

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

PRISCILA FREITAS LEMES

**ANÁLISE ESPECTRO-FOTOMÉTRICA DE CANDIDATAS A
GALÁXIAS COM ANEL POLAR**

São José dos Campos, SP

2014

PRISCILA FREITAS LEMES

**ANÁLISE ESPECTRO-FOTOMÉTRICA DE CANDIDATAS A
GALÁXIAS COM ANEL POLAR**

Tese de Doutorado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Física e Astronomia, como complementação dos créditos necessários para a obtenção do título de Doutora em Física e Astronomia.

Orientador: Dr. Irapuan Rodrigues de Oliveira Filho

Co-orientador: Dr. Maximiliano Faúndez-Abans

São José dos Campos, SP

2014

TERMO DE AUTORIZAÇÃO DE DIVULGAÇÃO DA OBRA

Ficha catalográfica

Lemes, Priscila Freitas

Análise espectro-fotométrica de candidatas a galáxias com anel polar / Priscila Freitas Lemes; orientador, Irapuan Rodrigues Oliveira Filho; co-orientador Maximiliano Faúndez-Abans. - São José dos Campos, SP, 2014.

1 CD-ROM, 124 p.

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

Inclui referências

1. Física e Astronomia. 2. Galáxia com Anel Polar. 3. Galáxias em Interação. 4. Galáxias com Núcleo Ativo. 5. Cinemática das galáxias. I. Oliveira Filho, Irapuan Rodrigues, orient. II. Faúndez-Abans, Maximiliano, co-orient. III. Universidade do Vale do Paraíba. Programa de Pós-Graduação em Física e Astronomia. IV. Título.

Eu, Priscila Freitas Lemes, 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, 10 de Novembro de 2014.



Autor(a) do Obra

Data da defesa: 06 / 06 / 2014

“ANÁLISE ESPECTRO-FOTOMÉTRICA DE CANDIDATAS A GALÁXIAS COM ANEL POLAR”

Tese aprovada como requisito parcial à obtenção do título de Doutor em Física e Astronomia, 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. Dra. ÂNGELA CRISTINA KRABBE (UNIVAP) Ângela Krabbe

Prof. Dr. IRAPUAN RODRIGUES DE OLIVEIRA FILHO (UNIVAP) Irapiuan

Prof. Dr. MAXIMILIANO FAÚNDEZ ABANS (LNA/MCTI) Max Abans

Prof. Dr. PAOLO REPETTO (LNA/MCTI) Paolo Repetto

Prof. Dr. PAULO CÉSAR DA ROCHA POPPE (UEFS) Poppe

Prof^a. Dra. Sandra Maria Fonseca da Costa
Diretora do IP&D – Univap
São José dos Campos, 06 de junho de 2014.

“Por vezes sentimos que aquilo que fazemos não é senão uma gota de água no mar. Mas o mar seria menor se lhe faltasse uma gota.”

MADRE TERESA DE CALCUTÁ

AGRADECIMENTOS

A elaboração de uma Tese é algo fantástico. E ao fim deste divertido trabalho gostaria muito de fazer alguns agradecimentos.

Primeiramente a Deus, que primeiro me amou, agradeço pela vida, saúde e oportunidades proporcionadas, ao que um dia espero retribuir com a minha evolução.

Um agradecimento repleto de amor aos meus verdadeiros heróis, meus pais Stela e Celso. Eles que conseguem me surpreendem a cada dia e me dão a cada momento um motivo extra para sorrir. Ao meu irmão, Matias, que com alegria me acompanha em todo os momentos. E a toda minha família que sempre esteve ao meu lado, mesmo quando eu tinha pouco a oferecer. Ao Pedro, pelo companheirismo e carinho.

Aos meus amigos, pessoas incríveis, que escolhi para multiplicar alegrias e dividir as tristezas. Obrigado por aceitarem os meus defeitos e enaltecerem as minhas virtudes. Sem vocês o mundo seria muito, muito mais chato.

À Univap, minha segunda casa há mais de dez anos. Gostaria de agradecer por possibilitar a minha formação do Ensino Médio ao Doutorado, o meu primeiro emprego, e por *simplesmente* ser cenário de muitas das minhas melhores amizades, seja no campus Urbanova, Castejón ou Aquárius.

Nunca tinha sonhado em ser astrônoma. Na verdade, nem sabia ao certo o que era astronomia. Isso tudo mudou graças ao Irapa. O que sou na astronomia, devo a ele. Obrigada por me escolher, me propor uma ideia, acreditar em mim e me orientar ao longo de todos esse anos. Trabalhar contigo, *subir e descer as rampas* e ser sua primeira doutoranda-orientada são motivos de grande orgulho pra mim. Obrigado por tudo.

Ter a sua pesquisa valorizada e discutida intensamente é um dos desejos de todo doutorando. Situações que o Max sempre me proporcionou. Muito obrigada por sempre me inserir em discussões repletas de conhecimento, tenho certeza que elas foram essenciais para a minha formação crítica e importantes para *abrir a minha mente* para pesquisas futuras.

Agradeço ao grupo de Física & Astronomia da UNIVAP, colegas e professores, pelas horas compartilhadas nesses último anos. Ao Dr. Oli Dors Jr pela amizade e confiança. Aos funcionários do Observatório Pico dos Dias, pela ótima companhia nas noites de observação. Por fim, agradeço à FAPESP (processo 2010/17136-4) pelo financiamento do Doutorado.

PRISCILA FREITAS-LEMES

ANÁLISE ESPECTRO-FOTOMÉTRICA DE CANDIDATAS A GALÁXIAS COM ANEL POLAR

RESUMO

Sabe-se hoje que as interações entre galáxias são muito comuns. Em certos tipos de interações, formam-se sistemas conhecidos como galáxias com anel polar (PRGs), compostos por uma galáxia hospedeira de tipo lenticular, elíptica ou espiral, rodeada por um anel de gás e estrelas que orbitam num plano aproximadamente polar. Este trabalho tem como objetivo estudar a cinemática, morfologia e química das PRGs usando como base um conjunto de dados observacionais que coletamos nos últimos anos. A morfologia em diferentes bandas, os mapas de cores, as distribuições de velocidades radiais e a determinação de abundâncias químicas, foram usados para caracterizar este grupo de galáxias ainda pouco estudado. Contamos com uma amostra de 5 PRGs e candidatas: AM 2020-504, AM 2229-735, ESO 238-G002, HRG 54103 e NGC 5122. As PRGs são sistemas em interação que apresentam algumas características que as diferenciam das demais galáxias, como a presença de dois eixos de rotação desalinhados (anel e hospedeira), com diferenças de idade e cor entre o anel e a galáxia hospedeira, além de uma alta taxa de núcleos ativos. Essas e outras características são alvos do nosso estudo, uma vez que a compreensão desses parâmetros é essencial para entendermos a história de formação desses sistemas.

Palavras-chave: 1. Galáxia com anel polar. 2. Galáxias em interação. 3. Galáxias com núcleo ativo. 4. Cinemática de galáxias. 5. Imageamento e Espectroscopia.

SPECTROPHOTOMETRIC ANALYSIS OF POLAR RING GALAXY CANDIDATES

ABSTRACT

It is well established today that interactions between galaxies are very common. In some types of interactions, systems known as polar ring galaxies (PRGs) are formed. They are composed of a lenticular, elliptical or spiral host galaxy, surrounded by a ring of gas and stars that orbits around its polar plane. This work aims to study the kinematics, morphology and chemistry of PRGs based on a set of observational data we collect in recent years. The morphology in different bands, color maps, radial velocities distributions and chemical abundances were used to characterize this group of galaxies still scarcely studied. We have a sample of 5 PRGs and candidates: AM 2020-504, AM 2229-735, ESO 238-G002, HRG 54103 and NGC 5122. PRGs are interacting systems that have some features that differentiate them from other galaxies, such as the presence of two offset rotation axes (ring and host), differences in age and color between the ring and the host galaxy, and a high rate of active nuclei. These and other features are targets of our study since the understanding of these parameters is essential to understand the formation history of such systems.

Keywords: 1. Polar ring galaxies. 2. Interacting galaxies. 3. Active galactic nuclei. 4. Kinematics of galaxies. 5. Imagery and spectroscopy.

LISTA DE FIGURAS

		<u>Pág.</u>
1	Duas galáxias gigantes em combate gravitacional.	21
2	Formação do anel polar no sistema Arp 87.	25
3	Esquema da distribuição das galáxias aneladas.	27
4	Cenário de <i>merger</i> para formação de PRGs.	30
5	Cenário de acréscimo para formação de PRGs	32
6	Cenário de formação do anel polar via acréscimo de filamentos cósmicos.	33
7	Diagrama de Diagnóstico classificando o tipo de ionização predominante de 24 PRGs.	37
8	As galáxias selecionadas.	38
9	Redução dos dados fotométricos.	42
10	Posição das fendas das PRGs estudadas.	45
11	Redução de dados espectroscópicos.	47
12	Tratamento de imagens: filtragem.	48
13	A Galáxia com Anel Polar AM 2020-504.	53
14	Análise espectral da galáxia AM2020-504.	56
15	Gradiente de $12+\log(O/H)$ na AM 2020-504.	57
16	Imagem e espectro da galáxia AM 2229-735.	60
17	Resultados da fotometria de abertura da galáxia AM 2229-735.	62
18	Imagem da galáxia AM 2229-735 após o processo de filtragem.	63
19	Perfil de velocidade radial da galáxia AM 2229-735.	64
20	Diagramas de diagnóstico da galáxia AM 2229-735.	65
21	Distribuição espacial da abundância de oxigênio para a galáxia AM 2229-735.	65
22	Apresentação da galáxia ESO 238-G002.	67
23	Espectro nuclear e curva de rotação da galáxia ESO 238-G002.	68
24	Diagrama de Diagnóstico e distribuição da densidade eletrônica da galáxia ESO 238-G002.	69
25	Imagem e espectro nuclear da galáxia HRG 54103	71
26	Resultados da Fotometria de Abertura da galáxia HRG 54103.	72
27	Perfil de velocidade radial da galáxia HRG 54103 para o anel e galáxia hospedeira.	73
28	Diagrama de diagnóstico da galáxia HRG 54103.	74
29	Síntese da população estelar da galáxia HRG54103.	75
30	Distribuição espacial da abundância de oxigênio para a galáxia HRG54103.	77
31	Imagem na Banda R da galáxia NGC 5122.	78
32	Imagem da galáxia NGC 5122 mostrando a faixa de poeira identificada.	79
33	Espectro nuclear e perfil de velocidade da galáxia NGC 5122.	80

34	Diagrama de diagnóstico da galáxia NGC 5122.	80
35	Diagrama mostrando a distribuição de PRGs no plano redshift x magnitude R.	84
36	Diagrama cor magnitude B x (B-R).	86
37	Diagrama de diagnóstico da amostra de PRGs.	88
38	Relação entre $12+\log(O/H)$ e Magnitude B.	89

LISTA DE TABELAS

	<u>Pág.</u>
1	Informações gerais das galáxias estudadas. 40
2	Log das imagens obtidas 43
3	Log das observações espectroscópicas. 44
4	Estrelas padrões usadas na calibração em fluxo dos espectros. 46
5	Linhas de emissão da galáxia AM 2020-504. 55
6	Dados da fotometria de abertura da galáxia AM 2229-735. 61
7	Intensidade de linhas de emissão para a galáxia HRG 54103. 76
8	Diferença de velocidade da Galáxia Hospedeira e o Anel. 85

SUMÁRIO

Pág.

LISTA DE FIGURAS

LISTA DE TABELAS

1	Introdução	19
1.1	As Galáxias	19
1.1.1	Interação de Galáxias: Os Primórdios	21
1.1.2	Pontes e Caudas Galácticas	23
1.1.3	As Galáxias Aneladas	24
1.2	Galáxias com Anel Polar	27
1.2.1	Formação	29
1.2.2	Classificação das Galáxias com Anel Polar	33
1.2.3	PRGs e Atividade Nuclear	34
1.3	A Amostra de PRGs Seleccionadas	36
1.4	Objetivos	37
2	Análise Espectral, Fotométrica e Morfológica de Galáxias com Anel Polar	41
2.1	Observação e Redução de dados	41
2.1.1	Imagens Ópticas de Banda Larga	41
2.1.2	Observações Espectroscópicas	43
2.2	Análise Morfológica	46
2.3	Análise Fotométrica	47
2.4	Estudo da Cinemática	48
2.5	Análise Espectral	49
3	Resultados e Discussões	53
3.1	AM2020-504	53
3.1.1	Conclusão Individual	58
3.2	AM2229-735	59
3.2.1	Conclusão Individual	64
3.3	ESO238-G002	67
3.3.1	Conclusão Individual	70
3.4	HRG54103	71
3.4.1	Conclusões Individuais	75

3.5	NGC5122	78
3.5.1	Conclusões Individuais	80
4	Conclusões	83
4.1	Visão Geral das PRGs	83
4.2	Trabalhos Futuros	90
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	91
	Apêndice 1	105
	Apêndice 2	106

1 Introdução

Um dos maiores objetivos da astrofísica sempre foi explicar a formação e a evolução dos objetos astronômicos. A evolução das galáxias, por exemplo, ocorre em escala de tempo tão grande que nós, observadores terrestres, não temos como medir diretamente. Por isso, o uso de técnicas e a formulação de teorias que nos ajudem a estudar e entender a evolução desses sistemas ao longo do tempo se fazem necessários. Esse conhecimento nos ajuda a identificar marcas na cinemática e na composição química que o processo evolutivo deixou. A presença de determinados elementos e a forma com que são distribuídos no sistema nos dão dicas de processos importantes sobre o objeto.

No processo evolutivo das galáxias, o evento que mais altera as suas características morfológicas e cinemáticas é o processo de interação com outros objetos que tenham dimensões compatíveis, como o choque de duas galáxias.

1.1 As Galáxias

Sempre deslumbrantes, as galáxias são os blocos fundamentais do Universo. A curiosidade em estudá-las e tentar compreender como se formam, evoluem e como serão no futuro é quase inevitável. Desde que Galileu em 1610 apontou um telescópio para a Via-Láctea e descobriu que ela era constituída por um grande número de estrelas fracas, e não por um “*fluido celestial*”, uma história de descobertas em torno das galáxias começou a eclodir. O grande passo histórico, no estudo das galáxias, foi dado século XVIII, quando [KANT \(KANT, 1755\)](#) [Kant \(1755\)](#) publicou o seu tratado “História Natural Genérica e Teorias dos Céus”, onde sugeriu, entre outras coisas, que o sistema solar poderia ser um, entre os diversos sistemas solares presentes na “nossa nebulosa”, e que algumas manchas de luz vistas no céu poderiam ser na verdade sistemas complexos parecidos com a Via-Láctea, só que vistos a grande distâncias e em uma grande variedade de ângulos, dependendo da linha de visada.

O primeiro catálogo de “nebulosas” foi criado ainda no século XVIII, pelo astrônomo caçador de cometas Charles Messier, em 1771. Messier elaborou um catálogo inicialmente com o objetivo de facilitar a identificação dos passos dos cometas após ter descoberto uma nebulosa logo acima do “chifre” mais austral da constelação de Touro, enquanto procurava observar o cometa daquele ano. O catálogo possui 110 objetos e ainda hoje é utilizado, por exemplo, para designar a galáxia Andrômeda, a M 31.

No meio do século XIX, muitos novos objetos foram descobertos, e então veio a necessidade de um novo catálogo. Compilado por [Herschel \(1864\)](#), o catálogo conhecido como GC - do inglês *General Catalog*, contava com cerca de 5 000 aglomerados de estrelas e nebulosas (hoje sabemos que muitas são galáxias). Em pouco mais de 20 anos do

lançamento do GC, o número de novos objetos era tão grande, que Dreyer (1888) lançou o Novo Catálogo Geral de Nebulosas e Aglomerados de Estrelas – conhecido como NGC. Inicialmente com 8 000 objetos e depois expandido com outros 5 000 objetos novos (os Index Catalogues I e II – IC), é ainda um dos catálogos mais utilizado pela astronomia. Nesta época, por mais que os objetos já estivessem catalogados, ainda não se sabia a natureza desses objetos.

A melhor explicação sobre esses objetos veio em 1912, quando Slipher realizou estudos espectrográficos das nebulosas espirais e descobriu que elas tinham altos desvios para o vermelho, se afastavam a velocidades maiores do que a velocidade de escape da nossa galáxia, ou seja, não estavam gravitacionalmente ligadas a nossa Galáxia (SLIPHER, 1913; 1915).

A hipótese de que as nebulosas espirais seriam galáxias independentes foi proposta por Curtis (1917), que se embasou na observação de uma supernova na “nebulosa de Andrômeda” (M 31). Essa hipótese só foi confirmada no início da década de 20, quando Opik determinou a distância de diversas outras nebulosas, baseado na teoria da Nebulosa de Andrômeda (OPIK, 1922).

O desenrolar definitivo desta história, entretanto, veio com um dos mais famosos astrônomos até hoje, Edwin Hubble (HUBBLE 1922; 1930; 1936). Durante o período de 1922-1936 ele fez pelo menos três descobertas fundamentais. A primeira grande descoberta foi anunciar que a nossa galáxia é apenas uma entre milhões de galáxias similares que povoam o Universo. A segunda, e talvez mais famosa, foi que o Universo em si está em expansão. E, a terceira, é que depois de estudar a morfologia de milhares de galáxias, Hubble concluiu que elas podem ser classificadas em uma sequência definida por três formas: elipsoidais, discoidais e irregulares.

Originalmente pensava-se que a classificação de galáxias proposta por Hubble estava associada à sua evolução. A ideia original propunha que as galáxias Esfero-Elípticas (E 0) se achatavam durante o processo evolutivo, tornando-se semelhantes às galáxias Lentas-Finas (E 7) que, por sua vez, vinham a se tornar galáxias Espirais (S) ou Espirais Barradas (S_{ba}, por exemplo), com o núcleo cortado por uma barra. Havia ainda as galáxias irregulares, que apresentam uma estrutura privadas de qualquer simetria circular ou rotacional.

As galáxias irregulares tendem a ser menores do que as galáxias espirais e as elípticas, e também mais azuladas. Apresentam uma distribuição aleatória de estrelas, com estrelas jovens e velhas. É comum encontrarmos nas galáxias irregulares regiões de intensa formação estelar. Algumas galáxias irregulares ainda apresentam sinais de uma barra ou de um braço espiral, como é o caso da Grande Nuvem de Magalhães, que apresenta

Figura 1 - À esquerda está a galáxia espiral M81, cercada por braços espirais azuis. À direita, envolvida por um gás vermelho e nuvens de poeira, está a galáxia irregular M82. Esta vista deslumbrante mostra essas duas galáxias gigantes em combate gravitacional. Em alguns bilhões de anos, apenas uma galáxia elíptica permanecerá.



Fonte: HUBBLESITE (2014).

resquícios de uma barra estelar e indícios de um braço espiral. Os objetos que compõem a categoria das galáxias irregulares frequentemente são o resultado da colisão de duas ou mais galáxias, ou de perturbações originadas de fortes interações gravitacionais de maré de uma galáxia próxima, como é o caso da única galáxia irregular do catálogo Messier, a M82. A estrutura dessa galáxia sofreu fortes modificação por causa da influência de sua companheira, a M81, veja [Figura 1](#).

1.1.1 Interação de Galáxias: Os Primórdios

Galáxias em interação (ou em colisão) são aquelas que fazem parte de um sistema de duas ou mais galáxias que tenham um encontro gravitacional, e que ao longo do processo irá perturbar a cinemática e a composição química das galáxias envolvidas. As colisões entre galáxias modificam substancialmente as estruturas cósmicas do Universo. Estes fenômenos são implacavelmente determinados pelo caráter puramente atrativo da força da gravidade, que por sua vez induz na interação dos grandes sistemas a força de maré, o atrito dinâmico, etc ([RODRIGUES et al., 1999](#)). Os efeitos mais importantes são ocasionados pela força de maré, modificando profundamente as estruturas visíveis e também o halo de matéria escura. O processo de interação entre duas galáxias envolve uma quantidade enorme de energia. Se considerarmos duas galáxias com massa da ordem de $10^{12} M_{\odot}$, com velocidade de colisão típica de 300 km/s, a energia de colisão envolvida é de 10^{53} J, que é equivalente a 10^{8-9} supernovas. E, em parâmetros terrestres, são extremamente lentas, durando cerca de 3×10^8 anos.

A colisão de galáxias vem sendo estudada há anos desde que os astrônomos perceberam que uma porcentagem das galáxias mostram distorções fortes, e algumas apresentavam indício de que estariam colidindo. Um dos pioneiros nesta área foi Zwicky, um astrônomo suíço já bem conhecido. Ele estimou que a massa dos aglomerados de galáxias deveria ser pelo menos dez vezes maior do que a matéria visível do aglomerado (ZWICKY, 1942). Estas conclusões foram obtidas usando o telescópio de 46 cm, situado no Monte Palomar – EUA, mesmo equipamento que mais tarde usou para fotografar todo o céu do hemisfério norte e identificar as galáxias que estavam passando pelo processo de interação. Ele compilou um catálogo que continha 29 418 objetos interconectados ou em grupos (ZWICKY; HUMASON, 1961). Observando as imagens, ele concluiu que muitos dos filamentos estreitos eram decorrentes da interação gravitacional entre duas ou mais galáxias. De forma independente, Holmberg (1941) chegou a resultados similares.

Holmberg (1941) usou em seus trabalhos o que podemos considerar como os primeiros modelos de galáxias para simulação. A sua técnica consistia em um computador analógico equipado com lâmpadas e células fotoelétricas. A queda da intensidade da luz de $1/r^2$ representava as forças gravitacionais. Para representar as galáxias ele usava cerca de 37 partículas para cada galáxia (74 partículas no total) e baixa resolução temporal. Usando esta técnica ele conseguiu comprovar as deformações de maré.

Um dos trabalhos mais significativos e inovadores sobre o efeito causado pelo processo de interação entre duas ou mais galáxias foi publicado na *Physics Today*, em 1953, por Zwicky. Neste trabalho, ele afirmava que os filamentos da galáxia M 51 eram restos de material do processo de interação e ainda pressupôs corretamente que as pontes fossem compostas por material visto quase de lado. Enfatizou, ainda, que a maior parte da matéria visível em pontes e caudas galácticas era constituída de estrelas (ZWICKY, 1956; ZWICKY; HUMASON, 1959). Alguns astrofísicos da época estavam duvidosos quanto ao fato dessas pontes serem produzidas *somente* pelo efeito da força de maré (ZASOV, 1968). O próprio Zwicky se referiu às suas ideias como sendo heterodoxas (ZWICKY, 1963). Vorontsov-Velyaminov (1962) argumentava que caudas tão finas e grandes, chegando a cerca de 100 000 pc, não poderiam ter sido produzidas somente pela gravidade.

A confirmação das ideias sobre o processo de interação e a teoria das pontes e caudas de maré só foi realmente aceita em 1972, quando o renomado astrônomo Alar Toomre provou que as forças de maré são responsáveis pelas caudas. Nesta fase, já se acreditava que a interação entre galáxias podia ser importante para explicar as diferentes populações estelares encontradas nas galáxias. Esta hipótese teve os seus primeiros indicativos por Holmberg (1958), quando encontrou no seu levantamento fotométrico de galáxias uma correlação entre as galáxias que possuíam companheiras e a cor azul, dando assim os primeiros indícios de que durante o processo de interação era disparado o processo de

formação de estrelas. Nas últimas décadas houve um grande acúmulo de evidências de que a presença de galáxias companheiras podem levar a uma maior atividade nuclear (HUMMEL, 1981; DAHARI, 1985; KELL, 1985; BUSHOUSE, 1986) e também a um acentuado aumento da formação de estrelas (LARSON; TINSLEY, 1978; CONDON et al., 1982; JOSEPH et al., 1984).

Na segunda metade do século passado, surgiram duas teorias sobre a formação e evolução de galáxias: a monolítica e a hierárquica. O modelo monolítico diz que as galáxias se formaram e evoluíram isoladamente através do colapso de grandes nuvens de gás. Já no modelo hierárquico, acredita-se que as primeiras galáxias a surgirem no Universo seriam pequenas e nasceriam nos maiores poços de potencial gerados pela distribuição primordial de matéria escura (PEACOCK, 1999). A formação de galáxias maiores e mais massivas se daria por meio de interações e fusões consecutivas. A teoria hierárquica vem sendo comprovada com a detecção de galáxias em altos redshifts. Bouwens et al. (2011) encontraram uma das galáxias mais distantes até hoje identificadas, com *redshift* $z = 10$. Usando o telescópio Hubble, eles analisaram as mudanças que se produziram nas galáxias de 480 milhões a 650 milhões de anos após o Big Bang e detectaram que a taxa de nascimento das estrelas no Universo aumentou cerca de dez vezes durante esse período, dados consistentes com o modelo de formação hierárquica das galáxias.

1.1.2 Pontes e Caudas Galácticas

A cauda de maré é uma região fina e alongada gerada a partir do processo de interação, composta por gás e estrelas, que se estende próxima da galáxia em interação. A força de maré pode ejetar uma quantidade significativa de matéria para a cauda. Na galáxia Arp 244 (Galáxia das Antenas), por exemplo, quase metade do gás está localizado nas caudas (GAO et al., 2001). Nas galáxias que apresentam cauda, estima-se que aproximadamente 10% da formação estelar aconteça nas caudas (JARRETT et al., 2006), o que corresponde, segundo Naeye (2007), a aproximadamente 1% de toda formação estelar do Universo conhecido.

O primeiro trabalho a estudar em detalhes as caudas de maré foi o de Toomre e Toomre (1972). Neste trabalho foram apresentadas três propriedades fundamentais do processo de interações por maré. A primeira relaciona a força de maré ao inverso do cubo da separação entre as galáxias. A segunda, diz que as forças de maré sobre um objeto tendem a alongá-lo, e, a terceira, diz que a distribuição de matéria ao longo da interação é em parte reflexo da conservação do momento angular das galáxias antes do choque.

Os irmãos Toomre conseguiram reproduzir, através de simulações numéricas, diversos pares de galáxias em interações espetaculares. No decorrer da interação podem se formar pontes de matéria entre os dois sistemas interagentes, bem como caudas de maté-

ria que saem de cada galáxia em direções opostas. As caudas e pontes formadas podem assumir formas exóticas, por causa da rotação das galáxias, e podem parecer ainda mais estranhas se considerarmos que os movimentos orbitais das galáxias estarão em um plano que forma um ângulo qualquer com a nossa linha de visada.

Foi a evolução dos computadores que facilitou o estudo do processo de interação e o seu entendimento mais profundo. As simulações mostraram que o processo de fusão é relativamente rápido. Estudos com a galáxia Arp 81 mostraram que a aproximação máxima ocorreu há cerca de 100 milhões de anos (KEEL; Borne, 2003). Alguns astrônomos chegaram a propor que as galáxias elípticas só se formassem por meio do *merger* de galáxias de massas similares, mas esta suposição foi derrubada baseada na população velha que compõe várias galáxias elípticas. Hoje, a estimativa é que 10% das galáxias elípticas seja resultado do processo de interação (VIEGAS, 2004).

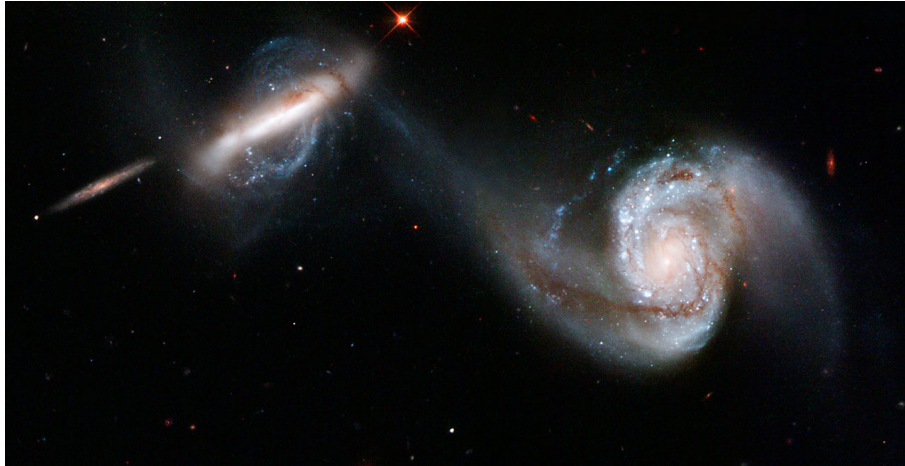
Nos estágios finais da fusão, as galáxias encontram-se fora do equilíbrio estatístico, o que impulsiona o espalhamento e a redistribuição das estrelas, que buscam atingir uma nova configuração de equilíbrio. Isso faz com que o sistema relaxe muito violentamente antes de entrar em um estado quase-estacionário. Lynden-Bell e Wood (1968) chamaram este processo de relaxação violenta. Com uma descrição estatística e uma derivação da função de distribuição do espaço de fase para o equilíbrio estelar eles demonstraram que o processo de relaxação violenta pode chegar a uma função de distribuição quase-estacionária de não equilíbrio em uma escala de tempo relativamente pequena. A velocidade do processo de interação também está relacionada com a taxa de decaimento orbital. Por exemplo, as fusões ocorrem com mais rapidez quando o momento angular das galáxias está dirigido no mesmo sentido de suas órbitas, do que quando elas giram no sentido oposto (VIEGAS, 2004).

Nem todo processo de interação termina na fusão dos objetos interagentes. Em alguns casos, as galáxias passam pelo processo de interação, que deixa marcas nas galáxias envolvidas, e depois seguem o seu percurso. Em alguns dos casos, o processo de interação cria novas estruturas, como por exemplo anéis. Um exemplo de galáxias em interação é o sistema Arp 87 (Figura 2). Neste sistema, ambas as galáxias se distorceram pelo processo de interação gravitacional. As estrelas, o gás e a poeira da galáxia espiral NGC 3808 formaram uma estrutura parecida com um *saca-rolhas*. O gás da galáxia maior está envolvendo a galáxia menor com o gás capturado através da atração gravitacional. Estudos revelaram que o gás capturado pela galáxia menor se tornará um Anel Polar.

1.1.3 As Galáxias Aneladas

Dentre os diversos tipos de galáxias, algumas apresentam anéis, sendo chamadas de galáxias aneladas. Existem dois tipos de galáxias aneladas: as normais e as peculiares

Figura 2 - Arp 87 é um par de galáxias em interação. Ambas galáxias foram distorcidas pelo processo de interação gravitacional. Estrelas, gás e poeira da galáxia espiral NGC 3808 formam uma estrutura parecida com um *saca-rolhas* e envolve a galáxia menor com o gás capturado através da atração gravitacional. O gás capturado pelo galáxia menor se tornará um Anel Polar.



Fonte: HUBBLESITE (2013).

FAÚNDEZ-ABANS; DE OLIVEIRA-ABANS, 1998, como é apresentado na Figura 3.

As *galáxias aneladas normais* geralmente são galáxias espirais barradas com anel interno. A formação do anel se deve à ressonância da barra com alta velocidade em relação as estrelas e o gás (BUTA, 1995). Na sua maioria as galáxias aneladas deste tipo apresentam um anel interno, que compartilha da mesma idade, composição química e cor da galáxia hospedeira.

Já as *galáxias aneladas peculiares* são formadas pelo processo de interação com o meio ou com outras galáxias e são bem mais raras – cerca de uma em 10^4 galáxias BINNEY; TREMAINE, 1987. Dois fatores fazem com que as galáxias aneladas peculiares sejam raras: terem uma vida curta, e, serem produzidas apenas em colisões próximas BINNEY; TREMAINE, 1987.

As galáxias aneladas, foram identificadas e classificadas pela primeira vez em 1976, quando Theys, baseado no catálogo Arp (1966), propôs a categoria “R”, destinada às galáxias com anel (do inglês *ring* – R). A sua motivação em estudar esses objetos ia além do fato de serem incomuns, mas também por querer provar que esses sistemas podiam ser estáveis. Com base na densidade média do material constituinte das galáxias, Theys e Spiegel (1976) concluíram que o anel da maioria das galáxias aneladas é formado depois da galáxia principal e que esse fato fornece a possibilidade de estudar a dinâmica galáctica. Buta (1995), classifica as galáxias aneladas em três categorias: **Anéis Colisionais**: quando

o anel é formado por uma onda de choque em expansão; **Anéis Polares**: quando o anel está em um plano aproximadamente perpendicular ao plano da galáxia principal; e **Anéis Ressonantes**: quando o anel é formado pela ação de torques gravitacionais.

Hoje, a classificação mais utilizada se baseia na morfologia do anel FAÚNDEZ-ABANS; DE OLIVEIRA-ABANS, 1998, que está diretamente ligada com os mecanismos de formação, podendo variar de tamanho, elipticidade, e a presença (ou não) de um objeto central, comumente chamado de galáxia hospedeira. As categorias de galáxias aneladas peculiares são:

Anéis Irregulares: Destinada às galáxias que apresentam caudas curvas, pseudo-anéis ou anéis *vazios*, como é o caso da galáxia Arp 147.

Anéis Centralmente Suaves: Galáxias que apresentam anéis com nódulos e o interior a este aparece "vazio", não apresentando estruturas como bojo ou núcleo, como HRG 50201.

Anéis Elípticos: Apresentam anéis elípticos que, em geral, mostram perturbações em sua estrutura, como por exemplo a AM 0644-741.

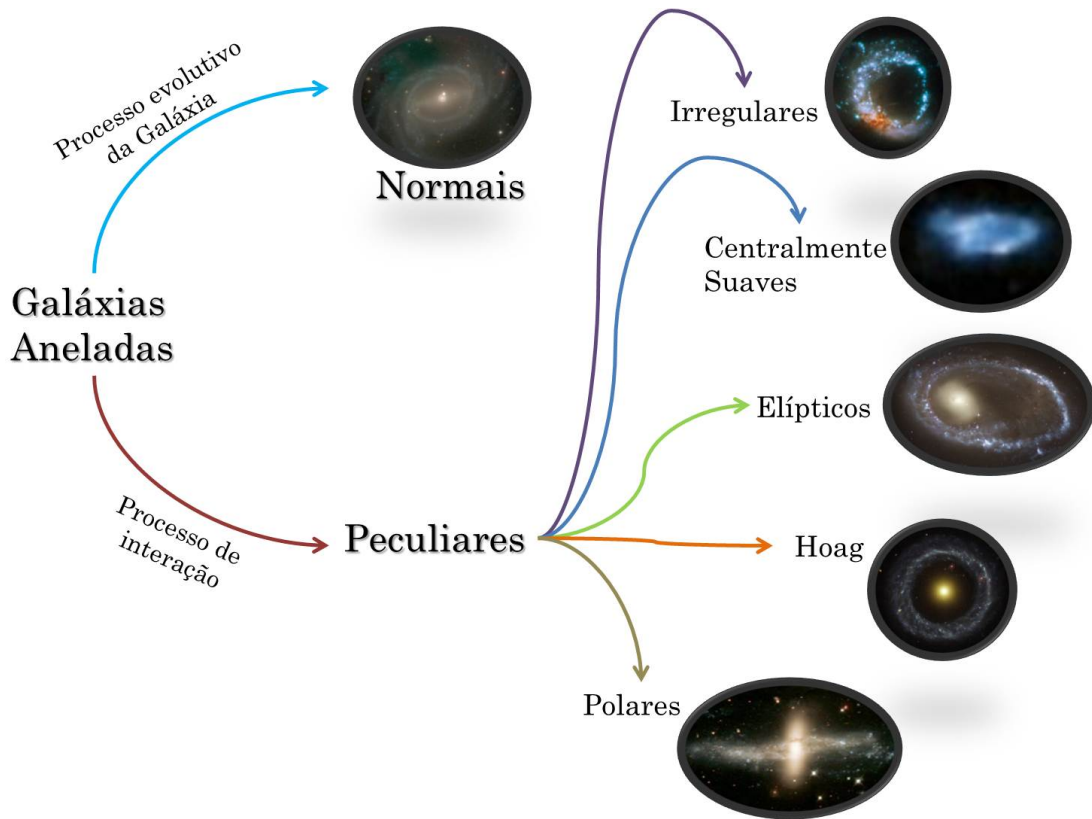
Anéis Hoag: As galáxias aneladas deste tipo contém um anel circular em torno de um bojo pequeno. O anel e a galáxia hospedeira compartilham o mesmo plano.

Anéis Polares: São formadas por uma galáxia hospedeira rodeada por um anel de gás, poeira e estrelas que orbita em um plano aproximadamente polar ao plano principal da galáxia hospedeira.

A [Figura 3](#) apresenta um diagrama resumindo e exemplificando as categorias de galáxias aneladas.

As galáxias aneladas peculiares em todos os casos, representam interações em andamento entre galáxias SCHWEIZER; WHITMORE; RUBIN, 1983. Galletta, Sage e Sparke 1997 apresentaram observações na linha de $COJ = 1 - 0(l = 2.6mm)$ de 10 desses sistemas e deduziram as massas de gás desses sistemas no intervalo $7 \times 10^7 - 2 \times 10^{10} M_{\odot}$, com uma média de $1 \times 10^9 M_{\odot}$. Essas massas são maiores que o valor médio de massa molecular em uma galáxia de tipo inicial. Eles concluíram que muitas vezes, a galáxia que deram origem ao anel, pode ser a fonte do gás molecular detectado, arrancado via forças de maré. A compreensão da distribuição de HI também é importante para o estudo das galáxias aneladas. [Struck et al. \(1996\)](#) mapearam a distribuição de hidrogênio neutro próximo à galáxia anelada Cartweel e, através da trilha de hidrogênio neutro, identificaram a galáxia intrusa que colidiu com a galáxia discoidal e formou o anel.

Figura 3 - Esquema resumindo e exemplificando os diversos tipo de galáxias aneladas.



Fonte: a autora.

1.2 Galáxias com Anel Polar

Dentre as galáxias aneladas a configuração geométrica mais restrita é a das galáxias com anel polar (do inglês *Polar Ring Galaxy* - PRG), objetos de estudo deste trabalho. Galáxias com anel polar são formadas por uma galáxia hospedeira rodeada por um anel de gás, poeira e estrelas que orbita em um plano aproximadamente polar. Acredita-se que os anéis polares se formam durante um evento secundário em torno de uma galáxia pré-existente. Se pensarmos no processo de formação de galáxias, uma nuvem protogaláctica pode dar origem a dois sistemas cujos eixos de rotação são desalinhados. Neste contexto, poderíamos imaginar a galáxia hospedeira e o anel como estruturas coetâneas. Contudo, anéis polares são sistematicamente mais jovens que as galáxias hospedeiras, geralmente pobres em gás. Quanto à população estelar, nos anéis ela é jovem, enquanto que as galáxias hospedeiras contém estrelas velhas, como indicam, por exemplo, os seu índices de cor (IODICE et al., 2002a). Podemos assim admitir que uma PRG é fruto de uma interação entre a galáxia hospedeira previamente formada com o meio ou com outra galáxia.

No caso das PRGs, o material externo, rico em gás, em órbita quase-polar, parece ser adquirido posteriormente já que não compartilha nem a rotação e nem o eixo de simetria da galáxia hospedeira. As hospedeiras são geralmente galáxias discoideais de tipo inicial (S0). Há exceções quanto ao tipo de hospedeira, como no caso de AM 1934-563, cuja hospedeira é uma galáxia espiral (RESHETNIKOV et al., 2006) ou como em AM 2020-504, cuja hospedeira é elíptica (WHITMORE et al., 1987; FREITAS-LEMES et al. 2012b).

O trabalho de Whitmore et al. (1990) foi o primeiro a catalogar PRGs. No seu atlas, Whitmore identificou 157 objetos que podem ser PRGs. Ele classificou esses objetos em 4 categorias: as PRGs *cinematicamente confirmadas* - 6 objetos, rotulados com a letra A, as *Boas candidatas* - 27 objetos, rotulados com a letra B, as *possíveis candidatas à PRG* - 73 objetos, rotulados pela letra C e, por fim, as *possivelmente relacionadas a PRGs* - 51 objetos, rotulados pela letra D. Um novo catálogo de PRGs foi publicado por Moiseev et al. (2011), que complementa o catálogo de Whitmore et al. (1990) e aumenta significativamente o número de PRGs conhecidas. Baseado nos dados do *Sloan Digital Sky Survey* (SDSS), foram identificadas 275 novas galáxias com anel polar ou candidatas. No novo catálogo foram identificadas 70 galáxias que foram classificadas como *melhores candidatas*, 115 boas candidatas, 90 classificadas como objetos relacionadas a PRGs. Reshetnikov; Faúndez-Abans; de Oliveira-Abans, 2001 confirmaram cinematicamente a PRG ESO 576-G69 como uma galáxia membro da categoria A de Whitmore.

