

Universidade do Vale do Paraíba
Instituto de Pesquisa e Desenvolvimento
Programa de Pós-Graduação em Física e Astronomia

Stella Faria Costa

**Análise de estruturas de galáxias espirais *grand design* via Séries e
Transformadas de Fourier**

São José dos Campos - SP

2023

Stella Faria Costa

Análise de estruturas de galáxias espirais *grand design* via Séries e Transformadas de Fourier

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Física e Astronomia da Universidade do Vale do Paraíba como parte do processo de avaliação para a obtenção do título de Mestre em Física e Astronomia.

Orientador: Irapuan Rodrigues de Oliveira Filho-
Coorientador: Lucas Antonio Caritá

São José dos Campos - SP

2023

TERMO DE AUTORIZAÇÃO DE DIVULGAÇÃO DA OBRA

Ficha catalográfica

Costa, Stella Faria

Análise de estruturas de galáxias espirais grand design via Séries e Transformadas de Fourier / Stella Faria Costa; orientador, Irapuan Rodrigues de Oliveira Filho; co-orientador Lucas Antonio Caritá. - São José dos Campos, SP, 2023.

1 CD-ROM, 87 p.

Dissertação (Mestrado Acadêmico) - Universidade do Vale do Paraíba, São José dos Campos. Programa de Pós-Graduação em Física e Astronomia.

Inclui referências

1. Física e Astronomia. 2. Galáxias: espiral. 3. Galáxia: estrutura. 4. Série de Fourier bidimensional. 5. Processamento de imagem. I. Oliveira Filho, Irapuan Rodrigues de, orient. II. Caritá, Lucas Antonio, co-orient. III. Universidade do Vale do Paraíba. Programa de Pós-Graduação em Física e Astronomia. IV. Título.

Eu, Stella Faria Costa, autor(a) da obra acima referenciada:

Autorizo a divulgação total ou parcial da obra impressa, digital ou fixada em outro tipo de mídia, bem como, a sua reprodução total ou parcial, devendo o usuário da reprodução atribuir os créditos ao autor da obra, citando a fonte.

Declaro, para todos os fins e efeitos de direito, que o Trabalho foi elaborado respeitando os princípios da moral e da ética e não violou qualquer direito de propriedade intelectual sob pena de responder civil, criminal, ética e profissionalmente por meus atos.

São José dos Campos, 19 de Junho de 2023.

Stella Faria Costa

Autor(a) da Obra

STELLA FARIA COSTA

“ANÁLISE DE ESTRUTURAS DE GALÁXIAS ESPIRAIS GRAND DESIGN VIA TÉCNICAS DE FOURIER”.

Dissertação aprovada como requisito parcial à obtenção do grau de Mestre, do Programa de Pós-Graduação em Física e Astronomia, do Instituto de Pesquisa e Desenvolvimento da Universidade do Vale do Paraíba, São José dos Campos, SP, pela seguinte banca examinadora:

Prof. ^a Dr. ^a Virginia Klauner de oliveira	<i>Virginia Klausner de Oliveira</i>
Prof. Dr. Irapuan Rodrigues de Oliveira Filho	<i>Irapuan Rodrigues</i>
Prof. Dr. Lucas Antonio Carità	<i>Lucas Antonio Carità</i>
Prof. Dr. José Andrés Hernandez Jimenez	<i>José Andrés Hernandez Jimenez</i>
Prof. Dr. Ivânio Puerari	<i>Ivânio Puerari</i>
Prpf. Dr. Nelson Vera Villamizar	<i>Nelson Vera Villamizar</i>

Prof.^a Dr.^a Lúcia vieira
Diretora do IP&D – Univap
São José dos Campos, 28 de Fevereiro de 2023.

Aos meus pais

AGRADECIMENTOS

A Deus pela minha vida, saúde e proteção; por iluminar meus caminhos e me capacitar a realização deste trabalho.

Aos meus pais por serem a minha fortaleza. Agradeço a eles pelo amor, dedicação, cuidado e exemplo dado durante toda a minha existência. A minha avó Rosa e madrinha Marina por serem, para sempre, minha referência de amor, bondade e perseverança.

Ao meu namorado Luiz Felipe por me encorajar; me ajudar com as ansiedades e inseguranças; por comemorar comigo cada vitória e me motivar sempre.

Ao meu orientador Irapuan por compartilhar comigo tantos conhecimentos, experiências e por ensinar sempre com paciência e bom humor. Ao meu coorientador Lucas por ter me inspirado desde antes da graduação, e por estar, há anos, me ensinando e incentivando.

A Universidade do Vale do Paraíba, por me receber tão bem, oferecer uma estrutura física e professores incríveis.

A CAPES, pela bolsa concedida ao longo destes anos.

A todos os professores que passaram pela minha vida e contribuíram para minha formação.

Aos meus colegas e amigos do IP&D pelos momentos, aprendizados e risadas compartilhadas. Agradeço em especial a Natália que além de minha amiga e companheira de estudos, tornou esta trajetória mais leve.

Por último, mas não menos importante, quero me agradecer. Eu quero me agradecer por ter acreditado em mim; por ter abdicado de alguns dias de folga; por não pensar em desistir. Eu quero me agradecer por ser eu mesma e por sempre me lembrar que, um dia, eu sonhei com esse dia.

”Se eu vi mais longe, foi por estar sobre ombros de gigantes.”

Isaac Newton

RESUMO

Utilizando imagens do *DESI Legacy Imaging Survey* nas bandas g , r e z , foi realizada uma análise das estruturas espirais das galáxias IC 4566, NGC 768 e IC 1256. O objetivo deste trabalho é aplicar as Transformadas de Fourier unidimensional e bidimensional para análise das estruturas presentes em galáxias espirais *grand design*. Para isso, foram criados programas em PYTHON para implementação dos métodos, realizados testes com espirais teóricas e galáxias estudadas em outros trabalhos e assim, feita a aplicação nas três galáxias. Primeiramente, aplicamos a Série e a Transformada de Fourier bidimensional para determinação das componentes (m) dominantes em cada uma das estruturas espirais, além da medição do *pitch angle* α de cada modo. Em seguida, foi implementada a Transformada de Fourier unidimensional para determinação da ressonância de corrotação. Como resultado, IC 1256 apresentou como modo dominante $m = 3$ e $|\alpha| \approx 21.8$, e as galáxias IC 4566 e NGC 768, $m = 2$ com $|\alpha| \approx 16.9$ e $|\alpha| \approx 18.9$, respectivamente. Com relação à ressonância de corrotação, para IC 4566 determinamos que o caráter do padrão espiral é *trailing* com raio de corrotação em 7.8 kpc e *leading* em 16 kpc ; para NGC 768 o caráter do padrão é *trailing* e o raio de corrotação está em 15 kpc . Os métodos apresentam boa caracterização das estruturas espirais de galáxias *grand design* e os valores obtidos para o *pitch angle* aproximam-se de valores apresentados em outros estudos e técnicas.

Palavras-chave: galáxias: espiral; galáxia: estrutura; método: Série de Fourier bidimensional; método: Transformada de Fourier bidimensional; método: Transformada de Fourier unidimensional; técnica: processamento de imagem.

ABSTRACT

Using DESI Legacy images in the g , r and z bands, an analysis of the spiral structures of galaxies IC 4566, NGC 768 and IC 1256 was performed. The objective of this work is to apply the Fourier Transforms (one and two-dimensional) to analyze the structures present in grand design spiral galaxies. For this purpose, Python programs were created to implement the methods, tests were performed with theoretical spirals and galaxies studied in other works, and then the application was made to the three galaxies. First, we apply the two-dimensional Fourier Series and Transform to determine the dominant components (m) in each of the spiral structures, in addition to measuring the pitch angle α of each mode. Then, the one-dimensional Fourier Transform was implemented to determine the corotation resonance. As a result, IC 1256 showed as dominant mode $m = 3$ and $|\alpha| \approx 21.8$, and galaxies IC 4566 and NGC 768, $m = 2$ with $|\alpha| \approx 16.9$ and $|\alpha| \approx 18.9$, respectively. Regarding the corotation resonance, for IC 4566 we determine that the character of the spiral pattern is trailing with corotation radius at 7.8 kpc and leading at 16 kpc ; and for NGC 768 the character of the pattern is trailing and the corotation radius is at 15 kpc . The methods show good characterization of the spiral structures of grand design galaxies and the values obtained for the pitch angle approach values presented in other studies and techniques.

Keywords: galaxies: spiral; galaxies: structure; method: two-dimensional Fourier Series; method: two-dimensional Fourier Transform; method: one-dimensional Fourier Transform; technique: image processing.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Classificação das galáxias ao longo da sequência de Hubble.	16
Figura 2 – Modelo de ondas de densidade proposto por Lindblad.	18
Figura 3 – O padrão espiral na Via Láctea.	20
Figura 4 – Como medir o <i>pitch angle</i> α nos braços espirais.	24
Figura 5 – Padrões espirais <i>leading</i> e <i>trailing</i>	25
Figura 6 – Braços espirais do tipo S e Z.	26
Figura 7 – Exemplo de remoção das estrelas de campo da imagem de uma galáxia.	28
Figura 8 – Exemplo de deprojeção da imagem de uma galáxia.	29
Figura 9 – Exemplo de um diagrama $\ln r$ vs. θ	31
Figura 10 – Posição da frente de choque com relação à OD.	33
Figura 11 – Comportamento relativo da fase $\Theta(r)$ da OD e da frente de choque.	34
Figura 12 – Diagrama de diferença de fase.	35
Figura 13 – Espectro $ A(p, m) $ de uma espiral matemática de 3 braços.	37
Figura 14 – Imagem da Transformada inversa da espiral logarítmica de 3 braços.	39
Figura 15 – Distribuição do tipo Hubble para a amostra completa de 5490 galáxias.	40
Figura 16 – Variação e dependência do <i>pitch angle</i> ao longo da sequência de Hubble.	41
Figura 17 – Distribuição bimodal do <i>pitch angle</i> das galáxias analisadas.	41
Figura 18 – Imagens da galáxia IC 4566 nos filtros g , r e z	44
Figura 19 – Imagem da galáxia IC 4566 sem as estrelas de campo e deprojetada.	45
Figura 20 – Diagrama $\ln r$ (r em pixels) vs. θ da galáxia IC 4566.	47
Figura 21 – Coeficientes $A(p, m)$ da TF2D na imagem g , r e z da galáxia IC 4566.	49
Figura 22 – Imagens das Transformadas inversas de IC 4566 para $m = 1, 2, 3, 4, 5$ e 6	51
Figura 23 – Imagens das Transformadas inversas de IC 4566 para $m = 2$	52
Figura 24 – Diagrama de fase da galáxia IC 4566 para $m = 2$ das imagens deprojetadas.	53
Figura 25 – Diagrama de diferença de fase da galáxia IC 4566 para $m = 2$ das deprojetadas.	54
Figura 26 – Diagrama de fase da galáxia IC 4566 para $m = 2$ das Transformadas inversas.	55
Figura 27 – Diagrama de diferença de fase da galáxia IC 4566 para $m = 2$ das Transformadas inversas.	56
Figura 28 – Ressonância de corrotação da galáxia IC 4566.	57
Figura 29 – Posição da frente de choque com relação à OD para IC 4566.	58

Figura 30 – Imagens da galáxia NGC 768 nos filtros g , r e z	59
Figura 31 – Imagem da galáxia NGC 768 sem as estrelas de campo e deprojetada.	60
Figura 32 – Diagrama $\ln r$ vs. θ da galáxia NGC 768.	62
Figura 33 – Coeficientes $A(p, m)$ da TF2D na imagem g , r e z da galáxia NGC 768.	64
Figura 34 – Imagens das Transformadas inversas de NGC 768 para $m = 1, 2, 3, 4, 5$ e 6	66
Figura 35 – Imagens das Transformadas inversas de NGC 768 para $m = 2$	67
Figura 36 – Diagrama de fase da galáxia NGC 768 para $m = 2$ das imagens deprojetadas.	68
Figura 37 – Diagrama de diferença de fase da galáxia NGC 768 para $m = 2$ das deprojetadas.	69
Figura 38 – Diagrama de fase da galáxia NGC 768 para $m = 2$ das Transformadas inversas.	70
Figura 39 – Diagrama de diferença de fase da galáxia NGC 768 para $m = 2$ das Transformadas inversas.	71
Figura 40 – Ressonância de corrotação da galáxia NGC 768.	72
Figura 41 – Posição da frente de choque com relação à OD para NGC 768.	73
Figura 42 – Imagens da galáxia IC 1256 nos filtros g , r e z	74
Figura 43 – Imagens da galáxia IC 1256 sem as estrelas de campo e deprojetada.	75
Figura 44 – Diagrama $\ln r$ vs. θ da galáxia IC 1256.	77
Figura 45 – Coeficientes $A(p, m)$ da TF2D na imagem g , r e z da galáxia IC 1256.	79
Figura 46 – Imagens das Transformadas inversas de IC 1256 para $m = 1, 2, 3, 4, 5$ e 6	81

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Propriedades das galáxias selecionadas.	42
Tabela 2 – Alguns valores obtidos no espectro de Fourier para IC 4566.	50
Tabela 3 – Alguns valores obtidos no espectro de Fourier para NGC 768.	65
Tabela 4 – Alguns valores obtidos no espectro de Fourier para IC 1256.	80

SUMÁRIO

1	Introdução	14
1.1	Galáxias	14
1.1.1	Um pouco de história	14
1.1.2	Catálogos	14
1.1.3	O Grande Debate Shapley-Curtis	15
1.2	Sistemas de classificação	16
1.2.1	Sistema de classificação de Hubble	16
1.3	Galáxias espirais	17
1.3.1	Teoria das Ondas de Densidade	18
1.3.2	Formação estelar por choques	19
1.3.3	Estudos	21
1.4	Organização da dissertação	22
2	Estrutura espiral	23
2.1	Representação dos braços em espirais logarítmicas	23
2.2	<i>Pitch angle</i>	24
2.3	Caráter <i>leading</i> e <i>trailing</i>	25
2.4	Ângulo de inclinação	26
2.5	Elipticidade	27
2.6	Ângulo de posição	27
3	Tratamento das Imagens	28
3.1	Remoção das estrelas de campo	28
3.2	Deprojeção das imagens	29
4	Métodos de Análise	30
4.1	Diagrama $\ln r$ vs. θ	30
4.2	Transformada de Fourier unidimensional	32
4.2.1	Diagrama de fase	33
4.2.2	Diagrama de diferença de fase	34
4.3	Transformada de Fourier bidimensional	35
5	Amostra de galáxias espirais	40
6	Programas em PYTHON	43

7 Galáxia IC 4566	44
7.1 Imagens	45
7.2 Transformada de Fourier bidimensional	48
7.3 Transformada de Fourier unidimensional	53
8 Galáxia NGC 768	59
8.1 Imagens	60
8.2 Transformada de Fourier bidimensional	63
8.3 Transformada de Fourier unidimensional	68
9 Galáxia IC 1256	74
9.1 Imagens	75
9.2 Transformada de Fourier bidimensional	78
10 Conclusões	83
Referências	86

1 Introdução

1.1 Galáxias

Galáxias são sistemas compostos de estrelas, gás e poeira interestelar, além de matéria escura. As estrelas, o gás e a poeira podem ser observados pela luz que é emitida ou absorvida, enquanto a presença de matéria escura é deduzida por métodos indiretos, como a observação do movimento das estrelas ou do gás em uma galáxia (PICAZZIO, 2011). As galáxias apresentam formas, cores e tamanhos variados. Podemos encontrar galáxias com trilhões de estrelas e outras com apenas dezenas de milhões, bem como há galáxias com formato de disco achatado (que é o caso da Via Láctea) e galáxias praticamente esféricas.

1.1.1 Um pouco de história

Ao olharmos para o céu noturno, entre aproximadamente 6 mil estrelas visíveis a olho nu, nota-se uma faixa difusa, de cor esbranquiçada, cobrindo uma estreita parte do céu. Devido à sua cor e aparência esfumada semelhante ao leite, os antigos batizaram essa faixa de Via Láctea, que em latim, significa “caminho de leite”. De origem grega, o termo “galáxia” tem um significado semelhante.

Por volta de 1609, Galileu Galilei apontou seu telescópio para o céu e foi o primeiro a perceber que a Via Láctea é uma vasta coleção de estrelas individuais, não se tratando de uma “nebulosidade esbranquiçada” como era vista até então. Na verdade, por se parecerem com manchas difusas nas observações daquela época, as galáxias eram chamadas de nebulosas, e recebiam pouca atenção dos observadores. Na metade do século XVIII, Immanuel Kant e Thomas Wright sugeriram que a Via Láctea era um disco estelar de tamanho finito e que nosso Sistema Solar era apenas um componente dentro desse disco. Como uma extensão do seu argumento sobre a natureza da Galáxia, em 1755, Kant sugeriu que as nebulosas seriam sistemas estelares semelhantes à Via Láctea, e então denominou esses objetos de “Universos-Ilha”. Então, na década de 1780, William Herschel produziu um mapa da Via Láctea baseado na contagem de estrelas que ele conseguia observar em regiões do céu.

1.1.2 Catálogos

A natureza dos “Universos-Ilha” tornou-se alvo de muitos estudos e investigações, como consequência, diversos catálogos desses objetos foram produzidos. Um desses catálogos foi o catálogo de Messier, feito por Charles Messier (entre os anos de 1764 e 1781), que, enquanto catalogava cometas, registrou 103 objetos difusos que poderiam ser confundidos com os objetos que

buscava. Em 1786 o catálogo *Catalogue of Nebulae and Clusters of Stars* (CN) foi produzido por William Herschel e publicado no *Philosophical Transactions*. Posteriormente, em 1864, foi ampliado por seu filho Sir John Herschel como *General Catalogue of Nebulae and Clusters of Stars* (GC), abrangendo 5079 objetos, incluindo aglomerados estelares, nebulosas e galáxias. Posteriormente, em 1888, John L. E. Dreyer publicou o *New General Catalogue* (NGC), o qual continha quase 8000 objetos e foi baseado nos catálogos CN e GC dos Herschels.

Paralelamente, em 1845, William Parsons, o terceiro Conde de Rosse, construiu o “Leviatã”, que era até então o maior telescópio do mundo. O instrumento possuía 1,8m de diâmetro e foi capaz de diferenciar, pela primeira vez, a estrutura espiral em algumas nebulosas.

1.1.3 O Grande Debate Shapley-Curtis

A discussão sobre a natureza das nebulosas se concentrava em suas distâncias e o tamanho relativo da Via Láctea (ainda não se conheciam as distâncias dos objetos). Muitos astrônomos acreditavam que as nebulosas espirais estavam dentro da Via Láctea e outros defendiam a visão de Kant, de “Universos-Ilha”. Até que em 26 de abril de 1920, na Academia Nacional de Ciências de Washington, Harlow Shapley e Heber D. Curtis se reuniram para discutir e mostrar suas visões, o que ficou conhecido historicamente como o “Grande Debate”. Shapley apoiava a ideia de que as nebulosas eram membros da nossa galáxia e Curtis defendia a ideia de que as nebulosas eram parecidas fisicamente com a Via Láctea, mas estavam separadas dela. Por fim, nenhum dos argumentos se tornou definitivo e o Grande Debate serviu mais para destacar alguns problemas em argumentos levantados de ambos os lados.

As questões do debate foram finalmente resolvidas por Edwin Hubble, no Observatório Mount Wilson, no ano de 1923. Usando o telescópio Hooker de 2,7m, ele detectou estrelas Cefeidas em M31 e mediu seus períodos de pulsação para determinar suas distâncias, e com isso, constatou que aquele objeto estava realmente distante, fora da Via Láctea. Este trabalho de Hubble na determinação de distâncias extragalácticas foi muito importante para investigações subsequentes de galáxias.

A expansão do universo foi descoberta no início do século XX. Ela foi prevista inicialmente em 1927 por Georges Lemaître ([LEMAÎTRE, 1927](#)), onde a partir da Teoria da Relatividade Geral e de dados observacionais de velocidade e distância de galáxias, ele chegou, matematicamente, em um modelo do Universo que estaria em expansão. A partir desse modelo, foi possível fazer uma extrapolação temporal para trás, chegando assim, à teoria sobre a origem do Universo. Dois anos depois, a partir de observações e medições, Hubble publicou um trabalho com resultados que indicavam uma expansão do Universo ([HUBBLE, 1929](#)), confirmando os estudos e teorias propostas por Lemaître. Desta forma, eles descobriram que existia uma relação entre velocidade e distância, conhecida atualmente por Lei de Hubble-Lemaître, e que todas as galáxias estão se afastando de nós.

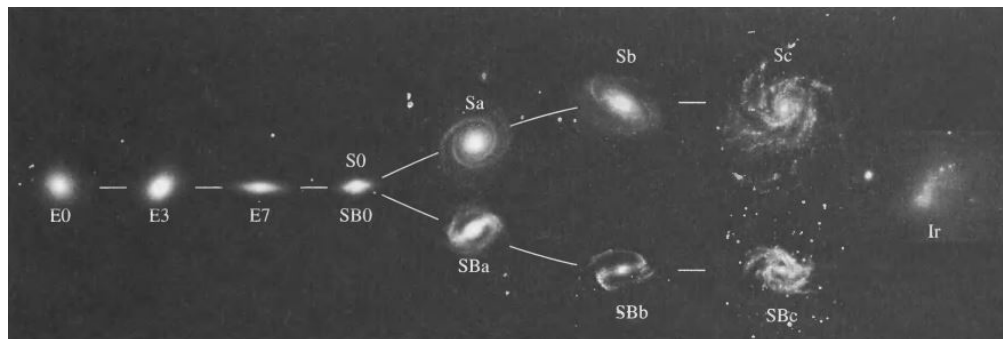
1.2 Sistemas de classificação

Com a natureza extragaláctica das galáxias estabelecida, começaram então, os estudos sobre suas propriedades físicas. Como primeiro passo para análise e melhor compreensão de objetos novos, é natural que eles sejam organizados e classificados de acordo com suas características intrínsecas. O primeiro sistema de classificação de nebulosas foi desenvolvido em 1908 por Maximilian Wolf, antes mesmo de se compreender a natureza extragaláctica das galáxias. Posteriormente, Joseph B. Reynolds definiu sete classes morfológicas de acordo com a importância da concentração central de luz em relação ao resto da nebulosa. Nesses sistemas, as nebulosas planetárias e as galáxias estavam dentro de um mesmo grupo e, embora bem detalhados, foram abandonados quando a natureza das galáxias foi melhor compreendida.

1.2.1 Sistema de classificação de Hubble

Em seu artigo *Extra-Galactic Nebulae* de 1926, Hubble foi o primeiro a propor um sistema de classificação exclusivo para galáxias, o qual foi aperfeiçoado no seu livro *The realm of the nebulae*, em 1936. O sistema de classificação Hubble é um dos mais usados até hoje e abrange cerca de 97% das galáxias conhecidas no Universo local. Neste sistema de classificação morfológica as galáxias são divididas em: elípticas (E0 até E7), lenticulares (S0), espirais normais (S), espirais barradas (SB) e irregulares (Irr).

Figura 1 – Classificação das galáxias ao longo da sequência de Hubble.



Fonte: [Carroll e Ostlie \(2007\)](#).

Inicialmente, existia uma concepção evolutiva na qual acreditava-se que as galáxias nasciam como elípticas, a partir de um colapso monolítico, e depois evoluíam para espirais quando a matéria assentasse em um disco. Daí veio a nomenclatura *early/late type*, onde as galáxias elípticas que estão no início da sequência foram chamadas de “tipo precoce” (em inglês, *early type*), enquanto as galáxias espirais de “tipo tardio” (em inglês, *late type*), o que fez muitas pessoas acabarem relacionando a classificação de Hubble como uma sequência evolutiva. Com o tempo, viu-se que esta interpretação era equívoca. Hoje se sabe, por exemplo, que uma colisão entre galáxias espirais

pode gerar como resultado uma elíptica. Entretanto, esta nomenclatura continua sendo usada até hoje por razões históricas.

Apesar da classificação de Hubble ter sido vista erroneamente como uma sequência evolutiva, várias propriedades físicas se alteram ao longo desse diagrama, tais como o grau de enrolamento dos braços espirais, variação da cor, taxa de formação estelar, entre outras. Por exemplo, espirais do tipo tardio apresentam braços ligeiramente mais fortes do que os tipos precoces (ELMEGREEN et al., 2011; YU; HO, 2020).

A uma distância aproximada de 1 ou 2 bilhões de anos-luz, cerca de 70% das galáxias brilhantes são espirais, 14% são lenticulares, 10% são elípticas e 6% irregulares (PICAZZIO, 2011), isto é, em nossa vizinhança, as galáxias espirais constituem os sistemas mais comuns.

1.3 Galáxias espirais

O foco deste trabalho está no estudo das estruturas espirais de galáxias discoidais. Nesta introdução daremos, portanto, ênfase especial à descrição deste tipo de galáxia. Galáxias espirais normais possuem um núcleo, disco, bojo, halo e braços espirais, onde os braços iniciam próximos ao bojo, na região central. Nas galáxias espirais barradas temos uma estrutura que se assemelha a uma barra no centro da galáxia (ou em termos técnicos: um elipsóide prolato), de modo que os braços espirais partem das extremidades dessa barra.

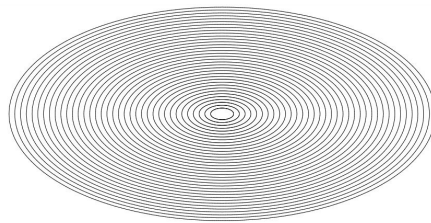
Para as galáxias espirais existe um critério de subdivisão que depende dos seguintes fatores: o enrolamento dos braços espirais, o grau de resolução dos braços em estrelas e regiões HII e o tamanho relativo do bojo com relação ao disco da galáxia. Desta forma, elas são subdivididas em Sa, Sb e Sc e SBa, SBb e SBc, tal que as Sa ou SBa são as galáxias com os braços mais enrolados e com os bojos maiores e mais brilhantes em comparação aos braços; as Sc ou SBc são aquelas com os braços mais abertos e com os bojos menos brilhantes do que os braços. Com relação à aparência e número de braços, as galáxias espirais ainda podem ser agrupadas como flocculentas (infinitude de braços mal definidos, descontínuos e irregulares), *grand design* (braços bem definidos e simétricos) ou braços múltiplos (características intermediárias) (ELMEGREEN; ELMEGREEN, 1987). De acordo com Hart et al. (2016), galáxias com múltiplos braços exibem cores mais azuis do que suas contrapartes de dois braços, sugerindo uma relação entre o número de braços e a formação estelar recente. Apenas cerca de 10% de todas as galáxias espirais são consideradas galáxias *grand design*, 60% são galáxias de braços múltiplos e os 30% restantes são galáxias flocculentas (CARROLL; OSTLIE, 2007).

Tais sistemas despertam curiosidade, atração e questionamentos científicos, como: “qual a sua origem?”, “como sua estrutura espiral se mantém?”, “o que determina o número de braços?”. Consequentemente, muitos estudos e técnicas são propostas para a análise das estruturas espirais

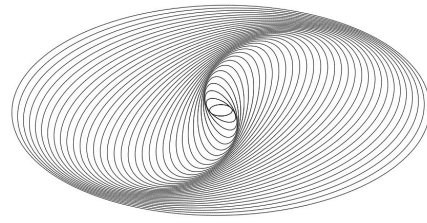
presentes nas galáxias (GROSBØL; PATSIS; POMPEI, 2004; GRAND et al., 2015; KENDALL; CLARKE; JR, 2015; YU; HO, 2019; YU; HO, 2020; SAKHIBOV; GUSEV; HEMMERICH, 2021).

Bertil Lindblad foi o primeiro pesquisador a trabalhar teoricamente neste assunto, dedicando-se a este problema de 1927 até 1965. Ele acreditava que a estrutura espiral vinha da interação entre as órbitas das estrelas do disco, por isso deveria ser investigada a partir de dinâmica estelar (LINDBLAD, 1947). Sua interpretação era que as estrelas e suas órbitas produzem “ondas de densidade”, isto é, as posições geométricas das órbitas das estrelas provocam os máximos de densidade em forma de braços espirais. Este conceito é ilustrado na Figura 2, onde na Figura 2a consideramos órbitas elípticas concêntricas com eixos alinhados e que estão povoadas por estrelas de maneira uniforme. Se girarmos os eixos principais dessas órbitas em um ângulo $\theta(r) = -a \ln(r) + b$ (sendo a e b constantes e r o eixo maior da órbita), irão aparecer, por acúmulo de estrelas, dois braços espirais simétricos, como podemos ver na Figura 2b.

