braços semelhantes a um anel fortemente enrolados;
9 . . . . .	Braços internos bissimétricos; múltiplos braços externos contínuos e longos;
10 . . . . .	Não mais usado; anteriormente denotado galáxias barradas;
11 . . . . .	Não mais usado; anteriormente denotado galáxias com companheiras próximas;
12 . . . . .	Braços bissimétricos longos dominando o disco ótico.

Tabela 1.1: Descrição de Classes de Braços para Galáxias Espirais, Elmegreen (1987).

A classificação proposta por Block et. al.<sup>[6]</sup> (1994) e Block & Puerari<sup>[7]</sup> (1999) baseia-se na estrutura dos braços espirais na banda  $K$ . A perturbação aparece originalmente no disco de estrelas velhas de população II, mas a mesma está ofuscada pelas estrelas recém formadas (de população I, muito mais luminosas) e também mascarada pela poeira geralmente associada à formação estelar. Face a isto, os autores mencionados propuseram realizar uma classificação baseada na população II, revelada em imagens infravermelhas na banda  $K$  (2.1 *microns*). Eles chamaram esta classificação de *dust-penetrated*, já que a absorção pela poeira é um fator 10 menor nesta banda que nas bandas ópticas. Com base na observação de 64 galáxias, os autores propuseram que os ângulos de passo (*pitch angles*) dos braços espirais no infravermelho eram diferentes dos da classificação de Hubble para as galáxias analisadas. Um trabalho posterior desenvolvido na Universidade Estadual de Ohio (Bright Galaxies Atlas Project, <http://www.astronomy.ohio-state.edu/~survey/>) de Eskridge, P.B. et al.<sup>[21]</sup> (2002), com a observação de mais objetos, realizada especificamente para testar este resultado, não o confirmou. Embora galáxias com aspecto floculento nas bandas espectrais ópticas apresentam estrutura espiral *mais suave* no infravermelho, a classificação na banda  $K$  realizada de forma clássica, não mostrou diferenças com a classificação nas bandas ópticas.

Paradoxalmente, as galáxias discoidais foram originalmente conhecidas como ***espirais***, devido ao seu aspecto mais marcante no intervalo espectral óptico, as *estruturas espirais*. Porém, os estudos ao longo do tempo levaram a identificar nos braços espirais

uma perturbação do disco tênue subjacente, que é onde se concentra a maior quantidade de estrelas velhas de baixa massa e luminosidade.

Seigar et al.<sup>[44]</sup> (2005), usando imageamento no infravermelho próximo de 14 galáxias, executaram análise de Fourier da estrutura espiral para determinar o *pitch angle* das mesmas. Este dado foi usado conjuntamente com a curva de rotação dos discos estelares destas galáxias. Encontraram uma correlação entre o *pitch angle* (definido na *seção 2.3.1*) no infravermelho próximo e a taxa de cisalhamento: galáxias com braços abertos largos têm curvas de rotação crescentes, enquanto que aquelas com curvas de rotação decrescentes encontram-se nos braços fortemente enrolados. Isto indica que o grau de enrolamento dos braços espirais está relacionado com a distribuição de matéria da galáxia hospedeira, contrariamente aos resultados inferidos do óptico por Burstein & Rubin<sup>[9]</sup> (1985). O trabalho desenvolvido por Seigar<sup>[43]</sup> (2005) à luz da classificação de Hubble, indica então que deve haver uma relação entre os subsistemas que compõem as galáxias discoidais. Por exemplo, a classificação de Hubble indica que espirais Sa tem bojos grandes e braços fechados, tanto que Seigar demonstra que braços deste tipo indicam curvas de rotação decrescentes. Mas, a curva de rotação é, em grande medida, determinada pela importância do halo. Sem dúvida, uma conjectura deste tipo deve ser analisada com maior profundidade sobre um maior número de casos. Villamizar et al.<sup>[51]</sup> (2001) mostraram que a NGC 1365 tem um halo pequeno e braços bem desenvolvidos.

Uma pergunta procedente é se a diferença em grau de detalhes nas estruturas dos braços tem a ver com propriedades globais da galáxia hospedeira (como importância relativa dos sub-sistemas halo, bojo, disco), se marca um problema evolutivo da perturbação em galáxias hospedeiras essencialmente iguais, ou se marca algum outro tipo de fenômeno, como a exaustão do gás e poeira disponíveis para a formação estelar (mecanismo que acaba dando maior riqueza de detalhes aos braços)? Simulações numéricas realizadas durante os últimos quinze anos, têm revelado muitos aspectos destas dúvidas, no que diz respeito à importância dos sub-sistemas no desenvolvimento e evolução dos braços espirais no disco de estrelas, quanto no gás perturbado (Junqueira & Combes<sup>[26]</sup>, 1996). Sem dúvida, estes tipos de propriedades deveriam estar refletidos nas imagens das galáxias nas diversas cores. A confirmação de resultados como este pode ser feita com a aplicação de técnicas mais objetivas do que a classificação clássica. Análise de imagens *g* e *i* permite detectar diferenças entre o disco gasoso e disco estelar velho, fornecendo inclusive idades para o padrão espiral a partir dos resultados das simulações numéricas (Vera-Villamizar et al.<sup>[51]</sup> 2001).

Em relação às perturbações, vemos então que perguntas tais como: Como se origina uma estrutura espiral?, Como ela se propaga sobre o disco?, Como se comportam as estrelas e o resto da matéria sob a influência dos braços espirais?, Como altera a cinemática e dinâmica dos discos?, Quanto tempo dura uma estrutura espiral?, Quanta energia dissipa uma estrutura espiral?, Por que são persistentes as estruturas espirais?, etc., precisam para

serem respondidas do aporte de um melhor e mais acurado conhecimento das estruturas espirais do que aquele fornecido pela classificação morfológica subjetiva.

O exposto indica que o estudo rigoroso e a caracterização das propriedades cinemáticas das estruturas espirais é importante para acompanhar as simulações numéricas e determinar cada vez condições mais precisas para desenvolvê-las. Este estudo deve ser abordado de dois aspectos, o cinemático, medindo os campos de velocidades radiais, e o morfológico, aplicando técnicas de processamento de imagens e técnicas matemáticas. O estudo de propriedades morfológicas pode se desenvolver com maior precisão em galáxias vistas de frente (*face-on*), isto se o empenamento (*warping*) do disco em questão não for muito crítico. As curvas de rotação tem menor erro para galáxias vistas de perfil (*edge-on*). Porém, estudo cinemático das perturbações requer que a galáxia apresente uma projeção da ordem de  $45^\circ$  no plano do céu, para poder obter mapas de velocidades bi-dimensionais (Meidt & Rand<sup>[33]</sup>, 2005).

Estas são questões relevantes, ainda objeto de pesquisas. Sem dúvida, a forma e demais propriedades que apresenta uma perturbação estão ligadas às características físicas do meio perturbado, por exemplo, a velocidade do som num meio depende da densidade do mesmo. Isto se vê nas perturbações de quaisquer sistemas físicos e as galáxias não devem fugir a esta regra. Como o disco é uma estrutura gravitacionalmente coesa, as perturbações devem, a princípio, responder a uma teoria não-linear, mas regidas pelas leis de Newton.

Lindblad<sup>[31]</sup> (1948), propôs que a estrutura espiral vinha da interação entre as órbitas das estrelas do disco e que, portanto, deveria ser investigada a partir de dinâmica estelar. As estrelas produziriam, na sua interpretação, verdadeiras ondas de densidade. Este conceito é representado graficamente na *fig. 1.1*, onde pode-se ver o resultado de rotacionar os eixos principais de um conjunto de órbitas elípticas de certo ângulo  $\theta(r)$ , densamente povoadas por estrelas. Até os anos sessenta existiam teorias alternativas, como as que propunham a organização de braços por campos magnéticos espirais (Piddington<sup>[35,36]</sup> 1964, 1967; Elvius & Herlofson<sup>[20]</sup>, 1960).

A *fig. 1.1 (superior)* mostra órbitas elípticas de estrelas alinhadas, ou seja, consideramos órbitas concêntricas com os seus eixos alinhados e que estão uniformemente povoadas por estrelas. Este conjunto de órbitas, bem como as estrelas que as povoam, devem se considerar como um conjunto peculiar, restrito a não mais do que 5 – 15 % da massa do disco. A *fig. 1.1 (inferior)* mostra o efeito de girar as órbitas por um ângulo

$$(1-1) \quad \theta(r) = -a \ln(r) + b,$$

onde  $a$  e  $b$  são constantes e  $r$  é o eixo maior da órbita. Observemos que a representação obtida nesta figura é uma estrutura bissimétrica de braços espirais, com um excesso de densidade de estrelas ao longo dos braços. Este excesso de densidade  $\Delta\rho$  tem forma de padrão espiral e, portanto, gera uma força diferencial  $\Delta f(r, \theta)$  que não tem simetria axial, acelera a estrela

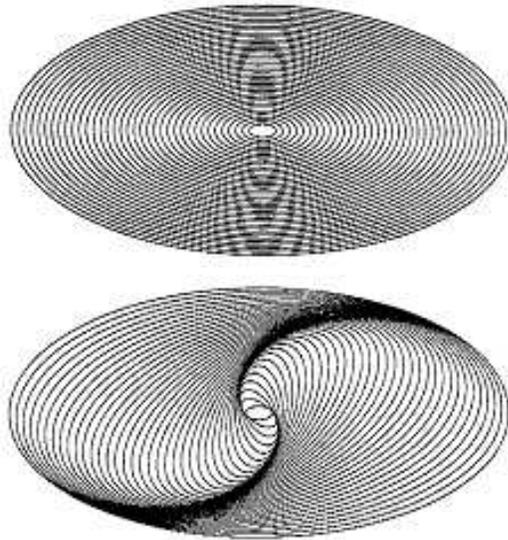


Figura 1.1: (*Imagem superior*) Órbitas elípticas de estrelas alinhadas. (*Imagem inferior*) Efeito da rotação das órbitas elípticas por um ângulo  $\theta$ . Nota-se a formação de um padrão espiral de densidade.

na direção azimutal, fazendo migrar as estrelas vizinhas ao braço na direção radial, para fora/dentro, dependendo de se a estrela está para fora/dentro do círculo de ressonância de corrotação (CR).

Posteriormente, Lin & Shu<sup>[30]</sup> (1964) introduziram a teoria de ondas de densidade espiral, dando uma sólida base matemática para o estudo destas estruturas como perturbações do campo gravitacional do disco das galáxias espirais. Eles foram os primeiros a produzir resultados quantitativos de ondas de densidade como um efeito coletivo, através do uso de métodos matemáticos desenvolvidos e utilizados com sucesso em problemas análogos em física de plasma e hidrodinâmica. O trabalho de Lin & Shu apresentava a hipótese da existência de uma estrutura espiral quase estacionária, na distribuição espacial de estrelas numa galáxia discoidal, se observássemos a galáxia de um sistema de referência que girasse ao redor do centro com velocidade angular constante. Estas ondas poderiam ser produzidas por instabilidades gravitacionais (sendo estas instabilidades entendidas aqui como qualquer mecanismo que quebre a simetria axial do sistema discoidal) e limitadas pela dispersão de velocidades das estrelas. Um dos grandes sucessos desta teoria foi permitir formalmente a existência tanto de espirais do tipo *leading* como *trailing*, embora estudos posteriores encontraram que a cinemática dos discos favorece a permanência de espirais de tipo *trailing* (Contopoulos<sup>[13]</sup>, 1971), sendo as *leading* fenômenos transitórios. Em face deste cenário,

é importante ressaltar as conseqüências da presença das ondas de densidade nos discos galácticos\*.

Roberts<sup>[41]</sup> (1969) fez um estudo da dinâmica de formação estelar por choques com a presença de um padrão perturbador. Neste trabalho foram considerados os movimentos relativos entre o gás contido no disco galáctico e um campo espiral de dois braços. Foi sugerido, então, que ondas de choque podem ser o mecanismo para o colapso gravitacional das nuvens de gás, dando origem à formação estelar. Este fenômeno anteriormente havia sido apontado qualitativamente por Lindblad na sua “teoria da circulação”, mas foi estudado mais profundamente no trabalho de Roberts. Este autor descreveu detalhadamente o cenário do padrão espiral para a nossa galáxia, como mostra a *fig. 1.2*.

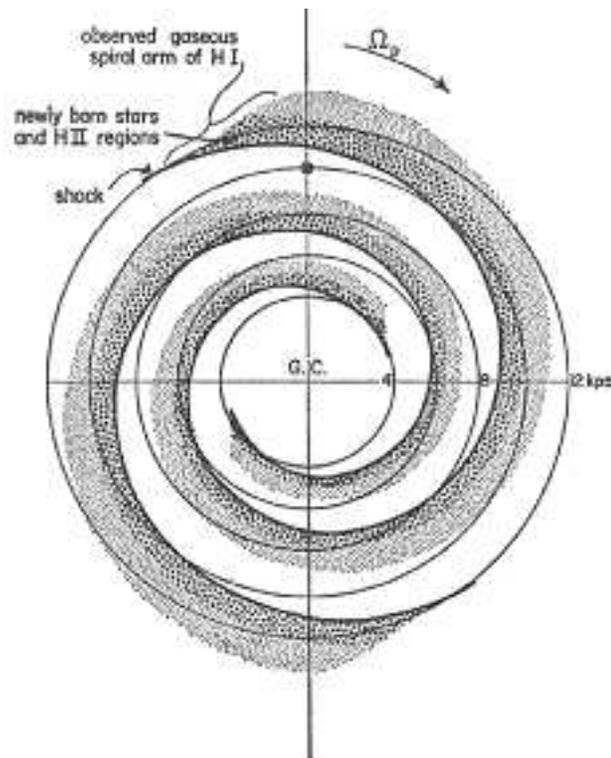


Figura 1.2: O padrão espiral da Via-Láctea: modelo de Roberts (1969). Nota-se a presença de estrelas recém-formadas e de regiões HII no lado interno do braço espiral observado.

A ilustração exibe o mecanismo de formação estelar por choques, o qual apresenta um padrão de densidade bissimétrico e que, devido à velocidade relativa entre o padrão e o disco de gás, gera uma faixa de formação estelar e de regiões HII. Como a *fig. 1.2* mostra,

\*A explicação da estrutura espiral a partir da teoria de Lin e Shu supera o problema do enrolamento extremo dos braços por rotação diferencial que deve aparecer se os braços fossem materiais. Os braços espirais observados são simplesmente *ondas* que se propagam pelo disco com uma velocidade angular constante, sem transporte de matéria, somente leva energia. A *onda de densidade* se propaga no fluido estelar da mesma maneira que ondas sonoras movimentam-se num fluido. Na *seção 2.1.1* tratamos com mais detalhes a teoria de ondas de densidade.

qualitativamente, o padrão espiral está interagindo com o gás de maneira que a *região de choque* gera formação estelar no lado interno do braço espiral de HI.

A *fig. 1.3* mostra os resultados recentes para NGC 5247 (Grosbol & Dottori<sup>[25]</sup>, 2007), no diagrama  $\log(R)$  vs.  $\theta$ , na qual se compara a posição relativa de fontes infravermelhas, associadas à formação estelar recente e o máximo de emissão dos braços espirais na banda *K*. Pode-se notar uma clara diferença entre os ângulos de passo das duas distribuições, provavelmente indicando a ação do choque. As imagens no infravermelho foram obtidas com o telescópio NTT de 3,6 m, do European Southern Observatory no Chile.

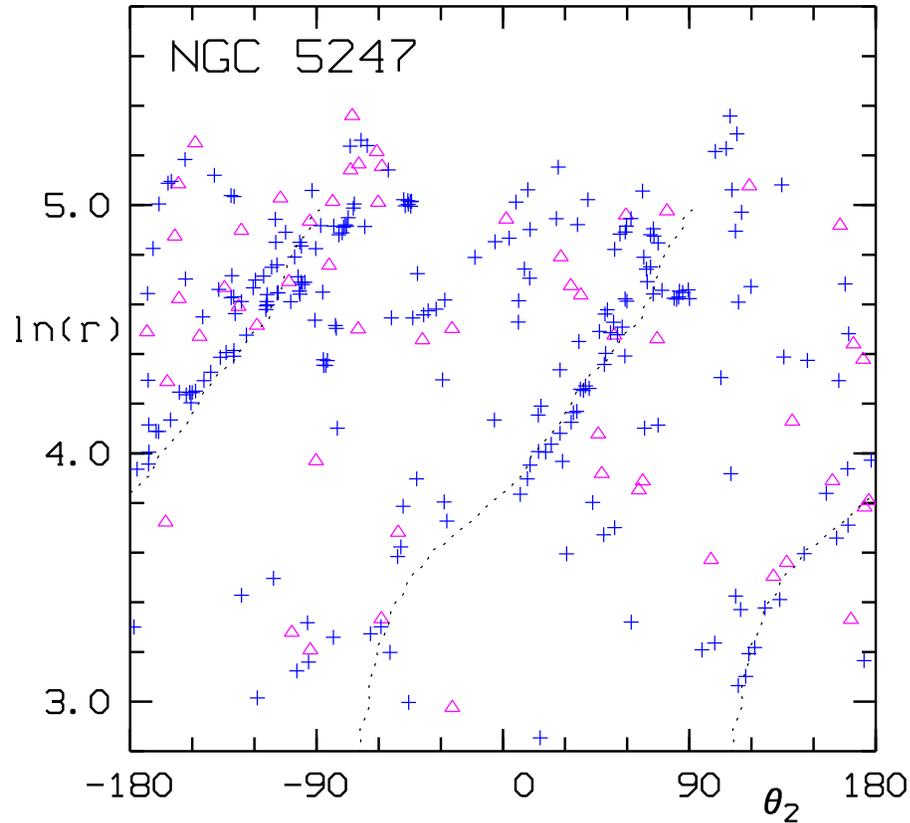


Figura 1.3: Distribuição de regiões de formação estelar muito jovens (pontos azuis) em relação ao máximo de emissão na banda *K* (linha tracejada) para NGC 5247. Imagens obtidas com o NTT do ESO (Grosbol & Dottori, 2007.)

Kalnajs<sup>[27]</sup> (1975) e posteriormente outros pesquisadores (Considère<sup>[11,12]</sup> & Athanassoula, 1982, 1988; Elmegreen & Elmegreen, 1992<sup>[19]</sup>; Puerari & Dottori<sup>[38]</sup>, 1992) desenvolveram métodos objetivos para a análise e classificação de galáxias espirais, que fornecem uma descrição matemática dos mesmos. O método inicialmente proposto por Kalnajs permite representar as estruturas espirais por meio de uma base de espirais logarítmicas de abertura (*pitch angle*) variável. É necessário salientar aqui, que este é um modelo que sugere que *todas as estruturas espirais observadas* estão essencialmente compostas por uma

soma de perturbações logarítmicas com  $m = 1$  até  $m = 6$  braços. As espirais *grand design* observadas podem se expressar como espirais  $m = 2$  logarítmicas quase perfeitas,  $\Psi(r) = \alpha \ln(r)$ , (Groot<sup>[22,23]</sup>, 1925, 1926; Reynolds<sup>[40]</sup>, 1925; Rots & Shane<sup>[42]</sup>, 1974; Boshhaar & Hodge<sup>[8]</sup>, 1977). Por exemplo, no trabalho pioneiro de Groot (1925, 1926) foi feito um estudo de várias espirais que incluíam espirais de Arquimedes, espirais hiperbólicas e espirais de Côtes, juntamente com espirais logarítmicas, concluindo que estas últimas são as que melhor se ajustam aos braços espirais *grand design*. Porém, estudos com técnicas mais modernas levaram diversos autores a chamar a atenção para o fato de que outras espirais matemáticas podem explicar também os objetos em questão. De qualquer forma, a existência de modelos alternativos para a descrição dos braços *não tiram a importância do fato essencial de ter uma descrição matemática que nos permita fazer modelagens posteriores, que transcende à unicidade do mesmo.*

Na década de setenta Schweizer<sup>[45]</sup> (1976) fez um estudo fotométrico de seis galáxias espirais, de tipos morfológicos de Hubble Sb e Sc. O objetivo deste trabalho era estudar separadamente o comportamento da luz do disco e dos braços espirais, por meio do uso de perfis de brilho superficial azimutais no sistema de Johnson. A partir dos índices de cor foi possível determinar que os braços espirais são significativamente mais azuis que o disco. No entanto, o resultado mais importante neste trabalho foi a detecção de padrões espirais largos nos discos das galáxias e que estes padrões representam as variações na densidade de massa superficial da população velha do disco. Dinamicamente falando, com a presença de um padrão de densidade espiral num disco de gás, é criado um cenário de formação estelar (como encontrado por Roberts<sup>[41]</sup>, 1969) que apontaria a passagem da onda de densidade em tal disco. No seu trabalho, Schweizer prevera que as bandas mais azuis (filtro B, V e R) indicam a população estelar jovem do disco (e, portanto, a presença de gás), enquanto que bandas do infravermelho traçam a população estelar velha.

Beckman & Cepa<sup>[2]</sup> (1990) analisaram os perfis azimutais de duas galáxias espirais nas cores B e I. Num cenário de formação estelar induzida por choques, os quais são gerados pela presença de um padrão espiral, Beckman & Cepa determinaram que os perfis azimutais eram mais íngremes no lado do braço espiral onde estava localizada a frente de choque. Da mesma maneira, os índices de cor eram mais azuis no mesmo lado dos braços.

O método inicialmente proposto por Kalnajs<sup>[27]</sup> (1975), foi aplicado a distribuições de regiões HII (Considère & Athanassoula<sup>[1]</sup>, 1982; Puerari & Dottori<sup>[38]</sup>, 1992) e a imagens digitalizadas (Considère & Athanassoula<sup>[12]</sup>, 1988). Este método de análise também foi utilizado no estudo de imagens de galáxias espirais nas bandas  $g$  e  $i$  (Dottori et al.<sup>[16]</sup>, 1996; Cepa & Beckman<sup>[2]</sup>, 1990; del Rio & Cepa, 1999; Vera-Villamizar et al.<sup>[51]</sup>, 2001) e no infravermelho  $J$ ,  $H$  e  $K$  (Block & Puerari<sup>[7]</sup>, 1999). Recentemente, Diaz et al.<sup>[15]</sup>, (2003), aplicaram este método em escalas circumnucleares da ordem das centenas de parsecs, em

imagens de alta resolução dos telescópios Gemini e HST, mostrando que os fenômenos de ressonância aparecem independentemente da escala dos braços espirais.

Analogamente, este mesmo tipo de análise foi feito por del Rìo & Cepa<sup>[14]</sup> (1998), numa amostra de 9 galáxias espirais nos filtros *B* e *I*. Neste trabalho eles demonstraram aquilo que já tinha sido sugerido nos trabalhos anteriores: que a assimetria relativa aos perfis de luz azimutais nas bandas ópticas e infravermelhas, é boa indicadora da presença de formação estelar, e de corotações em galáxias com ondas de densidade que estão influenciando a formação estelar. Se uma onda de densidade de alguma maneira gera formação estelar, é possível observar, nos perfis azimutais, um súbito aumento da luminosidade seguido de uma queda suave enquanto acompanhamos os perfis na direção relativa de movimento entre o gás e o padrão espiral. Como foi apontada por Schweizer<sup>[45]</sup>, (1976) a característica mais importante nos perfis azimutais gerados por estes eventos são: perfis mais inclinados e cores mais azuis no lado onde a frente de formação estelar está localizada. Este formato dos perfis azimutais deve sofrer uma inversão no raio de corotação.

Uma forma particular de estudo de ressonâncias foi aplicada por Dottori et al.<sup>[16]</sup>, (1996) na Grande Nuvem de Magalhães. A proximidade da GNM, permitiu observar fotometricamente no sistema *UBV* mais de 600 aglomerados estelares (Bica et al.<sup>[4]</sup>, 1996), os quais foram separados em grupos de idades caracterizados pelo par de cores (*U-B*) e (*B-V*). Esta separação mostrou que os aglomerados mais jovens  $< 3 \times 10^7$  anos se posicionam numa estrutura de barra espiral, a qual está deslocada com relação à barra de população velha  $3-7 \times 10^7$  anos. Esta particularidade permitiu aos autores medir a *velocidade de propagação* da onda de densidade bem como a *posição das ressonâncias*.

As ressonâncias são de grande importância no estudo de perturbações. Elas dependem basicamente das características físicas do meio perturbado e das condições de contorno nas quais a perturbação de um dado meio acontece. Os discos das galáxias não fogem desta regra.

As características físicas e cinemáticas que determinam a propagação, duração e atenuação de uma perturbação de um disco de galáxia produzem ressonâncias que acabam sendo traçadores destas características físicas. Algumas delas são extensão do padrão, lei de densidade superficial, forma do disco, potencial global ao qual está sujeito, etc. Provavelmente poderia também influenciar a história da formação estelar, e a abundância de elementos no disco. Por esta razão o estudo das ressonâncias adquire um significado especial no estudo da evolução das galáxias discoidais.

Na determinação das ressonâncias tem-se trabalhado em duas linhas observacionais diferentes, os métodos cinemáticos, que utilizam mapas de distribuição de velocidades do gás em emissão na galáxia em questão; e os métodos fotométricos, que se valem da informação contida nas cores das galáxias, com base em teorias de perturbações.

Blaise Canzian<sup>[10]</sup> (1998), propõe que, de acordo com a teoria de ondas de densidade, nas espirais *grand design*, a estrutura espiral deveria estar limitada pelas *ressonâncias interna* (ILR) e *externa de Lindblad* (OLR). A corrotação está entre a ILR e OLR. A posição das ressonâncias está em raios à razão dos quais é bastante independente da forma da curva de rotação. De acordo com Canzian, as condições descritas pelas razões entre raios conhecidos das estruturas espirais, ou sejam, feitas as medidas da razão entre o raio externo e interno que limitam o padrão espiral, a razão da ILR pelo raio interno e a razão da OLR pelo raio externo, estas quando satisfeitas pelas *equações 2-30, 2-32 e 2-33*, identificam então a ressonância de corrotação dentro do disco ótico. No seu trabalho, Canzian determina a provável posição da CR para 109 discos entre 140 galáxias estudadas.

Tremaine e Weinberg<sup>[46]</sup> (TM), propuseram um método baseado na análise conjunta de mapas de velocidades e imagens. A fundamentação teórica do mesmo é o teorema da continuidade da matéria. Embora conceitualmente simples, este tipo de análise foi pouco usada durante muito tempo, devido à necessidade de se obter bons mapas de velocidades. Recentemente, Zimmer, Rand & McGraw<sup>[52]</sup> (2004) analisaram mapas de velocidade radial do CO das galáxias M51, M83, e NGC 6946. Os resultados foram excelentes. Estes autores, porém, revelam que o método TM introduz resultados positivos espúrios em caso de galáxias flocculentas, nas quais a princípio não se deveriam encontrar ressonâncias. Meidt & Rand<sup>[33]</sup> (2005) propuseram uma variação do método TM, no qual permite-se a existência de padrões com velocidade angular variável. Segundo estes autores a aplicação do mesmo à galáxia NGC 1068, forneceu resultados interessantes no que diz respeito à vida média do padrão espiral. O mesmo está presentemente sendo submetido a testes, segundo Meidt et al.<sup>[34]</sup> (2006).

Elmegreen, Elmegreen e Montenegro<sup>[19]</sup> (1992) propuseram um método baseado na simetria de imagens para a determinação de parâmetros cinemáticos em galáxias espirais. O mesmo será melhor detalhado no próximo capítulo<sup>†</sup>, já que é aplicado neste trabalho.

Grosbol, Dottori & Gredel<sup>[24]</sup> (2006) propuseram a análise combinada de astrometria de alta precisão com espectroscopia de baixa resolução de objetos muito jovens pertencentes à galáxia NGC 2997, detectadas no infravermelho. As regiões estudadas apresentam-se em uma distribuição quase linear, ao longo de uns  $4\text{ kpc}$  no braço sudeste desta galáxia. Elas foram observadas com o espectrógrafo ISAAC, no telescópio ANTU do VLT, determinando-se a presença da linha  $\text{Br}_\gamma$  em emissão, o que as caracteriza como regiões HII. Os autores detectaram que a posição das regiões em relação ao máximo de brilho do braço espiral na banda  $K$  se correlaciona com a largura equivalente da linha  $\text{Br}_\gamma$ , que por sua vez é um indicador de idade (Dottori, 1983, Starburst 99). Os autores interpretaram esta propriedade como sendo devida à onda de densidade que formou as regiões HII. Desta forma, conseguiram determinar a posição do círculo de CR que é externo à cadeia de regiões. A existência

---

<sup>†</sup>Veja seção 2.1.5.

de condensações praticamente alinhadas ao longo de uma reta por vários *kiloparsecs*, que emitem no infravermelho, são invisíveis no óptico e mostram forte atividade de formação estelar, a qual foi detectada por Grosbol & Dottori em diversas galáxias. O alinhamento deve-se provavelmente a que estas regiões são muito jovens e ainda não tiveram tempo de sofrer o torque devido à rotação diferencial da galáxia, ou seja, não saíram do regime dinâmico linear no qual foram formadas.

O estudo das estruturas espirais que desenvolvemos fornece as componentes mais importantes numa base de 10 espirais logarítmicas de passo variável, o sentido de enrolamento dos braços, a extensão dos mesmos, identifica a(s) ressonância(s) de corotação sem recursos cinemáticos, entre outras propriedades. Propõe-se neste trabalho uma análise detalhada que nos permita obter algumas correlações entre esses parâmetros, no sentido de ampliar nosso conhecimento sobre as estruturas espirais. No capítulo 2 detalhamos a metodologia usada neste trabalho para obter propriedades dos padrões espirais e apresentamos uma base da teoria para o estudo da descrição da dinâmica dos braços espirais, bem como os conceitos e as definições relativos a estas estruturas.

Os resultados de 5 galáxias paradigmáticas são apresentados nos capítulos 3 a 7, sendo que o resto das galáxias são incluídas num CD anexo, como apêndice. As conclusões são apresentadas no capítulo 8.

## Capítulo 2

# Métodos de análise

### 2.1 Métodos de Análise

Três métodos são usados para fazer a análise de fase em galáxias espirais. Cada método está baseado em considerações distintas e fornece uma avaliação independente tanto das ressonâncias de corotação, quanto das propriedades das estruturas espirais.

O método de transformada de Fourier bidimensional fornece o espectro de Fourier da estrutura espiral, numa base de espirais logarítmicas com componentes de  $m = 1, \dots, 6$  (fig. 2.5), com ângulo de passo variável, *pitch angle* (fig. 2.6). Ele também fornece a importância relativa destas componentes, bem como o intervalo radial de validade das mesmas.

O método de simetrização de Elmegreen, Elmegreen & Montenegro<sup>[19]</sup> (1992) (doravante EEM92), permite separar as componentes com simetria par e ímpar das estruturas espirais.

A transformada de Fourier unidimensional de perfis azimutais desenvolvido por Pue-rari & Dottori<sup>[39]</sup> em 1997, que permite construir um diagrama de fase  $\log(r) \times \theta$  da parte mais brilhante do braço espiral. Este método pode ser aplicado às imagens originais ou às estruturas derivadas das duas análises anteriormente mencionadas.

#### 2.1.1 Teoria de Ondas de Densidade de Lin e Shu

O processo de geração e conservação da estrutura espiral em galáxias discoidais pode ser explicado como sendo o resultado da presença de ondas de densidade espiral. A ODE representa uma *perturbação gravitacional* que se propaga através do disco. No entanto, o mecanismo de formação e permanência de padrões espirais nestas galáxias de disco, após passar mais de décadas deste os trabalhos de Lidblad e Lin e Shu, é ainda parcialmente compreendido. É de consenso geral que a formação destes padrões seja o resultado de instabilidades gravitacionais no disco (como barras ou interações com galáxias companheiras

que quebrem a simetria axial do sistema), embora existam sistemas isolados, que não apresentam barras e que mostram padrão espiral. Kormendy & Norman<sup>[29]</sup> (1979) sugerem na ausência da ressonância interna de Lindblad (ILR)\* (ausência devido a forma da curva de rotação, do tipo corpo rígido  $V(r)$ ), o padrão espiral seria mantido com facilidade, pois a onda de densidade é extinta na ILR.

Uma teoria da estrutura espiral deve levar em conta as estrelas (suas forças gravitacionais e velocidades circular e de dispersão), o gás interestelar (com seu campo gravitacional e pressão) e o campo magnético da galáxia (este campo, devido a sua baixa intensidade, é na maioria das vezes desprezado).

No trabalho original de Lin e Shu (1964), os autores partem da hipótese de que os braços espirais não podem ser considerados como formados sempre pela mesma porção da matéria. Os braços seriam a manifestação de ondas de densidade que se propagariam no disco e forças gravitacionais seriam responsáveis por essas propagação. Resolvendo as equações básicas de dinâmica estelar (Chandrasekhar, 1960), e introduzindo uma perturbação na densidade de equilíbrio, Lin e Shu encontraram que a evolução espacial e temporal da perturbação representa uma onda de densidade, que tem forma espiral e se propaga radialmente. Nestes cálculos, a dispersão de velocidades das estrelas é desprezada. Nesta primeira solução, os modos de oscilação resultam em *não estáveis*. A inclusão de dispersão de velocidades é relevante, pois introduz termos não-lineares às equações. Quando considerados, estes termos têm um papel muito importante no sentido de limitar o crescimento das ondas e estabilizar os modos espirais (estes modos também poderiam ser desestabilizados no caso em que a dispersão de velocidades fosse suficientemente alta).

As zonas de ressonâncias são interpretadas como locais onde o gás adquire altas velocidades radiais e são como que barreiras que se opõem à propagação das ondas. Estas barreiras fornecem um eficiente sistema de restauração das ondas, as quais seriam amortecidas após algumas revoluções da galáxia. As variações na amplitude da onda, interpretadas como sendo resultado da interferência entre ondas que se propagam para fora e para dentro, em direção ao centro da galáxia, foram observadas em galáxias do tipo *grand design*, Elmegreen et. al.<sup>[18]</sup> (1964).

Dois grandes resultados da teoria de Lin e Shu são a predição de uma correlação entre a densidade central da galáxia e o grau de enrolamento dos braços, assim como a possibilidade formal da existência de braços *trailing* e *leading*<sup>†</sup>. Além disso, o fato das galáxias deficientes em gás não mostrarem um padrão espiral, é explicado por esses sistemas apresentarem alta dispersão de velocidades e, como colocado anteriormente, este fator limita o crescimento da onda espiral. Outra razão é que, devido à ausência de gás, a manifestação da onda em tais sistemas não seria facilmente observada.

---

\*Veja seção 2.3.3

†ver seção 2.3.2

### 2.1.2 Transformada de Fourier unidimensional

Este método, introduzido por Puerari & Dottori<sup>[39]</sup> em 1997, está baseado na análise de perfis azimutais em imagens de galáxias espirais. A idéia básica desta análise surgiu a partir de estudos do comportamento de cores através dos braços espirais desenvolvidos por Schweizer<sup>[45]</sup> (1976) e por Beckman & Cepa<sup>[2]</sup> em 1990 (doravante BC90). Quando a onda de densidade espiral (ODE) (*spiral density wave*) se choca com o disco de gás, formação estelar é induzida, deixando a sua assinatura em forma de estrelas jovens e azuis que marcam também um padrão espiral, porém, deslocado em relação ao padrão perturbador<sup>‡</sup>. BC90 detectaram que nos perfis azimutais era possível achar características próprias deste cenário: os perfis azimutais eram mais íngremes do lado do braço em que o gás estava sendo chocado e o índice de cor, neste mesmo lado dos braços, era mais azul.

Schweizer<sup>[45]</sup> (1976), num estudo de estrelas de população estelar velha e de estrelas jovens OB do disco galáctico, no sistema de filtros de Johnson, determinou que 70% da luminosidade no filtro B (banda azul) corresponde às estrelas OB, enquanto que as estrelas velhas só contribuem com 30%. Já no caso do filtro I a situação se invertia, pois 80% da luminosidade provém das estrelas velhas do disco. Devido a este fato, BC90 analisaram as galáxias NGC7479 e NGC1835 nestas duas bandas, determinando que existia um deslocamento sistemático da fase dos braços espirais, quando comparada nas duas cores. Este deslocamento da fase, nada mais é do que a posição relativa da frente de choque com respeito à perturbação da ODE. Dito de uma maneira mais simples: quando o padrão perturbador passa por uma região do disco, estrelas são geradas continuamente, as quais devido à velocidade relativa entre o padrão espiral e o disco começam a ficar para trás da perturbação, na medida em que ficam mais velhas, por causa do movimento relativo entre a ODE e o disco. A *fig. 2.1* mostra esquematicamente o deslocamento de fase correspondente a frente de choque e a ODE.

A **ressonância de corrotação** acontece quando a velocidade angular da perturbação (padrão espiral),  $\Omega_p$ , e do disco estelar,  $\Omega$ , coincidem, isto é,  $\Omega_p = \Omega$ <sup>§</sup>. Com efeito, pode-se afirmar que a formação estelar induzida por choques (num cenário de ODE) produz uma distribuição azimutal de idades através dos braços espirais. Isto pode ser percebido que a frente de choque e a perturbação na direção radial sobre uma inversão da ordem na qual aparecem as populações estelares dos discos velho e novo através do braço na direção radial. Puerari & Dottori<sup>[39]</sup> (1977), com o fim de detectar esta inversão (que indica a posição da corrotação) analisaram o comportamento relativo das fases da ODE e da frente de choque,  $\Theta_{ode}$  e  $\Theta_{fc}$ , respectivamente, por meio da transformada de Fourier aplicada aos

---

<sup>‡</sup>Veja seção 2.3.3.

<sup>§</sup>Como a *ressonância de corrotação* corresponde a uma região em particular da galáxia, atribui-se um *raio de corrotação* que identifica a posição daquela ressonância, aqui definido por  $R_{CR}$ .

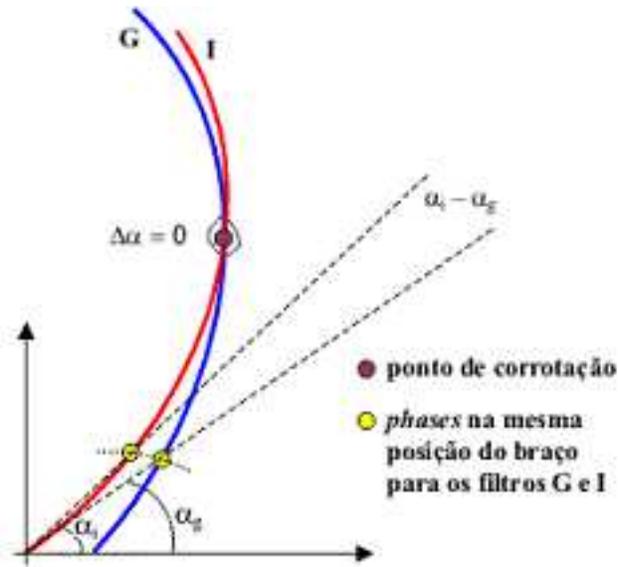


Figura 2.1: Esquema que mostra o deslocamento de fase nas bandas  $g$  (frente de choque) e  $i$  (onda de densidade espiral).

perfis azimutais  $I_r(\theta)$ . Esta transformada de Fourier pode ser escrita como:

$$(2-1) \quad \mathcal{F}(r) = \int_{-\pi}^{+\pi} I_r(\theta) e^{-2i\theta} d\theta,$$

e a fase  $\Theta$  é obtida por meio da relação:

$$(2-2) \quad \Theta(r) = \tan^{-1} \frac{\Re[\mathcal{F}(r)]}{\Im[\mathcal{F}(r)]},$$

onde  $\Re$  e  $\Im$  correspondem às partes real e imaginária dos coeficientes complexos de Fourier.

### 2.1.3 Diagramas de Fase e de Diferença de Fase

A partir da argumentação anterior constroem-se os diagramas de fase, os quais apresentam o comportamento relativo da frente de choque e da ODE, conforme mostra a *fig. 2.2*. Esta figura apresenta espirais de dois braços do tipo S e Z. Neste trabalho a frente de choque é representada pela banda  $G$  (ou  $R$ ), enquanto a ODE é representada pela banda  $I$ . Assumindo que a velocidade angular do padrão espiral é aproximadamente constante em toda a extensão do disco e que o disco possui uma rotação diferencial, na região dentro do raio de corotação (na *fig. 2.2* corresponde ao ponto onde acontece a inversão da posição da frente de choque) o disco está *batendo* no padrão perturbador, enquanto que para fora do círculo de corotação é o padrão perturbador que *bate* no disco. Este fenômeno acontece devido às velocidades relativas do disco e da ODE serem *iguais* na corotação.