Entre os diferentes tipos de galáxias aneladas, as PRGs destacam-se pela frequência do fenômeno de atividade nuclear. Sendo as PRGs frutos da interação gravitacional, o processo de interação deve representar um papel importante no aparecimento do fenômeno da atividade nuclear.

Mais um ponto interessante que pode ser explorado com base nas PRGs é o estudo da matéria escura. Com a presença de dois sistemas diferentes, interagindo a uma pequena distância, podemos mapear a distribuição da matéria escura. Quanto mais matéria escura há no sistema, mais rápido ele gira. Ao comparar a velocidade de rotação do anel com a do disco da galáxia hospedeira, podemos identificar o formato do halo de matéria escura (achatado ou esférico). Se o anel estiver em equilíbrio e as velocidades do disco e do anel forem semelhantes a um mesmo raio, o halo terá formato esférico, se for achatado ao longo da galáxia hospedeira, o halo é oblato. A forma dos halos de matéria escura podem ser confrontados com o mecanismo de formação das PRGs, sendo mais uma informação importante para a compreensão de como esses sistemas são formados. Segundo Bournaud e Combes (2003), a única solução para se formar um halo de matéria escura achatado ao longo do anel polar, é que uma grande parte da matéria escura seja de gás frio, capturado durante o processo de interação de uma galáxia doadora.

O modelo de Bournaud e Combes (2003) prediz que se existe um halo de matéria escura, as velocidades do anel devem ser maiores do que o esperado para o disco, se o halo é achatado em relação ao anel polar. Combes (2006) afirma que um halo achatado em PRG requer menos matéria escura para explicar as velocidades mais altas. Esta proposta não tem uma correlação com as declarações de Reshetnikov e Sotnikova (1997) que introduzem um halo de matéria escura esférica para dar conta das estruturas de anéis prolongados.

1.2.1 Formação

Acredita-se que os anéis polares se formam durante um evento secundário em torno de uma galáxia pré-existente. Não há um consenso sobre a formação de PRGs. Podemos agrupar os vários mecanismos propostos na literatura para formação de PRGs em:

(1) **merger entre duas galáxias.** Foi simulado pela primeira vez por BEKKI, 1997a; 1998. Neste cenário as galáxias envolvidas podem ter diferentes relações de massa, das quais pelo menos uma é rica em gás. Quando a velocidade relativa é alta, formam-se sistemas do tipo *Cartwheel*, que não contêm anéis polares. Entretanto, se a velocidade relativa for baixa, a fricção dinâmica leva à fusão, podendo originar uma PRG. A galáxia rica em gás é chamada *intrusa*, enquanto a outra é chamada *vítima*. Quando se forma a PRG, a galáxia vítima se torna a hospedeira e o conteúdo gasoso da galáxia intrusa forma o anel polar. Este cenário engloba o processo de **major mergers**, onde dois sistemas são orientados ortogonalmente, e tem relação de massa semelhantes (Figura 4). Entretanto, também podemos ter a formação de PRGs com grande diferença de massa, como é o caso do **canibalismo** (também chamado de *minor merger*) de uma pequena galáxias satélite em órbita polar, em que os detritos se alinham formando o anel polar (descrito em Bekki et al. 1997b).

Este cenário de formação pode formar até anéis duplos, como no caso de ESO 474-G26 (RESHETNIKOV et al., 2005). Contudo, o espaço de parâmetros para esse tipo de evento foi explorado por BOURNAUD e COMBES (2003), que mostraram ser bem mais restrito que no cenário de acréscimo. Assim, esses autores concluem que a maioria das PRGs não deve ser formada através de mergers. Neste cenário espera-se um alto valor de metalicidade para o anel.

(2) **acrécimo de gás e estrelas pela galáxia hospedeira.** Proposto originalmente por SCHWEIZER; WHITMORE; RUBIN, 1983 e simulado pela primeira vez por Reshetnikov e Sotnikova (1997). Neste cenário, duas galáxias interagem, porém não é necessária uma fusão entre elas (por mais que elas possam se fundir depois da formação do anel). A galáxia que cede o gás é chamada *doadora* e a que acreta o gás é a galáxia *vítima*, que após a formação do anel se tornará a hospedeira. O anel polar, neste caso,

Figura 4 - Cenário de *merger* para formação de PRGs. Azul: intrusa (estrelas), vermelho: vítima (estrelas), verde: vítima (gás e estrelas formadas a partir deste gás após o anel). Imagem de Bournaud & Combes (2003)

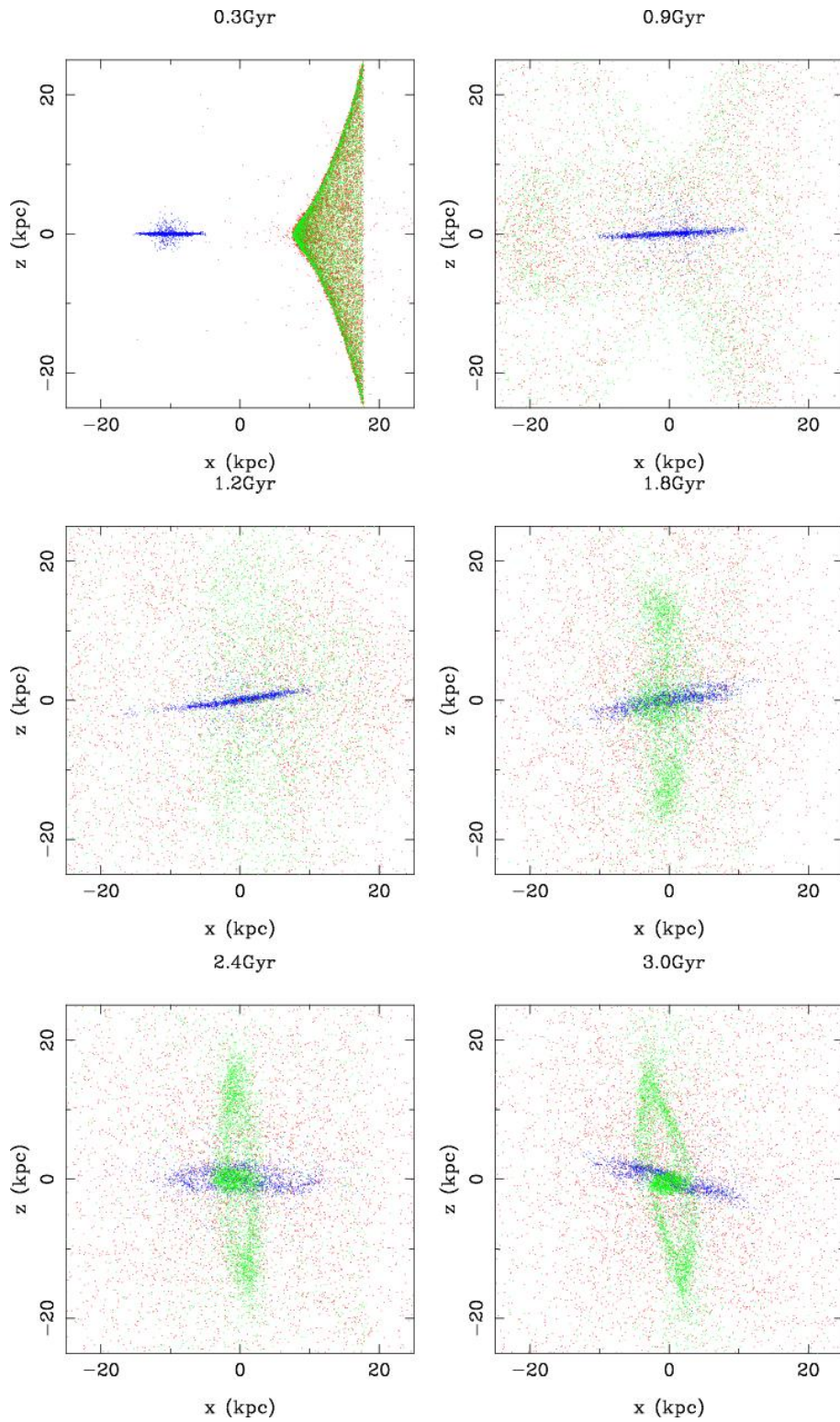


Imagem de Bournaud & Combes (2003)

pode ser formado pelo rompimento de uma galáxia companheira anã ou pelo acréscimo de gás de um disco galáctico. Pensava-se que esse mecanismo só poderia formar anéis pouco massivos, uma vez que a galáxia doadora só entrega parte do seu material antes de abandonar a cena da interação. Entretanto, podem se formar anéis bastante massivos, com componentes polares de massas comparáveis ou até maiores do que a das galáxias hospedeiras (COMBES, 2006). Um protótipo para este tipo de interação é NGC 4650A, em que não foi detectado conteúdo estelar ao redor da galáxia (COMBES, 2006). Um halo estelar seria de se esperar se sua formação fosse por cenário de *merger*, em que as estrelas viriam da galáxia satélite destruída. Ao se explorar o espaço de parâmetros geométricos para este cenário, verificou-se que podem se formar anéis bastantes inclinados, como no caso da prototípica NGC 660, que representa uma continuidade com os sistemas com grande *warping* (outro exemplo é NGC 3718, (KRIPS et al., 2005)). Bournaud e Combes (2003) exploraram as condições iniciais para o cenário de acréscimo e estimaram que seja de 3 a 5 vezes mais provável formar anéis polares por este mecanismo do que pelo cenário de *merger* (Figura 5). Vários dos sistemas observados parecem se enquadrar neste cenário (RESHETNIKOV et al., 2006; FREITAS-LEMES et al., 2012b). Neste cenário também se espera o valor de alta metalicidade para o anel.

(3) Acréscimo de gás frio dos filamentos cósmicos. Foi investigado por Katz e Rix (1992) e Semelin e Combes (2005). Eles propuseram a hipótese de que a formação de anéis polares pudesse ocorrer sem qualquer interação ou *merger* entre galáxias, mas por acréscimo de gás frio dos filamentos cósmicos. Este cenário foi explorado por Macciò, Moore, Stadel, (2006), baseado em uma simulação hidrodinâmica cosmológica, em que os autores mostraram que um anel se forma por acréscimo de gás frio que flui ao longo de um filamento de 1 Mpc em direção ao halo virializado da galáxia hospedeira (Figura 6). Resulta que o anel polar é composto essencialmente por gás. Este cenário poderia explicar a formação de PRGs isoladas. Neste cenário espera-se um gás de baixa metalicidade, $Z \sim \frac{Z_{\odot}}{10}$, menor do que a dos discos em galáxias espirais de luminosidade compatível.

Em trabalhos mais recentes (Spavone et al., 2010; 2011) é discutida a mistura entre anéis polares e galáxias com discos polares, que até então foram classificadas simplesmente como PRGs. O cenário de acréscimo via filamentos cósmicos favorece o aparecimento de discos polares, para os quais espera-se uma baixa metalicidade e a ausência de gradientes radiais de abundância química. Esse mecanismo de acréscimo pode ser o mesmo responsável por levar gás para as galáxias em geral (KERESŠ et al., 2005).

Depois da formação do anel, quando ele já se encontra num estado (quase) estável, muitas das características das galáxias primordiais, que deram origem à PRGs, se perdem. Isso dificulta a reconstrução da sua história dinâmica. Uma forma de entendermos o processo de formação do anel, é comparar as PRGs já formadas com uma grade de

Figura 5 - Cenário de acréscimo para formação de PRGs: Azul: hospedeira (estrelas), vermelho: galáxia doadora (estrelas), verde: vítima (gás e estrelas formados a partir deste gás após o anel). Imagem de Bournaud & Combes (2003)

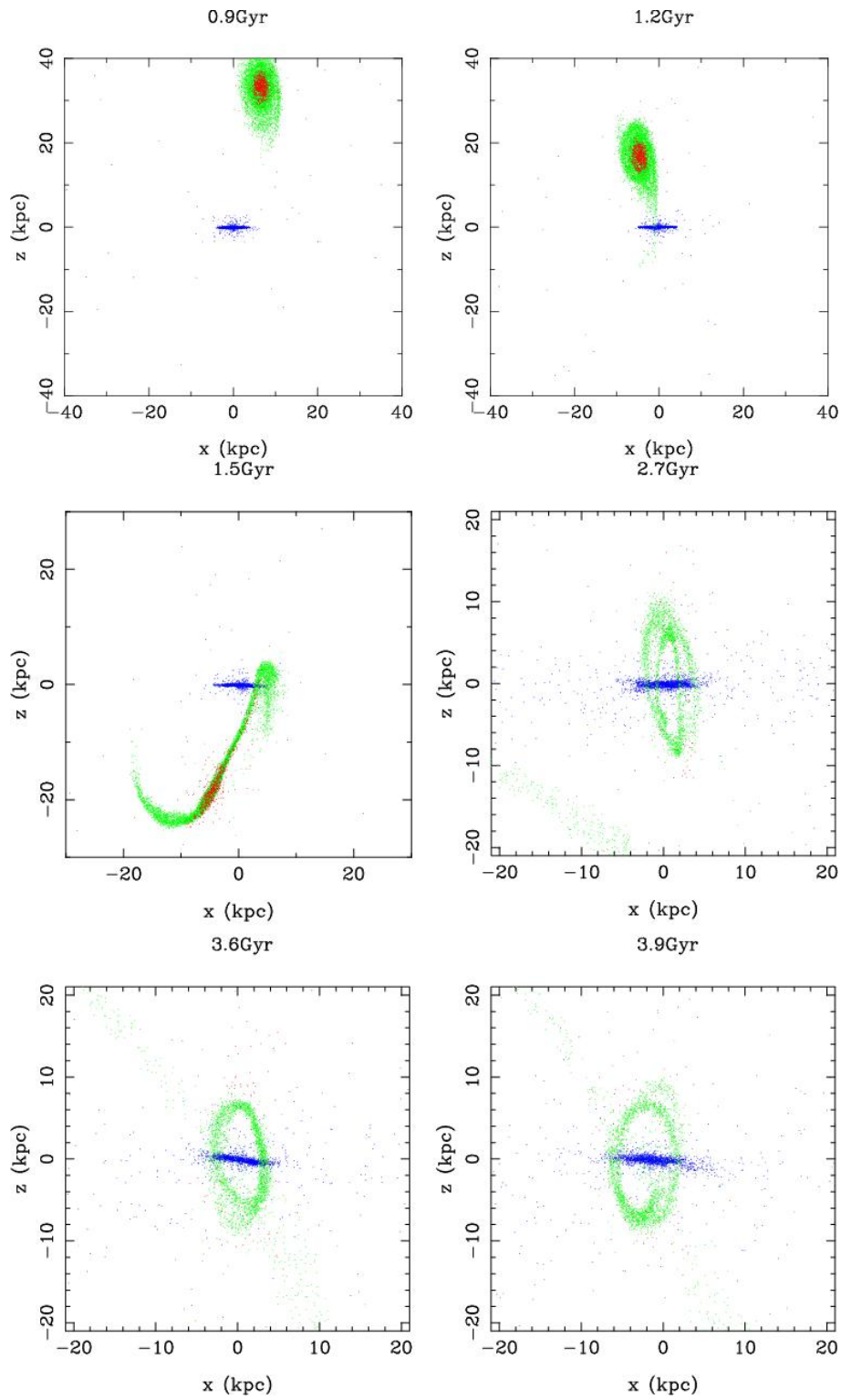


Imagem de Bournaud & Combes (2003)

Figura 6 - Cenário de formação do anel polar via acréscimo de filamentos cósmicos. A simulação hidrodinâmica proposta por Macciò (2006) mostra a formação do anel polar, que começa a adquirir forma com ≈ 1 Gyrs e se mantém estável até 1.6 Gyrs.

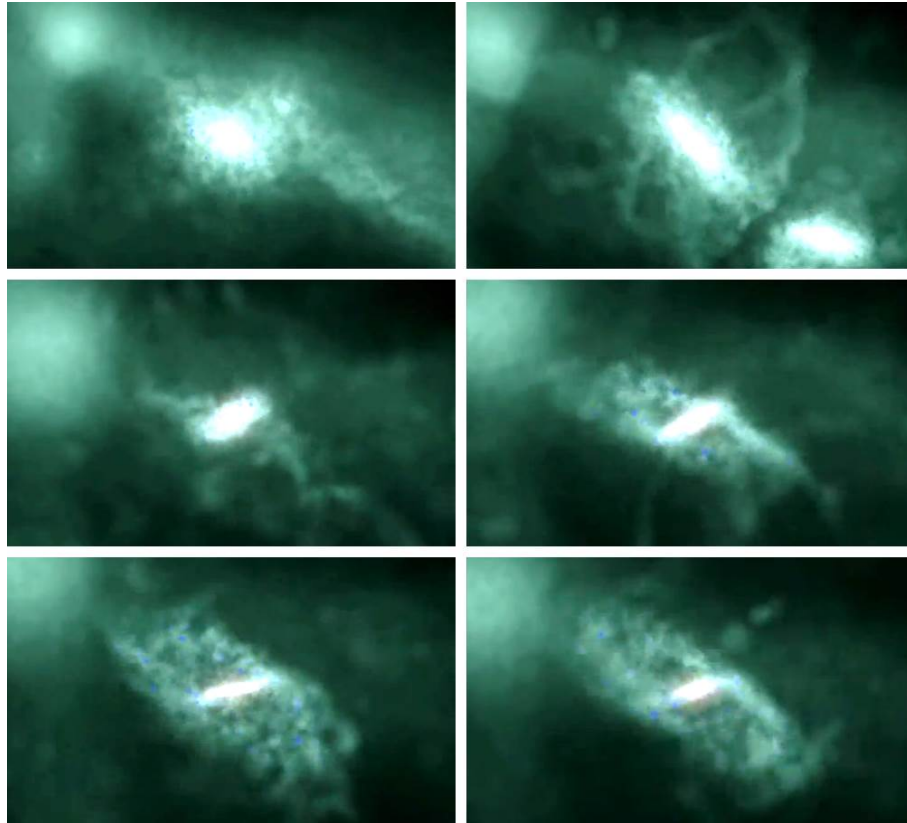


Imagem de Macciò (2006).

simulações de formação de PRGs.

1.2.2 Classificação das Galáxias com Anel Polar

As galáxias com anel polar são formadas por diferentes mecanismos e com galáxias primordiais de diferentes massas, tipos morfológicos e velocidades relativas no momento do choque. Por causa disso, mesmo seguindo um padrão geométrico, existem PRGs com diferentes características, que levaram [Faúndez-Abans e Oliveira-Abans \(1997\)](#) a classificar as PRGs em 3 categorias:

Spindle: Esta categoria inclui as PRGs tradicionais, que apresentam uma galáxia central, normalmente S0, com um anel quase perpendicular ao plano principal da galáxia hospedeira. Podemos dividi-la em duas sub-categorias: (a) galáxias que possuem sobras de material no plano do anel, provenientes do processo de interação (como a galáxia NGC 4650A) e (b) as que não tem restos de material do processo de interação.

Saturno: As PRGs que pertencem a esta categoria possuem um bojo esférico, rodeado por um anel brilhante, como a galáxia AM 2020-504 (Seção 3.1) e HRG 54103 (Seção 3.4).

Worm-like: Esta última categoria engloba os objetos que tenham uma galáxia hospedeira alongada ou objetos que possuam o anel e o bojo com um nó. Este é um dos cenários que Whitmore et al. (1990) usou para selecionar algumas candidatas a PRG. O objeto que melhor representava essa categoria era AM 0302-504 (PRC C-15), que hoje sabemos que não é uma PRG e sim efeito de uma projeção de duas galáxias espirais. Os outros objetos desta categoria são galáxias com o anel em formação, e estão fora da fase de equilíbrio (ou quase equilíbrio). Com isso, neste trabalho, consideramos que os objetos desta categoria ainda não são polares e sim objetos em estágio intermediário para a formação de uma PRG que ficará estável por milhões de anos.

1.2.3 PRGs e Atividade Nuclear

No mecanismo de formação de galáxias com anel polar, assim como em todo processo de interação de galáxias, a transferência de gás (massa) de uma componente à outra varia de sistema para sistema, desde acréscimo de gás e estrelas à fusão total. O gás desempenha um papel crucial neste processo evolutivo das galáxias. Devido à sua natureza dissipativa, o gás chega na forma molecular durante as colisões e fusões de galáxias, e serve de combustível para a formação de estrelas. Assim, as interações de galáxias e a formação estelar induzida são temas interessantes para entender o processo evolutivo das galáxias. Sendo assim, com o acúmulo de massa, é razoável supor que as PRGs apresentem as condições adequadas para disparar atividades nucleares não térmicas.

Reshetnikov, Faúndez-Abans, de Oliveira-Abans (2001), a partir de uma amostra de 27 PRGs e candidatas, determinaram que a fração de galáxias com núcleos ativos é alta: 12.5-25% de Seyfert (o primeiro valor se refere a objetos com classificação confiável, e o segundo, a classificações incertas) e 33-41% de LINERs. Esses resultados, no entanto, podem ser considerados como um limite inferior, já que foram derivados de observações na região do visível, o que pode ter mascarado um número maior de núcleos ativos, pois na grande maioria das pRGs o núcleo está envolvido em um casulo de poeira de raio ≈ 1 kpc (GALLAGHER et al., 2002). De fato, Gallagher et al. (2002), por exemplo, encontrou na PRG NGC 4650A, utilizando imagens obtidas pelo WFPC2 do HST, um núcleo não-resolvido aproximadamente 35 vezes mais luminoso que o da galáxia M 33, dentro de uma região menor do que 10 pc de raio. Eles afirmam que, muito provavelmente, o núcleo da PRG NGC 4650A virá a se tornar ativo, talvez devido ao acréscimo de massa, discutido por Rees (1984) e Collin-Souffrin et al. (1988).

No trabalho de Toomre e Toomre (1972) eles também observaram que a agitação mecânica violenta, provocada pela força de maré, durante o processo de interação, forneceria gás interestelar para as regiões centrais do próprio sistema ou para a galáxia companheira, que dispararia a atividade de formação estelar. A confirmação da intensificação da formação estelar em galáxias em interação veio no estudo de Larson e Tinsley (1978), onde compararam os índices de cor UBV das galáxias do atlas Arp (1966) com as do atlas do Hubble (SANDAGE, 1961). Eles criaram modelos de evolução de população estelar, com uma variedade de histórias de formação de estrelas num período de 10^{10} anos, e modelos de formação estelar com um surto de curta duração de 2×10^7 anos. As cores dos modelos em que ocorreram surtos, evoluíram significativamente em 10^9 anos após o surto. Já as galáxias normais têm cores que são consistentes com uma taxa de formação de estrelas que diminui com o tempo. Em contrapartida, galáxias peculiares mostram uma grande dispersão de cores, principalmente as que mostram interações de maré. Estes resultados fornecem evidências de uma relação entre os *starbursts* com os fenômenos dinâmicos violentos.

Dentro de uma galáxia encontramos estrelas de diferentes massas com uma ampla diferença de idade. Isso ocorre pelo fato da população estelar evoluir naturalmente, mesmo quando estudamos galáxias isoladas. Contudo, a interação entre galáxias, que é um evento comum, influencia a evolução da população da galáxia através do acréscimo e compressão de gás, da fusão com outros corpos celestes etc. Em contrapartida, a população estelar da própria galáxia pode ser importante para o enriquecimento da sua vizinhança. Isso pode ocorrer através de jatos provenientes da região nuclear ou explosões de supernovas. As galáxias que apresentam linhas de emissão podem ser classificadas em dois grupos: (1) objetos que se comportam como regiões HII e (2) galáxias com núcleo ativo. Essa classificação se baseia no mecanismo em que as linhas são produzidas. O primeiro grupo é destinado às galáxias nas quais o gás é fotoionizado por estrelas quentes e jovens, O e B. Já o segundo grupo é destinado às galáxias com núcleo ativo (do inglês AGN – *Active Galaxy Nuclei*) em que a emissão nuclear tem origem não térmica.

A classificação dos núcleos ativos pode ser derivada da sua luminosidade, que é resultado da taxa de acreção do Buraco Negro central. Sendo assim, os LINERs são AGNs que acretam matéria a uma taxa muito baixa, e por isso são pouco luminosos, enquanto que os Quasares são mais luminosos por causa da alta taxa de acreção, e as galáxias Seyfert seriam casos intermediários entre estes dois extremos. As galáxias Seyferts podem ser classificadas como do tipo 1 ou 2. Segundo o Modelo Unificado (ANTONUCCI; Miller, 1985), as Seyferts 1 e 2 são na verdade manifestações de um mesmo fenômeno, que parece diferente devido à orientação da fonte central em relação à linha de visada. De acordo com o modelo, Seyferts do tipo 1 são observadas na direção do cone de emissão, enquanto as Seyferts 2 são vistas através do toro de poeira.

Ainda há poucos trabalhos com análises espectrais que abordem somente PRGs. Um trabalho estatístico exclusivo, usando o mesmo tipo de calibração e baseado em dados semelhantes (do mesmo telescópio, com a mesma configuração instrumental) é inexistente. Para verificar a tendência de possuírem núcleos ativos e com o intuito de comparar os resultados obtidos neste trabalho, analisamos a presença de núcleos ativos em 24 galáxias com anel polar ². Os valores aqui considerados foram extraídos de Reshetnikov e Combes (1994), Reshetnikov, Faúndez-Abans, de Oliveira-Abans, (2001) e Freitas-Lemes (2013b).

A identificação das PRGs que possuem núcleo ativo foi feita com base no diagrama de diagnóstico $\log([\text{NII}]/\text{H}\alpha) \times \log([\text{SII}]/\text{H}\alpha)$, exposto na Figura 7. Da amostra estudada, mais de 30% dos objetos apresentam núcleos ativos. Infelizmente, os nossos dados não fornecem uma estatística significativa, entretanto, com base na alta proporção de núcleos ativos, podemos especular que as galáxias com anel polar apresentam condições favoráveis à formação de atividades nucleares não térmicas, já que o número de galáxias com núcleo ativo é superior ao relatado para galáxias normais. Os resultados encontrado em Reshetnikov e Combes (1994), Willner et al. (1985), Driel et al. (1995) e Reshetnikov, Faúndez-Abans, de Oliveira-Abans, (2001) também dão suporte a esta suposição.

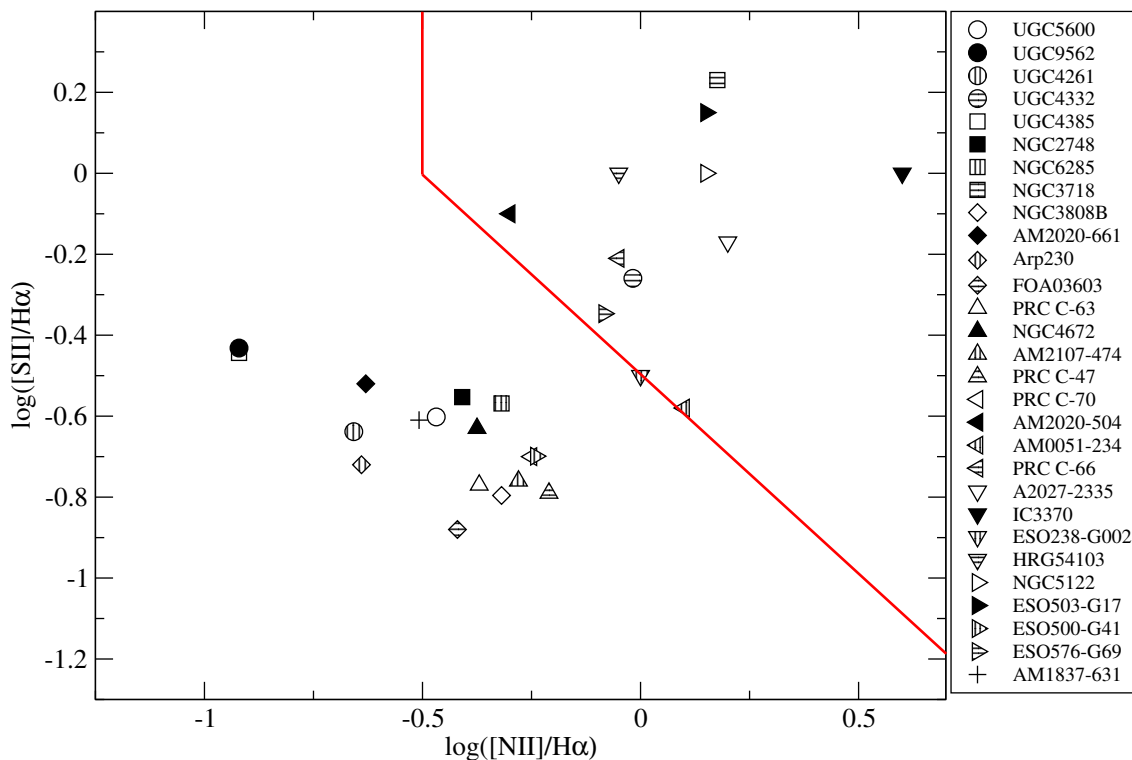
1.3 A Amostra de PRGs Selecionadas

Sabendo que as PRGs são objetos formados por interação, seja com outra galáxia ou com o meio interestelar, possuem geometria bem definida e características físicas peculiares, selecionamos algumas PRGs para estudar. Estudamos cinco galáxias aneladas, algumas polares cinematicamente confirmadas, onde a confirmação de que o anel e a galáxia hospedeira estão em interação já foi confirmada e, uma candidata a PRG. A seleção de objetos foi feita buscando objetos próximos e brilhantes e com o objetivo de cobrir uma variedade de morfologias e tipos espectrais. Na Figura 8 são apresentadas as imagens das galáxias que estamos trabalhando e, na Tabela 1 as características gerais desses objetos.

- AM 2020-504 (PRC B-19), uma PRG peculiar, com galáxia hospedeira elíptica;
- AM 2229-735, que acreditamos ser um objeto chave para a compreensão das galáxias com anel polar, já que apresenta um processo de interação intermediário entre duas galáxias espirais e a morfologia é semelhante ao encontrando num estágio intermediário ao visto em simulações de formação de anéis polares via acréscimo de gás;
- ESO 238-G002, que possui um anel irregular;

²A parte inicial desta estatística, contendo 10 galáxias com anel polar, foi publicado na Revista Univap, 2013 (Freitas-Lemes, 2013B).

Figura 7 - Diagrama de Diagnóstico $\log[\text{NII}]/\text{H}\alpha$ versus $\log[\text{SII}]/\text{H}\alpha$ classificando o tipo de ionização predominante de 24 PRGs que possuem dados na literatura. A linha proposta por Pérez-Monteiro (2013) separa os AGNs das regiões HII.



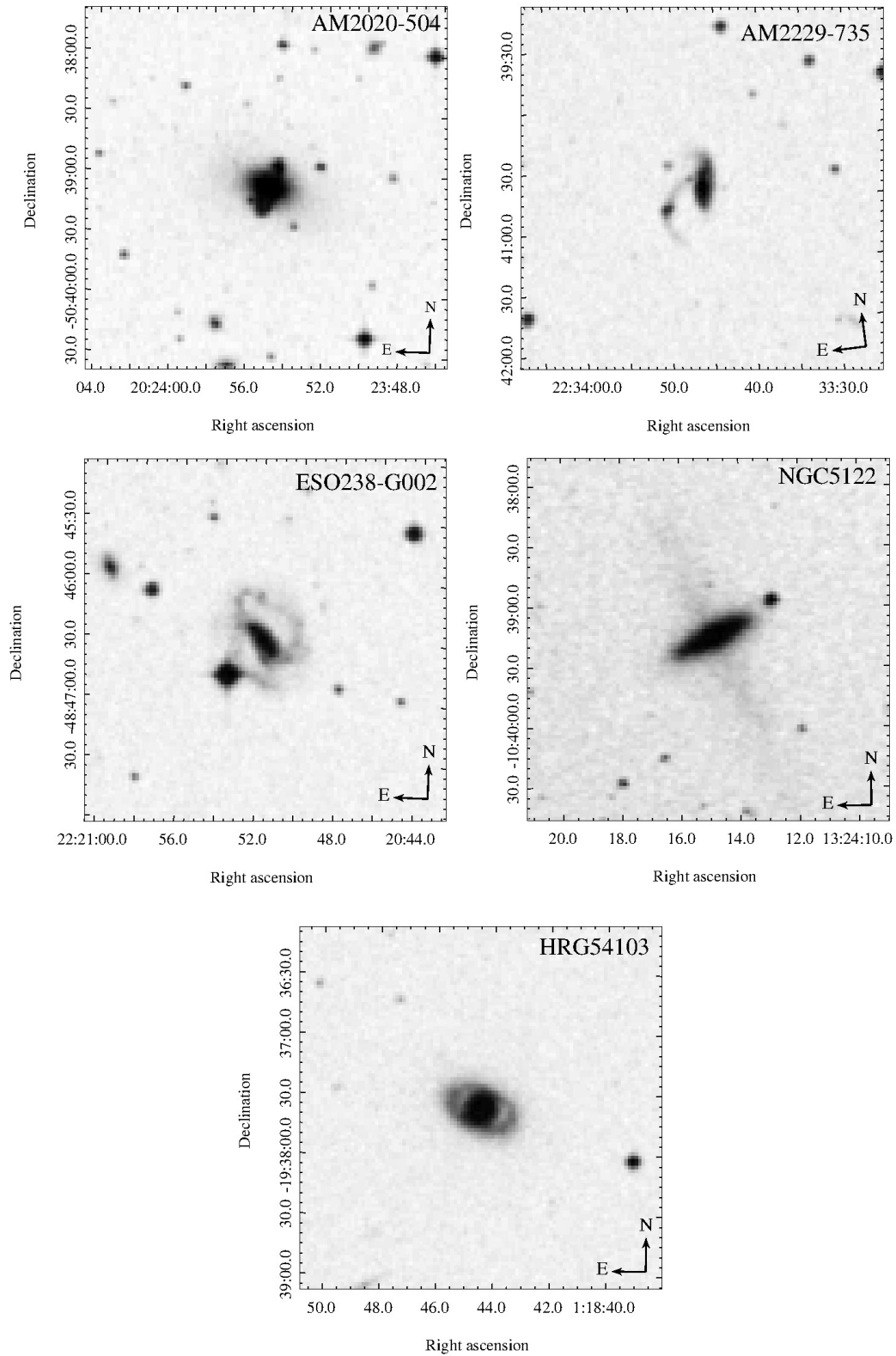
Fonte: a autora.

- HRG 54103, uma galáxia com anel bem definido e peculiaridades nas linhas de emissão, com forte emissão de $[\text{N II}]$;
- NGC 5122 (PRC B-16), que possui um anel cujo diâmetro é maior que duas vezes o diâmetro da galáxia hospedeira, do tipo S0;

1.4 Objetivos

Este trabalho combina ferramentas observacionais e teóricas para a compreensão detalhada das PRGs estando, portanto, alinhado com um dos maiores objetivos da astrofísica atual. É objetivo deste trabalho estudar observacionalmente a morfologia, a química e a cinemática das PRGs através de imageamento e espectroscopia óptica. Para este estudo, analisamos uma pequena amostra de cinco objetos pouco estudados na literatura, sendo duas PRGs confirmadas (AM 2020-504 e NGC 5122), duas candidatas (ESO 238-G002 e HRG 54103) e uma que acreditamos ser uma proto-PRG (AM 2229-735). Pretendemos com isso contribuir na compreensão dos pormenores do processo da interação galáxia-galáxia que originou tais objetos. A obtenção e redução dos dados, bem como as técnicas usadas para analisá-los, são apresentados no [Capítulo 2](#). No [Capítulo 3](#) são apresentados

Figura 8 - Amostras de galáxias selecionadas. Da esquerda para direita, de cima para baixo: AM 2020-504, AM 2229-735, ESO 238-G002, NGC 5122 e HRG 54103.



Fonte: a autora.

os resultados individuais para as galáxias estudadas. No [Capítulo 4](#) apresentamos as conclusões, comparando as nossas galáxias entre si e com outras PRGs. Neste último capítulo são apresentados ainda os trabalhos em andamento e futuros.

Tabela 1 - Informações gerais das galáxias estudadas.

Galáxia	Outros nomes	R.A.	Dec.	Velocidade Radial km/s	z (NED)	(B) (B)	PRC ¹	Eixo Maior <i>arcmin</i>	Eixo Menor <i>arcmin</i>
AM2020-504	–	20h23m54.9s	-50d39m07s	5006±23	0.016698	14.5	B-19	0.58	0.45
AM2229-735	ESO 048-IG026	22h33m45.2s	-73d40m55s	–	–	15.62	–	–	–
ESO 238-G002	AM 2217-490	22h20m51.7s	-48d46m29s	9212±28	0.030728	14.0	–	1.0	0.9
NGC 5122	–	13h24m14.9s	-10d39m15s	2818±19	0.009400	13.94	B-16	0.8	0.3
HRG 54103	ESO 542-G003	01h18m44.5s	-19d37m36s	6444±25	0.021495	14.38	–	0.9	0.5

¹Whitmore (1990).

2 Análise Espectral, Fotométrica e Morfológica de Galáxias com Anel Polar

Com a finalidade de melhor entender os sistemas em interação que serão estudados neste trabalho, obtivemos imagens diretas e espectros. Os dados são de diferentes telescópios, como será descrito na [Seção 2.1](#). A redução dos dados fotométricos e espectroscópicos seguiu os procedimentos padrões de redução. Os pontos principais da redução de dados estão descritos nas Subseções [2.1.1](#) e [2.1.2](#).

Todas as galáxias foram analisadas a partir de quatro frentes: *Análise Morfológica*, *Análise Fotométrica*, *Cinemática* e *Análise Espectral*. A técnica usada em cada uma dessas frentes e os métodos empregados para aplicar essas técnicas são descritos nas Subseções [2.2](#), [2.3](#), [2.4](#) e [2.5](#), respectivamente.

2.1 Observação e Redução de dados

Os dados que utilizaremos neste trabalho foram obtidos usando três telescópios. Com o telescópio de 1,6 m do OPD (Observatório Pico dos Dias) situado no Sul de Minas Gerais, Brasil, obteve-se imagens nos filtros BVRI das galáxias AM 2020-504, AM 2229-735, NGC 5122 e HRG 54103 e espectros das galáxias AM 2020-504, AM 2229-735, ESO 238-G002, NGC 5122 e HRG 54103. Do banco de dados do telescópio de 8,0 m do Gemini Sul, localizado numa das montanhas nos Andes Chilenos, Cerro Pachon, usamos imagens na banda R das galáxias AM 2229-735 e NGC 5122. Por fim, com o telescópio de 1,5 m do CTIO (*Cerro Tololo Inter-American Observatory*), localizado a leste de La Serena, Chile, utilizamos dados espectroscópicos da galáxia ESO 238-G002¹. Nas [Subseção 2.1.1](#) e [Subseção 2.1.2](#) será apresentado os principais pontos do processo de redução, o procedimento completo é descrito em [Freitas-Lemes et al. \(2012a\)](#).