Figura 2 – Modelo de ondas de densidade proposto por Lindblad. Nota-se a formação de um padrão espiral de densidade.



(a) Órbitas elípticas alinhadas.



(b) Estrutura bissimétrica de braços espirais como efeito da rotação das órbitas elípticas por um ângulo $\theta(r)$.

Fonte: Villamizar (2001).

A variação no grau de enrolamento dessa estrutura espiral depende da constante a , de modo que ao aumentarmos o valor de a , a estrutura aparece mais enrolada.

Na época, sua ideia não repercutiu entre os astrônomos e até os anos 60 existiam teorias alternativas, como as que consideravam que as estruturas espirais eram causadas por campos magnéticos interestelares (PIDDINGTON, 1967).

1.3.1 Teoria das Ondas de Densidade

Pouco antes da morte de Lindblad, trinta e sete anos após o início de seu trabalho, o matemático C. C. Lin e o astrônomo chinês Frank Shu conseguiram esclarecer a teoria na qual Lindblad trabalhou sozinho por tanto tempo, introduzindo assim, a teoria de ondas de densidade espiral (LIN; SHU, 1964). Esta teoria propunha que as estruturas espirais no disco estelar poderiam ser interpretadas como uma onda de densidade que se propaga azimutalmente através do disco. Os autores utilizaram técnicas matemáticas da mecânica de ondas para tratar a propagação de

perturbações rotando diferencialmente em discos estelares. Esta ideia foi combinada com uma forte hipótese vinda do trabalho Lindblad (1947): que os padrões espirais nos discos das galáxias são fenômenos de longa duração, isto é, que estas espirais permanecem com a mesma aparência por muitos períodos orbitais (exceto pela rotação global) (JIMÉNEZ, 2010). Então, Lin & Shu apresentavam a hipótese de que a estrutura espiral é uma onda de densidade quase estacionária. Esta teoria parece resolver boa parte dos problemas associados aos braços espirais¹, permitindo diversas análises e previsões quantitativas sobre os padrões espirais, inclusive a existência de espirais do tipo *leading* e *trailing*².

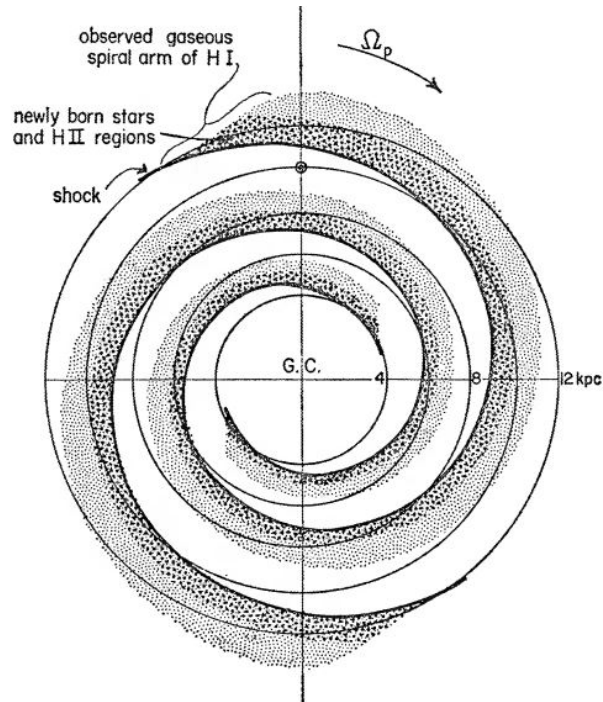
1.3.2 Formação estelar por choques

Roberts (1969) propõe um mecanismo de formação estelar induzido por choques em um cenário de ondas de densidade. Em seu trabalho foi considerado o movimento relativo entre o gás presente no disco galáctico e um campo espiral de dois braços. Quando o padrão perturbador ou a Onda de Densidade (OD) passa por uma região do disco, ela estimula a formação estelar devido a velocidade relativa da OD e do disco, em outras palavras, ondas de choque é o mecanismo para o colapso gravitacional das nuvens de gás, originando a formação de estrelas. Roberts descreveu o cenário do padrão espiral da Via Láctea, como apresentado na Figura 3.

¹ Com esta teoria solucionamos o problema que aparece do enrolamento extremo dos braços por rotação diferencial que deve aparecer se forem braços materiais. Os braços espirais observados são ondas que se propagam pelo disco com uma velocidade angular constante transportando energia, não matéria.

² Ver Seção 2.3 para definição destes termos.

Figura 3 – O padrão espiral na Via Láctea proposto em Roberts (1969). Temos ilustrado o mecanismo para a formação estelar por choques, a qual apresenta um padrão de densidade espiral bissimétrico que, devido a velocidade relativa entre o padrão (OD) e o disco de gás, gera uma faixa de estrelas recém formadas e de regiões HII. Nota-se essa faixa no lado interno do braço espiral observado.



Fonte: Roberts (1969).

Conforme a OD vai passando pelo disco, as estrelas formadas vão ficando para trás e tornando-se estrelas mais velhas, causando uma distribuição azimutal de idades estelares através dos braços espirais. Para entendermos melhor esse mecanismo, assumimos que o padrão espiral tem uma velocidade angular aproximadamente constante e que o disco de gás e estrelas apresenta uma rotação diferencial. Chamamos de raio de corrotação, o raio cuja a velocidade angular do padrão (Ω_p) é igual à velocidade angular do disco (Ω), isto é, $\Omega_p = \Omega$. Assim, na região interna ao raio de corrotação a velocidade de rotação do disco é maior que a do padrão ($\Omega_p < \Omega$) e para raios externos, acontece o contrário ($\Omega_p > \Omega$). Desta forma, o cenário de formação estelar fica descrito da seguinte forma: na região dentro do raio de corrotação, os gases e as estrelas do disco estão “batendo” no padrão, enquanto que para fora do raio de corrotação, o padrão que “bate” no material disco. Essa colisão que cria a frente de choque nos braços espirais e como consequência, no raio de corrotação nota-se um deslocamento da frente de choque do lado côncavo para o lado convexo do braço espiral (Figura 10). Assim, observaremos uma inversão do gradiente azimutal de idades estelares no raio de corrotação, devido ao fato da frente de choque estar associada à formação estelar.

1.3.3 Estudos

A estrutura espiral é a característica mais marcante das galáxias de disco e embora tenham sido estudadas por mais de um século, sua natureza ainda é debatida. Diversos pesquisadores têm trabalhado a fim de desenvolver um método objetivo para análise e classificação de galáxias espirais. O método da Transformada de Fourier bidimensional³ aplicado em imagens de galáxias espirais foi proposto inicialmente por Kalnajs (1975 apud VILLAMIZAR, 2001) sendo aplicado primeiramente com o objetivo de recuperar informações sobre as distribuições das regiões HII. Autores como Considère e Athanassoula (1982), Iye et al. (1982), Considère e Athanassoula (1988), Puerari e Dottori (1990), Puerari e Dottori (1992), Vera-Villamizar et al. (2001) usaram extensivamente este método. Por meio da separação das estruturas espirais em cada uma de suas componentes, este método permite recuperar informações contidas nas imagens das galáxias e analisar a relevância de cada componente na extensão do disco galáctico. Em Puerari e Dottori (1997) foi desenvolvido um método para analisar o gradiente azimutal de idades através dos braços espirais a partir da Transformada de Fourier unidimensional, com isso foi possível encontrar o raio de corotação das galáxias NGC 1832 e NGC 7479. Nesse artigo os autores mostram a existência de dois e três raios de corotação para as galáxias NGC 7479 e NGC 1832, respectivamente. Além disso, as técnicas de Fourier unidimensional (1D) e bidimensional (2D) são técnicas amplamente adotadas para medir o *pitch angle*⁴ dos braços espirais (SAVCHENKO; RESHETNIKOV, 2013; YU et al., 2018; YU; HO, 2018).

Baseado nos estudos citados acima, o objetivo deste trabalho é aplicar as Transformadas de Fourier (unidimensional e bidimensional) para análise das estruturas presentes em galáxias espirais *grand design*. Para isso, foram criados programas em PYTHON para implementação dos métodos, realizados testes com espirais teóricas e galáxias estudadas em outros trabalhos (PUERARI; DOTTORI, 1997; VILLAMIZAR, 2001) e assim, feita a aplicação nas galáxias IC 4566, NGC 768 e IC 1256.

As galáxias IC 4566 e NGC 768 são *grand design* e IC 1256 possui múltiplos braços irregulares. Como dito anteriormente, neste trabalho serão estudadas galáxias discoidais, mais precisamente, galáxias espirais *grand design*. Logo, a última galáxia que iremos analisar (IC 1256) é um caso discordante para notarmos o desempenho e as limitações dos métodos ao serem aplicados em uma galáxia que não seja *grand design*.

³ Ver seção 4.3 para formulação e descrição do método.

⁴ Ver Seção 2.2 para definição deste termo.

1.4 Organização da dissertação

No Capítulo 2 são introduzidas definições, conceitos e bases utilizadas para o estudo das estruturas espirais. No Capítulo 3 explicamos os tratamentos necessários para aplicação dos métodos nas imagens das galáxias. No Capítulo 4 apresentamos as Transformadas de Fourier, as equações e os diagramas necessários para estudo. No Capítulo 5 são apresentadas as galáxias que serão estudadas (IC 4566, NGC 768 e IC 1256), bem como algumas de suas propriedades. No Capítulo 6 é feita uma breve descrição dos programas criados em PYTHON. Por fim, nos Capítulos 7, 8 e 9 serão apresentados os resultados obtidos para cada galáxia ao implementarmos as Transformadas de Fourier; primeiramente, será aplicada a Transformada de Fourier bidimensional para análise das componentes presentes na estrutura espiral, e em seguida, a Transformada de Fourier unidimensional para determinação da ressonância de corrotação.

2 Estrutura espiral

Com o intuito de analisar as estruturas de galáxias espirais, é natural que, primeiramente, sejam apresentadas algumas definições e elementos importantes, como *pitch angle*, ângulo de inclinação, ângulo de posição, entre outros. Assim, será feita uma breve introdução sobre tais conceitos.

De acordo com Athanassoula (1984), um potencial perturbador pode ser escrito em notação de ondas:

$$\Phi(r, \theta, t) = A(r)e^{i(\Psi(r) + \Omega_p t - m\theta)}, \quad (2.1)$$

onde r e θ são coordenadas polares galactocêntricas, $A(r)$ é a amplitude de oscilação da onda, Ω_p é uma frequência de oscilação que não depende r , t é o tempo, m é o número de braços espirais e $\Psi(r)$ é a fase radial da onda. Deste modo, se temos curvas com fase constante, então:

$$\Psi(r) + \Omega_p t - m\theta = \text{constante}, \quad (2.2)$$

onde se considerarmos o *tempo* e a *constante* iguais a zero, obtemos:

$$\Psi(r) - m\theta = 0. \quad (2.3)$$

Para toda função $\Psi(r)$ monotonicamente crescente, esta última relação representa as propriedades geométricas básicas de espirais simples, isto é, ela representa uma espiral. Pahlen (1911) usou espirais arquimedianas e logarítmicas para representar suas observações, e de acordo com os resultados, acabou rejeitando a espiral arquimediana. Groot (1925, 1926) analisou espirais de Arquimedes, espirais de Cotes, hiperbólicas e logarítmicas, concluindo que as espirais logarítmicas são as que se ajustam e representam melhor os braços observados de galáxias *grand design*. Além destes estudos, vários outros autores mostraram que as espirais logarítmicas, $\Psi(r) = \alpha \ln(r)$, onde α é o *pitch angle*¹, descrevem com precisão os braços de galáxias discoidais (REYNOLDS, 1925; DANVER, 1942; ROTS, 1975; BOESHAAR; HODGE, 1977). Diante disso, neste trabalho, usaremos as espirais logarítmicas para caracterização da estrutura espiral.

2.1 Representação dos braços em espirais logarítmicas

Em coordenadas polares, uma espiral logarítmica é definida pela expressão:

$$r = r_0 e^{-\frac{m}{p}\theta}, \quad (2.4)$$

¹ Ver Seção 2.1 para definição dos termos.

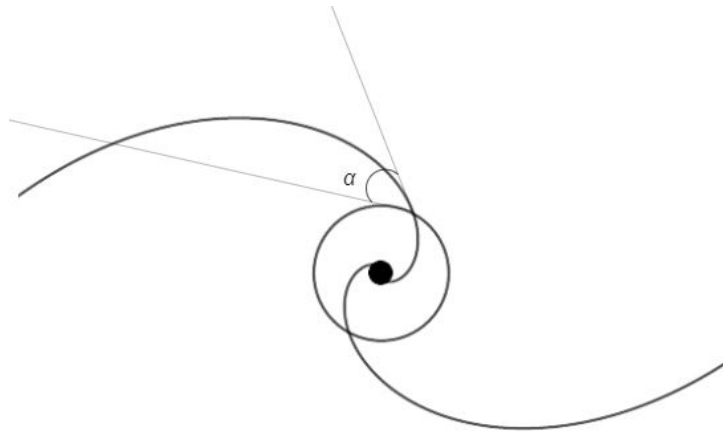
onde m é o número de braços (ou periodicidade angular), r e θ são coordenadas polares e p é a variável relacionada ao *pitch angle* α da espiral através da expressão:

$$\tan(\alpha) = -\frac{m}{p} \quad \Rightarrow \quad \alpha = \arctan\left(-\frac{m}{p}\right). \quad (2.5)$$

2.2 Pitch angle

O *pitch angle* α é um parâmetro fundamental, pois mede o grau de enrolamento dos braços espirais. Podemos medir este ângulo traçando um círculo num determinado raio ao redor do núcleo, uma tangente a esse círculo e uma tangente à espiral, e medir o ângulo entre essas duas retas (Figura 4).

Figura 4 – Como medir o *pitch angle* α nos braços espirais.



Fonte: O autor.

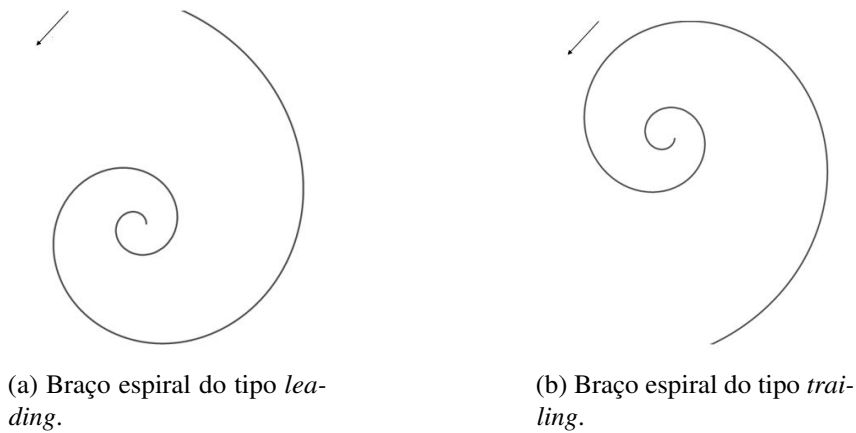
A partir desta definição, temos que braços fortemente enrolados apresentam *pitch angles* bem pequenos, enquanto braços menos enrolados apresentam valores maiores. Podemos notar esse aumento do *pitch angle* ao longo da sequência de Hubble, onde espirais do tipo Sa exibem braços mais enrolados do que espirais do tipo Sc. Além disso, na presença de barras, temos casos mais extremos de estruturas espirais com *pitch angle* de 90° ao longo da extensão da barra.

Em muitas galáxias, o *pitch angle* é aproximadamente constante, em função do raio, para toda a extensão dos braços espirais. Numa galáxia específica, variações neste parâmetro pode fornecer informações importantes a respeito da origem de sua estrutura espiral.

2.3 Caráter *leading* e *trailing*

Outro fator importante é a determinação do caráter *leading* ou *trailing* dos braços espirais. Analisando o enrolamento do braço de dentro para fora, um braço espiral é do tipo *leading* quando está enrolado na mesma direção que a de rotação do disco galáctico (Figura 5a). Quando o sentido de enrolamento do braço espiral é contrário a direção de rotação do disco galáctico, teremos braço do tipo *trailing* (Figura 5b).

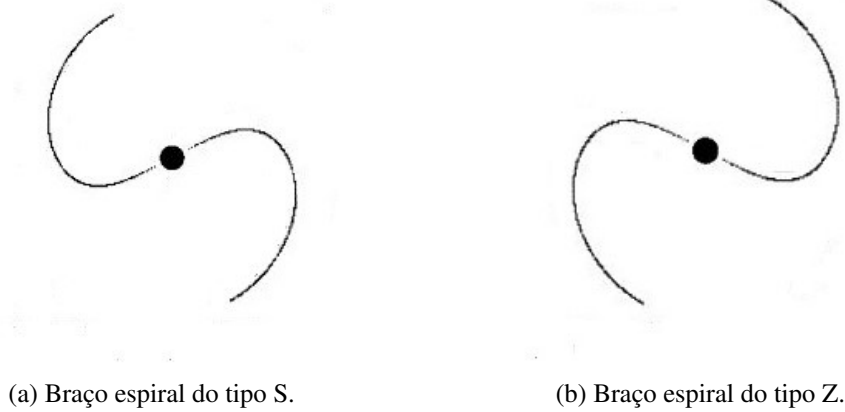
Figura 5 – Padrões espirais *leading* e *trailing*. A seta indica o sentido de rotação do disco da galáxia.



Fonte: O autor.

Para uma galáxia que possui rotação no sentido anti-horário, um *pitch angle* positivo corresponde à uma espiral do tipo *leading* e um *pitch angle* negativo configura um braço espiral do tipo *trailing*. Além disso, temos espirais com braços do tipo S ou Z (Figura 6), onde conhecendo o tipo dos braços espirais da galáxia (S ou Z), é possível utilizarmos técnicas que determinam o caráter *leading* ou *trailing* da estrutura, como será feito adiante.

Figura 6 – Braços espirais do tipo S e Z.



(a) Braço espiral do tipo S.

(b) Braço espiral do tipo Z.

Fonte: O autor.

Estudos como [Contopoulos \(1971\)](#) mostram que a cinemática dos discos favorece a permanência de espirais do tipo *trailing*, sendo o tipo *leading* característica de fenômenos transitórios.

2.4 Ângulo de inclinação

As galáxias estão inclinadas randomicamente em relação à nossa linha de visada. Logo, suas formas aparentes variam ainda que suas formas reais sejam mantidas. Supomos inicialmente que uma galáxia espiral *grand design* tenha um disco estritamente circular. Ao observarmos essa galáxia sob certo ângulo de inclinação, ela terá aparência elíptica. Podemos obter a inclinação β de uma galáxia discoidal (o ângulo entre o disco da galáxia e o plano do céu) medindo a proporção entre o eixo menor b e o eixo maior a de isofotas de aparência elíptica, isto é:

$$\beta = \arccos\left(\frac{b}{a}\right). \quad (2.6)$$

Galáxias com inclinações de 90° são denominadas *edge-on*, enquanto galáxias com inclinações de 0° são chamadas de *face-on*. Quando enxergamos uma galáxia *face-on*, vemos seu disco praticamente circular, mas uma galáxia inclinada a um certo ângulo β apresentará um formato elíptico. No catálogo *Third Reference Catalogue of Bright Galaxies* (RC3) podemos encontrar os valores para a razão dos eixos das elipses para um grande número de galáxias espirais conhecidas, facilitando assim, o cálculo da inclinação β . Em particular, o RC3 apresenta o $\log R_{25}$, que corresponde à razão dos eixos maior e menor, medidos na isofota com brilho superficial de $25 \text{ mag arcsec}^{-2}$ na banda B.

2.5 Elipticidade

A elipticidade e de uma galáxia é denotada por:

$$e = 1 - \frac{b}{a}, \quad (2.7)$$

onde a e b são os semieixos maior e menor da elipse.

2.6 Ângulo de posição

Outro parâmetro útil e importante das galáxias é o ângulo de posição PA . Este é o ângulo no plano do céu medido entre o eixo maior do disco e o Norte, no sentido Leste, também conhecido como direção da linha dos nodos. Em RC3 podemos encontrar também os valores para o PA das galáxias.

Como dito anteriormente, os ângulos de inclinação e de posição são parâmetros importantes e com eles, podemos, por exemplo, deprojetar a imagem de uma galáxia e estudá-la em uma posição *face-on*, como será visto na Seção 3.2.

3 Tratamento das Imagens

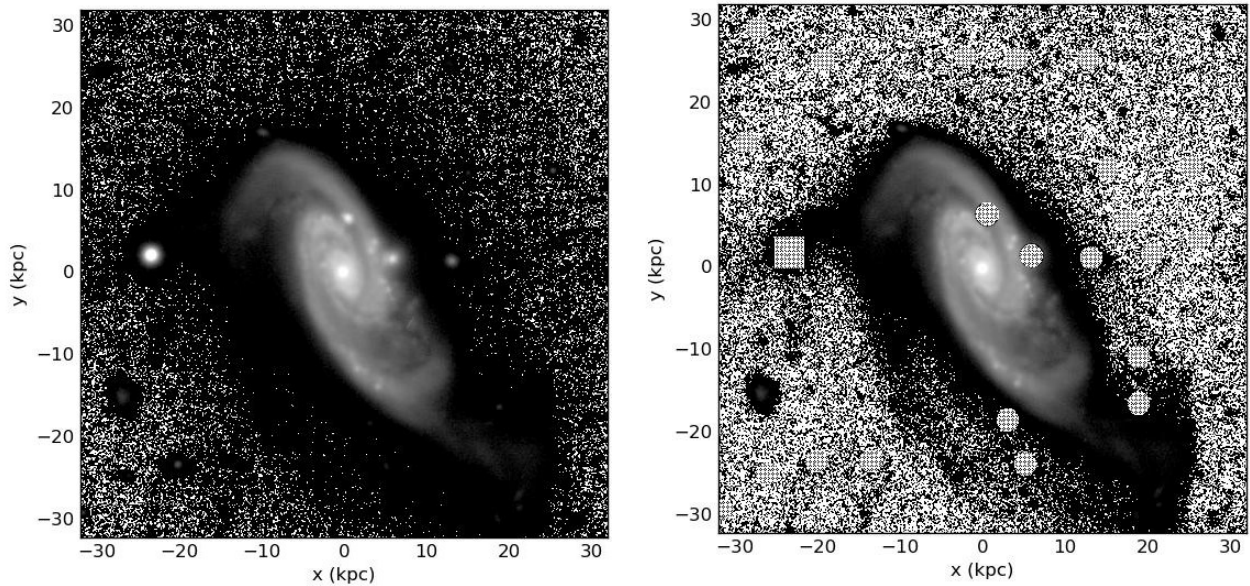
Neste Capítulo serão apresentados os tratamentos a serem realizados nas imagens das galáxias antes da aplicação dos métodos de análise.

3.1 Remoção das estrelas de campo

As estrelas de campo presentes nas imagens das galáxias são responsáveis por gerar frequências espúrias na Transformada de Fourier, bem como informações desnecessárias no diagrama $\ln r$ vs. θ . Por isso, previamente foi feita uma edição nas imagens para extração das estrelas de campo. Esta parte do tratamento das imagens foi realizada no software *IRAF* com a rotina *imedit*.

Na Figura 7 temos um exemplo da remoção das estrelas de campo de uma imagem da galáxia NGC 768 no filtro *g*.

Figura 7 – Exemplo de remoção das estrelas de campo da imagem de uma galáxia.



(a) Imagem original da galáxia no filtro *g*.

(b) Imagem da galáxia após remoção das estrelas.

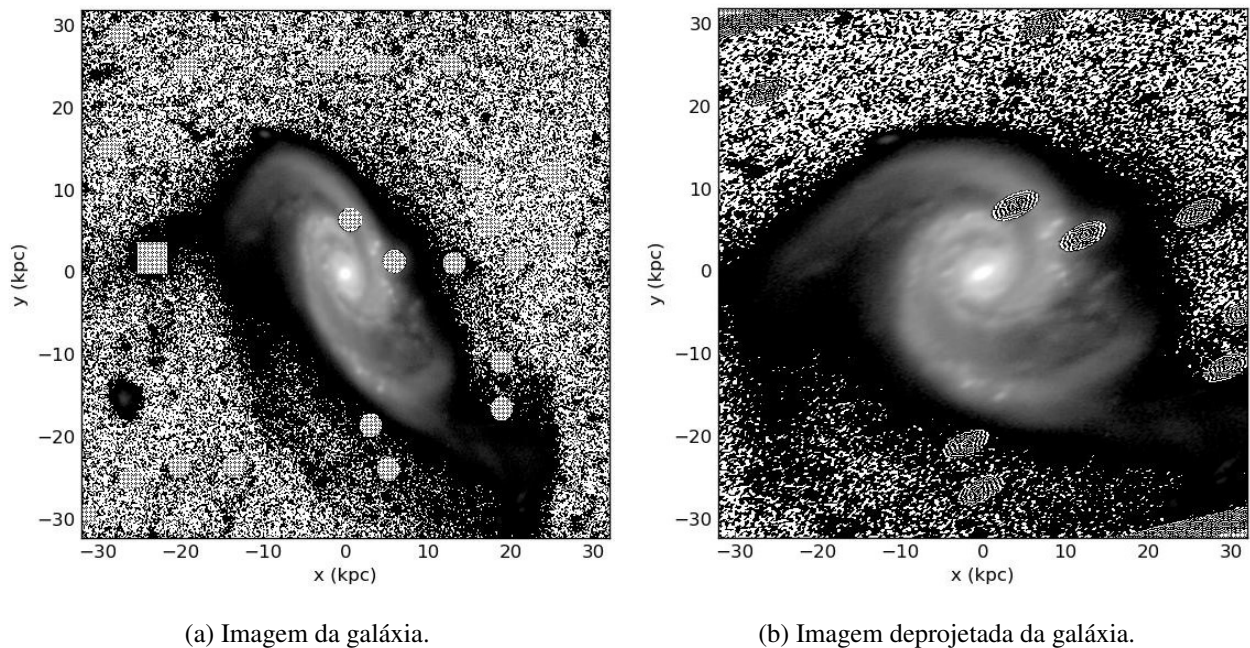
Fonte: O autor.

3.2 Deprojeção das imagens

Para a análise das estruturas espirais é necessário que as galáxias se apresentem no modo *face-on*¹, logo foi feita a deprojeção das imagens antes de aplicarmos nossos métodos de análise. Para isso, precisamos do ângulo de inclinação (ou elipticidade) e do ângulo posição da galáxia em estudo. Partimos da hipótese de que o disco da galáxia é perfeitamente circular, ou de simetria axial, e “esticamos” a sua imagem de forma que a aparência elíptica de suas isofotas torne-se circular.

Na Figura 8 temos um exemplo de deprojeção com uma imagem da galáxia NGC 768 no filtro *g* sem as estrelas de campo.

Figura 8 – Exemplo de deprojeção da imagem de uma galáxia.



Fonte: O autor.

¹ Ver Seção 2.4 para definição deste termo.

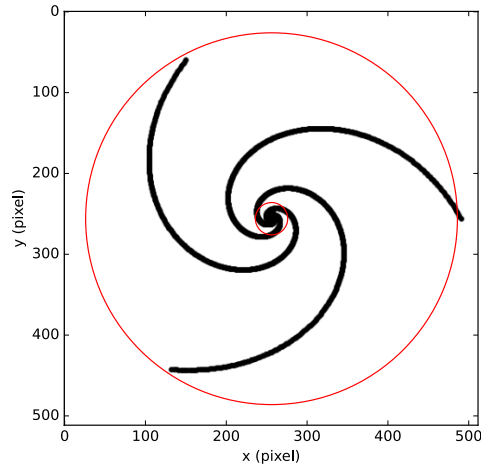
4 Métodos de Análise

Neste capítulo serão apresentados os métodos utilizados para análise das estruturas espirais. Cada método permite análises e informações diferentes sobre os padrões espirais. Utilizaremos o método da Transformada de Fourier unidimensional desenvolvido por [Puerari e Dottori \(1997\)](#) para analisarmos o comportamento relativo da OD e da frente de choque e determinarmos o raio de corotação. O método da Transformada de Fourier bidimensional foi utilizado para estudo morfológico da estrutura espiral, onde os espectros permitem determinar as componentes do padrão, bem como a sua importância. Além disso, conseguimos obter o *pitch angle* de cada modo.