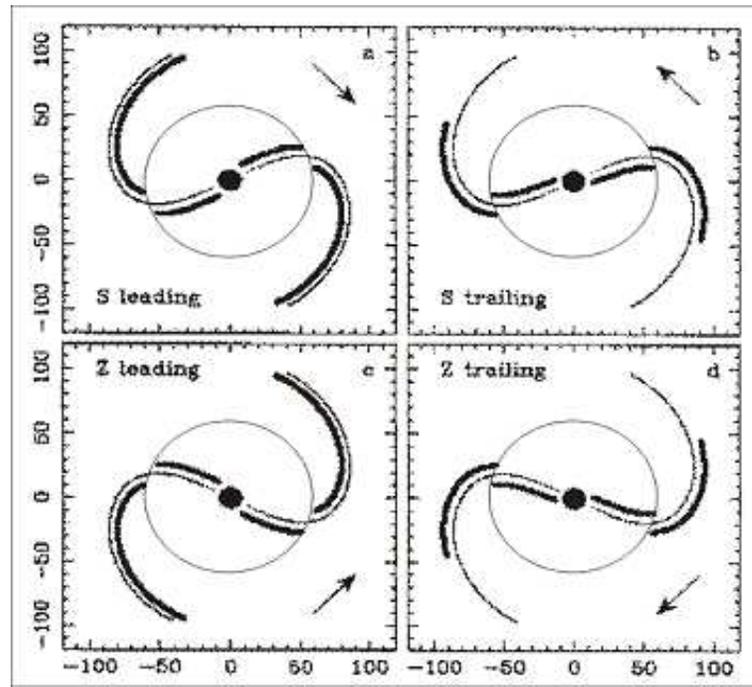


Figura 2.2: A posição da frente de choque (linha grossa) com respeito à ODE (linha fina) para espirais do tipo S: (a) leading e (b) trailing; e espirais do tipo Z: (c) leading e (d) trailing. Em cada caso, as setas indicam o sentido de rotação do disco.

A *figura 1.2* é importante nos casos em que a mudança na fase é suficientemente clara e atinge valores que, neste diagrama, são facilmente identificáveis. No entanto, existem casos em que aparecem variações muito sutis e se torna difícil identificar claramente o ponto de corrotação nos diagramas de fase. Com efeito, constroem-se os diagramas das diferenças de fase, como se observa na *fig. 2.4*. Estes diagramas permitem identificar o tipo de espiral, S ou Z e, conseqüentemente, é possível determinar o caráter *leading* ou *trailing* dessa estrutura espiral (*seção 2.3.2*).

#### 2.1.4 Transformada de Fourier bidimensional

Este método foi introduzido na análise de estruturas espirais de galáxias por Kalnajs<sup>[27]</sup> (1975), para estudar a distribuição de regiões HII, de associações OB e de gás neutro (HI) da galáxia de Andrômeda. Distribuições de regiões HII de galáxias externas foram analisadas em Considère & Athanassoula<sup>[11]</sup> (1982) e Puerari & Dottori<sup>[37]</sup> (1990). Iye et al. (1982), Iye (1983), Schlosser & Musculus (1984) e Considère & Athanassoula<sup>[12]</sup> (1988) utilizaram um método análogo para analisar a distribuição de luz de galáxias a partir de imagens obtidas no filtro *B*. Mais adiante este método foi aplicado por Villamizar<sup>[51]</sup> et al. (2001)

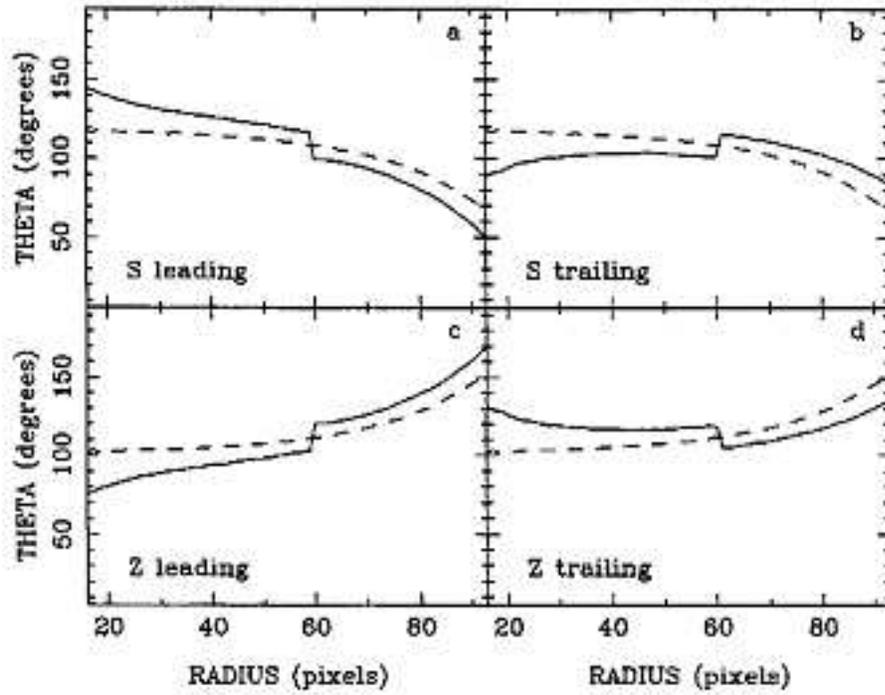


Figura 2.3: Comportamento relativo da fase  $\Theta(r)$  da ODE (linha tracejada) e da frente de choque (linha contínua) para os casos mostrados na figura anterior (P&D, 1997).

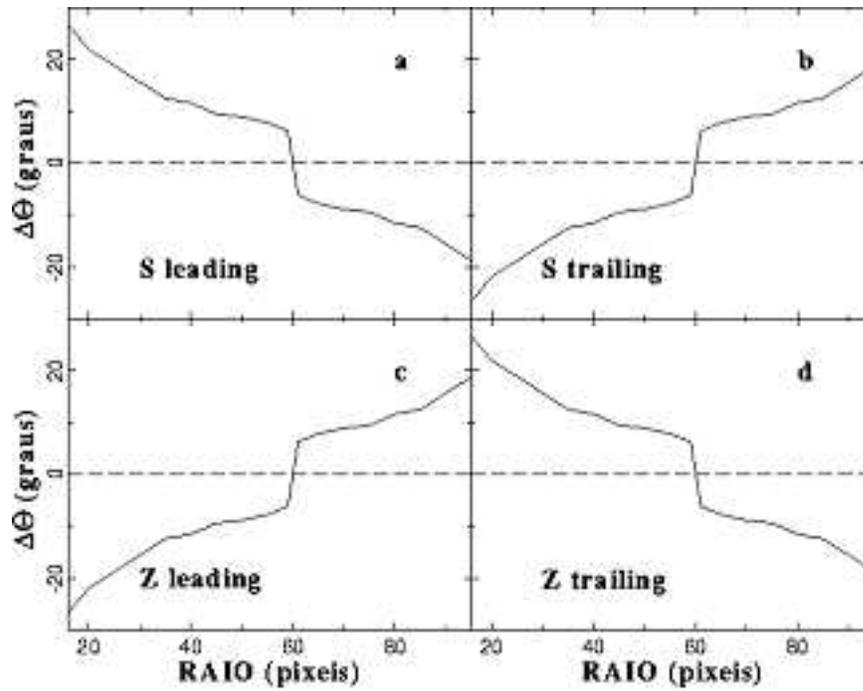


Figura 2.4: Diagramas de diferença de fase construídos a partir da fig. 2.3.

na análise das galáxias NGC1365, NGC1566 e NGC2997 para obtenção das ressonâncias de corotação para a componente  $m = 2$ <sup>¶</sup>.

Uma função  $f(x)$  que satisfaz as condições de integrabilidade pode ser escrita em termos de sua transformada de Fourier na forma

$$(2-3) \quad \mathcal{F}[f(x)] = F(k) = \int_{-\infty}^{+\infty} f(x) e^{-ikx} dx.$$

Sendo  $F(k)$ , conhecida como *transformada de Fourier* de  $f(x)$ , pode-se recuperar esta função calculando a *transformada inversa* de  $F(k)$ , expressa da seguinte forma

$$(2-4) \quad \mathcal{F}^{-1}[F(k)] = f(x) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} F(k) e^{-ikx} dk.$$

Outrossim, para uma função de duas variáveis a extensão é natural. Pode-se escrever, então,

$$(2-5) \quad \mathcal{F}[f(x, y)] = F(k, l) = \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} f(x, y) e^{-i(kx+ly)} dx dy,$$

e, analogamente,

$$(2-6) \quad \mathcal{F}^{-1}[F(k, l)] = f(x, y) = \frac{1}{4\pi^2} \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} F(k, l) e^{-i(kx+ly)} dk dl.$$

No caso de galáxias espirais é conveniente escrever a transformada de Fourier em outro sistema de coordenadas que seja função das coordenadas  $x$  e  $y$ , estas usadas nas *equações 2.5 e 2.6*. Uma espiral logarítmica (*seção 1.3*) é definida em coordenadas polares pelas *equações 2.22 e 2.23*. A partir deste novo sistema de coordenadas, deseja-se escrever a distribuição de densidade contínua  $I(u, \theta)$ , a qual corresponde à matriz discreta  $I(u_k, \theta_l)$ . Esta matriz pode ser expandida em série de Fourier no ângulo azimutal  $\theta$  e numa integral sobre o logaritmo do raio  $u$ . Portanto,

$$(2-7) \quad I(u, \theta) = \frac{1}{2\pi} \sum_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} A(p, m) e^{-i(pu+m\theta)} dp,$$

onde  $m$  é o número de onda azimutal ou o número de braços espirais, e  $p$  é o número de onda radial logarítmico ou a medida da direção e do grau de enrolamento dos braços espirais<sup>||</sup>.

O coeficiente de Fourier,  $A(p, m)$ , é a intensidade da componente que tem uma forma espiral logarítmica com  $m$  braços que possuem um valor de *pitch angle*  $\alpha = \tan^{-1}(-m/p)$ . O ângulo de fase  $\phi$  da componente  $A(p, m)$  é definido como  $\phi = \arg[A(p, m)]$ . As componentes com  $p$  positivo têm o enrolamento em forma de S, isto é, o padrão espiral está

<sup>¶</sup>Neste trabalho foram obtidas *ressonâncias de corotação* para as componentes  $m = 1, 2, 3$ ; entretanto, o maior número de CR's obtido foi para a componente  $m = 2$ .

<sup>||</sup>Seção 2.3.1.

enrolado em sentido horário. Aquelas com  $p$  negativo têm sentido Z (anti-horário), e aquelas com  $p = 0$  não têm forma espiral, mas apresentam forma de barra. Baseados na sua simetria pode-se afirmar que a intensidade da estrutura da barra ou das distorções ovais do disco é mais apropriadamente representada pela componente de Fourier  $A(0, 2)$ .

A componente de Fourier  $A(p, m)$  é obtida fazendo-se a transformada de Fourier em  $I(r, \theta)$ , de forma que

$$\begin{aligned}
 (2-8) \quad A(p, m) &= \frac{1}{\sum_{k'=1}^{m'} \sum_{l'=1}^{n'} w_{k'l'}} \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\pi}^{+\pi} \sum_{k'=1}^{m'} \sum_{l'=1}^{n'} w_{k'l'} \delta(u - u_{k'l'}) \\
 &\times \delta(\theta - \theta_{k'l'}) e^{-i(pu+m\theta)} du d\theta \\
 &= \frac{1}{\sum_{k'=1}^{m'} \sum_{l'=1}^{n'} w_{k'l'}} \sum_{k'=1}^{m'} \sum_{l'=1}^{n'} w_{k'l'} e^{-i(pu+m\theta)},
 \end{aligned}$$

onde  $w_{kl}$  é o peso  $(k, l)$  que está localizado nas coordenadas  $(r_{kl}, \theta_{kl})$  e  $u_{kl} = \ln(r_{kl})$ .

Utilizou-se um algoritmo conhecido como Transformada Rápida de Fourier (FFT), para obter a matriz  $A(p_i, m)$  da transformada de Fourier discreta computada na matriz  $I(u_k, \theta_l)$ . O algoritmo da FFT estabelece limites na resolução máxima espectral e no intervalo espectral, isto é, ela só pode ser aplicada a dados igualmente espaçados, e tem a limitação de que os valores de  $M$  e  $N$ , que correspondem às dimensões da matriz que contem a distribuição de intensidades em coordenadas  $(u, \theta)$ , devem ser uma potência de 2. Neste trabalho, as resoluções máximas em  $p$  e  $m$  são  $\Delta p = 2\pi/(\Delta r \times M)$  e  $\Delta m = 1$ , respectivamente, e o espectro se estende por  $-(M/2 - 1)\Delta p \leq p \leq (M/2)\Delta p$  e  $-(M/2 - 1) \leq m \leq (M/2)$ , onde  $M$  é a dimensão da matriz  $I(u_k, \theta_l)$ . É importante ressaltar que o valor de  $\Delta p$  nos fornece a precisão com que está sendo medido um determinado pico no espectro de frequências. Adota-se no espectro de Fourier para as espirais logarítmicas aqui analisadas, as componentes  $1 \leq m \leq 6$  no intervalo  $-50 \leq p \leq 50$ , para  $\Delta m = 1$ , e com resolução máxima  $\Delta p = 0.25$ . Além do mais, o espectro da componente mais relevante tem amplitude 1 para a relação  $-m/p$ , e todos os demais espectros são normalizados em relação àquela componente. No caso das galáxias, a representação analítica dos braços representa uma aproximação do fenômeno real. Interações com outras galáxias, por exemplo, podem deformar os espectros de frequência de Fourier criando assimetrias, ou mais alargado, e outras distorções. Quando a dispersão é tal que o pico do espectro tem amplitude menor que 0.5, todos os harmônicos terão amplitudes próximas a zero (Considère & Athanasoula<sup>[11]</sup>, 1982).

A transformada inversa das funções complexas  $A(p, m)$  deve reconstituir a imagem da galáxia. A densidade superficial (função complexa) é, então, calculada pela equação:

$$(2-9) \quad S(r, \theta) = \sum_m S_m(u) e^{im\theta},$$

onde

$$(2-10) \quad S_m(u) = \frac{\sum_{k'=1}^{m'} \sum_{l'=1}^{n'} w_{k'l'}}{e^{2u4\pi^2}} \int_{-\infty}^{+\infty} G_m(p) A(p, m) e^{ipu} du,$$

e

$$(2-11) \quad G_m(p) = \exp \left\{ -\frac{1}{2} \left[ \left( \frac{p - p_{max}}{25} \right)^2 \right] \right\},$$

sendo  $p_{max}$  o valor de  $p$  para o qual o espectro de um determinado  $m$  é máximo em amplitude.

A expressão (2-11) representa um filtro de altas frequências que faz com que os valores da função  $A(p, m)$  tendem a zero nos limites do intervalo estabelecido\*\*. Esta condição é necessária para se aplicar a expressão (2.9), calculando-se a integral no intervalo  $-50 \leq p \leq 50$ .

Com as expressões (2.8) e (2.9) podem ser obtidos muitos resultados. Por exemplo, a função  $|S_0(r)|$ , que é independente de  $\theta$ , fornece a distribuição radial de intensidades como lida na matriz *face-on* de intensidades  $I_F(x_i, y_i)$ . As demais funções  $|S_m(r)|$  serão discutidas em cada caso particular das galáxias paradigmáticas. Pode-se adiantar que estas funções revelam em que posição da galáxia uma determinada componente é dominante. Mas quando se recupera a função  $S_m(r)e^{im\theta}$  para uma determinada componente  $m$ , obtém-se uma imagem da transformada inversa correspondente aos valores específicos de  $m$ ; neste caso, somente a parte real e positiva da função é desenhada. Uma grande vantagem deste método é que se pode desenhar as componentes individuais da transformada inversa ou somar as componentes principais. As imagens da transformada inversa são aqui denominadas de *imagens sintéticas*.

### 2.1.5 Método de Elmegreen de simetrização de imagens

Este método é proposto e desenvolvido por Elmegreen, Elmegreen e Montenegro<sup>[19]</sup>(1992) (doravante, EEM92). Inicialmente eles notaram que existiam muitas galáxias espirais que apresentavam uma transição de uma estrutura predominante de dois braços nas regiões internas, a uma estrutura de braços múltiplos nas regiões externas. Kalnajs<sup>[28]</sup> em 1983 tinha proposto a separação das componentes simétricas em galáxias espirais, usando sucessivas rotações e subtrações em imagens de galáxias, e foi precisamente nesta idéia que EEM92 se espelharam para conseguir separar componentes de 2 e 3 braços em galáxias espirais.

---

\*\*Os limites do intervalo em  $p$  foram estabelecidos haja visto que não tem sido observados valores maiores que  $p = 50$ , pois no caso  $m = 2$ , corresponderia a uma espiral muito enrolada com  $i = 2^\circ$ .

Este método, também conhecido como *simetrização das imagens*, é resolvido através de sucessivas rotações e subtrações das imagens das galáxias. Neste trabalho usamos tarefas do IRAF na aplicação deste método.

Uma imagem contendo tudo que não é simétrico na galáxia (que chamaremos  $A_2$ ) pode ser produzida fazendo uma subtração da imagem  $I(r, \theta)$  uma imagem  $[I(r, \theta + \pi)]$  rotada um ângulo de  $180^\circ$  com relação à original, isto é:

$$(2-12) \quad A_2 = [I(r, \theta) - I(r, \theta + \pi)]_T,$$

onde o sufixo T indica truncamento, ou seja, os píxeis com valores negativos são tomados nulos. A parte bissimétrica de uma galáxia (que chamaremos  $S_2$ ) é a diferença entre a imagem original  $I(r, \theta)$  e a imagem contendo a parte anti-simétrica, isto é:

$$(2-13) \quad S_2 = \{I(r, \theta) - [I(r, \theta) - I(r, \theta + \pi)]_T\}_T.$$

Já a estrutura de três braços (chamada de  $S_3$ ) pode ser obtida seguindo a mesma linha de raciocínio da imagem  $S_2$ . Fazem-se duas imagens rotadas em um ângulo de  $120^\circ$  nos sentidos anti-horário e horário sucessivamente e, depois, estas subtraídas da imagem original  $I(r, \theta)$ , isto é:

$$(2-14) \quad S_3 = \{2I(r, \theta) - [I(r, \theta) - I(r, \theta + 2\pi/3)]_T - [I(r, \theta) - I(r, \theta - 2\pi/3)]_T\}_T.$$

## 2.2 Tratamento das Imagens

O procedimento geral para o cálculo das diferenças de fase pressupõe que as imagens originais, em determinado filtro, foram trabalhadas no sentido de deprojetá-las e de retirar as estrelas de campo e, depois de combinadas, produzir uma imagem bi-dimensional “alisada” a partir do perfil radial do disco. Estes procedimentos levam a três métodos: (i) imagens *derivadas das originais*, (ii) imagens *simetrizadas* resultantes do método de Elme-green (EEM92) aplicado com scripts feitos no IRAF, e (iii) imagens *sintéticas* a partir da antitransformada de Fourier, todas nas bandas  $g$  e  $i$ .

### 2.2.1 Redimensionamento das imagens

Ao calcular as Transformadas de Fourier das imagens das galáxias, ocorria problemas de alocação de memória no processo computacional, face ao tamanho das matrizes correspondentes a estas imagens. Face a estas limitações de memória, o tamanho das imagens devia ser limitado a matrizes de, no máximo,  $700 \times 700$  píxeis.

O detector CCD utilizado para obter as imagens tem 1024x1024 píxeis e, portanto, as imagens deviam ser ajustadas ao tamanho requerido pelo sistema. Algumas das galáxias observadas ocupavam uma área menor e, neste caso, foi utilizado o algoritmo “imcopy” (pacote IRAF v.2.20) para tirar a borda da imagem que não seria utilizada. A vantagem apresentada por este algoritmo é que permite escolher “pedaços” de imagens, que depois serão copiados num novo arquivo de imagem. Mas, outras galáxias excedem o tamanho máximo admitido pelo sistema. Neste caso não somente foi necessário recortar a borda das imagens, como também tivemos que diminuir o número de píxeis ocupado pela galáxia. Neste caso foi usado um outro algoritmo do pacote IRAF chamado “magnify”, que basicamente faz uma interpolação de píxeis para modificar o tamanho da imagem. Para determinar o fator de redimensionamento devemos calcular a razão entre o número de píxeis (individualmente no eixo x e y) da imagem original sobre o número de píxeis da imagem de saída. Assim, no caso de ter uma imagem de 800x800 píxeis e ao se pretender ajustá-la a uma matriz 500 × 500 píxeis, o fator de ampliação do píxel será  $800/500=1.6$ . Isto significa que devem-se produzir 500 × 500 píxeis, cujos tamanhos são 1,6 vezes maiores que o píxel da matriz original de 800 × 800 píxeis. É importante salientar que o critério para produzir ampliação é a conservação do fluxo (ou energia), de modo que os valores de fluxo dos píxeis são determinados pela inversa da razão de suas áreas.

### 2.2.2 Subtração de raios cósmicos

O próximo passo no processo de redução das imagens foi a extração de eventos de raios cósmicos.

Quando se está realizando uma observação de qualquer objeto astronômico, o CCD fica exposto à ação dos raios cósmicos. A marca desses eventos aparece na forma de pontos ou traços brilhantes sobre a imagem, elevando substancialmente as contagens nos píxeis atingidos. Isto faz com que ao calcular a Transformada de Fourier apareçam frequências espúrias que eventualmente ocultarão as contribuições reais da estrutura espiral. Usamos o algoritmo “cosmicrays” do pacote IRAF para substituir automaticamente os dos píxeis afetados, por um valor correspondente à média de seus 4 píxeis adjacentes.

### 2.2.3 Subtração das estrelas de campo

As estrelas de campo são também responsáveis pela geração de frequências espúrias na Transformada de Fourier.

Infelizmente ainda não existem algoritmos suficientemente adequados ao tratamento de imagens de galáxias, que façam a extração de estrelas de campo automaticamente. A única alternativa é fazer uma edição de cada imagem, retirando as estrelas manualmente; esta parte do processamento das imagens foi realizada com a rotina *imedit*. Este algoritmo

permite examinar e editar regiões de imagens píxel por píxel; é preciso conhecer dois parâmetros, o valor do fundo e o FWHM, os quais têm que ser especificados junto com o tipo de abertura que vai ser utilizada. No nosso caso, a abertura utilizada foi circular.

### 2.2.4 Deprojeção das imagens

As galáxias estão inclinadas randomicamente na nossa linha de visada. Assim, suas formas aparentes variam ainda que suas formas reais sejam iguais.

A inclinação de uma galáxia discoidal é o ângulo medido entre o disco e o plano do céu. Galáxias com inclinações de  $90^0$  são conhecidas como *edge-on*, enquanto que galáxias com uma inclinação de  $0^0$  são chamadas *face-on*. Os discos das galáxias são praticamente circulares quando enxergamos de frente (*face-on*), sendo que uma galáxia inclinada um certo  $\beta$  apresentará um formato elíptico. O catálogo “Third Reference Catalogue of Bright Galaxies” (RC3), apresenta os valores da razão dos eixos das elipses para quase a totalidade das galáxias espirais conhecidas. A inclinação  $\beta$  pode ser determinada por

$$(2-15) \quad \beta = \arccos(b/a),$$

onde  $a$  e  $b$  são os semi-eixos da elipse projetada no céu. O catálogo RC3 apresenta o  $\log(R_{25})$ , onde  $R_{25}$  corresponde à razão do eixo menor sobre o eixo maior da elipse e o subscrito 25 refere-se ao nível de luminosidade de  $25 \text{ mag arc sec}^{-2}$ . Ainda no RC3 encontra-se o valor do ângulo de posição da galáxia; este é o ângulo do eixo maior do disco projetado no plano do céu, medido com respeito ao norte, e no sentido leste.

O conhecimento dos ângulos de inclinação e posição permitem deprojetar a imagem da galáxia. Para tanto, usamos a tarefa *imlnttran* do pacote do IRAF. Ao fazer a deprojeção, tomamos o cuidado para que a área do céu da imagem original corresponde à mesma área do céu para a imagem deprojetada, isto é, o fluxo é conservado, da mesma maneira quando ampliamos uma imagem de galáxia.

### 2.2.5 Contraste das estruturas espirais

As galáxias têm um intervalo de brilho muito grande entre o núcleo e as extensões mais fracas, e os detectores têm um intervalo dinâmico relativamente pequeno para poder representar de uma vez este intervalo de intensidades. Assim, as imagens aparecem super-expostas no núcleo da galáxia ou são muito fracas nas regiões externas. Estas regiões externas são de grande importância porque permitem saber o raio de máxima extensão dos braços espirais. É importante salientar neste ponto que os braços espirais são, de fato, muito fracos nas imagens no vermelho e infravermelho (bandas I, J, H e K), as quais mostram a perturbação original nas estrelas do disco. Para contornar este problema foi implementado um processo de contraste dos detalhes de luminosidade baixa.

Primeiramente, se construiu um perfil radial com média azimutal, que pode ser calculado através da expressão:

$$(2-16) \quad \bar{I}_\theta(r) = \sum_\theta I(r, \theta)/N,$$

onde  $I(r, \theta)$  é o valor da intensidade da matriz original no píxel  $(r, \theta)$  e  $N$  representa o número de píxeis utilizados para calcular a média em cada raio  $r$ . Este perfil radial é transformado numa imagem simétrica, representando um disco de brilho uniforme. Finalmente, este disco é subtraído da imagem original restando a estrutura de braços contrastada, ou seja,

$$(2-17) \quad \bar{I}_p(r, \theta) = I(r, \theta) - \bar{I}_\theta(r).$$

Uma importante consequência da expressão anterior é o aparecimento de um buraco na região central da galáxia. Este fenômeno acontece por causa dos valores de intensidade média,  $\bar{I}_\theta(r)$ , na região central serem muito altos. Para corrigir este problema é feito uma normalização da imagem a um valor de RMS ( $\sigma$ ) constante, ou seja, uma medida do espalhamento dos valores com respeito a uma média. Define-se então o valor RMS para cada raio através da expressão:

$$(2-18) \quad RMS(r) = \sqrt{\sum_\theta [I(r, \theta) - \bar{I}_\theta(r)]^2 / N}.$$

Com efeito, a normalização da imagem a um valor de RMS constante é feita multiplicando-se todos os píxeis, localizados a uma mesma distância  $r$ , por  $B(r) = c/RMS(r)$ , onde a constante  $c$  é calculada como a média dos valores RMS(r), isto é,  $c = \sum_r \overline{RMS}/n$ , onde  $n$  corresponde ao número de valores  $\overline{RMS}$  obtidos através da matriz  $I(r, \theta)$ .

O processo de contraste faz perder informação sobre a intensidade relativa entre as diversas partes da estrutura espiral, mas a princípio não modifica a curvatura do mesmo. É de muita importância a determinação do valor exato da extensão da estrutura espiral bissimétrica, já que este valor nos permite estimar a localização da ressonância externa de Lindblad, e eventualmente a presença de padrões externos mais fracos. O método de subtração do disco exponencial nos permite determinar este valor com uma boa precisão.

### 2.3 A estrutura espiral extensiva

Na dinâmica das galáxias discoidais alguns elementos e conceitos são muito importantes na descrição dos braços espirais, como a definição de *pitch angle*, frequência epicíclica, ressonâncias, entre outros. Assim, é feito uma rápida introdução a estes elementos, bem como se introduz o método de Canzian usado no desenvolvimento deste trabalho.

Ao estudar o comportamento do padrão em galáxias espirais, é conveniente representar matematicamente as estruturas espirais. Um potencial perturbador pode ser escrito em notação de ondas como (Athanasoula, 1984):

$$(2-19) \quad \Phi(r, \theta, t) = A(r) \exp\{i[\Psi(r) + \Omega_p t - m\theta]\},$$

onde  $r$  e  $\theta$  são as coordenadas polares galactocêntricas,  $A(r)$  é a amplitude de oscilação da onda,  $\Omega_p$  é uma frequência de oscilação que independe de  $r$ ,  $m$  corresponde ao número de braços espirais como indica a *fig. 2.5*, e  $\Psi(r)$  é o termo de fase radial da onda. Portanto, curvas com fase constante obtêm-se da expressão:

$$(2-20) \quad \Psi(r) + \Omega_p t - m\theta = \text{constante},$$

onde, tomando o tempo e a constante com valor igual a zero, obtêm-se:

$$(2-21) \quad \Psi(r) - m\theta = 0.$$

Esta última relação representa as propriedades geométricas básicas de espirais simples para toda função  $\Psi(r)$  monotonicamente crescente. Muitos autores mostraram que as espirais logarítmicas,  $\Psi(r) = \alpha \ln(r)$ , representam com precisão os braços das galáxias discoidais (Groot<sup>[22,23]</sup>, 1925, 1926; Reynoldst<sup>[40]</sup>, 1925; Rots<sup>[42]</sup> & Shanet<sup>[10]</sup>, 1974; Rots<sup>[10]</sup>, 1975; Boeshaart<sup>[8]</sup> & Hodge, 1977). Por exemplo, no trabalho pioneiro de Groot foi feita uma análise de várias espirais que incluía espirais de Arquimedes, hiperbólicas e espirais de Cotes, juntamente com espirais logarítmicas, concluindo que estas últimas são as que melhor se ajustam aos braços de galáxias *grand design*.

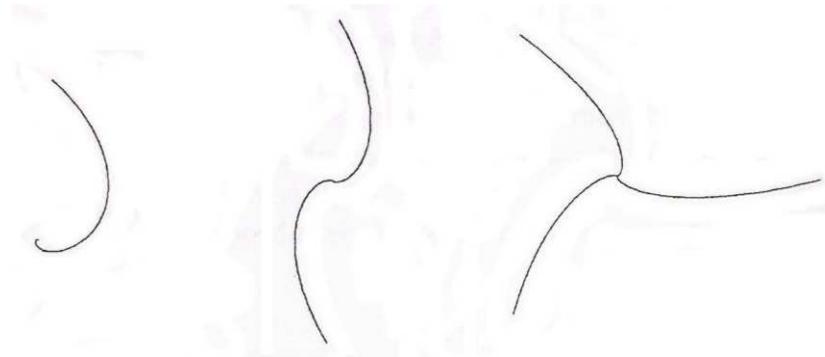


Figura 2.5: Espirais de periodicidades angulares  $m = 1, 2, 3$ .

### 2.3.1 *Pitch Angle*

No estudo da dinâmica das estruturas espirais, o *pitch angle* é um parâmetro fundamental, pois mede o grau de enrolamento dos braços espirais. Pode-se medir este ângulo traçando

um círculo num determinado raio ao redor do núcleo e medindo o ângulo entre a tangente ao círculo e a tangente à espiral, de acordo com a *fig. 2.6*. Com efeito, vê-se que braços fortemente enrolados têm *pitch angle* muito pequenos. Tipicamente eles têm valores que vão deste  $5^\circ$  nas espirais Sa (que possuem braços espirais bastante "enrolados"), até  $40^\circ$  nas espirais Sc (que apresentam uma estrutura espiral bastante "aberta"). O caso extremo acontece na presença de barras, que podem ser interpretadas como estruturas espirais com *pitch angle* de  $90^\circ$ .

Na caracterização dos braços espirais, relativo ao estudo de casos das galáxias deste trabalho, teve-se como base as espirais do tipo logarítmicas. Com efeito, para definir matematicamente o *pitch angle*, a espiral logarítmica é definida em coordenadas polares pela expressão:

$$(2-22) \quad r = r_0 e^{-(m/p)\theta},$$

onde  $m$  é a periodicidade angular ou o número de braços espirais,  $r$  e  $\theta$  são as coordenadas polares. Portanto,  $p$  é a variável relacionada com o *pitch angle  $\alpha$  da espiral, através da expressão:*

$$(2-23) \quad \tan \alpha = -m/p, \quad \text{ou} \quad \alpha = \tan^{-1}(-m/p).$$

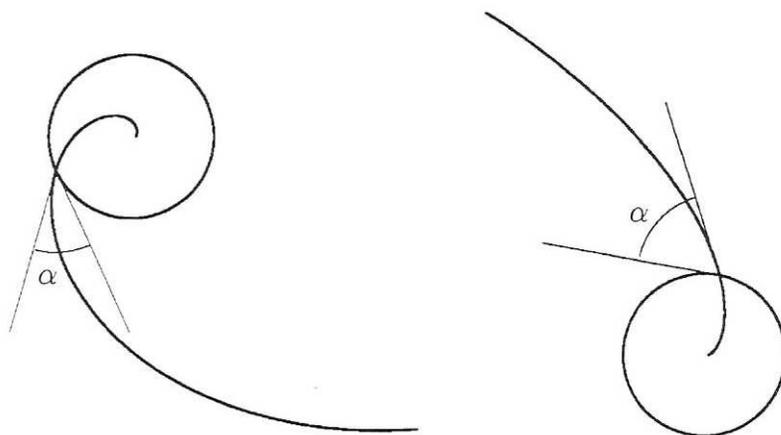


Figura 2.6: Definição de *pitch angle* ( $\alpha$ ) nos braços espirais. A figura mostra que um braço mais enrolado tem um menor valor de  $\alpha$  (à esquerda), enquanto um braço menos enrolado fornece um maior valor de  $\alpha$  (à direita).

Em muitas galáxias, o *pitch angle* é aproximadamente constante para toda a extensão dos braços espirais em função do raio. Variações no *pitch angle* fornecem importante informação a respeito das origens da estrutura espiral numa galáxia específica.

### 2.3.2 Caráter *leading* e *trailing*

Outra característica relevante é a determinação do caráter *leading* ou *trailing* dos braços espirais. Um braço espiral é *leading* quando está enrolado na mesma direção que a rotação do disco galáctico. O caso contrário, quando o sentido do enrolamento do braço é contrário à direção do disco galáctico, é conhecido como braço *trailing*. Assim, para uma galáxia que rota no sentido contrário ao dos ponteiros do relógio, um *pitch angle* positivo, corresponde a uma espiral do tipo *leading* e um *pitch angle* negativo corresponderá a um braço espiral do tipo *trailing*, como se observa na *fig. 2.7*.

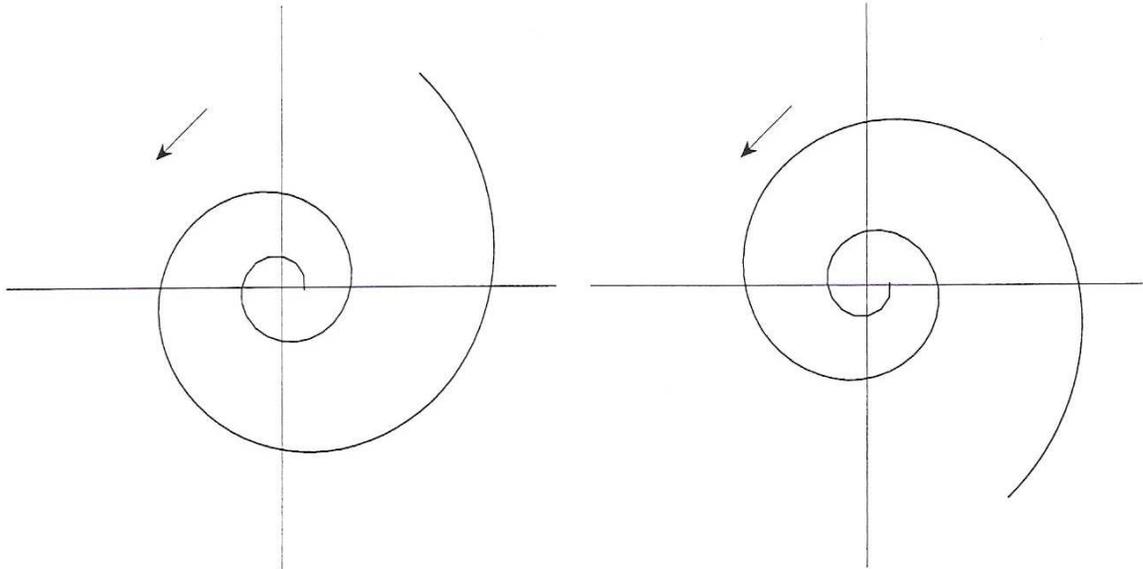


Figura 2.7: Padrões espirais: à esquerda, *leading* e à direita, *trailing*. A seta aponta o sentido de rotação do disco da galáxia.

### 2.3.3 Frequência epicíclica e Ressonâncias de Lindblad

Uma galáxia discoidal é constituída de estrelas, gás, nuvens moleculares, poeira, campos magnéticos e partículas cósmicas, e todo esse material rotaciona em torno de seu núcleo. O gás e as estrelas no disco de uma galáxia se movimentam em órbitas aproximadamente circulares, a menos que estejam se movimentando na vizinhança de uma barra. As estrelas oscilam nas suas órbitas por causa de perturbações geradas pelos efeitos gravitacionais combinados de outros objetos e também devido às componentes aleatórias iniciais da velocidade da nuvem molecular da qual foram formadas. Essa oscilações em torno da órbita circular à distância  $R$  podem ser descritas num sistema de referência não inercial, que gira a esta distância  $R$ , com velocidade angular igual à velocidade do disco nesse círculo, por órbitas em forma de elipses (conhecido como *epiciclos*) na medida em que as estrelas se movimentam radialmente para dentro ou para fora no disco galáctico (Athanasoula<sup>[1]</sup>, 1984). Essa

frequência de oscilação é chamada de *frequência epicíclica*. Um tratamento completo do problema pode-se encontrar em Binney & Tremaine, 1994 (*veja equação 2-8*).

Considere a existência de uma onda de densidade com velocidade angular  $\Omega_p$ ; da velocidade de rotação  $\Omega(R)$  do disco, define-se a frequência epicíclica  $\kappa(R)$  na forma (Binney & Tremaine<sup>[5]</sup>, 1987)

$$(2-24) \quad \kappa(R) \equiv \left[ 2 \frac{V}{R} \left( \frac{dV}{dR} + \frac{V}{R} \right) \right]^{1/2} = 2\Omega(r) \left( 1 + \frac{1}{2} \frac{d \ln \Omega(r)}{d \ln r} \right)^{1/2}.$$

O movimento das estrelas no disco num sistema co-rotante com o padrão espiral fica governando por duas frequências:  $\Omega(r) - \Omega_p$  e  $\kappa(R)$ . Define-se, portanto, a frequência relativa:

$$(2-25) \quad \nu = \frac{m}{\kappa(R)} [\Omega_p - \Omega(R)].$$

Quando  $\nu$  é um número racional há uma ressonância. Na maioria dos sistemas a componente principal é bissimétrica ( $m = 2$ ). As ressonâncias principais são a ressonância interna de Lindblad (ILR), o raio de corrotação (CR) e a ressonância externa de Lindblad (OLR), que ocorrem quando  $\nu = -1, 0, +1$ , respectivamente. Para outros valores de  $m$ , as ressonâncias se localizam em

$$(2-26) \quad \Omega_p = \Omega(r) \pm \frac{\kappa(R)}{m},$$

onde  $\kappa$  é a frequência epicíclica, o sinal mais refere-se à *OLR*, o sinal menos à *ILR*, e  $m$  é o número de braços espirais. Esta última equação mostra que uma ressonância acontece quando a diferença entre a velocidade angular do disco e a velocidade da perturbação é um múltiplo integral da frequência epicíclica. Considera-se neste trabalho um número significativo de galáxias espirais que possuem componentes  $m = 2$ , ou seja, aquelas que apresentam ressonâncias de corrotação correspondente a esta componente. A *fig. 2.8* mostra o gráfico da frequência angular calculada para uma curva de rotação plana.  $\Omega - \kappa/2$  é uma função decrescente exterior à *ILR*.

### 2.3.4 O Método de Canzian

A estrutura espiral das galáxias de disco está restrita entre a *ressonância interna de Lindblad (ILR)* e a *ressonância externa de Lindblad (OLR)* do padrão espiral, de acordo com Canzian<sup>[10]</sup> (1998). Como consequência, a *ressonância de corrotação (CR)* está limitada entre a *ILR* e *OLR*. Este autor coloca que, para testar a posição do raio da *CR* dentro do disco luminoso, primeiro mede-se a extensão interna ( $R_1$ ) e externa ( $R_2$ ) da estrutura espiral da imagem numa inspeção típica da mesma. Estas extensões podem ser medidas a partir da análise das funções de densidade radial, os quais são obtidas da transformada de

Fourier unidimensional. O trabalho de Canzian se limita ao estudo das estruturas espirais extensivas, e estas, na sua grande maioria, perfazem o conteúdo deste trabalho. Em geral, estas estruturas têm uma curva de rotação plana. Vamos enfatizar rapidamente as condições nas quais testam a validade das ressonâncias de corrotação para a estrutura de dois braços espirais.