2.1.1 Imagens Ópticas de Banda Larga

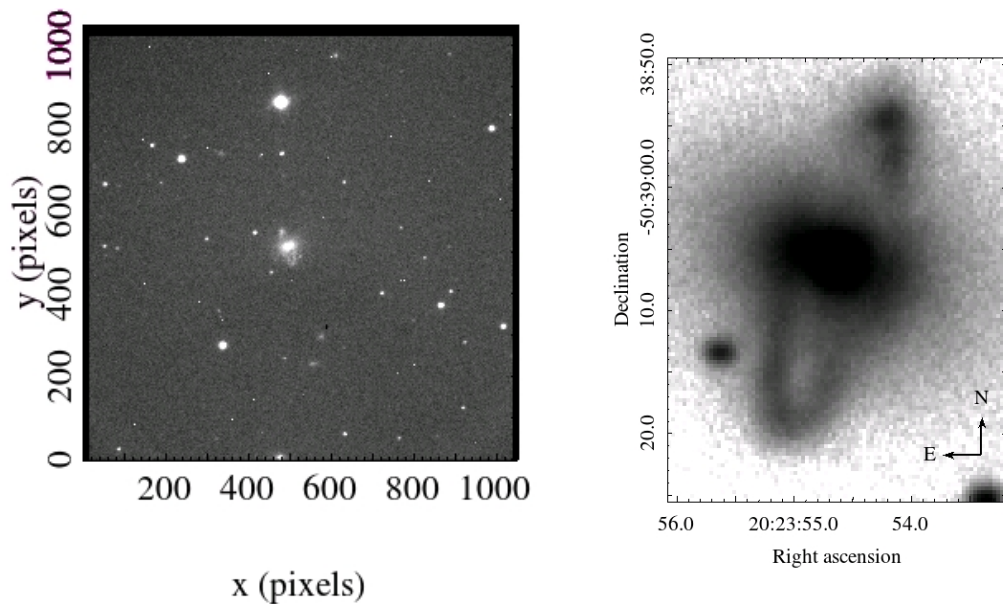
Foram obtidas imagens nos com os filtros BVRI no OPD ([Tabela 2](#)). Usamos a câmera com o detector CCD 106 de 1024×1024 pixels², cuja escala é $0,284''/\text{pixel}$; nesta configuração o ruído de leitura varia entre 4,1 e 9,5 elétrons/ADU (rms). O tempo de exposição das imagens, o *seeing* e a massa de ar são apresentados na [Tabela 2](#).

As imagens do Gemini foram obtidas com o instrumento GMOS-S (*Gemini Multi-Object Spectrographs - South*). Estas imagens foram adquiridas usando o CCD 01, onde o ruído de leitura varia de 4,92 a 5,13 elétrons/ADU (rms), o detector tem 6144×4608 pixels² e a escala é de $0,073''/\text{pixel}$. O tempo de exposição das imagens, o *seeing* e a massa de ar estão na [Tabela 2](#). A imagem da galáxia AM 2229-735 é parte do programa

¹Dados observados por Max Faúndez-Abans.

GS-2006A-DD-6 e, a imagem da galáxia NGC 5122 é parte do programa GS-2012A-Q-56.

Figura 9 - (a) Imagem em B da galáxia AM 2020-504 como foi obtida pelo telescópio de 1,60-OPD. (b) Imagem em B da mesma galáxia após o ajuste das coordenadas, correção de Bias e Flats e com o corte que foi utilizado na maioria das análises.



Fonte: a autora.

Para a redução de dados utilizamos as rotinas padrões do IRAF¹. Iniciando com a subtração de *darks* e *bias*, e correções de *flat-field* (usamos a média de diversos flats de cúpula para cada filtro). Os raios cósmicos foram removidos com o auxílio do programa *lacos.cl*². Os raios cósmicos que não foram subtraídos pelo programa, foram retirados manualmente, mascarados com o valor médio de intensidade dos pixels adjacentes. As imagens foram alinhadas, usando como base as estrelas do campo e colapsadas em cada filtro usando a ferramenta IMCOMBINE. Para a calibração em magnitude, realizamos repetidas observações de estrelas de calibração do catálogo de Landolt (1992).

Veja na Figura 9 à esquerda, uma imagem bruta na banda B da galáxia AM 2020-504 e, à direita, a imagem reduzida, pronta para iniciarmos o processo de análise.

¹Do inglês, *Image Reduction and Analysis Facility*, que é um sistema de software de uso geral para a redução e análise de dados astronômicos. Foi desenvolvido e é mantido pelo *National Optical Astronomy Observatories (NOAO)*

²LACosmic é um algoritmo para identificação e remoção de raios cósmicos. O método é descrito em Dokkum (2001). O algoritmo está disponível para download em <http://www.astro.yale.edu/dokkum/lacosmic/>

Tabela 2 - Log das imagens obtidas

Galáxia	Data	Banda	Exp. (s)	Seeing	Massa de Ar
OPD					
AM 2020-504	2008 Jul 07-08	B	6 x 300	1.3	1.2
	2008 Jul 07-08	V	6 x 300	1.3	1.1
	2008 Jul 07-08	R	6 x 300	1.2	1.1
	2008 Jul 07-08	I	6 x 240	1.2	1.2
AM 2229-735	2011 Set 21-22	B	5 x 600	1.3	1.6
	2011 Set 21-22	V	5 x 420	1.2	1.6
	2011 Set 21-22	R	5 x 360	1.1	1.7
	2011 Set 21-22	I	5 x 120	1.2	1.6
NGC 5122	2008 Jun 07-08	B	5 x 300	1.3	1.9
	2008 Jun 07-08	V	5 x 300	1.3	2.6
	2008 Jun 07-08	R	5 x 300	1.4	1.2
	2008 Jun 07-08	I	4 x 240	1.4	1.1
HRG 54103	2011 Set 12-13	B	5 x 300	1.7	1.1
	2011 Set 12-13	V	5 x 300	1.3	1.1
	2011 Set 12-13	R	5 x 300	1.3	1.1
	2011 Set 12-13	I	5 x 240	1.3	1.1
GEMINI					
AM 2229-735	2006 Jul 16-17	R	1 x 30	–	1.4
NGC 5122	2012 Mai 24-25	R	8 x 300	–	1.1

2.1.2 Observações Espectroscópicas

Nas observações espectroscópicas coletamos dados nos telescópios de 1,6 m do OPD e do telescópio de 1,5 m do CTIO. Os intervalos espectrais observados, as redes de difração, as massas de ar e o *seeing* estão indicados na [Tabela 3](#).

No 1,6 m do OPD utilizamos o espectrógrafo Cassegrain equipado com o detector CCD 105, de 2048×2048 pixels². Usamos as redes de 300 l/mm, 600 l/mm e 900 l/mm ([Tabela 3](#)), sempre visando as principais linhas de emissão: $H\beta$, $[OIII]\lambda 5007$, $H\alpha$, $[NII]\lambda 6584$ e $[SII]\lambda 6716, \lambda 6731$.

Com o objetivo de obter informações em diferentes regiões do sistema em interação, alinhamos as fendas em regiões que consideramos importantes para a sua compreensão. Em todos os sistemas estudados, uma fenda foi alinhada no eixo maior da galáxia hospedeira. Para a galáxia AM 2020-504 e HRG 54103, uma segunda fenda foi alinhada ao longo do eixo maior do anel. Para o sistema AM 2229-735 posicionamos uma fenda ao longo da galáxia companheira. Os ângulos de posição das fendas (PA) foram medidos a partir do Norte, crescendo para Leste. Veja na [Tabela 3](#) e na [Figura 10](#) as posições de

Tabela 3 - Log das observações espectroscópicas.

Galáxia	Data	PA °	Rede l/mm	Intervalo Espectral (Å)	Exp (s)	Seeing "	Massa de Ar
OPD							
AM 2020-504	2008 Set 29-30	72.5	600	4600-6730	1800	1.2	1.2
	2008 Jun 04-05	343	300	4100-8600	1200	1.2	1.2
AM 2229-735	2011 Ago 30-31	0	300	4100-8600	1800	1.2	1.4
	2011 Ago 30-31	110	300	4100-8600	1800	1.3	1.6
NGC 5122	1997 Mai 07-08	300	900	6500 - 7200	1200	–	1.1
HRG 54103	2011 Set 11-12	340	300	4100 - 8600	1500	1.2	1.0
	2011 Set 11-12	75	300	4100 - 8600	1500	1.2	1.0
CTIO							
ESO 238-G002	2002 Set 28-29	40	300	6000 - 7500	1200	–	1.0
HRG 54103	2002 Set 28-29	330	300	6000 - 7500	1200	–	1.0

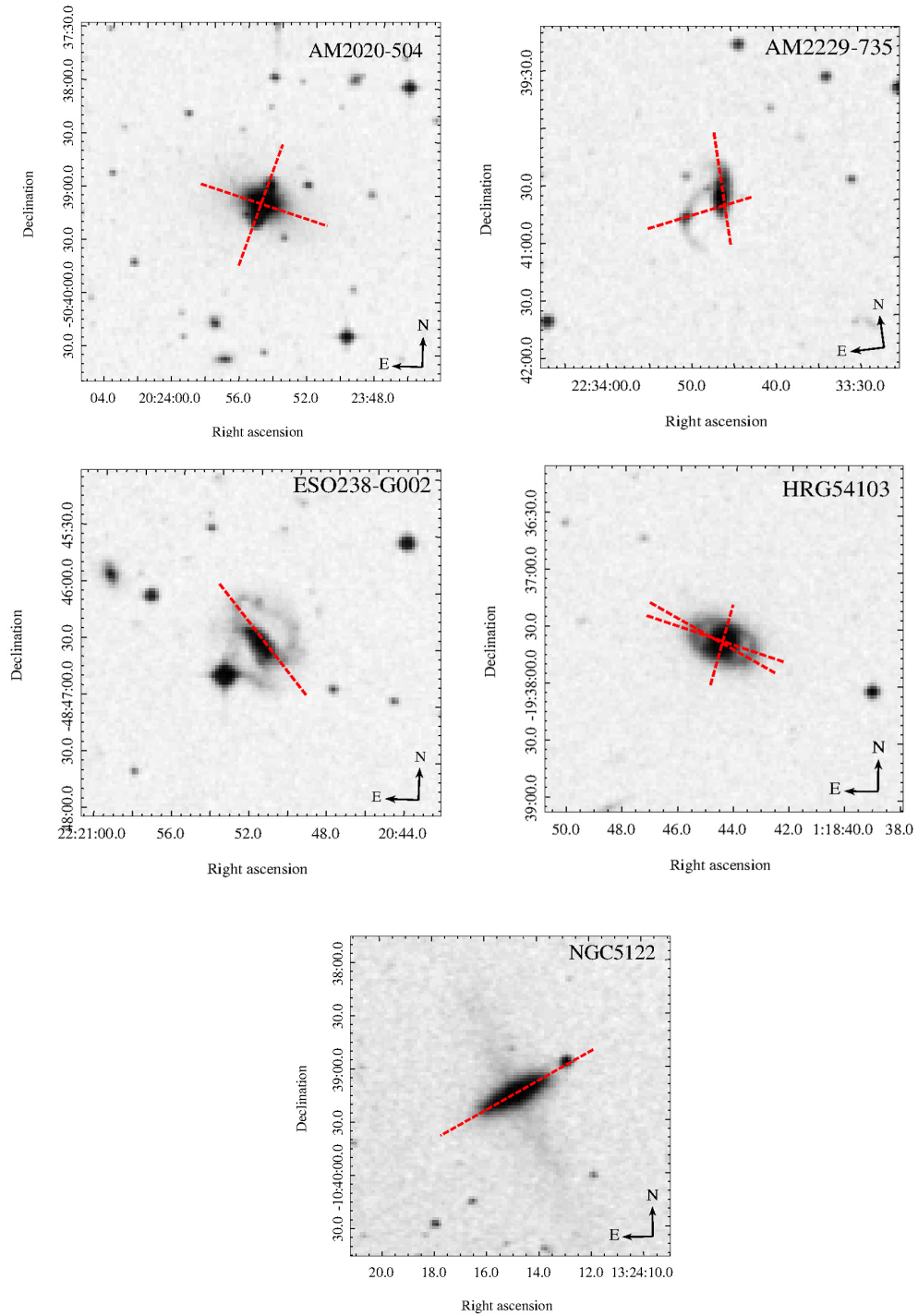
fenda de cada sistema.

A redução de dados foi realizada de forma padrão com as rotinas IRAF para subtração dos *bias* e *darks* e *flat-fields*. Para a remoção dos raios cósmicos, usamos o programa *lacos.cl*, e os raios cósmicos que o programa não localizou foram removidos manualmente, substituindo a região afetada pela intensidade média dos pixels adjacentes.

A extração dos espectros unidimensionais foi feita usando a ferramenta APALL do IRAF. No processo de extração é subtraída a contribuição do céu (*background*) e ajustado o *trace* dos espectros. O tamanho das aberturas foi escolhido como sendo maior do que o *seeing* da noite de observação (tipicamente 2"). As extrações das lâmpadas e estrelas de calibração também foram feitas usando o APALL. Para os dados do OPD usamos sempre lâmpadas de HeAr e para os dados do CTIO, lâmpadas de Ne.

Os espectros foram calibrados em unidade de fluxo ($\text{ergs cm}^{-2} \text{s}^{-1} \text{Å}^{-1}$) usando espectros observados das estrelas padrões espectrofotométricas catalogadas por Baldwin e Stone (1984) e revisadas por Hamuy et al. (1992) (veja também Hamuy (1994)). Na Tabela 4 são apresentadas as estrelas padrões usadas para cada sistema. Nós observamos estrelas padrões ao longo de toda a noite, a fim de obter o melhor ajuste da sensibilidade (SENSFUNC) para a calibração. Veja na Figura 11 o espectro bidimensional, como foi observado, da galáxia ESO 238-G002 e o seu espectro unidimensional integrado, pronto para iniciarmos o processo de análise.

Figura 10 - Posições das fendas de acordo com a Tabela 3. Da esquerda para direita, de cima para baixo: AM 2020-504, AM 2229-735, ESO 238-G002, HRG 54103 e NGC 5122.



Fonte: a autora.

Tabela 4 - Estrelas padrões usadas na calibração em fluxo dos espectros.

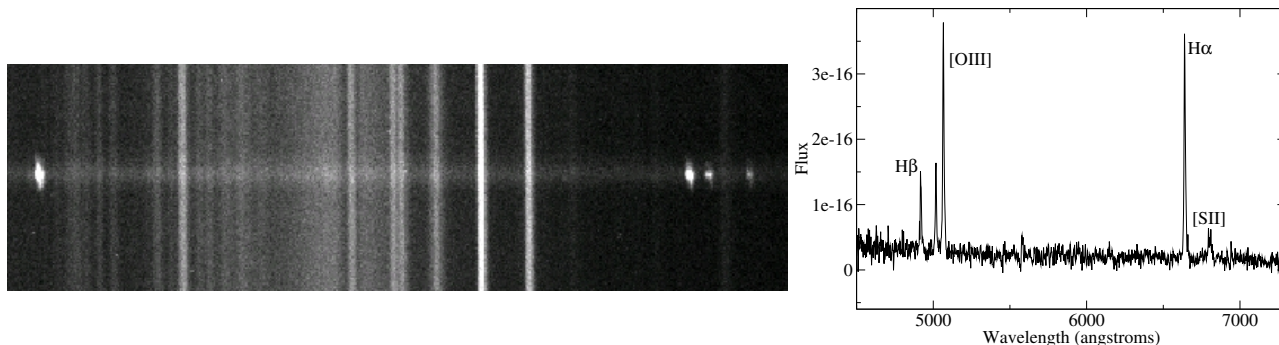
Galáxia	Data	Estrela Padrão	Hora da Observação
AM 2020-504	2008 Set 29-30	LTT 9239	01:47:50
	2008 Jun 04-05	LTT 7379	21:52:55
	2008 Jun 04-05	LTT 7987	23:44:03
	2008 Jun 04-05	LTT 9239	02:44:13
	2008 Jun 04-05	LTT 9491	04:25:20
	2008 Jun 04-05	LTT 377	05:27:43
AM 2229-735	2011 Ago 30-31	LTT 7379	21:50:10
	2011 Ago 30-31	LTT 1020	02:09:43
	2011 Ago 30-31	LTT 377	04:59:58
ESO 238-G002	2002 Set 28-29	LTT 7987	20:57:27
	2002 Set 28-29	LTT 2415	21:32:07
	2002 Set 28-29	LTT 377	00:41:45
	2002 Set 28-29	LTT 1788	03:12:05
	2002 Set 28-29	LTT 1020	06:32:45
NGC 5122	1997 Mai 07-08	LTT 3864	02:18:37
	1997 Mai 07-08	LTT 6248	03:06:58
	1997 Mai 07-08	LTT 7397	05:22:03
HRG 54103	2010 Set 10-11	LTT 9491	00:58:15
	2010 Set 10-11	LTT 377	02:28:58
	2002 Set 28-29	LTT 1020	19:25:11
	2002 Set 28-29	LTT 377	20:19:44
	2002 Set 28-29	LTT 2415	21:32:48
	2002 Set 28-29	LTT 1788	04:22:36

2.2 Análise Morfológica

Para complementar o estudo das galáxias estudadas, usamos também técnicas de tratamento de imagens, tornando os resultados mais adequados para classificação e análise morfológica. De acordo com Reduzzi et al. (1994), a estrutura da galáxia nem sempre é evidente em imagens brutas, porque a contribuição do componente estelar é muito forte, sendo assim, o uso de técnicas de tratamento de imagens é necessário para uma melhor compreensão dos sistemas em estudo. Uma das técnicas mais aplicadas usa como base a própria imagem, que passa por um filtro (mediano, por exemplo) e depois é subtraída da imagem original. Com essa técnica é possível identificar estruturas, como por exemplo, faixas de poeira ou barras (Jedrzejewski (1987) e Reduzzi et al. (1994)).

A primeira ferramenta que consideramos no processo de tratamento de imagens é o filtro mediano. Seguimos as indicações de Sulentic, Arp, Lorre, (1985), usamos o filtro mediano pelo menos duas vezes maior do que a maior característica que desejamos preservar na galáxia. A subtração do modelo de baixa frequência da imagem original

Figura 11 - (a) Espectro bidimensional da galáxia ESO 201-IG26. O eixo horizontal corresponde a direção espectral (λ 6800-4800, da esquerda para direita) e na vertical a direção espacial (NW para cima e NE para baixo). (b) Espectro unidimensional da galáxia ESO 201-G20 calibrado em comprimento de onda e fluxo.



Fonte: a autora.

produz uma imagem com a estrutura residual de alta frequência. O método é baseado no trabalho de Jedrzejewski (1987) e é implementado usando ferramentas do pacote STSDAS do IRAF.

Escolhemos esta técnica por ser a mais eficiente para o estudo de estruturas finas, como faixas de poeira (*dust-lanes*), regiões H II e estruturas espirais, que não podem ser vistas claramente à primeira vista. Outros trabalhos também se basearam nesta técnica: Faúndez-Abans e de Oliveira-Abans (1998), Reshetnikov, Faúndez-Abans, de Oliveira-Abans, (2002) e Faúndez-Abans et al. (1996). Aplicamos esta técnica em todas imagens das galáxias estudadas. A Figura 12 mostra um resultado da aplicação da técnica.

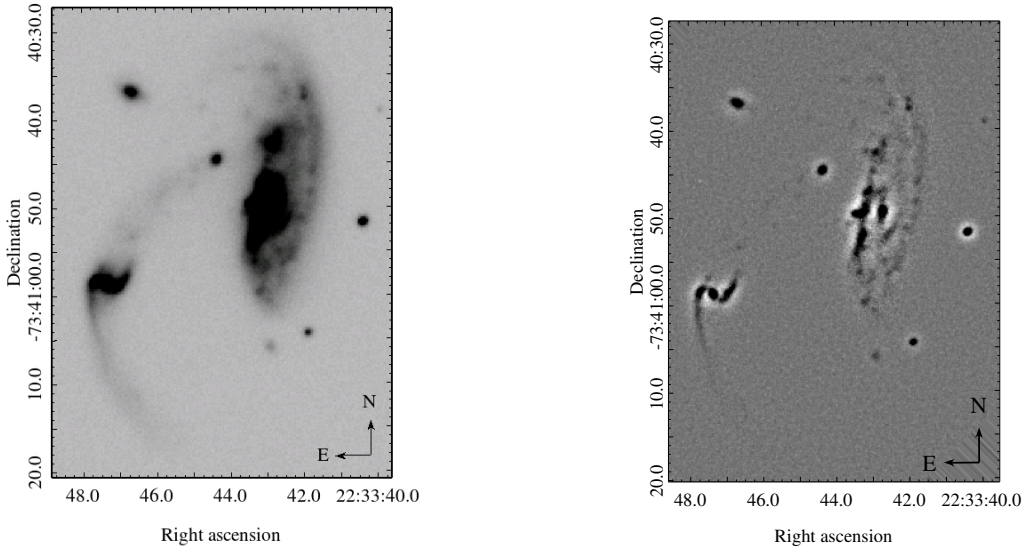
2.3 Análise Fotométrica

Neste trabalho fizemos fotometria de abertura, combinando as técnicas descritas por Harris (1990), Howell (1989) e Stetson e Harris (1988), que consiste em calcular a soma do fluxo observado dentro de uma abertura. Desta região deve-se subtrair a contribuição do céu (*background*), deixando apenas o fluxo do objeto para calcular a magnitude instrumental. O céu foi medido em uma parte da imagem não afetada pela galáxia.

Para todos os dados aplicamos a correção de extinção, baseado nas estrelas observadas junto com os objetos. Para a análise fotométrica definimos diversas aberturas em diferentes regiões das galáxias (visando a galáxia hospedeira e o anel), com o objetivo de comparar os valores encontrados em cada região. Para isso, usamos a ferramenta DIGIPHOT/APPHOT/PHOT.

O ajuste do coeficiente linear da equação da magnitude foi feito com vários pontos

Figura 12 - (a) Imagem reduzida no filtro R da galáxia AM 2229-735 obtida com o GMOS-S. (b) Imagem original convoluída com um filtro mediano e subtraída dela própria.



Fonte: a autora.

que correspondem às magnitudes absolutas e instrumentais das estrelas padrões. Usamos estrelas padrões fotométricas de Landolt (1992).

Além da fotometria de abertura, fizemos fotometria de superfície, produzindo diagramas cor \times cor e mapas de cor de cada um dos sistemas. Um mapa de cor é criado dividindo-se a imagem da mesma galáxia, em diferentes filtros. Por exemplo, o mapa de cor B-I é a imagem na banda B dividida pela imagem da banda I.

2.4 Estudo da Cinemática

As velocidades radiais ao longo das fendas foram calculadas com base no efeito Doppler das linhas espectrais. Para a construção do perfil de velocidade radial, usamos a linha de emissão $H\alpha$.

Para medir a intensidade das linhas de emissão, foi feito um ajuste gaussiano usando a rotina SPLIT do IRAF. A incerteza relacionada com as intensidades da linha foi estimada usando o mesmo procedimento de Oliveira, Copetti, Krabbe, (2008), onde a incerteza total da linha de emissão é estimada da soma quadrática da incerteza associada à intensidade da linha de emissão σ_{linha} (resíduo do ajuste gaussiano) e da incerteza do contínuo $\sigma_{cont} = \sqrt{N}\Delta\sigma_{rms}$, onde N é o número de pixels subjacentes à linha de emissão, Δ representa a dispersão do espectro (unidades de comprimento de onda por pixel), e σ_{rms} é a raiz quadrada do fluxo médio do contínuo (fluxo por unidade de comprimento de

onda). Assim, a incerteza é dada por $\sigma^2 = \sigma_{linha}^2 + \sigma_{cont}^2$.

2.5 Análise Espectral

Ao se estudar a formação e evolução de sistemas de galáxias em interação, a análise espectral é uma ferramenta fundamental. A história química da evolução de uma galáxia é regida por diversas populações estelares que se formaram e evoluíram no decorrer da vida da galáxia, assim, a compreensão da evolução química de uma galáxia pode ser entendida como o desmembramento dessas histórias.

É comum em galáxias em interação encontrarmos a contribuição de populações com diferentes idades e composições químicas. Nelas a transferência de gás de uma componente à outra varia de sistema para sistema, desde acréscimo de gás até a fusão total. Sendo assim, com o acúmulo de massa, é razoável supor que as PRGs, assim como as demais galáxias formadas por transferência de gás, apresentem condições adequadas para disparar atividades nucleares não térmicas.

Neste trabalho usamos os diagramas de diagnóstico para classificar a fonte de ionização nuclear das galáxias estudadas. Os diagramas de diagnóstico mais usado para classificação de galáxias com linhas de emissão é o proposto por Baldwin, Philips, Terlevich, (1981), conhecido como BPT, que utiliza razões de linhas fáceis de se detectar no óptico: $[O III]/H\beta$ vs. $[O I]/H\alpha$ e $[N II]/H\alpha$ e $[S II]/H\alpha$.

Nos diagramas de diagnósticos, usamos os critérios de Kewley et al. (2006) para separar os objetos fotoionizados por estrelas massivas, classificadas como regiões de galáxias “*star forming*”, das galáxias com núcleo ativo (AGN, do inglês *Active Galactic Nuclei*). Esta separação combina resultados de modelos de fotoionização com modelos de sínteses populacionais, construídos por Kewley et al. (2001), com o objetivo de analisar as propriedades das linhas de emissão de 80 000 galáxias selecionadas do SDSS – *Sloan Digital Sky Survey*. Eles mostraram que Seyferts e LINERs formam ramos separados nos diagramas de diagnósticos óticos. O campo de radiação gerado pelo núcleo ativo é mais intenso (duro) que o campo produzido pelas regiões H II, isso faz com que as razões $[O III]/H\beta$ apresentem valores elevados para as razões $[N II]/H\alpha$, $[S II]/H\alpha$ e $[O I]/H\alpha$.

A razão de linhas $[O III]/H\beta$ é representativo da excitação do gás. A presença da linha de emissão do $[O III]$ requer fótons com energia superior a 35 eV, que geralmente tem emissão mais fraca em regiões H II do que em AGNs. Essa razão de linha é sensível aos efeitos de metalicidade do gás, uma vez que o oxigênio representa um dos principais agentes resfriadores do gás. Um considerável aumento da metalicidade faz com que o gás seja resfriado de forma mais eficiente, reduzindo a temperatura dos gases e a intensidade relativa de $[O III]$ com relação $H\beta$ até $0,3Z_{\odot}$ (ROCHA-POPPE et al., 2010).

A razão de linhas $[\text{O I}]/\text{H}\alpha$ tem como finalidade medir a espessura óptica do gás emissor. De acordo com [Krolik \(1999\)](#), também pode ser usada como uma medida do fluxo de fótons de alta energia, cuja absorção é a causa do aquecimento da região observada.

A razão de linhas $[\text{N II}]/\text{H}\alpha$ também faz parte de um dos diagramas BPT e é sensível aos efeitos da abundância química. Esta razão de linhas não é afetada pela extinção, devido à proximidade das linhas. Um cuidado especial deve ser tomado para realizar as medidas do $[\text{N II}]$ devido à proximidade do $\text{H}\alpha$ largo, principalmente quando há linhas estreitas de $[\text{N II}]$, como em galáxias Seyferts 1.

A razão $[\text{S II}]/\text{H}\alpha$, é representativa de regiões de baixa excitação e, dada a proximidade entre os comprimentos de onda, não é afetada pela extinção. De acordo com [Veilleux e Osterbrock \(1987\)](#), as linhas de emissão do $[\text{S II}]$ são originadas tanto em regiões parcialmente ionizadas, como em regiões ionizadas, assim como a linha de $[\text{O I}]$. Eles discutem ainda, que as linhas de $[\text{S II}]$ e $[\text{O I}]$ se originam preferencialmente na região parcialmente ionizada da galáxia, que é bastante estendida em AGNs, mas quase ausente nas galáxias fotoionizadas por estrelas O e B. Esta diferença física distingue um espectro de AGN, com linhas estreitas, dos espectros típicos de uma região H II.

A evolução química dos objetos em interação é significativamente alterada em comparação com o que ocorre nas galáxias isoladas. O estudo do gás nos dá importantes dicas de qual cenário de formação deu origem a PRG (como discutido [Subseção 1.2.1](#)). Nos nossos estudos, usamos calibrações empíricas entre as razões de abundância de emissões de linhas que são identificadas mais facilmente para estimar a abundância de metais ([Dors Jr. et al, 2011](#) e referências). Nós estimamos a abundância de oxigênio usando o O/H como traçador da metalicidade e utilizando a calibração de S/H com os parâmetros propostos por [Pérez-Montero e Contini \(2009\)](#). Para isso, aplicamos:

$$O3N2 = \log \left(\frac{I([\text{O III}]\lambda 5007)}{I(\text{H}\beta)} \times \frac{I(\text{H}\alpha)}{I([\text{N II}]\lambda 6584)} \right), \quad (2.1)$$

$$N2 = \log \left(\frac{I([\text{N II}]\lambda 6584)}{I(\text{H}\alpha)} \right) \quad (2.2)$$

e,

$$12 + \log(\text{O}/\text{H}) = 8.73 - 0.32 \times O3N2, \quad (2.3)$$

$$12 + \log(\text{O}/\text{H}) = 0.57 \times N2 + 9.07. \quad (2.4)$$

Para as galáxias estudadas, calculamos também a densidade eletrônica N_e , que indica a quantidade de elétrons por unidade de volume. Segundo Copetti et al. (2000), a análise da distribuição de densidades eletrônicas pode evidenciar estruturas presentes no objeto e, dar subsídios para compreender a sua evolução dinâmica, já que tais estruturas estão diretamente relacionadas com a expansão natural da matéria ionizada.

A densidade eletrônica estimada neste trabalho é determinada através do duplete do íon $[\text{SII}]\lambda 6716/\lambda 6731$, usando a ferramenta STSDAS.NEBULAR.TEMDEN do IRAF com temperatura de 10 000K (adotado de Ramsbottom, Bell, Starfford, (1996) e Verner, Verner, Ferland (1996)).

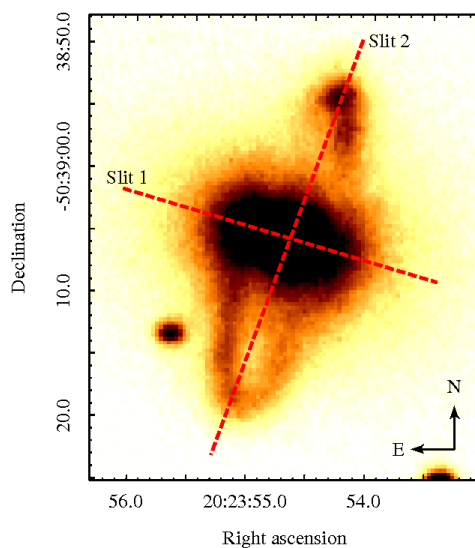
3 Resultados e Discussões

Neste capítulo, serão apresentados os resultados das análises espectral e fotométrica das galáxias estudadas. De cada galáxia será feita uma breve descrição seguida pela discussão das características do sistema. Em seguida, apresentamos os resultados obtidos e uma breve conclusão individual, que posteriormente será inserida nas discussões gerais.

3.1 AM2020-504

A PRG AM 2020-504 (Figura 13)¹, possui uma galáxia hospedeira elíptica, rodeada por um anel bem definido, provavelmente formado por acréscimo de matéria de uma galáxia doadora. Medimos um *redshift* $z = 0,01683$, correspondente à velocidade radial heliocêntrica de 5145 ± 23 km/s. O mapa de cor (B-R) (Veja Figura 4 do Apêndice 1) mostra que o anel é mais azul que a galáxia hospedeira, indicando que o anel é uma estrutura mais nova.

Figura 13 - A galáxia com anel polar AM 2020-504.



Fonte: a autora.

Para analisar a emissão do gás, contruímos quatro diagramas de diagnósticos propostos por Coziol et al. (1999) e Baldwin, Philips, Terlevich, (1981). Esses diagramas são usados para distinguir entre objetos ionizados por estrelas massivas e regiões contaminadas pelo núcleo ativo (AGN) e/ou gás excitado por choques. Esses diagramas usam as razões de

¹Esta galáxia foi estudada detalhadamente no meu mestrado e os resultados da análise cinemática e fotometria já foram relatadas na dissertação, por isso não são rerepresentados aqui. O Trabalho completo desta galáxia foi publicado na revista MNRAS (FREITAS-LEMES et al., 2012b), veja em anexo.

linhas $[\text{O III}]\lambda 5007/\text{H}\beta$ versus $[\text{O I}]\lambda 6300/\text{H}\alpha$, $[\text{N II}]\lambda 6584/\text{H}\alpha$ e $[\text{S II}](\lambda 6717 + \lambda 6731)/\text{H}\alpha$; e $[\text{N II}]\lambda 6584/\text{H}\alpha$ versus $[\text{S II}](\lambda 6717 + \lambda 6731)/\text{H}\alpha$ (Figura 14).

Na Tabela 5 são apresentadas as seguintes medidas para as extrações feitas no espectro da fenda *Slit 2*, que passa pelo eixo maior do anel: as distâncias do centro galáctico, as intensidades das linhas de emissão normalizadas para o fluxo de $\text{H}\beta=100$ e o coeficiente nebuloso de avermelhamento $C(\text{H}\beta)$. O $C(\text{H}\beta)$ foi calculado através da comparação entre os decrementos de Balmer $\text{H}\alpha/\text{H}\beta$ baseado no valor teórico 2,86 dado por Osterbrock (1989) para a temperatura eletrônica de 10 000 K. Consideramos a lei interestelar de Whitford (1958). O fluxo de $\text{H}\beta$ em cada abertura também é apresentado.

O coeficiente de avermelhamento $C(\text{H}\beta)$ do anel da AM 2020-504 é de 0.8, valor similar ao encontrado na PRG SDSSJ075234.33+292049.8 (BROSCH et al., 2010) e maior que o dos discos de galáxias espirais, por exemplo, M 33 KENNICUTT; GARNETT, (2011) e M 101 (KENNICUTT; Garnett, 1996).

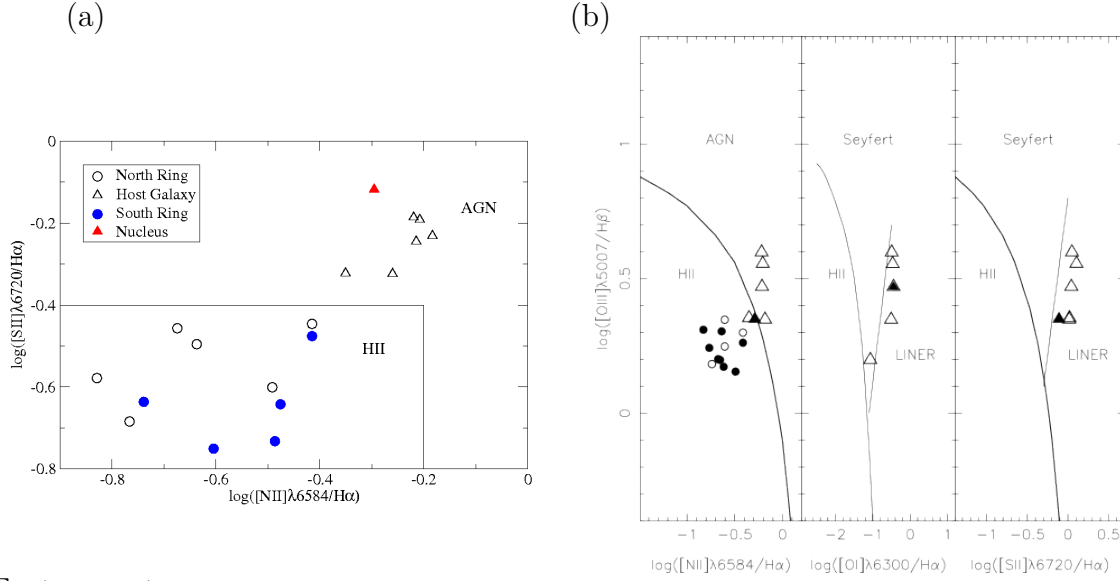
A Figura 14 mostra os diagramas de diagnósticos para a galáxia AM 2020-504, onde diferentes símbolos são usados para representar o anel e a região nuclear. Na Figura 14a é apresentado o diagrama de diagnóstico proposto por Coziol et al. (1999), onde é plotado $[\text{N II}]/\text{H}\alpha$ versus $[\text{S II}]/\text{H}\alpha$. Essas duas razões são significativamente mais altas em LINERs e Seyferts do que em regiões HII, por exemplo. A distinção entre os tipos de AGN (Seyferts ou LINERs) não é possível usando este diagrama, mas as regiões fotoionizadas por estrelas do tipo O e B são claramente separadas das regiões ionizadas por AGN. Na Figura 14a, os pontos correspondentes ao anel são divididos entre a parte norte do anel (círculos vazados) e sul do anel (círculos cheios), e as medidas sobre a galáxia hospedeira são representadas por triângulos vazados e o núcleo por um triângulo cheio.

As linhas apresentadas no diagrama da Figura 14b foram usadas para separar objetos com fontes de ionização distintas, seguindo os critérios de Kewley et al. (2006). Estes autores combinaram resultados do modelo de fotoionização estelar com modelos de síntese de população, construídas por Kewley et al. (2001). Podemos ver que o ponto nuclear e os que correspondem a galáxia hospedeira, ocupam a região dos AGNs em três diagramas (Figura 14) e em um deles está no limite da divisão. Em dois deles, estes pontos são no local destinados as LINERs, enquanto os pontos do anel estão na parte ocupada por regiões HII.

Tabela 5 - Intensidade de linhas de emissão corrigidas por avermelhamento (em relação ao $H\beta=100$) e propriedades globais da AM 2020-504 referente ao eixo maior do anel (*Slit 2*).

r (kpc)	$\log(F(H\beta))$ $\text{erg s}^{-1} \text{cm}^{-2}$	$C(H\beta)$	[O III] λ 5007	$H\alpha$	[N II] λ 6584	[S II] λ 6716	[S II] λ 6731	O3N2	N2	$12+\log(O/H)$ O3N2	$12+\log(O/H)$ N2
5.83	-15.01	1.11	162±11	263±16	45±3	46±4	51±5	0.97	-0.76	8.41	8.46
5.10	-14.58	0.88	192±11	268±15	39±2	29±2	68±5	1.12	-0.83	8.37	8.40
4.37	-14.81	0.35	153±9	279±14	61±4	—	—	0.84	-0.66	8.45	8.54
3.65	-15.07	1.31	183±9	260±13	59±3	39±3	78±6	0.90	-0.64	8.43	8.56
2.91	-14.95	0.80	150±8	270±13	57±3	57±4	90±6	0.85	-0.67	8.45	8.53
2.20	-15.22	0.68	141±8	272±21	65±3	—	—	0.77	-0.62	8.48	8.57
1.45	-15.17	0.78	135±6	270±11	87±4	135±7	65±4	—	—	—	—
0.73	-15.25	1.05	169±8	265±10	101±4	142±8	90±3	—	—	—	—
0.38	-15.38	1.47	204±10	256±10	114±5	136±5	114±8	—	—	—	—
0.0	-15.39	1.97	313±12	247±8	153±6	143±9	145±11	—	—	—	—
0.38	-15.39	1.71	262±10	252±10	154±6	124±8	132±10	—	—	—	—
0.73	-15.21	1.03	207±8	265±9	174±6	113±9	148±7	—	—	—	—
1.45	-15.35	1.68	352±14	253±10	152±6	109±5	152±7	—	—	—	—
2.20	-15.02	0.47	192±7	276±11	106±5	117±6	90±7	0.69	-0.41	8.50	8.74
2.91	-15.11	0.63	169±6	273±11	67±9	—	—	0.83	-0.61	8.46	8.58
3.65	-15.27	0.86	209±10	268±12	66±3	105±6	45±3	0.92	-0.60	8.43	8.58
4.37	-15.27	1.44	137±7	257±15	47±4	69±4	55±3	0.87	-0.73	8.45	8.48
5.10	-15.03	0.53	124±6	275±16	55±5	79±5	16±1	0.79	-0.69	8.47	8.51

Figura 14 - (a) Diagrama de Diagnóstico proposto por Coziol (1999) da galáxia AM 2020-504. (b) Diagramas de Diagnóstico propostos por Kewey (2006) da galáxia AM 2020-504.



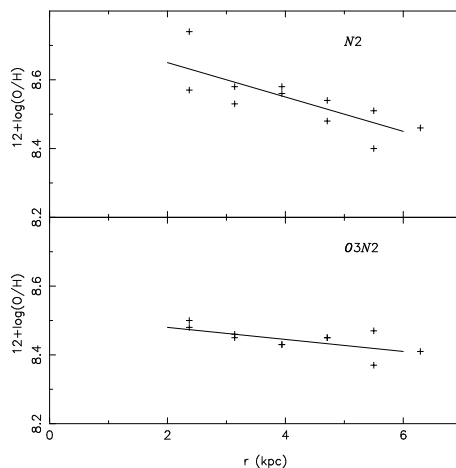
Fonte: a autora.