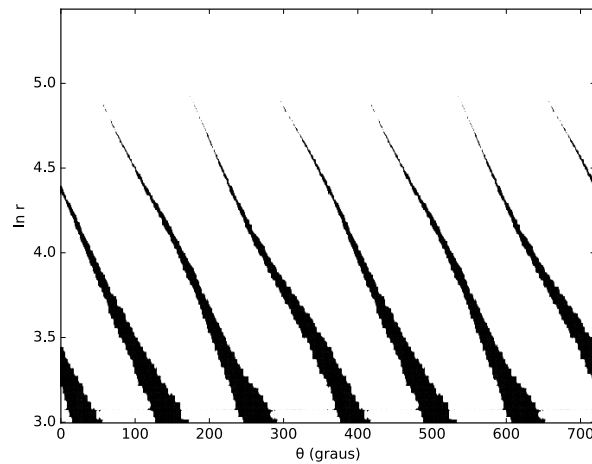
4.1 Diagrama $\ln r$ vs. θ

Como dito no Capítulo 2, as galáxias espirais têm braços aproximadamente logarítmicos, o que implica no fato do *pitch angle* α dos braços ser mais ou menos constante, independente do local onde seja medido. Portanto, para facilitar o estudo dos braços espirais, podemos modificar a distribuição de luminosidade da imagem da galáxia. Para que isso seja possível, representamos a imagem em outro sistema de coordenadas, onde os eixos são $\ln r$ e θ , o que permite retificar as espirais logarítmicas. Nesta mudança de coordenadas, medimos θ a partir da direção oeste da imagem e no sentido anti-horário. Com este diagrama é possível visualizar mais facilmente o grau de simetria e continuidade dos braços espirais; permite também visualizar a mudança da estrutura espiral e a variação do *pitch angle*, o que nos possibilita medir a extensão de cada um dos segmentos de *pitch angle* constante.

Figura 9 – Exemplo de um diagrama $\ln r$ vs. θ (9b) para uma espiral logarítmica de três braços (9a). As circunferências vermelhas indicam o raio mínimo e raio máximo. Isto é, será analisada a região da espiral compreendida entre estes raios.



(a)



(b)

Fonte: O autor.

Na Figura 9 apresentamos o gráfico $(\ln r, \theta)$ para a imagem de uma espiral logarítmica de três braços, como um exemplo. No caso de uma imagem de galáxia deprojetada, o resultado seria semelhante. Para uma galáxia com braços do tipo S teremos no diagrama as estruturas traçadas para a esquerda, como é o caso da Figura 9b, mas para galáxias do tipo Z, as estruturas estarão inclinadas para a direita.

Este diagrama também possibilita a obtenção do *pitch angle* de uma estrutura espiral. A partir da equação (2.4) obtemos a seguinte relação:

$$\tan \alpha = \frac{\ln\left(\frac{r_1}{r_2}\right)}{\theta_1 - \theta_2}, \quad (4.1)$$

onde os valores de r e θ (em radianos) são obtidos a partir da escolha de dois pontos da estrutura no diagrama $\ln r$ vs. θ . Nesta forma de medir o *pitch angle* podem haver indeterminações por conta dos ângulos serem medidos diretamente na imagem, mas essas incertezas podem ser estimadas fazendo algumas medidas do mesmo ângulo e calculando a dispersão desses valores ao redor de uma média.

4.2 Transformada de Fourier unidimensional

Suponha $f : \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{C}$ uma função que satisfaz as condições de integrabilidade. Definimos a Transformada de Fourier de $f(x)$ por:

$$\mathcal{F}[f(x)] = F(k) = \int_{-\infty}^{+\infty} f(x)e^{-ikx} dx. \quad (4.2)$$

Conhecendo $F(k)$, podemos recuperar $f(x)$ calculando a Transformada Inversa de Fourier, que é expressa por:

$$\mathcal{F}^{-1}[F(k)] = f(x) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} F(k)e^{ikx} dk. \quad (4.3)$$

[Puerari e Dottori \(1997\)](#) detectaram o ponto de inversão das fases relativas da OD (Θ_{od}) e da frente de choque (Θ_{fc}) por meio da Transformada de Fourier aplicada aos perfis azimutais $I_r(\theta)$, tendo como base o cenário descrito por [Roberts \(1969\)](#)¹. Este ponto de inversão indica o raio de corrotação. Nesse contexto, podemos escrever a Transformada de Fourier unidimensional como:

$$\mathcal{F}_m(r) = \int_{-\infty}^{+\infty} I_r(\theta)e^{-im\theta} d\theta, \quad (4.4)$$

onde m é o número de braços. Na prática, as integrais são calculadas a partir de um raio mínimo (selecionado para excluir o bojo onde não há informação dos braços) até um raio máximo (os limites externos dos braços em nossas imagens).

A fase Θ é obtida por meio da expressão²:

$$\Theta(r) = \arctan \frac{\Im[\mathcal{F}_m(r)]}{\Re[\mathcal{F}_m(r)]}, \quad (4.5)$$

onde \Re e \Im correspondem à parte real e imaginária dos coeficientes complexos de Fourier, respectivamente.

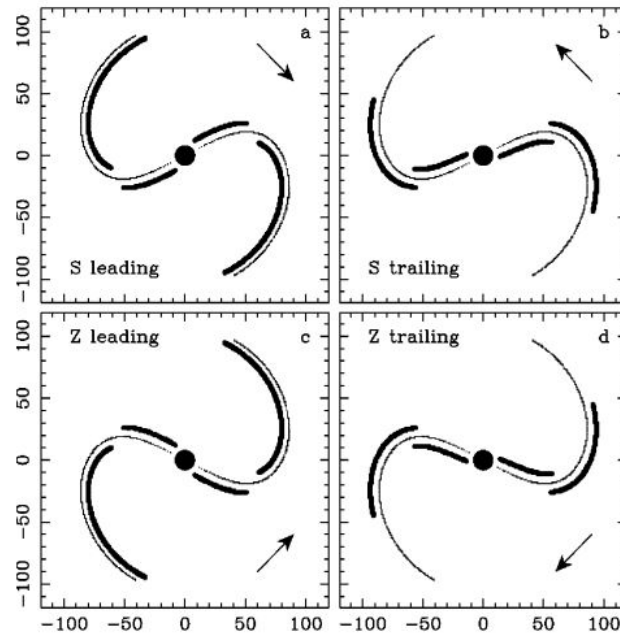
¹ Ver Seção 1.3.2.

² Em trabalhos como [Puerari e Dottori \(1997\)](#) e [Villamizar \(2001\)](#) o cálculo da fase foi apresentado com o argumento invertido, por engano, conforme comunicação privada com os autores. Ressaltamos que, matematicamente, a fase Θ deve ser calculada como está apresentada neste trabalho.

4.2.1 Diagrama de fase

A Figura 10 ilustra o comportamento relativo da frente de choque e da OD, para o caso de espirais de dois braços do tipo S e Z.

Figura 10 – Posição da frente de choque (linha grossa) com relação à OD (linha fina) para espirais do tipo S: (a) *leading* e (b) *trailing*; espirais do tipo Z: (c) *leading* e (d) *trailing*. Em cada painel as setas indicam o sentido de rotação do disco. Nota-se o deslocamento da frente de choque no raio de corotação (PUERARI; DOTTORI, 1997).

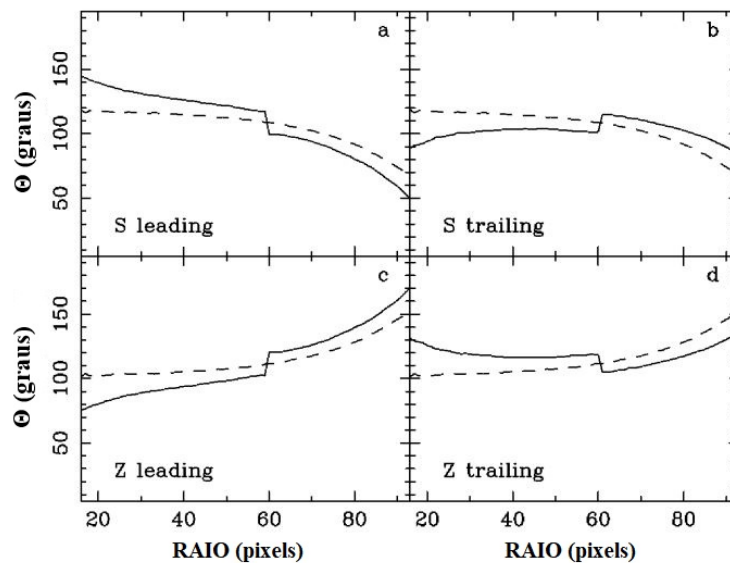


Fonte: Puerari e Dottori (1997).

Para obtermos o diagrama da Figura 10, a partir de imagens de uma galáxia, precisamos combinar duas imagens da galáxia em bandas diferentes: uma banda mais azul que mostre população estelar recente (frente de choque) e outra mais vermelha que mostre estrelas mais velhas (OD). A partir das equações (4.4) e (4.5) calculamos a fase Θ para cada imagem, isto é, Θ_{fc} e Θ_{od} .

Podemos plotar estas fases e assim, obter o diagrama de fase, o qual nos dá o comportamento relativo da Θ_{fc} e da Θ_{od} , como é apresentado na Figura 11.

Figura 11 – Comportamento relativo da fase $\Theta(r)$ da OD (linha tracejada) e da frente de choque (linha contínua) para os casos apresentados na Figura 10 (PUERARI; DOTTORI, 1997).



Fonte: Adaptado de Puerari e Dottori (1997).

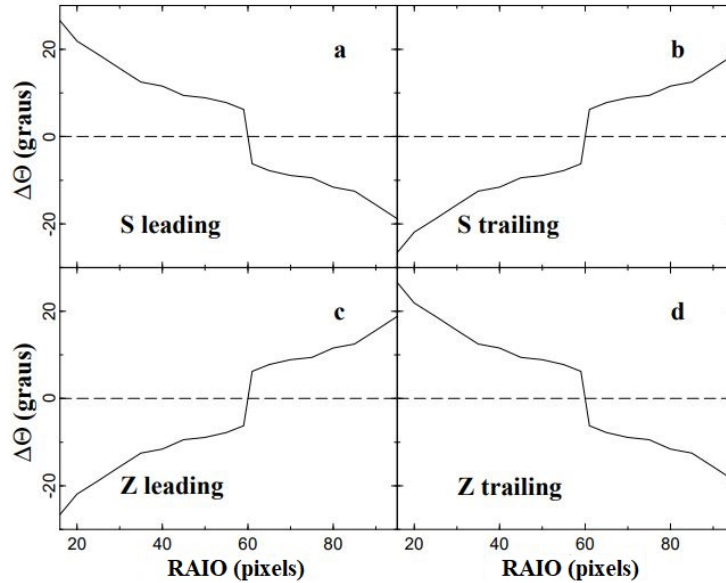
Por meio deste diagrama, o caráter *leading* ou *trailing* é facilmente identificado se soubermos o tipo da estrutura espiral (S ou Z). A informação mais interessante é o ponto de corte entre essas duas linhas, que indica o raio de corrotação.

Note que este diagrama é bem útil nos casos que a mudança de fase é suficientemente clara e detectável. No entanto, existem casos em que a variação é muito sutil, o que torna difícil a identificação do ponto de corrotação por meio deste diagrama. Nestes casos, é interessante utilizarmos o diagrama da diferença de fase.

4.2.2 Diagrama de diferença de fase

O comportamento da diferença de fase para as espirais de dois braços do tipo S e Z (mostradas na Figura 10) é apresentado na Figura 12.

Figura 12 – Diagrama de diferença de fase obtido a partir da Figura 11 (VILLAMIZAR, 2001).



Fonte: Adaptado de Villamizar (2001).

Para obtermos este diagrama, calculamos a diferença das fases obtidas nos dois filtros, isto é, $\Delta\Theta = \Theta_{fc} - \Theta_{od}$. Este diagrama também permite identificar o caráter *leading* ou *trailing* da estrutura espiral quando se conhece o tipo dos braços espirais (S ou Z).

4.3 Transformada de Fourier bidimensional

Analogamente, para uma função $f : \mathbb{R} \times \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{C}$, teremos:

$$\mathcal{F}[f(x,y)] = F(k,l) = \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} f(x,y) e^{-i(kx+ly)} dx dy \quad (4.6)$$

e

$$\mathcal{F}^{-1}[F(k,l)] = f(x,y) = \frac{1}{4\pi^2} \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} F(k,l) e^{i(kx+ly)} dk dl, \quad (4.7)$$

sendo a equação (4.6) a Transformada de Fourier bidimensional e (4.7) a Transformada Inversa de Fourier bidimensional.

Particularmente, para galáxias espirais é conveniente escrevermos a Transformada de Fourier em outro sistema de coordenadas, que seja função das coordenadas x e y utilizadas nas equações (4.6) e (4.7). Como visto na Seção 2.1, uma espiral logarítmica é definida em coordenadas polares pela equação (2.4).

Pela natureza da série de Fourier, ela pode representar somente funções periódicas com período T . Observamos a periodicidade da estrutura espiral a partir do digrama $\ln r$ vs. θ , verificando que os braços se repetem, periodicamente (Figura 9).

Deste modo, a distribuição de densidade contínua $I(u, \theta)$, a qual corresponde à matriz discreta $I(u_k, \theta_l)$, pode ser expandida em série de Fourier no ângulo azimutal θ e numa integral sobre o logaritmo do raio u . Portanto, temos:

$$I(u, \theta) = \frac{1}{2\pi} \sum_{m=0}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} A(p, m) e^{i(pu+m\theta)} dp \quad (4.8)$$

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 espirais³. 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* $\alpha = \arctan\left(-\frac{m}{p}\right)$. As componentes com p positivo têm o enrolamento do braço no tipo S, isto é, o padrão espiral está enrolado no sentido horário; as que têm p negativo possuem padrão espiral tipo Z (braços estão enrolados no sentido anti-horário); e aquelas com $p = 0$ não apresentam forma espiral, mas forma de barra.

Podemos obter o coeficiente de Fourier $A(p, m)$ fazendo a transformada de Fourier em $I(u, \theta)$, de modo que:

$$\begin{aligned} A(p, m) &= \frac{1}{\sum_{k'=1}^{m'} \sum_{l'=1}^{n'} w_{k'l'}} \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\pi}^{+\pi} \sum_{k'=1}^{m'} \sum_{l'=1}^{n'} w_{k'l'} \delta(u - u_{k'l'}) \delta(\theta - \theta_{k'l'}) e^{-i(pu+m\theta)} dud\theta \\ &= \frac{1}{\sum_{k'=1}^{m'} \sum_{l'=1}^{n'} w_{k'l'}} \sum_{k'=1}^{m'} \sum_{l'=1}^{n'} w_{k'l'} e^{-i(pu+m\theta)}, \end{aligned} \quad (4.9)$$

onde w_{kl} é o peso do ponto (k, l) que está localizado nas coordenadas (r_{kl}, θ_{kl}) e $u_{kl} = \ln(r_{kl})$. Assim como na Transformada de Fourier unidimensional (ver Seção 4.2) as integrais são calculadas a partir de um raio mínimo até um raio máximo. Para obtenção da matriz $A(p_i, m)$ foi utilizado o algoritmo da Transformada Rápida de Fourier (*Fast Fourier Transform - FFT*)⁴. O algoritmo da FFT estabelece limites na resolução máxima espectral e no intervalo espectral. Utilizamos uma base com 6 espirais logarítmicas com o número de onda azimutal (ou número de braços) no intervalo $0 \leq m \leq 6$ e o número de onda radial no intervalo $-50 \leq p \leq 50$ com $\Delta m = 1$ e $\Delta p = 0.25$ ⁵. O valor de Δp nos fornece a precisão na qual está sendo medido um determinado pico no espectro de frequências. Sendo m o número de braços, chamamos de componente ou modo cada m . Neste contexto, a galáxia será uma soma de componentes m , uma das quais será a componente dominante, isto é, a componente

³ Ver Seções 2.1, 2.2 e 2.3 para definição destes termos.

⁴ Esta rotina faz parte de uma série de algoritmos apresentados no livro *Numerical Recipes in C* (PRESS et al., 1992). Ela só pode ser aplicada em dados igualmente espaçados com a limitação de que os valores de M e N (dimensões da matriz que contém a distribuição de intensidades em coordenadas (u, θ)) devem ser uma potência de 2.

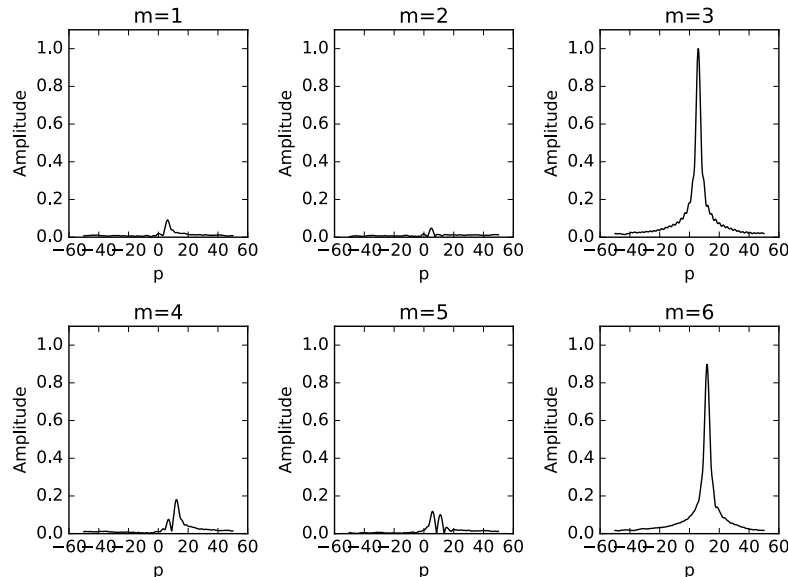
⁵ Os limites no intervalo de p foram estabelecidos levando em consideração o fato de não serem observados braços espirais com um grau de enrolamento fora deste intervalo. Por exemplo, para uma espiral de dois braços ($m = 2$) com um valor de $p = 50$, teríamos $|\alpha| \approx 2.2^\circ$.

em que o pico de amplitude é o mais alto no espectro de Fourier. Esta nomenclatura é comumente utilizada na área.

Quando se decompõe uma função com o método da Transformada de Fourier, o espectro de Fourier da componente mais relevante é normalizada para ter amplitude igual a 1 para a frequência principal ($-m/p$), e os demais espectros são normalizados com relação a ela. Os espectros de Fourier podem apresentar harmônicos da frequência principal, o que é comum, mas eles não representam propriedades físicas reais da estrutura espiral. Estes harmônicos que aparecem possuem frequências que são múltiplos da frequência principal, como $-2m/2p$, $-3m/3p...$ além disso, os harmônicos têm amplitude menor do que a componente dominante. Na prática, se a componente dominante indica uma estrutura espiral de dois braços ($m = 2$) com um pico de amplitude em um certo valor de p , poderemos ter um harmônico na componente $m = 4$ localizado em $2p$. Vale ressaltar que os harmônicos têm o valor do *pitch angle* idêntico ao da componente dominante, ou seja, há um critério que ajuda a reconhecê-los.

Como exemplo, apresentamos na Figura 13 o espectro de Fourier (com $1 \leq m \leq 6$, $-50 \leq p \leq 50$ com $\Delta m = 1$ e $\Delta p = 0.25$) para uma espiral logarítmica de 3 braços (Figura 9a) que tem como expressão $\ln(r) = -\frac{3}{6}\theta$.

Figura 13 – Espectro $|A(p, m)|$ de uma espiral matemática de 3 braços (Figura 9a). Vemos a componente dominante, $m = 3$ e o harmônico em $m = 6$.



Fonte: O autor.

Note que o pico maior está localizado no modo $m = 3$, indicando que esta é a componente dominante da estrutura espiral. Temos para esse pico, $p = 6$, isto é, o sinal positivo condiz com o enrolamento do tipo S. O outro pico encontrado em $m = 6$ é um harmônico do pico em $m = 3$

pois tem uma amplitude menor, está localizado em $p = 12$ e, ambos apresentam $\alpha = -26.56^\circ$, concordando com as relações mencionadas acima.

Podemos reconstituir a imagem da galáxia fazendo a Transformada inversa das funções complexas $A(p, m)$. Assim, a densidade superficial (função complexa) é calculada através da equação:

$$S(u, \theta) = \sum_m S_m(u) e^{im\theta} \quad (4.10)$$

onde

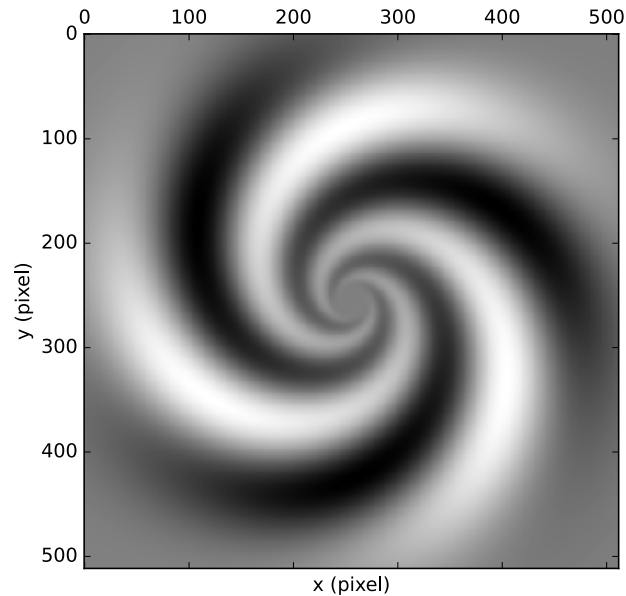
$$S_m(u) = \frac{\sum_{k'=1}^{m'} \sum_{l'=1}^{n'} w_{k'l'}}{e^{2u} 4\pi^2} \int_{-\infty}^{+\infty} G_m(p) A(p, m) e^{ipu} dp \quad (4.11)$$

e

$$G_m(p) = e^{-\frac{1}{2} \left[\left(\frac{p-p_{max}}{5} \right)^2 \right]} \quad (4.12)$$

sendo p_{max} o valor de p no qual o espectro é o máximo em amplitude para determinado m . A expressão 4.12 representa uma filtragem das altas frequências que suavizam os espectros $A(p, m)$ (fazer com que os valores tendam a zero) nos limites do nosso intervalo $-50 \leq p \leq 50$. Esta condição é necessária para que possamos integrar a equação (4.11) neste intervalo de p . A partir das equações (4.10) e (4.11) é possível obtermos muitos resultados úteis para análise da estrutura espiral. Por exemplo, a função de densidade radial, $S_m(u)$, (equação (4.11)) independe de θ e corresponde à distribuição de densidade radial de intensidade para qualquer componente m . Quando recuperamos a função $S_m(u) e^{im\theta}$ para uma determinada componente m obtemos a transformada inversa correspondente.

Figura 14 – Imagem da Transformada inversa da espiral logarítmica de 3 braços (Figura 9a) para $m = 3$. Note que recuperamos apenas a componente dominante. A espiral recuperada está destacada em preto na imagem.



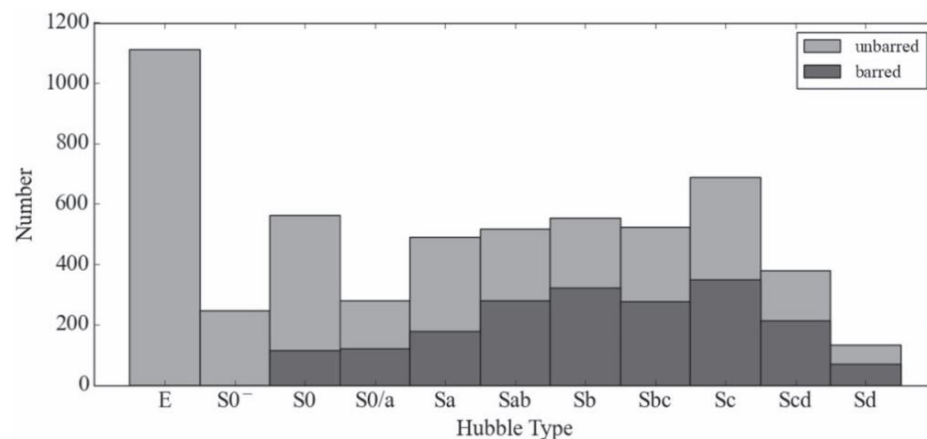
Fonte: O autor.

Um dos pontos fortes deste método é que podemos obter e ilustrar as componentes individuais da transformada inversa (como na Figura 14) ou somar as componentes dominantes. Sendo assim, através da Transformada de Fourier bidimensional podemos visualizar e estudar as componentes da estrutura espiral, estabelecer a importância das mesmas e ainda, conhecer seu comportamento ao longo do disco.

5 Amostra de galáxias espirais

Em Yu e Ho (2020) foi realizado um estudo com uma amostra de 5490 galáxias, sendo 1112 elípticas e 4378 galáxias de disco: 809 lenticulares e 3569 galáxias espirais (a distribuição do tipo Hubble para a amostra completa é apresentada na Figura 15). Para definir essa amostra, foram selecionadas galáxias próximas retiradas do catálogo *NASA Sloan Atlas* (NSA) com $0.005 \leq z \leq 0.03$ e magnitude em banda r mais brilhante que 14.5; e foram incluídas galáxias do *extended GALEX Arcibo SDSS Survey* (xGASS) sem restrição no *redshift* ou magnitude, embora todas as galáxias xGASS estejam dentro de $z = 0.05$.

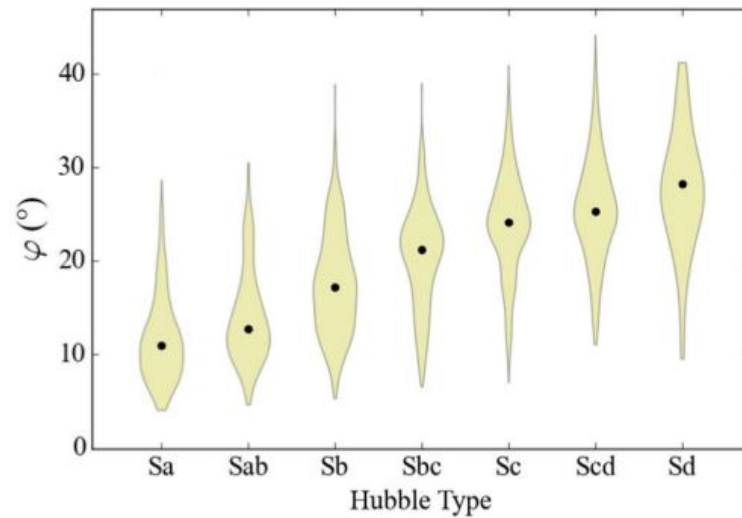
Figura 15 – Distribuição do tipo Hubble para a amostra completa de 5490 galáxias. Galáxias barradas e não barradas são marcadas em preto e cinza, respectivamente (YU; HO, 2020).



Fonte: Yu e Ho (2020).

Ainda sobre (YU; HO, 2020), foram analisadas as 3569 galáxias espirais mencionadas, onde a partir das componentes de Fourier unidimensional foram caracterizados os braços espirais e a sua força; e com a decomposição de Fourier bidimensional foi calculado o *pitch angle* dos braços espirais. Na Figura 16 podemos observar a variação e a dependência do *pitch angle* ao longo da sequência de Hubble para as galáxias espirais do referido trabalho.