Considere uma curva de rotação plana. No raio correspondente à ressonância de corrotação ( $CR$ ), o material do disco tem uma frequência orbital igual à frequência angular do padrão espiral (*as estrelas e o padrão corrotam*), isto é,

$$(2-27) \quad \Omega_p = V/R_{CR}$$

na  $CR$ , onde  $\Omega_p$  é a frequência angular do padrão,  $V$  é a velocidade de rotação circular, e  $R_{CR}$  é o raio da ressonância de corrotação. Se uma estrela tem uma velocidade angular  $\Omega(R)$ , então a velocidade relativa da estrela com respeito ao padrão está dada pela diferença  $\Omega_p - \Omega(R)$ . Já vimos que, quando a frequência epicíclica é sincrônica com o movimento relativo do padrão espiral, é criada uma condição conhecida como *ressonância*. Com efeito, para uma curva de rotação plana, e a partir da definição (2-24), obtém-se:

$$(2-28) \quad \kappa = \sqrt{2}V/R.$$

Portanto, o teste para verificar se a estrutura espiral se ajusta a  $ILR$  e  $CR$ , ou seja, para  $R_{ILR} \leq R_1$ , implica que

$$(2-29) \quad (\Omega - \kappa/2)_{R_1} \leq (\Omega - \kappa/2)_{ILR} = V/R_{CR}.$$

Assim, as equações (2-28) e (2-29) levam à condição

$$(2-30) \quad R_{CR(i)} \leq (2 + \sqrt{2})R_1.$$

Outrossim, para o ajuste de  $OLR$  e  $CR$ , ou seja, para  $R_2 \leq R_{OLR}$ , implica que

$$(2-31) \quad (\Omega + \kappa/2)_{R_2} \geq (\Omega + \kappa/2)_{OLR} = V/R_{CR}.$$

Portanto, as equações (2-28) e (2-31) levam à condição

$$(2-32) \quad R_{CR(o)} \geq (2 - \sqrt{2})R_2.$$

Combinando as duas condições anteriores, leva à condição de que a característica da estrutura está limitada a

$$(2-33) \quad R_2 \leq (3 + 2\sqrt{2})R_1.$$

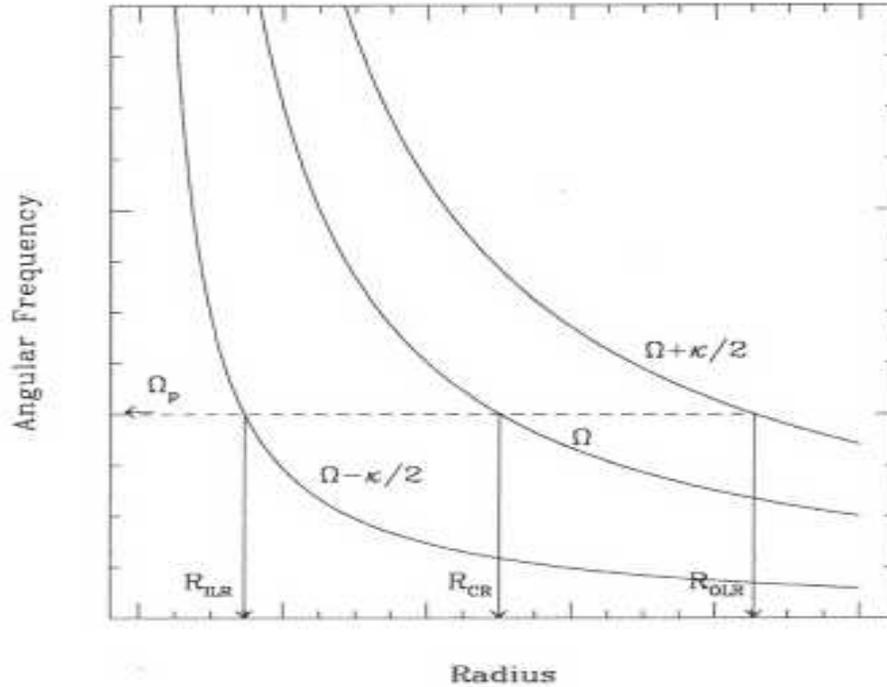


Figura 2.8: Esquema mostrando as frequências angulares (em unidades arbitrárias) para uma curva de rotação plana. A *frequência de rotação angular* é  $\Omega$ , e a *frequência epicíclica* é  $\kappa$ . A *velocidade do padrão* é  $\Omega_p$ . Ressonância de corrotação (CR) e ressonâncias interna (ILR) e externa (OLR) de Lindblad são identificadas (Canzian, 1998).

As equações 2-30, 2-32 e 2-33 são as condições de Canzian para testar a validade das ressonâncias de corrotação. Neste trabalho, elas foram aplicadas aos 22 raios de corrotação encontrados para a componente  $m = 2$ . A *tabela 8.1* descreve os resultados obtidos.

Finalmente, a partir da análise de fase e da comparação com o ruído de cada fase, obtemos os *diagramas das diferenças de fase* para os filtros  $g$  (ou  $r$ ) e  $i$ , a partir das imagens *originais*, das imagens *sintéticas* e das imagens *simetrizadas*. Este processo é extremamente importante, pois permitir determinar **as posições das ressonâncias de corrotação** para as estruturas espirais das galáxias. Em paralelo, testam-se estas corrotações pelo método de Canzian. Os diagramas de fase feitos através dos três métodos nos permitem estabelecer o comportamento do padrão perturbador ao redor da ressonância de corrotação, assim determinar o caráter *leading* ou *trailing*. Todo o processo descrito acima é a essência deste trabalho, pois permite uma melhor análise da perturbação em toda a extensão do disco.

Objeto	RA	DEC	Escala (kpc/pix)	Tamanho (pix)	Distância (Mpc)	Int. Lum. (m-M) mag
ic0167	01h51m08.5s	+21d54m46s	0.06953	600x600	36.6	32.82
ic0267	02h53m50.2s	+12d50m57s	0.08466	500x500	46.4	33.33
ic2421	08h54m21.6s	+32d40m51s	0.10396	500x500	64	34.03
ngc0019	00h10m40.9s	+32d58m59s	0.11359	300x300	61.9	33.96
ngc0036	00h11m22.3s	+06d23m22s	0.14305	600x600	78.9	34.49
ngc0047	00h14m30.6s	-07d10m03s	0.17793	500x500	74.4	34.36
ngc0060	00h15m58.2s	-00d18m13s	0.27946	400x400	162	36.05
ngc0070	00h18m22.5s	+30d04m46s	0.17003	400x400	95.4	34.90
ngc0622	01h36m00.1s	+00d39m49s	0.12244	300x300	67.5	34.15
ngc0753	01h57m42.2s	+35d54m58s	0.11632	500x500	64.6	34.05
ngc0772	01h59m19.6s	+19d00m27s	0.05865	698x698	30.3	32.41
ngc1073	02h43m40.6s	+01d22m33s	0.02875	698x698	13.5	30.66
ngc2336	07h27m04.0s	+80d10m41s	0.05229	700x700	30.3	32.40
ngc6951	20h37m14.1s	+66d06m20s	0.03038	700x700	17.4	31.20
ngc7479	23h04m56.6s	+12d19m22s	0.05649	700x700	27.7	32.21
ngc7678	23h28m27.9s	+22d25m16s	0.08277	400x400	43.3	33.18
ngc7741	23h43m54.4s	+26d04m32s	0.01782	600x600	5.54	28.72
ngc7753	23h47m04.8s	+29d29m00s	0.12260	600x600	67	34.13

Tabela 2.1: Dados relevantes das galáxias analisadas.

## 2.4 Amostra de galáxias espirais Gran-Design

**IC0167** É descrita como uma galáxia interagente por Bushouse & Stanford (1992) no seu atlas de imageamento no infravermelho próximo. É uma espiral classificada no RC3 como SA(rs)c e como tipo 9 no sistema E&E (Elmegreen & Elmegreen, 1987). Os diâmetros maior e menor desta galáxia são, na seqüência, 2.9 e 1.9 arcmin.

**IC0267** Esta galáxia foi classificada como de tipo 12 por EEM87, ou seja é uma galáxia *grand design* por excelência. Na imagem 103aE de Palomar (DSS, 1994) aparecem um par de braços muito tênues que saem de uma barra. O disco tem uma inclinação muito pequena segundo de Jong (1996 JAD 2, 1). Na classificação de Hubble seu tipo morfológico é SB(s)b. Os diâmetros maior e menor desta galáxia são, na seqüência, 2.0 e 1.6 arcmin.

**IC2421** Classificada como de tipo 12 por EEM87 no seu paper original. Esta galáxia é um protótipo para a análise que pretendemos realizar. No IPAC encontramos tão somente duas imagens, a do Palomar e as imagens nas bandas *J*, *H*, *K* do 2-MASS. No infravermelho, dentro do minuto de arco central aparece uma componente  $m=1$ , enquanto a placa do Palomar 103a-E mostra uma  $m=2$ . Na classificação de Hubble é SA(rs)c. Os diâmetros maior e menor desta galáxia são, na seqüência, 2.2 e 2.0 arcmin.

**NGC0019** Na imagem com placa 103aE, do Monte Palomar, esta galáxia mostra um disco ligeiramente inclinado e uma galáxia companheira muito pequena sem evidências de ação de maré forte. Na imagem infravermelha composta das cores *J*, *H* e *K* do 2-MASS, vê-se uma barra na direção N-S que ocupa praticamente todo o disco, intenso nesta cor. Os braços espirais saem a partir deste disco, ligeiramente deslocados em relação ao final da barra. O seu tipo morfológico é SB(r)bc. Os diâmetros maior e menor desta galáxia são, na seqüência, 1.2 e 0.6 arcmin.

**NGC0036** Em alguma medida esta galáxia se parece com a M51, já que na placa 103a-E do Monte Palomar, apresenta uma galáxia satélite a uma distância angular de aproximadamente um diâmetro galáctico. A mesma aparece também na imagem infravermelha do 2-MASS. Na imagem H, vê-se, na parte central, um par de braços em forma anelada. Apresenta tipo morfológico de SAB(rs)b. Os diâmetros maior e menor desta galáxia são, na seqüência, 2.2 e 1.3 arcmin.

**NGC0047** É uma galáxia que tem bojo brilhante e dois braços espirais bem definidos, um curto e outro longo, além de braços menores. No IPAC encontrou-se somente duas imagens, a do UKS Schmidt (new optics) e as imagens nas bandas *J*, *H*, *K* do 2-MASS. No infravermelho, dentro do minuto de arco central destaca-se uma componente  $m=1$ , enquanto a outra placa mostra a  $m=2$ . Na classificação de Hubble seu tipo é SB(rs)bc. Os diâmetros maior e menor desta galáxia são, na seqüência, 2.2 e 2.1 arcmin.

**NGC0060** Apresenta uma estrutura caótica e difusa, com dois braços fortes fragmentados do sul para o centro. É classificada como SA(r)cd. No IPAC há apenas duas imagens, a do UKS Schmidt (new optics) e as imagens nas bandas *J*, *H*, *K* do 2-MASS. Observa-se um bojo brilhante em contraste com as estruturas externas. Os diâmetros maior e menor desta galáxia são, na seqüência, 1.13 e 0.65 arcmin.

**NGC0070** Esta galáxia tem vários braços espirais, e apresentam-se aproximadamente simétricos. Há três fortes contaminações, que provavelmente afetam a sua luminosidade. O seu tipo morfológico é SA(rs)c. Os diâmetros maior e menor desta galáxia são, na seqüência, 2.0 e 1.6 arcmin.

**NGC0622** É uma galáxia com extensa barra, não simétrica em relação ao centro da galáxia. Apresenta várias estruturas além dos braços espirais, inclusive um tênue anel em torno da barra; isto está de acordo com sua classificação morfológica, SB(rs)b. Os diâmetros maior e menor desta galáxia são, na seqüência, 1.47 e 0.96 arcmin.

**NGC0753** Esta galáxia tem braços espirais brilhantes. O padrão espiral é extremamente regular na região interna onde dois braços *grand design* originam-se com intenso brilho superficial. O tipo morfológico é SAB(rs)bc. Há várias imagens no IPAC, e no infravermelho nas bandas *J*, *H*, *K* do 2-MASS observa-se um bojo brilhante em constraste com as estruturas espirais, embora estas também estejam definidas. Os diâmetros maior e menor desta galáxia são, na seqüência, 2.5 e 1.9 arcmin.

**NGC0772** É uma galáxia com múltiplos braços espirais e com uma tênue e pequeníssima barra central. O braço ao norte na direção leste-oeste apresenta várias condensações, com pequenas regiões brilhantes, sugerindo forte indício de formação estelar ao longo de sua estrutura. Existem ainda várias estruturas menores com condensações menos acentuadas. O tipo morfológico desta galáxia é SA(s)b. Os diâmetros maior e menor desta galáxia são, na seqüência, 7.2 e 4.3 arcmin.

**NGC1073** Esta galáxia contém múltiplos braços espirais e com uma barra central visivelmente destacada. Apresenta muitas estruturas menores e observam-se também condensações no disco da galáxia e regiões *HII*, indicando formação estelar. A sua classificação morfológica é SB(rs)c. Os diâmetros maior e menor desta galáxia são, na seqüência, 4.9 e 4.5 arcmin.

**NGC2336** Apresenta uma pequena barra no ótico. Duas regiões extendidas de emissão de rádio são proeminentes, mas elas não coincidem com as regiões de formação estelar. Tem tipo morfológico SAB(r)bc. No IPAC as imagens no ótico apresentam estruturas espirais fortes, e na imagem do infravermelho nas bandas *J*, *H*, *K* do 2-MASS uma estrutura difusa no disco com pequeno bojo brilhante. Os diâmetros maior e menor desta galáxia são, na seqüência, 7.1 e 3.9 arcmin.

**NGC6951** Esta galáxia apresenta um núcleo brilhante, com um anel circumnuclear, cuja estrutura de poeira do anel é a característica mais conspícua no mapa de cores  $J-K$ , mas regiões de formação estelar no anel também podem ser vistos (Vila et al. 1990, Saikia et al. 1994). A barra da banda de poeira conecta a este anel nuclear de norte a leste e de sul a oeste. É uma espiral classificada no RC3 como SAB(rs)bc. Os diâmetros maior e menor desta galáxia são, na seqüência, 3.9 e 3.2 arcmin.

**NGC7479** É uma galáxia *late-type* tendo uma barra e dois braços espirais bem definidos partindo das duas extremidades da barra, mas não são perpendiculares a ela. Neste caso, dois braços espirais formam um padrão global no disco. Os braços também formam um anel de raio do eixo maior da barra. Seu tipo morfológico é SB(s)c. Os diâmetros maior e menor desta galáxia são, na seqüência, 4.1 e 3.1 arcmin.

**NGC7678** Também conhecida como UGC 12614, esse objeto é classificado como uma Seyfert 2. Sendo uma espiral barrada é classificada com tipo morfológico SBc. Possui braços proeminentes, especialmente o do sul, apresenta intensa formação estelar nos seus braços espirais e contém várias regiões HII. Os diâmetros maior e menor desta galáxia são, na seqüência, 2.17 e 1.67 arcmin.

**NGC7741** A barra interior tem intenso brilho superficial. Os braços são formados de pequenas estruturas que são difusas. Os braços interiores formam um pseudo-anel interior; fora deste anel, os braços são bem mais difusos, porém há nítida formação estelar. Apresenta classificação morfológica SB(s)cd e do tipo 10 como EEM87. Os diâmetros maior e menor desta galáxia são, na seqüência, 4.4 e 3.0 arcmin.

**NGC7753** Esse objeto é também conhecido como CPG 591. É uma galáxia do tipo espiral barrada classificada como SAB(rs)bc. Os braços espirais são bastante simétricos e largos, e são proeminentes nas bandas B, V, R e I. No IPAC, se vê imagens na banda ótica com os braços bem definidos, além de, no infravermelho nas bandas  $J$ ,  $H$ ,  $K$  do 2-MASS, destaca-se a componente  $m=2$ . A distribuição e morfologia local de formação estelar nas regiões da galáxia variam ao longo dos braços espirais. Os diâmetros maior e menor desta galáxia são, na seqüência, 3.3 e 2.1 arcmin.

As *figs. 2.9 e 2.10* mostram as imagens da amostra de 18 galáxias. Na seqüência se tem: imagens *limpas, deprojetadas e subtraídas as estrelas* (1), e imagens obtidas das anteriores *subtraídas o disco médio* (2). Todas as imagens exibidas estão na banda  $g$ .

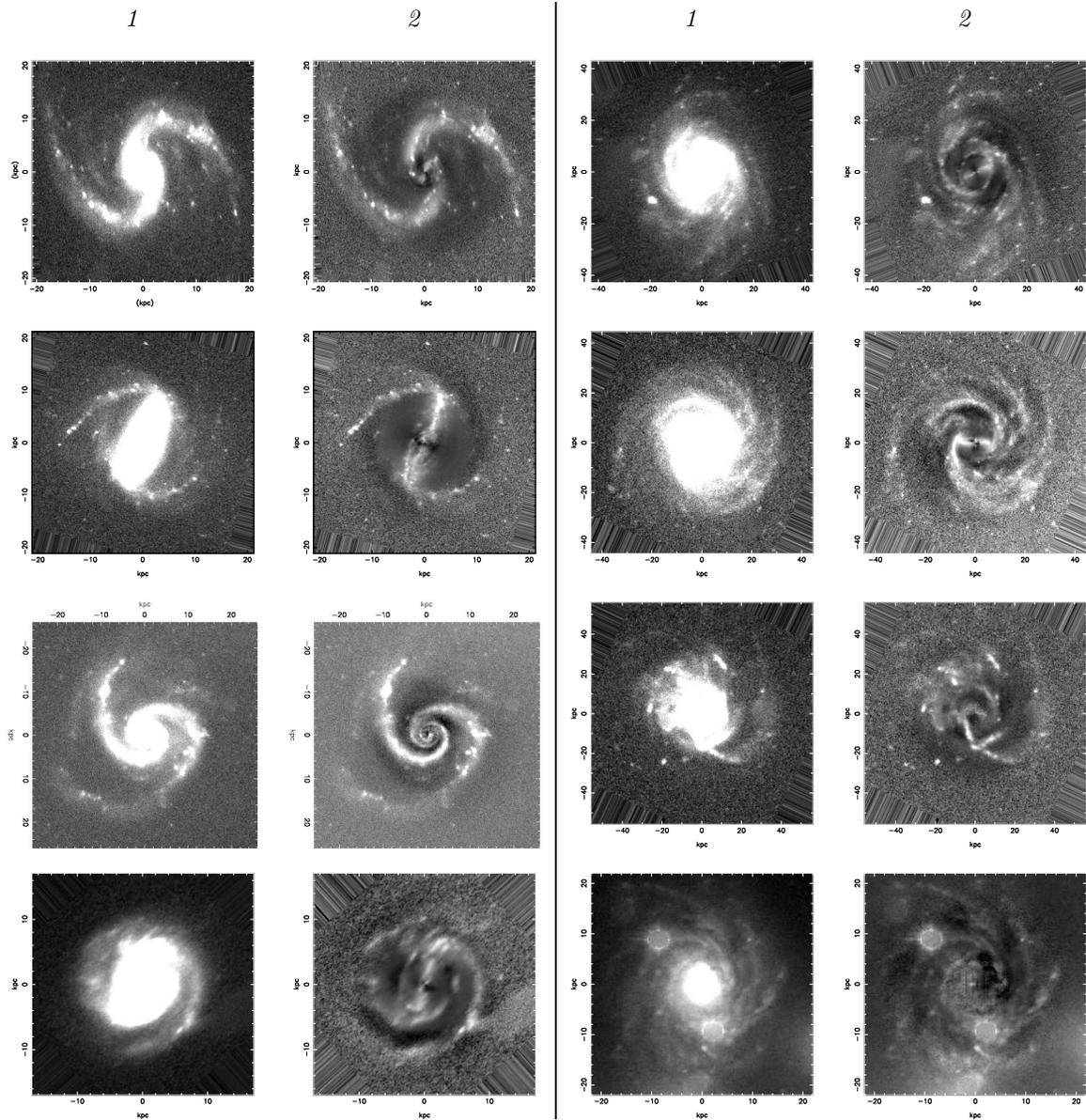


Figura 2.9: Pares de imagens da amostra. Na seqüência à esquerda: IC0167, IC0267, IC2421 e NGC0019, e à direita: NGC0036, NGC0047, NGC0060 e NGC0070.

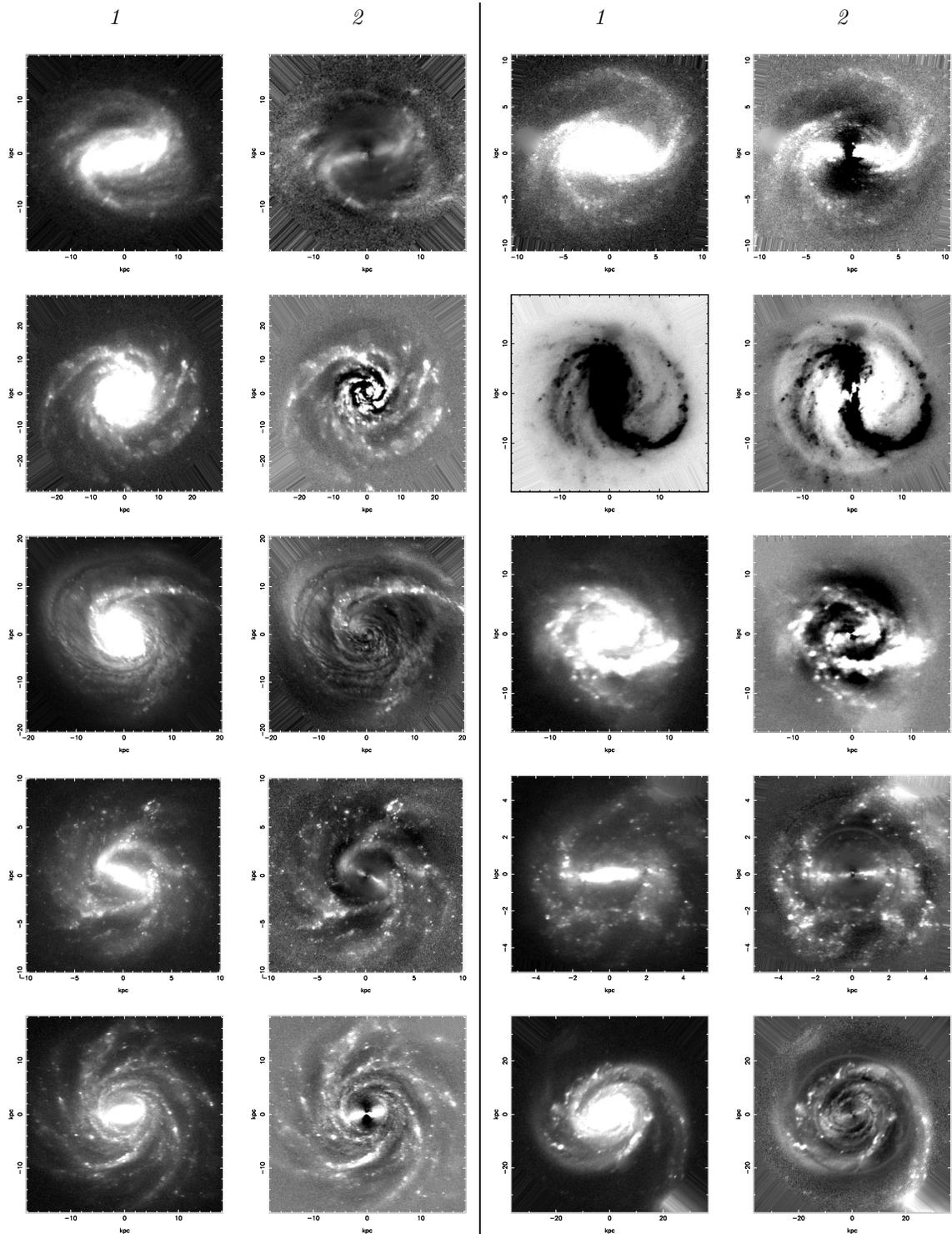


Figura 2.10: Pares de imagens da amostra. Na seqüência à esquerda: NGC0622, NGC0753, NGC0772, NGC1073, NGC2336, e à direita: NGC6951, NGC7479, NGC7678, NGC7741, NGC7753.

## Capítulo 3

# Análise de IC2421

As imagens de IC2421, *fig. 3.2*, revelam uma estrutura de dois braços, porém os mesmos não são simétricos. A análise de Fourier, realizada entre 0.53 e 21.8 *kpc*, indica que as componentes  $m = 2$  e  $m = 1$  são relevantes.

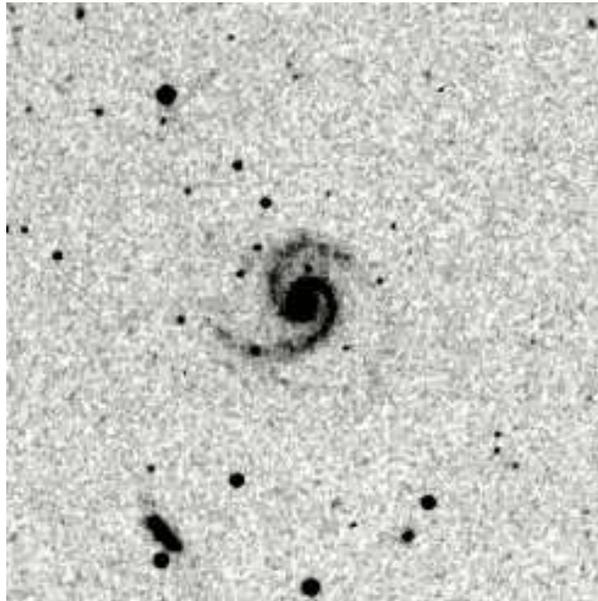


Figura 3.1: Imagem IC2421 extraído do NED na banda I,  $\lambda = 6450\text{\AA}$ .

As funções de densidade radial (*fig. 3.4*) indicam que a componente  $m = 2$  é importante entre os raios 1 e 15 *kpc*, mas também há uma pequena região mais central onde aparece novamente uma componente  $m = 2$ . A inspeção visual das imagens na *fig. 3.2(2)* indicam que a componente  $m = 2$  estende-se até o próprio centro da galáxia, dentro da resolução espacial da imagem. A componente  $m = 1$ , predomina entre 3 e 8 *kpc*, mas também num pequeno intervalo entre os 10 e os 14 *kpc*, provavelmente como modulação do braço S da componente  $m = 2$ .

A *fig. 3.2 (3)* em comparação com a *fig. 3.2 (1)* mostra que o método da anti-transformada de Fourier (somado as 10 componentes) é adequado na análise das imagens, fornecendo (por exemplo) resultados confiáveis no cálculo dos raios de corrotação. A *fig. 3.5*, mostra as imagens obtidas pelas antitransformadas de Fourier, das componentes  $m = 1, 2, 3$ , embora a componente 3 tenha probabilidade muito baixa.

As imagens dos braços espirais no diagrama  $\log(R)$  vs.  $\theta$  (*fig. 3.7*), indicam que os braços não podem ser representados por uma única espiral logarítmica em toda a sua extensão. Porém, parece sim haver duas espirais logarítmicas. Com efeito, o mesmo diagrama para a imagem simetrizada  $m = 2$  (*fig. 3.8*) mostra com maior clareza que duas espirais logarítmicas são uma boa representação da componente  $m = 2$ . Deve-se salientar aqui, que o processo de simetriação não introduz nenhum viés nas imagens simetrizadas, ele tão só destaca a estrutura da componente  $m = 2$ , qualquer que seja a sua forma como mostrado na *fig. 3.6*. Outro aspecto relevante se verifica nas imagens da *fig. 3.9*, em que estas reproduzem detalhes dos braços retificados nas imagens da *fig. 3.7*, de modo que reforça a eficiência do método adotado.

A comparação das imagens nas *figs. 3.5 e 3.6* mostram algumas diferenças na descrição das componentes  $m = (1, 3)$ , mas a componente  $m = 2$  é descrita similarmente por ambos os métodos. Na componente  $m = 1$  a curvatura do braço é a mesma que a da  $m = 2$ , porém, a lacuna de menor densidade posicionada a aproximadamente  $9 \text{ kpc}$ , segundo os diagramas da *fig. 3.4*, está deslocada ligeiramente a sudeste na imagem simetrizada. Esta apresenta também uma condensação ao N do braço, que não aparece na transformada de Fourier,  $m = 1$ . A componente  $m = 3$  é também semelhante em ambos os métodos, embora ela seja muito mais fraca do que a  $m = 1$ . Um detalhe é que a parte mais externa aparece como *trailing* na imagem simetrizada e como *leading* na antitransformada de Fourier. Sendo estes detalhes externos tão fracos, conforme à densidade de probabilidade (*fig. 3.3*) deve-se atribuir esta diferença aos erros inerentes a todo o processo. Pode-se dizer então que a descrição destas componentes é surpreendentemente similar quando realizada pelo método das transformadas de Fourier ou pela simetriação de EEM92, embora a matemática envolvida nos mesmos seja filosoficamente distinta.

Os diagramas da *fig. 3.10* apresentam o comportamento da diferença de fase em função do raio. Para a componente  $m = 2$ , a corrotação para a imagem original está situada a  $\sim 6,5 \text{ kpc}$ , na imagem simetrizada a  $\sim 9,5 \text{ kpc}$ , e na imagem antitransformada de Fourier a  $\sim 7,5 \text{ kpc}$ . A relação sinal-ruído é alta, o que nos dá uma margem de confiabilidade suficiente para afirmar que entre  $6,5 \text{ kpc}$  e  $9,5 \text{ kpc}$  há uma corrotação. Portanto, o raio médio para a CR é  $\sim 7,8 \pm 1.5 \text{ kpc}$ . A componente  $m = 1$  apresenta uma ressonância de corrotação a  $\sim 10,5 \pm 2.0 \text{ kpc}$ .

As imagens das *figs. 3.11 e 3.12* mostram os círculos de corrotação para as duas componentes.

Através das funções de densidade radial (*fig. 3.4*), e tendo em conta que nesta galáxia há uma ressonância de corrotação para a componente  $m = 2$  analisada, os raios das extensões interna e externa da estrutura espiral observados são  $R_1 \simeq 4 \text{ kpc}$  e  $R_2 \simeq 12 \text{ kpc}$ . A *tabela 3.1* mostra o resultado dos parâmetros de Canzian para a componente 2.

m	$R'_2 \leq 5.8 \times R_1$	$R_{CR(i)} \leq 3.4 \times R_1$	$R_{CR(o)} \geq 0.6 \times R_2$	RC
1	-	-	-	10.5
2	23.2	13.6	7.2	7.8

Tabela 3.1: Comparação dos parâmetros de Canzian com o raio da ressonância de corrotação (*fig. 3.10*) para a componente  $m = 2$ .

O parâmetro  $R_2$  da extensão externa da estrutura espiral para a componente 2, está condizente com o parâmetro  $R'_2$  de Canzian (segunda coluna da *tabela 3.1*). De forma análoga, o raio de corrotação está de acordo com os parâmetros correspondentes de Canzian ( $R_{CR(i)}$  e  $R_{CR(o)}$ ).

A *tabela 3.2* mostra os resultados dos *pitch angles* para as componentes  $m = 1, 2$  e  $3$  nas cores  $g$  e  $i$ .

Banda	$m$	$p$	Amplitude	$\alpha$
$g$	1	-3.5	1	$15.9 \pm 2.5$
	2	-4.75	0.931	$22.8 \pm 1.2$
	3	-6.75	0.484	$24.0 \pm 0.8$
$i$	1	-3.75	1	$14.9 \pm 1.0$
	2	-4.5	0.971	$24.0 \pm 1.2$
	3	-6.25	0.600	$25.6 \pm 1.0$

Tabela 3.2: Valores derivados dos espectros de Fourier para IC0267.

Portanto, os *pitch angles* de acordo com a tabela são:

$$\begin{aligned}
 m = 1 &\Rightarrow \Delta\alpha \simeq 1.0^\circ, \\
 m = 2 &\Rightarrow \Delta\alpha \simeq 6.9^\circ, \\
 m = 3 &\Rightarrow \Delta\alpha \simeq 1.6^\circ.
 \end{aligned}$$

Os diagramas dos espectros (*fig. 3.3*) mostram diversos picos correspondentes a  $p$  distintos, ou seja, na componente  $m = 2$  dispõe-se de três resultados para os *pitch angles*; o mesmo acontece para as componentes 1 e 3. Assim, os resultados para  $\Delta\alpha$  são atípicos nesta galáxia. As imagens das *figs. 3.2(2) e 3.6(2)* não evidenciam *pitch angles* significativos para

a região central da galáxia que justifiquem os vários resultados encontrados, como também se vê nos diagramas  $\log(R) \times \theta$  (figs. 3.7 a 3.9). Portanto, o resultado mais realístico é aquele que corresponde à componente 2 ( $\Delta\alpha = 6.9^\circ$ ,  $p = -4.75$  e  $p = -7$ ), de acordo com *tabela 3.2*.

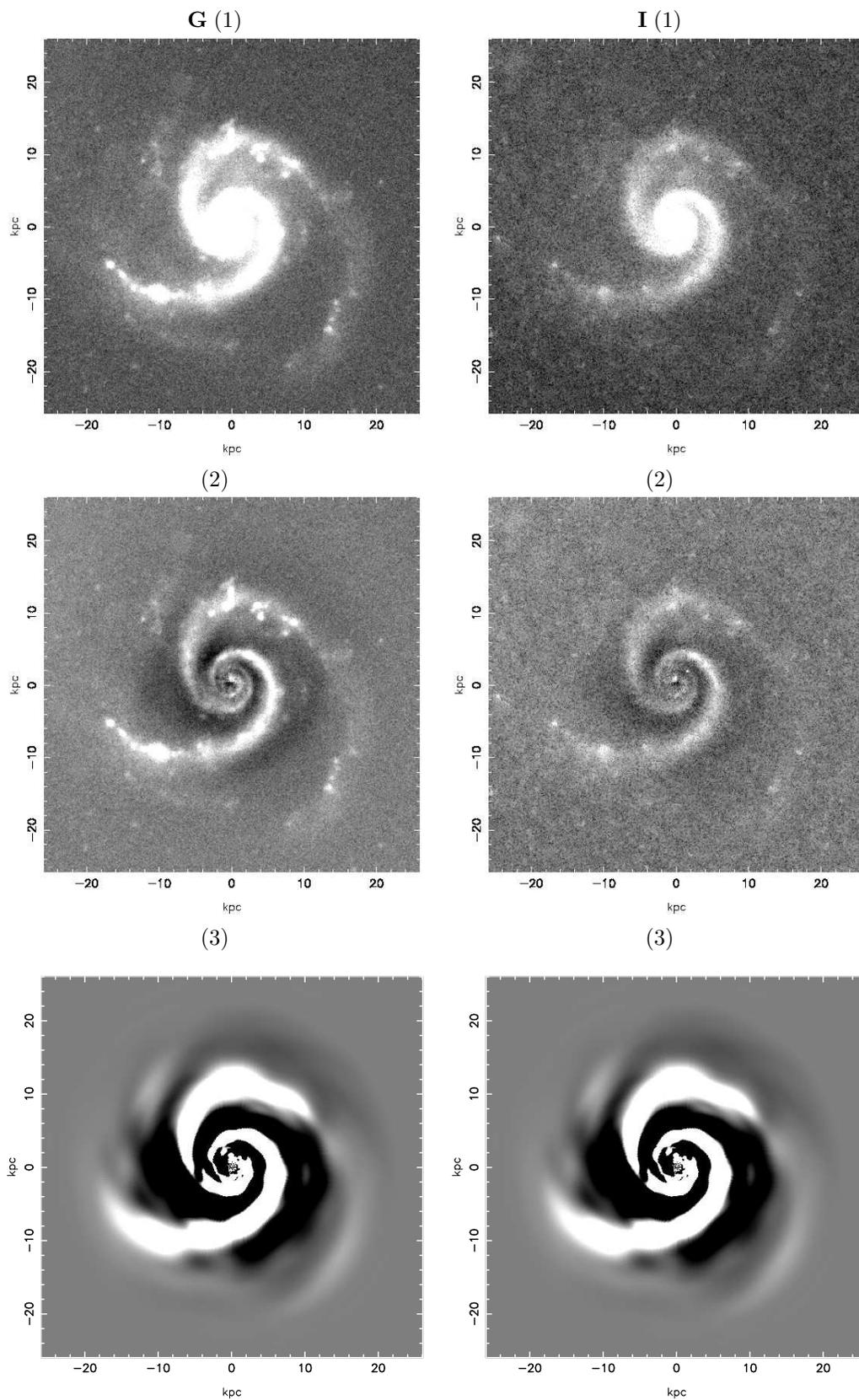


Figura 3.2: IC2421 nas bandas *g* e *i*. (1) Imagens originais deprojetadas e sem as estrelas; (2) Imagens obtidas das anteriores em que foi subtraído o disco médio; (3) Imagens anti-transformada de Fourier (combinadas as dez componentes).

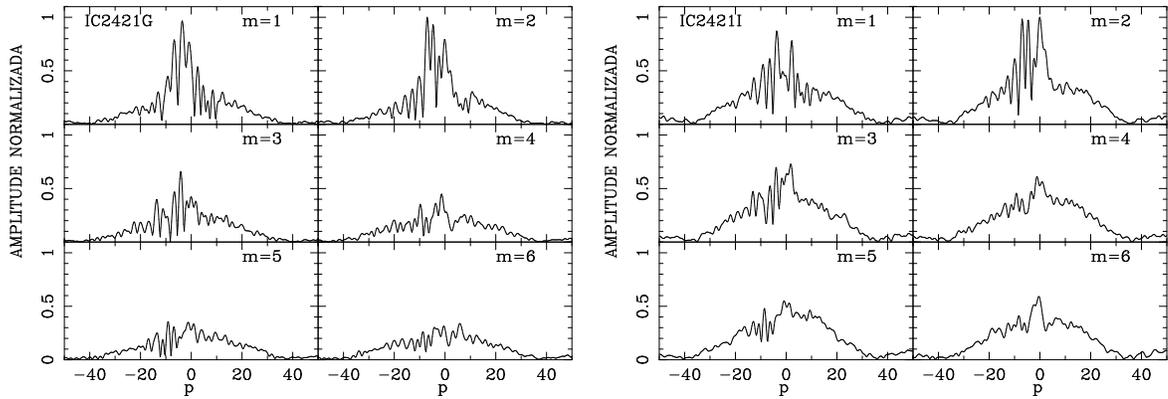


Figura 3.3: Coeficientes  $A(p, m)$  da transformada bidimensional de Fourier na imagem  $g$  e  $i$  de IC2421, obtidos segundo o processo descrito no capítulo 2. A variável  $p$  está relacionada com o *pitch angle*  $\alpha$  por  $p = -m/\tan \alpha$ .

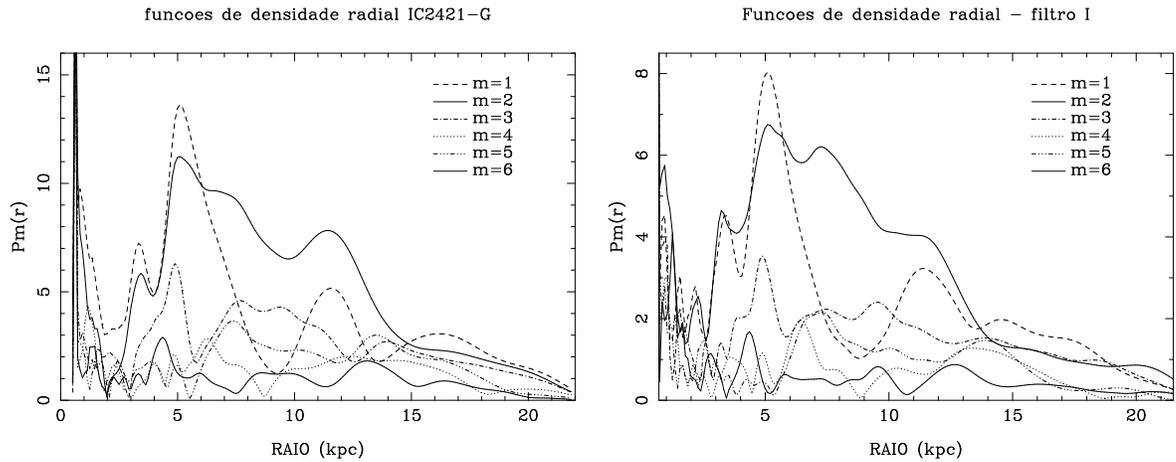
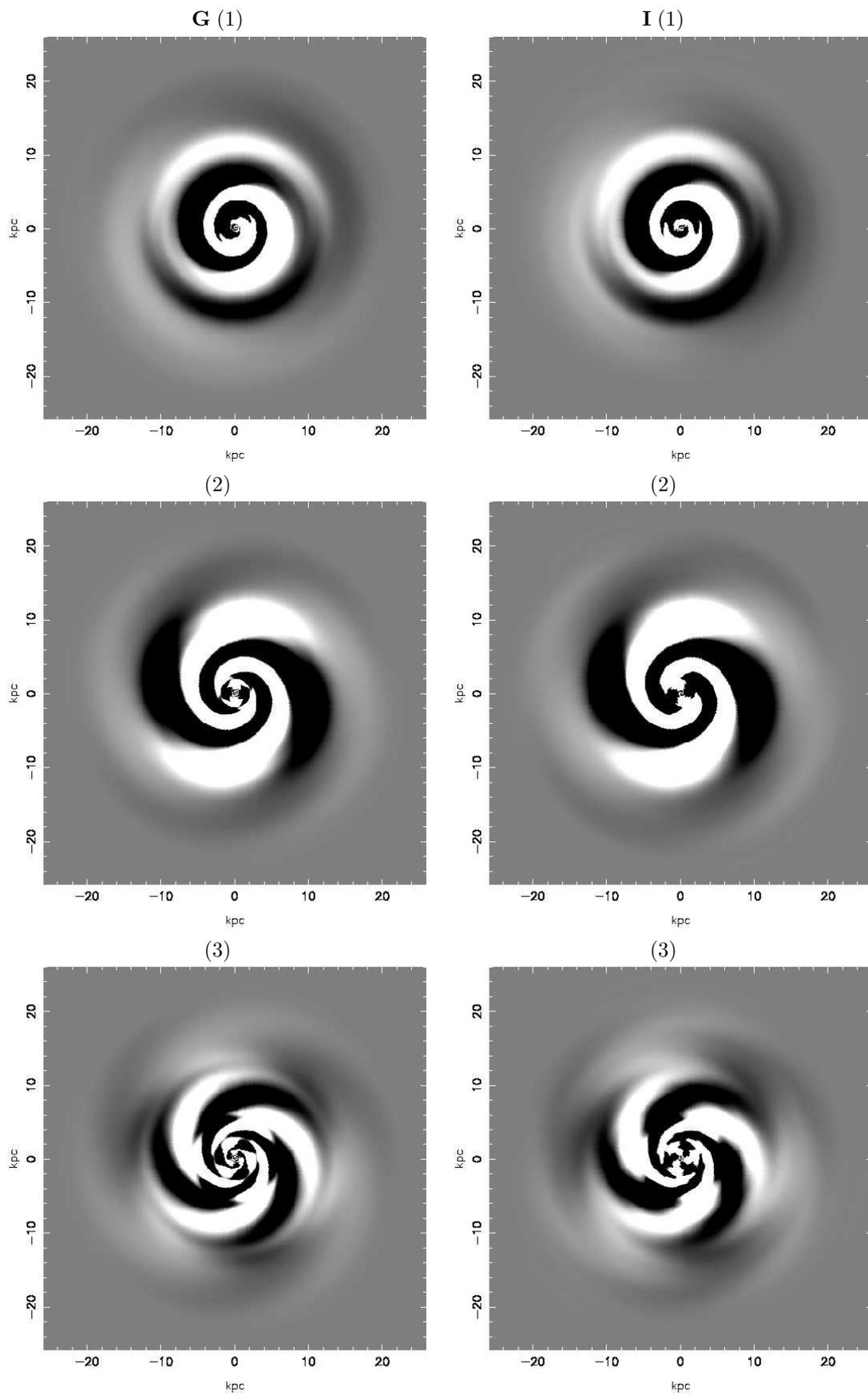


Figura 3.4: Funções de densidade radial nas bandas  $g$  e  $i$ .