As abundâncias químicas das regiões H II em galáxias com anel polar tem profundas implicações para o cenário evolutivo desses objetos e nos dão importantes dicas sobre os mecanismos de formação do anel (veja comentários na [Subseção 1.2.1](#)). Para os casos de fusão e acréscimo de gás de outra galáxia, altas metalicidades seriam encontradas. Para testar qual dos cenários discutidos em [Subseção 1.2.1](#) representam a formação da PRG AM 2020-504, estimamos a abundância de oxigênio nas regiões polares do disco. A abundância química só pode ser obtida diretamente por medições de razões de linhas sensíveis a temperatura, como por exemplo $[\text{O III}](\lambda 4959 + \lambda 5007)/\lambda 4363$, que infelizmente não foram todas observadas nos espectros do anel da AM 2020-504. Nestes casos, calibrações empíricas são necessárias (veja Dors et al. (2011) e suas referências). Por isso, estimamos a abundância de oxigênio O/H (usado como traçador da metalicidade) com os parâmetros propostos por Pérez-Montero e Contini (2009) (Seção 2.5).

Na [Tabela 5](#) os valores desses parâmetros e o valor da abundância de oxigênio derivada para cada região classificada nos diagramas de diagnóstico como regiões H II são apresentados. Os parâmetros $O3N2$ e o $N2$ indicam que o anel têm abundâncias de oxigênio $[12 + \log(\text{O}/\text{H})] \sim 8,3 - 8,8$ dex, com valor médio de $8,53 \pm 0,11$ dex. Este valor é próximo do valor máximo da abundância de oxigênio derivada para as regiões centrais de galáxias espirais, de 8,87 dex (PILYUGIN; THUAN; VÍLCHEZ, ()).

Na [Figura 15](#) apresentamos a abundância de oxigênio com base em dois parâmetros como função da distância ao centro da galáxia AM 2020-504. Ambos indicam um

Figura 15 - Gradiente de $12+\log(O/H)$ na direção do eixo maior do anel da AM2020-504, a escala correspondente é $1''=0,344\text{pc}$. A linha é a regressão linear da determinação da abundância de oxigênio obtidos para os parâmetros que são indicados em cada gráfico.



Fonte: a autora.

gradiente radial de oxigênio no anel. A regressão linear nas estimativas seguindo o $O3N2$ e $N2$ são de $-0,017(\pm 0.006)\text{dex/kpc}$ e $-0,051(\pm 0.013)\text{dex/kpc}$, respectivamente. Esses valores são semelhantes aos encontrados em galáxias espirais (DORS; COPETTI, (2005); PILYUGIN; VÍLCHEZ; CONTINI et al. (2004))

Também testamos se AM 2020-504 segue o relação metalicidade-luminosidade das galáxias espirais. PILYUGIN; VÍLCHEZ; CONTINI, (2004) descobriram que a abundância de oxigênio em galáxias espirais, segue a relação

$$12 + \log(O/H) = 6.93(\pm 0.37) - 0.079(\pm 0.018)M_B. \quad (3.1)$$

Nós calculamos a magnitude absoluta de AM 2020-504 como sendo $M_B=-18.24$, considerando que o esferóide central e o anel polar estejam a uma distância de 70 Mpc ($H_0=73$, Mould et al. (2000)). A partir da relação 4.1 obtemos $12+\log(O/H)=8.37\pm 0.2$ dex.

A metalicidade média na AM 2020-504 é alta ($Z \approx Z_\odot$), existe um gradiente de oxigênio em todo o anel polar, e esta galáxia segue a relação metalicidade-luminosidade das galáxias espirais normais. Esses resultados apoiam os cenários de formação de acréscimo ou grande fusão para este objeto e descarta a acreção de gás frio via filamentos.

3.1.1 Conclusão Individual

A AM 2020-504 é uma galáxia com anel polar com o anel bem definido ao redor de uma galáxia hospedeira elíptica. O anel foi provavelmente formado por acreção de material de uma galáxia doadora durante um evento de interação. Este sistema possui um AGN como indicado nos diagramas de diagnóstico. Usando dois métodos empíricos com base nas linhas de emissão facilmente observáveis, encontramos (a) a abundância de oxigênio para as regiões H II localizadas no anel está na faixa de $[12+\log(\text{O}/\text{H})]=8,3-8,8$ dex com valor médio de $8,53 \pm 0,11$ dex e (b) a presença de um gradiente de oxigênio em todo o anel de cerca de -0.035 dex/kpc. Descobrimos também que AM 2020-504 segue a relação de metalicidade-luminosidade de galáxias espirais típicas. Esses resultados suportam o cenário de acréscimo ou fusão e descartam o cenário de acréscimo de gás frio dos filamentos cósmicos.

3.2 AM2229-735

Interações de galáxias no universo local são relatadas em catálogos por diversos autores (VORONTSOV-VELYAMINOV, 1959; 1977; ARP; MADORE, 1977; 1986; WHITMORE et al., 1990; MOISEEV et al., 2011). Segundo o modelo hierárquico de formação de estruturas cósmicas, no universo primitivo as interações entre galáxias provavelmente foram as principais responsáveis pela formação das propriedades observadas nas galáxias (SPINRAD et al., 1998). Mesmo na época atual, pelo menos 5-10 % de galáxias são membros de sistemas interagentes (RESHETNIKOV; SOTNIKOVA, (1997)). E ainda, muitas outras galáxias guardam sinais em sua estrutura de interações e mergers passados. Exemplos desses sinais são vistos nas Galáxias com Anel Polar (PRGs). Com o objetivo de investigar o cenário de formação das PRGs, nós usamos os catálogos de Whitmore et al. (1990), Vorontsov-Velyaminov (1977), Arp e Madore (1977) e Arp (1986) em busca de pares de galáxias que podem ser progenitoras de PRGs. A partir desta análise, a galáxia AM 2229-735¹ foi selecionada como objeto-chave devido à sua estrutura morfológica. AM 2229-735 é um sistema formado por duas galáxias espirais, NED01 e NED02 e uma ponte muito luminosa. A Figura 16a mostra uma imagem na banda r-G0326 do sistema AM 2229-735.

Na Figura 16b são expostos os espectros nucleares das galáxias NED 01 e NED 02. As seguintes linhas de emissão podem ser identificadas, da esquerda para a direita: $H\beta$, $[O III]\lambda 4959$, $[O III]\lambda 5007$, $[N II]\lambda 6548$ *blended* com $H\alpha$, $[N II]\lambda 6584$, e $[S II](\lambda 6716 + \lambda 6731)$. O *redshif* da NED 01 é $z = 0.0573$, correspondendo a uma velocidade de $17\,518 \pm 25 \text{ km s}^{-1}$ e, para a NED 02, o *redshif* é de $z = 0.0583$, derivado da velocidade $17\,326 \pm 27 \text{ km s}^{-1}$.

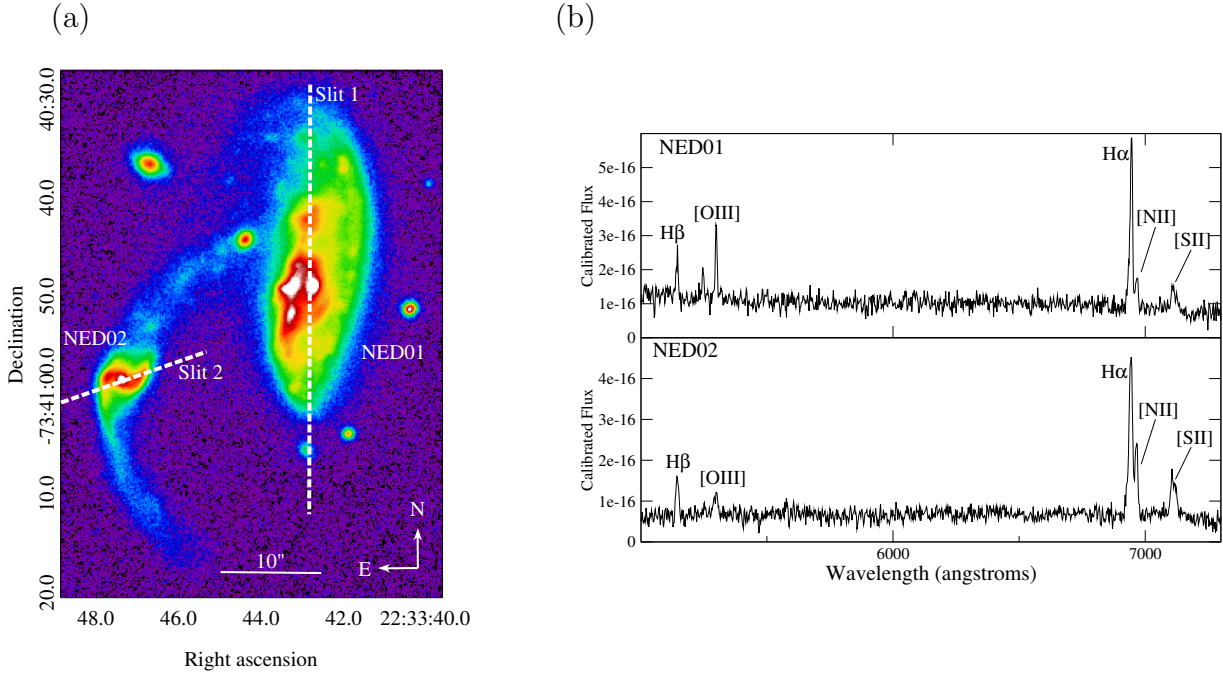
Ferreiro, Pastoriza, Rickes, (2008) estudaram esta galáxia e estimaram que a faixa de idade de seis regiões H II, é de 5-7 Myr. A sua atividade nuclear e população estelar foi estudada por Pastoriza, Donzelle, Bonatto, (1999) que encontrou um espectro composto (AGN + Regiões H II) para o núcleo da galáxia principal.

A morfologia da galáxia AM 2229-735, se assemelha ao encontrado por Bournaud e Combes (2003) (Figura 5) em simulações de N-corpos que estudam a formação de PRGs. Em $t \sim 1,5 \text{ Gyr}$, a simulação reproduz bem a morfologia do gás e a estrutura estelar vista nesta galáxia, indicando que este sistema pode ser um progenitor de PRG.

Para melhor entender esse sistema, realizamos fotometria com aberturas circulares nas posições marcadas na Figura 17a. A Tabela 6 apresenta as magnitudes mensuradas em B, (B-V), (B-R), (V-R) e (V-I) para as regiões demarcadas. Cada abertura tem raio de $2''$ (aproximadamente 2.3 kpc). Algumas das posições, coincidem com as do trabalho de

¹O trabalho completo desta galáxia foi submetido a revista MNRAS (Freitas-Lemes, 2014) e está em anexo.

Figura 16 - (a) Imagem na banda r-G0326 obtida com o GEMINI/ GMOS-S com as posições em que foram obtidas as fendas. Posição: P.A.=0° e 120°, respectivamente. A referência ao NED01 (galáxia hospedeira) e NED02 (companheira) são designadas. (b) Espectro óptico nuclear da NED01 e NED02 em unidades de $\text{erg sec}^{-1}\text{cm}^{-2}\text{Å}^{-1}$. As linhas de emissão são identificadas.



Fonte: a autora.

Ferreiro, Pastoriza, Reckes (2008, a fim de facilitar a comparação dos resultados. Também medimos a magnitude absoluta no azul, onde encontramos o valor de $M_B = -19,58 \pm 0,2$ para NED 01.

Na Figura 17b, a distribuição de cor sugere que a região sul da NED01 é mais azul que o norte, com o *blob* - objeto 9, sendo o objeto mais vermelho do diagrama cor-cor. O núcleo da NED02 é mais azul do que o da NED01 (painéis II e III). Toda a NED02 é mais azul do que NED01, e o objeto 6, que está na ponte entre os dois objetos é tão azul quando o núcleo do NED02. Os objetos \triangle e \blacksquare são de campo e seu perfil de brilho indica que são galáxias anãs. No painel I, são expostos os dados de Ferreiro, Pastoriza, Reckes (2008) usando os mesmos símbolos para a comparação com os nossos dados. Embora as posições das nossas aberturas não correspondam exatamente com os usados no trabalho de Ferreiro, Pastoriza, Reckes (2008), os resultados são semelhantes.

Aplicando-se o processo de filtragem descrito na Seção 2.3 (Figura 18), algumas estruturas que estavam escondidas ficaram mais evidentes, como o braço na região norte da galáxia principal e uma barra na região nuclear da NED 01. A galáxia NED 01 é uma

Tabela 6 - Dados da fotometria de abertura. Todas medidas foram obtidas com aberturas de raios iguais a $r = 2''$. As identificações desta tabela estão relacionadas com as posições marcadas na Figura 3.4(a).

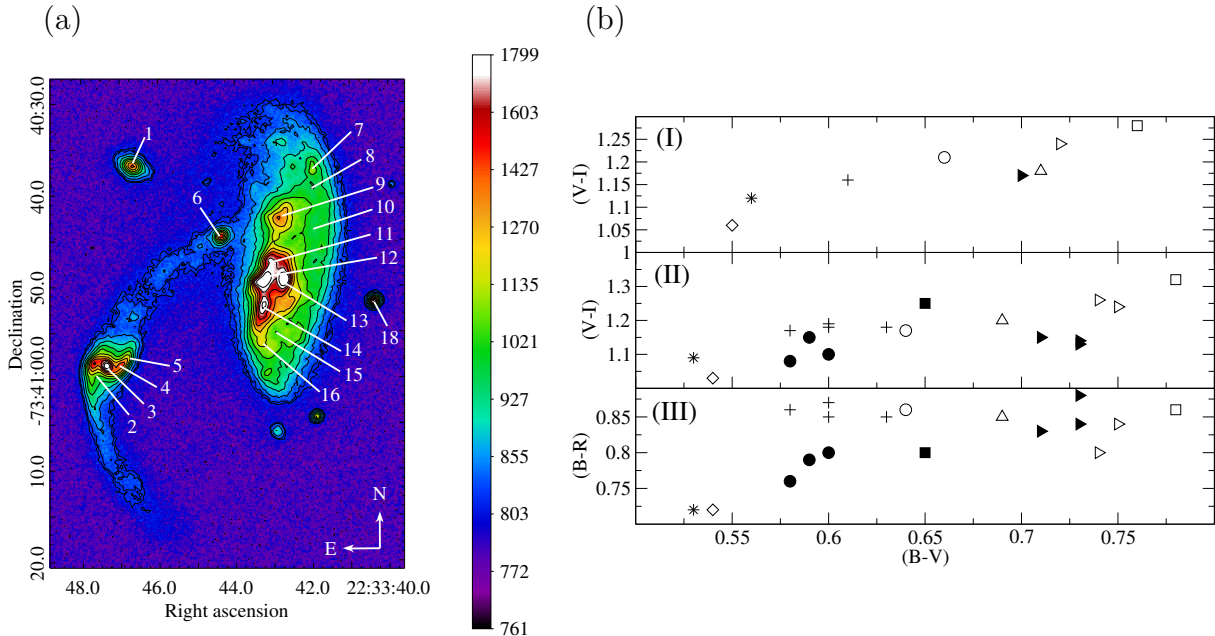
ID	B	(B-V)	(B-R)	(V-R)	(V-I)
1	20.64	0.69	0.85	0.16	1.20
2	19.47	0.58	0.76	0.18	1.08
3	18.15	0.53	0.72	0.19	1.09
4	18.23	0.59	0.79	0.20	1.15
5	19.49	0.60	0.8	0.20	1.10
6	19.52	0.54	0.72	0.18	1.03
7	19.49	0.71	0.83	0.12	1.15
8	19.45	0.73	0.88	0.15	1.13
9	19.07	0.78	0.86	0.08	1.32
10	19.44	0.73	0.84	0.11	1.14
11	18.98	0.74	0.8	0.06	1.26
12	18.99	0.75	0.84	0.09	1.24
13	17.32	0.64	0.86	0.22	1.17
14	18.45	0.58	0.86	0.18	1.17
15	18.46	0.63	0.85	0.13	1.18
16	18.42	0.60	0.87	0.11	1.18
17	18.43	0.60	0.85	0.05	1.19
18	22.35	0.65	0.8	0.15	1.25

galáxia SAB(s) deformada, vista quase de lado ($i=78^\circ$) na nossa linha de visada. Há um evidência de uma barra no centro do NED 01 e de um anel interno, com aproximadamente 1,6 kpc de raio. NED 02 é uma galáxia Sb.

A Figura 19a mostra a curva de rotação da parte central de NED 01. Percebe-se que existem três subsistemas cinemáticos principais ao longo da fenda: (1) O bojo central simétrico ($|r| < 10\text{kpc}$), (2) a mudança de inclinação na região sul, para $r < -10\text{kpc}$ e, (3) uma suave quebra a 8 kpc na região norte, onde há um ponto de inflexão que coincide com o *blob 9*, apresentado na Figura 17. A região sul do perfil de rotação se afasta de nós, e o norte está se aproximando.

NED 02 mostra um perfil de velocidade radial em forma de U (Figura 19b), comuns em galáxias que interagem fortemente, como relatados em estudos de pares perturbados (BORNE, 1990; BORNE; HOESSEL, 1985; 1988; BENDER et al., 1991; MADEJSKY et al., 1991a ;1991b) A interpretação física é dada por Borne et al. (1994): há um acoplamento ressonante de maré entre as órbitas estelares da galáxia principal e da companheira, cinematicamente perturbada (BORNE, 1988; BORNE;HOESSEL,1985; BALCELLS, 1989). Perfis em forma de U também foram encontrado por Faúndez-Abans et al. (2012) em galáxias interagentes no núcleo do aglomerado Abell S0546, como assi-

Figura 17 - (a) Posições onde realizamos a fotometria de abertura indicadas numa imagem da banda r-G0326 do GMOS-S. As magnitudes mensuradas são apresentadas na Tabela 6. (b) (I) Diagrama $(V-I) \times (B-V)$, derivado dos dados de Ferreiro (2008); (II) diagrama $(V-I) \times (B-V)$, baseado nos nosso trabalho, e (III) diagrama $(B-R) \times (B-V)$ com dados do nosso trabalho.



Fonte: a autora.

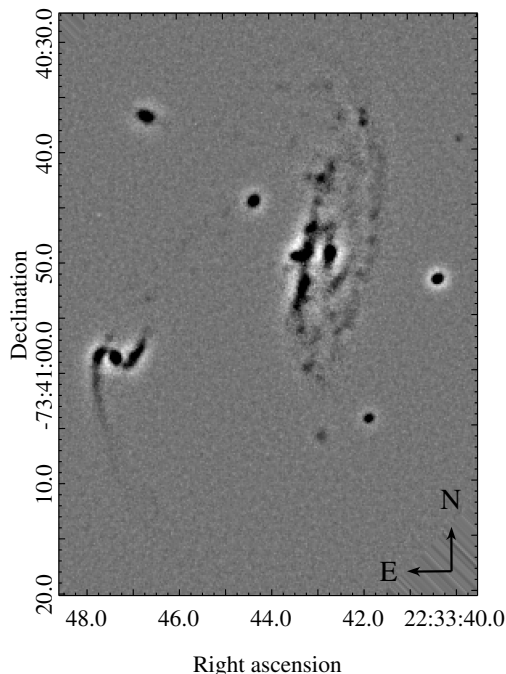
Os símbolos:

- (○) núcleo do NED01; (*) núcleo do NED02;
- (□) objeto 9;
- (●) regiões do NED02;
- (+) regiões sul do NED01;
- (▶) regiões norte do NED01 ;
- (▷) regiões 11 e 12;
- (△) e (■) objetos do campo: 1 e 18;
- (◇) o objeto número 6.

natura observacional direta da ação do efeito de maré.

A cinemática perturbada da NED 02, e a morfologia do par, sugerem que AM 2229-735 pode ser uma proto-PRG. Simulações de N-corpos apresentadas por Bournaud e Combes (2003) e Reshetnikov et al. (2006) para explorar o cenário de acreção mostram, depois do primeiro perigalacticum, uma morfologia muito semelhante à observada em AM 2229-735. Neste cenário, a formação da PRG se dá quando um doador está em órbita quase polar com respeito à galáxia hospedeira, que acreta o material. Após o primeiro perigalacticum, o doador alonga-se devido às forças de maré, de uma forma muito

Figura 18 - Imagem na banda r-G0326 obtida com o GMOS-S, depois de passar por um processo de filtragem (ver texto).



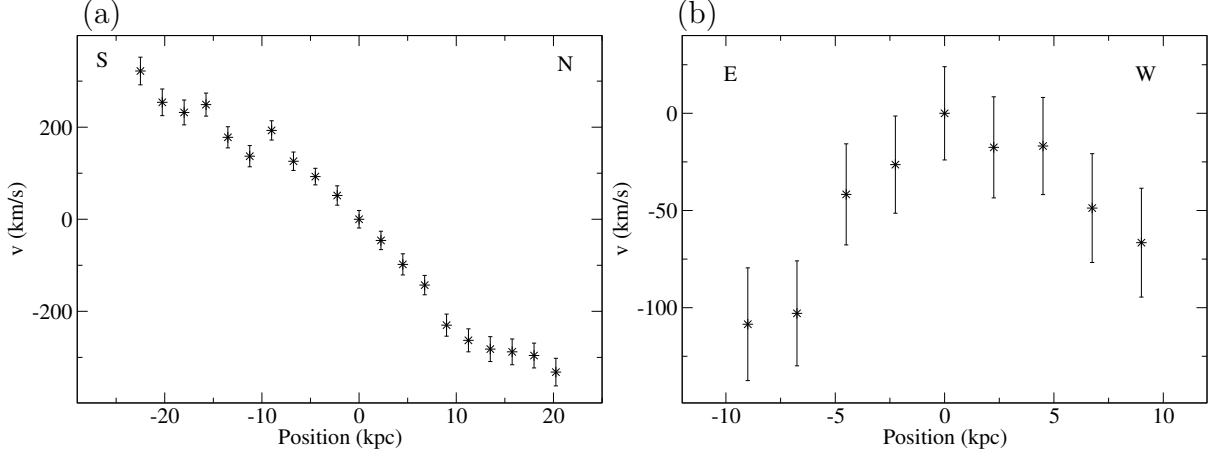
Fonte: a autora.

semelhante ao que vemos na NED 02. A cauda de maré é então puxada pelo potencial da galáxia hospedeira, enrolando-se ao seu redor, formando o anel.

Determinamos também a metalicidade do gás das regiões de formação estelar, através da abundância de oxigênio, usando os índices de linhas de emissão disponíveis nos nossos espectros amplamente discutidos da literatura.

A Figura 20a, apresenta o diagrama de diagnóstico proposto por Pérez-Montero et al. (2013). Podemos notar que as medidas de ambas, NED 01 e NED 02, no $\log([\text{N II}]/\text{H}\alpha)$ versus $\log[\text{S II}]/\text{H}\alpha$, ocupam a região dos *star-forming objects*. Uma análise desses objetos também foi feita por Pastoriza, Donzelle, Bonatto, (1999), que encontrou o mesmo resultado para NED 01, entretanto, eles classificaram NED 02 como tendo um espectro composto, isto é, tendo como fonte ionizante o AGN e estrelas massivas. Na Figura 20b, usamos as razões de linhas para separar objetos com fontes ionizantes distintas, seguindo os critérios de Kewley et al. (2006). Esses autores combinam os resultados de modelos de fotoionização estelar como modelos de síntese populacional, construídos por Kewley et al. (2001). Eles mostraram que Seyferts e regiões de emissão de linha estreita de baixa ionização (LINERs) formam ramos nitidamente separados. Podemos ver que assim como no primeiro diagrama (Figura 20a), todos os pontos ocupam a região de *star-forming objects*.

Figura 19 - (a) Perfil de velocidade radial de NED01 obtida a partir das linhas de emissão medidas ao longo do seu eixo maior (Slit-1). (b) Perfil de velocidades radiais em forma de U de NED02 obtido a partir das linhas de emissão ao longo do Slit-2.



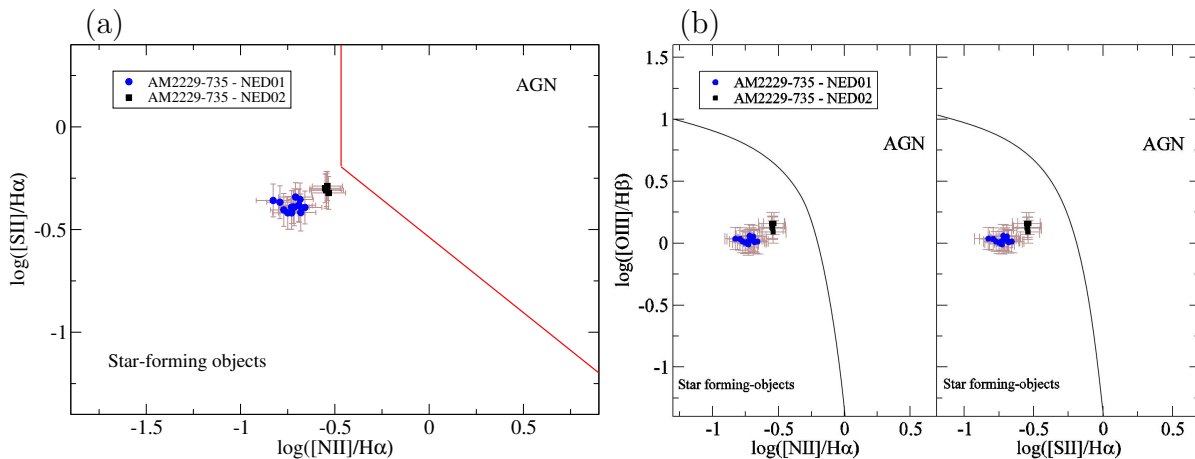
Fonte: a autora.

Na [Figura 21](#) mostramos as abundâncias químicas em NED01 e NED02. Os teores de oxigênio das duas galáxias são muito semelhantes, resultando em abundâncias de oxigênio totais de $12 + \log(O/H) \sim 8,5$. Valor semelhante de abundância de oxigênio foi obtido por [Brosch et al. \(2007\)](#) para a PRG AM 1934-563 e para VGS31b por [Spavone e Iodice \(2013a\)](#). A ligeira diferença de metalicidade entre a distribuição de oxigênio em NED01 e NED02 utilizando o indicador $N2$ não é visível quando utilizamos $O3N2$. Entretanto, essa diferença provavelmente é real, porque também é visto em $S2N2$.

3.2.1 Conclusão Individual

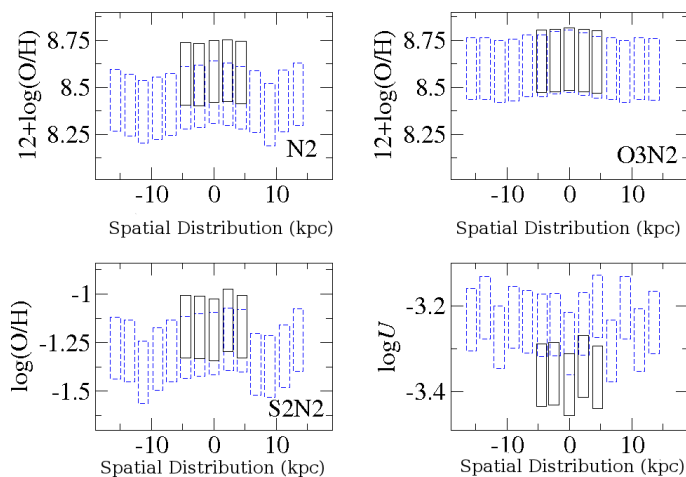
O sistema AM 2229-735 é formado por uma galáxia de disco, NED01 e por uma galáxia espiral compacta perturbada Sb(s), NED02, mostrando cauda e contra-cauda características em forma de arco. A cauda é muito luminosa e parece ligar as galáxias. A cinemática perturbada da NED02 e a morfologia do par, sugerem que AM 2229-735 seja um caso de proto-PRG. Simulações de N-corpos apresentados por [Bournaud e Combes \(2003\)](#) e [Reshetnikov et al. \(2006\)](#) para explorar o cenário de acréscimo, mostram depois do primeiro perigalacticum uma morfologia muito semelhante à vista em AM 2229-735. Neste cenário, o anel polar se forma quando a galáxia doadora está em uma órbita quase polar em relação a galáxia hospedeira. Após o primeiro perigalacticum, o doador alonga-se, devido às forças gravitacionais, de um modo muito semelhante ao que observado na NED02. A cauda de maré é então puxada pelo potencial da galáxia hospedeira, envolvendo em torno dele, para se tornar um anel.

Figura 20 - (a) Diagrama de diagnóstico da AM 2220-735 $\log[\text{N II}]\lambda 6584/\text{H}\alpha$ versus $\log[\text{S II}](\lambda 6717 + \lambda 6731)/\text{H}\alpha$. (b) Diagramas de diagnóstico $[\text{O III}]\lambda 5007/\text{H}\beta$ versus $[\text{O I}]\lambda 6300/\text{H}\alpha$, $[\text{N II}]\lambda 6584/\text{H}\alpha$ e $[\text{S II}](\lambda 6717 + \lambda 6731)/\text{H}\alpha$. Os círculos e quadrados correspondem as regiões do NED01 e NED02, respectivamente.



Fonte: a autora.

Figura 21 - Distribuição espacial da abundância de oxigênio, calculada usando diferentes indicadores, como marcado em cada quadro, para NED01 (linha tracejada) e NED02 (linha contínua).



Fonte: a autora.

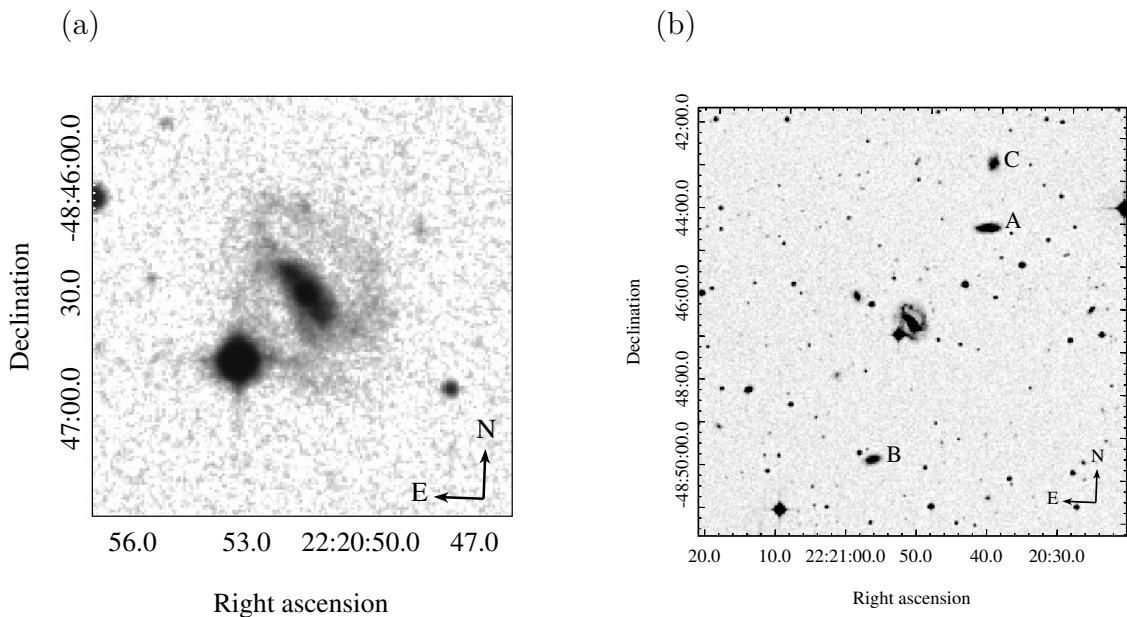
Diagramas de diagnóstico propostos por Baldwin et al. (1981), Coziol et al. (1999) e Pérez-Montero et al. (2013), foram utilizados para classificar a principal fonte de ionização das regiões selecionadas. Todas as regiões medidas são ionizadas principalmente por estrelas massivas e ocupam a região dos formadores de estrelas nos diagramas. Usando dois métodos empíricos baseados em linhas de emissão facilmente observáveis, encontramos o valor da abundância de oxigênio para as regiões H II localizadas no anel, que estão

no intervalo de $12+\log(\text{O}/\text{H})=8.3-8.6$ dex.

3.3 ESO238-G002

O estudo dos processos físicos envolvidos em interações e fusões de galáxias no universo local é fundamental para compreender a formação de sistemas que apresentam estruturas que não teriam sido formadas se as galáxias não interagissem com o meio ou com outras galáxias. Um exemplo de estrutura formada através do processo de interação, seja com filamentos cósmicos ou com outras galáxias, são as galáxias aneladas.

Figura 22 - (a) Imagem da galáxia ESO 238-G002 mostrando o seu anel irregular. (b) Campo em torno da ESO 238-G002.



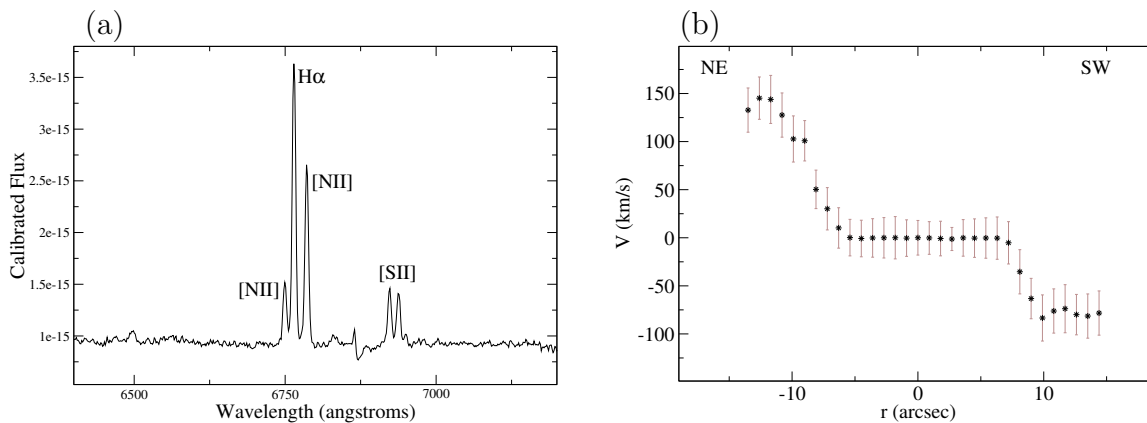
Fonte: a autora.

Com o objetivo de investigar as propriedades físicas em uma galáxia que ainda está formando o seu anel, estudamos a galáxia ESO 238-G002 (Figura 22a). Esta galáxia possui um anel irregular, visto face-on, quase perpendicular à galáxia hospedeira, uma espiral do tipo SB(s)b (VAUCOULEURS et al., 1991). Ela se enquadra na categoria **RK** de Theys e Spiegel (1976) e na categoria **P** da classificação de Few e Madore (1986). Com os nossos dados espectroscópicos determinamos uma distância de 126 Mpc para ESO 238-G002, derivada da velocidade heliocêntrica de 9152 ± 18 km/s ($z = 0,0307$). Nas imagens ópticas, o campo em torno desta galáxia não mostra restos de material ou pontes que a enlacen em outra estrutura ou galáxia. Entretanto, identificamos três galáxias companheiras que possuem *redshifts* semelhantes (Figura 22b). O objeto mais próximo é a galáxia espiral 2MASX J22204141-4844140 (label A). A sua velocidade é de 9060 ± 55

km/s (NED) e está a $2,8''$ da ESO 238-G002. Mais a sul, temos a galáxia irregular 2MASX J22205636-4849431 (label B), com velocidade 10676 ± 55 km/s e distante $3,3''$ da galáxia anelada. A última galáxia que aparece no campo é a 6dFJ2220410-484243 (label C), com velocidade de 9081 ± 55 km/s e distante $4,1''$. A presença de galáxias companheiras próximas a galáxias aneladas é relativamente comum. Na PRG AM 2020-504 são relatadas seis galáxias companheiras, todas com velocidades semelhantes (FREITAS-LEMES et al., 2012b). Beygu et al. (2013) estudando a galáxia anelada VGS31b mostrou que ela possui mais três galáxias companheiras, todas embebidas no mesmo envelope de HI e praticamente com a mesma velocidade.

Na Figura 23a é apresentado o espectro da região nuclear desta galáxia. As linhas de emissão estão demarcadas. Observando a curva de rotação desta galáxia (Figura 23b), nota-se uma diferença de ~ 150 km/s na velocidade entre $\sim -12''$ (NE da galáxia) e o núcleo. Nesta região está o anel que apresenta velocidade 150 km/s maior do que o extremo da hospedeira. Já a região da galáxia hospedeira ($-5''$ a $8''$) quase não há variação na velocidade.

Figura 23 - (a) Espectro da região nuclear da galáxia ESO 238-G002. (b) Curva de rotação ao longo da galáxia hospedeira.



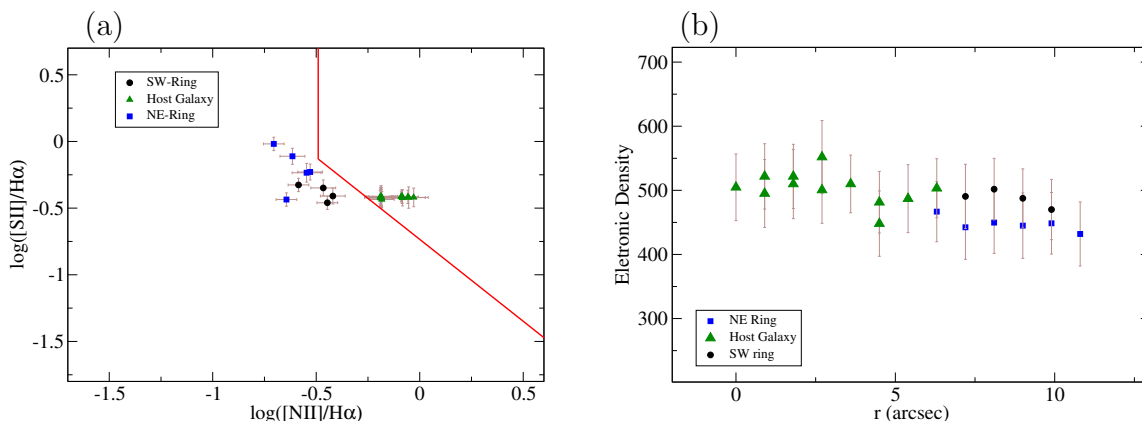
Fonte: a autora.

Analisando os espectros desta galáxia, primeiramente identificamos qual o mecanismo ionizante predominante no sistema. Para isso, usamos o diagrama de diagnóstico $[NII]/H\alpha$ versus $[SII]/H\alpha$ proposto por Pérez-Montero et al. (2013). Através dele nós identificamos que esta galáxia possui um núcleo ativo. Nota-se na Figura 23a uma clara separação entre a galáxia hospedeira (\blacktriangle), que possui um núcleo ativo, e as regiões do anel (\bullet e \blacksquare), que se comportam como regiões H II. Infelizmente, com a cobertura espectral dos nossos espectros ($6000 - 7500 \text{ \AA}$), a classificação entre os tipos de núcleos ativos (LINERs

ou Seyferts) não é possível.

O valor da razão de $[SII]/H\alpha=0,4$ é próximo ao encontrado por Fraquelli, Storchi-Bergmann, Binette, (2000) para galáxias Seyfert1 ($[SII]/H\alpha=0,43$). Este valor indica baixa ionização e, segundo Veilleux e Osterbrock (1987), tende a ser uma zona estendida em objetos com uma grande fração de fótons de alta energia, mas é aproximadamente ausente em galáxias fotoionizadas por estrelas O e B. Já para a razão de linhas $[NII]/H\alpha$ o nosso valor é de 0,40, inferior ao encontrado por Fraquelli, Storchi-Bergmann, Binette, (2000) para galáxias Seyferts1 ($[NII]/H\alpha = 0,6$). Enfim, para uma classificação decisiva sobre qual tipo de núcleo ativo tem essa galáxia precisamos da razão de linhas representativas da excitação do gás, $[OIII]/H\beta$.

Figura 24 - (a) Diagrama de Diagnóstico usando a calibração de proposta por Pérez-Monteiro (2013). A região nuclear tem um núcleo ativo. (b) Densidade eletrônica calculada ao longo do raio da galáxia com base na razão de linhas $[SII]67166731$.



Fonte: a autora.