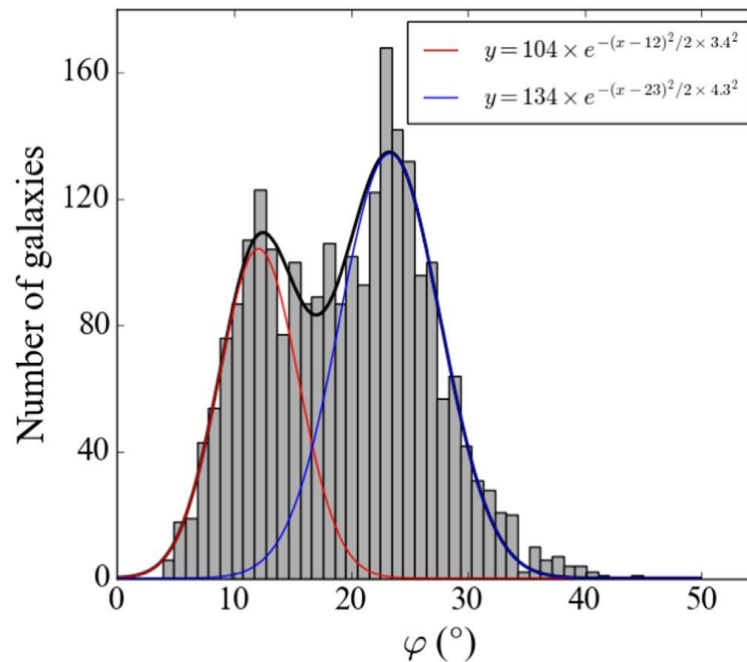
Figura 16 – Variação e dependência do *pitch angle* ao longo da sequência de Hubble. Neste gráfico, o *pitch angle* está denotado como φ . Os pontos pretos representam a mediana do *pitch angle* para cada tipo Hubble (YU; HO, 2020).



Fonte: Yu e Ho (2020).

A partir do *pitch angle* dos braços espirais, os autores obtiveram uma distribuição bimodal que pode ser descrita por duas gaussianas, uma com média e desvio padrão de $\alpha = 12^\circ \pm 3.4^\circ$ e a outra com $\alpha = 23^\circ \pm 4.3^\circ$ (Figura 17).

Figura 17 – Distribuição bimodal do *pitch angle* das galáxias analisadas. As curvas vermelha e azul marcam as duas funções gaussianas mais bem ajustadas. Neste gráfico, o *pitch angle* está denotado como φ .



Fonte: Yu e Ho (2020).

Neste contexto, considerando os valores de *pitch angle* conforme a distribuição bimodal

obtida por Yu e Ho (2020), a aparência e número de braços, a disponibilidade de dados e imagens, selecionamos três galáxias espirais: IC 4566, NGC 768 e IC 1256 e utilizamos imagens delas nas bandas g (verde), r (vermelho) e z (infravermelho próximo) retiradas do *DESI Legacy Survey*¹. Essas imagens são de $138.2 \times 138.2 \text{ arcsec}^2$, considerando uma escala de $0.27 \text{ arcsec pixel}^{-2}$.

Tabela 1 – Propriedades das galáxias selecionadas.

Galáxia	Tipo ^a	PA ^a	e^a	m^a	$ \alpha ^a$	RA; Dec. [Deg] ^b	V. radial [km/s] ^b
IC 4566	Sb	153°	0.31	2	$16.2^\circ \pm 1.2$	234.176; 43.539	5565.947 ± 2.098
NGC 768	Sc	25°	0.53	2	$17.5^\circ \pm 1.3$	29.670; 0.529	6979.169 ± 2.698
IC 1256	Sb	93°	0.37	2	$23.5^\circ \pm 3.7$	260.947; 26.486	4734.923 ± 0.599

Nota. Coluna 1: nome da galáxia. Coluna 2: tipo morfológico da galáxia segundo a classificação Hubble. Coluna 3: ângulo de posição. Coluna 4: elipticidade. Coluna 5: modo utilizado para calcular o *pitch angle*. Coluna 6: *pitch angle* do braço espiral. Coluna 7: ascensão reta e declinação. Coluna 8: velocidade radial.

^a Yu e Ho (2019).

^b NED: NASA/IPAC Extragalactic Database. Operado por Jet Propulsion Laboratory (JPL), California Institute of Technology (CALTECH), sob contrato com a NASA.

Fonte: Dados compilados das referências mencionadas em cada coluna.

¹ O DESI Legacy Imaging Survey (DR9) compila dados ópticos em 3 bandas (g , r e z), em conjunto com o imageamento em infravermelho do Wide-field Infrared Survey Explorer (WISE) (MEISNER et al., 2019). É obtido usando três telescópios: DECam Legacy Survey (DECaLS), Beijing-Arizona Sky Survey (BASS) e Mayall z-band Legacy Survey (MzLS) (DEY; SCHLEGEL; LANG, 2019).

6 Programas em PYTHON

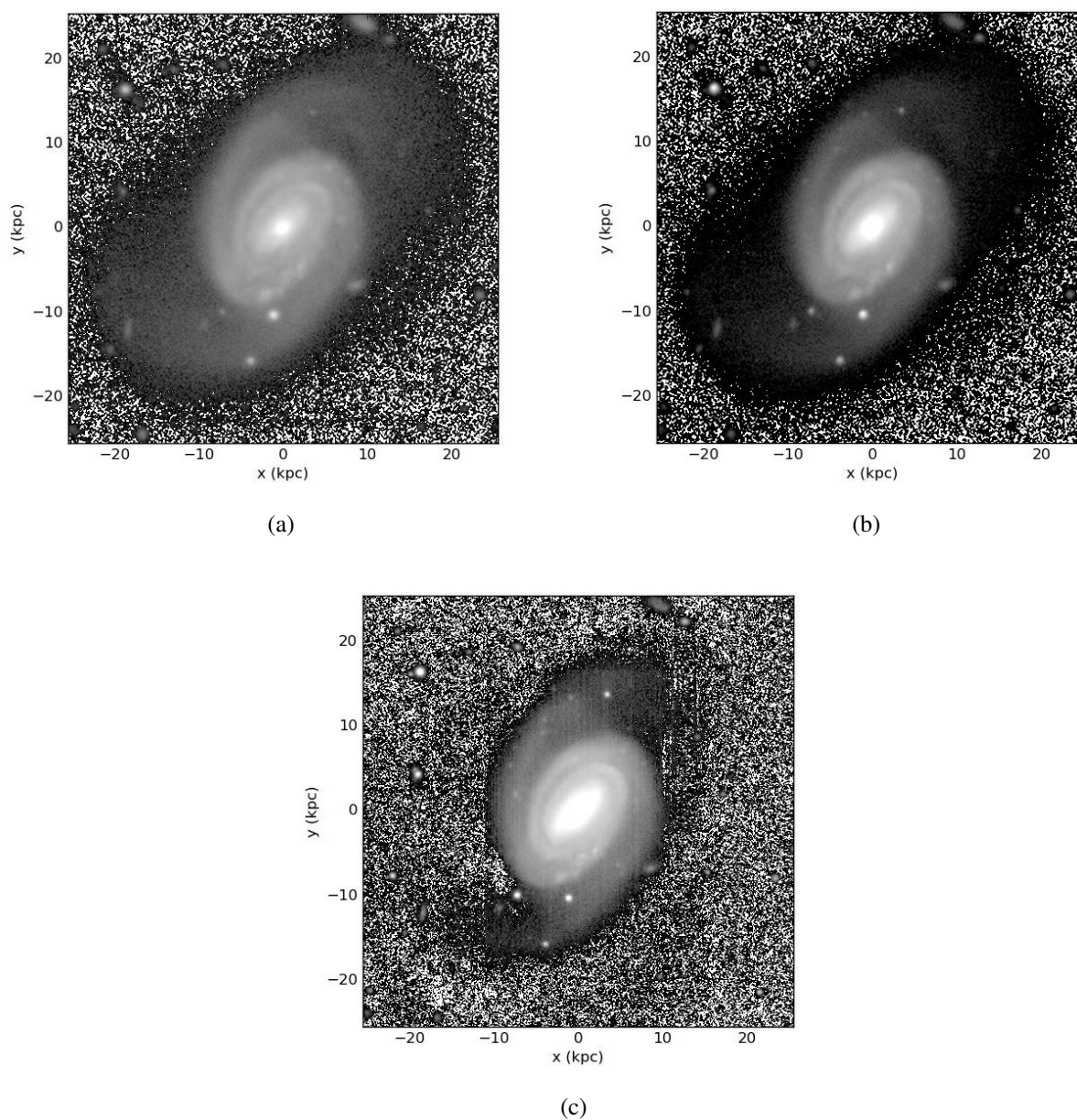
Para realização deste estudo foram criados programas em PYTHON para desenvolver as seguintes tarefas:

- **Deprojeção das imagens** - como entrada no programa precisamos inserir a imagem da galáxia e algumas informações como sua dimensão e centro, e parâmetros como o PA , a distância da galáxia e (para apresentação em unidades de kpc) a razão b/a dos eixos da galáxia;
- **Diagrama $\ln r$ vs. θ** - os dados de entrada são a matriz da imagem deprojetada, a distância da galáxia, sua dimensão, centro, raio mínimo e raio máximo;
- **Transformada de Fourier 2D** - como entrada, é necessário a matriz da imagem deprojetada, sua dimensão, centro, raio mínimo e raio máximo;
- **Transformada inversa de Fourier 2D** - para o cálculo da inversa precisamos dos valores obtidos na TF2D e inserir a distância da galáxia, a dimensão da imagem, centro, raio mínimo, raio máximo e qual componente gostaríamos de recuperar (1, 2, 3, 4, 5 ou 6).
- **Transformada de Fourier 1D** - os dados necessários de entrada são a matriz da imagem deprojetada, a distância da galáxia, sua dimensão, centro, raio mínimo e raio máximo.

7 Galáxia IC 4566

IC 4566 é uma galáxia espiral *grand design* do tipo Sb localizada na constelação de Bootes, com uma inclinação $\beta \approx 46.37^\circ$ e $PA = 153^\circ$. A partir da velocidade radial $v = 5565 \text{ km s}^{-1}$ determinamos sua distância como $d = 76.23 \text{ Mpc}$, considerando $H_0 = 73 \text{ km s}^{-1} \text{ Mpc}^{-1}$ (WONG et al., 2020).

Figura 18 – Imagens da galáxia IC 4566 nos filtros g , r e z , respectivamente.

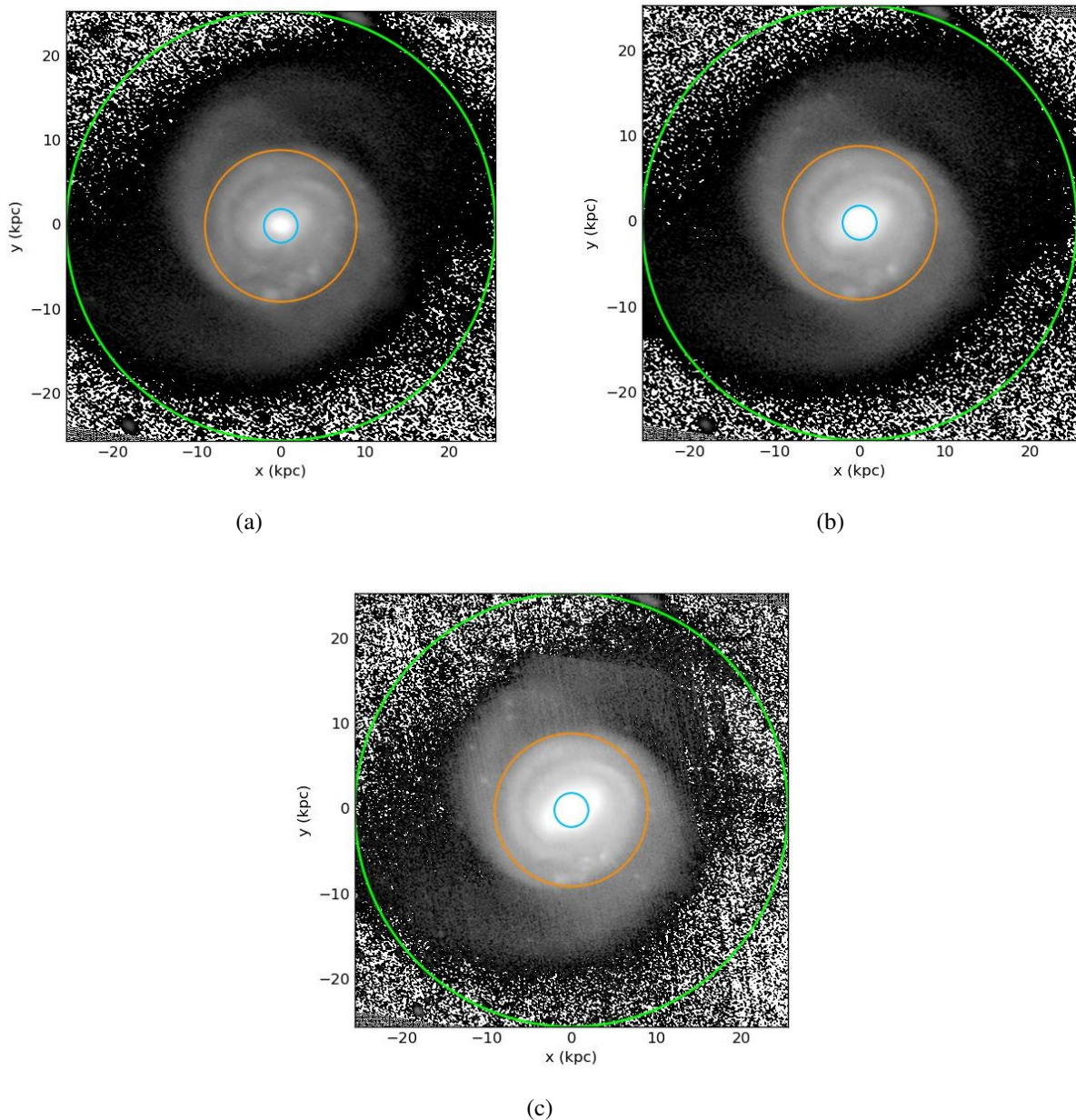


Fonte: O autor.

7.1 Imagens

Como descrito no Capítulo 3, realizamos a subtração das estrelas de campo e a deprojeção das imagens nas bandas g , r e z (Figura 19).

Figura 19 – Imagem da galáxia IC 4566 sem as estrelas de campo e deprojetada nos filtros g , r e z , respectivamente. O círculo em azul indica o raio mínimo da análise da TF1D; o círculo laranja indica o raio mínimo da análise da TF2D e o verde indica o raio máximo em ambos os métodos.

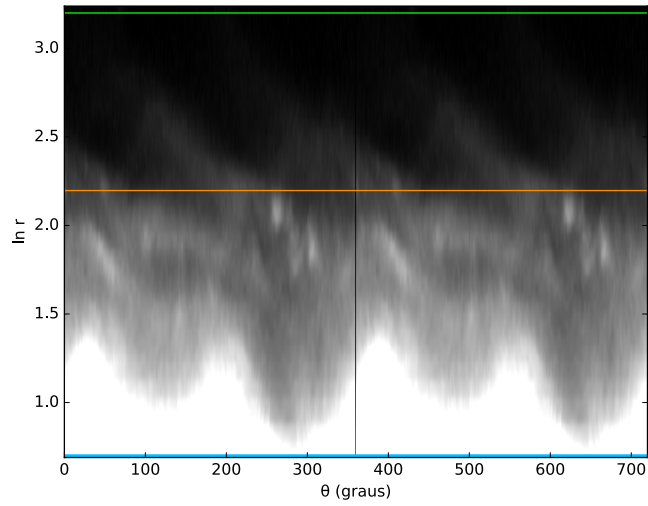


Fonte: O autor.

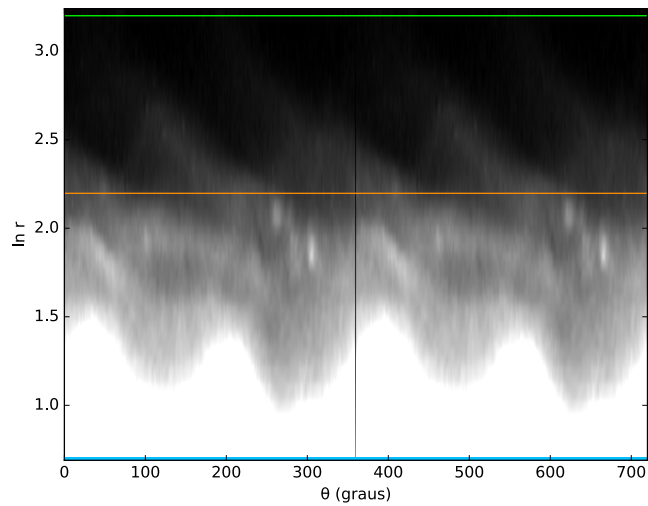
Podemos notar que esta galáxia possui dois longos braços simétricos que dominam o disco.

A partir do diagrama $\ln r$ vs. θ conseguimos retificar estes braços de modo a evidenciar o grau de simetria, a extensão e a continuidade da estrutura espiral (Figura 20).

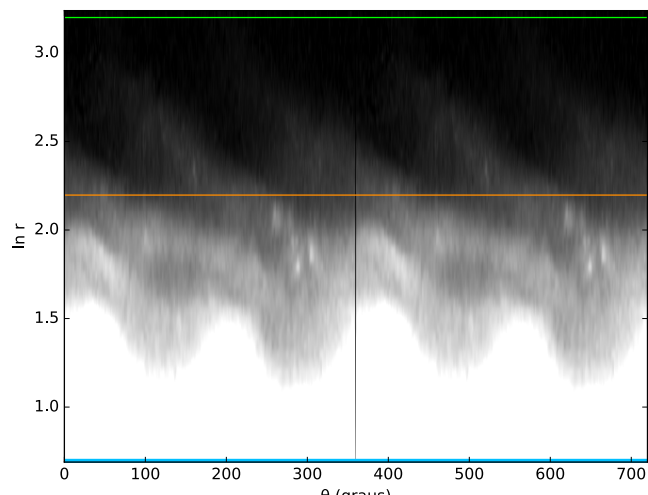
Figura 20 – Diagrama $\ln r$ vs. θ da galáxia IC 4566 nos filtros g , r e z , respectivamente. O valor de θ se estende de 0° a 720° , evidenciando a continuidade da estrutura espiral. A linha azul indica o raio mínimo da análise da TF1D; a linha laranja indica o raio mínimo da análise da TF2D e a verde indica o raio máximo em ambos os métodos.



(a)



(b)



A Figura 20 nos apresenta a imagem g , r e z de IC 4566 em um diagrama $\ln r$ vs. θ . Com este diagrama podemos observar que temos a presença de uma barra que se estende até, aproximadamente, 5 kpc (que seria em torno de 1.6 no eixo y do diagrama). Note que a estrutura espiral bissimétrica se inicia no extremo da barra e vai até $\approx 20 \text{ kpc}$ (em torno de 3.0 no eixo y do diagrama).

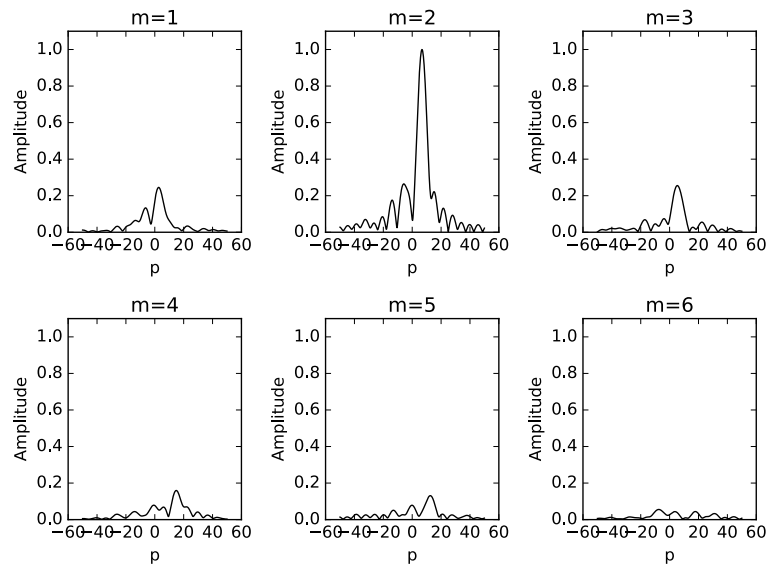
7.2 Transformada de Fourier bidimensional

A Transformada de Fourier bidimensional em IC 4566 nas bandas g (Figura 19a), r (Figura 19b) e z (Figura 19c) foi calculada em um intervalo de raio de 9.0 kpc até 25.5 kpc . Como dito anteriormente, podemos notar a presença de uma barra nesta galáxia que se estende, até $\approx 5 \text{ kpc}$. Por este motivo, nossa análise da TF2D foi realizada nesta região, isto é, fugindo da região que contém a barra e indo até o final da imagem.

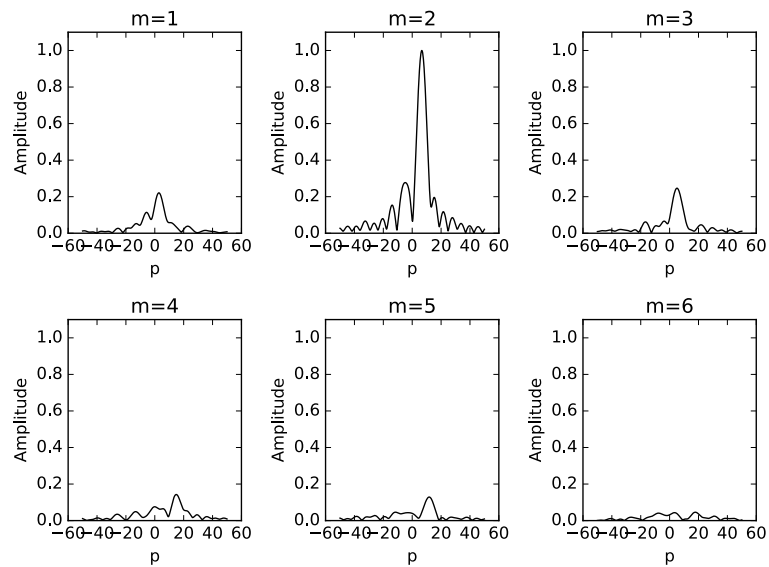
Os espectros de Fourier, apresentados na Figura 21, mostram que a componente $m = 2$ é a dominante nas imagens (Figura 21a), r (Figura 21b) e z (Figura 21c), e as demais componentes apresentam menor contribuição. Os valores obtidos em cada banda se assemelham, apresentando poucas variações. O enrolamento dos braços espirais em IC 4566 é do tipo S, e para este tipo de espiral os valores de p que descrevem tal estrutura devem ser positivos¹, e os picos que aparecem em valores de p negativos correspondem a modulações, as quais aparecem, geralmente, quando os braços possuem algum tipo de assimetria.

¹ Ver Seção 4.3 para esclarecimento.

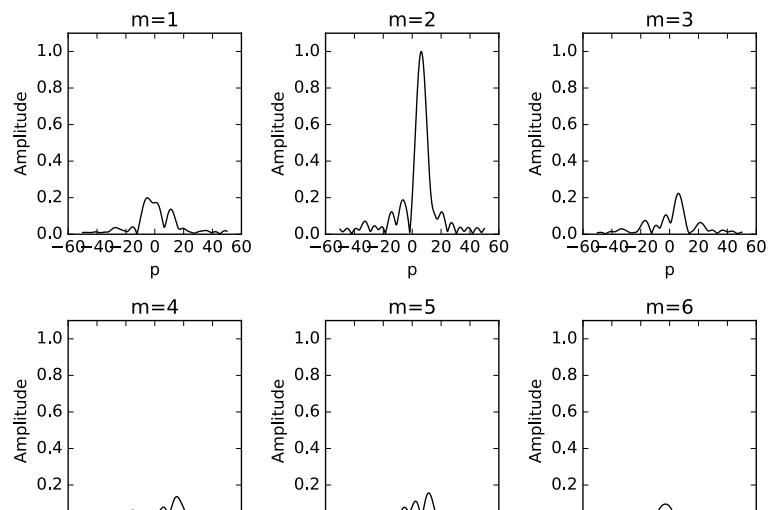
Figura 21 – Coeficientes $A(p, m)$ da Transformada bidimensional de Fourier na imagem g, r e z da galáxia IC 4566, obtidos conforme processo apresentado na Seção 4.3.



(a)



(b)



A Tabela 2 apresenta os valores dos maiores picos no espectro de Fourier. Note que não são identificados harmônicos da componente dominante em nenhuma imagem e que, aparentemente, $m = 6$ é uma modulação ou algum tipo de ruído, tendo pico com uma amplitude baixa. Ao calcularmos a média dos valores obtidos para o *pitch angle* nas bandas g , r e z em $m = 2$ (componente dominante), temos que $|\alpha| \approx 16.9^\circ$, o que condiz com o valor obtido em Yu e Ho (2019), exibido na Tabela 1.

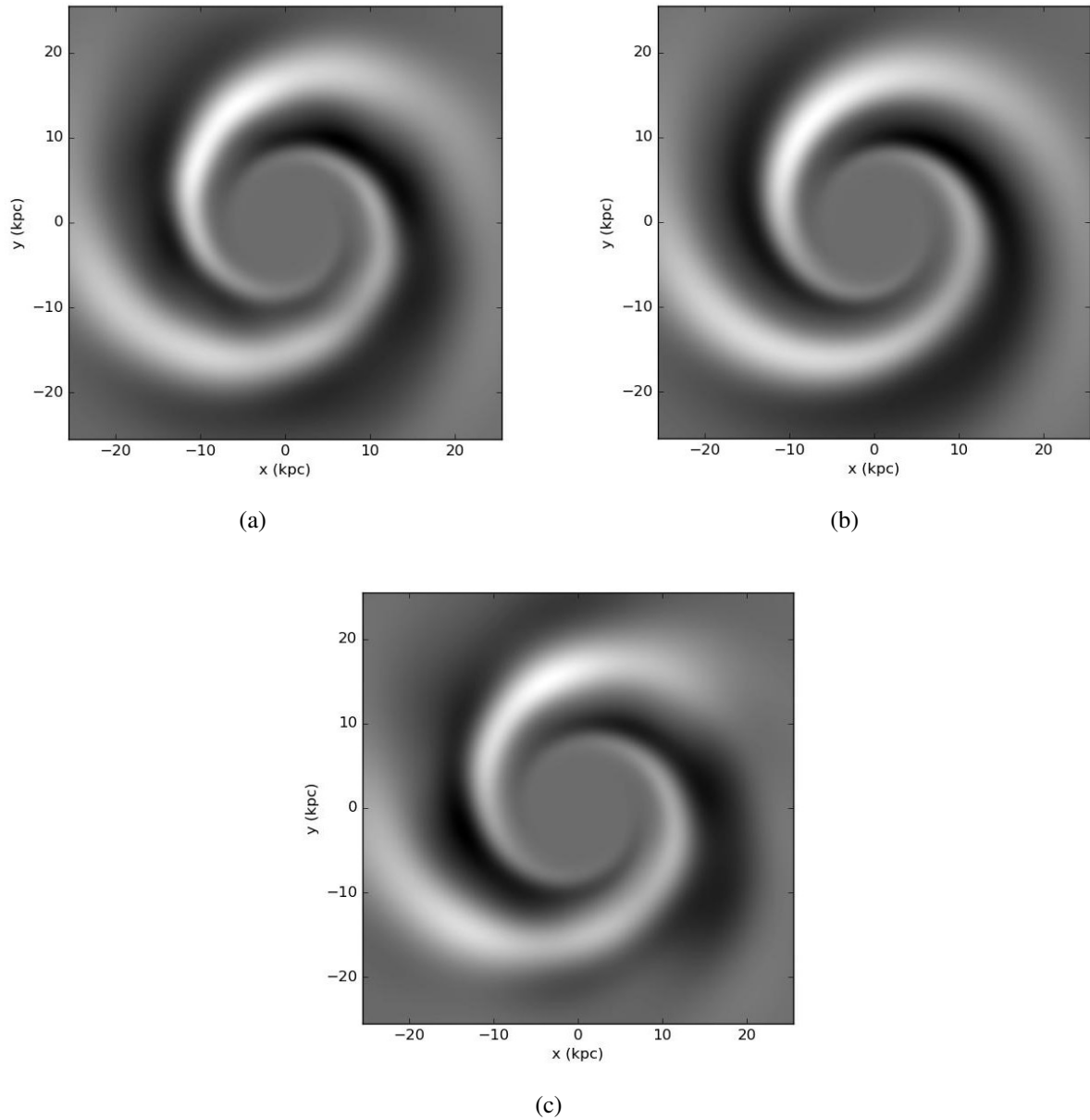
Tabela 2 – Alguns valores obtidos no espectro de Fourier para IC 4566.