Figura 3.5: IC2421 Espirais sintéticas nas bandas  $g$  e  $i$ . Componentes (1), (2) e (3).

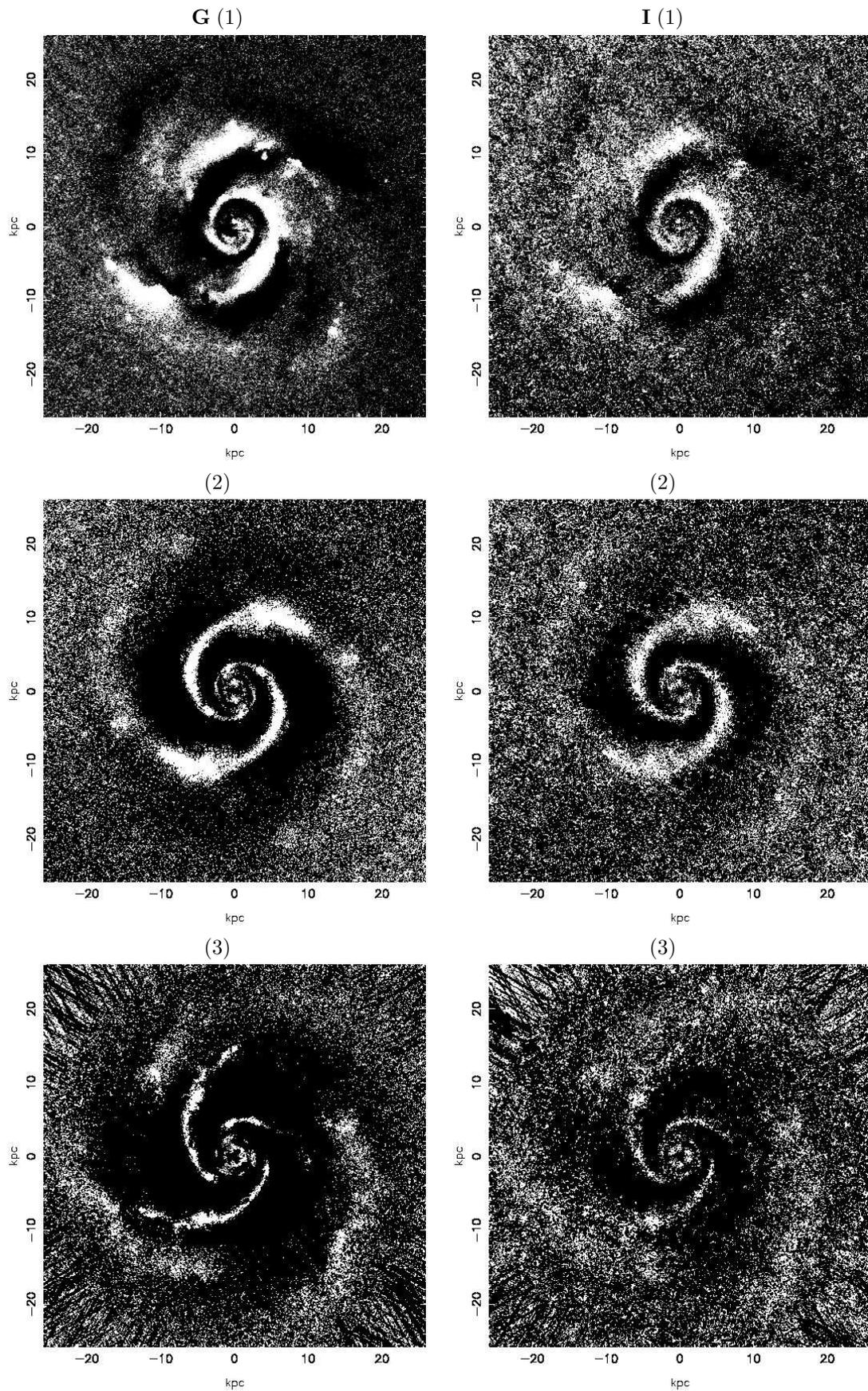


Figura 3.6: IC2421 Elmegreen nas bandas *g* e *i*. Componentes (1), (2) e (3).

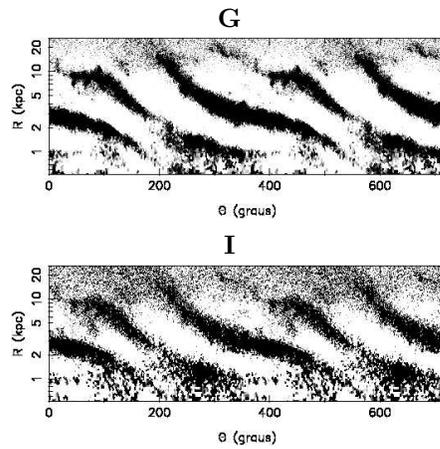


Figura 3.7: Imagens retificadas  $g$  e  $i$  das componentes originais, subtraído o disco médio.

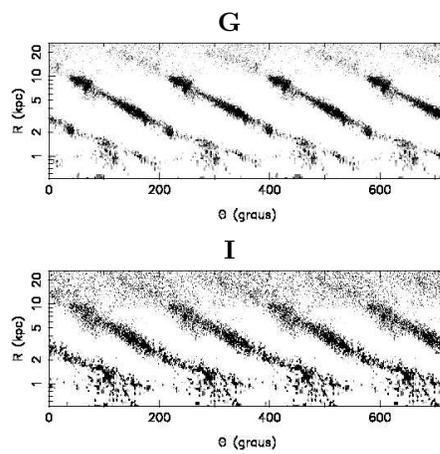


Figura 3.8: Imagens retificadas  $g$  e  $i$  para a componente 2 do método EEM92.

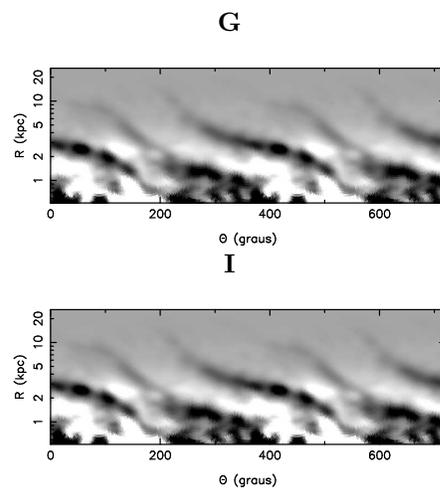


Figura 3.9: Imagens retificadas  $g$  e  $i$  da anti-transformada de Fourier (combinadas as 10 componentes).

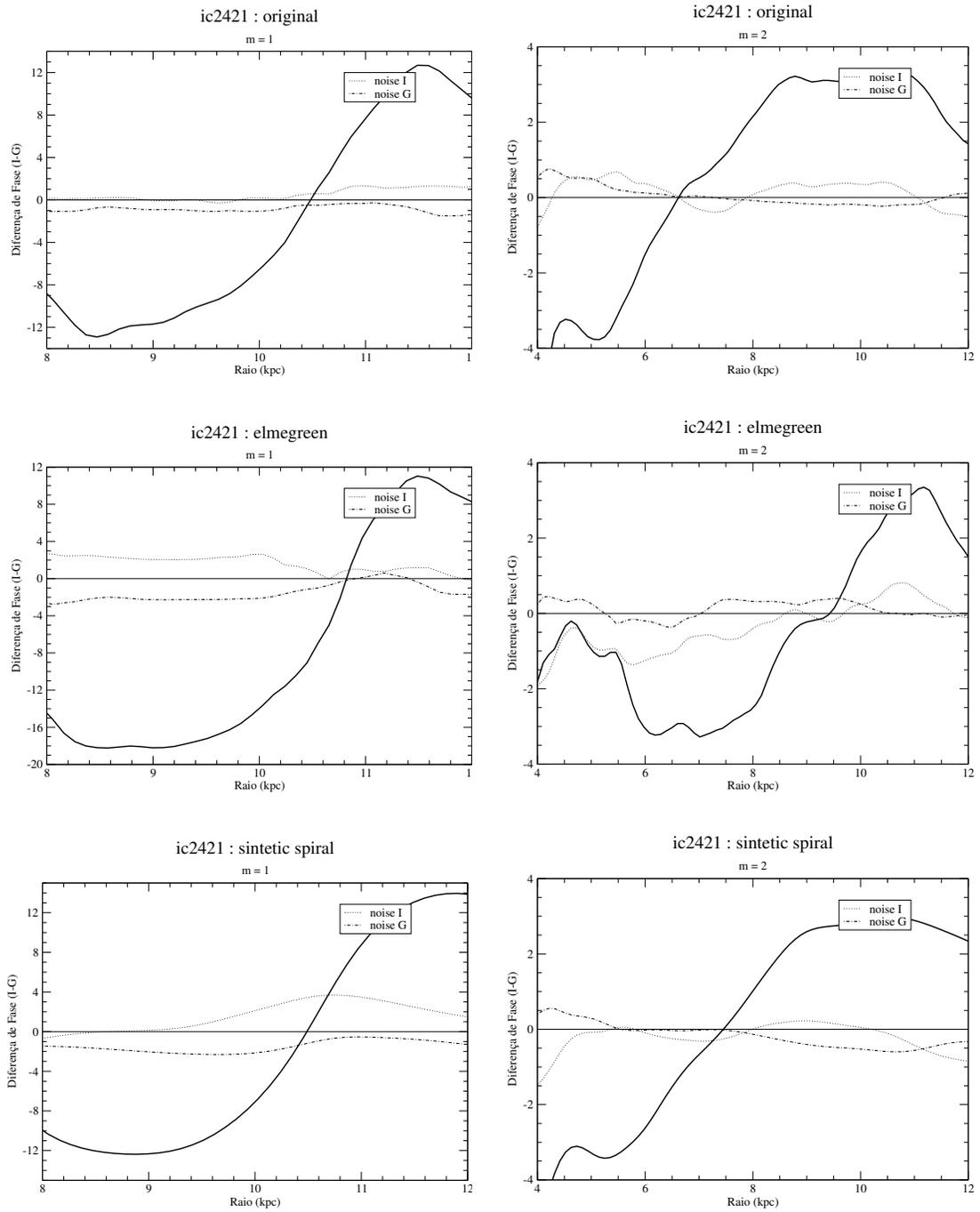


Figura 3.10: [Diferenças de Fase (*graus*)  $\times$  Raio (*kpc*)]. Os gráficos correspondem às componentes  $m = 1, 2$  relativos às imagens originais, método EEM92 e antitransformada.

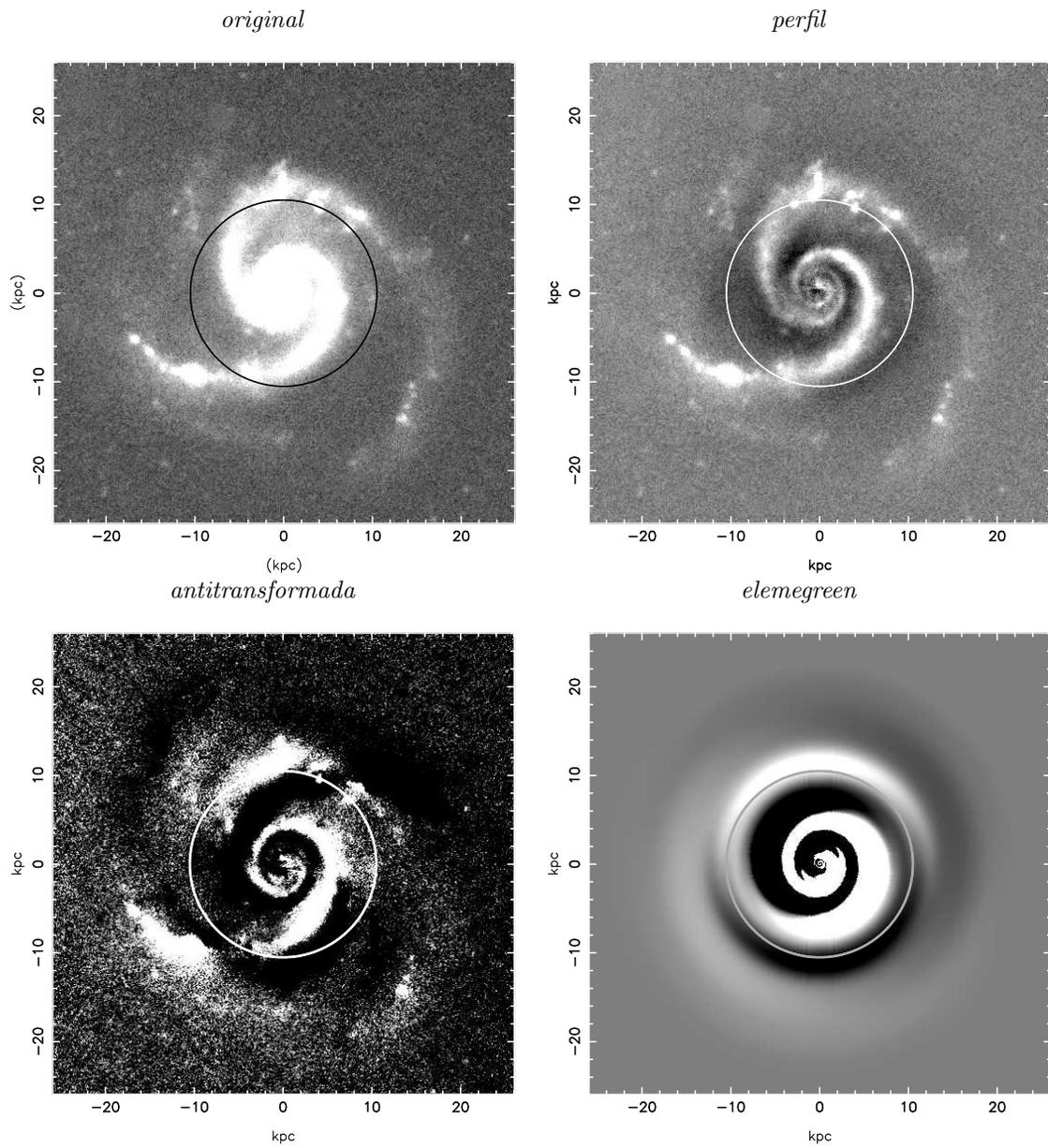


Figura 3.11: O círculo indica a posição da ressonância de corrotação da componente  $m = 1$ .

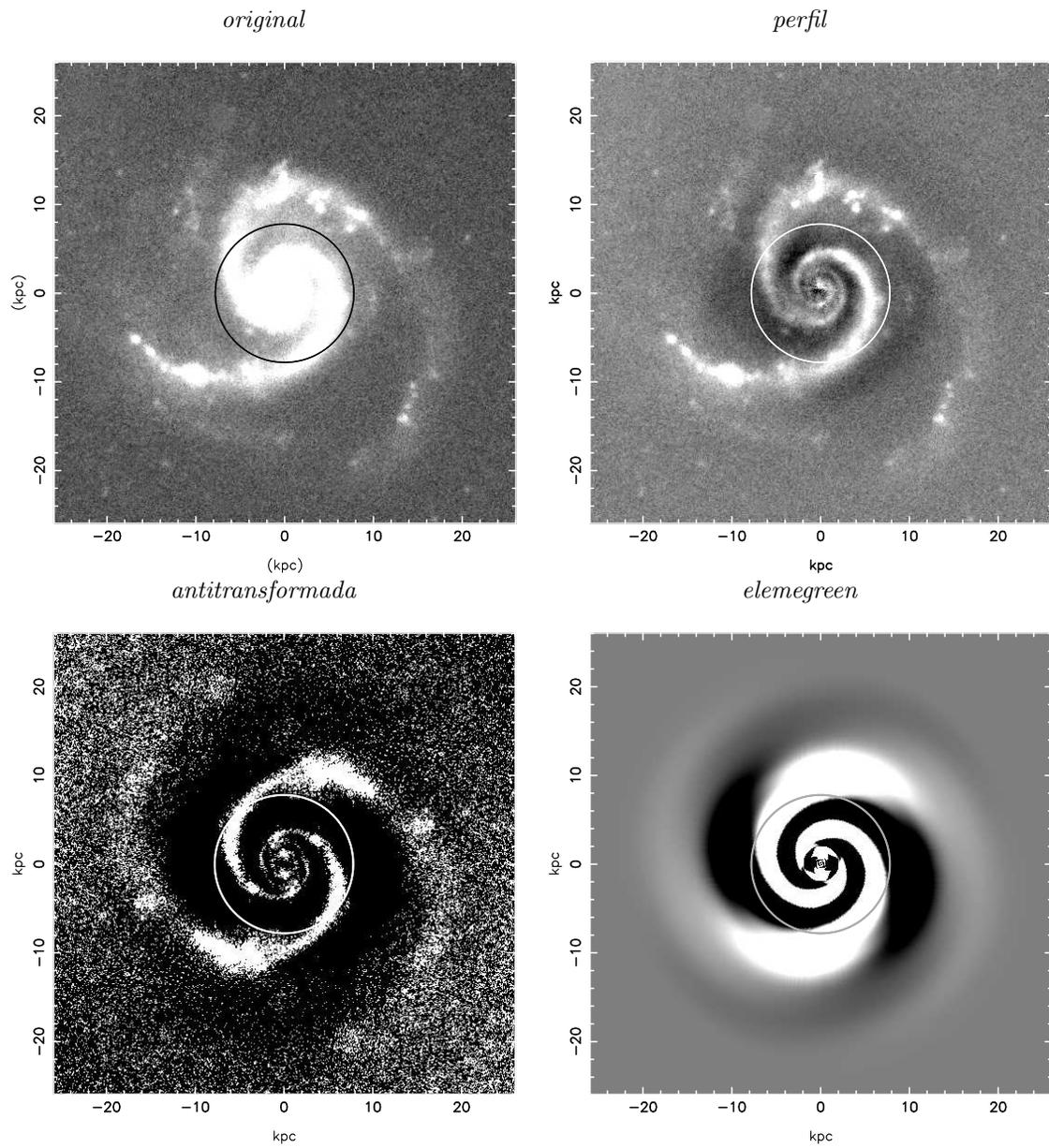


Figura 3.12: O círculo indica a posição da ressonância de corrotação da componente  $m = 2$ .

## Capítulo 4

# Análise de NGC0622

A NGC0622 é uma galáxia com extensa barra, não simétrica em relação ao centro da galáxia, isto é, a parte da barra na direção  $\sim L$ , tem extensão menor do que a parte na direção  $\sim O$ , dentro da resolução espacial das imagens (*fig. 4.2*). Há uma quebra, aproximadamente a  $6\text{ kpc}$ , a oeste, podendo ser outro sistema (como um pequeno braço cortando a barra nessa extremidade). Observa-se um extenso braço fraco ao norte e um braço sul mais visível, com uma bifurcação a cerca de  $6\text{ kpc}$  exatamente ao sul da imagem, originando duas estruturas, uma delas que se enrola até próximo ao norte e outra próxima a extremidade oeste. Notam-se condensações nessas estruturas, indicando regiões de formação estelar. Se ampliadas fisicamente as imagens da *fig. 4.2*, verificam-se um tênue anel em torno da barra; isto está de acordo com sua classificação, SB(rs)b.

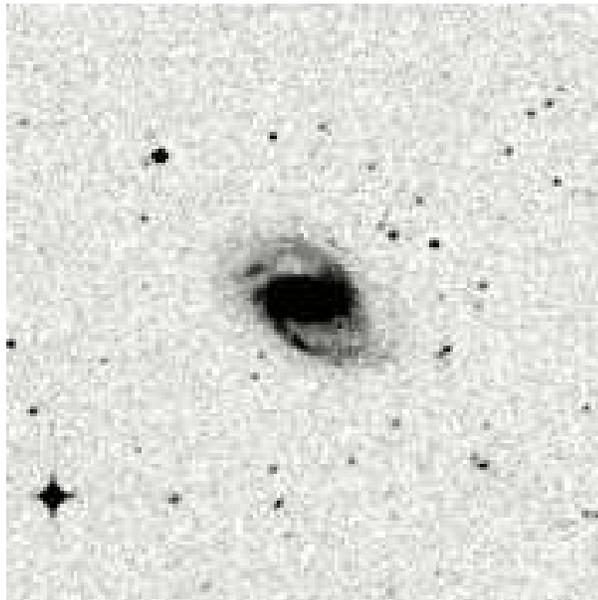


Figura 4.1: Imagem NGC0622 extraído do NED, no comprimento de onda  $6480\text{ \AA}$ .

A análise de Fourier foi realizada entre  $1.22 \text{ kpc}$  e  $18.4 \text{ kpc}$ . Os espectros de Fourier (*fig. 4.3*) informam que a componente 2 é a mais relevante, com pouca relevância para a componente 1, e as demais sem nenhuma importância. As funções de densidade (*fig. 4.4*), mostram que a componente 2 tem maior probabilidade em toda a extensão da galáxia, com destaque para  $m = 1$  nos intervalos  $\sim 8.5$  a  $10.5 \text{ kpc}$  e  $\sim 12$  a  $13.5 \text{ kpc}$ , e para  $m = 2$ , no intervalo de  $\sim 3$  a  $10 \text{ kpc}$ , tendo relevância menor a partir desse limite.

Pelo diagrama de fase  $\log(R)$  vs.  $\theta$  (*fig. 4.7*), se observam ambas as barras, com destaque para a barra oeste a  $\sim 200^\circ$ . Os braços que se enrolam a oeste da imagem, são quase logarítmicos, mas apresentam pequeníssima curvatura. Segundo esse diagrama, a barra tem extensão de, no máximo,  $9 \text{ kpc}$ . Já no diagrama de fase da imagem simetrizada (*fig. 4.8*), a componente 2 apresenta braço logarítmico.

Nas imagens antitransformada de Fourier (*fig. 4.5*), se destacam as componentes  $m = 1, 2$  e  $3$ , embora esse fato não represente nenhuma contradição com os espectros de Fourier (*fig. 4.3*). Semelhante acontece nas imagens simetrizadas (*fig. 4.6*), com a componente 3 fraquíssima.

A diferença de fase em função do raio (*fig. 4.10*) mostra que há possibilidade de ressonância de corrotação da componente  $m = 2$ , com  $\sim 7.8, 7.7$  e  $7.7 \text{ kpc}$  relativos às imagens original, *elmegreen* e sintética, respectivamente. O resultado médio é de  $\sim 7.5 \pm 0.5 \text{ kpc}$ . O ruído na banda  $i$  é bastante significativo nas três imagens, porém na banda  $g$  o ruído é irrelevante. Não se obteve ressonâncias para as componentes 1 e 3.

Pode-se observar o círculo de corrotação nas imagens *original, perfil, antitransformada* e *elmegreen* da *fig. 4.11*. A corrotação acontece além das extremidades da barra, próxima a uma região onde a densidade é ligeiramente menor.

Através das funções de densidade radial (*fig. 4.4*), e tendo em conta nesta galáxia a existência de uma ressonância de corrotação para a componente 2, os raios das extensões interna e externa da estrutura espiral observados são  $R_1 \simeq 3 \text{ kpc}$  e  $R_2 \simeq 10 \text{ kpc}$ . A tabela seguinte mostra o resultado dos parâmetros de Canzian em comparação com a  $CR$ .

m	$R'_2 \leq 5.8 \times R_1$	$R_{CR(i)} \leq 3.4 \times R_1$	$R_{CR(o)} \geq 0.6 \times R_2$	$CR$
2	17.4	10.2	6	7.5

Tabela 4.1: Comparação dos parâmetros de Canzian com os CR dos diagramas de fase (*fig. 4.10*) para a componente  $m = 2$ .

O parâmetro  $R_2$  da extensão externa da estrutura espiral está condizente com o parâmetro  $R'_2$  de Canzian, como se vê na *tabela 4.1*. A componente  $m = 2$  tem predomínio em toda a extensão da galáxia, no entanto, foi escolhido como limite o raio externo de  $\sim 10 \text{ kpc}$ , de modo que, a partir dessa posição, a curva correspondente a esta componente tem

uma queda suave até os limites da galáxia. Com efeito, o raio de corotação calculado está nos limites permitidos pelos parâmetros de Canzian (terceira e quarta colunas da tabela).

A tabela 4.2 mostra os *pitch angles* para as componentes  $m = 1, 2, 3$  e  $4$  nas cores  $g$  e  $i$ .

Banda	$m$	$p$	Amplitude	$\alpha$
$g$	1	0.25	0.301	$-76.0 \pm 14$
	2	-0.25	1	$82.9 \pm 7.1$
	3	-1.25	0.132	$67.4 \pm 4.2$
	4	0	0.312	$90 \pm 3.6$
$i$	1	0	0.276	$90 \pm 14$
	2	-0.25	1	$82.9 \pm 7.1$
	3	-0.75	0.116	$76.0 \pm 4.5$
	4	0.25	0.314	$-86.4 \pm 3.6$

Tabela 4.2: Valores derivados dos espectros de Fourier para NGC0622.

Portanto, os *pitch angles* de acordo com a tabela são:

$$\begin{aligned}
 m = 1 &\Rightarrow \Delta\alpha \simeq 14.0^\circ, \\
 m = 2 &\Rightarrow \Delta\alpha < 7.1^\circ, \\
 m = 3 &\Rightarrow \Delta\alpha \simeq 8.6^\circ, \\
 m = 4 &\Rightarrow \Delta\alpha \simeq 3.6^\circ.
 \end{aligned}$$

Para a amplitude máxima ( $A = 1$ ), e para a componente  $m = 2$  (em  $p = -0.25$ ), verifica-se diferença nula nos *pitch angles* das bandas  $g$  e  $i$ , embora não reflita que não haja diferença de fase para ambas as cores. A aparente contradição entre os diagramas de fase e os valores derivados dos espectros de Fourier está no erro que é inerente ao processo. Por exemplo, a diferença nos ângulos em torno de  $p = 0$ , sendo  $\Delta p = 0.25$ , leva ao resultado de  $7.1^\circ$  para o *pitch angle*, no entanto, podem-se ocorrer *pitch angles* menores que este, mas não nulos, deste que o passo fosse menor que 0.25, significando para este caso específico, uma limitação do próprio método. Além disso, os diagramas  $\log(R) \times \theta$  (figs. 4.7 a 4.9) mostram que não há estrutura de braços nas regiões centrais da galáxia, e sendo essas estruturas mais externas, justificam ângulos de fase menores que os calculados pelos espectros de Fourier.

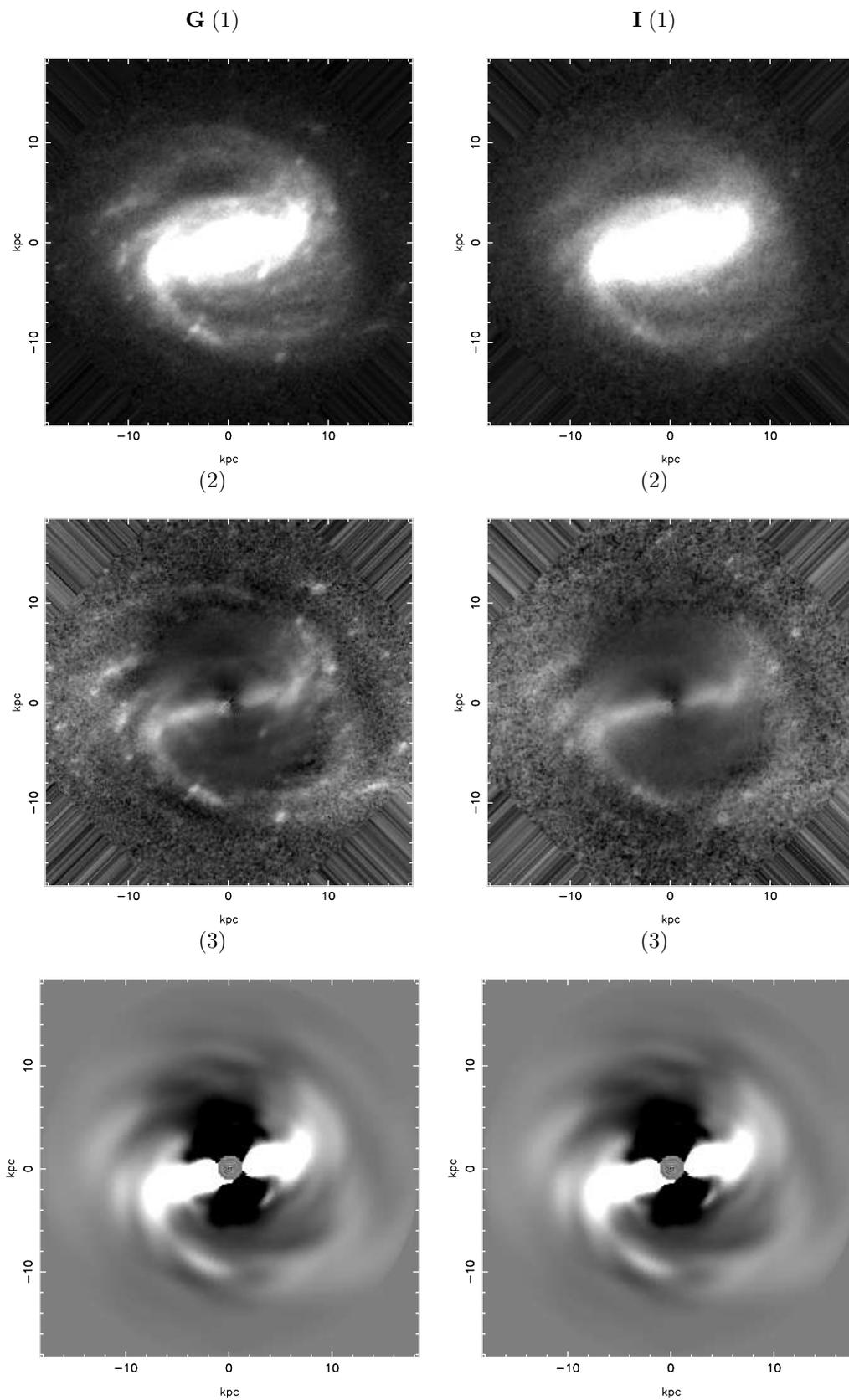


Figura 4.2: NGC0622 nas bandas  $g$  e  $i$ . (1) Imagens originais deprojetadas e sem as estrelas; (2) Imagens obtidas das anteriores em que foi subtraído o disco médio; (3) Imagens anti-transformada de Fourier (combinadas as dez componentes).

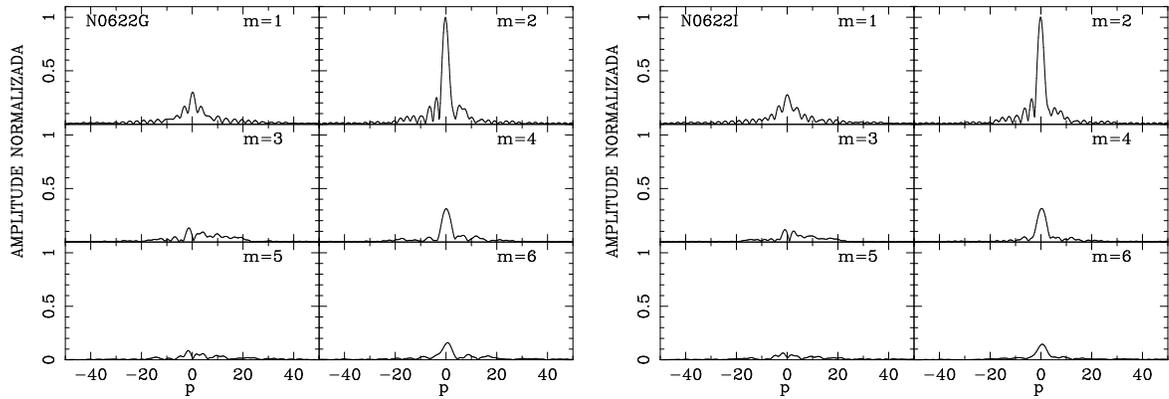


Figura 4.3: Coeficientes  $A(p, m)$  da transformada bidimensional de Fourier na imagem  $g$  e  $i$  de NGC0622, obtidos segundo o processo descrito no capítulo 2. A variável  $p$  está relacionada com o *pitch angle*  $\alpha$  por  $p = -m/\tan \alpha$ .

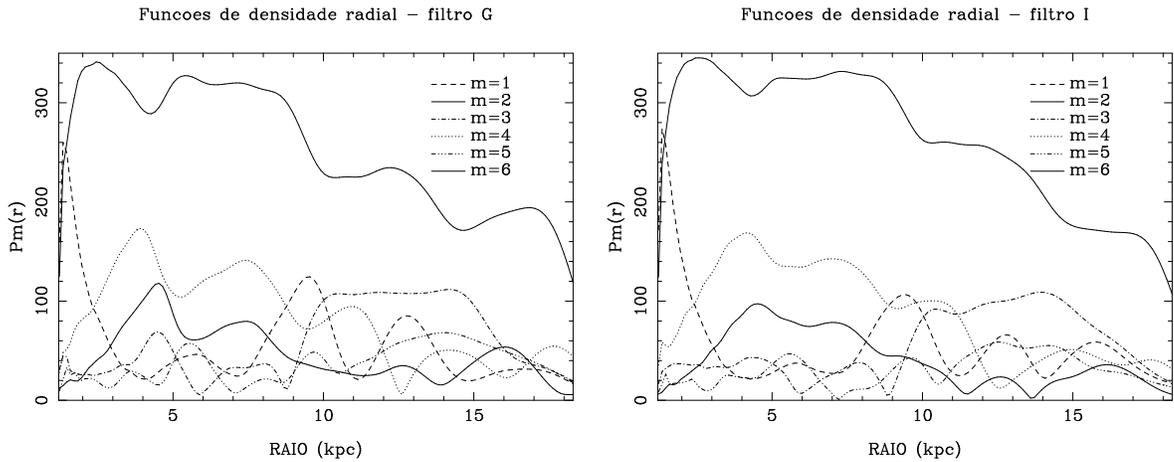
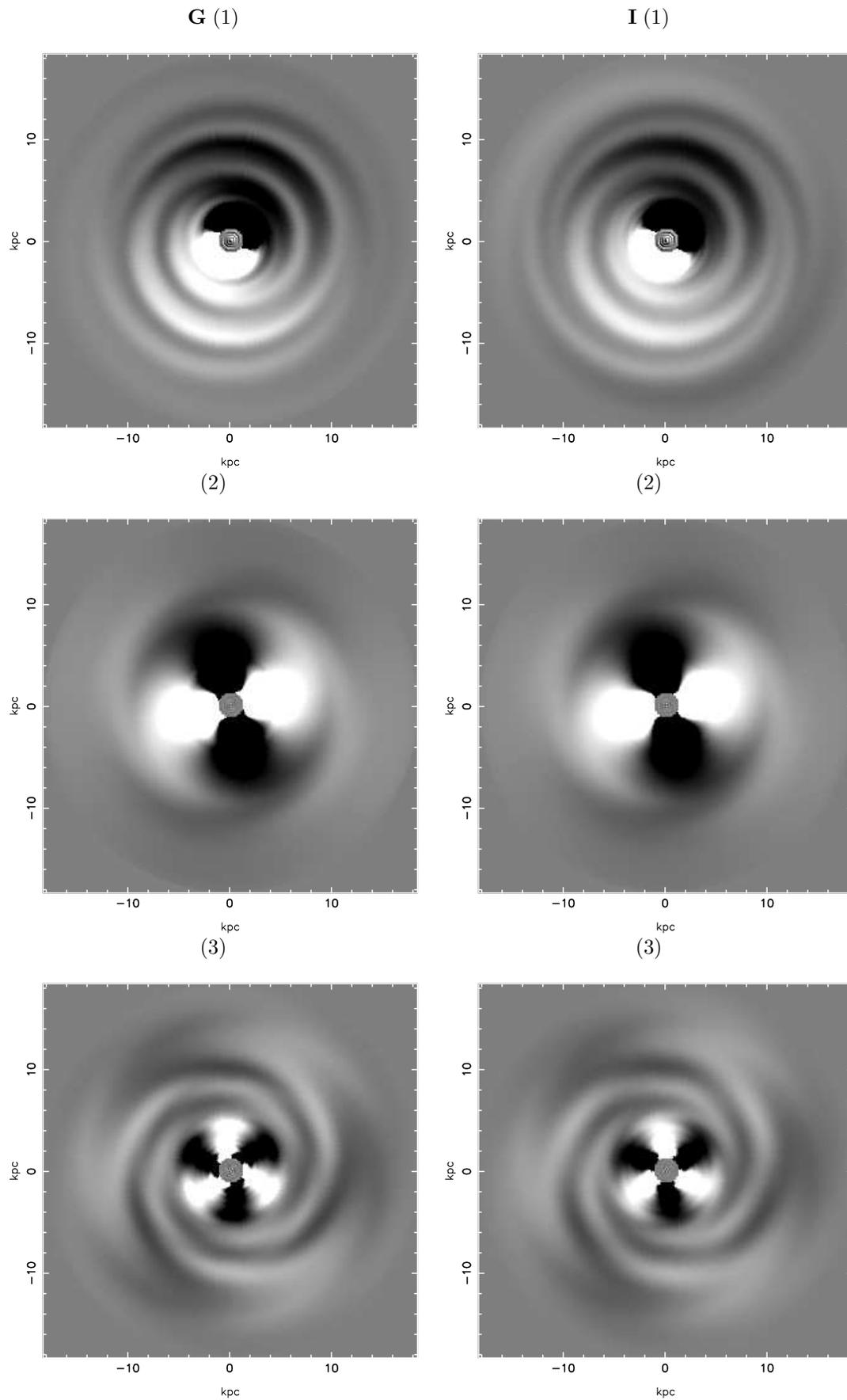


Figura 4.4: Funções de densidade radial nas bandas  $g$  e  $i$ .

Figura 4.5: Espirais sintéticas nas bandas  $g$  e  $i$ , e componentes (1), (2) e (3).