A densidade eletrônica N_e foi calculada com base na razão das intensidades das linhas de $[SII]\lambda 6716/\lambda 6731$, resolvendo numericamente através da rotina TEMDEN do IRAF.STSDAS, assumindo temperatura eletrônica de 10 000K. Para a galáxia ESO 238-G002 o valor estimado da densidade eletrônica apresentou valor médio de $N_e = 485 \pm 51 \text{ cm}^{-3}$. Este valor é próximo ao encontrado por Krabbe et al. (2013) para a galáxia AM 1054-325, que contém regiões H II muito luminosas ao longo do disco galáctico. Esses autores encontraram $N_e = 434 \pm 53 \text{ cm}^{-3}$, mas com grandes variações ao longo da fenda (de 65 cm^{-3} a 681 cm^{-3}), diferente do que encontramos para ESO238-G002, em que N_e varia entre 401 cm^{-3} e 551 cm^{-3} .

Medimos o valor do parâmetro de ionização baseado na razão $[SII]/H\alpha$, usando

a fórmula

$$\log U = -1,66(\pm 0,66)\log\left(\frac{[S II]}{H\alpha}\right) - 4,13(\pm 0,07)$$

descrita em Dors et al. (2011). Obtivemos $\log U = -3.5$, valor próximo ao encontrado para outros sistemas em interação, e mais baixo que o encontrado para galáxias isoladas, prescrito por Dors et al. (2013).

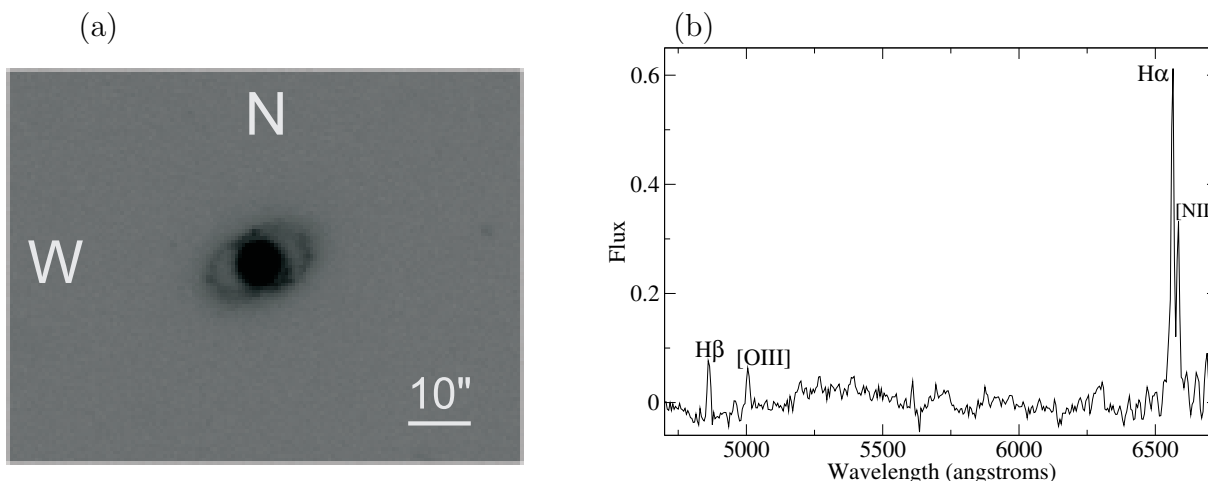
3.3.1 Conclusão Individual

A galáxia ESO 238-G002 apresenta um anel em formação e não simétrico. Ela não apresenta pontes ou caudas que a liguem a outros objetos, entretanto, em um raio de 4.5 arcmin existem outras 3 galáxias com velocidades similares. Para este estudo usamos espectros de 6000-7500Å obtidos no telescópio de 1.5m do CTIO - Chile. Medimos uma velocidade heliocêntrica de 9152 ± 18 km/s. O diagrama de diagnóstico aponta que a galáxia hospedeira tem um núcleo ativo, seguindo uma tendência das galáxias com anel polar. O valor do parâmetro de ionização é similar ao valor encontrado em galáxias isoladas. A densidade eletrônica apresentou pouca variação ao longo do eixo maior da galáxia hospedeira.

3.4 HRG54103

O estudo detalhado da formação estelar em galáxias interagentes fornece informações importantes não só sobre a distribuição etária da população estelar, mas também de diversos aspectos relacionados com o processo da interação e seus efeitos nas propriedades individuais e evolutivas da galáxia. A PRG HRG 54103 é uma galáxia notável do Universo local, com uma cinemática complexa, anel bem definido e núcleo ativo (FAÚNDEZ-ABANS et al., 2009). Acreditamos que esta é uma PRG adequada para se estudar as populações estelares que compõe o anel e a galáxia hospedeira, assim como classificar o seu AGN.

Figura 25 - (a) Imagem da PRG HRG54103 no filtro B obtida no OPD. (b) Espectro nuclear da HRG54103, as linhas do $H\beta$, [O III], $H\alpha$ e [N II] são apresentadas.



Fonte: a autora.

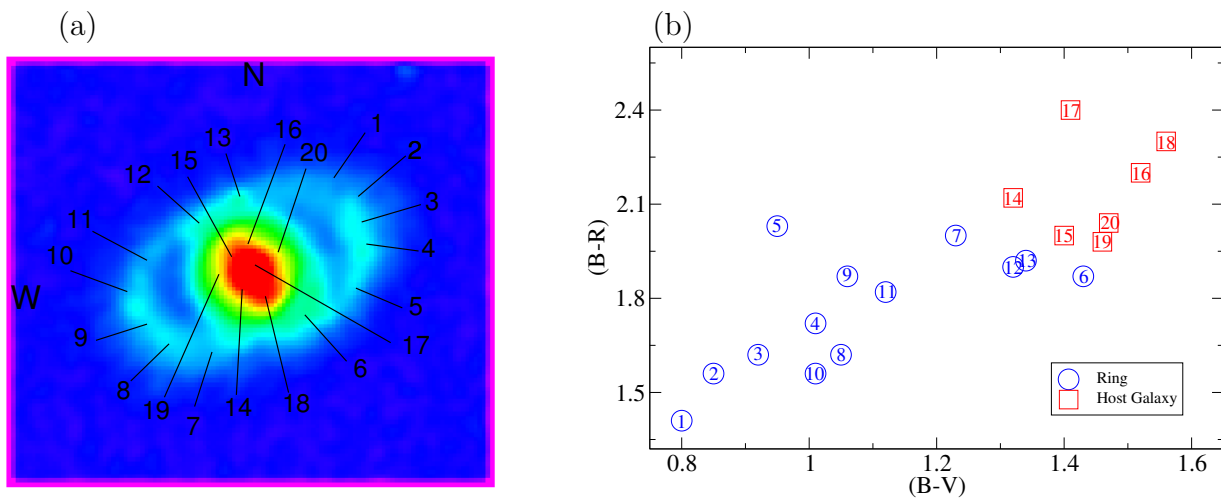
A estrutura interna desta galáxia foi estudada pela primeira vez por Faúndez-Abans e de Oliveira-Abans (1998), mostrando que existem plumas e satélites redondos (Figuras 11 e 16 de Faúndez-Abans e Oliveira-Abans (1998)) provavelmente resquícios de uma ressonância orbital no campo galáctico, que pode ter dado origem ao anel. Este objeto é apontado por Faúndez-Abans e Oliveira-Abans (1998) como um dos melhores exemplos da categoria Saturno das PRGs, veja Figura 25a.

Na região central dos espectros apresentados por Faúndez-Abans et al. (2009), o [N II] é mais intenso do que o $H\alpha$, (também visível nos nossos dados, veja Figura 3.12(b)) enquanto na região do anel acontece o contrário. Os Autores propõem duas explicações para este fato: (I) o excesso de nitrogênio na galáxia hospedeira pode ter sido produzido por um *starburst* ou por supernovas (GONZALEZ-DELGADO et al. 1995; LEH-

NERT;HECKMAN,1994) ou; (II) esta galáxia possui uma fonte extra de excitação de gás, além do AGN, como sugerido por Storchi-Bergmann (1991) e Ohyama, Taniguchi, Terlvich, (1997), e também apontada por Kennicutt JR, Keel, Blaha, (1989), que sugeriu a existência de núcleos ativos *escondidos* como fonte extra de $[N II]\lambda 6584$.

Para melhor entender o sistema, fizemos fotometria de abertura em regiões selecionadas do bojo e do anel (Figura 26a), usando aberturas com raio de $3''$. Fazendo os diagramas cor-cor (Figura 26b), verificamos que a galáxia hospedeira é mais vermelha, sugerindo uma população mais velha, que o anel, azul. O anel e a galáxia hospedeira são bem distinguidos neste diagrama. Os pontos do anel, localizados próximo à galáxia hospedeira, apresentam quase a mesma *cor* da galáxia, por contaminação (veja na Figura 26b as regiões 6, 7, 12 e 13). Os nossos resultados são semelhantes ao encontrado em Faúndez-Abans et al. (2009).

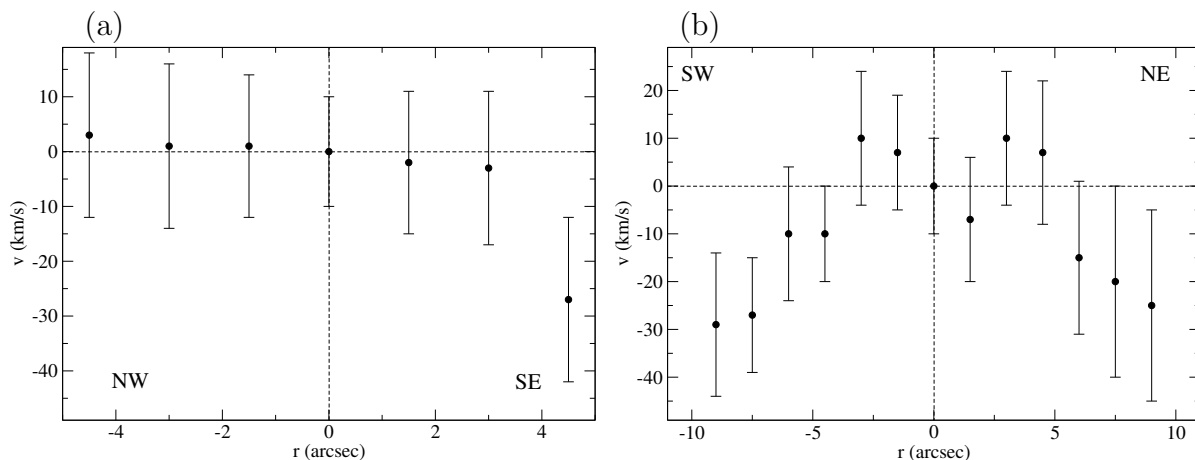
Figura 26 - (a) Imagem em banda B, onde estão demarcadas as aberturas onde fizemos a fotometria. (b) Diagrama (B-V) *versus* (B-R). Os círculos correspondem ao anel e os triângulos correspondem a galáxia hospedeira.



Fonte: a autora.

Estimamos a velocidade heliocêntrica sistêmica usando como centro o pico da intensidade da linha $H\alpha$. O valor obtido para a região nuclear foi de 6484 ± 20 km/s ($z=0,022$), que está de acordo com o NED e com Faúndez-Abans et al. (2009). A Figura 27 mostra as curvas de rotação ao longo do anel e da galáxia hospedeira, respectivamente. A diferença de velocidade encontrada entre o anel e a galáxia hospedeira é muito pequena (~ 30 km/s). Esta é uma diferença atípica nas PRGs, sendo que a maioria tem diferenças de velocidade (hospedeira x anel) grandes, como em PGC 60020 (diferença de ~ 200 km/s Merkuloca et al., (2013)) e SPRC-10 (~ 300 km/s, Moiseev et al., (2011)). Entretanto,

Figura 27 - (a) Perfil de velocidade radial ao longo do eixo maior da galáxia hospedeira. (b) Perfil de velocidade radial ao longo do eixo maior do anel.



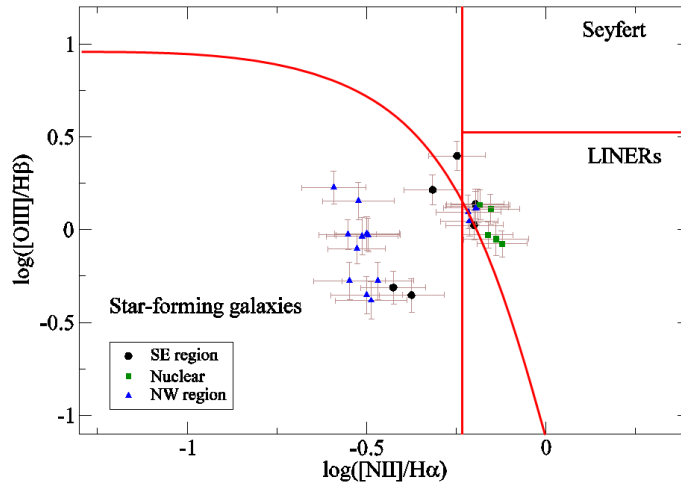
Fonte: a autora.

a SPRC-178 também apresenta velocidades similares entre o anel e a galáxia hospedeira (MOISEEV et al., 2011). Segundo os autores, a velocidade similar pode indicar que existe um envelope de gás que envolve ambas galáxias de um par em interação. A Figura 27a, mostra a curva de rotação ao longo da galáxia hospedeira, que pela cinemática, notamos estar quase de frente (*face-on*). Já na Figura 27b, vemos a curva de rotação na direção do anel. A região central ($r \sim 2,5''$) mostra uma estrutura que se comporta como corpo rígido, sessão central simétrica e (2) uma sessão com diferença de ~ 30 km/s da região central, referente a região do anel.

De acordo com Faúndez-Abans et al. (2009), perto do núcleo da HRG 54103 (veja Fig.11 deste artigo), a principal fonte de excitação dos gases é um AGN. Com o objetivo de classificar o tipo de núcleo ativo que esta galáxia abriga, usamos o diagrama de diagnóstico proposto por Kewley et al. (2006), baseado nas razões de linhas $[\text{O III}]\lambda 5007/\text{H}\beta$ versus $[\text{N II}]\lambda 6584/\text{H}\alpha$. Com ele é possível, além de identificar o núcleo ativo, classificá-lo em LINER ou Seyfert, veja a Figura 28. Observando o diagrama, notamos que a galáxia hospedeira (■) está na região destinada a núcleos ativos do tipo LINER. Alguns pontos do anel (▲ e ●) também estão na região destinado aos núcleos ativos, provavelmente por influência do AGN.

O estudo detalhado da formação de estrelas em galáxias interagentes fornece importantes informações não só sobre a distribuição da idade da população ao longo dos seus componentes estelares, mas também para compreender melhor os vários aspectos relacionados com o processo de interação, e seus efeitos sobre as propriedades das galáxias individuais e sua evolução.

Figura 28 - Diagrama de diagnóstico da galáxia HRG 54103 usando as razões $\log[\text{OIII}](\lambda 5007)/\text{H}\beta$ versus $\log[\text{NII}]\lambda 6584/\text{H}\alpha$.

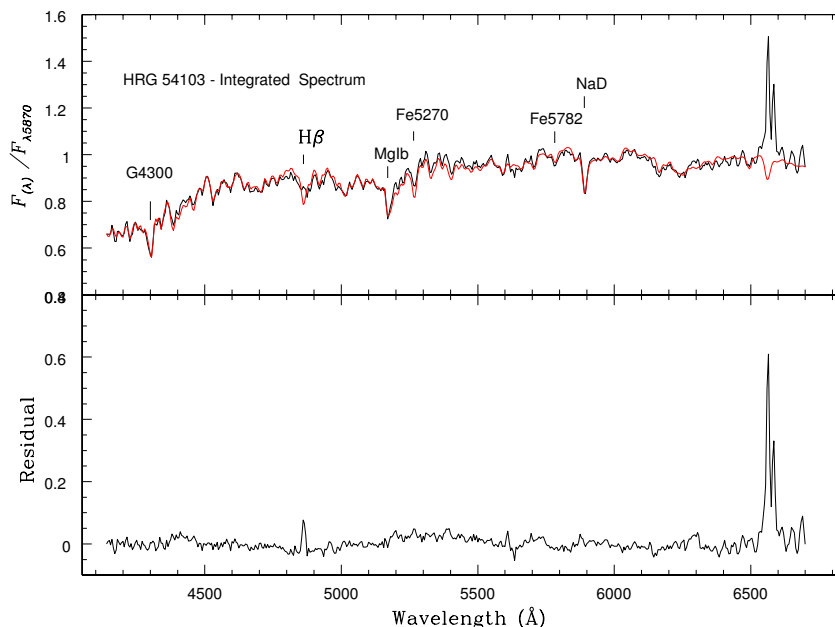


Fonte: a autora.

Para investigar a história da formação estelar deste sistema, utilizamos o código de síntese de população estelar STARLIGHT (CID FERNANDES et al., 2004; 2005; ASARI et al., 2007) em colaboração com a Prof. Dra. Angela C. Krabbe. Este código foi construído baseado em técnicas computacionais empíricas, desenvolvidas originalmente para a síntese de população com ingredientes adicionais de modelos de síntese evolutiva. Este modelo é usado largamente e tem sido muito bem sucedido na descrição da população estelar de galáxias interagentes (veja, por exemplo, Krabbe et al. (2011)). Este método também foi usado por Faúndez-Abans et al. (2013), Krabbe et al. (2011) e Wenderoth et al. (2011) e tem sido bem sucedida em descrever a população estelar em galáxias de interação. Na Figura 29, é apresentado o espectro resultante do processo da síntese.

Usamos as linhas de emissão mais brilhantes $[\text{O III}]\lambda 5007$, $[\text{N II}]\lambda 6584$, $[\text{S II}](\lambda 6717 + \lambda 6731)$ e as linhas de Balmer $\text{H}\beta$ e $\text{H}\alpha$ para determinar a metalicidade deste sistema. A calibração dessas *razões de linhas fortes* com a abundância de oxigênio foi determinada por vários métodos: (i) usando a abundância de oxigênio calculada a partir de elétrons sensíveis a temperatura (PILYUGIN, 2001); (ii) por meio de modelos de fotoionização (por exemplo, Dors e Copetti (2005)); (iii) através de métodos mistos (veja discussões em Kewley e Ellison (2008) e Maiolino et al. (2008)). Para estimar a metalicidade das regiões selecionadas da HRG 54103, seguimos a mesma metodologia utilizada em Freitas-Lemes et al. (2012a) e descrita na Seção 2.5. Na Tabela 7 são apresentadas as distâncias ao centro galáctico, as intensidades das linhas de emissão normalizadas para o fluxo de $\text{H}\beta=100$, o coeficiente nebular de avermelhamento $C(\text{H}\beta)$, calculado através da comparação entre os decrementos de Balmer $\text{H}\alpha/\text{H}\beta$ baseado no valor teórico 2,86 dado por Osterbrock (1989) para a temperatura eletrônica de 10 000 K e considerando a

Figura 29 - Síntese da população estelar da galáxia HRG54103, espectro integrado e espectro subtraído, só com as linhas de emissão.



Fonte: a autora.

lei interestelar de Whitford (1958). Os erros associados de cada abertura foram estimados seguindo os procedimentos de Oliveira, Copetti, Krabbe, (2008).

Na Figura 30 mostramos as abundâncias medidas na galáxia HRG 54103. O teor de oxigênio ao longo da galáxia hospeira é constante, resultando em uma abundância de oxigênio média de $12+\log(O/H)\sim 8,77$. Na região do anel, $r > 4''$, a abundância cai cerca de $\sim 0,2$ dex, principalmente usando o calibrador N2. Isso pode ser reflexo da população que compõe o anel e a galáxia hospedeira. Os resultados preliminares da síntese de população estelar mostram que o fluxo a 5870Å desta galáxia é dominado principalmente por estrelas de população velha. E, uma fração de população jovem e intermediária só é detectada nas regiões externas da galáxia, onde está localizado o anel.

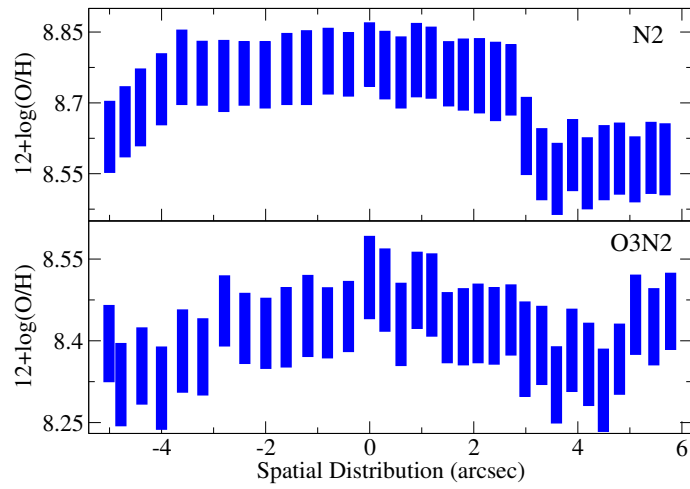
3.4.1 Conclusões Individuais

A galáxia HRG 54103 é um dos melhores exemplos de candidatas a PRGs do tipo saturno, com o bojo esférico. Para este estudo usamos espectros ao longo do anel e da galáxia hospedeira, onde identificamos as linhas de H β , [O III], H α , [N II] e [S II]. Medimos uma velocidade heliocêntrica de 6484 ± 20 km/s. A diferença de velocidade entre a galáxia hospedeira e o anel é muito baixa ~ 30 km/s. Esta diferença é atípica para PRGs e pode ser um indicativo da existência de um envelope de gás que envolve os objetos interagentes.

Tabela 7 - Intensidade de linhas de emissão corrigidas por avermelhamento (em relação ao $H\beta=100$)

Dist. (kpc)	c(Hβ)	[O III] $\lambda 5007$	Hα	[N II] $\lambda 6584$
Região SE				
16	0.32	49 \pm 20	285 \pm 21	107 \pm 21
17	0.14	44 \pm 21	286 \pm 20	121 \pm 20
20	0.40	208 \pm 22	285 \pm 22	194 \pm 22
21	0.47	196 \pm 19	285 \pm 21	186 \pm 21
22	0.18	106 \pm 21	286 \pm 24	181 \pm 24
23	0.31	134 \pm 22	285 \pm 23	185 \pm 23
24	0.37	137 \pm 22	285 \pm 22	182 \pm 22
25	0.78	136 \pm 23	284 \pm 23	190 \pm 23
Região Nuclear				
26	0.65	125 \pm 17	284 \pm 21	194 \pm 21
27	0.86	140 \pm 18	284 \pm 20	204 \pm 20
28	0.75	129 \pm 16	284 \pm 19	199 \pm 19
1	0.30	84 \pm 17	285 \pm 18	216 \pm 18
29	0.67	93 \pm 18	284 \pm 19	196 \pm 19
30	0.48	136 \pm 19	285 \pm 20	187 \pm 20
31	0.46	89 \pm 18	285 \pm 20	207 \pm 20
Região NW				
32	0.54	98 \pm 19	285 \pm 22	201 \pm 21
33	0.39	133 \pm 20	285 \pm 22	184 \pm 23
34	0.44	131 \pm 18	285 \pm 23	182 \pm 24
35	0.35	122 \pm 21	285 \pm 21	182 \pm 22
36	0.34	125 \pm 22	285 \pm 20	174 \pm 19
37	0.18	111 \pm 23	286 \pm 22	175 \pm 23
38	0.12	95 \pm 20	286 \pm 23	91 \pm 22
40	0.5	116 \pm 22	286 \pm 24	73 \pm 22
47	0.55	53 \pm 19	285 \pm 23	81 \pm 22
48	0.55	44 \pm 20	285 \pm 24	90 \pm 23
49	0.48	41 \pm 21	285 \pm 22	93 \pm 21

Figura 30 - Distribuição espacial da abundância de oxigênio, ao longo da galáxia hospedeira, estimada usando os indicadores N2 e O3N2 (como indicado).



Fonte: a autora.

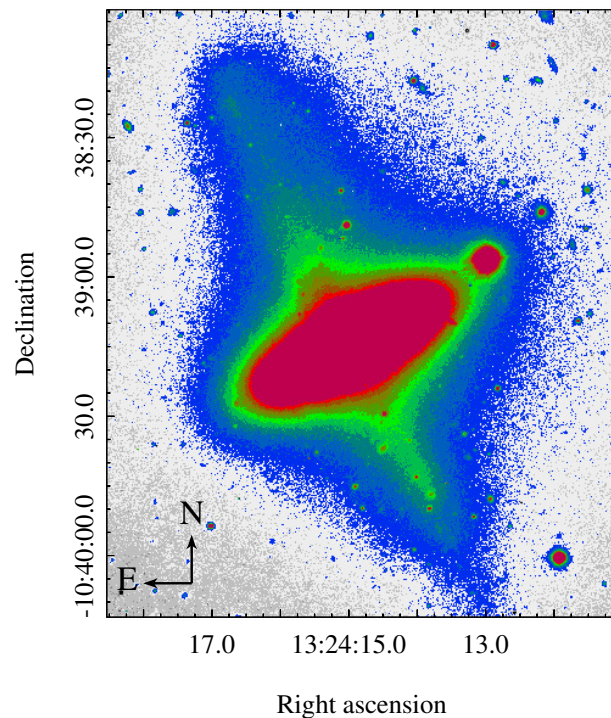
O diagrama de diagnóstico aponta que a galáxia hospedeira tem um núcleo ativo, do tipo LINER. A abundância de oxigênio se mantém quase constante ao longo de toda galáxia hospedeira, com uma suave queda na região do anel, o que pode ser reflexo da população mais jovem que compõe o anel.

3.5 NGC5122

A galáxia com anel polar NGC 5122 é formada por uma hospedeira de formato oval e por um anel extenso e perpendicular ao eixo maior da hospedeira. É relativamente próxima, com z é 0.009400. Tanto o anel como a galáxia hospedeira são vistos quase de lado, o ângulo entre eles é de 91° . Observando o campo da PRG NGC 5122, não encontramos restos de material ou pontes que a enlace com outra estrutura ou galáxia. O anel aponta para a galáxia MGC02-34-045, que segundo Cox et al. (1996) é uma galáxia companheira rica em gás, que está a cerca de $690''$ em projeção. A diferença de velocidade entre essas galáxias é muito pequena, ~ 50 km/s. De acordo com Sparke, van Moorsel, Cox, (2009), embora o anel seja extremamente rico em gás, ele não mostra *nós* de estrelas jovens. Usando dados de HI, eles concluíram ainda que o anel não é radialmente fino, mas um disco largo com um furo central.

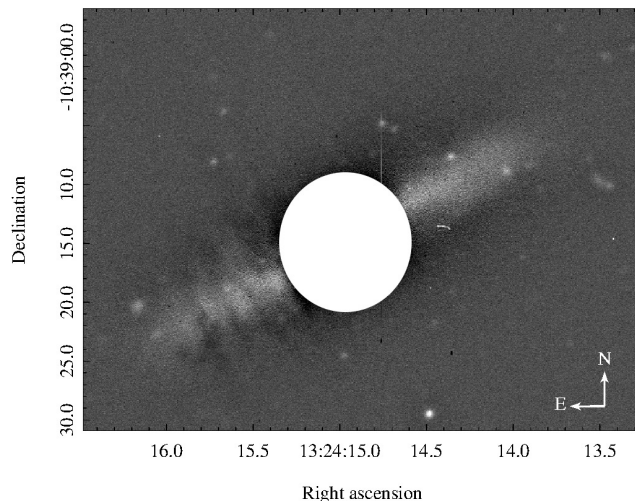
Observando as imagens em R, podemos notar que a galáxia tem uma estrutura central (*core*) elíptica e bojo oval. Na Figura 31, notamos que a parte SW do anel apresenta-se um pouco mais brilhante, em comparação com a parte NE. No extremo SW do anel, é possível ainda notar uma “sobra” de material, possivelmente restos da interação que gerou o anel. Outras galáxias com anel polar também mostram essa caracte-

Figura 31 - Imagem na Banda R da galáxia NGC 5122.



Fonte: a autora.

Figura 32 - Imagem em B, mostrando uma estrutura na galáxia hospedeira, possivelmente bandas de poeira.



Fonte: a autora.

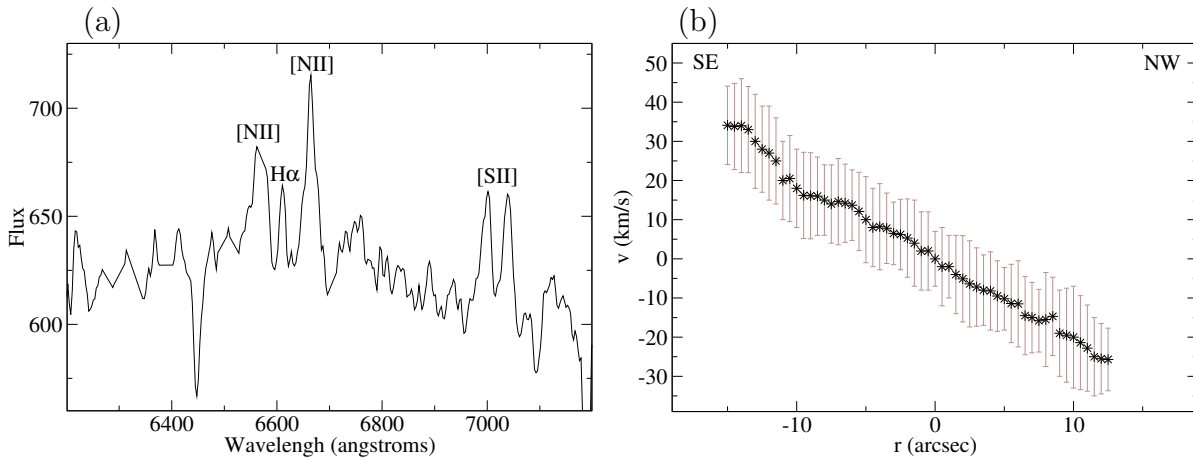
terística, como por exemplo a ESO 603-G21 (RESHETNIKOV, FAÚNDEZ-ABANS, DE OLIVEIRA-ABANS, 2002) e NGC 4650A (IODICE *et al.*, 2002b). Segundo a classificação de Faúndez-Abans e Oliveira-Abans (1998), as galáxias com essas características compõem a família Spindle II.

Para extrair o máximo de informação possível a partir das imagens, foi aplicada uma técnica de tratamento de imagem, como descrito na Seção 2.3. Observando a imagem tratada na banda R, mostrada na Figura 32, foi possível notar alguns filamentos, a SE da galáxia hospedeira. Possivelmente essas estruturas são parte de uma faixa de poeira (*dust-lane*) no plano do disco da galáxia central.

O espectro desta galáxia (Figura 33a) apresenta as linhas de $[NII]\lambda 6548$, $H\alpha$, $[NII]\lambda 6584$, $[SII]\lambda 6717$ e $[SII]\lambda 6731$. A velocidade da galáxia foi determinada como sendo a extração do pico de luminosidade, onde obtivemos 2826 ± 11 km/s. Nosso resultado está de acordo com as medições encontradas na literatura: 2818 ± 10 km/s RESHETNIKOV, FAÚNDEZ-ABANS, DE OLIVIERA-ABANS, 2001, 2855 km/s (COX *et al.*, 1996) e 2842 km/s (HUCHTMEIER, 1997). A curva de rotação, no eixo maior da galáxia hospedeira, é apresentado na Figura 33b. A curva é bem simétrica.

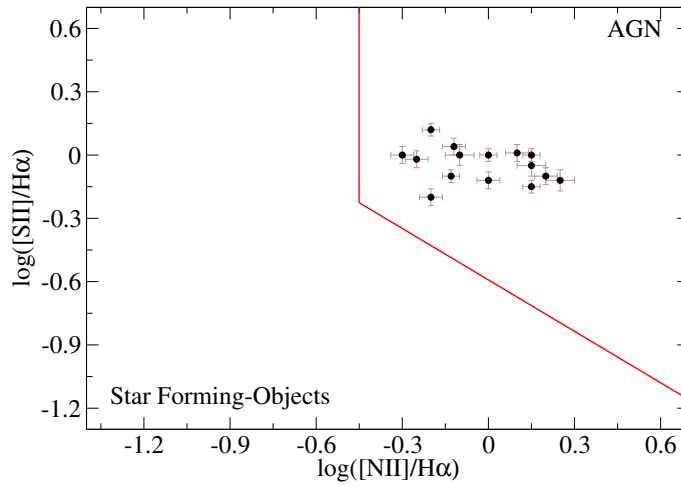
O diagrama de diagnósticos usando as razões de linhas $[NII]/H\alpha$ e $[SII]/H\alpha$ (PÉREZ-MONTERO *et al.*, 2013), apresentado na Figura 34, aponta que existe um núcleo ativo nesta galáxia, mesmo resultado encontrado por Reshetnikov, Faúndez-Abans, de Oliveira-Abans, 2001. Nos espectros desta galáxia há uma forte emissão de $[NII]$, ca-

Figura 33 - (a) Espectro da região nuclear da galáxia NGC 5122. (b) Perfil de velocidade radial ao longo do eixo maior da galáxia hospedeira.



Fonte: a autora.

Figura 34 - Diagrama de diagnóstico da galáxia NGC 5122.



Fonte: a autora.

racterística de AGNs do tipo LINER (VEILLEUX; Osterbrock, 1987).

3.5.1 Conclusões Individuais

A NGC 5122 é uma galáxia com anel polar bem definido. É um dos melhores casos de PRGs, onde o plano do anel e da galáxia hospedeira estão inclinados a 91° . Analisando as imagens, identificamos faixas de poeira na galáxia hospedeira, possivelmente causadas pelo efeito da interação. A curva de rotação da galáxia hospedeira é bem simétrica. Este sistema possui um AGN como indicado no diagrama de diagnóstico. As razões de linhas

presentes nos nossos espectros não permitem classificá-lo entre LINER ou Seyfert.

4 Conclusões

Ao término deste estudo de cinco PRGs e candidatas, apresentaremos algumas conclusões, relacionando-as com objetos apresentados na literatura e em banco de dados. Com isso, conseguimos caracterizar esta classe de objetos, que ainda é pouco estudada.

4.1 Visão Geral das PRGs

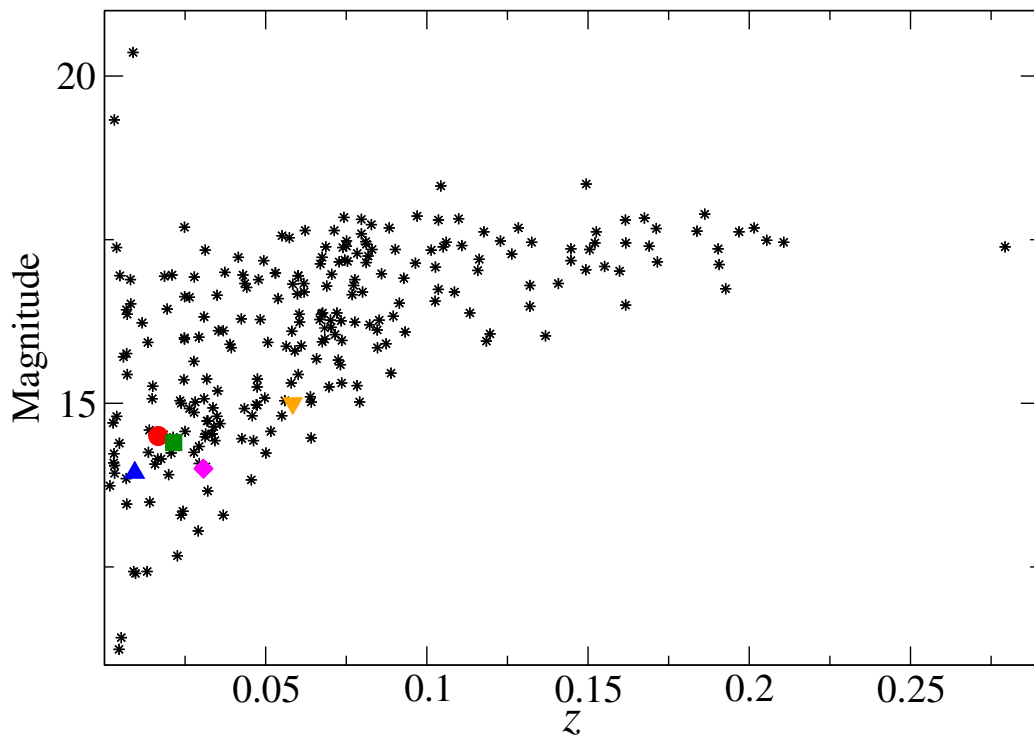
PRGs são sistemas formados por interação e que possuem uma geometria muito específica e rara. Segundo [Moiseev et al. \(2011\)](#) as PRGs são uma classe única de objetos extragalácticos que permitem investigar uma variedade de problemas, ligados à formação e evolução das galáxias.

Hoje o número de PRGs catalogadas é de 432 (275 em [Moiseev et al. \(2011\)](#) e 157 em [Whitmore et al \(1990\)](#)). [Brocca et al. \(1997\)](#), fizeram um estudo estatístico do ambiente das PRGs, buscando companheiras num campo de até 5 vezes o diâmetro do anel e encontraram um ambiente semelhante ao de galáxias normais e, portanto, diferente do campo de galáxias ativas, que geralmente possui galáxias companheiras ([KENNICUTT JR. et al., 1996](#)). Isso dá robustez aos modelos que propõem longos tempos de formação e evolução do anel. De acordo com [Brocca, Bettoni, Galletta, \(1997\)](#), se os anéis são relativamente velhos e estáveis (ou próximos do equilíbrio), espera-se que nos seus arredores não haja vestígio de interações passadas. Buscamos por galáxias companheiras que estavam num raio de até 20'. Nas 4 polares que estudamos neste trabalho, AM 2020-504 é a que mais apresenta galáxias companheiras (6 objetos). ESO 238-G002 apresenta três galáxias companheiras. HRG 54103 não tem galáxias companheiras e apresenta algumas estruturas, que segundo [Faúndez-Abans et al. \(2009\)](#), são resquícios do processo de interação. NGC 5122 apresenta uma galáxia companheira com velocidade muito similar que, de acordo com [Sparke, van Moorsel, Cox, \(2009\)](#), é rica em gás. Já na vizinhança da AM 2229-735, não encontramos galáxias próximas.

Uma das PRGs que possui uma companheira muito próxima, é UGC 5600. A companheira, UGC 5609, está a 14 kpc. [Brocca, Bettoni, Galletta, \(1997\)](#) encontraram um perfil de velocidade radial bem complexo e não estável. Este fato pode estar associado ao fato de esta galáxia ter passado pelo processo de interação muito recentemente. Na PRG AM 2040-620 também encontramos uma galáxia companheira próxima ([FREITAS-LEMES, RODRIGUES, FAÚNDEZ-ABANS, 2012a](#)) e muito deformada, provavelmente devido ao processo de interação.

As PRGs catalogadas estão na sua maioria distribuídas até $z < 0.2$. A questão da identificação de PRGs de alto *redshift* foi abordado pela primeira vez por [Reshetnikov e Sotnikova \(1997\)](#). Existe uma queda no número de PRGs em $z > 0.1$, ocasionada pelo

Figura 35 - Diagrama mostrando a distribuição de PRGs no plano redshift x magnitude R. Os asterísticos correspondem às galáxias do catálogo de Moiseev et al. (2011), o círculo a galáxia AM2020-504, o quadrado a galáxia HRG54103, o triângulo a galáxia NGC5122 e o losango a galáxia ESO238-G002.



Fonte: a autora.

Tabela 8 - Diferença de velocidade da Galáxia Hospedeira e o Anel.