Banda	m	p	Amplitude	α
g	2	6.75	1.00	-16.50
	4	14.75	0.16	-15.17
	6	-7.5	0.05	38.66
r	2	6.75	1.00	-16.50
	4	14.75	0.14	-15.17
	6	17.75	0.04	-18.68
z	2	6.25	1.00	-17.74
	4	15.25	0.14	-14.70
	6	-3.0	0.09	63.43

Fonte: O autor.

A Figura 22 contém as imagens das Transformadas inversas de Fourier da IC 4566 nas bandas g (Figura 22a), r (Figura 22b) e z (Figura 22c) calculadas com a soma das componentes $m = 1, 2, 3, 4, 5$ e 6 . Nas três imagens é possível observar a simetria e extensão dos dois braços espirais, mas na banda z notamos uma maior intensidade nos braços quando comparado com as imagens em g e r .

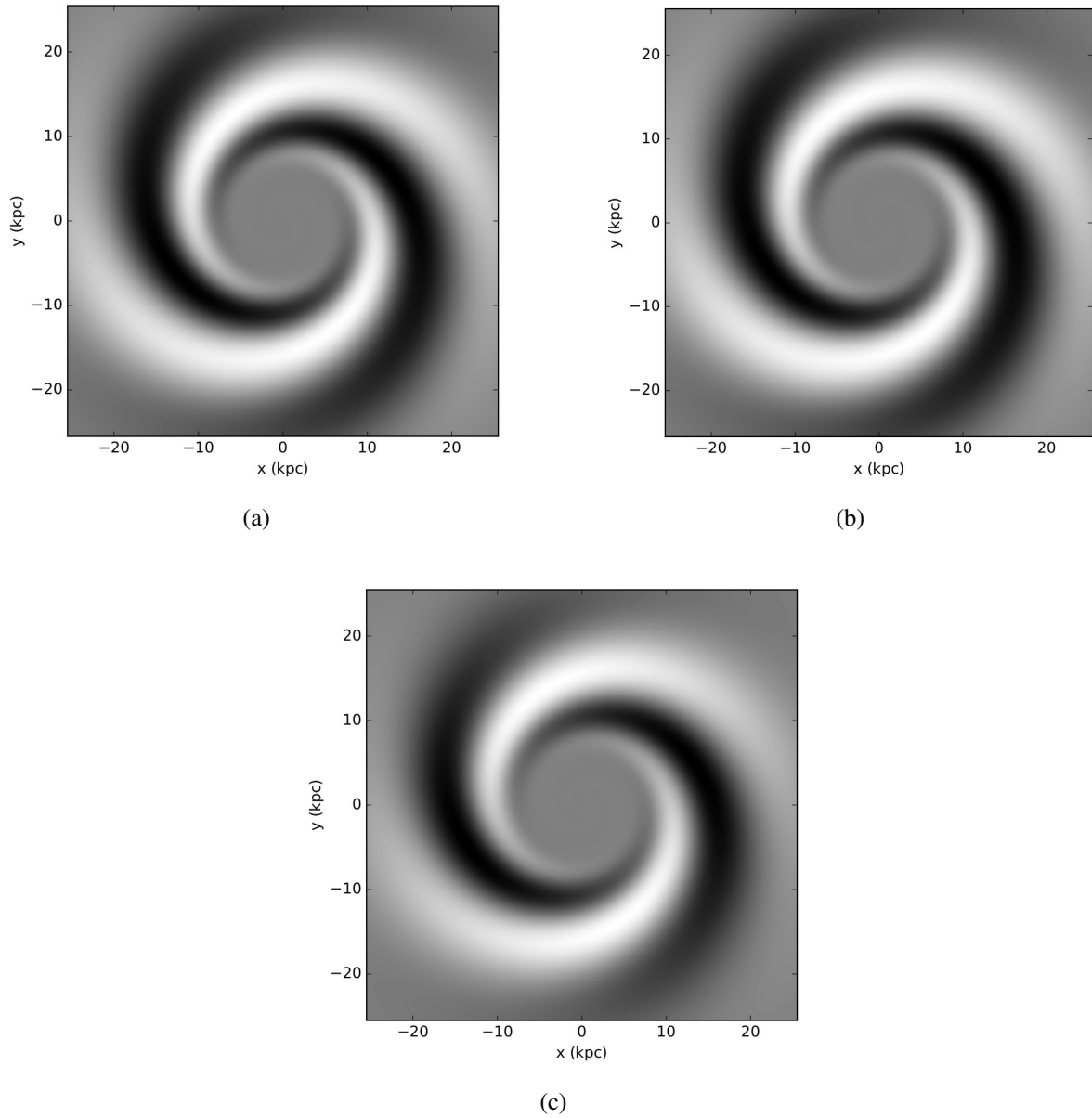
Figura 22 – Imagens das Transformadas inversas de IC 4566 para as componentes $m = 1, 2, 3, 4, 5$ e 6 nas imagens g, r e z , respectivamente. Note que a espiral recuperada está destacada em branco nas imagens.



Fonte: O autor.

A Figura 23 contém as imagens das Transformadas inversas de Fourier de IC 4566 nas bandas g (Figura 23a), r (Figura 23b) e z (Figura 23c) calculadas para a componente dominante $m = 2$.

Figura 23 – Imagens das Transformadas inversas de IC 4566 para a componente $m = 2$ nas imagens g , r e z , respectivamente. Note que a espiral recuperada está destacada em branco nas imagens.



Fonte: O autor.

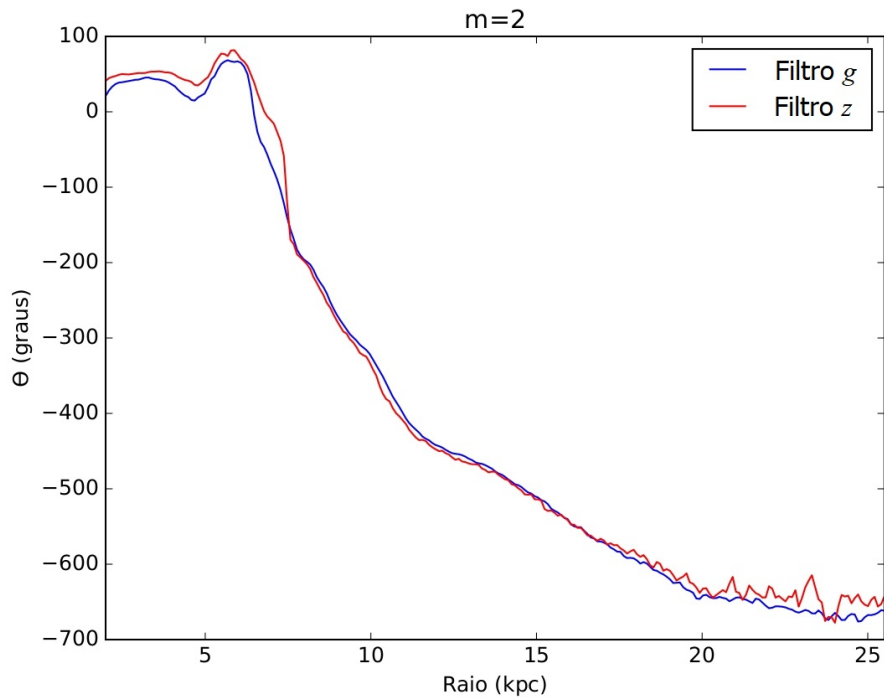
Comparando as Figuras 22 e 23, note que, embora a estrutura bissimétrica dos braços tenha sido recuperada nitidamente somente com a componente $m = 2$, as demais componentes fazem falta para reproduzir detalhes da galáxia.

7.3 Transformada de Fourier unidimensional

Com o intuito de determinar a ressonância de corrotação em IC 4566 foi aplicada a Transformada de Fourier unidimensional nas bandas g (Figura 19a) e z (Figura 19c) em um intervalo de raio de 2.0 kpc até 25.5 kpc (analisando desde a parte central da galáxia), conforme processo descrito na Seção 4.2.

Para obtermos o diagrama de fase da IC 4566 (Figura 24) consideramos as imagens da galáxia nos filtros g (evidencia população estelar recente) e z (evidencia estrelas mais velhas). A partir das equações (4.4) e (4.5) calculamos a fase Θ para cada imagem, isto é, Θ da imagem g como sendo Θ_{fc} e Θ da imagem z como Θ_{od} .

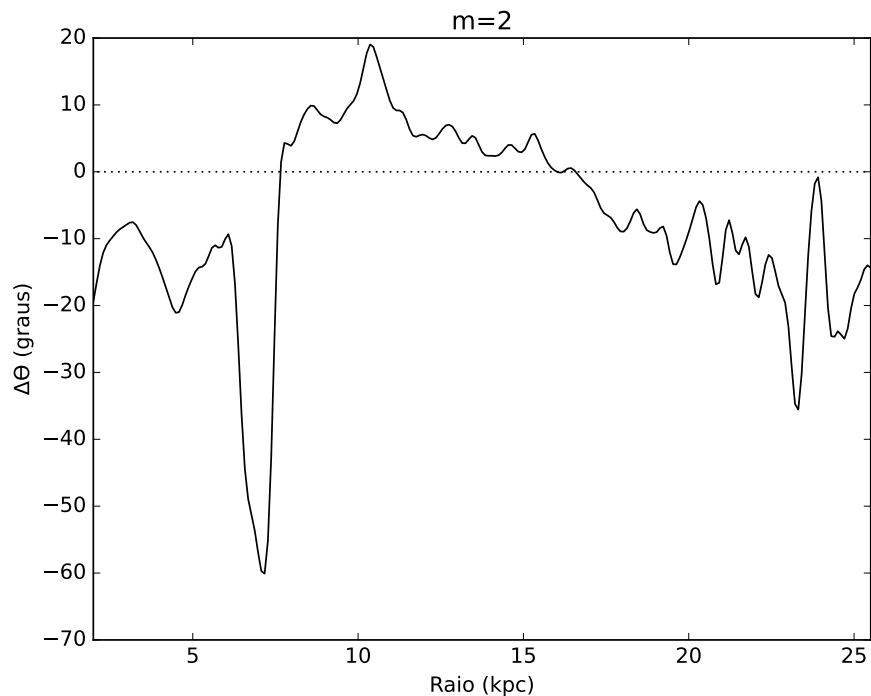
Figura 24 – Diagrama de fase da galáxia IC 4566 para $m = 2$ obtido a partir das imagens deprojetadas nos filtros g e z .



Fonte: O autor.

Ao analisarmos o diagrama de fase (Figura 24) conseguimos notar que há alguns pontos de cortes entre a linha azul (filtro g) e a linha vermelha (filtro z). Como dito anteriormente, estes cortes indicam a presença de raio de corrotação. Para evidenciar e determinar estes pontos, utilizamos o diagrama de diferença de fase, o qual foi obtido a partir da diferença de fase nos filtros g e z , isto é, $\Delta\Theta = \Theta_{fc} - \Theta_{od}$ (Figura 25).

Figura 25 – Diagrama de diferença de fase da galáxia IC 4566 para $m = 2$ obtido a partir das fases nos filtros g e z (Figura 24).

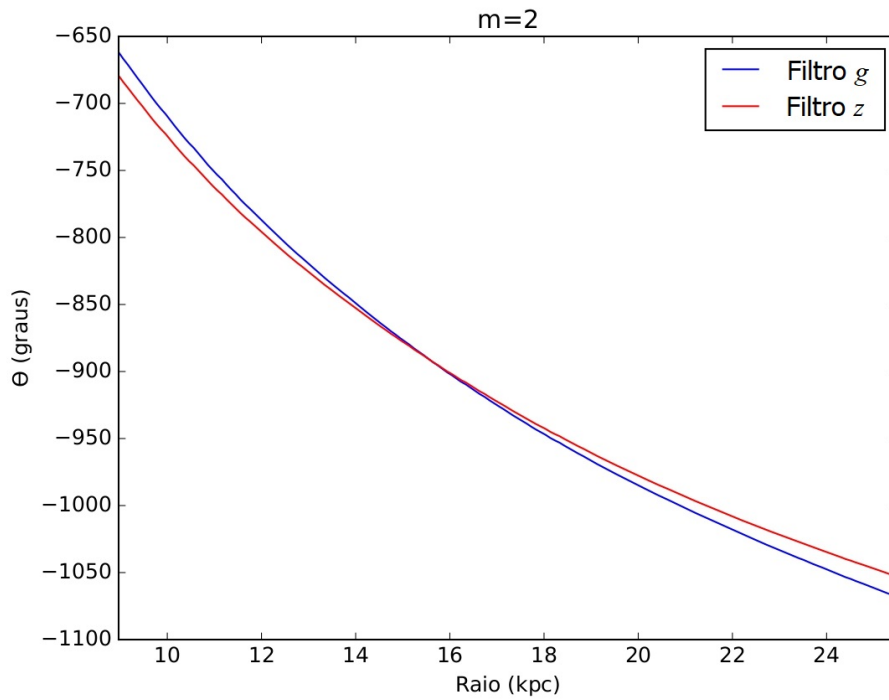


Fonte: O autor.

O diagrama de diferença de fase (Figura 25) aponta dois raios de corrotação, aproximadamente, em 7.8 kpc e 16 kpc . Por conta do ruído, possíveis cortes em raios menores que 5 kpc e em raios maiores que 20 kpc podem ser descartados da análise. Comparando estes dois diagramas (Figuras 24 e 25) com as Figuras 11 e 12, vemos que em torno do raio de corrotação menor, o caráter do padrão espiral é do tipo *trailing* e em torno do outro, o caráter é *leading*.

Até então, com estas imagens, temos dois possíveis raios de corrotação. Diante deste cenário, iremos proceder como em Villamizar (2001) e incluir mais um caso em nossa análise a fim de determinar o raio de corrotação e o caráter do padrão corretamente, já que espera-se que estas informações sejam as mesmas através de ambos os modos. Assim, iremos aplicar o método nas imagens das Transformadas inversas de Fourier para $m = 2$, as quais foram obtidas na seção anterior.

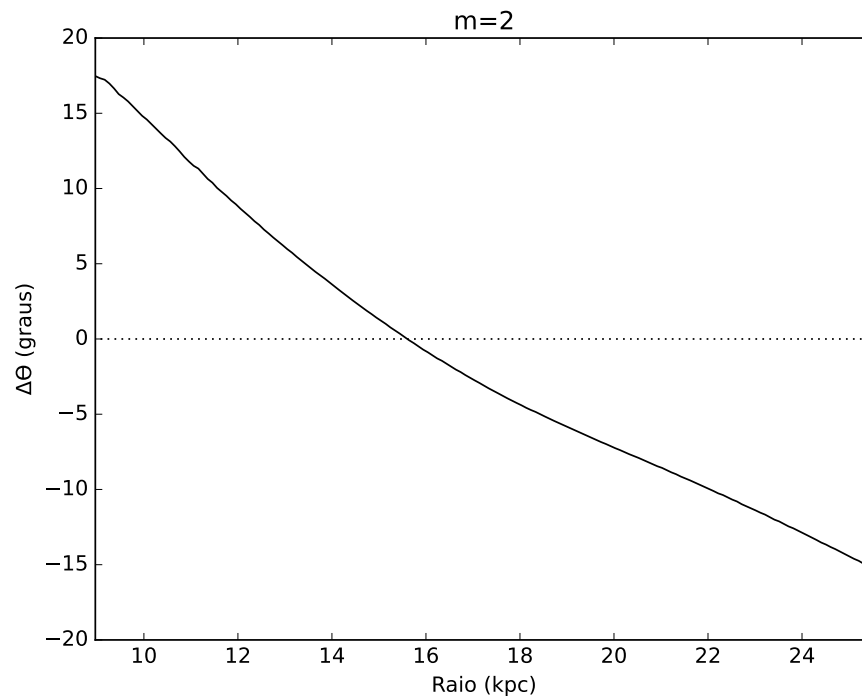
Na Figura 26 apresentamos o diagrama de fase para as imagens das Transformadas inversas de Fourier nos filtros g (Figura 23a) e z (Figura 23c).

Figura 26 – Diagrama de fase da galáxia IC 4566 para $m = 2$ obtido a partir das Transformadas inversas nos filtros g e z .

Fonte: O autor.

Observando o diagrama de fase (Figura 26) conseguimos notar que há ponto de corte entre a linha azul (filtro g) e a linha vermelha (filtro z), entretanto, fica difícil a determinação deste ponto somente por este diagrama. Deste modo, na Figura 27 apresentamos o diagrama de diferença de fase para evidenciarmos o corte.

Figura 27 – Diagrama de diferença de fase da galáxia IC 4566 para $m = 2$ obtido a partir das fases nos filtros g e z (Figura 26).



Fonte: O autor.

De acordo com o diagrama de diferença de fase (Figura 27) o corte está localizado, aproximadamente, em 16 kpc . Comparando os dois diagramas das Transformadas inversas (Figuras 26 e 27) com as Figuras 11 e 12 vemos que o caráter do padrão é *leading*.

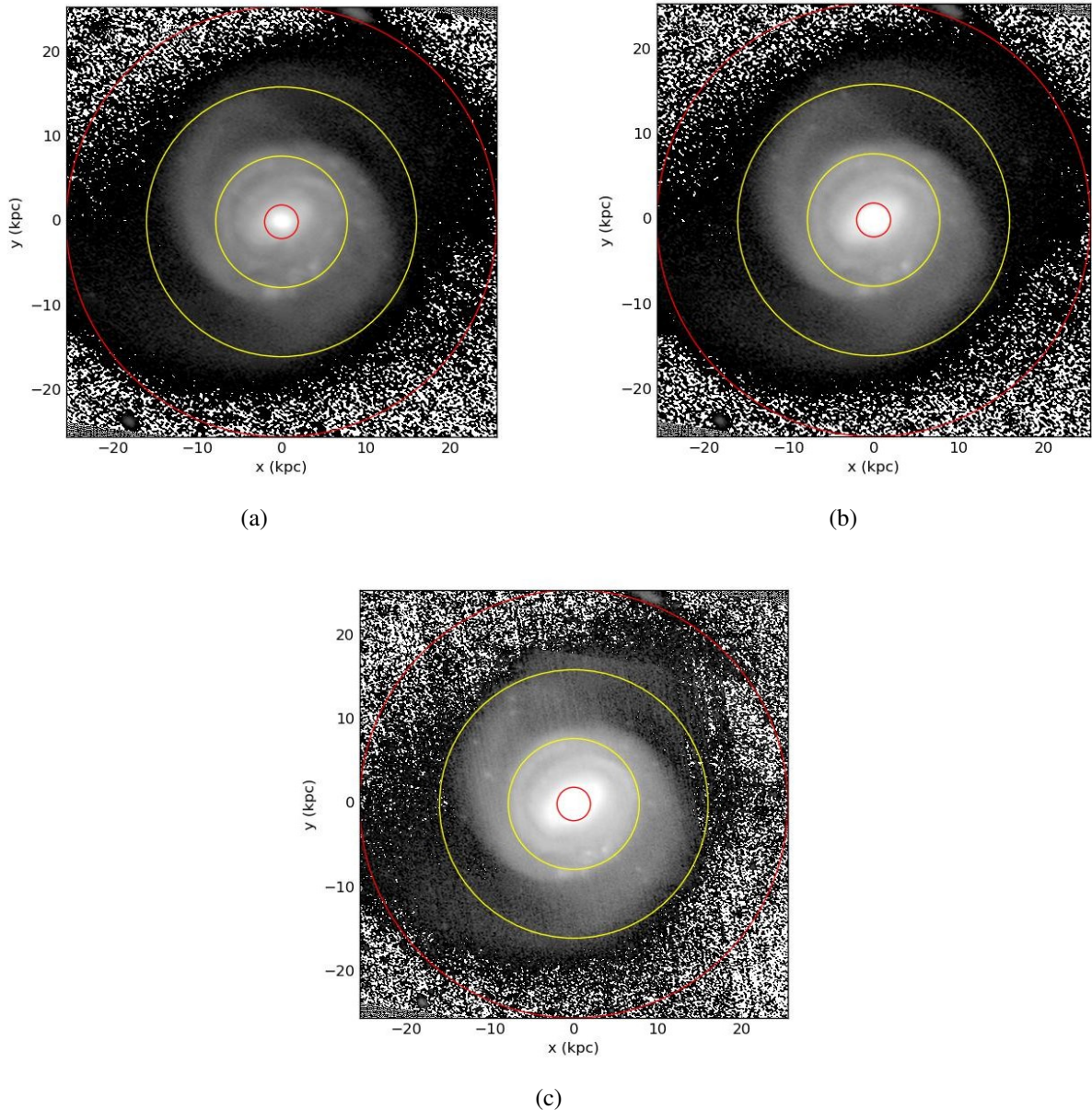
Como dito anteriormente, podemos notar a presença de uma barra nesta galáxia que se estende, até $\approx 5 \text{ kpc}$. Temos que nossa análise da TF2D foi realizada entre 9.0 kpc até 25.5 kpc , isto é, fugindo da região que contém a barra. Já na análise da TF1D optamos por raios entre 2.0 kpc até 25.5 kpc , analisando desde a parte central da galáxia. Comparando os resultados obtidos, temos então que o corte em 16 kpc coincidiu em ambos os casos, mas os diagramas das Transformadas inversas (Figuras 26 e 27) não incluem a região da barra e por isso, não era possível que o outro corte em $\approx 7.8 \text{ kpc}$ aparecesse. Entretanto, como há a presença de uma barra nesta galáxia, esperamos que ao fim da barra tenha uma corrotação e este valor muitas vezes pode ser 1.4 vezes maior que o comprimento da barra (DEBATTISTA; SELLWOOD, 1998). Logo, concluímos que o raio de corrotação está localizado em $\approx 7.8 \text{ kpc}$ e o caráter do padrão é *trailing*.

Com relação ao corte encontrado em $\approx 16 \text{ kpc}$, ele pode ser explicado como sendo resultado de interações com galáxias próximas. Galáxias companheiras podem afetar a dinâmica de uma galáxia e a sua estrutura, de modo que o mais afetado é sempre a parte mais externa da galáxia. A

galáxia IC 4566 pertence a um grupo composto por 6 galáxias, o que pode ter feito aparecer esse segundo raio de corotação, localizado quase ao fim da estrutura espiral.

A Figura 28 mostra a localização destes raios de corotação na galáxia.

Figura 28 – Ressonância de corotação da galáxia IC 4566 nas imagens g , r e z , respectivamente. Os círculos em vermelho indicam o raio mínimo e raio máximo da análise, e em amarelo os raios de corotação (7.8 kpc e 16 kpc).

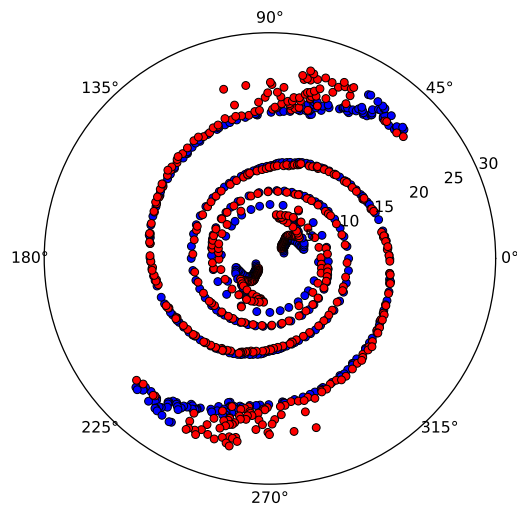


Fonte: O autor.

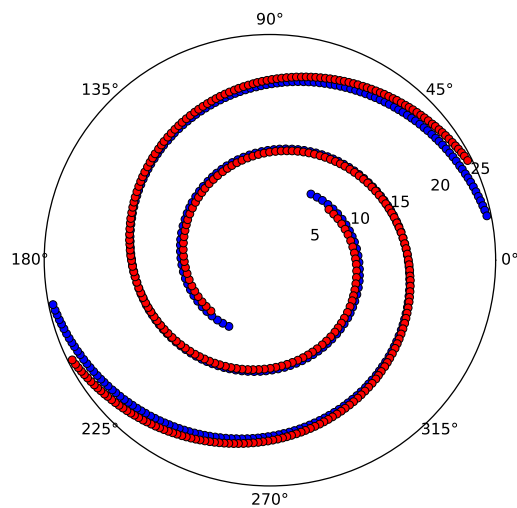
Com o intuito de reproduzir a Figura 10 para a galáxia IC 4566, plotamos em coordenadas polares, a fase em função do raio, para nossos dois casos analisados, as imagens deprojetadas e as Transformadas inversas de Fourier. Assim, a Figura 29 apresenta a posição da frente de choque com

relação à OD para a galáxia IC 4566, sendo que 29a foi obtida a partir das fases calculadas das imagens deprojetadas e a Figura 29b a partir das fases calculadas das imagens das Transformadas inversas para a componente $m = 2$.

Figura 29 – Posição da frente de choque (linha azul) com relação à OD (linha vermelha) para IC 4566. A Figura 29a foi obtida a partir das imagens deprojetadas e a Figura 29b a partir das imagens das Transformadas inversas para $m = 2$.



(a)



(b)

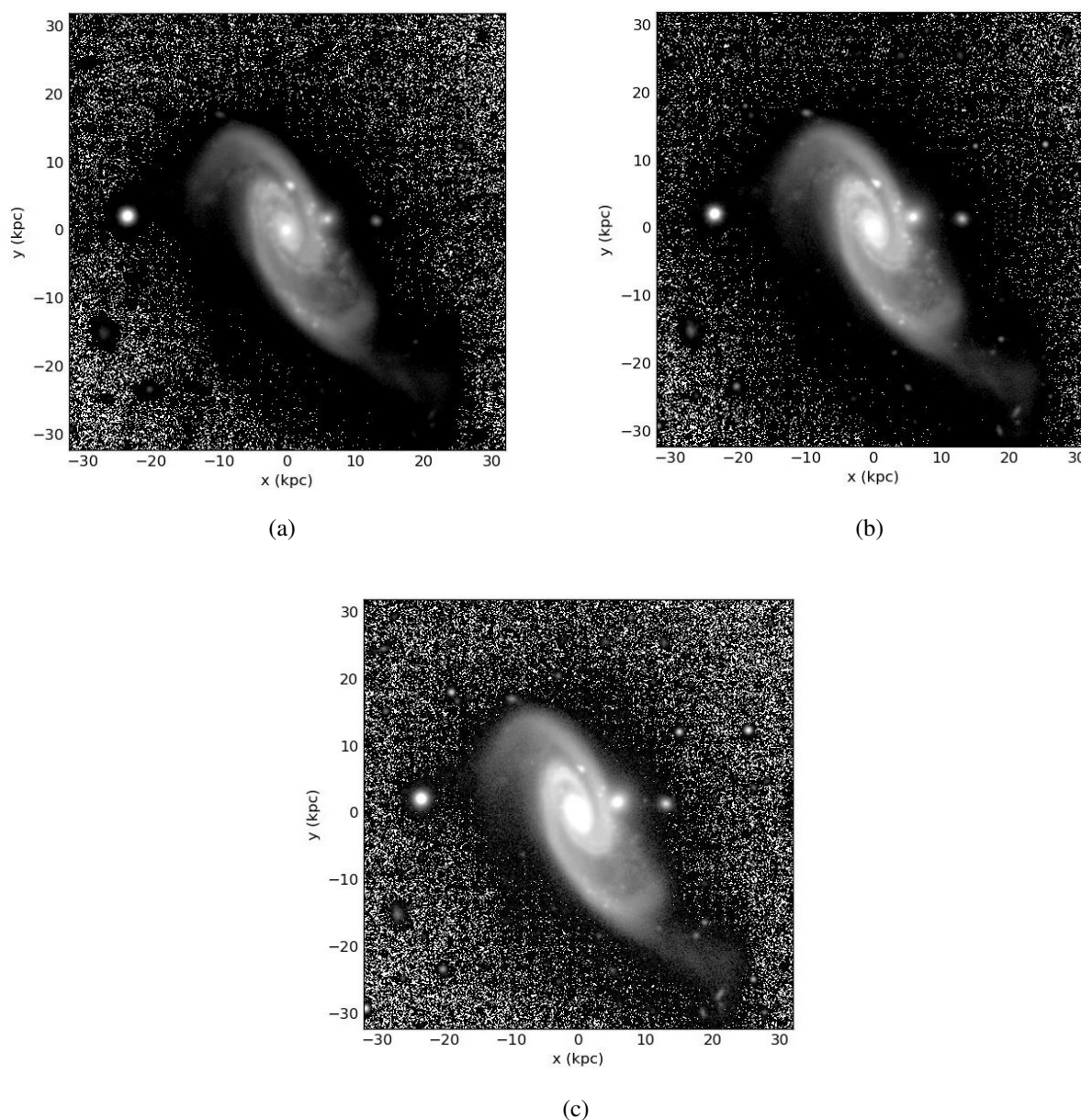
Fonte: O autor.