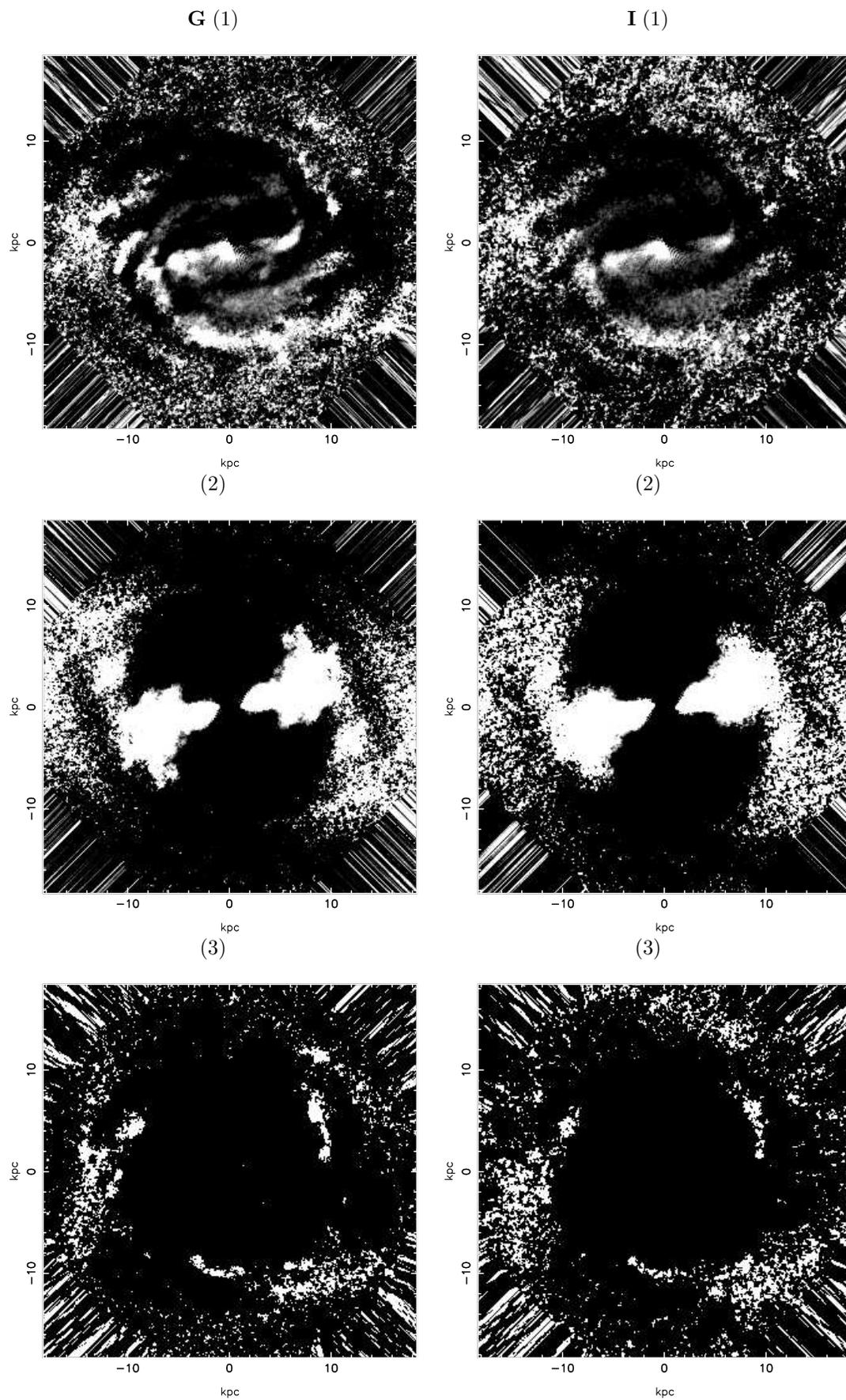


Figura 4.6: Imagens simetrizadas nas bandas  $g$  e  $i$ , e componentes (1), (2) e (3).

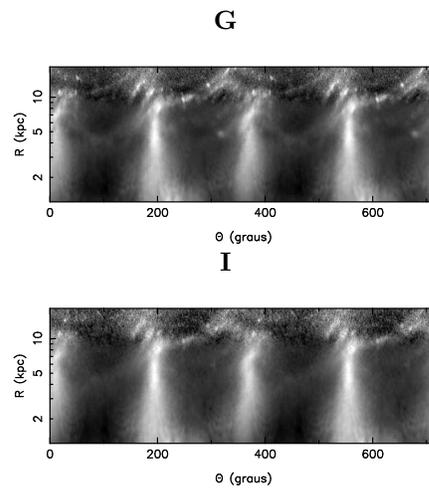


Figura 4.7: Imagens retificadas  $g$  e  $i$  das componentes originais, subtraído o disco médio.

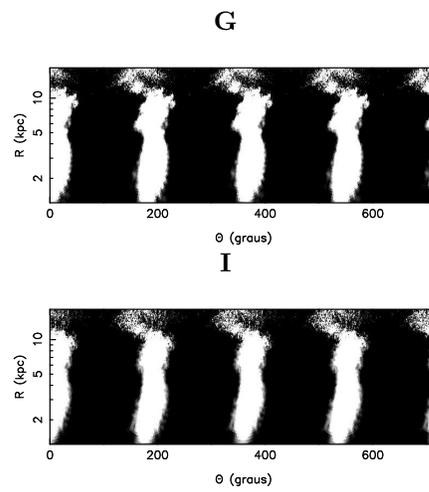


Figura 4.8: Imagens retificadas  $g$  e  $i$  para a componente 2 do método EEM92.

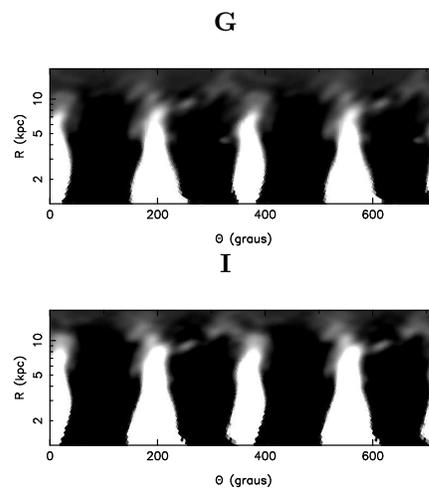


Figura 4.9: Imagens retificadas  $g$  e  $i$  da anti-transformada de Fourier.

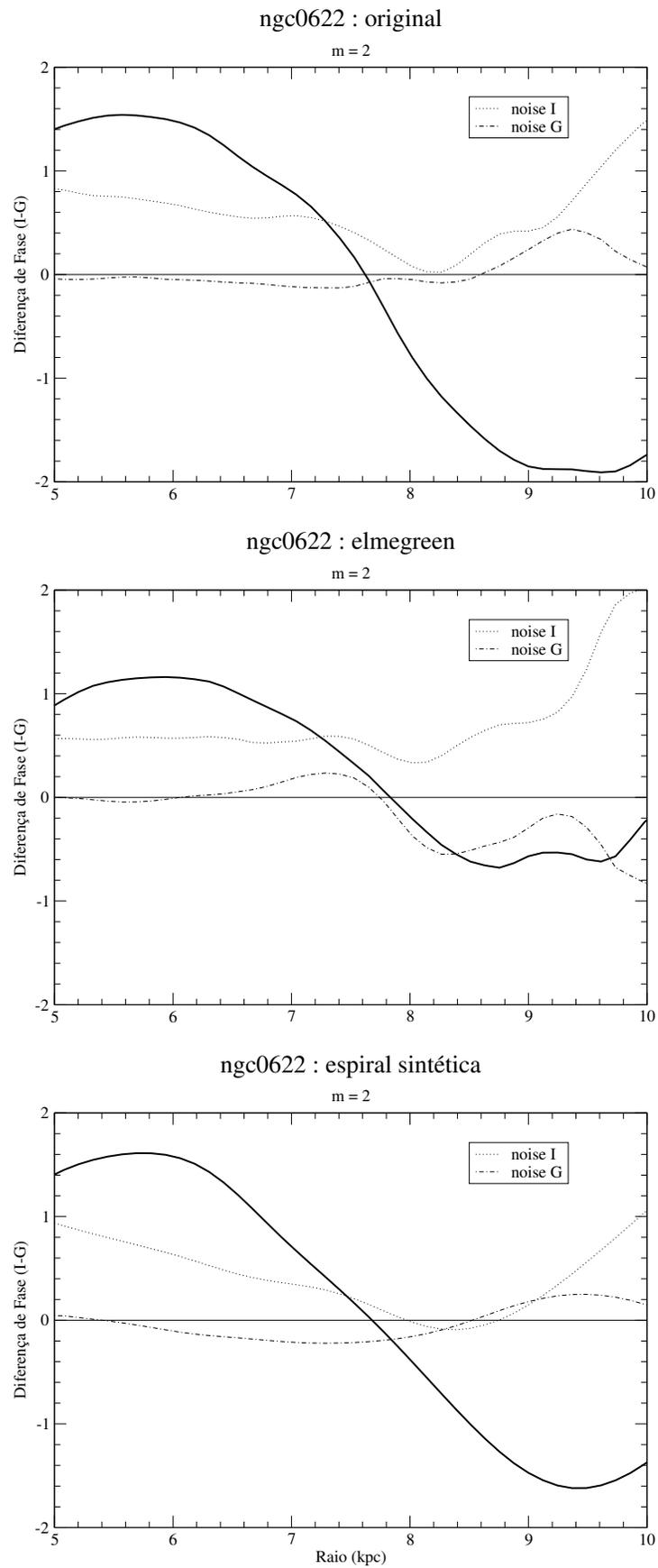


Figura 4.10: [Diferenças de Fase (*graus*)  $\times$  Raio (*kpc*)]. Os gráficos correspondem à componente  $m = 2$  relativos às imagens originais, método EEM92 e anti-transformada.

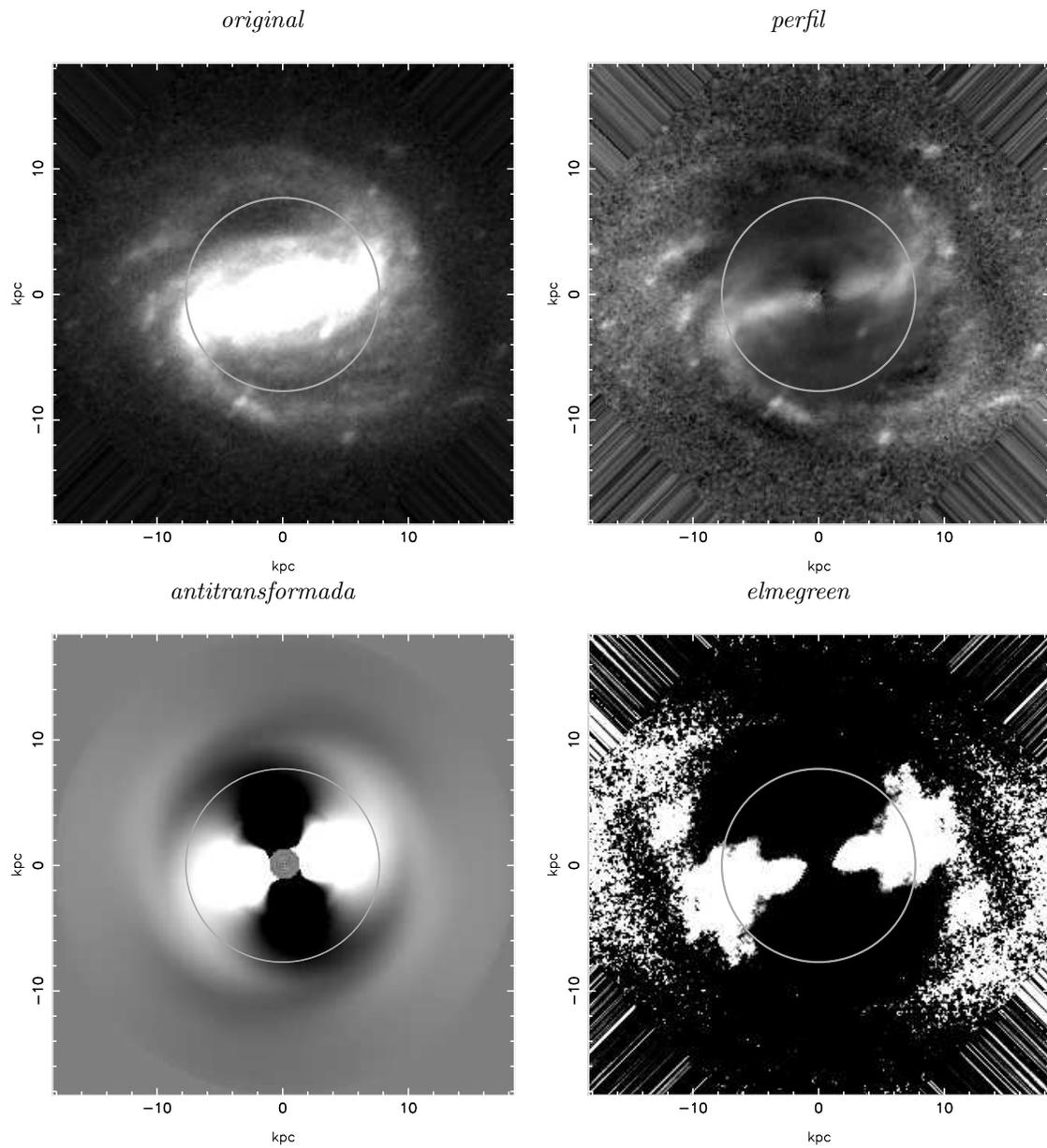


Figura 4.11: O círculo indica a posição da ressonância de corrotação da componente  $m = 2$ . As imagens são na cor  $g$ .

## Capítulo 5

# Análise de NGC7479

As imagens de NGC7479, *figs. 5.2*, revelam uma estrutura de dois braços circulares assimétricos e uma barra central longa, no sentido N-S de extensão  $\simeq 10 \text{ kpc}$ . O braço S se apresenta mais denso e mais extenso que o braço N. Existem ainda duas estruturas menores, originando-se na extremidade norte da barra, uma apontado no sentido  $\sim$  N-S, e outra no sentido  $\sim$  SE. Todos os braços apresentam na sua extensão partes mais e menos brilhantes, sugerindo intensa formação estelar nas regiões mais densas.

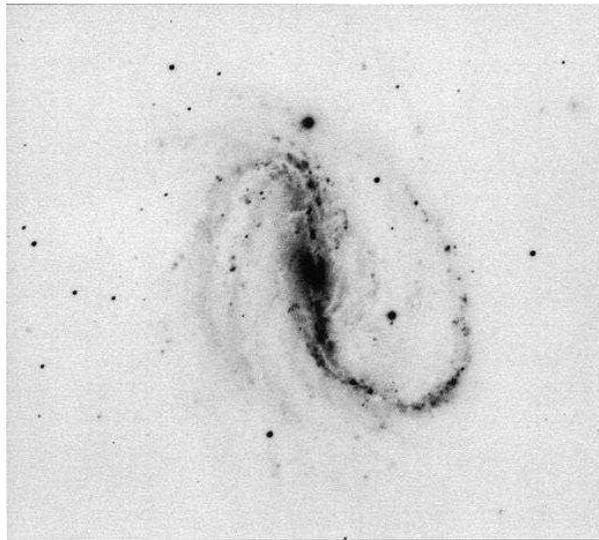


Figura 5.1: Galáxia NGC7479. Imagem adquirida no NED no comprimento de onda  $4050\text{\AA}$ , e telescópio Palomar 200 inch., 1994.

A análise de Fourier foi realizada entre  $0.0565 \text{ kpc}$  e  $18.1 \text{ kpc}$ . Os diagramas da *fig. 5.3* indicam que somente a componente  $m = 2$  é relevante, principalmente a que corresponde à barra, de acordo com os espectros de Fourier. Conforme às funções de densidade radial (*fig. 5.4*), a importância da componente 2 estende-se de  $\sim 2$  a  $12 \text{ kpc}$  originando-se, portanto, próximo do centro da galáxia.

As *figs. 5.5 e 5.6* mostram as imagens obtidas pelas antitransformadas de Fourier e simetrizadas das componentes 1, 2 e 3. Relativo a componente 2, nota-se que esta tem uma extensão  $\geq 12 \text{ kpc}$  pelos dois métodos. Pelo diagrama  $\log(R)$  vs.  $\theta$ , (*figs. 5.7 a 5.9*), verifica-se que os braços nas extremidades N e S são aproximadamente logarítmicos, e que a barra está levemente inclinada de  $\sim 10^\circ$ . O diagrama também mostra que o braço N penetra na barra, e nessa região a parte do braço apresenta um comportamento logarítmico; o mesmo acontece com o braço S, porém, dentro da resolução da imagem, o braço próximo ao centro da galáxia se comporta quase logarítmico.

A diferença de fase em função do raio, *fig. 5.10*, mostram duas ressonâncias de corrotação da componente  $m = 2$ . Os raios para a primeira corrotação das imagens original, simetrizada e antitransformada, são, respectivamente,  $\sim 3.8, 3.7, 3.6 \text{ kpc}$ , obtendo-se a média de  $\sim 3.7 \pm 0.5 \text{ kpc}$ . Para a segunda corrotação obtém-se  $\sim 9.3, 8.7, 9.1 \text{ kpc}$  para as três imagens, cuja média é  $\sim 9.0 \pm 0.5 \text{ kpc}$ . Ambas as corrotações estão na região de predomínio da barra. O raio de corrotação mais externo corta o S da barra onde há uma mudança na direção do *pitch angle*, enquanto o raio mais interno corta uma região menos densa nos limites N e S do círculo de corrotação. Também se verifica uma mudança mais suave na direção do *pitch angle* para a corrotação mais interna.

Puerari & Dottori<sup>[39]</sup> (1997) analisaram esta galáxia usando o mesmo tratamento das transformada de Fourier dos perfis azimutais para dois braços espirais, nos filtros *B* e *I*. Encontraram duas ressonâncias de corrotação, uma interna que caracteriza o padrão *trailing* e a segunda no extremo da barra indicando a presença do padrão *leading*.

As imagens da *fig. 5.11* mostram o círculo de corrotação da componente  $m = 2$  para as imagens *original, perfil, antitransformada e elmegeen*.

Através das funções de densidade radial (*fig. 5.4*), e tendo em conta nesta galáxia a existência de *duas* ressonâncias de corrotação para a componente  $m = 2$ , os raios das extensões internas e externas dos sistemas observados são (i)  $R_1 \simeq 2.5 \text{ kpc}$  e  $R_2 \simeq 5 \text{ kpc}$  para  $R_{CR} = 3.7 \text{ kpc}$  e (ii)  $R_1 \simeq 5.5 \text{ kpc}$  e  $R_2 \simeq 12 \text{ kpc}$  para  $R_{CR} = 9 \text{ kpc}$ . A tabela seguinte mostra o resultado dos parâmetros de Canzian em comparação com os raios de corrotação.

m	$R'_2 \leq 5.8 \times R_1$	$R_{CR(i)} \leq 3.4 \times R_1$	$R_{CR(o)} \geq 0.6 \times R_2$	RC
2	14.5	8.5	3	3.7
2	31.9	18.7	7.2	9.0

Tabela 5.1: Comparação dos parâmetros de Canzian com os CR dos diagramas de fase (*fig. 5.10*) para a componente  $m = 2$ .

Os parâmetros  $R_2$  das extensões externas dos sistemas da estrutura espiral estão condizentes com os parâmetros  $R'_2$  de Canzian (segunda coluna da *tabela 5.1*). Os raios de

corrotação 3.7 e 9  $kpc$  estão de acordo com os parâmetros das terceira e quarta colunas da tabela.

As diferenças nos *pitch angles* entre as bandas  $g$  e  $i$  são nulas para os primeiros oito resultados de  $p$ , na seqüência de -0.75 a 1.0. Para  $p = -1.0$  na banda  $g$  e  $p = 1.25$  na banda  $i$  há os *pitch angles*  $\alpha(g) \simeq +63.4^\circ$  e  $\alpha(i) \simeq -58.0^\circ$ , o que resulta numa diferença de fase fisicamente inaceitável, pois as imagens nas duas cores não mostram uma diferença exorbitante. Como  $\Delta p = 0.25$ , e o máximo das amplitudes em ambas as cores foi exatamente em  $p = 0.25$ , isto significa que haveria uma diferença de fase de  $6.9^\circ$ , se fossem considerados *pitch angles* distintos em  $p = 0.25$  e  $p = 0.5$ , ou  $7.1^\circ$  para  $p = 0.25$  e  $p = 0$ . Com efeito, só há uma consideração a ser feita, que  $\Delta\alpha < 7.1^\circ$ . Uma possibilidade, neste caso, é que o incremento  $\Delta p$ , em torno de  $p = 0.25$  (para  $m = 2$ ), ser suficientemente grande para não fornecer uma medida acurada de  $\Delta\alpha$ . Isto está de acordo com os diagramas de fase que fornecem uma diferença de fase menor que  $3.0^\circ$  nas duas bandas. A princípio, isto caracteriza uma probabilidade baixa para as ressonâncias de corrotação, mas ainda consideráveis, tendo em vista a alta relação sinal ruído dos diagramas das diferenças de fase, o método Canzian, e corroborado pelo trabalho de Puerari & Dottori (1997) na análise desta galáxia.

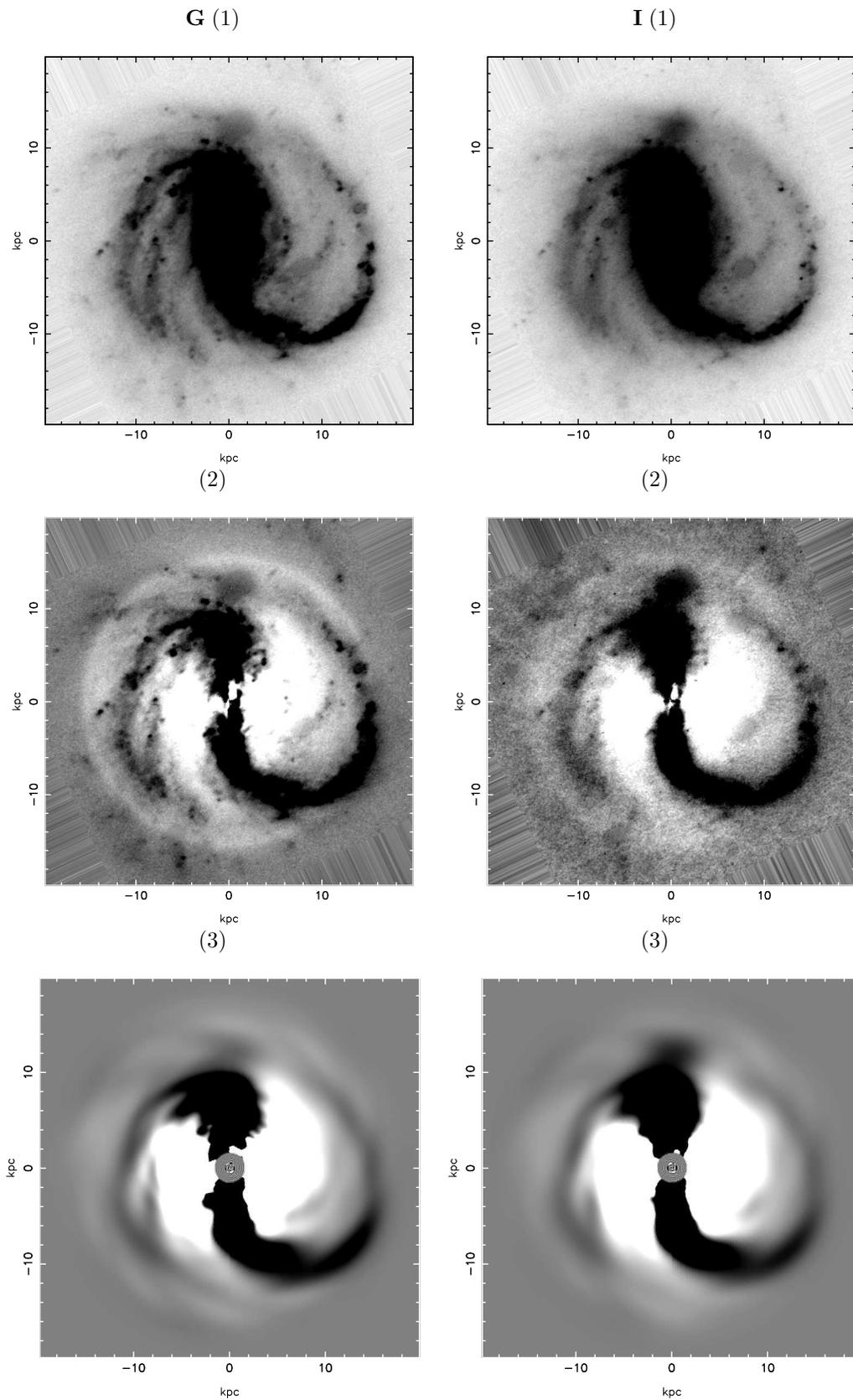


Figura 5.2: NGC7479 nas bandas  $g$  e  $i$ . (1) Imagens originais deprojetadas e sem as estrelas; (2) Imagens obtidas das anteriores em que foi subtraído o disco médio; (3) Imagens anti-transformada de Fourier (combinadas as dez componentes).

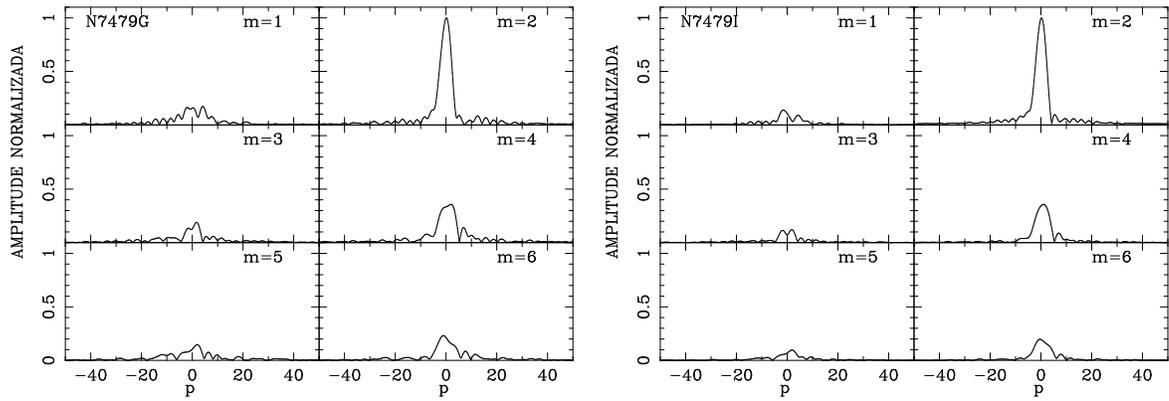


Figura 5.3: Coeficientes  $A(p, m)$  da transformada bidimensional de Fourier na imagem  $g$  e  $i$  de NGC7479, obtidos segundo o processo descrito no capítulo 2. A variável  $p$  está relacionada com o *pitch angle*  $\alpha$  por  $p = -m/\tan \alpha$ .

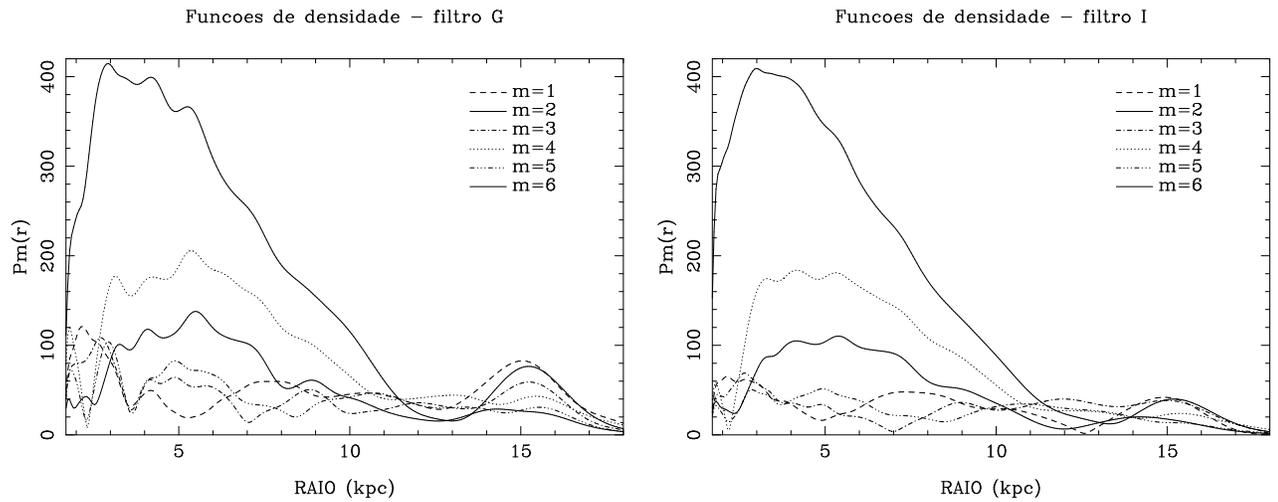


Figura 5.4: Funções de densidade radial nas bandas  $g$  e  $i$ .

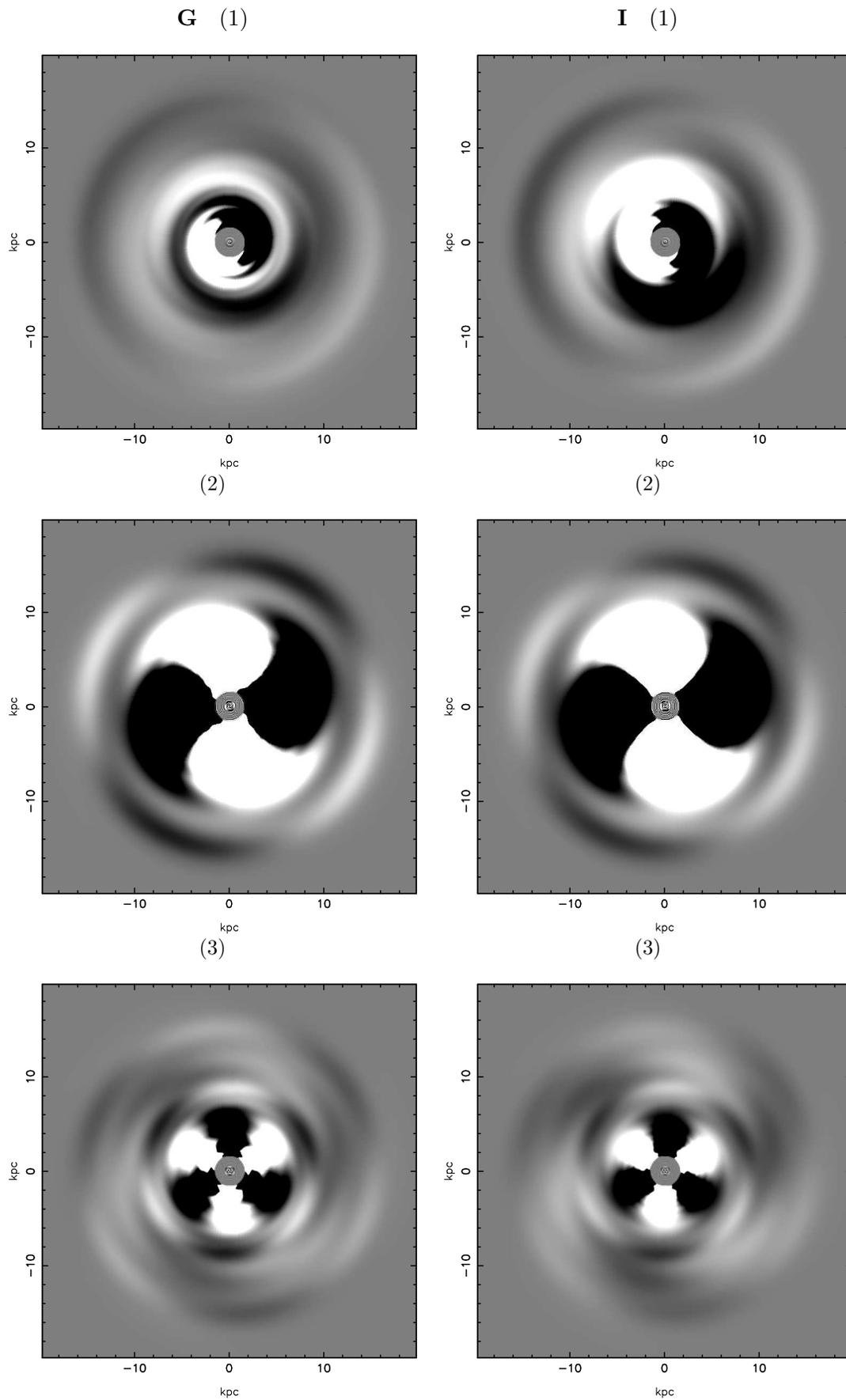


Figura 5.5: Espirais sintéticas nas bandas  $g$  e  $i$ , e componentes (1), (2) e (3).

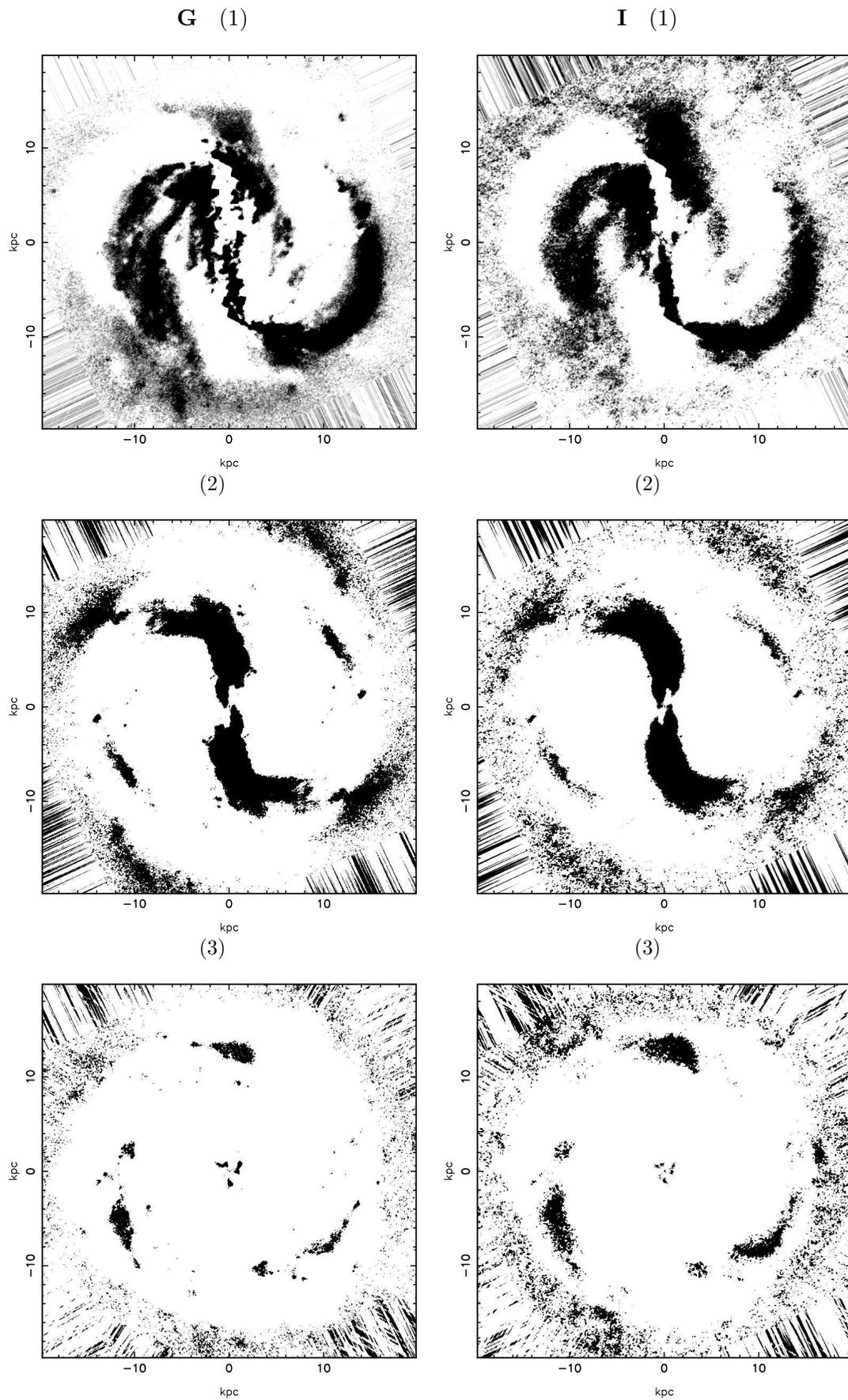


Figura 5.6: Imagens simetrizadas nas bandas  $g$  e  $i$ , e componentes (1), (2) e (3).

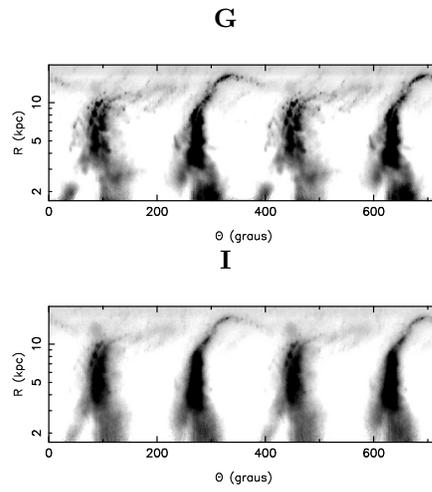


Figura 5.7: Imagens retificadas  $g$  e  $i$  das componentes originais, subtraído o disco médio.

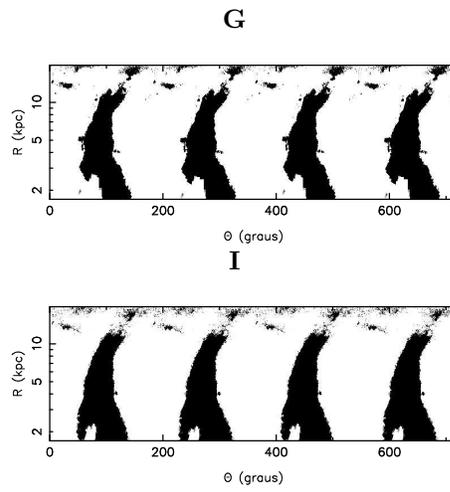


Figura 5.8: Imagens retificadas  $g$  e  $i$  para a componente 2 do método EEM92.

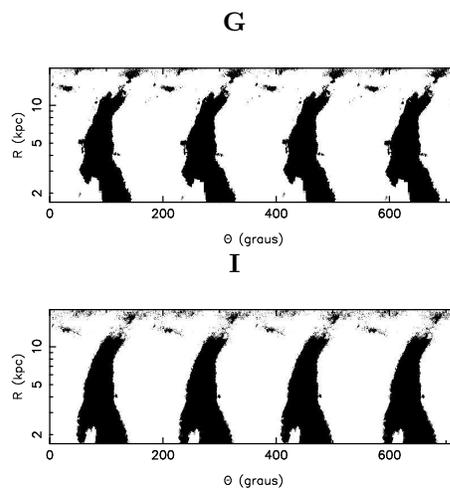


Figura 5.9: Imagens retificadas  $g$  e  $i$  da anti-transformada de Fourier.

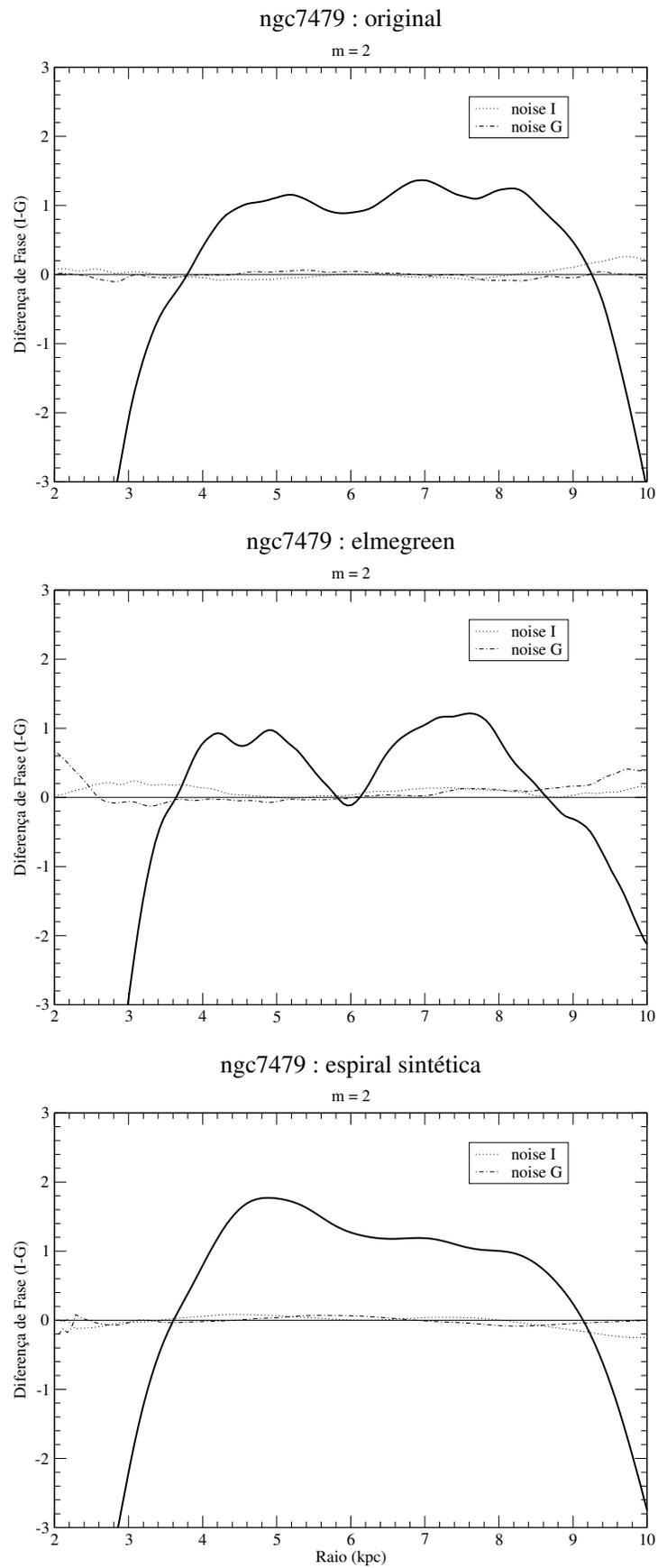


Figura 5.10: [Diferenças de Fase (*graus*)  $\times$  Raio (*kpc*)]. Os gráficos correspondem à componente  $m = 2$  relativos às imagens originais, método EEM92 e antitransformada.