Objeto	Referência	Diferença de Velocidade
AM2020-504	Seção 3.1	230
ESO238-G002	Seção 3.3	150
HRG54103	Seção 3.4	30
SPRC-10	Moiseev et al. (2011)	200
SPRC-14	Moiseev et al. (2011)	100
SPRC-39	Moiseev et al. (2011)	200
SPRC-60	Moiseev et al. (2011)	150
SPRC-69	Moiseev et al. (2011)	100
SPRC-178	Moiseev et al. (2011)	50
NGC2855	Coccatto et al. (2007)	150
AM1934-563	Reshetnikov et al. (2001)	260
ESO603-G21	Reshetnikov et al. (2002)	100
ESO500-G41	Reshetnikov et al. (2001)	150
ESO576-G69	Reshetnikov et al. (2001)	100
AM1837-621	Reshetnikov et al. (2001)	50
A0136-0801	Schweizer et al. (1983)	200
NGC4698	Bertola et al. (1999)	70
NGC4650a	Combes e Arnaboldi (1996)	150
A2330-3751	Reshetnikov et al. (2011)	200

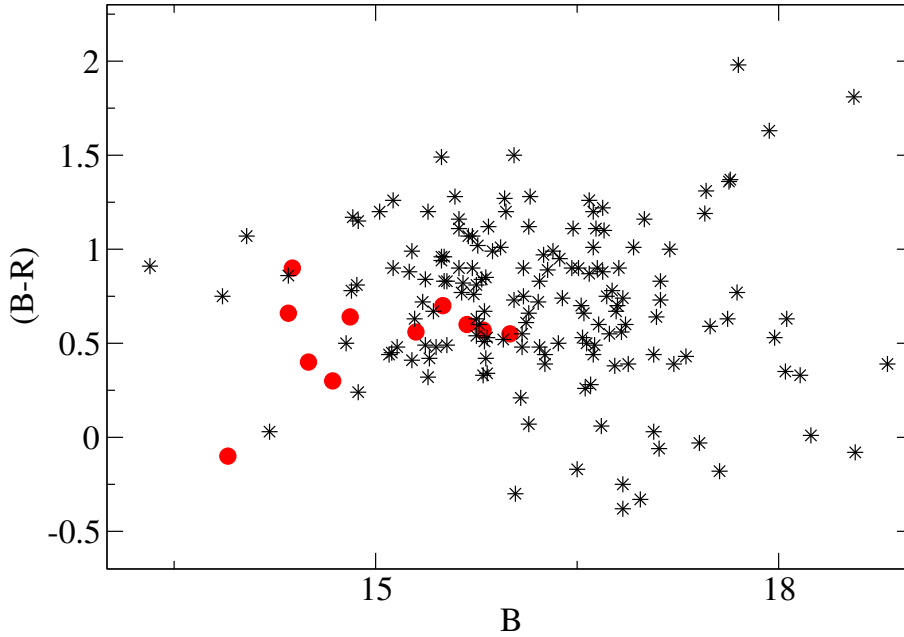
nosso limite de observação, que nos impede de distinguir estruturas a altos redshift. Em $z = 0.1$, a escala é de $1'' = 2$ kpc. Veja a distribuição de PRGs no plano *redshift* x Magnitude na [Figura 35](#). Neste estudo, trabalhamos com PRGs relativamente próximas.

O estudo da dinâmica das PRGs é complexo: cada sistema revela uma história importante e diferente de um encontro de dois sistemas, ocasionado pelos diferentes mecanismos de formação do anel polar. Os mecanismos de formação do anel, teoricamente, podem ser agrupados em três categorias ([Subseção 1.2.1](#)) e geram anéis de diferentes tamanhos e diferença de velocidade com a hospedeira.

A diferença de velocidade entre o anel e a galáxia hospedeira varia bastante de sistema para sistema. Analisando uma amostra de 19 perfis de velocidades de PRGs, verificamos que na maioria deles a diferença de velocidade do anel e da galáxia hospedeira está entre $100 \sim 250$ km/s. Veja na [Tabela 8](#) as PRGs analisadas.

Das PRGs analisadas, a que apresenta menor variação de velocidade é HRG 54103, com diferença de ~ 30 km/s da velocidade do anel e da galáxia hospedeira. Para SPRC-178, a diferença de velocidade também é baixa, cerca de ~ 50 km/s (MOISSEV; SMIRNOVA; SMIRNOVA, 2011), e os autores sugerem que o sistema pode estar envolvido num envelope de HI. Isso justificaria a baixa diferença de velocidade entre o anel e a galáxia hospedeira. A galáxia AM 1934-563 é a que apresenta a maior diferença de velocidade entre o anel e a

Figura 36 - Diagrama cor magnitude B x (B-R). As estrelas correspondem a galáxias isoladas e os círculos a PRGs.



Fonte: a autora.

hospedeira: ~ 260 km/s (RESHETNIKOV; FAÚNDEZ-ABANS; DE OLIVEIRA-ABANS, 2001). As outras galáxias estudadas, AM 2020-504 e ESO238-G002 apresentam diferença de ~ 230 km/s e ~ 150 km/s entre a velocidade do anel e da hospedeira. A análise detalhada do sistema AM 2229-735 também será uma forte aliada na compreensão da formação desses sistemas, pois acreditamos que esta galáxia encontra-se num estágio precursor à formação do anel polar, assim como a galáxia Arp 147 (Figura 2).

O estudo fotométrico revelou que todos os anéis são mais azuis que a galáxia hospedeira, indicando ser uma estrutura formada posteriormente. O estudo realizado por Iodice et al. (2002b) para outras PRGs usando as bandas J, H e K também indicou resultado semelhante. Como já esperávamos, o anel em todos os casos é resultado do processo de interação da galáxia hospedeira, já formada, com outro sistema. Se um dos nossos sistemas fosse formado através do cenário de *Cold Accretion*, deveríamos encontrar idades (e cores) semelhantes.

A Figura 36 apresenta o diagrama $B \times (B-R)$. Comparamos 12 PRGs (círculos) com 191 galáxias catalogadas por Pérez-González et al. (2001), constituída por *star forming galaxies* no Universo Local. A amostra é dominada por galáxias espirais e espectroscopicamente, 8% possuem núcleo ativo. Usamos para comparação as PRGs: AM 2020-504, HRG 54103, A0136-0801 (RESHETNIKOV; HAGEN-THRON; YAKOVLEVA, 1995), ESO 415-G26 (RESHETNIKOV; HAGEN-THRON; YAKOVLEVA, 1995), (RESHETNI-

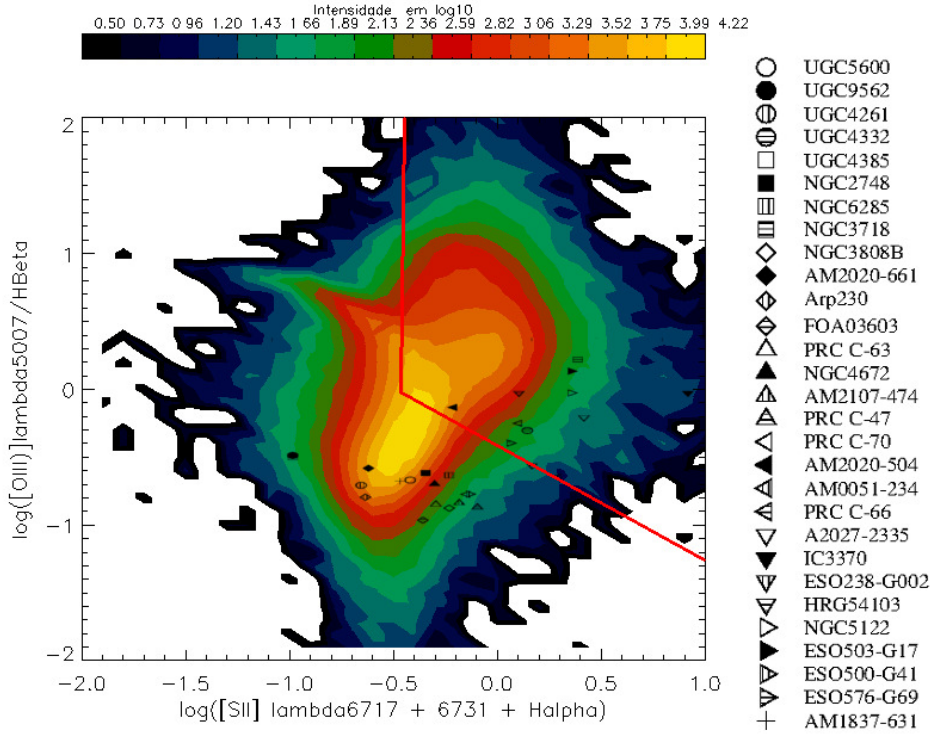
KOV; HAGEN-THRON; YAKOVLEVA, 1995), NGC4650A (RESHETNIKOV; HAGEN-THRON; YAKOVLEVA, 1995), NGC 6028 (RESHETNIKOV; HAGEN-THRON; YAKOVLEVA, 1995), NGC 6285 (RESHETNIKOV; HAGEN-THRON; YAKOVLEVA, 1995), A0017+2212 (RESHETNIKOV; HAGEN-THRON; YAKOVLEVA, 1995), UGC 7576 (RESHETNIKOV; HAGEN-THRON; YAKOVLEVA, 1994), UGC 9796 (RESHETNIKOV; HAGEN-THRON; YAKOVLEVA, 1994) e HRG 2302 (MYRRHA et al., 1999). Baseados nos nossos resultados, por mais que sejam muito pobres, podemos identificar que o índice médio B-R das Polares é ~ 0.6 , menos do que encontrados para a amostra que usamos como comparação (0.8). Reshetnikov, Hagen-Thron, Yakovleva, (1995) estudando dados fotométricos de 7 PRGs, encontraram uma significativa correlação entre o brilho superficial em B e o índice de cor (B-R): Quanto mais azul é o anel, mais elevado é o brilho superficial. Nos nossos dados o ajuste pode ser aplicado, mas há a necessidade de mais informações para se certificar desta correlação.

No levantamento realizado por Reshetnikov, Faúndez-Abans, de Oliveira-Abans, (2001), usando amostra de 27 PRGs e candidatas, eles estimaram que cerca de 13-25% das PRGs são Seyfert e 33-41% LINERs. No nosso estudo, 4 das 5 galáxias estudadas possuem núcleos ativos, seguindo uma tendência deste tipo de objeto. A galáxia AM 2229-735, que acreditamos ser uma proto-PRG, não possui núcleo ativo, entretanto, ao longo do processo de interação ela pode vir a ativá-lo, com o constante acréscimo de gás, como no caso da PRG NGC 4650A, que segundo Gallagher et al. (2002) pode vir a desenvolver um núcleo ativo.

Na Figura 37 é apresentado o diagrama de diagnóstico $\log[\text{N II}]/\text{H}\alpha$ versus $\log[\text{S II}]/\text{H}\alpha$. A linha proposta por Pérez-Montero et al. (2013) separa os AGNs das regiões HII. Usamos os dados do *SLOAN*, que contém os fluxos de linhas de aproximadamente 600.000 galáxias normais ou com núcleo ativo, com o objetivo de estudar a distribuição dessas galáxias no diagrama de diagnóstico. Com os dados do *SLOAN*, podemos notar que a maior concentração de galáxias no diagrama $\log[\text{N II}]/\text{H}\alpha$ versus $\log[\text{S II}]/\text{H}\alpha$ está em $-0,6;-0,4$. E a distribuição de maior intensidade segue uma curva que se assemelha ao limite de separação entre as galáxias que se comportam como regiões HII e as AGNs, proposto por Kewley et al. (2001).

Na Figura 37 estão sobrepostas as razões de linhas de todas as PRGs que citamos neste trabalho. Ainda que a nossa análise só inclua 29 PRGs, o número de galáxias com núcleo ativo é significativo e a distribuição dos objetos é significativamente diferente da indicada pelos dados do *SLOAN*. Segundo a nossa distribuição, $\sim 50\%$ das galáxias que analisamos tem núcleo ativo. Este é um ponto que ainda necessita de mais estudo e uma estatística com mais objetos é necessária. Mas também aqui podemos notar uma tendência das PRGs possuírem núcleo ativo, como já tinha sido relatado por Reshetnikov, Faúndez-

Figura 37 - Diagrama de diagnóstico $\log([\text{N II}]/\text{H}\alpha)$ versus $\log([\text{S II}]/\text{H}\alpha)$. A linha proposta por Pérez-Monteiro (2013) separa os AGNs das regiões HII.

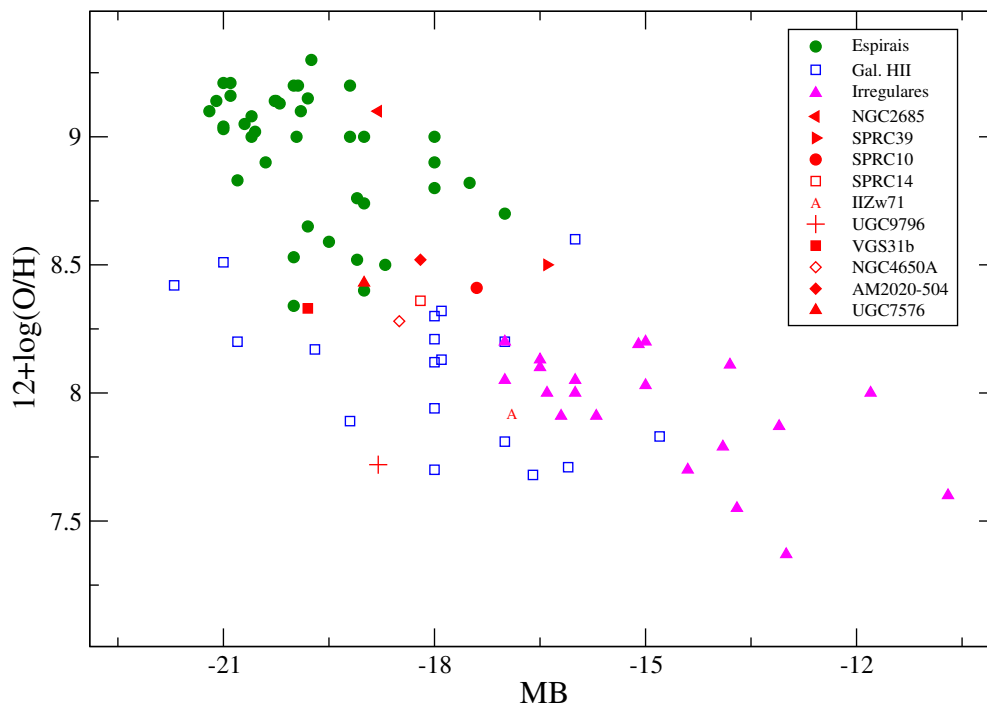


Fonte: a autora.

Abans, de Oliveira-Abans,(2011), Moiseev et al. (2011) e Reshetnikov e Combes (1994).

Outro parâmetro físico que recentemente tem sido inserido no campo de investigação das PRGs é a metalicidade do anel polar. A metalicidade é fundamental para discriminar entre os diferentes cenários de formação das PRGs, como abordado nas Subseção 1.2.1 e 2.5. Neste trabalho, analisamos as galáxias AM 2020-504 (Apêndice 1) e AM 2229-735 (Apêndice 2). Outros trabalhos também já foram feitos nesta área: Eskridge e Pogge (1997), Pérez-Montero et al. (2009), Spavone et al. (2010, 2012) e Spavone e Iodice (2013b). Na Figura 38 é apresentada a relação entre metalicidade e Magnitude Absoluta B estimado para uma amostra de PRGs, comparadas com um grupo de galáxias espirais, irregulares e alguns que se comportam com regiões HII. As PRGs apresentam, em média, uma metalicidade sub-solar, com $8,2 \leq 12 + \log (\text{O}/\text{H}) \leq 8.6$ dex, semelhante a espirais de baixa metalicidade (IODICE, 2014).

Figura 38 - Valores de $12+\log(\text{O}/\text{H})$, relacionados com a Magnitude Total em B para uma amostra de 10 PRGs (dados obtidos em: Eskridge & Pogge 1997; Pérez-Montero et al. 2009; Spavone et al. 2010, 2011; Freitas-Lemes et al. 2012; Spavone & Iodice 2013 e Moiseev et al., 2014). A amostra de galáxias espirais, HII e irregulares são de Kobulnicky & Zaritsky (1999).



Fonte: a autora.

4.2 Trabalhos Futuros

Até o momento, este trabalho já produziu quatro publicações, frutos de colaborações importante para o estudo das PRGs: Freitas-Lemes, Rodrigues, Faúndez-Abans, (2012a) sobre a galáxia PRG AM 2020-504, Freitas-Lemes, Rodrigues, Faúndez-Abans (2012b), referente a PRG AM 2040-620, Freitas-Lemes et al. (2014) *in press*, referente ao sistema AM 2229735 e Freitas-Lemes et al. (2014) *in press* sobre a galáxia anelada HRG 54103 . Outros trabalhos, baseados nesse dados ainda estão em andamento:

- **NGC 4501:** Um estudo espectroscópico sobre a galáxia espiral NGC 4501 está sendo realizado. O objetivo é compreender a abundância, população estelar e cinemática desta galáxia usando dados de IFU do Gemini/Sul. O estudo, entitulado **The central 200 pc of NGC 4501: Inflow detection and kinematic** está sendo desenvolvido por P. Prepetto, M. Faúndez-Abans, P. Freitas-Lemes, A.C. Krabbe, A. Ardila e I. Rodrigues.
- **Metallicity determinations in AGNs based on optical narrow emission-lines** : Uma análise da abundância de (O/H) em núcleos ativos baseada nas fortes linhas de emissão. O estudo inclui PRGs e está sendo desenvolvido em colaboração com O. Dors Jr., L.S. Pilyugin, P. Freitas-Lemes, G.F. Hagele e M.V.Cardaci.
- **Simulação da galáxia AM 2229-735:** A versão final da simulação do sistema AM 2229-735 será estudada e analisada usando o código GADGET-2. O trabalho contará com a colaboração do pesquisador Juan Carlos Muñoz Cuartas (Colômbia). O trabalho já vem sendo desenvolvido e acreditamos que seja muito importante para a compreensão da formação das PRGs.
- **Análise espectral**, fotométrica e morfológica das galáxias *AM 0051-234* (espectros do OPD e imagens em B e V do CFHT), *ESO 201-IG26* (espectros e imagens em BVRI do OPD) e *HRG 4061* (espectros e imagens em BVRI do OPD).

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ANTONUCCI, R. R. J.; Miller, J. S. Spectropolarimetry and the nature of NGC 1068. **ApJ**, v. 297, p. 621–632, out. 1985. 35
- ARP, H. Atlas of peculiar galaxies. **ApJS**, v. 14, p. 1, nov. 1966. 25, 35
- ARP, H.; Madore, B. F. Preliminary results from the catalogue of southern peculiar galaxies and associations. **QJRAS**, v. 18, p. 234–241, jun. 1977. 59
- ARP, H. . M. B. F. **Catalogue of southern peculiar galaxies and associations, vol. I, positions and descriptions**. [S.l.: s.n.], 1986. 59
- ASARI, N. V.; Cid Fernandes, R.; Stasińska, G.; Torres-Papaqui, J. P.; Mateus, A.; Sodré, L.; Schoenell, W.; Gomes, J. M. The history of star-forming galaxies in the Sloan Digital Sky Survey. **MNRAS**, v. 381, p. 263–279, out. 2007. 74
- BALCELLS, M.; Borne, K. D.; Hoessel, J. G. Interacting binary galaxies. VI - The fast encounter of NGC 2672 and NGC 2673 (Karachentsev 175, ARP 167). **ApJ**, v. 336, p. 655–668, jan. 1989. 61
- BALDWIN, J. A.; Phillips, M. M.; Terlevich, R. Classification parameters for the emission-line spectra of extragalactic objects. **PASP**, v. 93, p. 5–19, fev. 1981. 49, 53, 65
- BALDWIN, J. A.; STONE, R. P. S. Southern spectrophotometric standards for large telescopes. II. **MNRAS**, v. 206, p. 241–245, jan. 1984. 44
- BEKKI, K. Formation of polar-ring S0 galaxies in dissipative galaxy mergers. **ApJ**, v. 490, p. L37, nov. 1997. 29
- _____. Formation of stellar bars in a collapsing and self-gravitating two-component fluid. **ApJ**, v. 483, p. 608, jul. 1997. 29
- _____. Formation of a polar ring galaxy in a galaxy merger. **ApJ**, v. 499, p. 635, maio 1998. 29
- BENDER, R.; Paquet, A.; Nieto, J.-L. Internal stellar kinematics of three dwarf ellipticals in the Local Group. **A&A**, v. 246, p. 349–353, jun. 1991. 61
- BERTOLA, F.; Corsini, E. M.; Vega Beltrán, J. C.; Pizzella, A.; Sarzi, M.; Cappellari, M.; Funes, J. G. The bulge-disk orthogonal decoupling in galaxies: NGC 4698. **ApJ**, v. 519, p. L127–L130, jul. 1999. 85

BEYGU, B.; Kreckel, K.; van de Weygaert, R.; van der Hulst, J. M.; van Gorkom, J. H. An interacting galaxy system along a filament in a void. **AJ**, v. 145, p. 120, maio 2013. 68

BINNEY, J.; Tremaine, S. **Galactic dynamics**. [S.l.: s.n.], 1987. 25

BORNE, K. D. Interacting binary galaxies. IV - Simulations, masses, and spatial orientations for NGC 1587/1588 and NGC 7236/7237. **ApJ**, v. 330, p. 61–77, jul. 1988. 61

_____. **In dynamics and interactions of galaxies**. [S.l.: s.n.], 1990. 61

BORNE, K. D.; Balcells, M.; Hoessel, J. G.; McMaster, M. Interacting binary galaxies. 7: Kinematic data for 12 disturbed ellipticals. **ApJ**, v. 435, p. 79–92, nov. 1994. 61

BORNE, K. D.; Hoessel, J. G. Observational signatures of tidal friction in interacting binary galaxies. In: **Bulletin of the American Astronomical Society**. [S.l.: s.n.], 1985. (Bulletin of the American Astronomical Society, v. 17), p. 601. 61

_____. Interacting binary galaxies. III - Observations of NGC 1587/1588 and NGC 7236/7237. **ApJ**, v. 330, p. 51–60, jul. 1988. 61

BOURNAUD, F.; COMBES, F. Formation of polar ring galaxies. **A&A**, v. 401, p. 817–833, abr. 2003. 28, 29, 31, 59, 62, 64

BOUWENS, R. J.; Illingworth, G. D.; Labbe, I.; Oesch, P. A.; Trenti, M.; Carollo, C. M.; van Dokkum, P. G.; Franx, M.; Stiavelli, M.; González, V.; Magee, D.; Bradley, L. A candidate redshift $z \sim 10$ galaxy and rapid changes in that population at an age of 500Myr. **Nature**, v. 469, p. 504–507, jan. 2011. 23

BRESOLIN, F. Revisiting the abundance gradient in the maser host galaxy NGC 4258. **ApJ**, v. 729, p. 56, mar. 2011. 54

BROCCA, C.; Bettoni, D.; Galletta, G. The visible environment of polar ring galaxies. **A&A**, v. 326, p. 907–914, out. 1997. 83

BROSCH, N.; Kniazev, A. Y.; Buckley, D. A. H.; O’Donoghue, D.; Hashimoto, Y.; Loaring, N.; Romero, E.; Still, M.; Vaisanen, P.; Burgh, E. B.; Nordsieck, K. The polar ring galaxy AM1934-563 revisited. **MNRAS**, v. 382, p. 1809–1822, dez. 2007. 64

BROSCH, N.; Kniazev, A. Y.; Moiseev, A.; Pustilnik, S. A. On the nature of the apparent ring galaxy SDSS J075234.33+292049.8. **MNRAS**, v. 401, p. 2067–2080, jan. 2010. 54

- BUSHOUSE, H. A. Star-formation rates in the nuclei of violently interacting galaxies. **AJ**, v. 91, p. 255–270, fev. 1986. [23](#)
- BUTA, R. The catalog of southern ringed galaxies. **ApJS**, v. 96, p. 39–116, jan. 1995. [25](#)
- COCCATO, L.; Corsini, E. M.; Pizzella, A.; Bertola, F. The search for inner polar disks with integral field spectroscopy: the case of NGC 2855 and NGC 7049. **A&A**, v. 465, p. 777–786, abr. 2007. [85](#)
- COLLIN-SOUFFRIN, S.; DYSON, J. E.; MCDOWELL, J. C.; PERRY, J. J. The environment of active galactic nuclei. I - A two-component broad emission line model. **MNRAS**, v. 232, p. 539–550, jun. 1988. [34](#)
- COMBES, F. Polar ring galaxies and warps. In: Mamon, G. A.; Combes, F.; Deffayet, C.; Fort, B. (Ed.). **EAS Publications Series**. [S.l.: s.n.], 2006. (EAS Publications Series, v. 20), p. 97–104. [29](#), [31](#)
- COMBES, F.; Arnaboldi, M. The dark halo of polar-ring galaxy NGC 4650a: flattened towards the polar ring? **A&A**, v. 305, p. 763–+, jan. 1996. [85](#)
- CONDON, J. J.; Condon, M. A.; Gisler, G.; Puschell, J. J. Strong radio sources in bright spiral galaxies. II - Rapid star formation and galaxy-galaxy interactions. **ApJ**, v. 252, p. 102–124, jan. 1982. [23](#)
- COPETTI, M. V. F.; Mallmann, J. A. H.; Schmidt, A. A.; Castañeda, H. O. Internal variation of electron density in galactic H β II regions. **A&A**, v. 357, p. 621–636, maio 2000. [51](#)
- COX, A. L.; Sparke, L. S.; van Moorsel, G.; Shaw, M. Optical and 21 CM observations of the warped, Edge-On galaxy UGC 7170. **AJ**, v. 111, p. 1505, abr. 1996. [78](#), [79](#)
- COZIOL, R.; Reyes, R. E. C.; Considère, S.; Davoust, E.; Contini, T. The abundance of nitrogen in starburst nucleus galaxies. **A&A**, v. 345, p. 733–746, maio 1999. [53](#), [54](#), [65](#)
- CURTIS, H. D. Novae in the spiral nebulae and the island Universe theory. **PASP**, v. 29, p. 206–207, out. 1917. [20](#)
- DAHARI, O. The nuclear activity of interacting galaxies. **ApJS**, v. 57, p. 643–664, abr. 1985. [23](#)
- DOKKUM, P. G. van. Cosmic-Ray rejection by Laplacian edge detection. **PASP**, v. 113, p. 1420–1427, nov. 2001. [42](#)
- DORS, J. O. L.; Copetti, M. V. F. Abundance gradients in a sample of barred spiral galaxies. **A&A**, v. 437, p. 837–847, jul. 2005. [57](#), [74](#)

DORS, J. O. L.; Hagele, G. F.; Cardaci, M. V.; Perez-Montero, E.; Krabbe, A. C.; Vilchez, J. M.; Sales, D. A.; Riffel, R.; Riffel, R. A. Optical and mid-infrared neon abundance determinations in star-forming regions. **ArXiv e-prints**, abr. 2013. [70](#)

DORS, J. O. L.; Krabbe, A.; Hägele, G. F.; Pérez-Montero, E. Analysing derived metallicities and ionization parameters from model-based determinations in ionized gaseous nebulae. **MNRAS**, v. 415, p. 3616–3626, ago. 2011. [50](#), [56](#), [70](#)

DREYER, J. L. E. A new general catalogue of nebulae and clusters of stars, being the catalogue of the late Sir John F. W. Herschel, Bart, revised, corrected, and enlarged. **MmRAS**, v. 49, p. 1, 1888. [20](#)

DRIEL, W. van; Combes, F.; Casoli, F.; Gerin, M.; Nakai, N.; Miyaji, T.; Hamabe, M.; Sofue, Y.; Ichikawa, T.; Yoshida, S.; Kobayashi, Y.; Geng, F.; Minezaki, T.; Arimoto, N.; Kodama, T.; Goudfrooij, P.; Mulder, P. S.; Wakamatsu, K.; Yanagisawa, K. Polar ring spiral galaxy NGC 660. **AJ**, v. 109, p. 942–959, mar. 1995. [36](#)

ESKRIDGE, P.; Pogge, R. W. Polar-Ring Galaxies. In: Persic, M.; Salucci, P. (Ed.). **Dark and visible matter in galaxies and cosmological implications**. [S.l.: s.n.], 1997. (Astronomical Society of the Pacific Conference Series, v. 117), p. 126. [88](#)

FAUNDEZ-ABANS, M.; de Oliveira-Abans, M. Looking for structures in the ring galaxy HRG 54103. In: Falco, E.; Fernandez, J. A.; Ferrero, R. F. (Ed.). **Revista Mexicana de Astronomia y Astrofisica Conference Series**. [S.l.: s.n.], 1996. (Revista Mexicana de Astronomia y Astrofisica, vol. 27, v. 4), p. 137. [47](#)

FAÚNDEZ-ABANS, M.; de Oliveira-Abans, M. Looking for fine structures in galaxies. **A&AS**, v. 128, p. 289–297, mar. 1998. [25](#), [47](#), [71](#)

FAÚNDEZ-ABANS, M.; de Oliveira-Abans, M.; Krabbe, A. C.; da Rocha-Poppe, P. C.; Fernandes-Martin, V. A.; Fernandes, I. F. FM 047-02: a collisional pair of galaxies with a ring. **A&A**, v. 558, p. A13, out. 2013. [74](#)

FAÚNDEZ-ABANS, M.; Fernandes, I. F.; Oliveira-Abans, M. de; Poppe, P. C. R.; Martin, V. A. F. The ring galaxy HRG 54 103: a first study. **A&A**, v. 507, p. 1303–1311, dez. 2009. [71](#), [72](#), [73](#), [83](#)

FAÚNDEZ-ABANS, M.; Krabbe, A. C.; de Oliveira-Abans, M.; da Rocha-Poppe, P. C.; Rodrigues, I.; Fernandes-Martin, V. A.; Fernandes, I. F. A study of the remarkable galaxy system AM 546-324 (the core of Abell S0546). **A&A**, v. 543, p. A64, jul. 2012. [61](#)

FAÚNDEZ-ABANS, M.; Oliveira-Abans, M. de. Morphology of peculiar ring galaxies (Faundez-Abans+ 1998). **VizieR Online Data Catalog**, v. 412, p. 90357–+, nov. 1997. [33](#)

_____. On the morphology of peculiar ring galaxies. **A&AS**, v. 129, p. 357–361, abr. 1998. [26](#), [71](#), [79](#)

FERNANDES, R. C.; Gu, Q.; Melnick, J.; Terlevich, E.; Terlevich, R.; Kunth, D.; Rodrigues Lacerda, R.; Joguet, B. The star formation history of Seyfert 2 nuclei. **MNRAS**, v. 355, p. 273–296, nov. 2004. [74](#)

FERNANDES, R. C.; Mateus, A.; Sodré, L.; Stasińska, G.; Gomes, J. M. Semi-empirical analysis of Sloan Digital Sky Survey galaxies - I. Spectral synthesis method. **MNRAS**, v. 358, p. 363–378, abr. 2005. [74](#)

FERREIRO, D. L.; Pastoriza, M. G.; Rickes, M. Sample of minor merger of galaxies. II. Modelling HII region properties. **A&A**, v. 481, p. 645–649, abr. 2008. [59](#), [60](#)

FEW, J. M. A.; Madore, B. F. Ring galaxies. II - Classification and statistics. **MNRAS**, v. 222, p. 673–682, out. 1986. [67](#)

FRAQUELLI, H. A.; Storchi-Bergmann, T.; Binette, L. The extended narrow-line region of the Seyfert 1 galaxy ESO 362-G18 versus that of the Seyfert 2 galaxy ESO 362-G8. **ApJ**, v. 532, p. 867–882, abr. 2000. [69](#)

FREITAS-LEMES, P.; Rodrigues, I.; Faúndez-Abans, M. The polar ring galaxy AM 2040-620 and its possible companion. **ArXiv e-prints**, ago. 2012. [41](#), [74](#), [83](#), [90](#)

FREITAS-LEMES, P.; Rodrigues, I.; Faúndez-Abans, M.; Dors, O. L.; Fernandes, I. F. Imagery and long-slit spectroscopy of the polar ring galaxy AM 2020-504. **MNRAS**, v. 427, p. 2772–2779, dez. 2012. [28](#), [31](#), [53](#), [68](#), [90](#)

GALLAGHER, J. S.; Sparke, L. S.; Matthews, L. D.; Frattare, L. M.; English, J.; Kinney, A. L.; Iodice, E.; Arnaboldi, M. Wide field planetary camera 2 observations of the polar ring galaxy NGC 4650A. **ApJ**, v. 568, p. 199–209, mar. 2002. [34](#), [87](#)

GALLETTA, G.; SAGE, L. J.; SPARKE, L. S. Molecular gas in polar-ring galaxies. **MNRAS**, v. 284, p. 773–784, fev. 1997. [26](#)

GAO, Y.; LO, K. Y.; Lee, S.-W.; Lee, T.-H. Molecular gas and the modest star formation efficiency in the “Antennae” galaxies: Arp 244=NGC 4038/9. **ApJ**, v. 548, p. 172–189, fev. 2001. [23](#)

GONZALEZ-DELGADO, R. M.; Perez, E.; Diaz, A. I.; Garcia-Vargas, M. L.; Terlevich, E.; Vilchez, J. M. The starburst galaxy NGC 7714. **ApJ**, v. 439, p. 604–622, fev. 1995. [71](#)

HAMUY, M.; Suntzeff, N. B.; Heathcote, S. R.; Walker, A. R.; Gigoux, P.; Phillips, M. M. Southern spectrophotometric standards, 2. **PASP**, v. 106, p. 566–589, jun. 1994. 44

HAMUY, M.; Walker, A. R.; Suntzeff, N. B.; Gigoux, P.; Heathcote, S. R.; Phillips, M. M. Southern spectrophotometric standards. **PASP**, v. 104, p. 533–552, jul. 1992. 44

HARRIS, W. E. A comment on image detection and the definition of limiting magnitude. **PASP**, v. 102, p. 949–953, ago. 1990. 47

HERSCHEL, J. F. W. Catalogue of nebulae and clusters of stars. **Royal Society of London Philosophical Transactions Series I**, v. 154, p. 1–137, 1864. 19

HOLMBERG, E. On the clustering tendencies among the nebulae. II. A study of encounters between laboratory models of stellar systems by a new integration procedure. **ApJ**, v. 94, p. 385, nov. 1941. 22

_____. A photographic photometry of extragalactic nebulae. **Meddelanden fran Lunds Astronomiska Observatorium Serie II**, v. 136, p. 1, 1958. 22

HOWELL, S. B. Two-dimensional aperture photometry - Signal-to-noise ratio of point-source observations and optimal data-extraction techniques. **PASP**, v. 101, p. 616–622, jun. 1989. 47

HUBBLE, E. P. A general study of diffuse galactic nebulae. **ApJ**, v. 56, p. 162–199, out. 1922. 20

_____. Distribution of luminosity in elliptical nebulae. **ApJ**, v. 71, p. 231–276, maio 1930. 20

_____. **Realm of the Nebulae**. [S.l.: s.n.], 1936. 20

HUBBLESITE, I. Disponível em: www.hubblesite.org. Acesso em 09 Jan 2014. **S.l.:s.n.**, v. 270, jan. 2013. 25

_____. _____. **S.l.:s.n.**, v. 270, jan. 2014. 21

HUCHTMEIER, W. K. An HI survey of polar ring galaxies. II. The Effelsberg sample. **A&A**, v. 319, p. 401–404, mar. 1997. 79

HUMMEL, E. The radio continuum radiation of spiral galaxies in multiple systems. **A&A**, v. 96, p. 111–119, mar. 1981. 23

IODICE, E. Narrow polar rings versus wide polar ring/disk galaxies. **ArXiv e-prints**, fev. 2014. 88

IODICE, E.; Arnaboldi, M.; De Lucia, G.; Gallagher, I. J. S.; Sparke, L. S.; Freeman, K. C. The puzzle of the polar structure in NGC 4650A. **AJ**, v. 123, p. 195–206, jan. 2002. 27

IODICE, E.; Arnaboldi, M.; Sparke, L. S.; Gallagher, J. S.; Freeman, K. C. Near-Infrared photometry in the J, H and Kn bands for polar ring galaxies. I. Data, structural parameters. **A&A**, v. 391, p. 103–115, ago. 2002. 79, 86

JARRETT, T. H.; Polletta, M.; Fournon, I. P.; Stacey, G.; Xu, K.; Siana, B.; Farrah, D.; Berta, S.; Hatziminaoglou, E.; Rodighiero, G.; Surace, J.; Domingue, D.; Shupe, D.; Fang, F.; Lonsdale, C.; Oliver, S.; Rowan-Robinson, M.; Smith, G.; Babbedge, T.; Gonzalez-Solares, E.; Masci, F.; Franceschini, A.; Padgett, D. Remarkable disk and off-nuclear starburst activity in the tadpole galaxy as revealed by the spitzer space telescope. **AJ**, v. 131, p. 261–281, jan. 2006. 23

JEDRZEJEWSKI, R. I. CCD surface photometry of elliptical galaxies. I - Observations, reduction and results. **MNRAS**, v. 226, p. 747–768, jun. 1987. 46, 47

JOSEPH, R. D.; Meikle, W. P. S.; Robertson, N. A.; Wright, G. S. Recent star formation in interacting galaxies. I - Evidence from JHKL photometry. **MNRAS**, v. 209, p. 111–122, jul. 1984. 23

KANT, I. Allgemeine naturgeschichte und theorie des Himmels. **S.l.:s.n.**, v. 270, p. 51–70, jul. 1755. 19

KATZ, N.; Rix, H.-W. Cooling and the longevity of polar rings. **ApJ**, v. 389, p. L55–L58, abr. 1992. 31

KEEL, W. C. Two active galaxies with tidal tails and companions. **AJ**, v. 90, p. 1449–1456, ago. 1985. 23

KEEL, W. C.; Borne, K. D. Massive star clusters in ongoing galaxy interactions: clues to cluster formation. **AJ**, v. 126, p. 1257–1275, set. 2003. 24

KENNICUTT, J. R. C.; Garnett, D. R. The composition gradient in M101 revisited. I. H II Region spectra and excitation properties. **ApJ**, v. 456, p. 504, jan. 1996. 54

KENNICUTT JR., R. C.; Keel, W. C.; Blaha, C. A. A comparison of the physical conditions in nuclear, hotspot, and disk H II regions. **AJ**, v. 97, p. 1022–1035, abr. 1989. 72

KENNICUTT JR., R. C.; Schweizer, F.; Barnes, J. E. **Galaxies: interactions and induced star formation**. [S.l.: s.n.], 1996. 83

- KEREŠ, D.; Katz, N.; Weinberg, D. H.; Davé, R. How do galaxies get their gas? **MNRAS**, v. 363, p. 2–28, out. 2005. [31](#)
- KEWLEY, L. J.; Dopita, M. A.; Sutherland, R. S.; Heisler, C. A.; Trevena, J. Theoretical modeling of starburst galaxies. **ApJ**, v. 556, p. 121–140, jul. 2001. [49](#), [54](#), [63](#), [87](#)
- KEWLEY, L. J.; Ellison, S. L. Metallicity calibrations and the mass-metallicity relation for star-forming galaxies. **ApJ**, v. 681, p. 1183–1204, jul. 2008. [74](#)
- KEWLEY, L. J.; Groves, B.; Kauffmann, G.; Heckman, T. The host galaxies and classification of active galactic nuclei. **MNRAS**, v. 372, p. 961–976, nov. 2006. [49](#), [54](#), [63](#), [73](#)
- KRABBE, A. C.; Pastoriza, M. G.; Winge, C.; Rodrigues, I.; Dors, O. L.; Ferreiro, D. L. The effects of the interactions on the kinematics, stellar population and metallicity of AM 2322-821 with Gemini/GMOS. **MNRAS**, v. 416, p. 38–50, set. 2011. [74](#)
- KRABBE, A. C.; Rosa, D. A.; Dors, O. L.; Pastoriza, M. G.; Winge, C.; Hägele, G. F.; Cardaci, M. V.; Rodrigues, I. Interaction effects on galaxy pairs with Gemini/GMOS- I: Electron density. **MNRAS**, nov. 2013. [69](#)
- KRIPS, M.; Eckart, A.; Neri, R.; Pott, J. U.; Leon, S.; Combes, F.; García-Burillo, S.; Hunt, L. K.; Baker, A. J.; Tacconi, L. J.; Englmaier, P.; Schinnerer, E.; Boone, F. Molecular gas in NUCLEI of GALAXIES (NUGA). III. The warped LINER NGC 3718. **A&A**, v. 442, p. 479–493, nov. 2005. [31](#)
- KROLIK, J. H. **Active galactic nuclei : from the central black hole to the galactic environment**. [S.l.: s.n.], 1999. [50](#)
- LANDOLT, A. U. UBVRI photometric standard stars in the magnitude range 11.5-16.0 around the celestial equator. **AJ**, v. 104, p. 340–371, jul. 1992. [42](#), [48](#)
- LARSON, R. B.; Tinsley, B. M. Star formation rates in normal and peculiar galaxies. **ApJ**, v. 219, p. 46–59, jan. 1978. [23](#), [35](#)
- LEHNERT, M. D.; Heckman, T. M. Emission-line ratios of the integrated spectra of galaxies: Evidence for a diffuse ionized medium in other galaxies? **ApJ**, v. 426, p. L27–L30, maio 1994. [72](#)
- LYNDEN-BELL, D.; Wood, R. The gravo-thermal catastrophe in isothermal spheres and the onset of red-giant structure for stellar systems. **MNRAS**, v. 138, p. 495, 1968. [24](#)
- MACCIÒ, A. V.; MOORE, B.; STADEL, J. The origin of polar ring galaxies: Evidence for galaxy formation by cold accretion. **ApJ**, v. 636, p. L25–L28, jan. 2006. [31](#)