Esta última imagem possibilita a ilustração das posições da frente de choque e da OD, deixando evidente a inversão da ordem na qual aparece a população estelar recente e a mais velha nos raios de corotação. Note que na Figura 29a ainda conseguimos ver a formação da barra na região central.

8 Galáxia NGC 768

NGC 768 é uma galáxia espiral *grand design* do tipo Sb localizada na constelação de Cetus, com uma inclinação $\beta \approx 61.95^\circ$ e $PA = 25^\circ$. A partir da velocidade radial $v = 6979 \text{ km s}^{-1}$ determinamos sua distância como $d = 95.60 \text{ Mpc}$, considerando $H_0 = 73 \text{ km s}^{-1} \text{ Mpc}^{-1}$ (WONG et al., 2020).

Figura 30 – Imagens da galáxia NGC 768 nos filtros g , r e z , respectivamente.

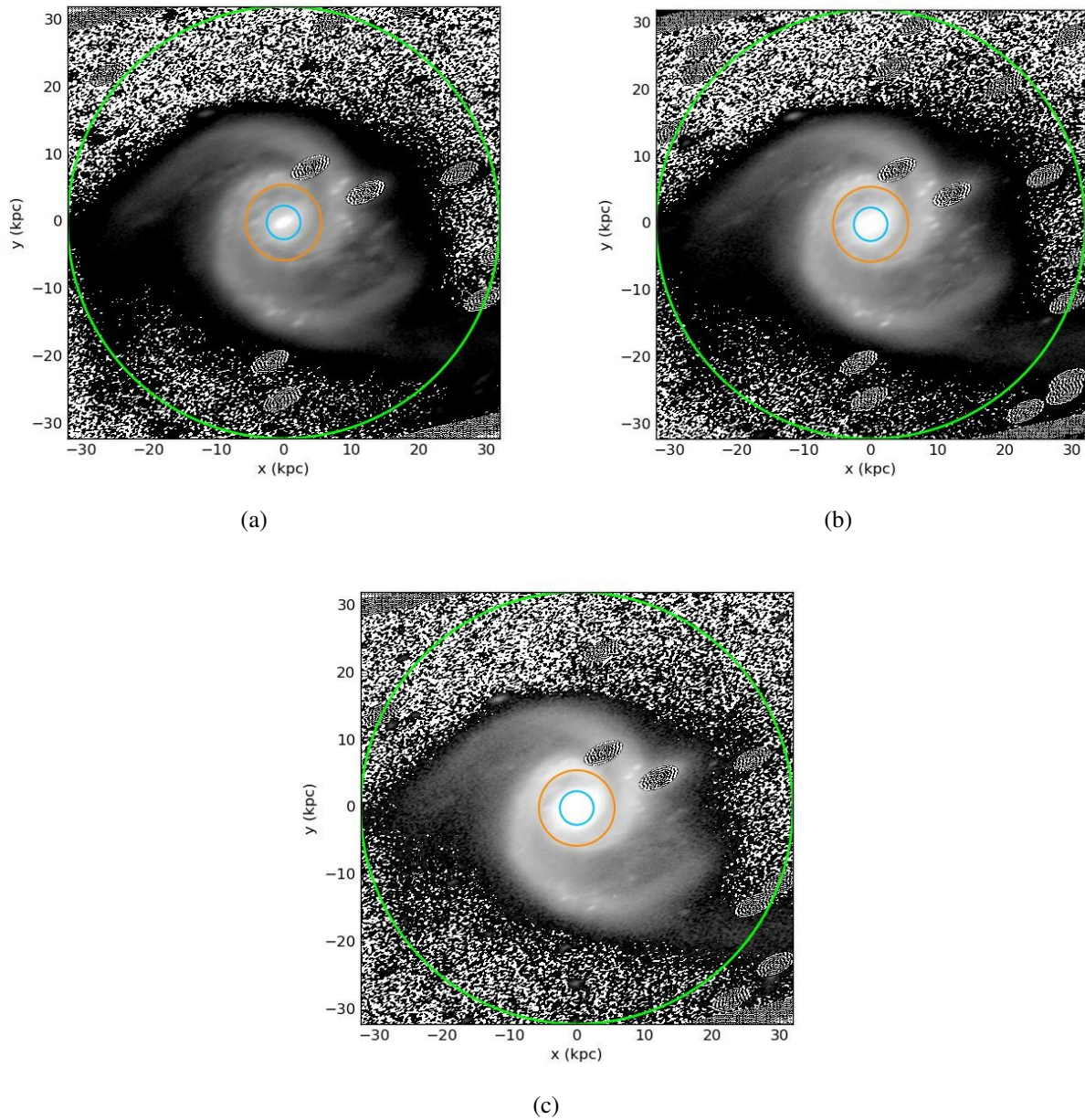


Fonte: O autor.

8.1 Imagens

Na Figura 31 temos as imagens da galáxia nos filtros g , r e z após a subtração das estrelas de campo e deprojção.

Figura 31 – Imagem da galáxia NGC 768 sem as estrelas de campo e deprojetada nos filtros g , r e z , respectivamente. O círculo em azul indica o raio mínimo da análise da TF1D; o círculo laranja indica o raio mínimo da análise da TF2D e o verde indica o raio máximo em ambos os métodos.

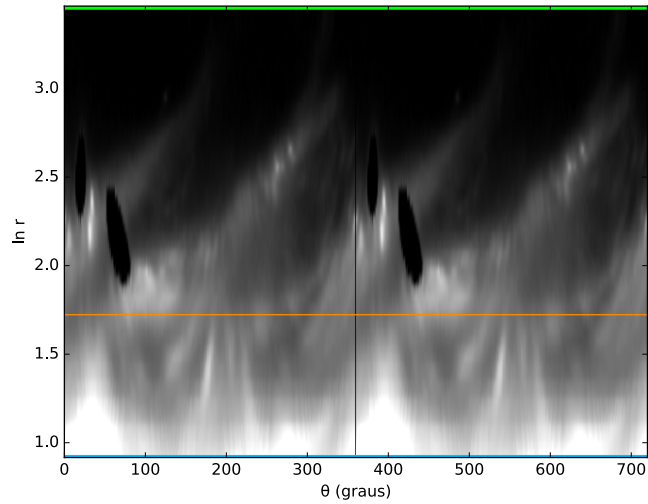


Fonte: O autor.

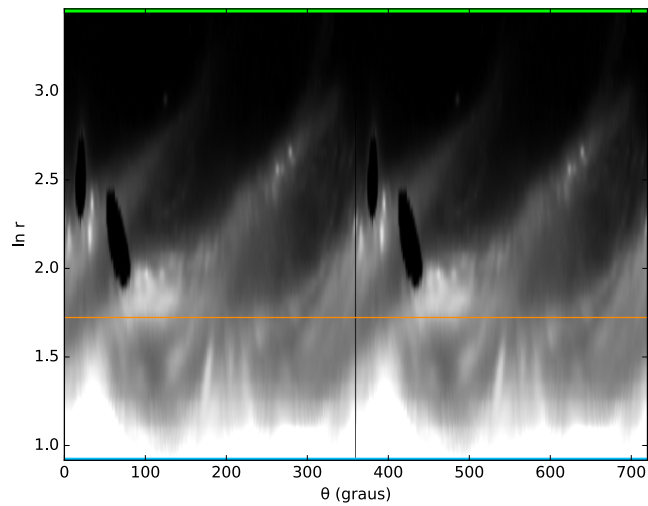
Assim como o caso anterior, notamos que esta galáxia apresenta dois longos braços que

dominam o disco. Com o diagrama $\ln r$ vs. θ podemos notar a simetria e extensão destes braços.

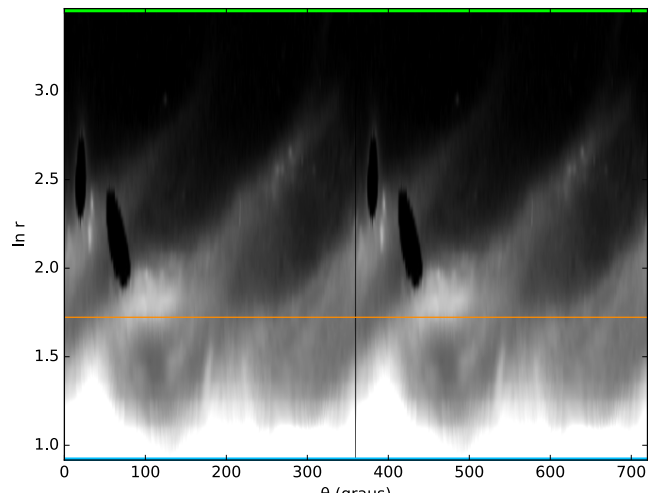
Figura 32 – Diagrama $\ln r$ vs. θ da galáxia NGC 768 nos filtros g , r e z , respectivamente. O valor de θ se estende de 0° a 720° , evidenciando a continuidade da estrutura espiral. A linha azul indica o raio mínimo da análise da TF1D; a linha laranja indica o raio mínimo da análise da TF2D e a verde indica o raio máximo em ambos os métodos.



(a)



(b)

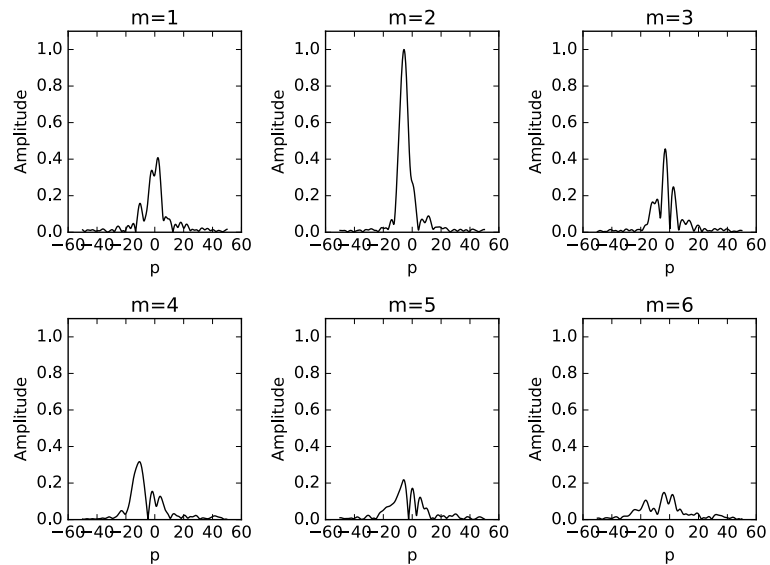


A Figura 32 nos apresenta a imagem g , r e z de NGC 768 em um diagrama $\ln r$ vs. θ . Com este diagrama podemos observar que temos uma estrutura espiral bissimétrica se inicia desde a região central da galáxia e vai até ≈ 25 kpc (que seria em torno de 3.2 no eixo y do diagrama).

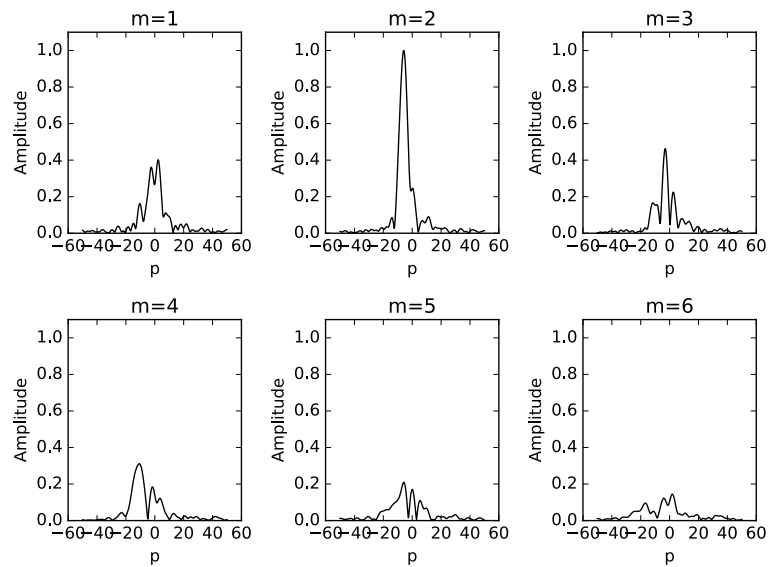
8.2 Transformada de Fourier bidimensional

A Transformada de Fourier bidimensional em NGC 768 nas bandas g (Figura 31a), r (Figura 31b) e z (Figura 31c) foi calculada em um intervalo de raio de 5.6 kpc até 32.0 kpc. Os espectros de Fourier, apresentados na Figura 33, mostram que a componente $m = 2$ é a dominante nas imagens g (Figura 33a), r (Figura 33b) e z (Figura 33c) e as demais componentes apresentam pouca contribuição, não sendo identificados harmônicos. O enrolamento dos braços espirais em NGC 768 é do tipo Z, e para este tipo de espiral os valores de p que descrevem tal estrutura devem ser negativos, e os picos que aparecem em valores de p positivos correspondem a modulações.

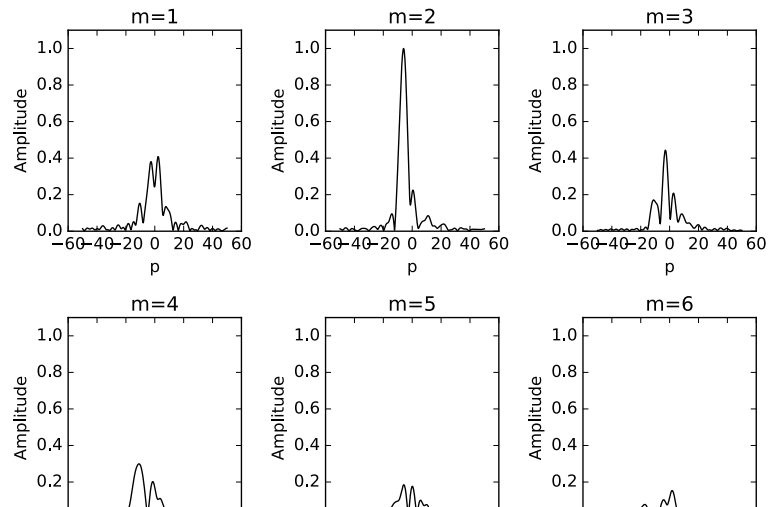
Figura 33 – Coeficientes $A(p, m)$ da Transformada bidimensional de Fourier na imagem g, r e z da galáxia NGC 768, obtidos conforme processo apresentado na Seção 4.3.



(a)



(b)



A Tabela 3 apresenta os valores dos maiores picos no espectro de Fourier. Com estes valores não conseguimos identificar harmônicos da componente dominante em nenhuma banda. Calculando a média dos valores obtidos para o *pitch angle* nas bandas *g*, *r* e *z* em $m = 2$ (componente dominante), obtemos $|\alpha| \approx 18.9^\circ$, o qual se aproxima do valor obtido em Yu e Ho (2019), exibido na Tabela 1.

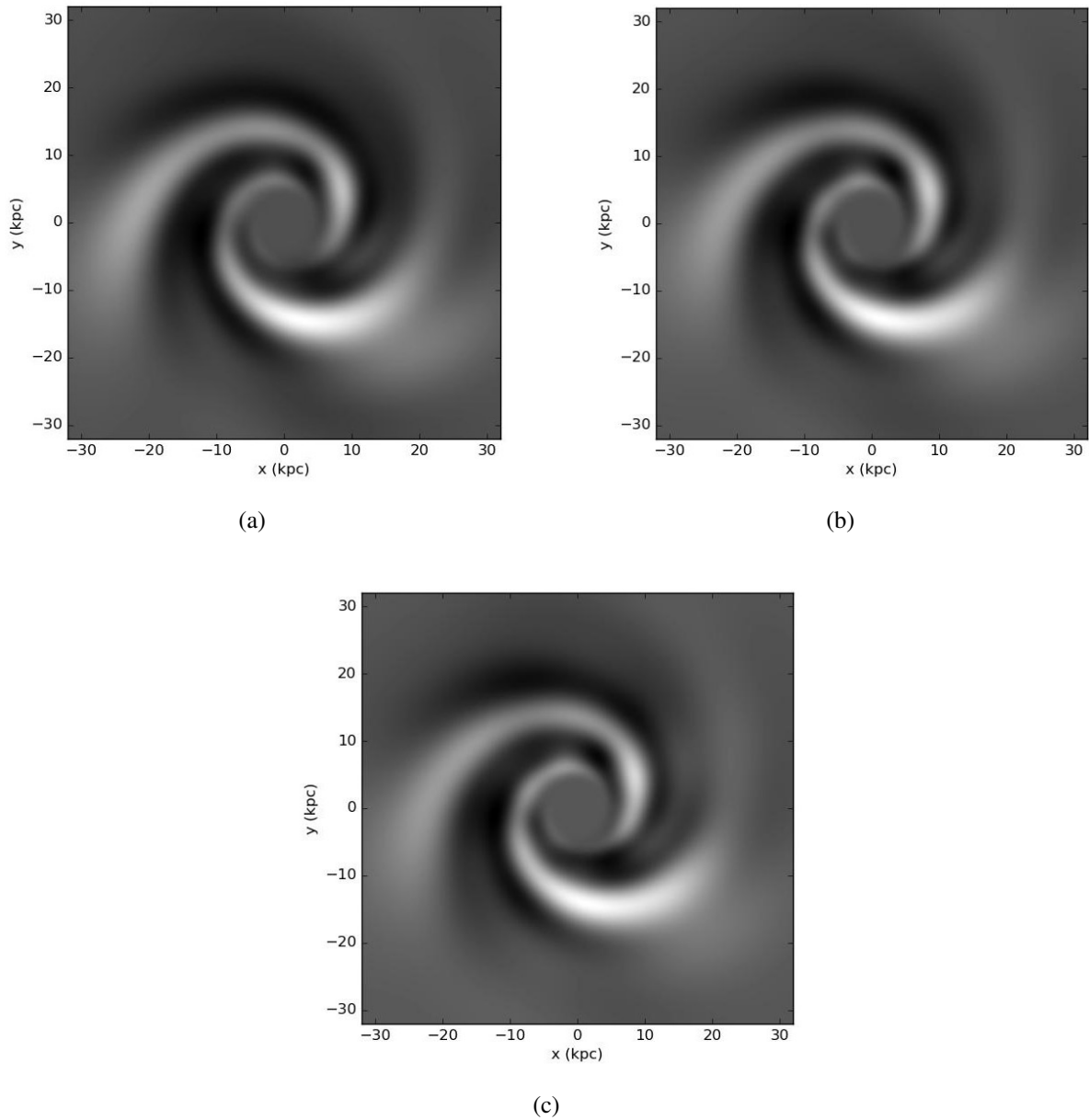
Tabela 3 – Alguns valores obtidos no espectro de Fourier para NGC 768.

Banda	<i>m</i>	<i>p</i>	Amplitude	α
<i>g</i>	2	-5.75	1.00	19.18
	4	-10.75	0.32	20.41
<i>r</i>	2	-5.75	1.00	19.18
	4	-10.75	0.31	20.41
<i>z</i>	2	-6.0	1.00	18.43
	4	-11.0	0.30	19.98

Fonte: O autor.

A Figura 34 contém as imagens das Transformadas inversas de Fourier da NGC 768 nas bandas *g* (Figura 34a), *r* (Figura 34b) e *z* (Figura 34c) calculadas com a soma das componentes $m = 1, 2, 3, 4, 5$ e 6. Conseguimos recuperar bem a estrutura espiral em todas as imagens, bem como observar a simetria e a extensão dos braços. Entretanto, na banda *g* (Figura 34a) os braços aparecem mais definidos e com maior intensidade.

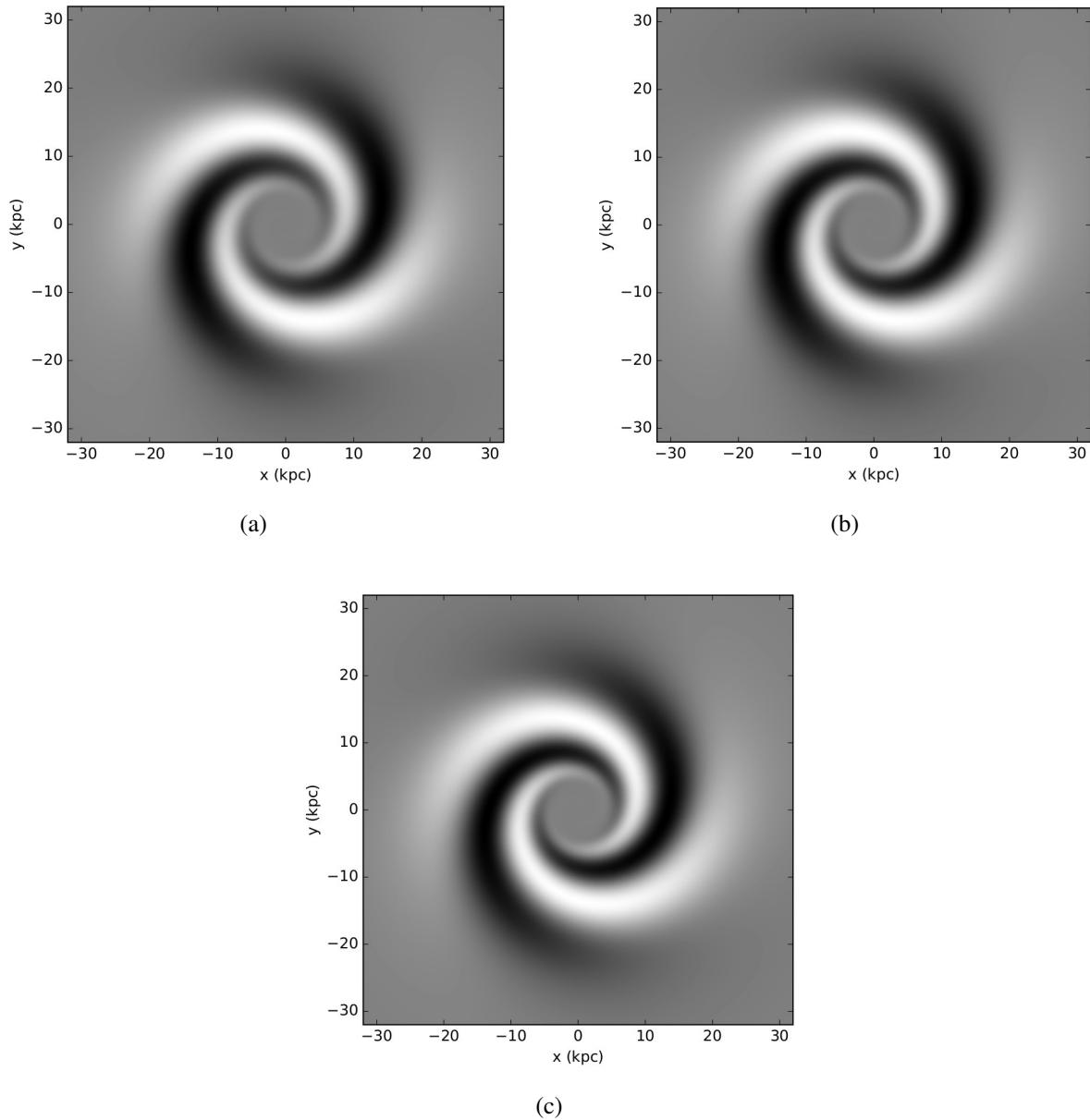
Figura 34 – Imagens das Transformadas inversas de NGC 768 para as componentes $m = 1, 2, 3, 4, 5$ e 6 nas imagens g, r e z , respectivamente. Note que a espiral recuperada está destacada em branco nas imagens.



Fonte: O autor.

A Figura 35 contém as imagens das Transformadas inversas de Fourier da NGC 768 nas bandas g (Figura 35a), r (Figura 35b) e z (Figura 35c) calculadas para a componente dominante $m = 2$.

Figura 35 – Imagens das Transformadas inversas de NGC 768 para a componente $m = 2$ nas imagens g , r e z , respectivamente. Note que a espiral recuperada está destacada em branco nas imagens.



Fonte: O autor.

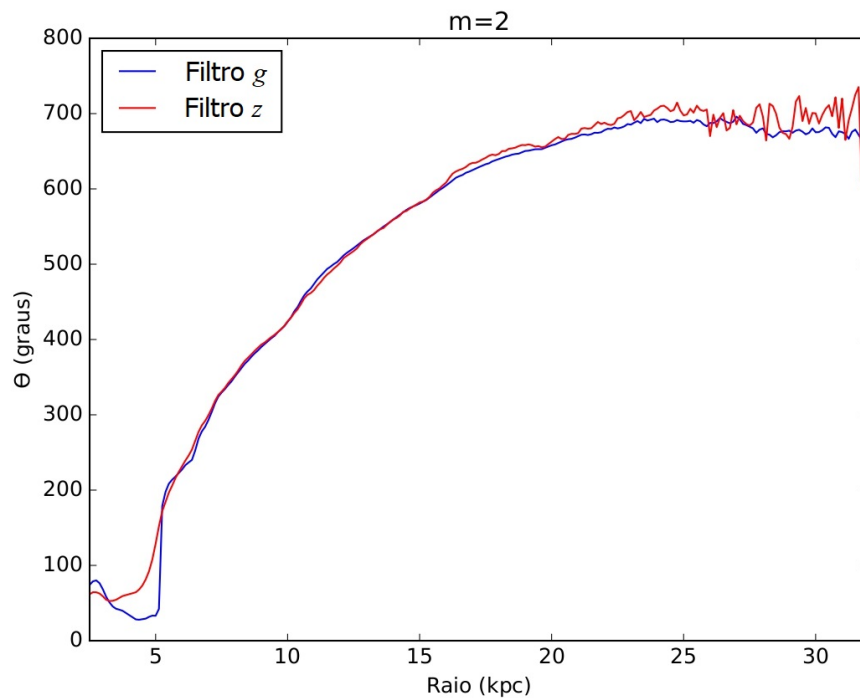
Comparando as Figuras 34 e 35, note que, embora a estrutura bissimétrica dos braços tenha sido recuperada nitidamente somente com a componente $m = 2$, as demais componentes fazem falta para reproduzir detalhes da galáxia.

8.3 Transformada de Fourier unidimensional

Com o intuito de determinar a ressonância de corotação em NGC 768 foi aplicada a Transformada de Fourier unidimensional nas bandas g (Figura 31a) e z (Figura 31c) em um intervalo de raio de 2.5 kpc até 32.0 kpc , conforme processo descrito na Seção 4.2.

Para obtermos o diagrama de fase da NGC 768 (Figura 36) consideramos as imagens da galáxia nos filtros g e z . A partir das equações (4.4) e (4.5) calculamos a fase Θ para cada imagem.