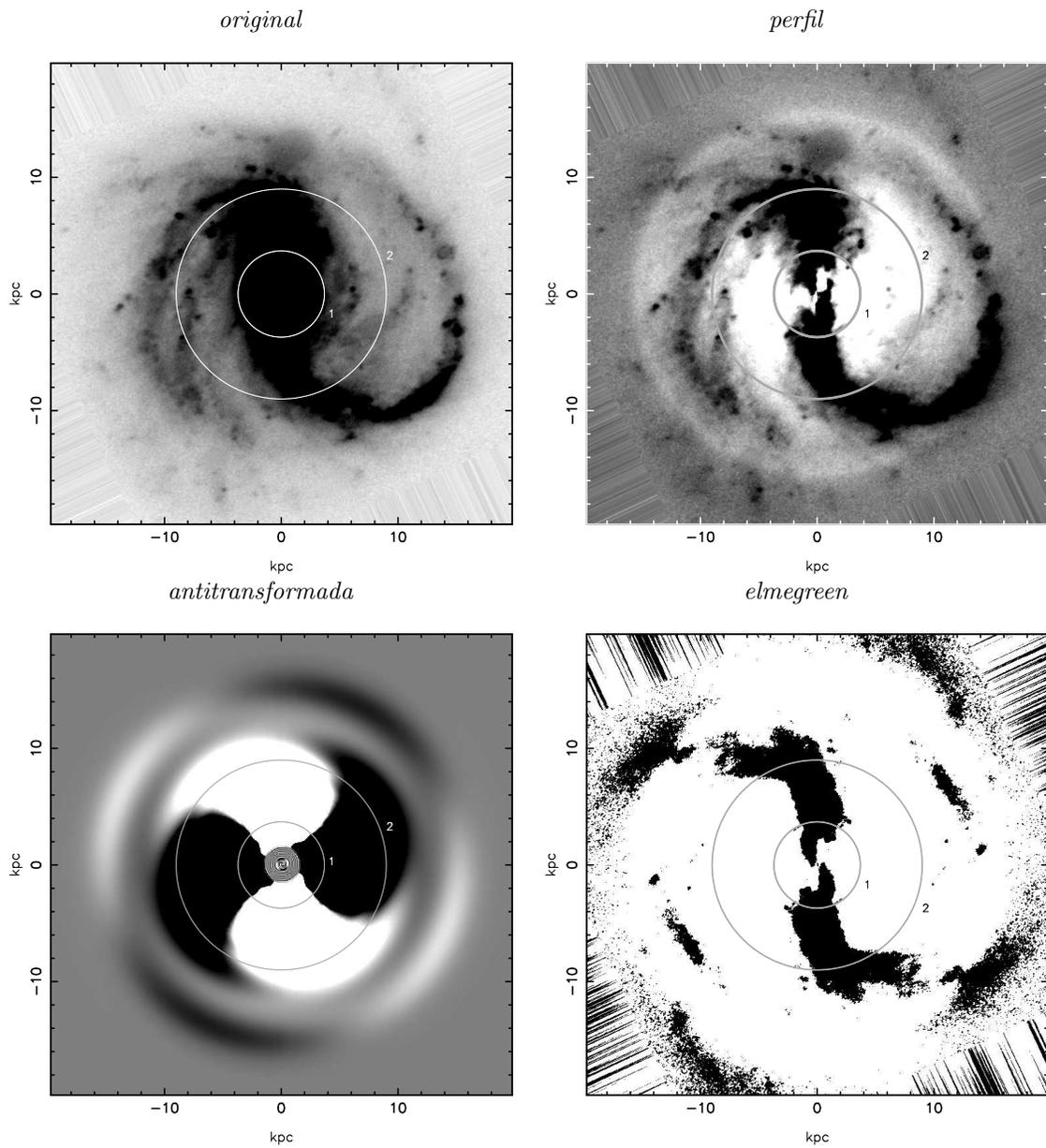


Figura 5.11: Os círculos indicam as posições das ressonâncias de corotação da componente  $m = 2$ . As imagens são na cor  $g$ .

## Capítulo 6

# Análise de NGC7678

A NGC7678 é uma galáxia espiral barrada com dois braços assimétricos. A barra e o braço que inicia na extremidade L são muito brilhantes, com forte condensação em sua extremidade oeste. O braço que se inicia nesta extremidade apresenta uma brusca mudança de direção em torno de  $90^\circ$  a  $\sim 9.5 \text{ kpc}$  do centro da galáxia e uma região de baixa densidade na direção NE. De acordo com a *fig. 6.2* este braço apresenta condensações localizadas e se estende ao sul da galáxia, provavelmente imerso em regiões HII, indicativo de intensa formação estelar. O braço no sentido N apesar de menos brilhante é bastante espesso. A barra tem uma extensão visual da ordem de  $6.0 \text{ kpc}$ .

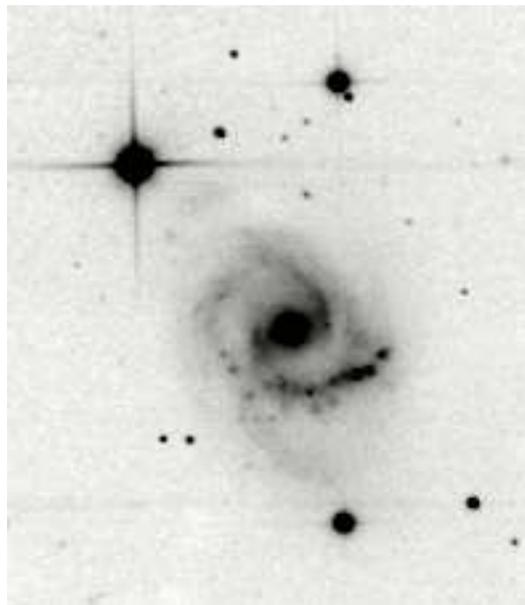


Figura 6.1: Imagem extraída do NED, na banda J e  $\lambda = 1.25 \mu\text{m}$ .

A análise de Fourier foi realizada entre  $0.828 \text{ kpc}$  e  $14.1 \text{ kpc}$ . Os espectros de Fourier (*fig. 6.3*) informam que as componentes  $m = 1, 2$  e  $3$  são relevantes, sendo confirmado pelas

funções de densidade de probabilidade (*fig. 6.4*). A componente 1 é forte entre as posições  $\sim 5 \text{ kpc}$  e  $10 \text{ kpc}$ , esta última no limite espacial da galáxia. No entanto, esta componente é atenuada pela componente 2 entre as posições de  $\sim 5.0 \text{ kpc}$  e  $7.0 \text{ kpc}$ . A componente  $m = 2$  é importante em quase toda a extensão da galáxia, exceto na região modulada pela componente 1. A componente  $m = 3$  também se apresenta importante entre as posições  $\sim 4.5 - 5.5 \text{ kpc}$  e  $\sim 6.5 - 11 \text{ kpc}$ .

Pelos diagrama de fase  $\log(R)$  vs.  $\theta$  (*fig. 6.7*), se observa que o braço S não é logarítmico e a provável presença de região HII no interior da barra. Além da extremidade da barra, que dá origem ao braço S, em torno de  $10 \text{ kpc}$ , se vê sutilmente uma pequena estrutura, localizada nesse diagrama a  $\sim 250^\circ$ , provavelmente sendo a extensão do braço N, ao sul da galáxia. Sendo parte de um braço espiral, esta extensão tem uma característica logarítmica. Na extremidade oeste da barra, ainda se verificam dois braços quase logarítmicos, um interno à barra e o outro maior no sentido N. Por outro lado, no diagrama de fase para a imagem simetrizada (*fig. 6.8*), ambos os braços apresentam comportamento logarítmicos puros. Por esses diagramas de fase, a barra tem uma inclinação aproximada de  $30^\circ$  na direção leste-oeste da imagem da galáxia.

Nas imagens antitransformada de Fourier (*fig. 6.5*) e EEM92 (*fig. 6.6*), verificam-se a presença forte da componente  $m = 1$ , enquanto para a componente  $m = 2$  observa-se uma forte simetria com respeito aos braços espirais. Embora a componente  $m = 3$  seja mais fraca, também se verifica sua importância nas duas bandas, principalmente na imagem simetrizada.

A diferença de fase em função do raio (*fig. 6.10*) mostra que há duas corotações da componente  $m = 1$ , em torno dos valores médios de  $4.0 \text{ kpc}$  e  $8.4 \text{ kpc}$ . A primeira corrotação é na extremidade da barra. O círculo correspondente à corrotação de raio maior atravessa uma região de baixa densidade a NE da galáxia (*fig. 6.11*). Os valores médios para os raios de corrotação da componente  $m = 2$  são  $\sim 5.7 \text{ kpc}$  e  $\sim 9.7 \text{ kpc}$ . Na primeira ressonância, o círculo de corrotação também corta uma região de baixa densidade, aproximadamente ao S e ao N da galáxia (*fig. 6.12*). A corrotação mais externa corta a região onde há uma mudança abrupta de  $\sim 90^\circ$  na direção do braço à L e onde a densidade é menor.

Através das funções de densidade radial (*fig. 6.4*), e tendo em conta que nesta galáxia há duas ressonâncias de corrotação para a componente de interesse ( $m = 2$ ), os raios das extensões interna e externa dos sistemas da estrutura espiral observados são (i)  $R_1 \simeq 2 \text{ kpc}$  e  $R_2 \simeq 6 \text{ kpc}$  para  $R_{CR} = 5.7 \text{ kpc}$  e (ii)  $R_1 \simeq 6.5 \text{ kpc}$  e  $R_2 \simeq 12 \text{ kpc}$  para  $R_{CR} = 9.7 \text{ kpc}$ . A *tabela 6.1* mostra o resultado dos parâmetros de Canzian para a componente 2.

m	$R'_2 \leq 5.8 \times R_1$	$R_{CR(i)} \leq 3.4 \times R_1$	$R_{CR(o)} \geq 0.6 \times R_2$	RC
2	11.6	6.8	3.6	5.7
2	37.7	22.1	7.2	9.7

Tabela 6.1: Comparação dos parâmetros de Canzian com os raios das ressonâncias de corrotação (*fig. 6.10*) para a componente  $m = 2$ .

Os parâmetros  $R'_2$  das extensões externas dos sistemas da estrutura espiral estão de acordo com os raios correspondentes de Canzian (segunda coluna da *tabela 6.1*). De forma análoga, ambos os raios de corrotação (terceira e quarta colunas), também conferem com os parâmetros correspondentes de Canzian ( $R_{CR(i)}$  e  $R_{CR(o)}$ ).

A *tabela 6.2* mostra os resultados dos *pitch angles* para as componentes  $m = 1, 2, 3$  e  $4$  nas cores  $g$  e  $i$ .

Banda	$m$	$p$	Amplitude	$\alpha$
$g$	1	-0.25	0.567	$76.0 \pm 12.5$
	2	-0.5	1	$76.0 \pm 6.6$
	3	5	0.030	$31.0 \pm 1.3$
	4	4.75	0.327	$40.1 \pm 1.4$
$i$	1	0	0.348	$90 \pm 14.0$
	2	-0.25	1	$82.9 \pm 7.1$
	3	5.25	0.191	$29.7 \pm 1.1$
	4	5.00	0.234	$38.7 \pm 3.5$

Tabela 6.2: Valores derivados dos espectros de Fourier para NGC7678.

As diferenças nos *pitch angles* estão aproximadamente de acordo com os diagramas de fase (*fig. 6.9*) para as componentes ( $m =$ ) 1 e 2, isto é:

$$m = 1 \Rightarrow \Delta\alpha \simeq 14^\circ,$$

$$m = 2 \Rightarrow \Delta\alpha \simeq 6.9^\circ,$$

$$m = 3 \Rightarrow \Delta\alpha \simeq 1.5^\circ,$$

$$m = 4 \Rightarrow \Delta\alpha \simeq 1.4^\circ.$$

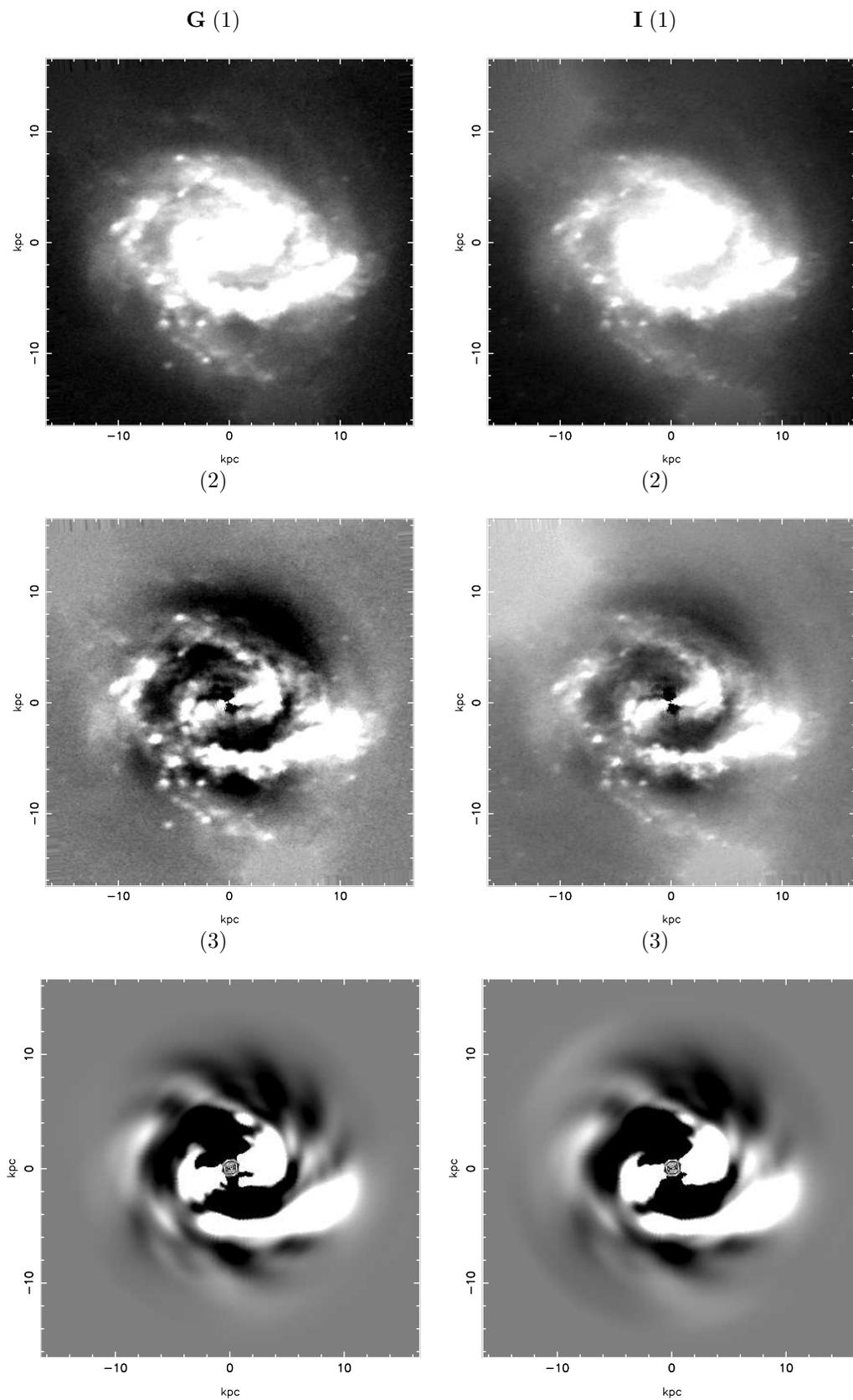


Figura 6.2: NGC7678 nas bandas  $g$  e  $i$ . (1) Imagens originais deprojetadas e sem as estrelas; (2) Imagens obtidas das anteriores em que foi subtraído o disco médio; (3) Imagens anti-transformada de Fourier (combinadas as dez componentes).

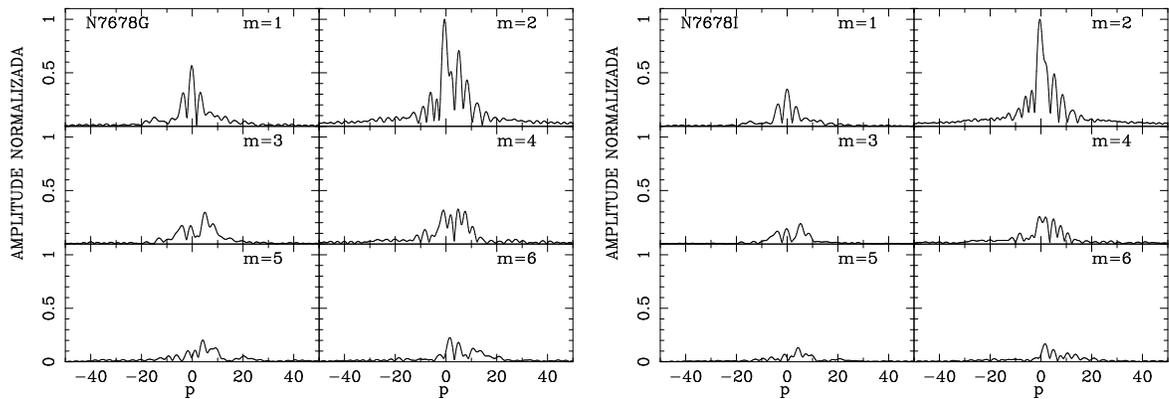


Figura 6.3: Coeficientes  $A(p, m)$  da transformada bidimensional de Fourier na imagem  $g$  e  $i$  de NGC7678, obtidos segundo o processo descrito no capítulo 2. A variável  $p$  está relacionada com o *pitch angle*  $\alpha$  por  $p = -m/\tan \alpha$ .

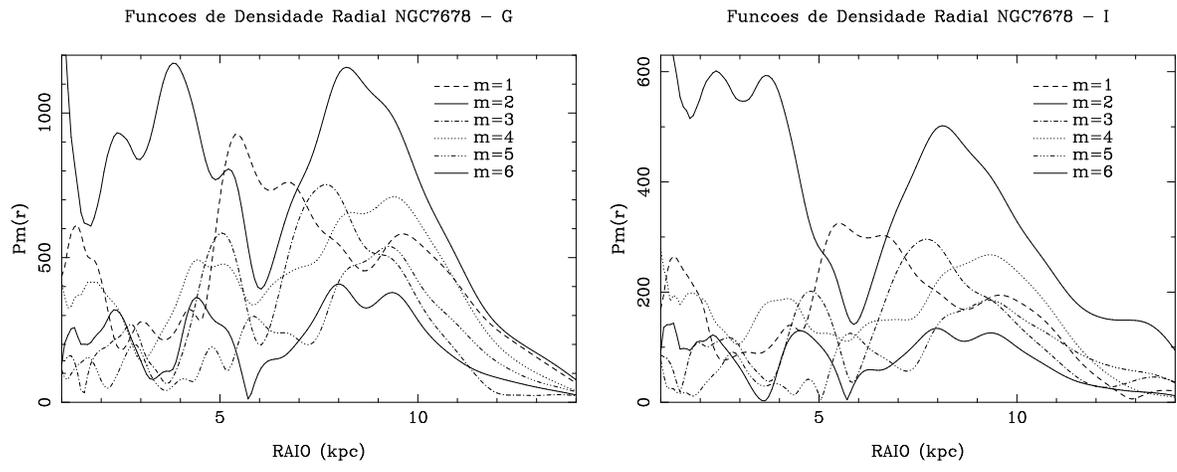


Figura 6.4: Funções de densidade radial nas bandas  $g$  e  $i$ .

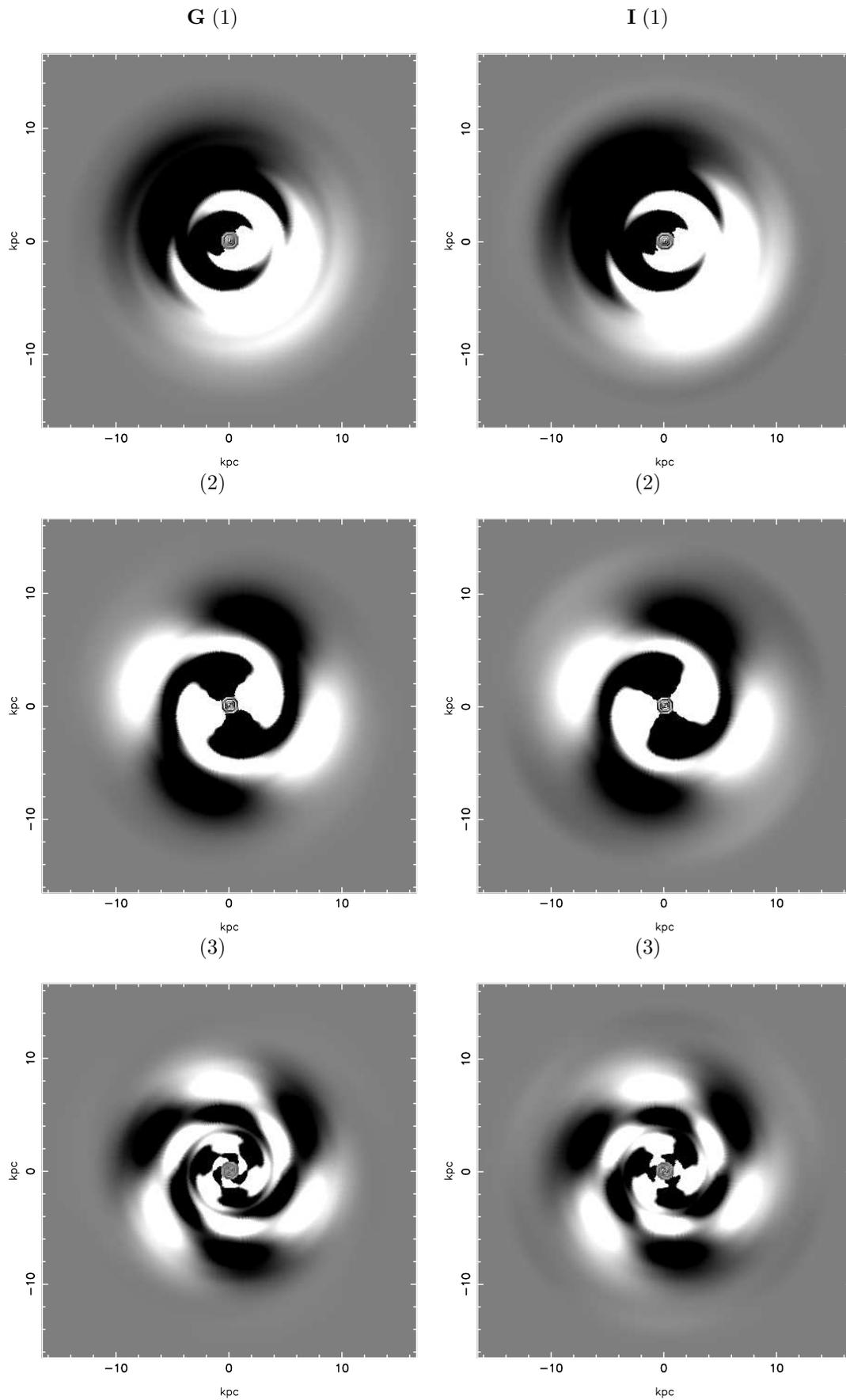


Figura 6.5: Espirais sintéticas nas bandas  $g$  e  $i$ , e componentes (1), (2) e (3).

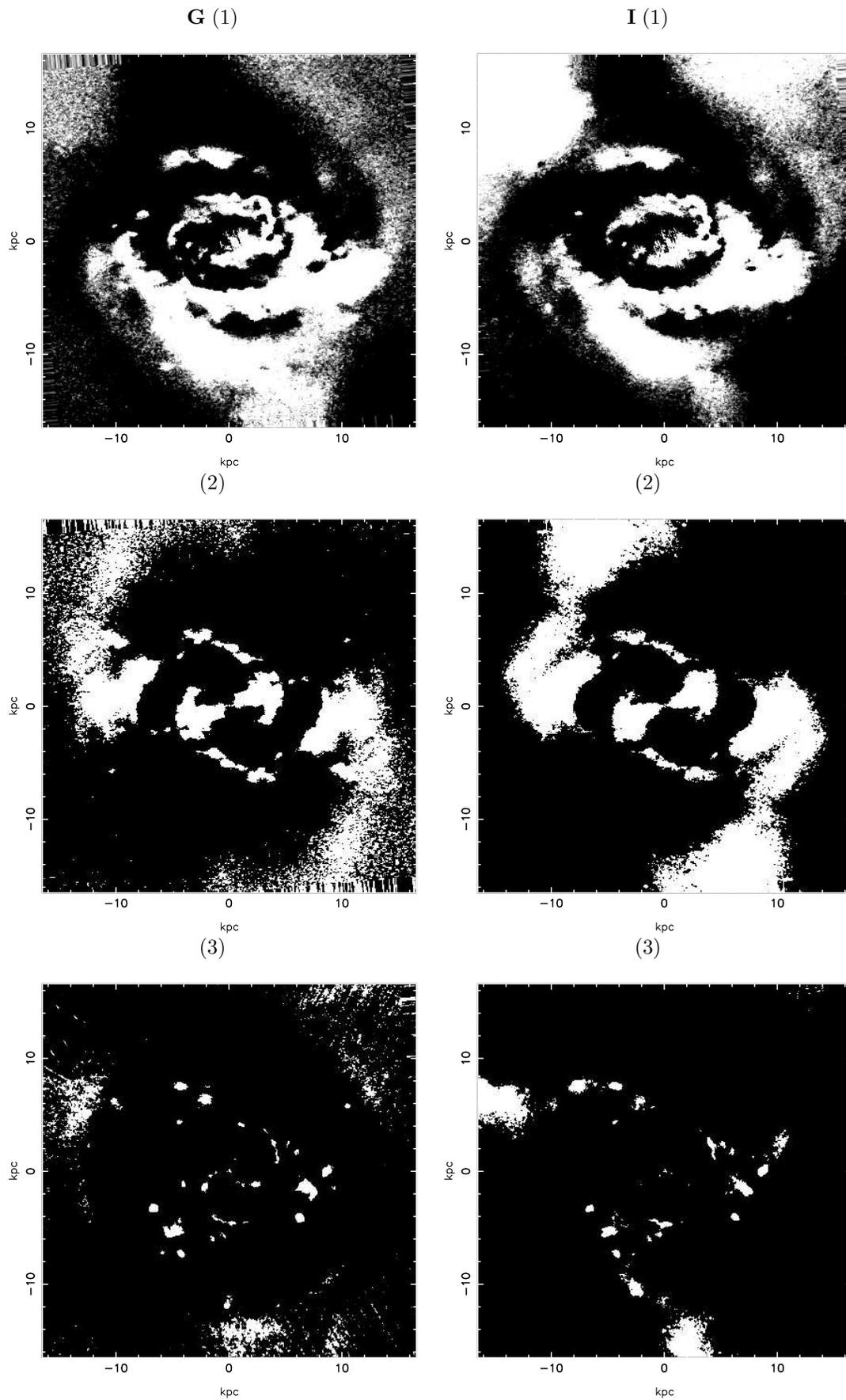


Figura 6.6: Imagens simetrizadas nas bandas *g* e *i*, e componentes (1), (2) e (3).

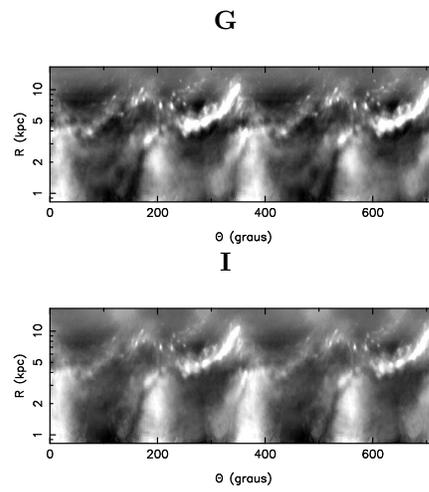


Figura 6.7: Imagens retificadas  $g$  e  $i$  das componentes originais, subtraído o disco médio.

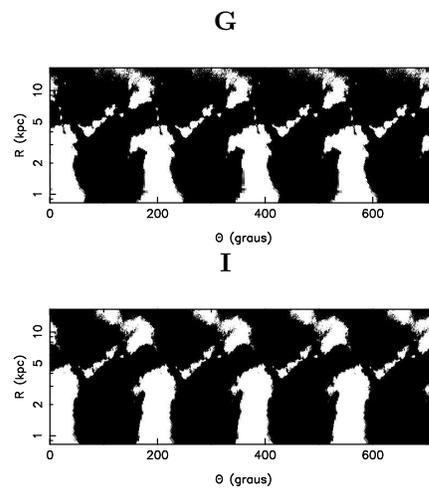


Figura 6.8: Imagens retificadas  $g$  e  $i$  para a componente 2 do método EEM92.

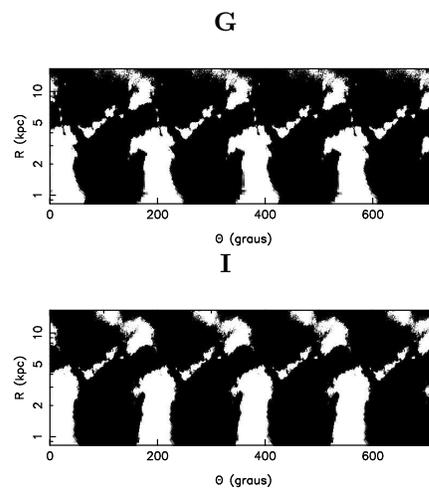


Figura 6.9: Imagens retificadas  $g$  e  $i$  da anti-transformada de Fourier.

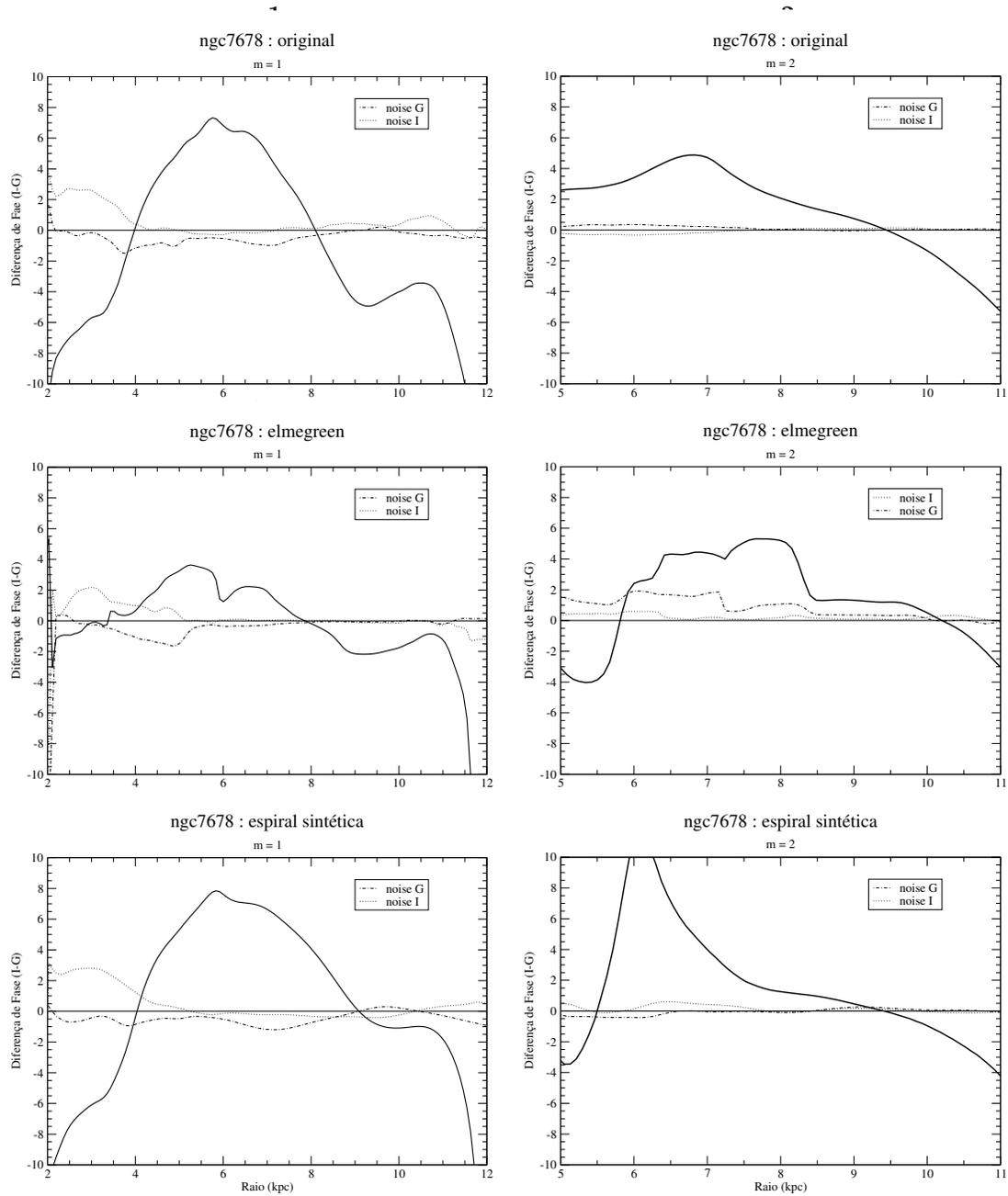


Figura 6.10: [Diferenças de Fase (*graus*)  $\times$  Raio (*kpc*)]. Os gráficos correspondem às componentes  $m = 1$  e  $m = 2$  relativos às imagens originais, método EEM92 e antitransformada.

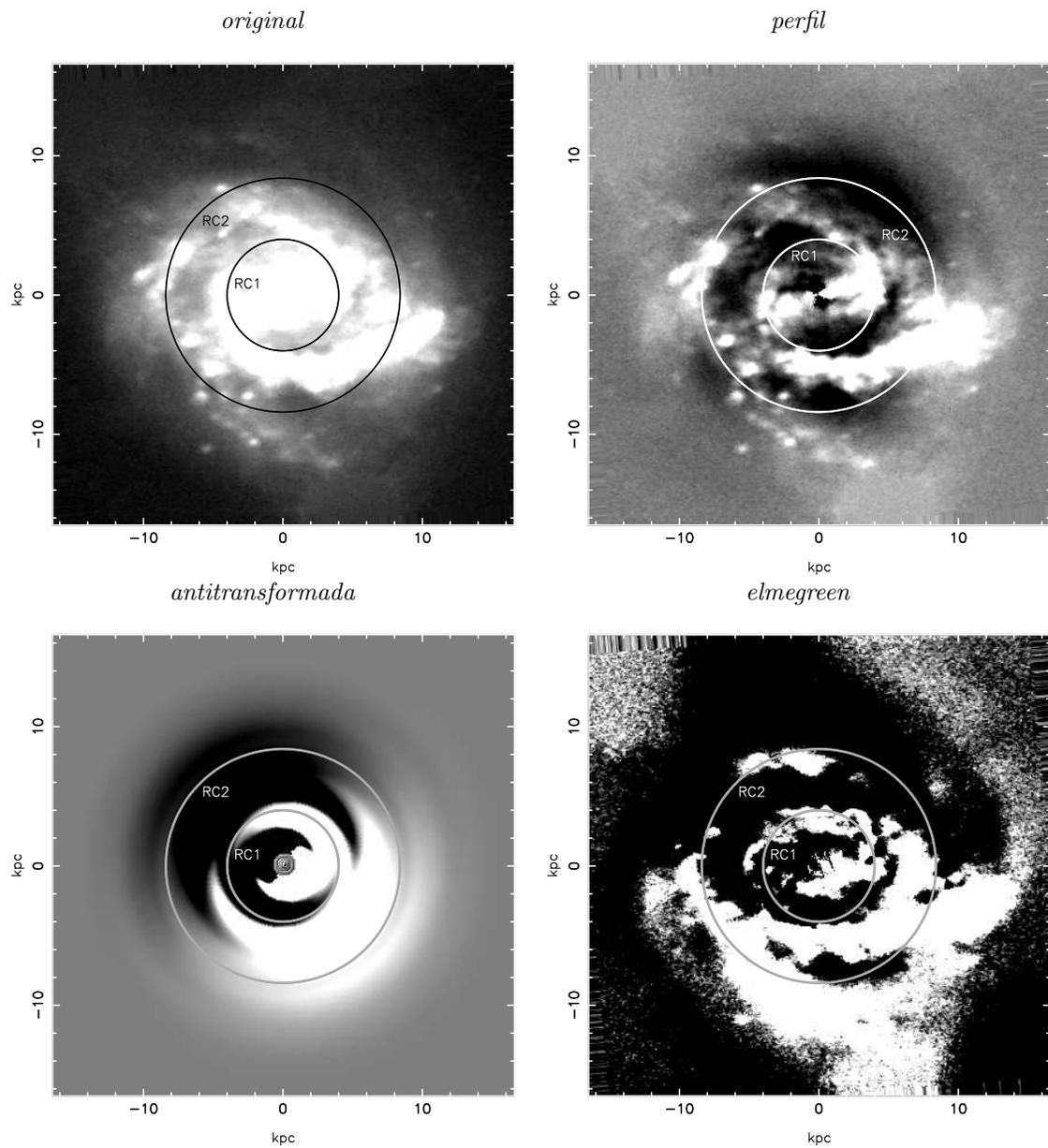


Figura 6.11: Os círculos indicam as posições das ressonâncias de corotação para a componente  $m = 1$ .

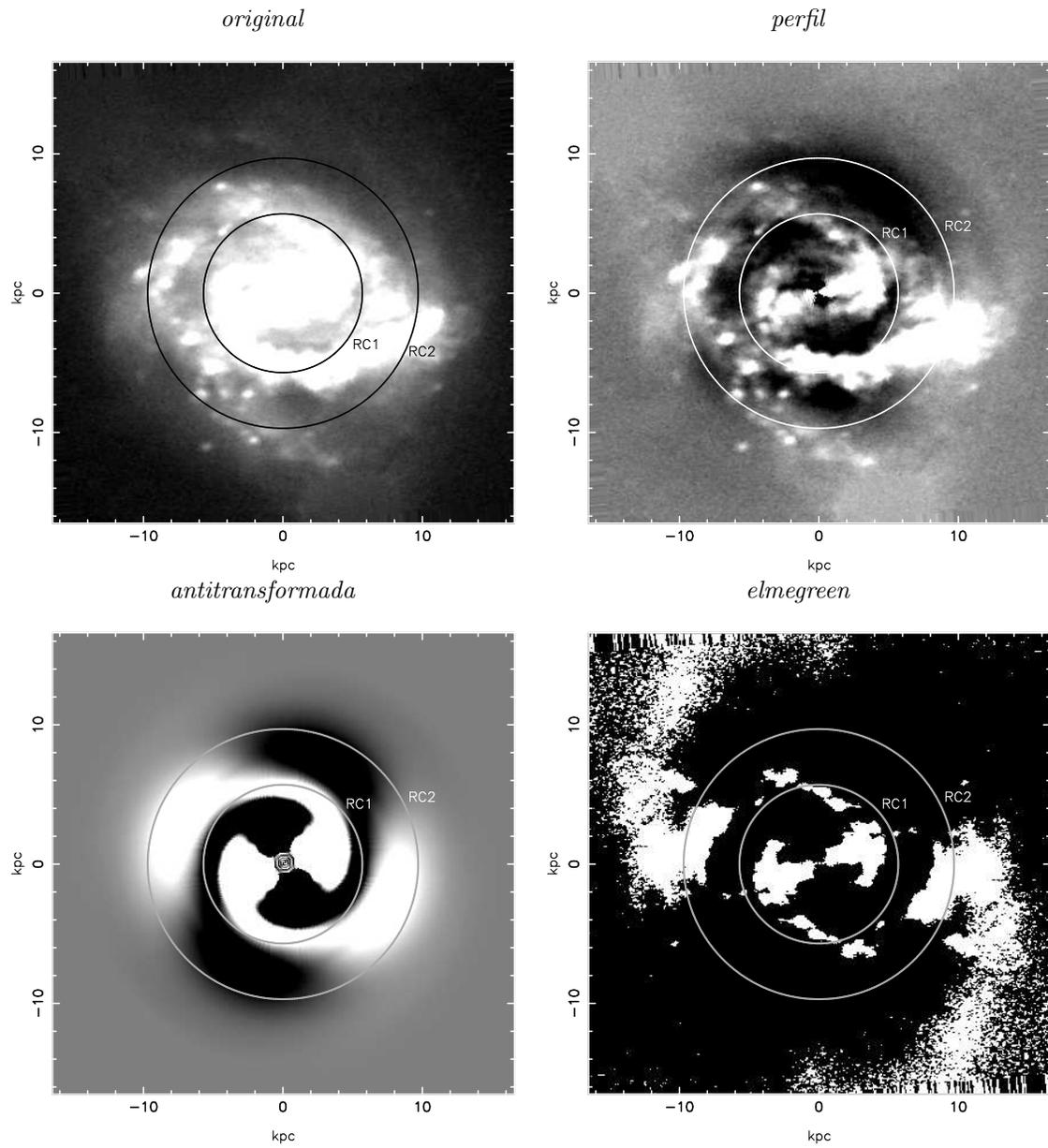


Figura 6.12: Os círculos indicam as posições das ressonâncias de corotação para a componente  $m = 2$ .