- MADEJSKY, R. Morphology and kinematics of the interacting elliptical galaxies NGC750 and NGC751 = ARP 166 - Velocity fields of tidally distorted elliptical galaxies. **A&A**, v. 247, p. 348–356, jul. 1991. [61](#)
- MADEJSKY, R.; Bender, R.; Moellenhoff, C. Morphology and kinematics of the pair of interacting elliptical galaxies NGC4782 and NGC4783. **A&A**, v. 242, p. 58–68, fev. 1991. [61](#)
- MAIOLINO, R.; Nagao, T.; Grazian, A.; Cocchia, F.; Marconi, A.; Mannucci, F.; Cimatti, A.; Pipino. AMAZE. I. The evolution of the mass-metallicity relation at $z \approx 3$. **A&A**, v. 488, p. 463–479, set. 2008. [74](#)
- MERKULOVA, O. A.; Karataeva, G. M.; Yakovleva, V. A.; Burenkov, A. N. PGC 60020: a Polar-ring galaxy. **ArXiv e-prints**, fev. 2013. [72](#)
- MESSIER, M.; Bevis, D. Extract of Two Letters from M. Messier, of the Royal Academy of Sciences, and F. R. S. M. Magalhaens, on a New Comet: Translated by Dr. Bevis, F. R. S. **Royal Society of London Philosophical Transactions Series I**, v. 61, p. 104–106, 1771. [19](#)
- MOISEEV, A. V.; Smirnova, K. I.; Smirnova, A. A.; Reshetnikov, V. P. A new catalogue of polar-ring galaxies selected from the Sloan Digital Sky Survey. **MNRAS**, v. 418, p. 244–257, nov. 2011. [28](#), [59](#), [72](#), [73](#), [83](#), [85](#), [88](#)
- MOULD, J. R.; Huchra, J. P.; Freedman, W. L.; Kennicutt, J. R. C.; Ferrarese, L.; Ford, H. C.; Gibson, B. K.; Graham, J. A.; Hughes, S. M. G.; Illingworth, G. D.; Kelson, D. D.; Macri, L. M.; Madore, B. F.; Sakai, S.; Sebo, K. M.; Silbermann, N. A.; Stetson, P. B. The Hubble space telescope key project on the extragalactic distance scale. XXVIII. Combining the constraints on the Hubble constant. **ApJ**, v. 529, p. 786–794, fev. 2000. [57](#)
- MYRRHA, M. L. M.; Vaz, L. P. R.; Faúndez-Abans, M.; Oliveira-Abans, M. de; Soares, D. S. L. BVRI- $H\alpha$ surface photometry of peculiar ring galaxies. I. <ASTROBJ>HRG 2302</ASTROBJ>. **A&A**, v. 351, p. 860–868, nov. 1999. [87](#)
- NAEYE, R. . Shot in the dark’ star explosion stuns astronomers - acessado em Julho de 2013. **NASA Goddard Flight Center**, dez. 2007. [23](#)
- OHYAMA, Y.; Taniguchi, Y.; Terlevich, R. A new superwind Wolf-Rayet galaxy Markarian 1259. **ApJ**, v. 480, p. L9, maio 1997. [72](#)
- OLIVEIRA, V. A.; Copetti, M. V. F.; Krabbe, A. C. Electron temperature fluctuations in NGC 346. **A&A**, v. 492, p. 463–468, dez. 2008. [48](#), [75](#)

- OPIK, E. An estimate of the distance of the Andromeda Nebula. **ApJ**, v. 55, p. 406–410, jun. 1922. 20
- OSTERBROCK, D. E. **Astrophysics of gaseous nebulae and active galactic nuclei**. [S.l.: s.n.], 1989. 54, 74
- PASTORIZA, M. G.; Donzelli, C. J.; Bonatto, C. Nuclear activity and stellar population of a sample of interacting galaxies. **A&A**, v. 347, p. 55–62, jul. 1999. 59, 63
- PEACOCK, J. A. **Cosmological Physics**. [S.l.: s.n.], 1999. 23
- PÉREZ-GONZÁLEZ, P. G.; Gallego, J.; Zamorano, J.; Gil de Paz, A. Optical photometry of the UCM lists I and II. II. B band surface photometry and morphological discussion. **A&A**, v. 365, p. 370–391, jan. 2001. 86
- PÉREZ-MONTERO, E.; Contini, T. The impact of the nitrogen-to-oxygen ratio on ionized nebula diagnostics based on [NII] emission lines. **MNRAS**, v. 398, p. 949–960, set. 2009. 50, 56
- PÉREZ-MONTERO, E.; Contini, T.; Lamareille, F.; Maier, C.; Carollo, C. M.; Kneib, J.-P.; Le Fèvre, O.; Lilly, S.; Mainieri, V.; Renzini, A.; Scodreggio, M.; Zamorani, G.; Bardelli, S.; Bolzonella, M.; Bongiorno, A.; Caputi, K.; Cucciati, O.; de la Torre, S.; de Ravel, L.; Franzetti, P.; Garilli, B.; Iovino, A.; Kampczyk, P.; Knobel, C.; Kovač, K.; Le Borgne, J.-F.; Le Brun, V.; Mignoli, M.; Pellò, R.; Peng, Y.; Presotto, V.; Ricciardelli, E.; Silverman, J. D.; Tanaka, M.; Tasca, L. A. M.; Tresse, L.; Vergani, D.; Zucca, E. The cosmic evolution of oxygen and nitrogen abundances in star-forming galaxies over the past 10 Gyr. **A&A**, v. 549, p. A25, jan. 2013. 63, 65, 68, 79, 87
- PÉREZ-MONTERO, E.; García-Benito, R.; Díaz, A. I.; Pérez, E.; Kehrig, C. Long-slit spectrophotometry of the multiple knots of the polar ring galaxy IIZw71. **A&A**, v. 497, p. 53–63, abr. 2009. 88
- PILYUGIN, L. S. On the oxygen abundance determination in HII regions. High-metallicity regions. **A&A**, v. 369, p. 594–604, abr. 2001. 74
- PILYUGIN, L. S.; Thuan, T. X.; Vílchez, J. M. On the maximum value of the cosmic abundance of oxygen and the oxygen yield. **Monthly Notices of the Royal Astronomical Society**, Blackwell Publishing Ltd, n. 1, p. 353–360. ISSN 1365-2966. 56
- PILYUGIN, L. S.; Vílchez, J. M.; Contini, T. Oxygen and nitrogen abundances in nearby galaxies. Correlations between oxygen abundance and macroscopic properties. **A&A**, v. 425, p. 849–869, out. 2004. 57

- RAMSBOTTOM, C. A.; Bell, K. L.; Stafford, R. P. Effective collision strengths for electron impact excitation of singly ionized Sulfur. **Atomic Data and Nuclear Data Tables**, v. 63, p. 57, 1996. 51
- REDUZZI, L.; Rampazzo, R.; Sulentic, J. W.; Prugniel, P. Fine structure in the early-type components in mixed pairs of galaxies. **The Messenger**, v. 75, p. 28–33, mar. 1994. 46
- REES, M. J. Black hole models for active galactic nuclei. **ARA&A**, v. 22, p. 471–506, 1984. 34
- RESHETNIKOV E Sotnikova, N. Global structure and formation of polar-ring galaxies. **A&A**, v. 325, p. 933–942, set. 1997. 29, 59, 83
- RESHETNIKOV, V.; Bournaud, F.; Combes, F.; Faúndez-Abans, M.; de Oliveira-Abans, M.; van Driel, W.; Schneider, S. E. Galaxy transmutations: The double ringed galaxy ESO 474-G26. **A&A**, v. 431, p. 503–510, fev. 2005. 29
- RESHETNIKOV, V.; Bournaud, F.; Combes, F.; Faúndez-Abans, M.; Oliveira-Abans, M. de. AM 1934-563: a giant spiral polar-ring galaxy in a triplet. **A&A**, v. 446, p. 447–458, fev. 2006. 28, 31, 62, 64
- RESHETNIKOV, V. P.; Combes, F. Kinematics and dark haloes of polar-ring galaxies. **A&A**, v. 291, p. 57–73, nov. 1994. 36, 88
- RESHETNIKOV, V. P.; Faúndez-Abans, M.; de Oliveira-Abans, M. Nuclear spectra of polar-ring galaxies. **MNRAS**, v. 322, p. 689–694, abr. 2001. 28, 34, 36, 79, 85, 86, 87
- _____. Polar-ring galaxies: New candidates and statistics. **Astronomy Letters**, v. 37, p. 171–180, mar. 2011. 85, 88
- RESHETNIKOV, V. P.; Faúndez-Abans, M.; Oliveira-Abans, M. de. ESO 603-G21: A strange polar-ring galaxy. **A&A**, v. 383, p. 390–397, fev. 2002. 47, 79, 85
- RESHETNIKOV, V. P.; Hagen-Thorn, V. A.; Yakovleva, V. A. Photometric study of polar-ring galaxies. I. UGC 7576 and UGC 9796. **A&A**, v. 290, p. 693–704, out. 1994. 87
- _____. Photometric study of polar-ring galaxies. II. IC 1689. **A&A**, v. 303, p. 398, nov. 1995. 86, 87
- ROCHA-POPPE, P. C. da; Faúndez-Abans, M.; Fernandes-Martin, V. A.; Fernandes, I. F.; de Oliveira-Abans, M.; Rodríguez-Ardila, A. ESO089-G018 and ESO089-G019: long-slit spectroscopy of emission-line galaxies. **MNRAS**, v. 402, p. 1480–1488, mar. 2010. 49

RODRIGUES, I.; Dottori, H.; Brinks, E.; Mirabel, I. F. Study of the interacting system NGC 6845. **AJ**, v. 117, p. 2695–2708, jun. 1999. 21

SANDAGE, A. **The Hubble atlas of galaxies**. [S.l.: s.n.], 1961. 35

SCHWEIZER, F.; Whitmore, B. C.; Rubin, V. C. Colliding and merging galaxies. II - S0 galaxies with polar rings. **AJ**, v. 88, p. 909–925, jul. 1983. 26, 29, 85

SEMELIN, B.; Combes, F. New multi-zoom method for N-body simulations: application to galaxy growth by accretion. **A&A**, v. 441, p. 55–67, out. 2005. 31

SLIPHER, V. M. On the spectrum of the nebula in the Pleiades. **Lowell Observatory Bulletin**, v. 2, p. 26–27, 1912. 20

_____. The radial velocity of the Andromeda Nebula. **Lowell Observatory Bulletin**, v. 2, p. 56–57, 1913. 20

_____. Spectrographic observations of nebulae. **Popular Astronomy**, v. 23, p. 21–24, jan. 1915. 20

SPARKE, L. S.; van Moorsel, G.; Cox, A. L. The polar rings around NGC 5122 and UGC 7576: Superthin quiescent low-surface-brightness disks. In: **American Astronomical Society Meeting Abstracts #213, Bulletin of the American Astronomical Society**. [S.l.: s.n.], 2009. v. 41, p. 444.12. 78, 83

SPAVONE, M.; Iodice, E. VGS31b: a highly inclined ring along a filament in a void. Implication for the cold accretion. **ArXiv e-prints**, jul. 2013. 64

_____. _____. **MNRAS**, v. 434, p. 3310–3321, out. 2013. 88

SPAVONE, M.; Iodice, E.; Arnaboldi, M.; Gerhard, O.; Saglia, R.; Longo, G. Chemical abundances in the polar disk of NGC 4650A: Implications for cold accretion scenario. **ApJ**, v. 714, p. 1081–1095, maio 2010. 31, 88

SPAVONE, M.; IODICE, E.; ARNABOLDI, M.; LONGO, G.; GERHARD, O. Chemical abundances of the PRGs UGC 7576 and UGC 9796. I. Testing the formation scenario. **A&A**, v. 531, p. A21, jul. 2011. 31

SPAVONE, M.; Iodice, E.; Bettoni, D.; Galletta, G.; Mazzei, P.; Reshetnikov, V. A new photometric investigation of the double-ringed galaxy ESO 474-G26: unveiling the formation scenario. **MNRAS**, v. 426, p. 2003–2018, nov. 2012. 88

SPINRAD, H.; Stern, D.; Bunker, A.; Dey, A.; Lanzetta, K.; Yahil, A.; Pascarelle, S.; Fernández-Soto, A. A $z = 5.34$ galaxy pair in the Hubble deep field. **AJ**, v. 116, p. 2617–2623, dez. 1998. 59

- STETSON, P. B.; Harris, W. E. CCD photometry of the globular cluster M92. **AJ**, v. 96, p. 909–975, set. 1988. 47
- STORCHI-BERGMANN, T. On the ratio (N II)/H-alpha in the nucleus of Seyfert 2 and LINER galaxies. **MNRAS**, v. 249, p. 404–408, abr. 1991. 72
- STRUCK, C.; Appleton, P. N.; Borne, K. D.; Lucas, R. A. Hubble Space Telescope imaging of dust lanes and cometary structures in the inner disk of the Cartwheel Ring Galaxy. **AJ**, v. 112, p. 1868, nov. 1996. 26
- SULENTIC, J. W.; Arp, H.; Lorre, J. Optimal enhancement of features in digital spectra. **AJ**, v. 90, p. 522–532, mar. 1985. 46
- THEYS, J. C.; Spiegel, E. A. Ring galaxies. I. **ApJ**, v. 208, p. 650–661, set. 1976. 25, 67
- TOOMRE, A.; Toomre, J. Galactic bridges and tails. **ApJ**, v. 178, p. 623–666, dez. 1972. 22, 23, 35
- VAUCOULEURS, G. de; de Vaucouleurs, A.; Corwin, J. H. G.; Buta, R. J.; Paturel, G.; Fouqué, P. **Third reference catalogue of bright galaxies. Volume I: Explanations and references. Volume II: Data for galaxies between 0^h and 12^h. Volume III: Data for galaxies between 12^h and 24^h.** [S.l.: s.n.], 1991. 67
- VEILLEUX, S.; Osterbrock, D. E. Spectral classification of emission-line galaxies. **ApJS**, v. 63, p. 295–310, fev. 1987. 50, 69, 80
- VERNER, D. A.; Verner, E. M.; Ferland, G. J. Atomic data for permitted resonance lines of atoms and ions from H to Si, and S, Ar, Ca, and Fe. **Atomic Data and Nuclear Data Tables**, v. 64, p. 1, 1996. 51
- VIEGAS, S. M. M. O. F. d. Descobrimo o universo. **São Paulo: EdUSP**, 2004. 24
- Vorontsov-Velyaminov, B. Interaction of Multiple Systems. In: MCVITTIE, G. C. (Ed.). **Problems of extra-galactic research.** [S.l.: s.n.], 1962. (IAU Symposium, v. 15), p. 194. 22
- VORONTSOV-VELYAMINOV, B. A. Atlas and catalog of interacting galaxies. 1959, Sternberg Institute, Moscow State University. In: **Atlas and catalog of interacting galaxies (1959).** [S.l.: s.n.], 1959. p. 0. 59
- _____. Atlas of interacting galaxies, part II and the concept of fragmentation of galaxies. **A&AS**, v. 28, p. 1–117, abr. 1977. 59
- WENDEROTH, E.; Faúndez-Abans, M.; Krabbe, A. C.; de Oliveira-Abans, M.; Cuevas, H. A first study of the galaxy <ASTROBJ>HRG 2304</ASTROBJ> and its

- companion <ASTROBJ>AM 1646-795 (NED01)</ASTROBJ>. **A&A**, v. 529, p. A157, maio 2011. [74](#)
- WHITFORD, A. E. The law of interstellar reddening. **AJ**, v. 63, p. 201–207, maio 1958. [54](#), [75](#)
- WHITMORE, B.; McElroy, D.; Schweizer, F. AM:2020-5050 - an elliptical galaxy with an outer ring. In: P. T. de Zeeuw (Ed.). **Structure and Dynamics of Elliptical Galaxies**. [S.l.: s.n.], 1987. (IAU Symposium, v. 127), p. 413–+. [28](#)
- WHITMORE, B. C.; LUCAS, R. A.; MCELROY, D. B.; STEIMAN-CAMERON, T. Y.; SACKETT, P. D.; OLLING, R. P. New observations and a photographic atlas of polar-ring galaxies. **AJ**, v. 100, p. 1489–1522, nov. 1990. [28](#), [34](#), [59](#), [83](#)
- WILLNER, S. P.; Elvis, M.; Fabbiano, G.; Lawrence, A.; Ward, M. J. Infrared observations of LINER galactic nuclei. **ApJ**, v. 299, p. 443–461, dez. 1985. [36](#)
- ZASOV, A. V. On the nature of interacting galaxies. **Astrophysics**, v. 4, p. 173–181, set. 1968. [22](#)
- ZWICKY, F. Clusters of Nebulae. **PASP**, v. 54, p. 185, out. 1942. [22](#)
- _____. Luminous and dark formations of intergalactic matter. **Physics Today**, v. 6, p. 7–11, 1953. [22](#)
- _____. Multiple Galaxies. **Ergebnisse der exakten Naturwissenschaften**, v. 29, p. 344–385, 1956. [22](#)
- _____. Intergalactic Bridges. **Leaflet of the Astronomical Society of the Pacific**, v. 9, p. 17, 1963. [22](#)
- ZWICKY, F.; Humason, M. L. Spectroscopic investigations of multiple galaxies and clusters of galaxies. **PASP**, v. 71, p. 392, out. 1959. [22](#)
- ZWICKY, F.; HUMASON, M. L. Spectra and other characteristics of interconnected galaxies and of galaxies in groups and in clusters. II. **ApJ**, v. 133, p. 794, maio 1961. [22](#)

**Apêndice 1: Imagery and long-slit spectroscopy of the polar
ring galaxy AM 2020-504**

Imagery and long-slit spectroscopy of the polar ring galaxy AM 2020–504

P. Freitas-Lemes,^{1*} I. Rodrigues,¹ M. Faúndez-Abans,² O. L. Dors Jr¹
and I. F. Fernandes³

¹Universidade do Vale do Paraíba. Av. Shishima Hifumi, 2911, CEP: 12244-000, São José dos Campos, SP, Brazil

²MCTI/Laboratório Nacional de Astrofísica, Caixa Postal 21, CEP: 37.504-364, Itajubá, MG, Brazil

³UEFS, Departamento de Física, CEP 44036-900, Feira de Santana, BA, Brazil

Accepted 2012 August 15. Received 2012 August 6; in original form 2012 April 4

ABSTRACT

Interactions between galaxies are very common. There are special types of interactions that produce systems called polar ring galaxies (PRGs), composed of a lenticular, elliptical or spiral host galaxy, surrounded by a ring of stars and gas, orbiting in an approximately polar plane. In this paper, we study AM 2020–504, a PRG with an elliptical host galaxy, and a narrow and well-defined ring, probably formed by accretion of material from a donor galaxy, collected by the host galaxy. Our observational study is based on *BVRI* broad-band imagery as well as long-slit spectroscopy in the wavelength range 4100–8600 Å, performed at the 1.6-m telescope at the Observatório do Pico dos Dias, Brazil. We have estimated a redshift of $z = 0.01683$, corresponding to a heliocentric radial velocity of $5045 \pm 23 \text{ km s}^{-1}$. The ($B - R$) colour map shows that the ring is bluer than the host galaxy, which indicates that the ring is a younger structure. Standard diagnostic diagrams have been used to classify the main ionizing source of selected emission-line regions (nucleus, host galaxy and ring). We find that the ring regions are mainly ionized by massive stars, while the nucleus presents the characteristics of an active galactic nucleus. Using two empirical methods, we have found oxygen abundances for the H II regions located in the ring in the range $12 + \log(\text{O}/\text{H}) = 8.3\text{--}8.8$ dex. We have also found the presence of an oxygen gradient across the ring, and it appears that AM 2020–504 follows the metallicity–luminosity relation of spiral galaxies. These results support the accretion scenario for this object and they rule out cold accretion as the source for the H I gas in the polar ring.

Key words: galaxies: abundances – galaxies: active – galaxies: individual: AM 2020–504 – galaxies: interactions – galaxies: kinematics and dynamics – galaxies: peculiar.

1 INTRODUCTION

Galaxies have long been seen as islands, distantly scattered and stable in the Universe. We now know that galaxies are not randomly distributed in space. They are in groups that are subject to the expansion of the Universe and mutual gravitational interaction. The interaction between galaxies has substantially modified cosmic structures throughout the evolution of the Universe. These events are determined by the attracting nature of gravity, which, in turn, induces collisions, tidal forces and dynamical frictions in larger systems (Rodrigues et al. 1999). The strong perturbations on the interacting systems are a result of the tidal force. This can dismember large quantities of material to form bridges and tails, thus injecting chemically processed interstellar material into the intergalactic space and contaminating distances up to 10 times larger than the diameter of the interacting galaxies (Dottori, Mirabel & Rodrigues 1997).

One of the many types of interactions occurs when there is a ring of gas, dust and stars positioned perpendicularly with the galaxy's main plane. These systems are known as polar ring galaxies (PRGs), peculiar systems with early-type or elliptical host galaxies. The term ‘polar ring galaxies’ was first introduced by Schweizer, Whitmore & Rubin (1983) and was used by Whitmore, McElroy & Schweizer (1987a). Later, Whitmore et al. (1990) published his Polar Ring Catalogue (PRC), with a total of 157 objects: six kinematically confirmed (rotation, detected in two orthogonal planes), 27 galaxies as ‘good candidates’, 73 as ‘possible candidates’ and 51 galaxies as ‘related objects’. Bekki (1998) has discussed the origin of the fundamental observational properties of PRGs. Faúndez-Abans & de Oliveira-Abans (1998) have made a more comprehensive classification of all collisional ring galaxies, which includes PRGs. Within our neighbouring Universe, 20 PRGs have recently been confirmed in the catalogue of Gnedin (2009). Moiseev et al. (2011) have also displayed a new catalogue with candidate PRGs selected from the Sloan Digital Sky Survey (SDSS).

Bournaud & Combes (2003) have reviewed the two scenarios for the formation of PRGs: (i) the fusion that occurs in a frontal

*E-mail: priscila@univap.br

collision between two spiral galaxies whose discs are orthogonal; (ii) the accretion scenario, in which during the interaction between two galaxies, the host collects material from another galaxy to form the ring. Both scenarios require a specific geometric configuration for the formation of a polar ring.

Macciò, Moore & Stadel (2006) have also proposed a third scenario: (iii) the cold accretion scenario for the formation of isolated PRGs. Based on a large cosmological hydrodynamical simulation, they have shown that the formation of these PRGs can occur naturally in a hierarchical universe where most low-mass galaxies are assembled through the accretion of cold gas infalling along megaparsec-scale filamentary structures.

In this paper, we report on the results of a study of the PRG AM 2020–504, based on broad-band images and long-slit spectroscopy obtained at the Observatório Pico dos Dias (OPD), Brazil. Our main goal in this paper is to investigate the scenario of formation by determining the oxygen abundance in the star-forming regions located in the ring and by inferring the dust and gas contents of the system. This is done using broad-band images and spectroscopic data, from which we study the kinematics, surface and aperture photometry. In Section 2, we present a review of AM 2020–504. We present the observations and data reductions in Section 3. We give our results and a discussion in Section 4, and our conclusions in Section 5.

2 AM 2020–504: REVIEW

AM 2020–504 is composed of a narrow ring surrounding a very bright host galaxy. This object appears in many PRG catalogues (e.g. Whitmore et al. 1990; Faúndez-Abans & de Oliveira-Abans 1998; Reshetnikov, Faúndez-Abans & de Oliveira-Abans 2002; Bournaud & Combes 2003; Casasola, Bettoni & Galletta 2004). Based on photometric and spectroscopic observations, Arnaboldi et al. (1993b) have concluded that the material of the ring has likely been accreted, as indicated by the kinematical decoupling of the inner core of the host galaxy, the different colour of the material in the ring and in the galaxy, and the large amount of H I, which is quite unusual for an E galaxy. They have modelled the surface brightness of the galaxy, assuming that the central component is seen edge-on, in order to determine the geometry of the system. They have found that the luminosity profile of the host galaxy is well described by an oblate Jaffe model with axial ratio $c/a = 0.6$ for $R > 9$ arcsec, where c and a are the minor and major axes of the galaxy and R is the galactic radius. The intrinsic inclination of the ring plane derived using the $(B - R)$ and $H\alpha$ images is consistent with the ring being very nearly polar. The ring is warped and tilted 18° from edge-on, passing with the north-east side in front of the elliptical galaxy. Arnaboldi et al. (1993a) have reproduced the ultraviolet (UV) spectral energy distribution (SED) by a model consisting of an elliptical galaxy with a starburst, which has given a lower limit for the age of the polar ring of 1.5×10^8 yr. This is consistent with the structure being quite young.

The field near AM 2020–504 is shown in Fig. 1 (labelled A). AM 2020–504 has no detected leftover materials or bridges connecting it with another structure or surrounding galaxy. We have found six other objects belonging to the group in a search field of 30 arcmin around AM 2020–504. These galaxies cover a velocity range of 730 km s^{-1} . Closer to AM 2020–504, at a projected distance of 5 arcmin, is 2MASXJ2023488–5043492 (label B), whose velocity difference is 330 km s^{-1} . Objects C (ESO 234–G016) and D (ESO 234–G017) have very similar radial velocities (190 and 5 km s^{-1} , respectively), forming a sort of plane in the radial velocity space (see Table 1). The

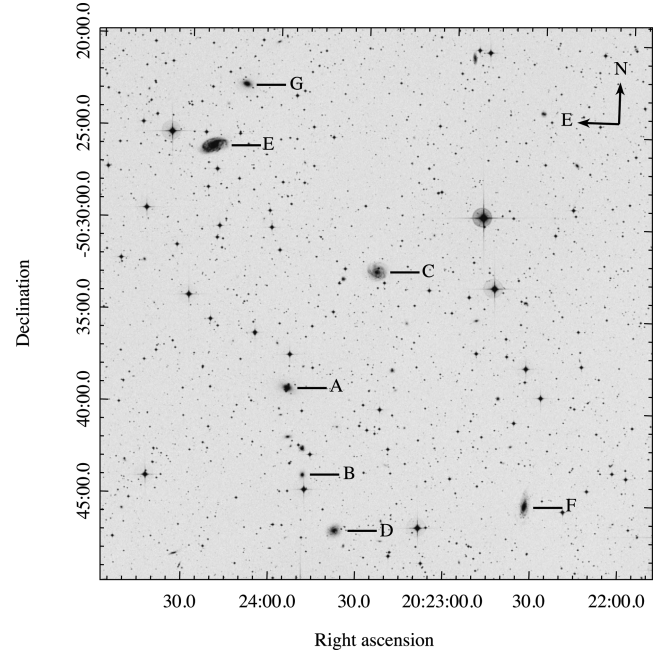


Figure 1. Objects near the PRG AM 2020–504 (Table 1). Image obtained from the Digitized Sky Survey.

Table 1. Galaxies within 30 arcmin of AM 2020–504. Labels are according to Fig. 1.

Name	Label	Velocity (km s^{-1})	Relative velocity	Distance (arcmin)
A	AM 2020–504	5006 ± 43	0	0
B	2MASXJ2023488–5043492	4676 ± 45	–330	4.7
C	ESO 234–G016	5196 ± 27	190	7.9
D	ESO 234–G017	5011	5	8.3
E	NGC 6899	5731 ± 10	724	13.8
F	ESO 234–G013	4786	–220	14.3
G	2MASXJ20241155–5022394	5648	642	16.7

coordinates of the objects and their radial velocities were obtained from the NASA/IPAC Extragalactic Data base (NED).¹

3 OBSERVATIONS AND DATA REDUCTION

3.1 Broad-band optical imagery

Photometric observations were performed with the 1.6-m telescope at the OPD in 2008 July. The telescope was equipped with a direct imaging Camera 1, with the CCD 106, a back-illuminated 1024×1024 detector.

The data were acquired with standard Johnson B , V , R and I filters. Calibration was accomplished using repeated observations of standard stars from Landolt (1992) selected fields Mark-A and PG13223–086. The log of observations is given in Table 2.

¹ The NED is operated by the Jet Propulsion Laboratory, California Institute of Technology, under contract with the National Aeronautics and Space Administration.

Table 2. Log of CCD image observations.

Date	Bandpass	Exposure (s)
2008 July 07–08	<i>B</i>	6 × 300
2008 July 07–08	<i>V</i>	6 × 300
2008 July 07–08	<i>R</i>	6 × 300
2008 July 07–08	<i>I</i>	6 × 240

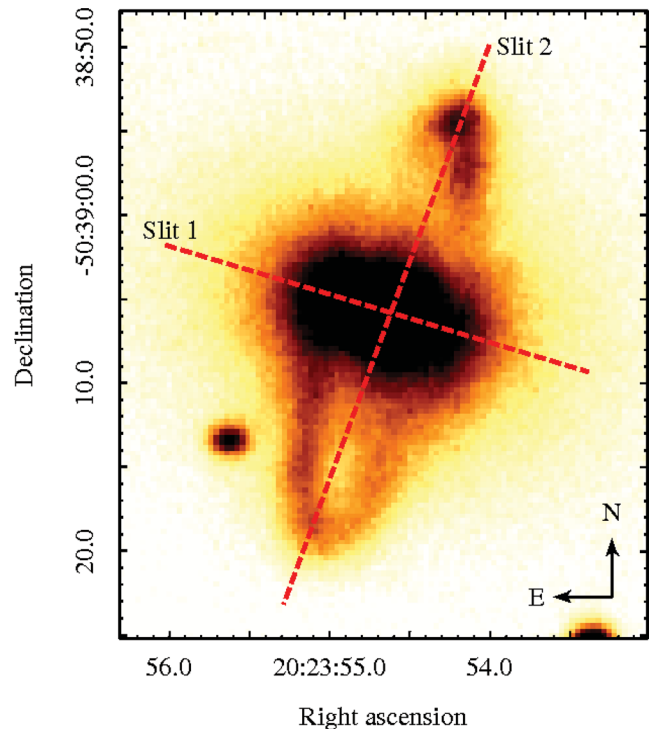
Data reductions were performed in the standard manner using the IRAF² package. This included dark and bias subtraction, and flat-field correction (we have used a mean of several dome flats taken in the appropriate filter). The cosmic rays were removed manually by masking them with the median of adjacent pixels.

3.2 Spectroscopic observations

The spectroscopic observations were performed with the 1.6-m telescope at the OPD equipped with a Cassegrain spectrograph and CCD 105, a back-illuminated 2048 × 2048 detector in 2008 June and 2008 September. Diffraction gratings of 300 and 600 lines mm⁻¹ were used. The aim of the 300 lines mm⁻¹ grating was to have a larger spectral coverage (4100–8600 Å), while 600 lines mm⁻¹ was used to obtain higher resolution in the main lines H β , [O III] λ 5007, H α , [N II] λ 6584 and [S II] λ 6716, λ 6731.

For the observations, we used two slit positions, one along the major axis of the host galaxy (slit 1) and another along the major axis of the ring (slit 2). Slit 1 has an inclination of 72° 5 NE and slit 2 has an inclination of 17° NW, as shown in Fig. 2. Spectrophotometric standard stars were observed each night to perform flux calibration. These are tertiary standards from Baldwin, Phillips & Terlevich (1981), as revised by Hamuy et al. (1992); see also Hamuy et al. (1994). Arc lamps were taken before and after each exposure in order to provide accurate wavelength calibration. A log of the spectral observations is given in Table 3. The spectra processing and data analysis were carried out using standard procedures employing the IRAF and RVSAO packages. This includes bias subtraction, flat-field correction, cosmic ray removal, sky subtraction, wavelength and flux calibration (IMAGES/IMFIT, IMUTIL, STSDAS/IMGTOOLS, TWODSPEC and ONEDSPEC tasks, respectively). The wavelength calibration errors are $\simeq 8$ and $\simeq 10$ Å for slits 1 and 2, respectively. The standard extraction aperture was set for the emission region. The spectra were reduced using the measurements of the standard stars observed at similar airmasses. The line fluxes were obtained using the SPLIT task of IRAF. This task was also used to obtain the centre of the emission lines in order to later calculate the radial velocities of the measured lines. As a double check of these results, the RVSAO/IRAF external package was used to calculate the apparent radial velocities from the observed spectral shifts. The EMSAO task finds emission lines in a spectrum and computes the observed centres, yielding individual shifts and errors for each line as well as a single velocity by combining all of the lines (Mink & Wyatt 1995).

² IRAF is distributed by the National Optical Astronomy Observatory, which is operated by the Association of Universities for Research in Astronomy (AURA) under cooperative agreement with the National Science Foundation.

**Figure 2.** *B*-band image of the galaxy AM 2020–504 showing the slit positions.**Table 3.** Log of spectral observations, the slit positions and exposure times.

	Slit 1	Slit 2
Date	2008 Sep 29	2008 Jul 04
Grating (lines mm ⁻¹)	600	300
Spectral range (Å)	4600–6730	4100–8600
Angle	72° 5 N–E	17° N–W
Exposure time (s)	1800	1200
Slit width (arcsec)	3	3

4 RESULTS AND DISCUSSION

4.1 Rotation curves

The radial velocities along the slits were calculated based on the Doppler shift of spectral lines. To construct the rotation curve of this system, the strongest emission lines were used (i.e. H β , [O III] λ 5007 and H α). In both slit positions, extractions of one-dimensional spectra were performed in order to obtain the rotation curves, as well as information on specific regions.

The radial velocity of the galaxy, calculated by averaging the central positions of slit 1, is 5045 ± 23 km s⁻¹. The value is similar to that found by Whitmore, McElroy & Schweizer (1987b) and Arnaboldi et al. (1993b).

The rotation profile along the ring major axis is shown in Fig. 3. The northern portion of the ring is approaching us and the southern portion is receding from us. This rotation curve is symmetrical and well behaved. The last three points on each side of the rotation curve suggest that the northern and southern portions of the ring have a difference in rotation velocity of about 60 km s⁻¹, but this difference is under the error bars. To a certain degree, asymmetries could be explained if the ring was warped. In fact, Arnaboldi et al. (1993b)

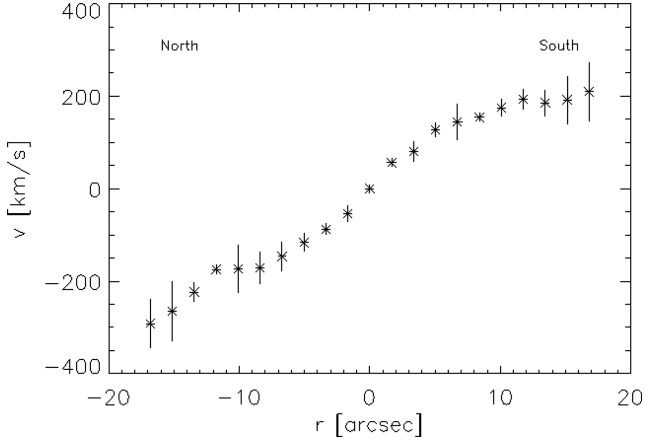


Figure 3. Rotation profile of AM 2020–504 along the ring major axis (PA = 17°).

have suggested that the ring is warped, and they have generated models that adjust fairly well with the morphology and the rotation velocity curves in some directions for which they had long-slit spectra, showing those asymmetries.

4.2 Spectral analysis

To analyse the emission from the gaseous component, we have constructed four diagnostic diagrams proposed by Baldwin et al. (1981) and Coziol et al. (1999), using slit 2 spectra. These diagrams are used to distinguish objects ionized only by massive stars from those containing active galactic nuclei (AGNs) and/or shock-excited gas. The diagrams used were $[\text{O III}]\lambda 5007/\text{H}\beta$ versus $[\text{O I}]\lambda 6300/\text{H}\alpha$, $[\text{N II}]\lambda 6584/\text{H}\alpha$, and $[\text{S II}](\lambda 6717 + \lambda 6731)/\text{H}\alpha$; and $[\text{N II}]\lambda 6584/\text{H}\alpha$ versus $[\text{S II}](\lambda 6717 + \lambda 6731)/\text{H}\alpha$. The emission-line intensities were measured using the IRAF SPLIT routine, considering a Gaussian line profile fitting. Table 4 presents the distance to the galactic centre (assuming 344 pc arcsec⁻¹), the emission-line intensity measurements normalized to the flux of $\text{H}\beta = 100$, the nebular reddening coefficient $C(\text{H}\beta)$ and the observed $\text{H}\beta$ flux for each aperture. $C(\text{H}\beta)$ is calculated by comparing

the Balmer decrement $\text{H}\alpha/\text{H}\beta$ to the theoretical value of 2.86 given by Osterbrock (1989) for an electron temperature of 10 000 K, and by considering the interstellar law of Whitford (1958).

The error associated with the line fluxes has been estimated by following the same procedure as Oliveira, Copetti & Krabbe (2008). The error is given by $\sigma^2 = \sigma_{\text{cont}}^2 + \sigma_{\text{line}}^2$, where σ_{cont}^2 is the error due to the continuum noise, calculated to be $\sigma_{\text{cont}}^2 = \sqrt{N}\Delta\sigma_{\text{rms}}$, and σ_{line}^2 is the Poisson error of the emission line. Here, N is the number of pixels covered by the emission line, Δ is the dispersion of the spectrum (units of wavelength per pixel) and σ_{rms} is the root mean square of the continuum flux density (flux per unit wavelength).

We have compared the values of the reddening coefficient $C(\text{H}\beta)$ in the ring of AM 2020–504 with those in other PRGs and in isolated galaxies. We have found an average $C(\text{H}\beta)$ of 0.8, which is similar to that (≈ 0.9) in the ring galaxy SDSSJ075234.33+292049.8 (Brosch et al. 2010), and larger than those in the discs of spiral galaxies. For example, in M33, it is ≈ 0.4 (Bresolin 2011) and in M101, it is ≈ 0.4 (Kennicutt & Garnett 1996).

Figs 4 and 5 show diagnostic diagrams, where different symbols are used to represent the ring and the nuclear regions. Fig. 4 shows the diagnostic diagram proposed by Coziol et al. (1999), where we plot the values of the $[\text{N II}]/\text{H}\alpha$ versus $[\text{S II}]/\text{H}\alpha$ ratios. These two line ratios are significantly higher in low-ionization narrow emission-line regions (LINERs) and type 2 Seyfert galaxies than in H II regions and starbursts. The distinction between the two AGN types (e.g. Seyferts and LINERs) is not possible in this diagram, but regions undergoing photoionization by O and B stars are clearly separated from AGN ionizing sources. The criteria of Coziol et al. (1999) have established two regions in this diagram, separated by the continuous lines in Fig. 4, where the gas is excited by the two different mechanisms (e.g. AGN and photoionization by stars), which is consistent with the lower limits for the presence of diffuse ionized gas in the haloes of edge-on starbursts, as proposed by Lehnert & Heckman (1996). The open and solid circles represent the northern and southern parts of the ring, respectively, the host galaxy is represented by open triangles and the nucleus is denoted by a closed triangle.

The lines in Fig. 5 are used to separate objects with distinct ionization sources, following the criteria of Kewley et al. (2006).