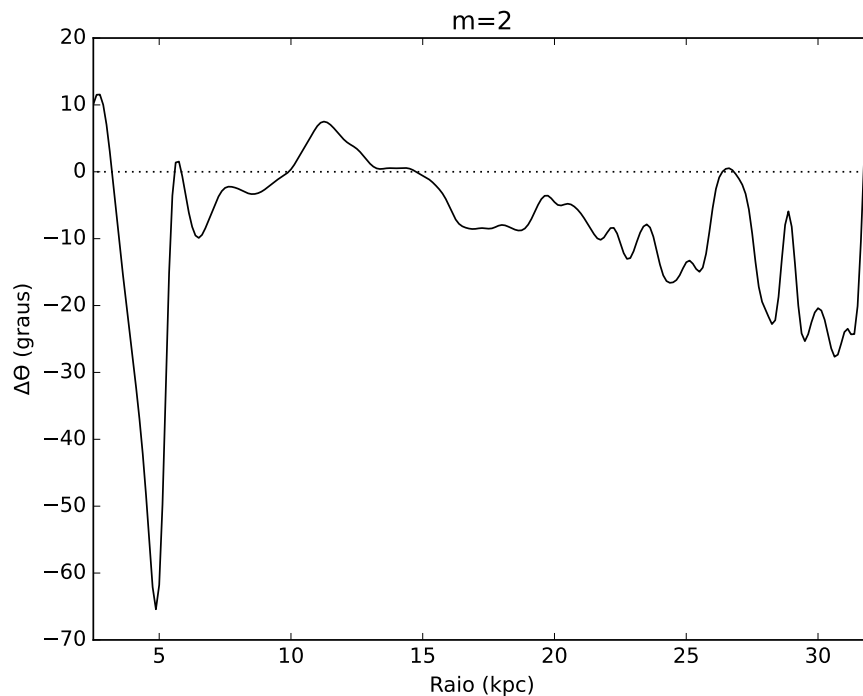
Figura 36 – Diagrama de fase da galáxia NGC 768 para $m = 2$ obtido a partir das imagens deprojetadas nos filtros g e z .



Fonte: O autor.

Ao analisarmos o diagrama de fase (Figura 36) conseguimos notar que há alguns pontos de corte entre a linha azul (filtro g) e a linha vermelha (filtro z). Como dito anteriormente, estes cortes indicam a presença de raio de corotação. Para evidenciar ainda mais estes pontos, utilizamos o diagrama de diferença de fase (Figura 37).

Figura 37 – Diagrama de diferença de fase da galáxia NGC 768 para $m = 2$ obtido a partir das fases nos filtros g e z (Figura 36).



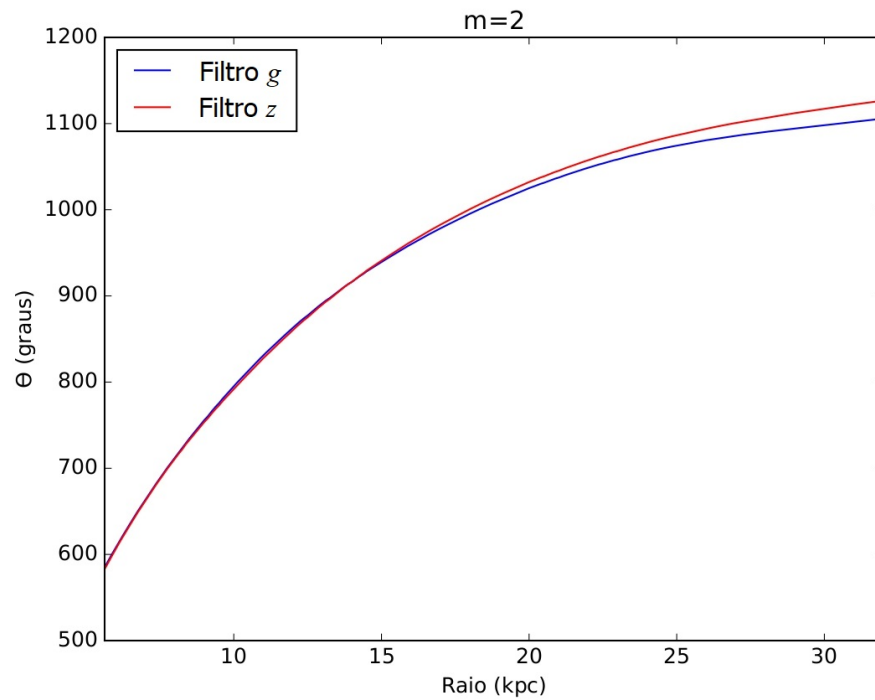
Fonte: O autor.

Os diagramas apontam alguns raios de corrotação, os quais estão localizados, aproximadamente, em 7 *kpc*, 10 *kpc* e 15 *kpc*. Por conta do ruído, os cortes em raios menores que 5 *kpc* e em raios maiores que 25 *kpc* podem ser descartados da análise. Comparando estes dois diagramas (Figuras 36 e 37) com as Figuras 11 e 12, podemos notar que teríamos o caráter do padrão espiral do tipo *trailing* e *leading* também.

Assim como a galáxia anterior, com estas imagens, temos quatro possíveis raios de corrotação. Portanto, analogamente, iremos incluir mais um caso em nossa análise a fim de determinar o raio de corrotação e o caráter do padrão corretamente, já que espera-se que estas informações sejam as mesmas através de ambos os modos. Assim, aplicaremos o método nas imagens das Transformadas inversas de Fourier para $m = 2$, as quais foram obtidas na seção anterior.

Na Figura 38 apresentamos o diagrama de fase para as imagens das Transformadas inversas de Fourier nos filtros g (Figura 35a) e z (Figura 35c).

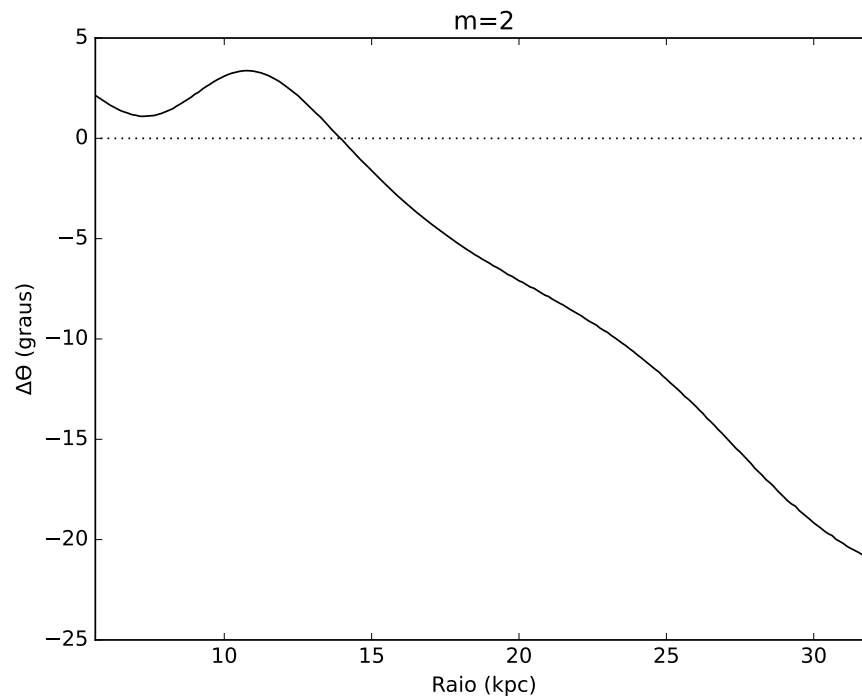
Figura 38 – Diagrama de fase da galáxia NGC 768 para $m = 2$ obtido a partir das Transformadas inversas nos filtros g e z .



Fonte: O autor.

Observando o diagrama de fase (Figura 38) conseguimos notar que há ponto de corte entre a linha azul (filtro g) e a linha vermelha (filtro z), entretanto, a detecção deste ponto não é clara somente por este diagrama. Deste modo, na Figura 39 apresentamos o diagrama de diferença de fase para evidenciarmos o corte.

Figura 39 – Diagrama de diferença de fase da galáxia NGC 768 para $m = 2$ obtido a partir das fases nos filtros g e z (Figura 38).



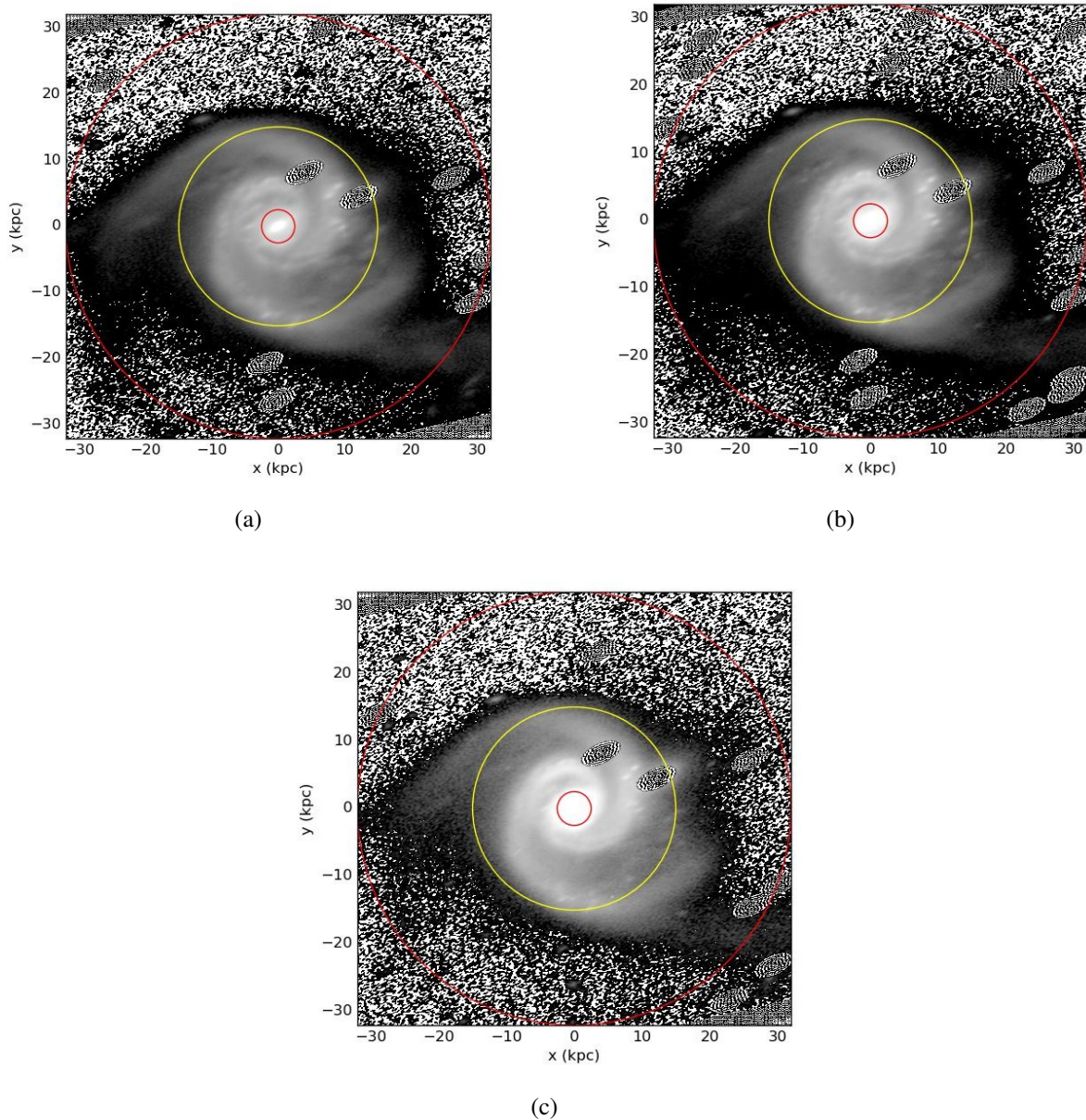
Fonte: O autor.

De acordo com o diagrama de diferença de fase (Figura 39) o corte está localizado, aproximadamente, em 15 kpc . Comparando os dois diagramas das Transformadas inversas (Figuras 38 e 39) com as Figuras 11 e 12 vemos que o caráter do padrão é *trailing*.

Temos que nossa análise da TF2D foi realizada entre 5.6 kpc até 32.0 kpc . Já na análise da TF1D optamos por raios entre 2.5 kpc até 32.0 kpc , analisando desde um raio um pouco menor no centro. Comparando os resultados obtidos, temos então que o corte em 15 kpc coincidiu em ambos os casos, sendo *trailing* o caráter do padrão espiral. Assim, podemos determinar que o caráter do padrão é *trailing* e o raio de corotação está em 15 kpc .

A Figura 40 mostra a localização deste raio na galáxia.

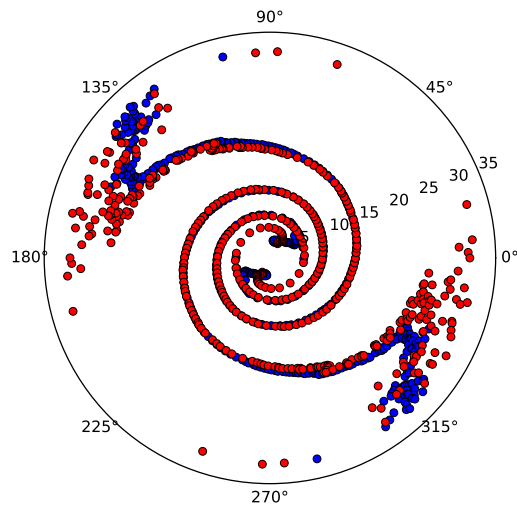
Figura 40 – Ressonância de corotação da galáxia NGC 768 nas imagens g , r e z , respectivamente. Os círculos em vermelho indicam o raio mínimo e raio máximo da análise, e em amarelo o raio de corotação.



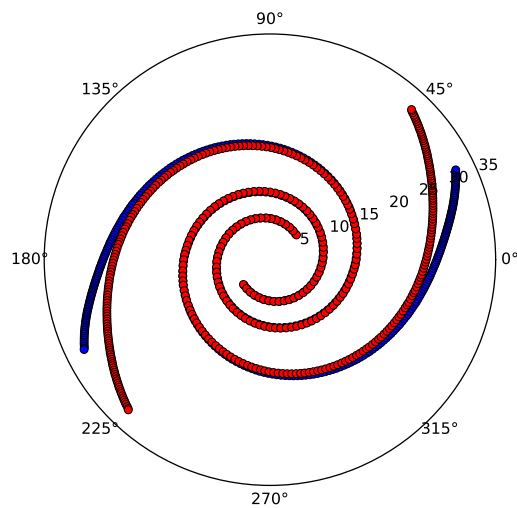
Fonte: O autor.

Com o intuito de reproduzir a Figura 10 para a galáxia NGC 768, plotamos em coordenadas polares, a fase em função do raio, para nossos dois casos analisados, as imagens deprojetadas e as Transformadas inversas de Fourier. Assim, a Figura 41 apresenta a posição da frente de choque com relação à OD para a galáxia NGC 768, sendo que 41a foi obtida a partir das fases calculadas das imagens deprojetadas e a Figura 41b a partir das fases calculadas das imagens das Transformadas inversas para a componente $m = 2$.

Figura 41 – Posição da frente de choque (linha azul) com relação à OD (linha vermelha) para NGC 768. A Figura 41a foi obtida a partir das imagens deprojetadas e a Figura 41b a partir das imagens das Transformadas inversas para $m = 2$.



(a)



(b)

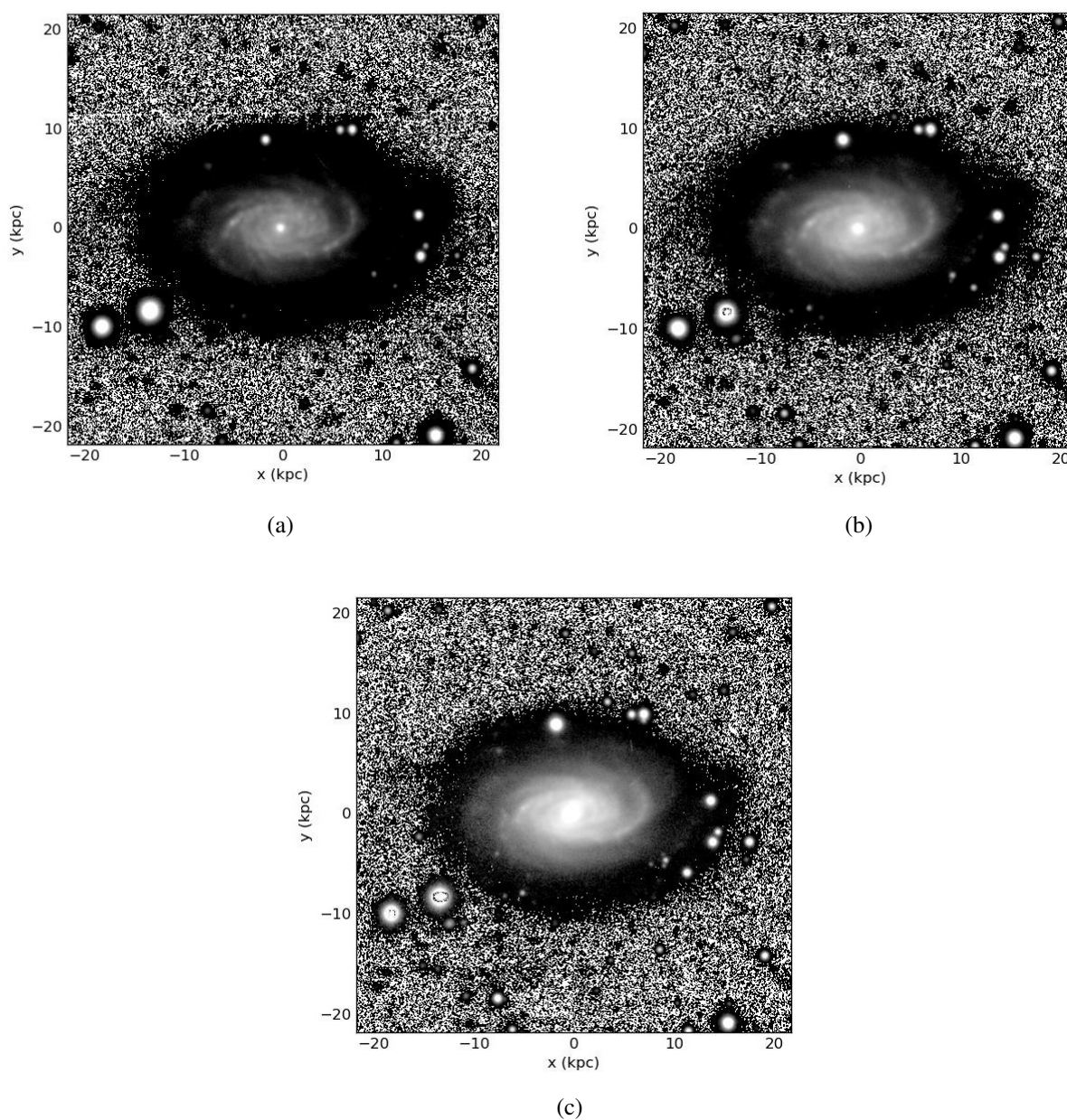
Fonte: O autor.

Esta última imagem possibilita a ilustração das posições da frente de choque e da OD, deixando evidente a inversão da ordem na qual aparece a população estelar recente e a mais velha em $\approx 15 \text{ kpc}$, que é o raio de corotação.

9 Galáxia IC 1256

IC 1256 é uma galáxia espiral do tipo Sb localizada na constelação de Hércules, com uma inclinação $\beta \approx 50.95^\circ$ e $PA = 93^\circ$. A partir da velocidade radial $v = 4734 \text{ km s}^{-1}$ determinamos sua distância como $d = 64.85 \text{ Mpc}$, considerando $H_0 = 73 \text{ km s}^{-1} \text{ Mpc}^{-1}$ (WONG et al., 2020).

Figura 42 – Imagens da galáxia IC 1256 nos filtros g , r e z , respectivamente.

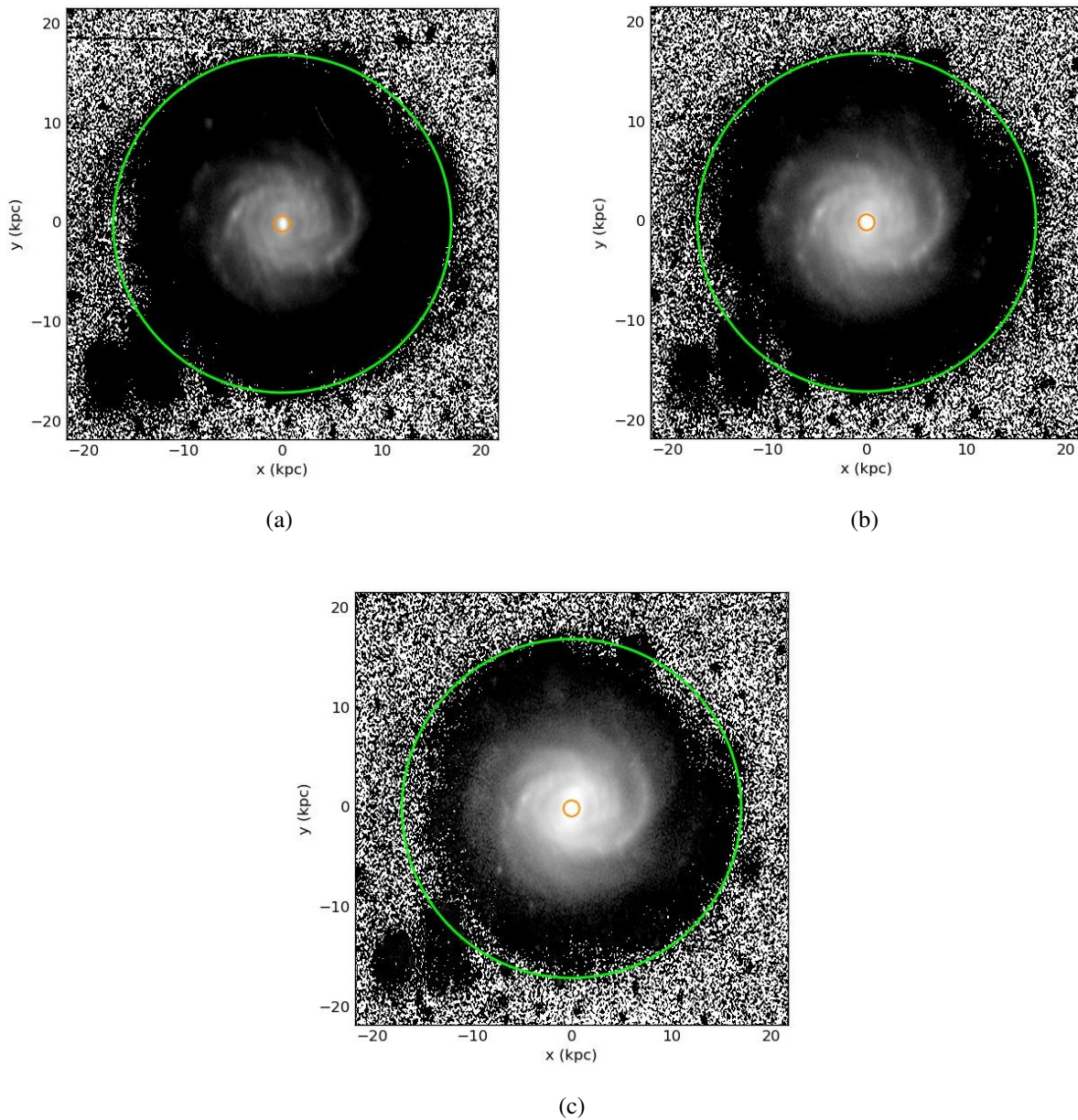


Fonte: O autor.

9.1 Imagens

Realizamos a subtração das estrelas de campo e a deprojeção das imagens nas bandas g , r e z (Figura 43).

Figura 43 – Imagens da galáxia IC 1256 sem as estrelas de campo e deprojetada nos filtros g , r e z , respectivamente. O círculo em laranja indica o raio mínimo e o verde indica o raio máximo da análise da TF2D.

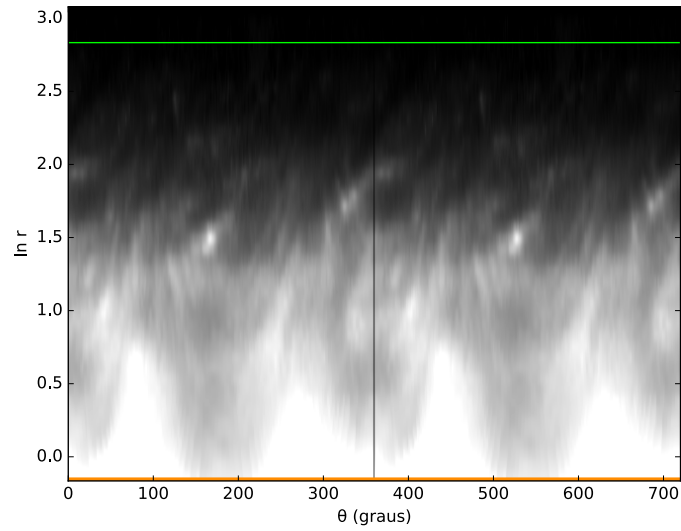


Fonte: O autor.

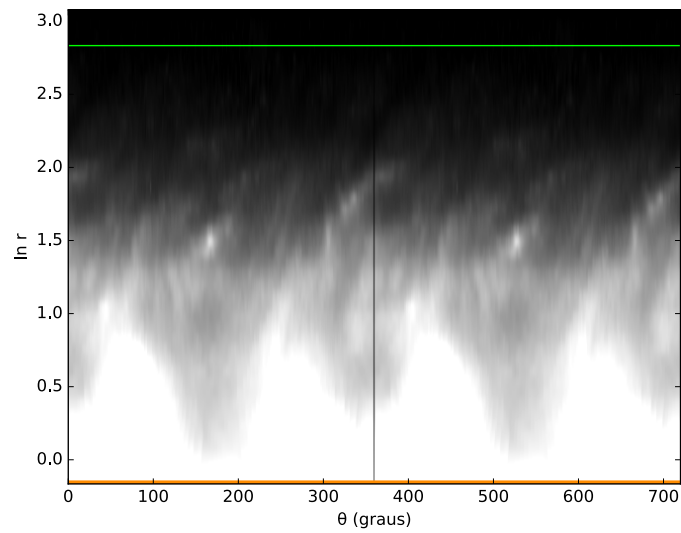
Aparentemente, esta galáxia é uma múltiplos braços, pois nota-se alguns braços mal definidos e irregulares. A partir do diagrama $\ln r$ vs. θ conseguimos retificar esta imagem de modo a evidenciar

alguns braços e a continuidade da estrutura espiral (Figura 44).

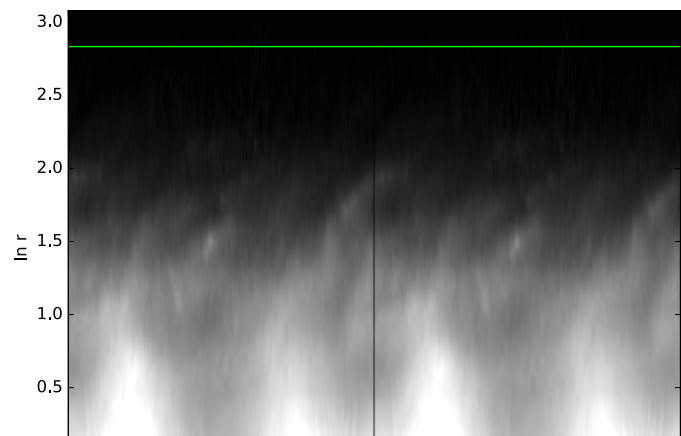
Figura 44 – Diagrama $\ln r$ vs. θ da galáxia IC 1256 nos filtros g , r e z , respectivamente. O valor de θ se estende de 0° a 720° , evidenciando a continuidade da estrutura espiral. A linha laranja indica o raio mínimo e a verde indica o raio máximo da análise da TF2D.