## Capítulo 7

# Análise de NGC7753

A NGC7753 é uma galáxia com dois braços espirais que se destacam fortemente nas imagens originais (*figs. 7.2*), apresentam-se simétricos e com o braço O mais intenso que o braço L, com condensações visíveis ao norte e a sudoeste. Também se destaca uma pequena barra central. Dentro da resolução espacial das imagens, observam-se que os braços se enrolam até os limites da barra. Há uma quebra no braço oeste a  $\sim 20 \text{ kpc}$  e outra quebra mais acentuada no braço L a  $\sim 25 \text{ kpc}$ . As regiões de flutuações ao longo do braço oeste indica intensa formação estelar. Há uma galáxia interactuante ao S da galáxia principal, provavelmente absorvendo material do braço oeste, como se vê na imagem da *fig. 7.1*. As imagens da galáxia são de  $300 \times 300$  píxeis, com  $1 \text{ pix} = 0.12260 \text{ kpc}$ .

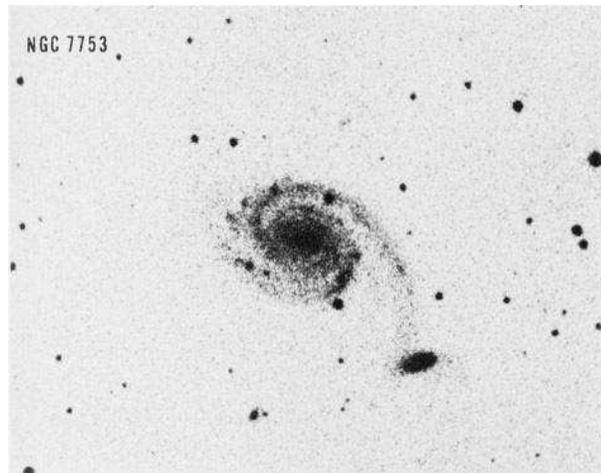


Figura 7.1: Imagem NGC7753 extraída do NED, na banda B e  $\lambda = 4360\text{\AA}$ .

A análise de Fourier foi realizada entre  $1.23 \text{ kpc}$  e  $33.1 \text{ kpc}$ . Os espectros de Fourier (*fig. 7.3*) informam que a componente 2 é mais significativa que as demais componentes. Notam-se modulações diversas na componente 2, sendo confirmada pela funções de densidade (*fig. 7.4*). Essas funções magnificam a componente 3, nas regiões de  $\sim 9$  a  $14 \text{ kpc}$

e  $\sim 16$  a  $21 \text{ kpc}$  e esta apresenta também várias modulações. Com menor importância, a componente 1 aparece magnificada nas regiões próximas a  $6 \text{ kpc}$  e  $17.5 \text{ kpc}$ .

Nas imagens antitransformada de Fourier (*fig. 7.5*) verificam-se a presença das três componentes, com mais destaque para as componentes 2 e 3 e, mais fraca, a componente 1. Nas imagens correspondentes ao método EEM92 (*fig. 7.6*), também se observam as três componentes, sendo aqui a componente 1 mais evidente que a 3. A componente 2 destaca simetria tanto relativa à barra quanto aos braços espirais O e L, e ainda enfatiza as quebras em ambos os braços.

Pelos diagramas de fase  $\log(R)$  vs.  $\theta$  (*figs. 7.7 a 7.9*), notam-se que os dois braços espirais são logarítmicos puros, ora confirmado pela simetria (*fig. 7.8*). Nesses diagramas, obtêm-se que a barra tem uma extensão de  $\sim 7.5 \text{ kpc}$ . Além disso, os braços internos ao disco que contornam a barra também são logarítmicos, e com *pitch angles* distintos. Inspeccionando esses diagramas, observam-se que a barra está inclinada de  $\sim 20 \text{ graus}$  na direção O-L.

A diferença de fase em função do raio (*fig. 7.10*) mostram as possibilidades de ressonância de corotação (CR) para as componentes  $m = 1$  e  $2$ . Para a componente 1 a ressonância está na posição  $\sim 12.1 \pm 1.3 \text{ kpc}$ . O círculo de corotação correspondente é mostrado nas imagens da *fig. 7.11*, enquanto as imagens da *fig. 7.12* mostram o círculo para a componente 2. Essa ressonância está a  $\sim 14.8 \pm 0.5 \text{ kpc}$ . A probabilidade da ressonância da componente 1 é menor que a da componente 2, face ao ruído observado pelo método *elmegreen*, mas esta ressonância ainda é real, como se vê nas imagens *antitransformada* e *elmegreen*.

Através das funções de densidade radial (*fig. 7.4*), e tendo em conta que nesta galáxia há *uma* ressonância de corotação para a componente  $m = 2$ , os raios das extensões interna e externa da estrutura espiral observados são  $R_1 \simeq 6 \text{ kpc}$  e  $R_2 \simeq 16 \text{ kpc}$ . A *tabela 7.1* mostra o resultado dos parâmetros de Canzian para a componente 2.

m	$R'_2 \leq 5.8 \times R_1$	$R_{CR(i)} \leq 3.4 \times R_1$	$R_{CR(o)} \geq 0.6 \times R_2$	RC
2	34.8	20.4	9.6	14.8

Tabela 7.1: Comparação dos parâmetros de Canzian com o raio da ressonância de corotação (*fig. 7.10*) para a componentes  $m = 2$ .

O parâmetro  $R_2$  da extensão externa da estrutura espiral da componente  $m = 2$  está de acordo com o raio correspondente de Canzian (segunda coluna da *tabela 7.1*). De forma análoga, o raio de corotação também confere com os parâmetros correspondentes de Canzian, ( $R_{CR(i)}$  e  $R_{CR(o)}$ ).

A *tabela 7.2* mostra os valores dos *pitch angles* para as componentes  $m = 1, 2$  e  $3$  nas cores  $g$  e  $i$ .

Banda	$m$	$p$	Amplitude	$\alpha$
$g$	1	-5.5	0.203	$10.3 \pm 0.5$
	1	2.5	0.171	$-21.8 \pm 2.1$
	2	-0.25	1	$82.9 \pm 7.1$
	3	0.75	0.171	$-76 \pm 4.5$
$i$	1	-5.25	0.105	$10.8 \pm 0.51$
	1	3	0.131	$-18.4 \pm 1.6$
	2	0	1	$90 \pm 7.1$
	3	0.5	0.156	$-80.5 \pm 4.7$

Tabela 7.2: Valores derivados dos espectros de Fourier para NGC7753.

A comparação dos resultados da *tabela 7.2* para a componente  $m = 1$  e os correspondentes diagramas de fase, confirmam uma probabilidade menor para esta ressonância de corrotação, sendo mais expressivo o resultado para a componente  $m = 2$ , ou seja:

$$m = 1 \Rightarrow \Delta\alpha \leq 3.4^\circ,$$

$$m = 2 \Rightarrow \Delta\alpha \simeq 7.1^\circ,$$

$$m = 3 \Rightarrow \Delta\alpha \simeq 4.5^\circ.$$

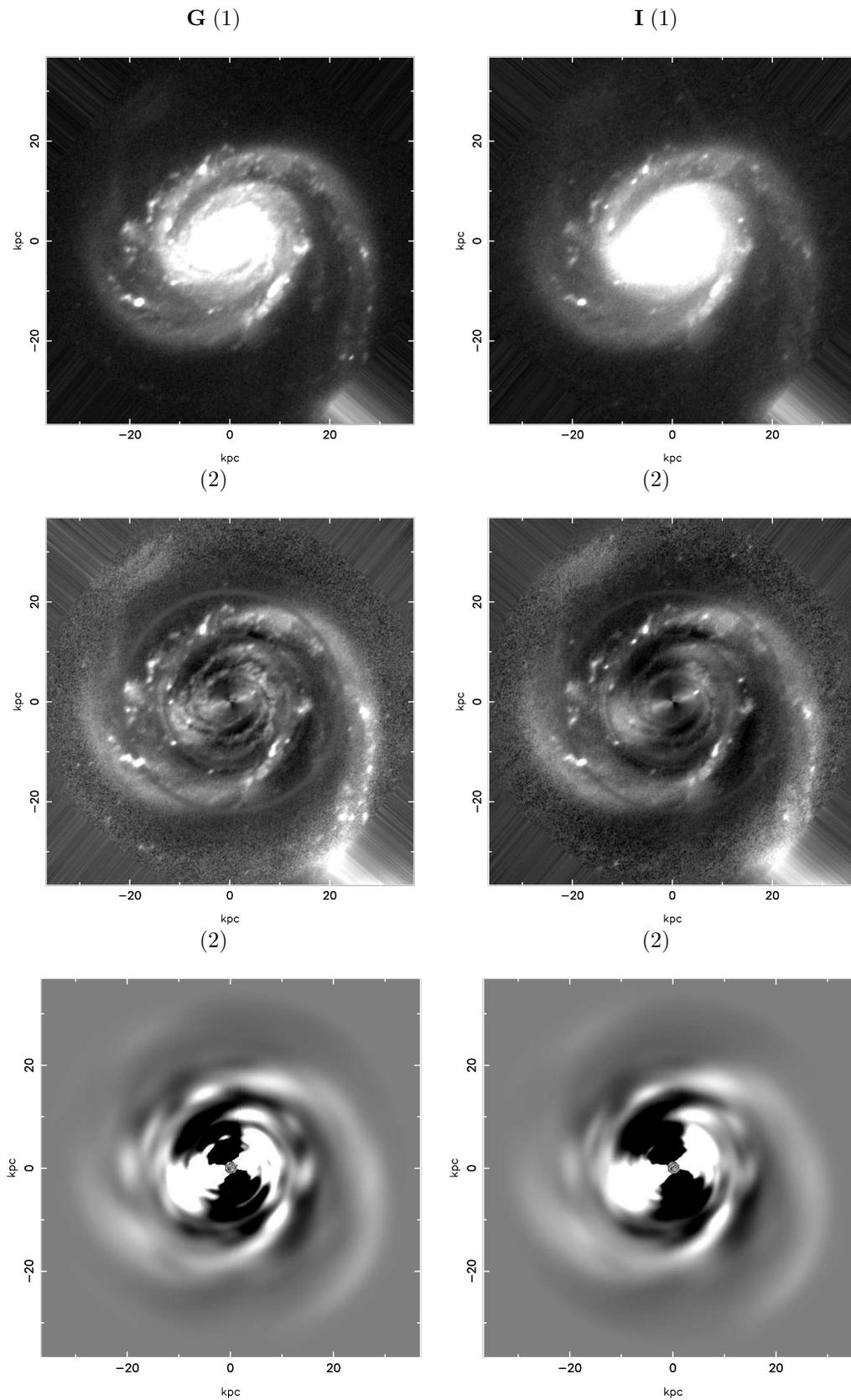


Figura 7.2: NGC7753 nas bandas  $g$  e  $i$ . (1) Imagens originais deprojetadas e sem as estrelas; (2) Imagens obtidas das anteriores em que foi subtraído o disco médio; (3) Imagens anti-transformada de Fourier (combinadas as dez componentes).

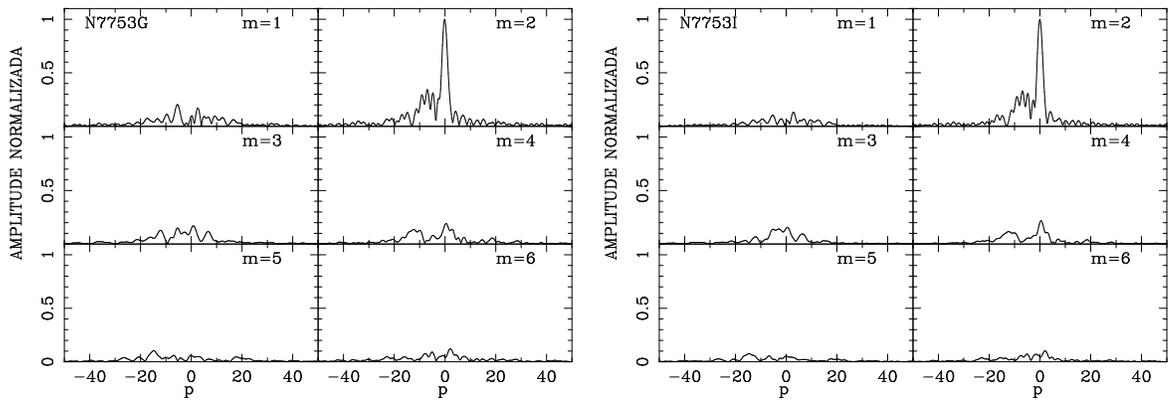


Figura 7.3: Coeficientes  $A(p, m)$  da transformada bidimensional de Fourier na imagem  $g$  e  $i$  de NGC7753, obtidos segundo o processo descrito no capítulo 2. A variável  $p$  está relacionada com o *pitch angle*  $\alpha$  por  $p = -m/\tan \alpha$ .

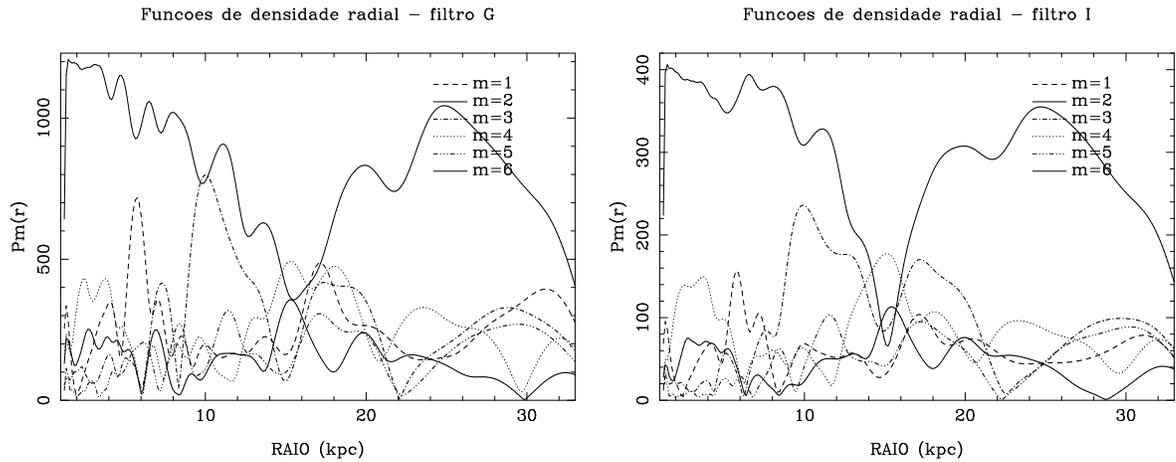


Figura 7.4: Funções de densidade radial nas bandas  $g$  e  $i$ .

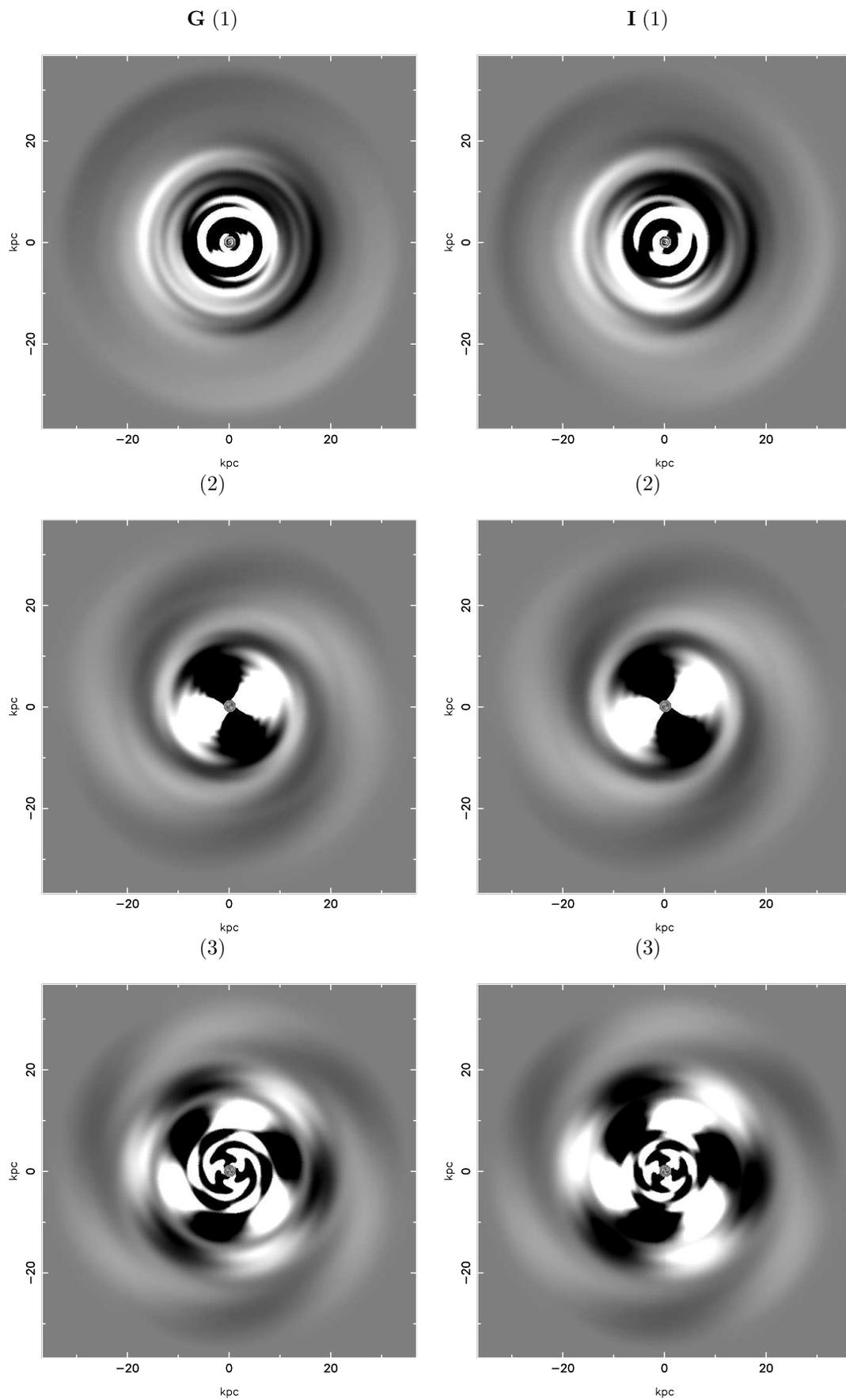


Figura 7.5: Espirais sintéticas nas bandas  $g$  e  $i$ , e componentes (1), (2) e (3).

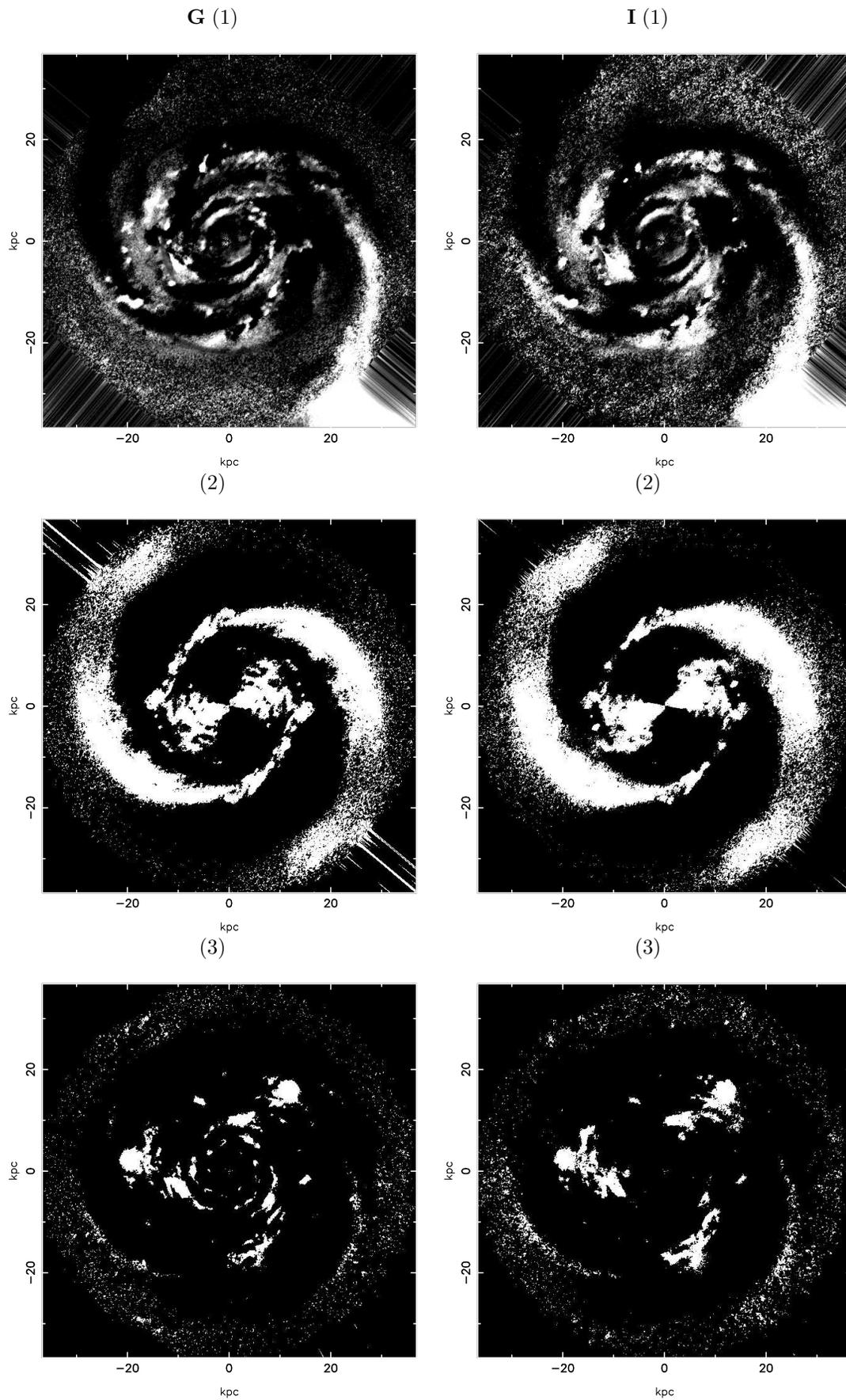


Figura 7.6: Imagens simetrizadas nas bandas *g* e *i*, e componentes (1), (2) e (3).

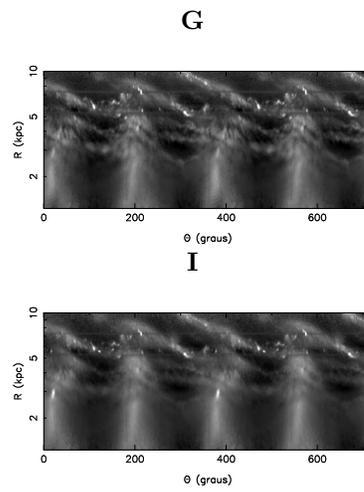


Figura 7.7: Imagens retificadas  $g$  e  $i$  das componentes originais, subtraído o disco médio.

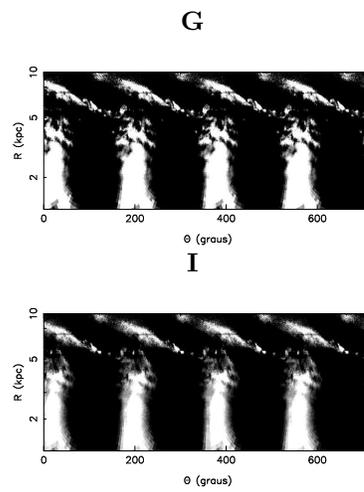


Figura 7.8: Imagens retificadas  $g$  e  $i$  para a componente 2 do método EEM92.

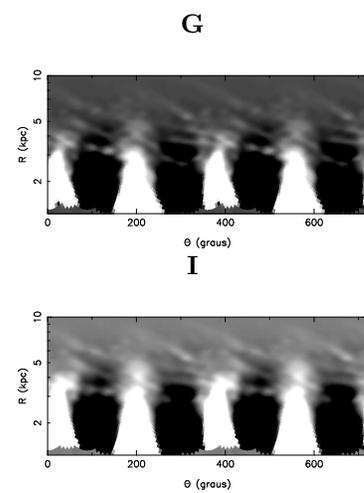


Figura 7.9: Imagens retificadas  $g$  e  $i$  da anti-transformada de Fourier.

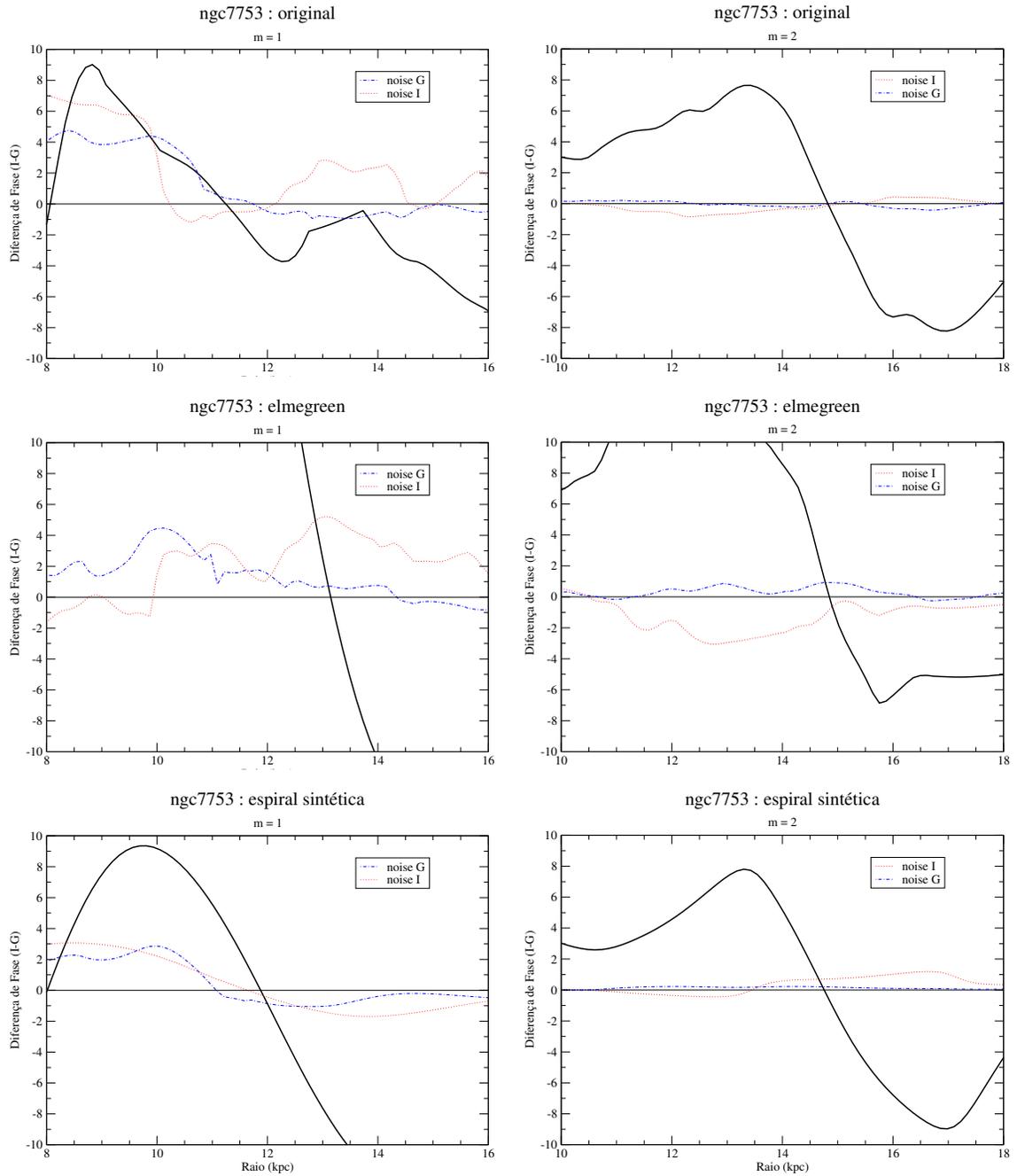


Figura 7.10: [Diferenças de Fase (*graus*)  $\times$  Raio (*kpc*)]. Os gráficos correspondem às componentes  $m = 1$  e 2 relativos às imagens originais, método EEM92 e antitransformada.

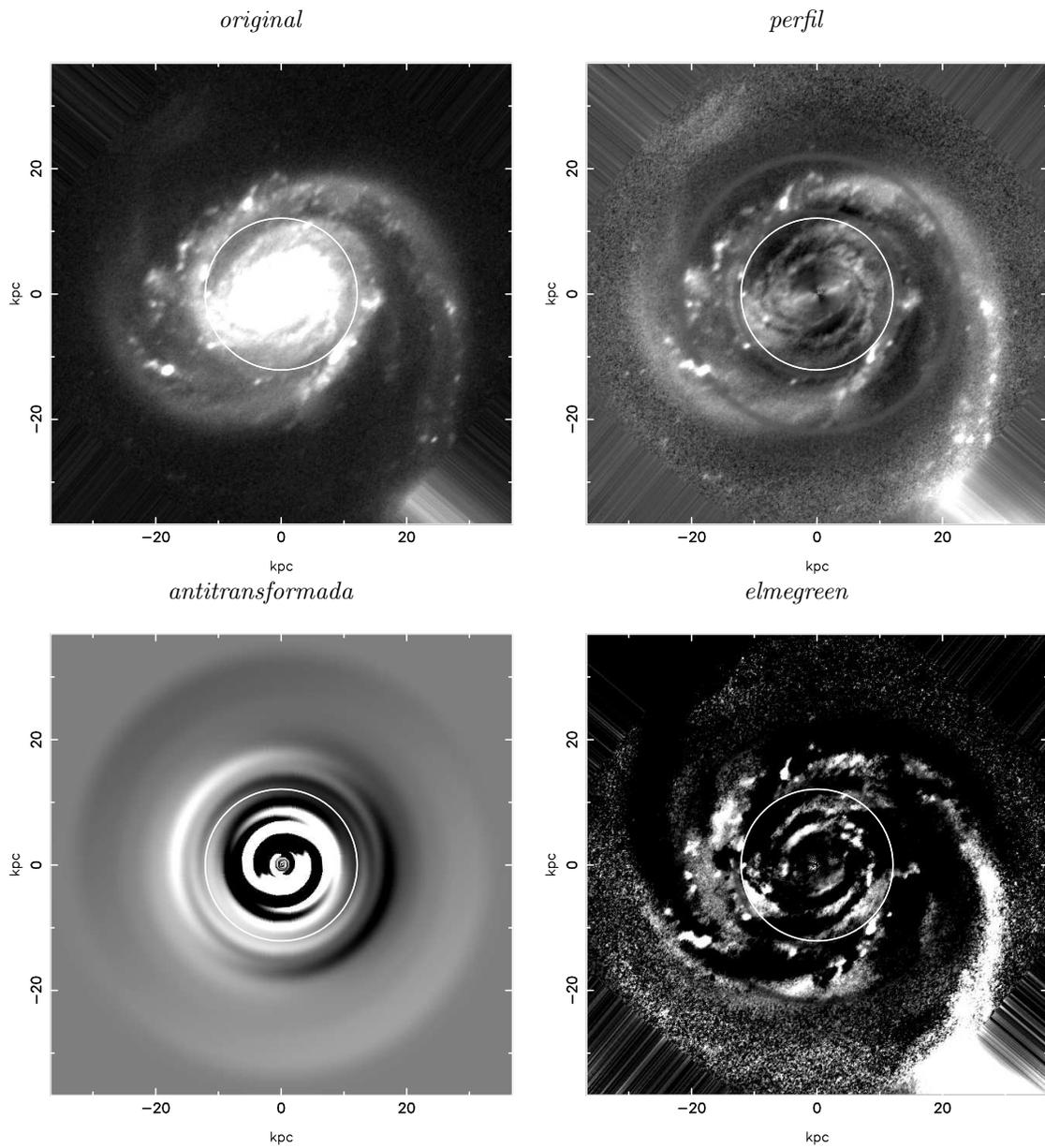


Figura 7.11: O círculo indica a posição da provável CR para a componente 1 em  $\sim 12.1 \pm 1.3$  kpc. As imagens são na cor  $g$ .

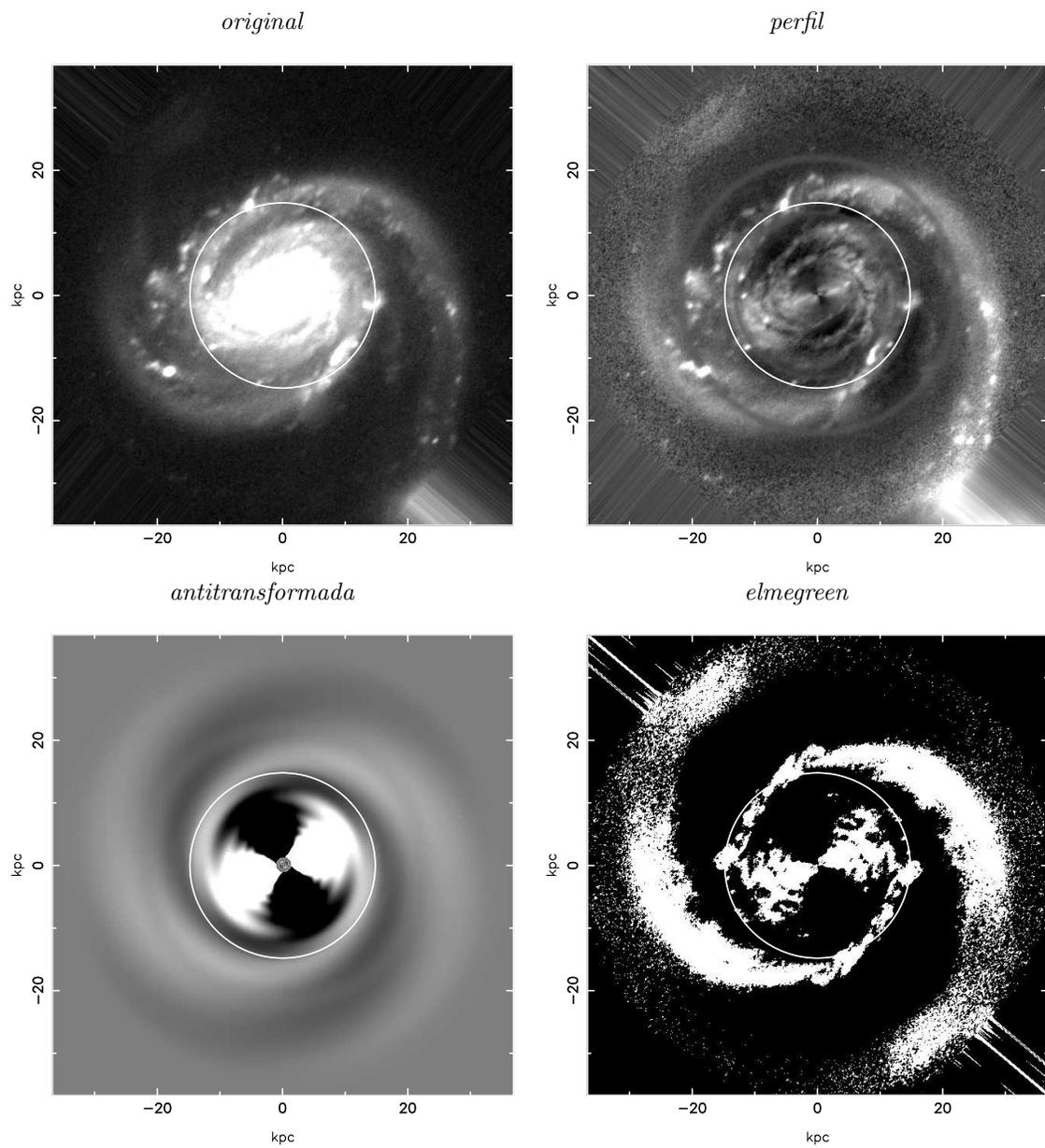


Figura 7.12: O círculo indica a posição da provável CR para a componente 2 em  $\sim 14.8 \pm 0.5$  kpc. As imagens são na cor  $g$ .

## Capítulo 8

# Conclusões

Estas conclusões referem-se ao conjunto das 18 galáxias, as 5 ilustradas nos capítulos 3 a 7 e as 13 apresentadas no CD em anexo.

Três métodos foram diretamente aplicados para a obtenção das ressonâncias de cor-rotação (CR) de galáxias de disco que apresentam estruturas espirais bem definidas. O método da transformada de Fourier unidimensional aplicado aos perfis azimutais se caracteriza como uma ferramenta poderosa para a detecção da ressonância de cor-rotação a partir de imagens na banda ótica e no infravermelho próximo. Nesta análise, a coerência dos resultados obtidos para uma mesma galáxia aplicada às imagens originais, àquelas tratadas por meio da transformada de Fourier bidimensional e pela simetrização de EEM92, corroboram esta afirmação. O processo de análise foi a partir das imagens originais em que foram subtraídos as estrelas e os raios cósmicos, além da subtração do disco médio, restando a estrutura de braços contrastada. Ainda no processo de obtenção das ressonâncias, tem-se a forma consistente no cálculo dos erros inerentes ao processo de medida das fases, a partir da diferença de fase de conjunto de imagens de uma mesma banda espectral. Esta estimativa de erro foi introduzida por Vera-Villamizar<sup>[51]</sup>, e é suficientemente confiável devido a boa caracterização das imagens das estruturas espirais, principalmente devido à subtração do perfil radial do disco, em que se destaca mais fortemente estas estruturas.

A aplicação da transformada de Fourier unidimensional às imagens na banda  $g$  (ou  $r$ ) (estrelas formadas recentemente) e na banda  $i$  (padrão perturbador de densidade espiral suportado pelo disco de estrelas velhas) de galáxias discoidais (que apresentam acentuadamente estruturas do tipo *grand design*), foi proposto por Puerari & Dottori<sup>[39]</sup> (1997), e oportunamente, melhorado por Vera-Villamizar & Dottori<sup>[51]</sup> (2001) numa amostra de três galáxias, no qual o tratamento de imagens originais de galáxias espirais foi complementado com a análise de imagens simetrizadas por meio dos métodos de transformadas de Fourier bidimensional e de EEM97, de modo que amplia as vantagens com respeito ao método original.

Neste trabalho, a amostra inicial de galáxias foi relativamente maior, no entanto, devido ao baixo nível na relação sinal/ruído foram finalmente selecionadas 18 galáxias. Além de um bom número de galáxias no processo de análise deste trabalho, e dos métodos já utilizados anteriormente, adicionalmente aplicam-se as condições de Canzian, como outro método, no qual que se determina o intervalo de confiabilidade dos raios que identificam as ressonâncias de corrotação.

Para galáxias com braços espirais puros, as imagens originais revelaram-se mais adequadas à aplicação da transformada de Fourier unidimensional, já que não estão "viciadas" pelos ruídos inerentes ao tratamento. O método de Fourier, em geral, apresenta um nível de ruído menor do que o método de EEM92. Entretanto, este método é mais realista que o método de Fourier, já que não está limitado a descrever as espirais como estruturas logarítmicas puras. O método EEM92 apresenta um nível de ruído ligeiramente maior, provavelmente porque destaca componentes espúrias que não aparecem na transformada de Fourier unidimensional. Outro aspecto importante está no processo da estimativa de erro na banda  $i$ , indicando um nível de ruído maior que o da banda  $g$ , embora esta banda esteja mais contaminada pela poeira.

As condições de Canzian<sup>[10]</sup> aplicadas neste trabalho, como descrito na *seção 2.3.4*, testa o intervalo em que as ressonâncias obtidas são confiáveis. Todos os resultados das CR's (com exceção de IC0267) estão de acordo com os parâmetros de Canzian. Estes parâmetros estão calculados na tabela 8.1, nas 5<sup>a</sup>, 6<sup>a</sup> e 7<sup>a</sup> colunas. Os diagramas de fase (*transformada de Fourier unidimensional*), donde se obtém as CR's, também informam de forma consistente as possibilidades reais de ocorrências dessas ressonâncias.