(a)



(b)

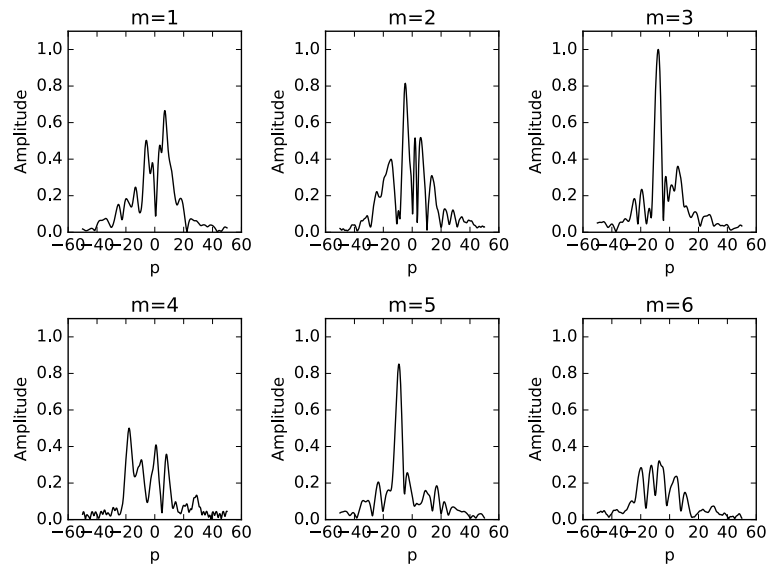


9.2 Transformada de Fourier bidimensional

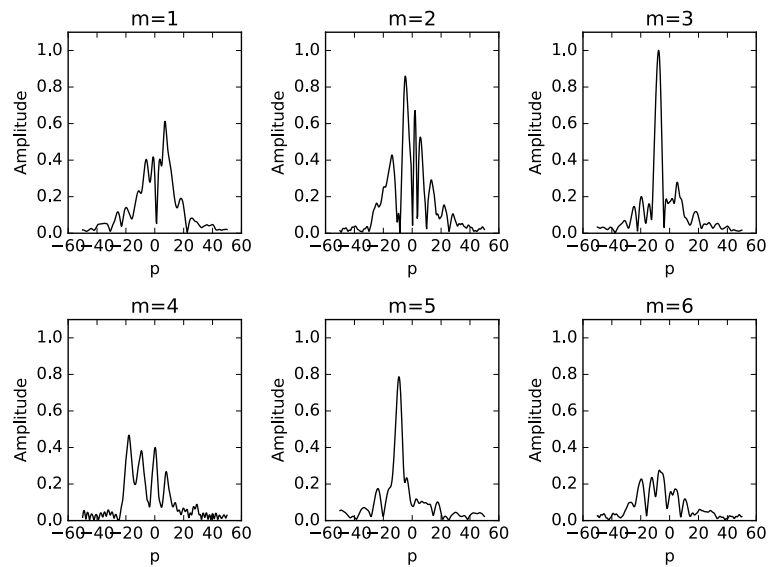
A Transformada de Fourier bidimensional em IC 1256 nas bandas g (Figura 43a), r (Figura 43b) e z (Figura 43c) foi calculada em um intervalo de raio de 0.8 kpc até 17.0 kpc . Os espectros de Fourier, apresentados na Figura 45, mostram que a componente $m = 3$ é a dominante nas imagens g (Figura 45a), r (Figura 45b) e z (Figura 45c), mas algumas outras componentes também apresentam certa contribuição. Os valores obtidos em cada banda se assemelham, apresentando poucas variações. O enrolamento dos braços espirais em IC 1256 é do tipo Z, e para este tipo de espiral os valores de p que descrevem tal estrutura devem ser negativos¹, e os picos que aparecem em valores de p positivos correspondem a modulações.

¹ Ver Seção 4.3 para esclarecimento.

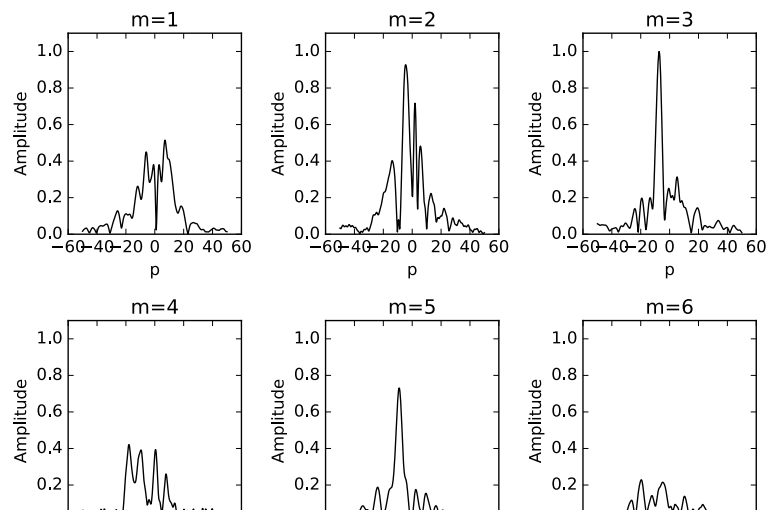
Figura 45 – Coeficientes $A(p, m)$ da Transformada bidimensional de Fourier na imagem g, r e z da galáxia IC 1256, obtidos conforme processo apresentado na Seção 4.3.



(a)



(b)



A Tabela 4 apresenta os valores dos maiores picos no espectro de Fourier. Note que não foram identificados harmônicos. Ao calcularmos a média dos valores obtidos para o *pitch angle* nas bandas g , r e z em $m = 3$ (componente dominante), temos que $|\alpha| \approx 21.8^\circ$; para a componente $m = 2$, que também apresenta grande contribuição, temos $|\alpha| \approx 23.2^\circ$, concordando com o valor obtido em Yu e Ho (2019), exibido na Tabela 1.

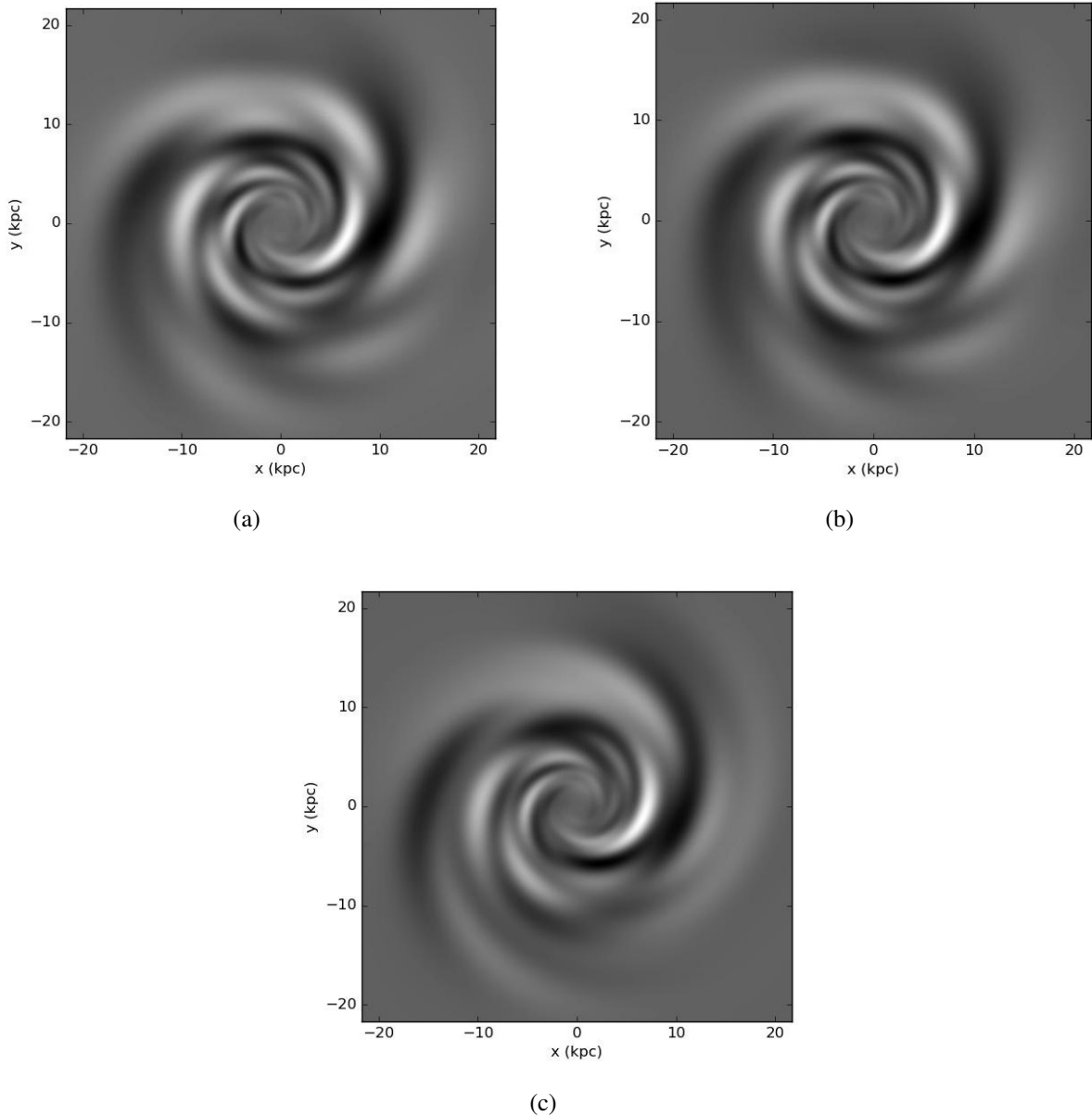
Tabela 4 – Alguns valores obtidos no espectro de Fourier para IC 1256.

Banda	m	p	Amplitude	α
g	2	-4.75	0.81	22.83
	3	-7.75	1.00	21.16
	5	-9.25	0.85	28.39
r	2	-4.75	0.86	22.83
	3	-7.5	1.00	21.80
	5	-9.25	0.79	28.39
z	2	-4.5	0.93	23.96
	3	-7.25	1.00	22.48
	5	-9.0	0.73	29.05

Fonte: O autor.

A Figura 46 contém as imagens das Transformadas inversas de Fourier da IC 1256 nas bandas g (Figura 46a), r (Figura 46b) e z (Figura 46c) calculadas com a soma das componentes $m = 1, 2, 3, 4, 5$ e 6.

Figura 46 – Imagens das Transformadas inversas de IC 1256 para as componentes $m = 1, 2, 3, 4, 5$ e 6 nas imagens g, r e z , respectivamente. Note que a espiral recuperada está destacada em branco nas imagens.



Fonte: O autor.

A presença de múltiplos braços assimétricos nesta galáxia fica evidente quando reconstruímos a imagem original a partir da soma das componentes (Figura 46). Apesar de não ser possível identificarmos com a exatidão a quantidade de braços, podemos observar que estes braços são mais fracos na banda z (Figura 46c).

Este método da Transformada de Fourier é bem eficiente para galáxias espirais *grand design*, possibilitando, nitidamente, a recuperação dos braços espirais a partir da Transformada inversa.

Entretanto, podemos ver que o mesmo não ocorre para galáxias de múltiplos braços. Dito isto, para esta galáxia, não será aplicada a Transformada de Fourier unidimensional e a análise para este caso está finalizada.

10 Conclusões

As Transformadas de Fourier são métodos poderosos para a análise das estruturas em galáxias espirais, principalmente, para as galáxias espirais *grand design*. Com a técnica da Transformada de Fourier bidimensional, conseguimos determinar quais são as componentes mais relevantes na estrutura espiral das galáxias, além de obter o *pitch angle* dos braços para cada um dos modos, individualmente. Ainda com esta técnica, através da Transformada inversa conseguimos desenhar e recuperar as componentes individuais ou somar as componentes principais da estrutura espiral, o que permite uma boa caracterização destas estruturas para as galáxias *grand design*. A análise com a Transformada de Fourier unidimensional possibilitou a determinação da ressonância de corrotação das galáxias, bem como o caráter do padrão espiral. Estas duas técnicas se complementam para um estudo morfológico de galáxias espirais, de modo a tornar mais completa a caracterização destas estruturas.

Aplicamos a Transformada de Fourier unidimensional e bidimensional para análise de três galáxias espirais: IC 4566, NGC 768 e IC 1256, sendo IC 4566 e NGC 768 *grand design* e IC 1256 apresenta múltiplos braços. Para que este estudo se tornasse possível, foram criados programas em PYTHON, os quais foram testados com espirais teóricas e galáxias estudadas em outros trabalhos, para que assim, estivesse validado para as galáxias selecionadas.

Para a análise de Fourier bidimensional, foram utilizadas imagens das três galáxias nas bandas g , r e z , as quais foram retiradas do *DESI Legacy* e para Fourier unidimensional, além destas imagens, foram utilizadas as imagens das Transformadas inversas obtidas pelo método anterior.

A galáxia IC 4566 é uma galáxia espiral *grand design*. É notório os dois longos braços simétricos que dominam o disco desta galáxia, e com o diagrama $\ln r$ vs. θ conseguimos retificar estes braços de modo a evidenciar ainda mais a simetria destes braços e notar a presença de uma barra. De acordo com a classificação de Hubble, esta é uma galáxia do tipo Sb, entretanto, mais uma vez foi constatada uma leve barra em seu centro, onde, ao realizar a medição do *pitch angle* em raios bem pequenos (menores que 8 kpc), encontramos valores para o *pitch angle* próximos de 90° , o que indica a presença dessa barra. Por esta razão, optamos por realizar a nossa análise da TF2D entre 9.0 kpc até 25.5 kpc . Como resultado da aplicação deste método, os espectros de Fourier apontam $m = 2$ como componente dominante, e as demais apresentam pouca contribuição. Ao calcularmos a média dos valores obtidos para o *pitch angle* nas bandas g , r e z em $m = 2$ (componente dominante), obtemos $|\alpha| \approx 16.9^\circ$, o que condiz com valores apresentados em outros trabalhos, como em [Yu e Ho \(2019\)](#). Com relação às Transformadas inversas, plotamos a soma das componentes, isto é, $m = 1, 2, 3, 4, 5$ e 6 e conseguimos recuperar bem a estrutura espiral. Somente com a componente

dominante, $m = 2$, recuperamos a estrutura bissimétrica dos braços com nitidez, mas as demais componentes fazem falta para reproduzir detalhes da galáxia. Para a análise da TF1D optamos por raios entre 2.0 kpc até 25.5 kpc , pois nesse caso é interessante analisarmos desde a parte central da galáxia. Aplicamos o método para as imagens deprojetadas nos filtros g e z e como resultado, obtivemos dois possíveis raios de corrotação em $\approx 7.8 \text{ kpc}$ e $\approx 16 \text{ kpc}$, sendo padrão *trailing* para o primeiro corte e *leading* no segundo. Como forma de determinar corretamente estas informações, seguimos Villamizar (2001) e incluímos mais um caso em nossa análise, aplicando o método nas imagens das Transformadas inversas de Fourier para $m = 2$. Comparando os resultados obtidos em ambos os casos, como há a indicação de uma barra nesta galáxia, concluímos que o raio de corrotação da IC 4566 está localizado em $\approx 7.8 \text{ kpc}$ e o caráter do padrão é *trailing*. Com relação ao corte encontrado em $\approx 16 \text{ kpc}$ e um padrão *leading*, ele pode ser explicado como sendo resultado de interações com galáxias próximas, especialmente IC 4564, o que afeta a parte externa da estrutura espiral, ocasionando esse segundo raio de corrotação na galáxia.

A galáxia NGC 768 também é uma galáxia espiral *grand design* e assim como o caso anterior, são nítidos os dois longos braços simétricos que dominam o disco desta galáxia, e com o diagrama $\ln r \text{ vs. } \theta$ conseguimos retificar estes braços de modo a evidenciar a simetria destes braços. Para a TF2D realizamos a análise nas bandas g , r e z em um intervalo de raio de 5.6 kpc até 32.0 kpc . Como esperado, os espectros de Fourier mostram que a componente $m = 2$ é a dominante nas três bandas e as demais componentes apresentam pouca contribuição, não sendo identificados harmônicos. Calculando a média dos valores obtidos para o *pitch angle* nas bandas g , r e z em $m = 2$, obtemos $|\alpha| \approx 18.9^\circ$, o qual se aproxima do valor obtido em Yu e Ho (2019). Assim como a galáxia anterior, com as Transformadas inversas, plotamos a soma das componentes, isto é, $m = 1, 2, 3, 4, 5$ e 6 e conseguimos recuperar bem a estrutura espiral. Somente com a componente dominante, $m = 2$, recuperamos a estrutura bissimétrica dos braços com nitidez, mas as demais componentes fazem falta para reproduzir detalhes da galáxia. A TF1D foi aplicada nas bandas g e z em um intervalo de raio de 2.5 kpc até 32.0 kpc . Como resultado deste método, obtivemos alguns possíveis raios de corrotação localizados, aproximadamente, em 7 kpc , 10 kpc e 15 kpc , onde teríamos caráter do padrão espiral do tipo *leading* e *trailing*. De maneira análoga a galáxia anterior, incluímos mais um caso em nossa análise, aplicando o método nas imagens das Transformadas inversas de Fourier para $m = 2$. Com este segundo caso tivemos um corte em 15 kpc , sendo *trailing* o caráter do padrão. Comparando os resultados em ambos os casos, concluímos então que o raio de corrotação deve estar localizado aproximadamente em 15 kpc e o caráter do padrão espiral é *trailing*.

A galáxia IC 1256 apresenta múltiplos braços. Como dito anteriormente, a escolha desta galáxia que não é *grand design* ocorreu propositalmente. O intuito era que comparássemos os resultados desta galáxia com as demais a fim de verificar o desempenho e as limitações do método. A análise de Fourier bidimensional foi realizada nas bandas g , r e z em um intervalo de raio de 0.8

kpc até 17.0 *kpc*. Os espectros de Fourier mostram que a componente $m = 3$ é a dominante nas três bandas, mas algumas outras componentes também apresentam bastante contribuição, o que já era esperado nesta galáxia que há muitos braços irregulares e descontínuos, os quais podem ser vistos na imagem deprojetada e também no diagrama $\ln r$ vs. θ . Ao calcularmos a média dos valores obtidos para o *pitch angle* nas bandas *g*, *r* e *z* em $m = 3$ (componente dominante), temos que $|\alpha| \approx 21.8^\circ$. Este parâmetro também foi calculado para a componente $m = 2$, que também apresenta grande contribuição e obtivemos $|\alpha| \approx 23.2^\circ$, o qual concorda com o valor obtido em Yu e Ho (2019). Com a Transformada inversa é evidenciada mais uma vez a presença de múltiplos braços assimétricos. Quando reconstruímos a imagem original a partir da soma das componentes não conseguimos identificar com a exatidão a quantidade de braços ou o que é apenas *gaps* de braços maiores, por exemplo. Diante deste cenário, podemos ver que este método da Transformada de Fourier é bem eficiente para galáxias espirais *grand design*, possibilitando, nitidamente, a recuperação dos braços espirais a partir da transformada inversa e obtendo uma boa caracterização da estrutura. Entretanto, podemos ver que o mesmo não ocorre para galáxias de múltiplos braços. Dito isso, para esta galáxia, não demos continuidade nas análises aplicando a Transformada de Fourier unidimensional pois encontraríamos outras limitações.

Muitas ideias de continuidade e aperfeiçoamento surgem da realização deste trabalho. No futuro, pretende-se ampliar a quantidade de galáxias estudadas, aplicando os métodos para um número maior de galáxias, com imagens em outras bandas, em uma amostra homogênea, com galáxias observadas com os mesmos instrumentos e parâmetros observacionais. Além disso, há a possibilidade de melhorarmos a medição do *pitch angle* realizando o cálculo sobre quatro faixas radiais propostas por Yu et al. (2018).

Referências

- ATHANASSOULA, E. The spiral structure of galaxies. *Physics Reports*, v. 114, n. 5-6, p. 319–403, 1984. Citado na página 23.
- BOESHAAR, G.; HODGE, P. H ii regions and the spiral structure of ngc 3631. *The astrophysical journal*, v. 213, p. 361–367, 1977. Citado na página 23.
- CARROLL, B. W.; OSTLIE, D. A. *An introduction to modern astrophysics*. [S.l.]: Addison-Wesley Reading, MA, USA, 2007. Citado 2 vezes nas páginas 16 e 17.
- CONSIDÈRE, S.; ATHANASSOULA, E. The distribution of h ii regions in external galaxies. i. *Astronomy and Astrophysics*, v. 111, p. 28–42, 1982. Citado na página 21.
- CONSIDÈRE, S.; ATHANASSOULA, E. Analysis of spiral components in 16 galaxies. *Astronomy and Astrophysics Supplement Series*, v. 76, p. 365–404, 1988. Citado na página 21.
- CONTOPOULOS, G. Preference of trailing spiral waves. *The Astrophysical Journal*, v. 163, p. 181, 1971. Citado na página 26.
- DANVER, C.-G. A morphological investigation of some near galaxies. *Annals of the Observatory of Lund*, v. 10, 1942. Citado na página 23.
- DEBATTISTA, V. P.; SELLWOOD, J. Dynamical friction and the distribution of dark matter in barred galaxies. *The Astrophysical Journal*, IOP Publishing, v. 493, n. 1, p. L5, 1998. Citado na página 56.
- DEY, A.; SCHLEGEL, D. J.; LANG. Overview of the DESI Legacy Imaging Surveys. *AJ*, v. 157, n. 5, p. 168, maio 2019. Citado na página 42.
- ELMEGREEN, D. M.; ELMEGREEN, B. G. Arm classifications for spiral galaxies. *The Astrophysical Journal*, v. 314, p. 3–9, 1987. Citado na página 17.
- ELMEGREEN, D. M. et al. Grand design and flocculent spirals in the spitzer survey of stellar structure in galaxies (s4g). *The Astrophysical Journal*, IOP Publishing, v. 737, n. 1, p. 32, 2011. Citado na página 17.
- GRAND, R. J. J. et al. Spiral-and bar-driven peculiar velocities in milky way-sized galaxy simulations. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, Oxford University Press, v. 453, n. 2, p. 1867–1878, 2015. Citado na página 18.
- GROOT, H. Nebulæ, on the true shape of some spiral. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, v. 85, p. 535–541, 1925. Citado na página 23.
- GROOT, H. On the spiral form of some nebulae. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, v. 86, p. 146–148, 1926. Citado na página 23.

- GROSBØL, P.; PATSIS, P.; POMPEI, E. Spiral galaxies observed in the near-infrared k band-i. data analysis and structural parameters. *Astronomy & Astrophysics*, EDP Sciences, v. 423, n. 3, p. 849–859, 2004. Citado na página 18.
- HART, R. E. et al. Galaxy zoo: comparing the demographics of spiral arm number and a new method for correcting redshift bias. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, Oxford University Press, v. 461, n. 4, p. 3663–3682, 2016. Citado na página 17.
- HUBBLE, E. A relation between distance and radial velocity among extra-galactic nebulae. *Proceedings of the national academy of sciences*, National Acad Sciences, v. 15, n. 3, p. 168–173, 1929. Citado na página 15.
- IYE, M. et al. Spectral analysis of the asymmetric spiral pattern of ngc 4254. *The Astrophysical Journal*, v. 256, p. 103–111, 1982. Citado na página 21.
- JIMÉNEZ, J. A. H. *Estudo morfológico e dinâmico de NGC 5427: estruturas circum-nuclear e em grande escala*. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal do Rio Grande do Sul - Instituto de Física, 2010. Citado na página 19.
- KALNAJS, A. J. The distribution of hii regions in m31. *La Dynamique des galaxies spirales*, v. 241, p. 103, 1975. Citado na página 21.
- KENDALL, S.; CLARKE, C.; JR, R. C. K. Spiral structure in nearby galaxies—ii. comparative analysis and conclusions. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, Oxford University Press, v. 446, n. 4, p. 4155–4167, 2015. Citado na página 18.
- LEMAÎTRE, G. Un univers homogène de masse constante et de rayon croissant rendant compte de la vitesse radiale des nébuleuses extra-galactiques. In: *Annales de la Société scientifique de Bruxelles*. [S.l.: s.n.], 1927. v. 47, p. 49–59. Citado na página 15.
- LIN, C. C.; SHU, F. H. On the spiral structure of disk galaxies. Department of Mathematics, Massachusetts Institute of Technology, 1964. Citado na página 18.
- LINDBLAD, B. On the dynamics of the barred spiral nebulae. *Publications of the Astronomical Society of the Pacific*, JSTOR, v. 59, n. 351, p. 305–309, 1947. Citado 2 vezes nas páginas 18 e 19.
- MEISNER, A. M. et al. unWISE Coadds: The Five-year Data Set. *PASP*, v. 131, n. 1006, p. 124504, dez. 2019. Citado na página 42.
- PAHLEN, E. Von der. Über die gestalten einiger spiralnebel. *Astronomische Nachrichten*, v. 188, p. 249, 1911. Citado na página 23.
- PICAZZIO, E. *O céu que nos envolve: Introdução à astronomia para educadores e iniciantes*. 1st. ed. [S.l.]: Odysseus Editora, 2011. Citado 2 vezes nas páginas 14 e 17.
- PIDDINGTON, J. H. Galactic spiral arms and central spheroidal systems. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, Oxford University Press Oxford, UK, v. 136, n. 2, p. 165–183, 1967. Citado na página 18.
- PRESS, W. H. et al. *Numerical Recipes in C: The Art of Scientific Computing*. 2nd. ed. [S.l.]: Cambridge University Press, 1992. Citado na página 36.

- PUERARI, I.; DOTTORI, H. Fourier analysis of structure in spiral galaxies. *Astronomy and Astrophysics Supplement Series*, v. 93, p. 469–493, 1992. Citado na página 21.
- PUERARI, I.; DOTTORI, H. A morphological method to determine corotation radii in spiral galaxies. *The Astrophysical Journal*, IOP Publishing, v. 476, n. 2, p. L73, 1997. Citado 5 vezes nas páginas 21, 30, 32, 33 e 34.
- PUERARI, I.; DOTTORI, H. A. Spiral structure in ngc 1566. *Revista Mexicana de Astronomia y Astrofisica*, vol. 21, v. 21, p. 126–130, 1990. Citado na página 21.
- REYNOLDS, J. H. The forms and development of the spiral and allied nebulae. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, v. 85, p. 1014–1020, 1925. Citado na página 23.
- ROBERTS, W. Large-scale shock formation in spiral galaxies and its implications on star formation. *The Astrophysical Journal*, v. 158, p. 123, 1969. Citado 3 vezes nas páginas 19, 20 e 32.
- ROTS, A. H. Distribution and kinematics of neutral hydrogen in the spiral galaxy m81. *Astronomy & Astrophysics*, 1975. Citado na página 23.
- SAKHIBOV, F.; GUSEV, A.; HEMMERICH, C. Azimuthal propagation of star formation in nearby spiral galaxies: Ngc 628, ngc 3726, and ngc 6946. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, Oxford University Press, v. 508, n. 1, p. 912–925, 2021. Citado na página 18.
- SAVCHENKO, S. S.; RESHETNIKOV, V. P. Pitch angle variations in spiral galaxies. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, Oxford University Press, v. 436, n. 2, p. 1074–1083, 2013. Citado na página 21.
- VERA-VILLAMIZAR, N. et al. Analysis of resonances in grand design spiral galaxies. *The Astrophysical Journal*, IOP Publishing, v. 547, n. 1, p. 187, 2001. Citado na página 21.
- VILLAMIZAR, N. V. *Análise de Ressonâncias em Galáxias Espirais*. Tese (Doutorado) — Universidade Federal do Rio Grande do Sul - Instituto de Física, Porto Alegre, 2001. Citado 6 vezes nas páginas 18, 21, 32, 35, 54 e 84.
- WONG, K. C. et al. H0licow–xiii. a 2.4 per cent measurement of h 0 from lensed quasars: 5.3 σ tension between early-and late-universe probes. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, Oxford University Press, v. 498, n. 1, p. 1420–1439, 2020. Citado 3 vezes nas páginas 44, 59 e 74.
- YU, S.-Y.; HO, L. C. Dependence of the spiral arms pitch angle on wavelength as a test of the density wave theory. *The Astrophysical Journal*, IOP Publishing, v. 869, n. 1, p. 29, 2018. Citado na página 21.
- YU, S.-Y.; HO, L. C. On the connection between spiral arm pitch angle and galaxy properties. *The Astrophysical Journal*, IOP Publishing, v. 871, n. 2, p. 194, 2019. Citado 8 vezes nas páginas 18, 42, 50, 65, 80, 83, 84 e 85.
- YU, S.-Y.; HO, L. C. The statistical properties of spiral arms in nearby disk galaxies. *The Astrophysical Journal*, IOP Publishing, v. 900, n. 2, p. 150, 2020. Citado 5 vezes nas páginas 17, 18, 40, 41 e 42.
- YU, S.-Y. et al. The carnegie-irvine galaxy survey. vi. quantifying spiral structure. *The Astrophysical Journal*, IOP Publishing, v. 862, n. 1, p. 13, 2018. Citado 2 vezes nas páginas 21 e 85.