Um estudo morfológico, baseado na análise visual de imagens reais na banda  $g$  desenhadas num diagrama de  $\log(R) \times \theta$ , revela a presença de barras centrais nas galáxias e detalhes morfológicos das estruturas espirais externas, tais como mudanças no *pitch angle* dos braços espirais e a máxima extensão da estrutura espiral externa. Já o mesmo tipo de estudo morfológico desenvolvido sobre imagens simetrizadas de Elmegreen também desenhadas num diagrama  $\log(r) \times \theta$ , revela detalhes da estrutura espiral bissimétrica. Por outro lado, a análise de Fourier bidimensional permite determinar as componentes mais importantes na estrutura das galáxias discoidais. Os picos principais dos espectros de Fourier apontam os valores de *pitch angles* nas estruturas espirais mais importantes, enquanto as funções de densidade radial informam as medidas das extensões interna e externa das estruturas espirais. A *tabela 8.1* descreve algumas propriedades depreendidas do processo de análise.

De acordo com a tabela,  $m$  é o número de braços. Os parâmetros de Canzian são dados por:  $R_1$ , a extensão interna da estrutura espiral;  $R_2$ , a sua extensão externa;  $R_2/R_1 \leq 5.8$  (Sim ou Não),  $R_{CR(i)} \leq 3.4 \times R_1$  e  $R_{CR(o)} \geq 0.6 \times R_2$ . A fração,  $R_{CR}^f = (R_{CR} - R_1)/(R_2 - R_1)$ , fornece a posição relativa do  $R_{CR}$  na estrutura espiral;  $R_{CR}$  fornece

<i>galáxia</i>	m	$R_1$	$R_2$	$R_2/R_1$	$R_{CR(i)}$	$R_{CR(o)}$	$R_{CR}$	$R_{CR}^f$	$\Delta\alpha$
IC0167	2	1	3.5	S	3.4	2.1	3.0	0.80	12.6°
	2	4	12	S	13.6	7.2	8.3	0.54	6.9°
IC0267	2	2	12	N	6.8	7.2	4.6, 8.6	0.26, 0.66	$\leq 6.6^\circ$
IC2421	1	-	-	-	-	-	10.5	-	1.0°
	2	4	12	S	13.6	7.2	7.8	0.48	6.9°
NGC0019	2	4	10	S	13.6	6	7.0	0.50	7.1°
NGC0036	1	-	-	-	-	-	5.3	-	2.6°
	2	9	12	S	30.6	7.2	11.1	0.65	12.6°
	2	14	22	S	47.6	13.2	21.6	0.95	12.6°
NGC0047	2	4	14	S	13.6	8.4	9.4	0.54	11.4°
NGC0060	1	-	-	-	-	-	34	-	2.0°
	2	4	12	S	13.6	7.2	10.5	0.81	$\leq 6.9^\circ$
NGC0070	1	-	-	-	-	-	9.7	-	10.3°
	2	7	14	S	23.8	8.4	12.6	0.80	6.9°
NGC0622	2	3	10	S	10.2	6	7.5	0.64	$< 7.1^\circ$
NGC0753	2	6	22	S	20.4	13.2	14.7	0.54	20.6°
NGC0772	1	-	-	-	-	-	5.9	-	$< 27^\circ$
	2	3	10	S	10.2	6	8.2	0.74	$< 14^\circ$
NGC1073	1	-	-	-	-	-	3.1	-	$< 18^\circ$
	3	-	-	-	-	-	7	-	$< 4.5^\circ$
NGC2336	2	3	8	S	10.2	4.8	6.9	0.78	$< 7.1^\circ$
NGC6951	1	-	-	-	-	-	4.3	-	10.3°
	2	2	8	S	6.8	4.8	5.2	0.53	$< 7.1^\circ$
NGC7479	2	2.5	5	S	8.5	3	3.7	0.48	$< 7.1^\circ$
	2	5.5	12	S	18.7	7.2	9	0.54	$< 7.1^\circ$
NGC7678	1	-	-	-	-	-	(4.0, 8.4)	-	14°
	2	2	6	S	6.8	3.6	5.7	0.93	6.9°
	2	6.5	12	S	22.1	7.2	9.7	0.58	6.9°
NGC7741	2	1	3.5	S	3.4	2.1	2.8	0.72	7.1°
	3	-	-	-	-	-	2.9	-	27.1°
NGC7753	1	-	-	-	-	-	12.1	-	$\leq 3.4^\circ$
	2	6	16	S	20.4	9.6	14.8	0.88	7.1°

Tabela 8.1: Síntese de algumas propriedades das galáxias para as componentes 1, 2 e 3. Os raios estão em *kpc*.

o raio de corotação e  $\Delta\alpha$  a diferença de *pitch angle* nas duas bandas espectrais. Todos os raios estão em *kpc*.

## 8.1 Estrutura dos braços espirais

Outras propriedades igualmente relevantes para as galáxias discoidais estão descritas abaixo. Os resultados foram obtidos através de observação direta e análise de imagens e diagramas que constituem o processo de análise de cada objeto, além de dados extraídos nas tabelas 8.1 e 8.2, compreendendo todas as galáxias da amostra.

### 8.1.1 Análise do número de componentes

Todas as galáxias analisadas mostram componentes de 2 braços, sendo que 4/18 mostram 2 componentes  $m = 2$ , e 1/18 mostram 3 componentes  $m = 2$ .

12 das 18 galáxias apresentam componente  $m = 1$  com sinal maior que 20% do que a  $m = 2$ . Duas destas galáxias apresentam duas componentes  $m = 1$ . É de se salientar que nas galáxias NGC0060 e NGC0070 a componente  $m = 1$  é mais intensa que a  $m = 2$ . Este fenômeno pode ser consequência de interações. Com efeito, NGC0070 pertence a um grupo do tipo Hickson e a NGC0060 parece estar canibalizando galáxias menores.

### 8.1.2 Caracterização da função de densidade ( $m = 2$ )

Como a função de densidade radial indica a fração de massa contida nos braços em relação à contida no disco regular, a forma desta distribuição é um indicativo de diversidade de perturbações que afetam os discos.

Uma das 18 galáxias, a NGC0622, mostra uma distribuição de densidade contínua do centro à metade de sua estrutura espiral, e com uma suave queda até a periferia do disco.

1/3 das galáxias apresentam uma queda gradual de sua distribuição de densidade, a saber: IC0267, IC2421, NGC0019, NGC0772, NGC6951 e NGC7741.

1/6 apresentam uma queda abrupta da função de densidade, as quais são NGC0753, NGC2336 e NGC7479.

As 8 galáxias restantes mostram uma quebra pronunciada na distribuição de densidade, indicando a existência de mais de um sistema. As galáxias IC0167, NGC0060, NGC1073, NGC7678 e NGC7753 apresentam 2 subsistemas perturbativos; entre estas, a IC0167 e NGC1073 têm o primeiro sistema mais concentrado. A galáxia NGC0047 apresenta 3 sistemas, sendo o primeiro mais intenso. A galáxia NGC0036 apresenta 4 subsistemas, enquanto a NGC0070 apresenta um centro indefinido e 2 subsistemas, sendo o primeiro mais concentrado.

### 8.1.3 Espectros de frequência mais relevantes

As amplitudes dos espectros foram obtidas a partir dos diagramas dos *Valores derivados dos espectros de Fourier*.

Para a componente 1 se destacam três galáxias, a IC2421, NGC0070 e NGC6951. Para a componente 2 se destacam 16 das 18 galáxias analisadas, a saber: IC0167, IC0267, IC2421, NGC0019, NGC0036, NGC0047, NGC0060, NGC0622, NGC0753, NGC0772, NGC1073, NGC2336, NGC7479, NGC7678, NGC7741 e NGC7753.

As galáxias IC2421 e NGC0753 apresentam relevância nas duas componentes, com ligeiro predomínio para a componente 2. Já na galáxia NGC0060 a componente 1 predomina, embora a componente 2 também se destaca.

## 8.2 Discussão do diagrama $\log(R) \times \theta$

Várias galáxias apresentam comportamento quase logarítmico nas suas estruturas espirais, outras apresentam comportamento logarítmico puro, e algumas não exibem essa propriedade.

Entre as galáxias com comportamento quase logarítmicos se destacam: IC0267, IC2421, NGC0019, NGC0047, NGC0060, NGC0622, NGC0772, NGC1073, NGC2336, NGC6951, NGC7479, NGC7678. Nesta análise, levam-se em consideração os dois diagramas  $\log(R) \times \theta$ , uma para a *imagem original, deprojetada e subtraído o disco*, e outro para a imagem EEM92. Por exemplo, na galáxia NGC0622, os braços são quase logarítmicos no primeiro diagrama, e logarítmicos puros no diagrama da imagem simetrizada. Para algumas destas galáxias que apresentam comportamento logarítmico encontram-se mais de um sistema perturbativo, ou seja, estruturas espirais que exibem *pitch angles* distintos; por exemplo, NGC0772, NGC1073 e NGC6951.

As galáxias NGC0036, NGC0070, NGC0753 e NGC7753 apresentam comportamento logarítmico puro. Entre estas, a NGC0070 e NGC0753 apresentam mais de um sistema. Por outro lado, as galáxias IC0167 e NGC7741 não apresentam propriedades logarítmicas nas suas estruturas espirais.

## 8.3 Discussão das ressonâncias de corrotação

### 8.3.1 Ressonâncias detectadas

Das informações extraídas da *tabela 8.1* constatam-se que, para a componente de 2 braços ( $m = 2$ ), 12 das 18 galáxias apresentam *uma* ressonância de corrotação (IC2421, NGC0019, NGC0047, NGC0060, NGC0070, NGC0622, NGC0753, NGC0772, NGC2336, NGC6951, NGC7741 e NGC7753), enquanto 5 galáxias apresentam *duas* CR's (IC0167,

IC0267, NGC0036, NGC7479 e NGC7678). A NGC1073 não apresenta nenhuma ressonância para a componente  $m = 2$ .

50% das galáxias apresentam *uma* ressonância de corrotação para  $m = 1$  (IC2421, NGC0036, NGC0060, NGC0070, NGC0772, NGC1073, NGC6951, NGC7678 e NGC7753). Apenas 2 galáxias apresentam *uma* ressonância de corrotação para  $m = 3$  (NGC1073 e NGC7741).

Portanto, obteve-se 9 CR's para a componente  $m = 1$ , 22 CR's para a  $m = 2$  e 2 CR's para a  $m = 3$ . Estatisticamente, 2/3 das ressonâncias de corrotação são para a componente  $m = 2$ , enquanto 27% para a componente  $m = 1$  e apenas 6% para a componente  $m = 3$ .

### 8.3.2 Ressonâncias de corrotação em galáxias barradas

11 das 18 galáxias estudadas apresentam uma barra central. As galáxias NGC0036, NGC0047 e NGC2336 têm barras pequenas quando comparadas às suas extensões externas, a partir de uma inspeção visual das imagens extraídas o disco médio.

Dessas galáxias, 6 apresentam CR's interno à barra (IC0267, NGC0019, NGC1073, NGC6951, NGC7479 e NGC7678). 7 apresentam CR's na extremidade da barra (IC0267, NGC0036, NGC0047, NGC0622, NGC6951, NGC7479 e NGC7678). Finalmente, 4 CR's se apresentam externo à barra (NGC1073, NGC2336, NGC7678 e NGC7753). Algumas galáxias se repetem nessa análise por apresentarem raios de corrotação distintos, ou para a mesma componente ( $m = 2$ ) (IC0267, NGC7479 e NGC7678) ou para componentes distintas (NGC1073, NGC6951 e NGC7678).

## 8.4 Probabilidade de ocorrência das CR's para $m = 2$

### 8.4.1 Posição das CR's nas estruturas espirais

A questão é investigar as regiões mais prováveis de ocorrência das ressonâncias de corrotação em relação à medida da extensão da própria estrutura espiral,  $R_2 - R_1$ , obtida ao investigar os diagramas das *funções de densidade radial*. Isto é feito a partir de suas medidas interna ( $R_1$ ) e externa ( $R_2$ ). As regiões mais internas estão no intervalo  $< \frac{1}{2}(R_1 + R_2)$  e as mais externas  $> \frac{1}{2}(R_1 + R_2)$ , e a fração que mede a posição relativa do raio da ressonância de corrotação na estrutura espiral é  $R_{CR}^f = (R_{CR} - R_1)/(R_2 - R_1)$ . Isto é, normalizou-se a posição do raio de corrotação na estrutura espiral ( $R_{CR} - R_1$ ) pela medida de sua extensão ( $R_2 - R_1$ ). Esta razão foi calculada para cada ressonância de corrotação e notadamente para a componente  $m = 2$ .

De acordo com as tabelas, apenas *três* das 22 CR para a componente  $m = 2$  estão nas regiões mais internas, relativo ao intervalo  $(R_{CR} - R_1)/(R_2 - R_1) < 0.5$ , correspondentes

às galáxias IC0267 ( $R_{CR} = 4.6 \text{ kpc}$  e  $R_{CR}^f = 0.26$ ), IC2421 ( $R_{CR} = 7.8 \text{ kpc}$  e  $R_{CR}^f = 0.48$ ) e NGC7479 ( $R_{CR} = 3.7 \text{ kpc}$  e  $R_{CR}^f = 0.48$ ). Uma CR acontece na metade da estrutura espiral, correspondente à galáxia NGC0019 ( $R_{CR} = 7.0 \text{ kpc}$  e  $R_{CR}^f = 0.50$ ). As demais *dezoito* CR's da componente  $m = 2$  encontram-se nas regiões mais externas, relativo ao intervalo  $(R_{CR} - R_1)/(R_2 - R_1) > 0.5$ .

#### 8.4.2 Comparação com os parâmetros de Canzian

Os resultados para as ressonâncias de corrotação calculados são ratificados quando comparadas com os parâmetros de Canzian, apenas para a galáxia IC0267 que tais corrotações são parcialmente satisfeitas. O raio de corrotação  $R_{CR(1)} = 4.6 \text{ kpc}$  satisfaz ao parâmetro  $R_{CR(i)}$ , mas não está de acordo com  $R_{CR(o)}$ ; o contrário acontece para o raio de corrotação  $R_{CR(2)} = 8.6 \text{ kpc}$ .

#### 8.4.3 Posição média relativa das CR's

Outro resultado interessante é a posição média relativa das 22 ressonâncias de corrotação para a componente  $m = 2$ . De acordo com a 9ª coluna da *tabela 8.1*, o resultado foi  $0.65 \pm 0.17$ . Ou seja, em média, as corrotações acontecem na *posição preferencial* situado a  $2/3$  da medida da estrutura espiral das galáxias discoidais, a partir da posição do raio interno dessas estruturas.

As galáxias de disco são muito peculiares e distintas entre si, sejam em seu tipo morfológico, brilho, tamanho, barradas ou não, e outras inúmeras propriedades. O resultado ( $0.65 \pm 0.17$ ) obtido, identifica uma galáxia espiral hipotética, em que se espera a que posição se encontra o raio de corrotação. Como tratamos de galáxias *grand design*, e sendo a componente ( $m = 2$ ) a mais estável e que corresponde às estruturas bissimétricas, espera-se que tal estimativa possa ser confirmada ou reproduzida no cálculo de um número maior de ressonâncias de corrotação para a referida componente.

### 8.5 Perspectivas

Pretende-se usar as ferramentas apresentadas neste trabalho, à análise de imagens H e/ou K. Com efeito, especialmente a banda K, revela a população velha do disco, destacando o padrão perturbador original. Na banda K, a influência da poeira é ainda muito menor que na banda I.

Estudos de ressonâncias usando a banda K foram recentemente publicados para NGC2997 (Grosbol, Dottori & Gradel, 2006) e então sendo preparados para 46 galáxias *grand design* (Grosbol & Dottori, 2007).

Já foram observadas algumas galáxias nas bandas K e B com o telescópio de 1.6 *m* do Pico dos Dias, os quais serão analisadas num futuro próximo.

# Referências Bibliográficas

- [1] Athanassoula, E. The spiral structure of galaxies. *Physics Reports*, Amsterdam, v. 114, n. 5/6, p.319-403, 1984.
- [2] Beckman, J. E.; Cepa, J.. The nature of arms in spiral galaxies. I. Azimutal color profiles of NGC7479 and NGC1832, *A&A* vol 229, 37, 46 1990.
- [3] Bertin, G.; Lin, C.C. *Spiral structure in galaxies: a density wave theory*, Cambridge: MIT Press, 271p, 1996.
- [4] Bica, E.; Clara, J.; Dottori, H.; Santos Jr., J. F. C.; Piatti, A. E. Integrated UBV photometry of 624 star clusters and associations in the Large Magellanic Cloud. *The Astrophysical Journal Supplement Series*, Chicago, 102, 57, 1996.
- [5] Binney, J.; Tremaine, S. *Galactic Dynamics*. Princeton: Princeton University Press, 733p, 1994.
- [6] Block, D. L.; Bertin, G.; Stockton, A.; Grosbol, P.; Moorwoor, A. F. M.; Peletier, R. F. 2.1  $\mu\text{m}$  images of the evolved stellar disk and the morphological classification of spiral galaxies. *A&A*, 288, 365, 1994.
- [7] Block, D. L.; Puerari, Ivânio. Toward a dust penetrated classification of the evolved stellar Population II disks of galaxies. *A&A*, v.342, p.627-642, 1999.
- [8] Boeshaar, G. O.; Hodge, P. W. H II Regions and the Spiral Structure of NGC 3631 . *ApJ*, 213, 361B, 1977.
- [9] Burstein, D.; Rubin, V. C. The distribution of mass in spiral galaxies. *ApJ*, 297, 423B, 1985.
- [10] Canzian, B. Extensive spiral structure and corotation resonance. *ApJ* 502, 582, 1998.
- [11] Considère, S.; Athanassoula, E. The distribution of HII regions in external galaxies. *A&A* 111, 28, 1982.

- [12] Considere, S.; Athanassoula, E. Analysis of spiral components in 16 galaxies. *A&AS*, 76, 365C, 1988.
- [13] Contopoulos, G. Preference of trailing spiral waves. *ApJ*, 163, 181, 1971.
- [14] del Rio, M. S.; Cepa, J. The nature of arms in spiral galaxies. III. Azimuthal profiles. *A&A*, 340, 1D, 1998.
- [15] Díaz, Rubén J.; Dottori, Horacio; Vera-Villamizar, Nelson; Carranza, Gustavo. Circumnuclear Structures in the Interacting Seyfert Galaxy NGC 1241: Kinematics and Optical/Infrared Morphology. *ApJ*, 597, 860D, 2003.
- [16] Dottori, H; Bica, E.; Claria, J. J.; Puerari, I. Spatial distributions of Young large magellanic cloud clusters as tracers of bar perturbation. *ApJ*, 461, 472, 1996.
- [17] Elmegreen, D. M.; Elmegreen, B. G. Flocculent and grand design spiral galaxies in groups: time scales for persistence of grand design in a sample of 18 galaxies. *ApJ* 79, 37, 1983.
- [18] Elmegreen, D. M.; Elmegreen, B. G. Arm classifications for spiral galaxies. *ApJ* 79, 37, 1987.
- [19] Elmegreen, B. G.; Elmegreen, D. M.; Montenegro, L. Optical tracers of spiral wave resonances in galaxies. *ApJ* 79, 37, 1992.
- [20] Elvius, A.; Herlofson. On the dynamics of galaxies with large-scale magnetic fields. *ApJ*...131..304, 1960.
- [21] Eskridge, Paul B.; Frogel, Jay A.; Pogge, Richard W.; Quillen, Alice C.; Berlind, Andreas A.; Davies, Roger L.; DePoy, D. L.; Gilbert, Karoline M.; Houdashelt, Mark L.; Kuchinski, Leslie E.; and 5 coauthors. Near-Infrared and Optical Morphology of Spiral Galaxies. *ApJS*, Volume 143, Issue 1, pp. 73-111.
- [22] Groot, H. On the shape of spiral nebulae. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, London, 85, 535, 1925.
- [23] Groot, H. On the spiral form of some nebulae. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, London, 86, 146, 1926.
- [24] Grosbol, P.; Dottori, H.; Gredel, R. Star-forming knots and density wave in NGC 2997. *A&A*, 453L, 25G, 2006.
- [25] Grosbol, P.; Dottori, H. Bright knots along spiral arms in disk galaxies. 2007IAUS..237..416G.

- [26] Junqueira, S.; Combes, F., 1996, *A&A* 312, 703.
- [27] Kalnajs A.J. In *La Dynamique des Galaxies Spirales*, ed. L. Weliachew (Paris Editions du CNRS), 103, 1975.
- [28] Kalnajs, A. J. Theory of spiral structure. *IAUS*, 100, 109, 1983.
- [29] Kormendi, J.; Norman, C. Observational constraints on driving mechanisms for spiral density waves, 233, 539, 1979.
- [30] Lin, C. C.; Shu, F. H. On the spiral structure of disk galaxies. *ApJ*...140..646, 1964.
- [31] Lindblad, B. On the dynamics of stellar systems. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society London*, 108, 214. 1948.
- [32] Martos, Marco; Yañez, Miguel; Hernandez, Xavier; On the Galactic Spiral Patterns: Stellar and Gaseous. *JKAS*...37..199M, 2004.
- [33] Meidt, S. E.; Rand, R. J. Pattern speeds of spiral galaxies using Tremaine-Weimber method. *AAS*...206.1308M, 2005.
- [34] Meidt, Sharon; Rand, R. J.; Merrifield, M. R.; Debattista, V. P.; Shen, J. Tests of the Modified Tremaine-Weinberg Method. *AAS*, 20921104M, 2006.
- [35] Piddington, J. H. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, Vol. 128, p.345, 1964.
- [36] Piddington, J. H. Magnetic field annihilation in current pinches. *P&SS*, 15, 733P, 1967.
- [37] Puerari, I.; Dottori, H. A. Spiral structure in NGC 1566. *RMxAA*, 21, 126P, 1990.
- [38] Puerari, I.; Dottori, H. A. Fourier analysis of structure in spiral galaxies. *A&AS* 93, 469, 1992.
- [39] Puerari, I.; Dottori, H. A. A morphological method to determine corotation radii in spiral galaxies. *ApJ* 476, L73, 1997.
- [40] Reynolds, J. H. The form and development of the spiral and allied nebulae. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society London*, 185, 1014, 1925.
- [41] Roberts, W. W. Large-scale shock formation in spiral galaxies and its implications on star formation. *ApJ*, 158, 123, 1969.
- [42] Rots, A. H.; Shane, W. W. A high resolution map of the distribution of neutral hydrogen in the spiral galaxy M81. *A&A*, 31, 245R, 1974.

- [43] Seigar, M. S. The connection between shear and star formation in spiral galaxies. *MNRAS*.tmpL..51S, 2005.
- [44] Seigar, M. S.; Block, D. L.; Puerari, I.; Chorney, N. E.; James, P. A. Dust-penetrated arm classes: insights from rising and falling rotation curves. *MNRAS*.359.1065S, 2005.
- [45] Schweizer, F. Photometric studies of spiral structure. I - The disks and arms of six SB I and SC I galaxies. *ApJS*, 31, 313S, 1976.
- [46] Tremaine, S.; Weinberg, M. D. A kinematic method for measuring the pattern speed of barred galaxies. *ApJ*, 282L, 5T, 1984.
- [47] Willett, K. W.; Elmegreen, B. G.; Hunter, D. A. Power Spectra in V band and  $H\alpha$  of Nine Irregular Galaxies. *AJ*....129.2186W, 2005.
- [48] Van den Berg, S. A preliminary luminosity classification of late-type galaxies. *ApJ*, 131, 215, 1960.
- [49] Van den Berg, S. A preliminary luminosity classification for galaxies of type Sb. *ApJ*, 131, 558, 1960.
- [50] Vaucouleurs, G. De. Southern Galaxies. IV. Isophotometry of the Large Barred Spiral NGC 6744. *ApJ*...138..934V, 1963.
- [51] Villamizar, N.; Dottori, H. A.; Puerari, I., de Carvalho, R., 2001, *ApJ* 547, 187.
- [52] Zimmer, P.; Rand, R. J.; McGraw, J. T. The Pattern Speeds of M51, M83, and NGC 6946 Using CO and the Tremaine-Weinberg Method. *ApJ*, 607, 285Z, 2004.

## Apêndice A

# Scripts

Neste trabalho, utilizou-se vários códigos para execução dos processos de análise das galáxias, além disso, diversos scripts foram escritos no IRAF e rotinas criadas para execução no shell, tendo em vista a repetição de tarefas comuns para todas as galáxias, salvo as suas peculiaridades. Apresentam-se alguns exemplos destes scripts e rotinas.

### A.1 Alinhamento de imagens de NGC7479

O objetivo deste arquivo é alinhar (deslocar) as imagens da galaxia ngc7479 nas duas cores. Para execução no IRAF deste script foram criados scripts auxiliares (box.cl) e (tab).

```
# Agora tomamos as coordenadas de quatro estrelas da galaxia ngc7479
# nas cor g. Para se obter as coordenadas, foi usado o script
# box.cl :
```

```
# 167.497 574.687
# 246.936 394.349
# 290.015 118.264
# 437.640 480.299
```

```
# O arquivo tab contem as coordenadas de quatro estrelas fixas: as
# duas primeiras colunas referem-se as coordenadas das estrelas na
# cor g, e as ultimas duas colunas as coordenadas das respectivas
# estrelas na cor i.
```

```
geomap tab db 1 700 1 700 interac = no
```

```
geotran ngc7479_g1 n7479g1 db tab
del db
```

```
geomap tab db 1 700 1 700 interac = no
geotran ngc7479_g2 n7479g2 db tab
del db
```

```
geomap tab db 1 700 1 700 interac = no
geotran ngc7479_g3 n7479g3 db tab
del db
```

```
geomap tab db 1 700 1 700 interac = no
geotran ngc7479_g4 n7479g4 db tab
del db
```

O arquivo box.cl citado é descrito como:

```
# Localizando o centro de quatro estrelas:
```

```
imcntr ngc7479_g1 233 838 cboxsiz=25
imcntr ngc7479_g2 357 573 cboxsiz=25
imcntr ngc7479_g3 434 165 cboxsiz=25
imcntr ngc7479_g4 639 710 cboxsiz=25
```

```
# Todas as demais imagens ngc7479_g* estão centralizadas com ngc7479_g1.fits.
```

E o arquivo tab é descrito pelo conjunto de coordenadas:

```
167.497 574.687 232.504 839.501
246.936 394.349 357.553 573.804
290.015 118.264 433.294 164.840
437.640 480.299 638.558 709.748
```

## A.2 Obtendo as imagens nos filtros *g* e *i* para IC0167

O script seguinte combina imagens e as converte em arquivos texto.

```
# As imagens sao todas quadradas e estao centralizadas nos frames,
# alem de limpas e deprojetadas. As varias combinacoes se devem
# ao calculo do ruido :

flpr
task $rm $mkdir = "$foreign"

# Removendo arquivos antes gerados por este script :
imdel IC0167G*.fits,IC0167I*.fits
del IC0167G*.dat,IC0167I*.dat

# Combinando as imagens :
# Filtro G

imcombine ic0167g1,ic0167g2,ic0167g3,ic0167g4 IC0167G combine=median
  reject=avsigclip lsigma=3 hsigma=3
flpr
imcombine ic0167g1,ic0167g2 IC0167G12 combine=median
  reject=avsigclip lsigma=3 hsigma=3
flpr
imcombine ic0167g3,ic0167g4 IC0167G34 combine=median
  reject=avsigclip lsigma=3 hsigma=3
flpr

# Filtro I
imcombine ic0167i1,ic0167i2,ic0167i3,ic0167i4 IC0167I combine=median
  reject=avsigclip lsigma=3 hsigma=3
flpr
imcombine ic0167i1,ic0167i2 IC0167I12 combine=median
  reject=avsigclip lsigma=3 hsigma=3
flpr
imcombine ic0167i3,ic0167i4 IC0167I34 combine=median
  reject=avsigclip lsigma=3 hsigma=3
flpr

# Convertendo as imagens em arquivos texto :
```

```
# Filtro G
wtext IC0167G IC0167G.dat header=no pixels=yes maxline=15
flpr
wtext IC0167G12 IC0167G12.dat header=no pixels=yes maxline=15
flpr
wtext IC0167G34 IC0167G34.dat header=no pixels=yes maxline=15
flpr

# Filtro I
wtext IC0167I IC0167I.dat header=no pixels=yes maxline=15
flpr
wtext IC0167I12 IC0167I12.dat header=no pixels=yes maxline=15
flpr
wtext IC0167I34 IC0167I34.dat header=no pixels=yes maxline=15
flpr

# Verifica o tamanho das imagens de saida :
!wc -l *.dat
```

### A.3 Criando estrutura de diretorios para NGC0622

O script seguinte cria diretorios/sub-diretorios da galaxia n0622

```
# Eh extremamente conveniente executar este script uma unica vez.
flpr
task $mkdir = "$foreign"

# Criando diretorios ELM
mkdir -p ~/IMAGES/ANA/n0622/ELM

# Criando diretorios ORG
mkdir -p ~/IMAGES/ANA/n0622/ORG/G/FT_DADOS/NEW_SPI
mkdir -p ~/IMAGES/ANA/n0622/ORG/I/FT_DADOS/NEW_SPI

# Criando diretorios PD
mkdir -p ~/IMAGES/ANA/n0622/PD/ELM/{M1/filter,M2/filter,M3/filter}
mkdir -p ~/IMAGES/ANA/n0622/PD/ORG/{M1/filter,M2/filter,M3/filter}
```

```
mkdir -p ~/IMAGES/ANA/n0622/PD/SPI/{M1/filter,M2/filter,M3/filter}

# Criando diretorios NOISE

# Criando diretorios NOISE/ELM
mkdir -p ~/IMAGES/ANA/n0622/NOISE/ELM/G/PD/{m1/filter,m2/filter,m3/filter}
mkdir -p ~/IMAGES/ANA/n0622/NOISE/ELM/I/PD/{m1/filter,m2/filter,m3/filter}

# Criando diretorios NOISE/ORG
mkdir -p ~/IMAGES/ANA/n0622/NOISE/ORG/G/FT_DADOS
    /{noise_12/NEW_SPI,noise_34/NEW_SPI}
mkdir -p ~/IMAGES/ANA/n0622/NOISE/ORG/G/PD/{m1/filter,m2/filter,m3/filter}
mkdir -p ~/IMAGES/ANA/n0622/NOISE/ORG/I/FT_DADOS
    /{noise_12/NEW_SPI,noise_34/NEW_SPI}
mkdir -p ~/IMAGES/ANA/n0622/NOISE/ORG/I/PD/{m1/filter,m2/filter,m3/filter}

# Criando diretorios NOISE/SPI
mkdir -p ~/IMAGES/ANA/n0622/NOISE/SPI/G/PD/{m1/filter,m2/filter,m3/filter}
mkdir -p ~/IMAGES/ANA/n0622/NOISE/SPI/I/PD/{m1/filter,m2/filter,m3/filter}

# Criando diretorio PS_GIF
mkdir -p ~/IMAGES/ANA/n0622/PS_GIF

# Copiando os arquivos aqui gerados para os seguintes diretorios :

# Analise sem ruído:
cp N0622G.fits N0622G.dat ~/IMAGES/ANA/n0622/ORG/G
cp N0622I.fits N0622I.dat ~/IMAGES/ANA/n0622/ORG/I
cp N0622G.fits N0622I.fits ~/IMAGES/ANA/n0622/ELM

# Analise com ruído:
cp N0622G12.dat N0622G34.dat ~/IMAGES/ANA/n0622/NOISE/ORG/G
cp N0622I12.dat N0622I34.dat ~/IMAGES/ANA/n0622/NOISE/ORG/I
cp N0622G12.fits N0622G34.fits ~/IMAGES/ANA/n0622/NOISE/ELM/G
cp N0622I12.fits N0622I34.fits ~/IMAGES/ANA/n0622/NOISE/ELM/I

# Não esquecer de dimensionar as imagens *.dat em cada primeira linha.
```

## A.4 Escrevendo dimensão das imagens em seus arquivos textos: cata.sh

Inserese em todas as 1as. linhas de arquivos (textos) das galáxias (extensão .dat) a dimensão da galáxia. Os códigos exigem que se escreva essa dimensão, por exemplo,  $500 \times 500$  pixels. Há ainda o arquivo texto (dim) de uma unica linha que informa essa dimensão, necessario durante a execucao deste script (exemplo: 500 500).

```
#!/bin/bash
# cata.sh
# Insere em todas as 1as. linhas de *.dat a dimensao (arquivo dim) da galaxia.

# ATENCAO: E' prioritario escrever a dimensao correta da galaxia atual
# no arquivo "dim" no diretorio ~/IMAGES. Exemplo: 500 500

wc -l *.dat      # exibe numero de linhas atual
cp ~/IMAGES/dim . # copia arquivo para diretorio das imagens .dat

# Inserindo a dimensao da imagem :
OPERATION=cat
SUFFIX=tmp

if [ -n "$1" ]
then
    directory=$1      # If directory name given as a script argument...
else
    directory=$PWD    # Otherwise use current working directory.
fi

for file in $directory/*.dat
do
    filename=${file}
    $OPERATION dim $file > "$filename.$SUFFIX"
    # Redirect conversion to new filename.
    rm -f $file      # Delete original files after converting
    # Nao usar "rm" por causa da renomeacao abaixo
done

# Renomeando *.dat.tmp para *.dat :
```

```

for old in $directory/*.dat.tmp;
do
    new=${old/.dat.tmp/.dat}
    mv $old $new
done

rm -r dim      # remove arquivo dim
echo
wc -l *.dat    # exibe novo numero de linhas
read trash    # pause
echo ":: Mostrando conteudo da 1a. linha ::"
echo
head -n 1 *.dat    # mostra em cada 1a. linha a dimensao da imagem
echo

exit 0

```

## A.5 Script utilizado nas rotações EEM92 para galáxia NGC1073

Este programa é executado no IRAF (elm-g.cl):

```

# Programas Elmegreen para as componentes m=1,2,3. Para cada componente
# ha 3 filtros (em geral). Executar este script por filtro individual.
# S2 tem importancia maior que S1 e S3.

# Parametros:  t   = angulo theta qualquer
#              T   = indica truncamento (pixeis negativos tornados nulos)
# A imagem tem o perfil radial subtraido e eh para determinado filtro.

flpr;gflush

# A2 = [I(r,t) - I(r,t+180)]T
# Imagem assimetrica pura (A1+A3) (elm_a2) ->

del N1073Ga2*
rotate N1073G.fits lixo1.fits 180. ; flpr          # I(r,t+180)
imarith N1073G.fits - lixo1.fits N1073Ga2.fits ; flpr          # I(r,t) - I(r,t+180)
imreplace N1073Ga2.fits value=0. lower=INDEF upper=0. ; flpr  # A2
del lixo*

```

```

wtext N1073Ga2.fits N1073Ga2.dat header=no pixels=yes maxline=15 ; flpr

# S1 = [I(r,t) - I(r,t+180)]T -
# {[I(r,t) - [I(r,t) - I(r,t+120)]T}T + {I(r,t) - [I(r,t) - I(r,t-120)]T}T}
# Imagem simetrica 1 (S1=A2-S3) (elm1) ->

del N1073Ge1*
rotate N1073G.fits lixo1.fits 120. ; flpr          # I(r,t+120)
imarith N1073G.fits - lixo1.fits lixo2.fits ; flpr      # I(r,t) - I(r,t+120)
imreplace lixo2.fits value=0. lower=INDEF upper=0. ; flpr
# [I(r,t) - I(r,t+120)]T
imarith N1073G.fits - lixo2.fits lixo3.fits ; flpr
# I(r,t) - [I(r,t) - I(r,t+120)]T
imreplace lixo3.fits value=0. lower=INDEF upper=0. ; flpr
# x1={I(r,t) - [I(r,t) - I(r,t+120)]T}T
rotate N1073G.fits lixo4.fits -120. ; flpr          # I(r,t-120)
imarith N1073G.fits - lixo4.fits lixo5.fits ; flpr
# I(r,t) - I(r,t-120)
imreplace lixo5.fits value=0. lower=INDEF upper=0. ; flpr
# [I(r,t) - I(r,t-120)]T
imarith N1073G.fits - lixo5.fits lixo6.fits ; flpr
# I(r,t) - [I(r,t) - I(r,t-120)]T
imreplace lixo6.fits value=0. lower=INDEF upper=0. ; flpr
# x2={I(r,t) - [I(r,t) - I(r,t-120)]T}T
imarith lixo3.fits + lixo6.fits lixo7.fits ; flpr      # x3=x1+x2
rotate N1073G.fits lixo8.fits 180. ; flpr          # I(r,t+180)
imarith N1073G.fits - lixo8.fits lixo9.fits ; flpr      # I - I(r,t+180)
imreplace lixo9.fits value=0. lower=INDEF upper=0. ; flpr
# x4=[I - I(r,t+180)]T
imarith lixo9.fits - lixo7.fits N1073Ge1.fits ; flpr      # x4-x3
imreplace N1073Ge1.fits value=0. lower=INDEF upper=0. ; flpr # S1=[x4-x3]T
del lixo*
wtext N1073Ge1.fits N1073Ge1.dat header=no pixels=yes maxline=15 ; flpr

# S2 = {I(r,t) - [I(r,t) - I(r,t+180)]T}T
# Imagem simetrica pura (S2=I-A2) (elm2) ->

del N1073Ge2*

```

```

rotate N1073G.fits lixo1.fits 180. ; flpr          # I(r,t+180)
imarith N1073G.fits - lixo1.fits lixo2.fits ; flpr      # I(r,t) - I(r,t+180)
imreplace lixo2.fits value=0. lower=INDEF upper=0. ; flpr
  # [I(r,t) - I(r,t+180)]T
imarith N1073G.fits - lixo2.fits N1073Ge2.fits ; flpr
  # I(r,t) - [I(r,t) - I(r,t+180)]T
imreplace N1073Ge2.fits value=0. lower=INDEF upper=0. ; flpr  # S2
del lixo*
wtext N1073Ge2.fits N1073Ge2.dat header=no pixels=yes maxline=15 ; flpr

# S3 = {2I(r,t) - {[I(r,t) - I(r,t+120)]T + [I(r,t) - I(r,t-120)]T}}T
# A3 = {[I(r,t) - I(r,t+120)]T + [I(r,t) - I(r,t-120)]T}
# Imagem simetrica 3 (S3=2I-A3) (elm3) ->

del N1073Ge3*          # removem imagens antes geradas por este script
rotate N1073G.fits lixo1.fits 120. ; flpr          # I(r,t+120)
imarith N1073G.fits - lixo1.fits lixo2.fits ; flpr
  # I(r,t) - I(r,t+120)
imreplace lixo2.fits value=0. lower=INDEF upper=0. ; flpr
  # x1=[I(r,t) - I(r,t+120)]T
rotate N1073G.fits lixo3.fits -120. ; flpr        # I(r,t-120)
imarith N1073G.fits - lixo3.fits lixo4.fits ; flpr
  # I(r,t) - I(r,t-120)
imreplace lixo4.fits value=0. lower=INDEF upper=0. ; flpr
  # x2=[I(r,t) - I(r,t-120)]T
imarith lixo2.fits + lixo4.fits lixo5.fits ; flpr   # x=x1+x2 (ou A3)
imarith N1073G.fits * 2. lixo6.fits ; flpr        # y=2I(r,t)
imarith lixo6.fits - lixo5.fits N1073Ge3.fits ; flpr  # y-x
imreplace N1073Ge3.fits value=0. lower=INDEF upper=0. ; flpr  # S3=[y-x]T
del lixo*
wtext N1073Ge3.fits N1073Ge3.dat header=no pixels=yes maxline=15 ; flpr

!wc -l N1073G*.dat # verifica tamanho das imagens texto (500x500 pixels2)

# Copiando as imagens *.dat :
cp N1073Ge1.dat N1073Ge2.dat N1073Ge3.dat ~/IMAGES/ANA/n1073/PD/ELM

```

```
# Exibindo as imagens no terminal grafico :  
disp N1073Ga2 1 ; gflush  
disp N1073Ge1 2 ; gflush  
disp N1073Ge2 3 ; gflush  
disp N1073Ge3 4 ; gflush
```

23 rotinas foram escritas e executadas no shell, enquanto dezenas de outras foram executadas no IRAF no tratamento das galáxias.

## Apêndice B

# Análise das 13 Galáxias Adicionais da Amostra

As treze galáxias estão apresentadas no arquivo *thesis-main-13galaxias.pdf*. Similarmente, o arquivo da parte principal da tese denomina-se *thesis-main.pdf*; e ambos estão contidos no CD em anexo.

- B.1 Análise IC0167**
- B.2 Análise IC0267**
- B.3 Análise thesis-n0019**
- B.4 Análise thesis-n0036**
- B.5 Análise thesis-n0047**
- B.6 Análise thesis-n0060**
- B.7 Análise thesis-n0070**
- B.8 Análise thesis-n0753**
- B.9 Análise thesis-n0772**
- B.10 Análise thesis-n1073**
- B.11 Análise thesis-n2336**
- B.12 Análise thesis-n6951**
- B.13 Análise thesis-n7741**