Table 4. Reddening corrected emission-line intensities (relative to $\text{H}\beta = 100$) and global properties.

r (kpc)	$\log[F(\text{H}\beta)]$ (erg s ⁻¹ cm ⁻²)	$C(\text{H}\beta)$	$[\text{O III}]\lambda 5007$	$\text{H}\alpha$	$[\text{N II}]\lambda 6584$	$[\text{S II}]\lambda 6716$	$[\text{S II}]\lambda 6731$	$O3N2$	$N2$	$12+\log(\text{O}/\text{H})$ $O3N2$	$12+\log(\text{O}/\text{H})$ $N2$
5.83	-15.01	1.11	162 ± 11	263 ± 16	45 ± 3	46 ± 4	51 ± 5	0.97	-0.76	8.41	8.46
5.10	-14.58	0.88	192 ± 11	268 ± 15	39 ± 2	29 ± 2	68 ± 5	1.12	-0.83	8.37	8.40
4.37	-14.81	0.35	153 ± 9	279 ± 14	61 ± 4	-	-	0.84	-0.66	8.45	8.54
3.65	-15.07	1.31	183 ± 9	260 ± 13	59 ± 3	39 ± 3	78 ± 6	0.90	-0.64	8.43	8.56
2.91	-14.95	0.80	150 ± 8	270 ± 13	57 ± 3	57 ± 4	90 ± 6	0.85	-0.67	8.45	8.53
2.20	-15.22	0.68	141 ± 8	272 ± 21	65 ± 3	-	-	0.77	-0.62	8.48	8.57
1.45	-15.17	0.78	135 ± 6	270 ± 11	87 ± 4	135 ± 7	65 ± 4	-	-	-	-
0.73	-15.25	1.05	169 ± 8	265 ± 10	101 ± 4	142 ± 8	90 ± 3	-	-	-	-
0.38	-15.38	1.47	204 ± 10	256 ± 10	114 ± 5	136 ± 5	114 ± 8	-	-	-	-
0.0	-15.39	1.97	313 ± 12	247 ± 8	153 ± 6	143 ± 9	145 ± 11	-	-	-	-
0.38	-15.39	1.71	262 ± 10	252 ± 10	154 ± 6	124 ± 8	132 ± 10	-	-	-	-
0.73	-15.21	1.03	207 ± 8	265 ± 9	174 ± 6	113 ± 9	148 ± 7	-	-	-	-
1.45	-15.35	1.68	352 ± 14	253 ± 10	152 ± 6	109 ± 5	152 ± 7	-	-	-	-
2.20	-15.02	0.47	192 ± 7	276 ± 11	106 ± 5	117 ± 6	90 ± 7	0.69	-0.41	8.50	8.74
2.91	-15.11	0.63	169 ± 6	273 ± 11	67 ± 9	-	-	0.83	-0.61	8.46	8.58
3.65	-15.27	0.86	209 ± 10	268 ± 12	66 ± 3	105 ± 6	45 ± 3	0.92	-0.60	8.43	8.58
4.37	-15.27	1.44	137 ± 7	257 ± 15	47 ± 4	69 ± 4	55 ± 3	0.87	-0.73	8.45	8.48
5.10	-15.03	0.53	124 ± 6	275 ± 16	55 ± 5	79 ± 5	16 ± 1	0.79	-0.69	8.47	8.51

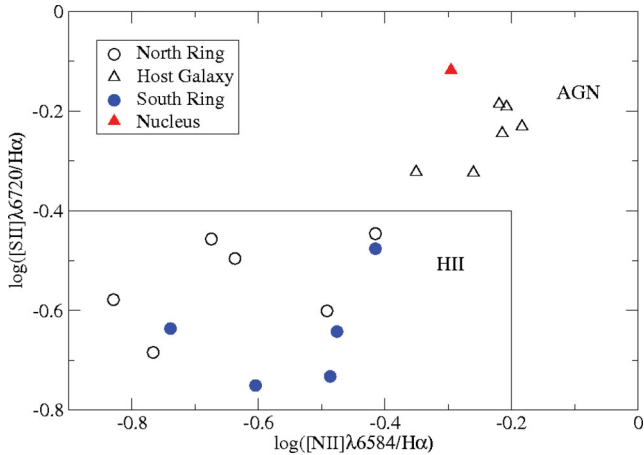


Figure 4. AM 2020–504 diagnostic diagram $\log[\text{N II}]\lambda 6584/\text{H}\alpha$ versus $\log[\text{S II}](\lambda 6717 + \lambda 6731)/\text{H}\alpha$ (Coziol et al. 1999). The solid triangle denotes the nuclear region and the open triangles correspond to the host galaxy. The open and solid circles correspond to the northern and southern regions of the ring, respectively.

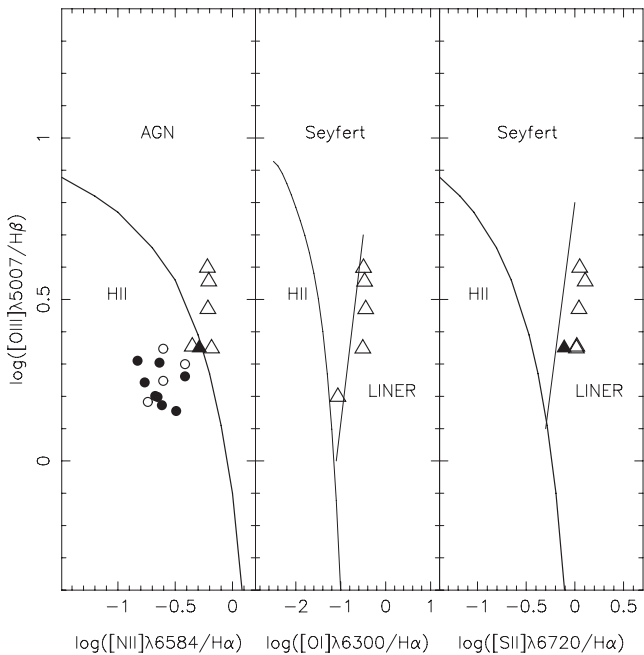


Figure 5. Diagnostic diagrams $[\text{N II}]\lambda 6584/\text{H}\alpha$ (left), $[\text{O I}]\lambda 6300/\text{H}\alpha$ (middle), and $[\text{S II}](\lambda 6717 + \lambda 6731)/\text{H}\alpha$ (right) versus $[\text{O III}]\lambda 5007/\text{H}\beta$ (Baldwin et al. 1981). The curves, taken from Kewley et al. (2006), separate objects ionized by massive stars from those containing active nuclei and/or shock-excited gas. The straight line, taken from Kewley et al. (2006), separates Seyferts and LINERs. The symbols are the same as in Fig. 4.

They combined photoionization model results with stellar population synthesis models, built by Kewley et al. (2001), in order to analyse the host properties of about 80 000 emission-line galaxies selected from the SDSS. They have shown that Seyferts and LINERs form clearly separated branches on the standard optical diagnostic diagrams, such as those used in this paper. We can see that the nuclear points occupy the AGN’s site in four diagrams (see Figs 4 and 5). In two of them, these points are at the LINER’s site, while the ring points are in the region occupied by H II-like objects.

A fundamental subject in galaxy formation studies is our understanding of metallicity. In particular, chemical abundances of H II regions in PRGs have important implications for the evolutionary scenario of these objects and they yield hints on the mechanisms at work during their formation. Three main formation processes have been proposed (for a more detailed discussion, see Spavone et al. 2011 and reference therein), as follows.

(i) Cold accretion of pristine gas. In this scenario, a polar structure can be formed by cold gas accretion, and a gas phase with very low metallicity ($Z \sim 1/10 Z_{\odot}$) is expected. The metallicity of the galaxy would then be lower than that of spiral discs of the same luminosity, and any metallicity gradient along the polar ring would not be present (Macciò et al. 2006; Agertz, Teyssier & Moore 2009).

(ii) Major dissipative merger. The PRG is formed from a merger of two disc galaxies of unequal mass (e.g. Bekki 1997).

(iii) Tidal accretion of material. The polar ring can be formed by the disruption of a dwarf companion galaxy or tidal accretion of gas stripping from a disc galaxy.

In both major merger and tidal accretion, a high metallicity would be found. To test which of these scenarios represents the formation of AM 2020–504, the oxygen abundance has been estimated in the polar disc regions. Unfortunately, accurate chemical abundances can only be derived by measuring temperature-sensitive line ratios, such as $[\text{O III}](\lambda 4959 + \lambda 5007)/\lambda 4363$, which are unobservable in the spectra of the H II regions in the ring of AM 2020–504. In these cases, empirical calibrations between abundances and more easily measured emission-line ratios have to be used to estimate metal abundances (see Dors et al. 2011, and reference therein). Therefore, we estimate the oxygen abundance O/H (used as a tracer of the metallicity) using the calibration of O/H with the parameters proposed by Pérez-Montero & Contini (2009)

$$O3N2 = \log \left[\frac{I([\text{O III}]\lambda 5007)}{I(\text{H}\beta)} \times \frac{I(\text{H}\alpha)}{I([\text{N II}]\lambda 6584)} \right], \quad (1)$$

$$N2 = \log \left[\frac{I([\text{N II}]\lambda 6584)}{I(\text{H}\alpha)} \right], \quad (2)$$

given by

$$12 + \log(\text{O}/\text{H}) = 8.73 - 0.32 \times O3N2 \quad (3)$$

and

$$12 + \log(\text{O}/\text{H}) = 0.57 \times N2 + 9.07. \quad (4)$$

Table 4 presents the values of these parameters and the derived oxygen abundance for each region classified in the diagnostic diagrams as H II regions. We have found that $O3N2$ and $N2$ parameters indicate that the ring H II regions have oxygen abundances $[12 + \log(\text{O}/\text{H})]$ from 8.3 to 8.8 dex, with an average oxygen value of 8.53 ± 0.11 dex. This value is about the solar oxygen abundance (i.e. 8.66 dex; Asplund et al. 2004), and it is near to the maximum oxygen abundance value derived for central parts of spiral galaxies (i.e. 8.87 dex; Pilyugin, Thuan & Vílchez 2007). Fig. 6 shows the oxygen abundance via the two parameters presented above as a function of the galactocentric distance of AM 2020–504. We can see that both parameters indicate an oxygen gradient across the ring. A linear regression in the oxygen estimates via $O3N2$ and $N2$ yields gradients of $-0.017 (\pm 0.006)$ and $-0.051 (\pm 0.013)$ dex kpc^{-1} , respectively. These values are similar to those found in spiral galaxies (see Pilyugin, Vílchez & Contini 2004; Dors & Copetti 2005).

We have also tested whether AM 2020–504 follows the metallicity–luminosity relation of spiral galaxies. Pilyugin et al.

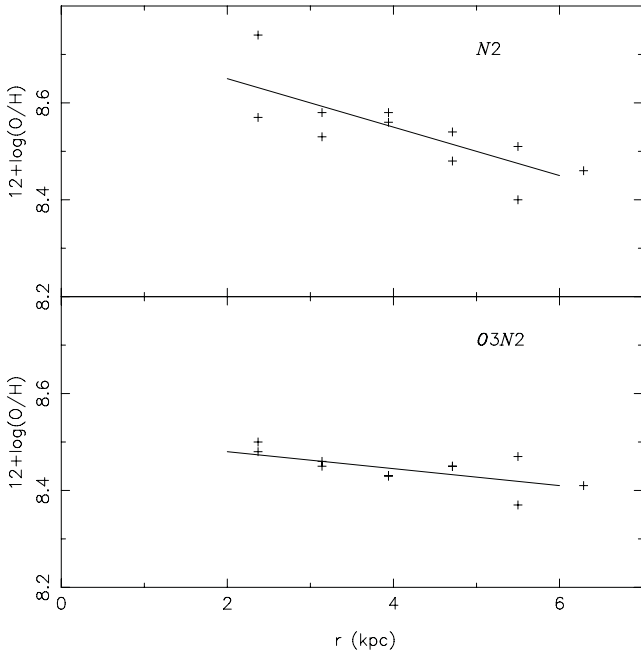


Figure 6. Gradients of $12+\log(\text{O}/\text{H})$ in AM 2020–504. The solid lines are linear regressions on oxygen abundance determinations obtained by the parameters indicated in each plot.

(2004) have found that characteristic oxygen abundance in spiral galaxies as a function of absolute blue magnitude M_B follows the relation

$$12 + \log(\text{O}/\text{H}) = 6.93(\pm 0.37) - 0.079(\pm 0.018)M_B. \quad (5)$$

We have computed the absolute magnitude of AM 2020–504, evaluated by considering the central spheroid and the polar ring for a distance of 71 Mpc ($H_0 = 71$; Mould et al. 2000), with $M_B = -18.24$. Using this value, from the relation above, we have obtained $12+\log(\text{O}/\text{H}) = 8.37 \pm 0.2$ dex, which is about the same average value for oxygen found in the polar ring.

Because the average metallicity in AM 2020–504 is high ($Z \approx Z_\odot$), there is a clear oxygen gradient across the polar ring, and this galaxy follows the metallicity–luminosity relation of normal spiral galaxies. Our results support the formation scenarios of accretion or major merger for this object and they rule out the cold accretion of pristine gas.

Some other works have determined the oxygen abundance in PRGs in order to test possible formation scenarios for these objects. For example, using an O/H – $N2$ calibration, Shalyapina, Moiseev & Yakovleva (2002) have found the oxygen abundance of $12+\log(\text{O}/\text{H}) \sim 8.8$ dex for the PRG UGC 5600. Using a calibration between the electron temperature and strong oxygen emission lines, Brosch et al. (2010) have found that oxygen abundance in different regions of the apparent ring galaxy SDSSJ075234.33+292049.8 is $12+\log(\text{O}/\text{H}) = 8.49 \pm 0.08$ dex. Spavone et al. (2010) have derived the oxygen abundance in the polar disc of NGC 4650A by using both the empirical methods and direct electron temperature detections; they have found $12+\log(\text{O}/\text{H}) = 8.2 \pm 0.1$. Recently, using the P -method (Pilyugin 2001), Spavone et al. (2011) have reported averaged oxygen abundance values of 8.5 ± 0.5 and 7.7 ± 1.0 for $H\text{II}$ regions located in the rings of the PRGs UGC 7576 and UGC 9796. Despite the fact that these results agree with our estimations, for the majority of galaxies above, no metallicity gradient has been

found along the polar disc. Because different methods or different calibrations of the same oxygen indicator provide different oxygen values, with discrepancies of up to 1.0 dex (e.g. Kewley & Ellison 2008), and because few PRGs have been observed, additional analysis is needed to confirm the (dis)agreement found above.

4.3 Aperture photometry

We have carried out circular aperture photometry at selected positions of the system, covering the ring, the host galaxy and its nucleus. Based on the diagrams in Fig. 7, in Table 5, we present the measured magnitudes in B , $(B - V)$, $(B - R)$, $(V - R)$ and $(V - I)$ for the labelled regions. The ring apertures have a mean $(B - V)$ value of 0.43 mag, while the value for the host galaxy is 1.25 mag. The low $(B - V)$ value on the ring indicates that it is a very different structure from the central galaxy: the ring is younger and of distinct origin. In the $(B - V) \times (B - R)$ diagram, shown in Fig. 8, the ring, host galaxy and nucleus are very well separated. Again, the host galaxy tends to be redder and the ring bluer. These values are consistent with those found in other ring galaxies, as described for HRG 2302 (Myrrha et al. 1999). In PRGs, the ring is expected to be bluer than the host galaxy, because the rings of PRGs are the result of recent interactions, and they are made of material that comes from donor galaxies, which are probably spiral. In this case, the material comes from its outer, less bound, parts. These colours suggest the contribution of an old stellar population in the host galaxy, and the contribution of young stars in the ring might be a result of localized star formation (see also Myrrha et al. 1999).

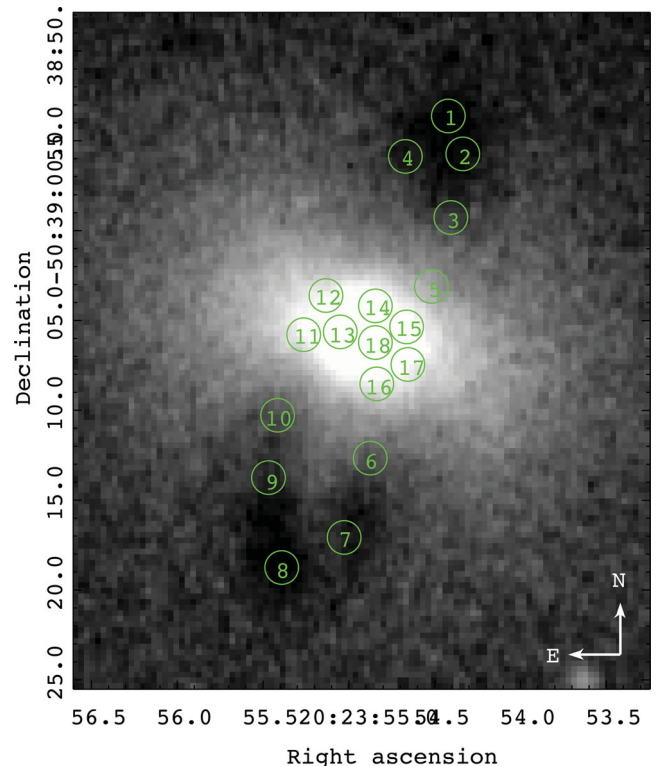
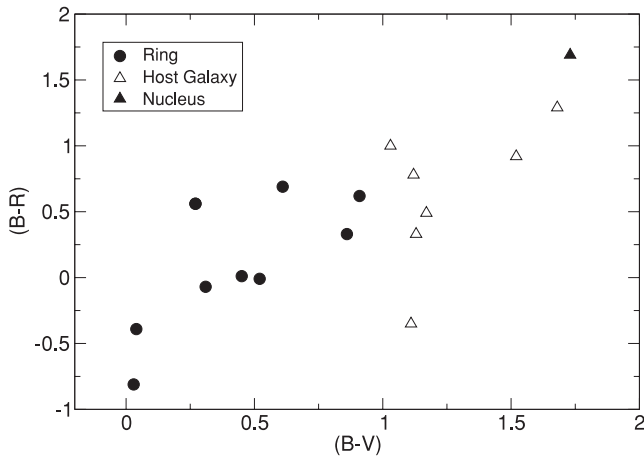


Figure 7. $(B - R)$ colour map: the blue colour of the ring (dark) is compared to the red colour of the galaxy (lighter). Circles mark the positions used for aperture photometry. Measured magnitudes are presented in Table 5.

Table 5. Aperture photometry data. Aperture numbers correspond to the positions marked in Fig. 7.

Region	Label	B	$(B - V)$	$(B - R)$	$(V - R)$	$(V - I)$
Ring	1	18.65	0.86	0.33	-0.53	0.14
	2	17.26	0.61	0.69	0.08	0.03
	3	17.10	0.45	0.01	-0.44	0.42
	4	18.58	0.31	-0.07	-0.38	0.44
	5	18.42	0.52	-0.01	-0.40	0.40
	6	18.70	0.27	0.56	0.29	0.0
	7	18.69	0.03	-0.81	-0.84	0.06
	8	18.55	0.04	-0.39	-0.43	0.19
	9	18.70	0.27	0.56	0.29	0.07
	10	18.12	0.91	0.62	-0.29	0.72
Host galaxy	11	17.14	1.03	1.00	0.11	0.88
	12	17.15	1.12	0.78	-0.34	0.93
	13	17.23	1.52	0.92	-0.60	0.74
	14	17.17	1.13	0.33	-0.80	0.8
	15	19.62	1.17	0.49	-0.68	0.0
	16	17.65	1.11	-0.35	-1.46	0.34
	17	17.69	1.68	1.29	-0.39	0.72
Nucleus	18	19.70	1.73	1.69	-0.04	0.05

**Figure 8.** $(B - V) \times (B - R)$ diagram. Solid circles denote the ring apertures, the open triangles correspond to the host galaxy and the solid triangle is the nuclear region.

Colour maps

The $(B - R)$ colour map is shown in Fig. 7. In this greyscale map, darker regions represent bluer colours, while lighter regions represent redder colours. Clearly, the ring is bluer than the host galaxy. This is also seen in other colour maps, such as $(B - I)$ and $(B - V)$.

5 CONCLUSION

In this paper, we have presented a study of AM 2020–504, a galaxy with a well-defined polar ring surrounding an elliptical host galaxy (Whitmore et al. 1987b; Arnaboldi et al. 1993b; Iodice et al. 2002). The ring was probably formed by accretion of material from a donor galaxy during an interaction event. In the field around the galaxy, we did not find any nearby object that might have given material for the formation of the ring, but there is a group of nearby galaxies with similar radial velocities.

We have estimated a redshift of $z = 0.01683$, corresponding to a heliocentric radial velocity of $5045 \pm 23 \text{ km s}^{-1}$, confirming the values found by Whitmore et al. (1987b) and Arnaboldi et al. (1993b). The rotation curve of the ring is symmetrical and well behaved. The last two points on each side of the rotation curve suggest that the northern and southern portions of the ring have a difference in rotation velocity of about 60 km s^{-1} , but this difference is under the error bars. To a certain degree, asymmetries could be explained if the ring was warped.

We have found that the $(B - R)$ colour index averaged 0.35 and 1.73 for the ring and core of the host galaxy, respectively. Thus, the ring is bluer than the host galaxy (bulge + nucleus), which is to be expected if the ring is the result of a recent interaction.

The B -band brightness profile along the minor axis of the galaxy is asymmetric because of the ring. The north-west peak is higher and corresponds to the bright spots seen in the images. This morphological feature and the general S-shaped appearance of the ring are in good agreement with the warped model of the polar ring given by Arnaboldi et al. (1993b). The light profile along the host galaxy major axis also looks asymmetric on both sides close to the centre. This seems to be because of the presence of dust where the ring passes in front of the galaxy, an indication that the near side of the ring is to the north-east of the galaxy.

This system harbours an AGN, as indicated by some diagnostic diagrams. Using two empirical methods based on easily observable emission lines, we have found (i) oxygen abundances for the H II regions located at the ring in the range $12 + \log(\text{O}/\text{H}) = 8.3\text{--}8.8$ dex, with an average value of 8.53 ± 0.11 dex, and (ii) the presence of an oxygen gradient across the ring of about $-0.035 \text{ dex kpc}^{-1}$. We have also found that AM 2020–504 follows the metallicity–luminosity relation of typical spiral galaxies. These results support the accretion scenario for this object and they rule out cold accretion.

ACKNOWLEDGMENTS

This work was partially supported by the Universidade do Vale do Paraíba - UNIVAP and the Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação (MCTI), Laboratório Nacional de Astrofísica. PF-L thanks FAPESP for the scholarship granted under process 2010/17136-4. OLD is grateful to FAPESP for support under grant 2009/14787-7. We thank the anonymous referee for helping us to improve the manuscript.

REFERENCES

- Agertz O., Teyssier R., Moore B., 2009, MNRAS, 397, L64
 Arnaboldi M., Capaccioli M., Barbaro G., Buson L., Longo G., 1993a, A&A, 268, 103
 Arnaboldi M., Capaccioli M., Cappellaro E., Held E. V., Sparke L., 1993b, A&A, 267, 21
 Asplund M., Grevesse N., Sauval A. J., Allende Prieto C., Kiselman D., 2004, A&A, 417, 751
 Baldwin J. A., Phillips M. M., Terlevich R., 1981, PASP, 93, 5
 Bekki K., 1997, ApJ, 483, 608
 Bekki K., 1998, ApJ, 499, 635
 Bournaud F., Combes F., 2003, A&A, 401, 817
 Bresolin F., 2011, ApJ, 729, 56
 Brosch N., Kniazev A. Y., Moiseev A., Pustilnik S. A., 2010, MNRAS, 401, 2067
 Casasola V., Bettoni D., Galletta G., 2004, A&A, 422, 941
 Coziol R., Reyes R. E. C., Considère S., Davoust E., Contini T., 1999, A&A, 345, 733
 Dors J. O. L., Copetti M. V. F., 2005, A&A, 437, 837

- Dors J. O. L., Krabbe A., Hägele G. F., Pérez-Montero E., 2011, *MNRAS*, 415, 3616
- Dottori H., Mirabel F., Rodrigues I., 1997, in Viegas S. M., Gruenwald R., de Carvalho R. R., eds, *ASP Conf. Ser. Vol. 114, Young Galaxies and QSO Absorption-Line Systems*. Astron. Soc. Pac., San Francisco, p. 71
- Faúndez-Abans M., de Oliveira-Abans M., 1998, *A&AS*, 129, 357
- Gnedin N. Y., 2009, *Nat*, 461, 43
- Hamuy M., Walker A. R., Suntzeff N. B., Gigoux P., Heathcote S. R., Phillips M. M., 1992, *PASP*, 104, 533
- Hamuy M., Suntzeff N. B., Heathcote S. R., Walker A. R., Gigoux P., Phillips M. M., 1994, *PASP*, 106, 566
- Iodice E., Arnaboldi M., Sparke L. S., Gallagher J. S., Freeman K. C., 2002, *A&A*, 391, 103
- Kennicutt J. R. C., Garnett D. R., 1996, *ApJ*, 456, 504
- Kewley L. J., Ellison S. L., 2008, *ApJ*, 681, 1183
- Kewley L. J., Dopita M. A., Sutherland R. S., Heisler C. A., Trevena J., 2001, *ApJ*, 556, 121
- Kewley L. J., Groves B., Kauffmann G., Heckman T., 2006, *MNRAS*, 372, 961
- Landolt A. U., 1992, *AJ*, 104, 340
- Lehnert M. D., Heckman T. M., 1996, *ApJ*, 462, 651
- Macciò A. V., Moore B., Stadel J., 2006, *ApJ*, 636, L25
- Mink D. J., Wyatt W. F., 1995, in Shaw R. A., Payne H. E., Hayes J. J. E., eds, *ASP Conf. Ser. Vol. 77, Astronomical Data Analysis Software and Systems IV*. Astron. Soc. Pac., San Francisco, p. 496
- Moiseev A. V., Smirnova K. I., Smirnova A. A., Reshetnikov V. P., 2011, *MNRAS*, 418, 244
- Mould J. R. et al., 2000, *ApJ*, 529, 786
- Myrrha M. L. M., Vaz L. P. R., Faúndez-Abans M., de Oliveira-Abans M., Soares D. S. L., 1999, *A&A*, 351, 860
- Oliveira V. A., Copetti M. V. F., Krabbe A. C., 2008, *A&A*, 492, 463
- Osterbrock D. E., 1989, *Astrophysics of Gaseous Nebulae and Active Galactic Nuclei*. University Science Books, Mill Valley, CA
- Pérez-Montero E., Contini T., 2009, *MNRAS*, 398, 949
- Pilyugin L. S., 2001, *A&A*, 369, 594
- Pilyugin L. S., Vílchez J. M., Contini T., 2004, *A&A*, 425, 849
- Pilyugin L. S., Thuan T. X., Vílchez J. M., 2007, *MNRAS*, 376, 353
- Reshetnikov V. P., Faúndez-Abans M., de Oliveira-Abans M., 2002, *A&A*, 383, 390
- Rodrigues I., Dottori H., Brinks E., Mirabel I. F., 1999, *AJ*, 117, 2695
- Schweizer F., Whitmore B. C., Rubin V. C., 1983, *AJ*, 88, 909
- Shalyapina L. V., Moiseev A. V., Yakovleva V. A., 2002, *Astron. Lett.*, 28, 443
- Spavone M., Iodice E., Arnaboldi M., Gerhard O., Saglia R., Longo G., 2010, *ApJ*, 714, 1081
- Spavone M., Iodice E., Arnaboldi M., Longo G., Gerhard O., 2011, *A&A*, 531, A21
- Whitford A. E., 1958, *AJ*, 63, 201
- Whitmore B. C., McElroy D. B., Schweizer F., 1987a, *ApJ*, 314, 439
- Whitmore B., McElroy D., Schweizer F., 1987b, in de Zeeuw P. T., ed., *Proc. IAU Symp. 127, Structure and Dynamics of Elliptical Galaxies*. Kluwer, Dordrecht, p. 413
- Whitmore B. C., Lucas R. A., McElroy D. B., Steiman-Cameron T. Y., Sackett P. D., Olling R. P., 1990, *AJ*, 100, 1489

This paper has been typeset from a $\text{\TeX}/\text{\LaTeX}$ file prepared by the author.

Apêndice 2: The effects of interaction on the kinematics and abundance of AM 2229-735

The effects of interaction on the kinematics and abundance of AM 2229–735

P. Freitas-Lemes,^{1*} I. Rodrigues,¹ O. L. Dors, Jr,¹ M. Faúndez-Abans² and E. Pérez-Montero³

¹Universidade do Vale do Paraíba. Av. Shishima Hifumi, 2911, CEP: 12.244-000 São José dos Campos, SP, Brazil

²MCT/Laboratório Nacional de Astrofísica, Caixa Postal 21, CEP: 37.504-364 Itajubá, MG, Brazil

³Instituto de Astrofísica de Andalucía (CSIC), Camino Bajo de Huétor s/n, Aptdo. 3004, E-18080 Granada, Spain

Accepted 2014 March 14. Received 2014 March 12; in original form 2013 November 8

ABSTRACT

This observational study is about the effects of interaction on the kinematics and chemical abundance of the component galaxies of AM 2229–735. This system is formed by a disc galaxy, NED01, and a compact perturbed Sb(s)-like galaxy, NED02, the latter showing a tail and counter-tail arc-shaped feature. This system could be a progenitor of a polar ring galaxy. The sky-projected tail is very luminous and seems to connect the galaxies. Our study was based on *BVRI* broad-band imagery as well as long-slit spectroscopy in the wavelength range 4240–8700 Å. We estimated heliocentric radial velocities of $17\,518 \pm 25$ km s⁻¹ (NED01) and $17\,326 \pm 27$ km s⁻¹ (NED02). Standard diagnostic diagrams were used to classify the main ionizing source of selected emission-line regions. It turns out that all regions are mainly ionized by massive stars. Using two empirical methods, we found that the H II regions in AM 2229–735 have high metallicity: $12 + \log(\text{O}/\text{H}) = 8.3\text{--}8.6$ dex.

Key words: galaxies: individual: AM 2229–735 – galaxies: interactions – galaxies: kinematics and dynamics – galaxies: peculiar – galaxies: photometry – galaxies: spiral.

1 INTRODUCTION

The accretion scenario among interacting galaxies in the local Universe is a measurable phenomenon reported in catalogues by several authors (e.g. Vorontsov-Velyaminov 1959, 1977; Arp & Madore 1977, 1986; Whitmore et al. 1990; Moiseev et al. 2011). Interactions and mergers between galaxies at early stages of evolution of the Universe were probably among the main processes leading to the observed properties of the galaxies in the local Universe (Spinrad et al. 1998). Even at the present epoch, at least 5–10 per cent of galaxies are members of interacting systems (Reshetnikov & Sotnikova 1997). Many other galaxies retain signs in their structure of past interactions and merging. Examples of these signs are seen on the Polar Ring Galaxies (PRGs), where large-scale rings of stars, gas and dust orbit on the polar plane of early-type galaxies.

With the aim of investigating what scenario could trigger the PRG phenomenon, we have selected interacting galaxies that might become PRGs. We used the catalogues of PRGs presented by Whitmore et al. (1990), Vorontsov-Velyaminov (1977), Arp & Madore (1977) and Arp & Madore (1986), which provide samples of peculiar galaxies and associations. From this analysis, the

AM 2229–735 galaxy was selected as a key object because of its well-defined morphological structure. AM 2229–735 is a system formed by a spiral galaxy and a compact Sb(s) galaxy connected by a very luminous bridge.

Ferreiro & Pastoriza (2004), using optical photometry, found that the very disturbed main galaxy has a typical exponential luminosity profile. Ferreiro, Pastoriza & Rickes (2008) found in the primary component a nucleus and six H II regions, whose ages are in the range 5–7 Myr. Pastoriza, Donzelli & Bonatto (1999) investigated the nuclear activity and stellar population in the galaxy pairs. These authors, using optical diagnostic diagrams (DDs), concluded that the nucleus of the main component of AM 2229–735 has a composite spectrum, with emission from an AGN and H II region. Moreover, Bournaud & Combes (2003) and Reshetnikov et al. (2006) presented *N*-body simulations to explore the formation of PRGs. The morphologies shown in some stages of their simulations, after the first perigalacticum, are quite similar to the one seen in AM 2229–735, indicating that this system could be the progenitor of a PRG.

PRGs are systems with two main structures, a central host galaxy and an outer ring composed of gas, dust and stars aligned almost perpendicular to the main plane of the host galaxy (Schweizer, Whitmore & Rubin 1983; Whitmore et al. 1990; Casertano, Sackett & Briggs 1991). Whitmore et al. (1990) presented an atlas of PRGs

*E-mail: priscila@univap.br

and pointed out that, in general, their host galaxies are S0, despite only 5 per cent of S0 galaxies present a polar ring. In PRGs, the polar ring appears to be younger than the host galaxies as indicated by H I radio observations (Richter, Sackett & Sparke 1994; van Driel et al. 2000, 2002), near-infrared photometry (Iodice et al. 2002b, c) and optical photometry (Myrrha et al. 1999; Freitas-Lemes et al. 2012a).

The following scenarios have been proposed to explain the origin of a polar ring around a pre-existing galaxy (Iodice et al. 2002a; see also Reshetnikov & Sotnikova 1997; Bekki 1998; Bournaud & Combes 2003; Combes 2006; Macciò, Moore & Stadel 2006):

(i) *the merging scenario*, proposed by Bekki (1997, 1998) and revised by Bournaud & Combes (2003), in which two orthogonal spiral galaxies had a head-on collision;

(ii) *the accretion scenario*, where gas and particles are pulled off from the donor object by the host (e.g. Schweizer et al. 1983; Reshetnikov & Sotnikova 1997; see also Bournaud & Combes 2003). The accretion scenario assumes that the interacting galaxies would not necessarily be merged, but can experience tidal interaction with formation of loops, rings, rims and gas bridges. This phenomenon of tidal interaction is seen in tidal loops in late-type spirals, such as in UGC 7388 (Faúndez-Abans et al. 2009), in the kinematically confirmed PRG with a spiral host ESO 576-G69 (Reshetnikov, Faúndez-Abans & de Oliveira-Abans 2001) and in some new PRG candidates (Reshetnikov, Faúndez-Abans & de Oliveira-Abans 2011). In the accretion scenario, the formation of a polar ring requires that the donor galaxy is on an almost polar orbit with respect to the host galaxy;

(iii) *the cold accretion* proposed by Macciò et al. (2006) for the formation of isolated PRGs: a polar ring may form through cold gas accretion along a filament into the virialized dark matter halo. In this scenario, there are no limits to the mass of the accreted material, thus a very massive polar disc may develop around either a stellar disc or a spheroid. This idea is supported by numerical simulations (Brook et al. 2008).

In an earlier paper, Freitas-Lemes et al. (2012a) presented *BVRI* broad-band imagery and long-slit spectroscopy of the PRG AM 2020–504 in order to investigate which of the scenarios above are favoured. They found that (i) (*B* – *R*) colour map shows that the ring is bluer than the host galaxy, indicating that the ring is a younger structure; (ii) presence of an oxygen gradient across the ring of this object; and (iii) AM 2020–504 follows the metallicity–luminosity relation of spiral galaxies (Spavone & Iodice 2013). These results support the accretion scenario for this object. A similar work was done by Pérez-Montero et al. (2009) for the PRG IIZw71, a blue compact dwarf galaxy. They found a uniform oxygen abundance across the polar ring, with values around 1/10 of the solar value. This object also supports the accretion scenario, because the material comes from IIZw70, another metal-poor blue compact dwarf, through an H I bridge. Although there has been a large number of PRGs catalogued, only a few of them have been studied in detail, which makes it impossible to determine statistically the prevalence of each formation scenario.

In this paper, we report a study of the proto-PRG candidate AM 2229–735 (ESO 048-IG26), based on broad-band images and long-slit spectroscopy performed at the Pico dos Dias Observatory, Brazil. This paper is organized as follows. Section 2 summarizes the observations and the data reduction. In Section 3, the results and a discussion are presented, while the conclusions are in Section 4.

Table 1. Log of broad-band observations.

Date	Reference	Exposure time (s)	Mean air mass	Seeing (arcsec)
Sep-12-2012	Filter <i>B</i>	5 × 600	1.6	1.3
Sep-12-2012	Filter <i>V</i>	5 × 420	1.6	1.2
Sep-14-2012	Filter <i>R</i>	5 × 360	1.7	1.1
Sep-14-2012	Filter <i>I</i>	5 × 120	1.6	1.2

Table 2. Log of spectroscopic observations.

AM 2229–735 Reference	Date	λ_c (Å)	PA	Exp. time (s)	Seeing (arcsec)
NED01	Aug-31-2011	6400	0	1800	1.2
NED02	Aug-31-2011	6400	30	1800	1.3

2 OBSERVATION AND DATA REDUCTION

2.1 Broad-band optical imagery

Broad-band optical imagery data were obtained with the 1.6-m telescope at the Observatório do Pico dos Dias (OPD) – Laboratório Nacional de Astrofísica, Brazil. The direct CCD camera with *BVRI* Kron–Cousins filters (Bessell 1990) and a 1024 × 1024 pixel² chip was used. This resulted in a scale of 0.284 arcsec pixel^{−1}. Five frames in each filter were taken under a mean seeing of 1.2 arcsec and mean air masses of 1.6–1.7. Table 1 is the journal of the photometric observations. The standard stars, Mark-A and PG13223-086, from the Landolt (1992) catalogue, taken at similar air masses, were used for extinction and calibration purposes throughout the night. We also used imagery data obtained with the Gemini Multi-Objects Spectrograph (GMOS-S) attached to the telescope 8-m Gemini South, Chile, as part of poor weather program GS-2006A-DD-6 (taken from the Gemini Science Archive).

Data reductions were performed in the standard manner using the IRAF¹ package. This included dark and bias subtraction, and flat-field correction (we used a mean of several dome flats taken in the appropriate filter). All frames of AM 2229–735 were aligned using four isolated foreground stars and then collapsed for each filter using the task IMCOMBINE. The photometric standard stars were calibrated to the standard *BVRI* photometric system in the usual way (see e.g. Reshetnikov 1994; Myrrha et al. 1999).

2.2 Spectral observations

The spectroscopic observations were also performed with the 1.6-m telescope at OPD equipped with a Cassegrain spectrograph and an Ikon back-illuminated 2048 × 2048 CCD. A diffraction grating of 300 lines mm^{−1} was used. We obtained a spectral coverage of 4240–8700 Å ($\lambda_{\text{central}} = 6400$ Å), and air mass for the slits of 1.5 were measured along both galaxies of the AM 2229–735 system. The log of spectroscopic observations is given in Table 2. Although differential atmospheric refraction effects can be important in slit positions out of the parallactic angle at the air masses of our spectroscopic observations, these do not affect neither our results regarding the rotation curve nor the diagnostics and derivation of abundances

¹ Image Reduction and Analysis Facility is developed and maintained by the National Optical Astronomy Observatories.

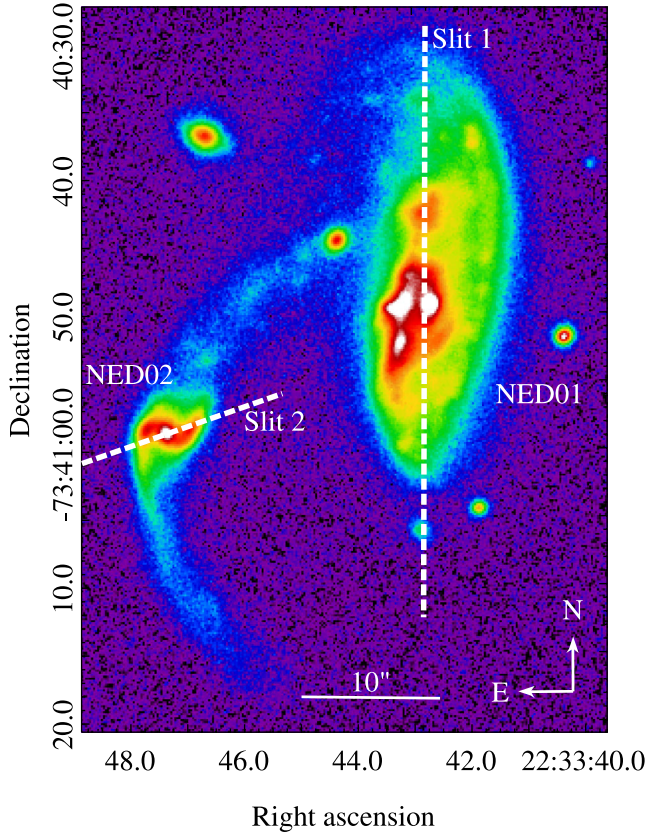


Figure 1. GMOS-S r -band image of AM 2229–735 with the observed slit positions: PA = 0° and 120° , respectively. The label NED01 (host galaxy) and NED02 (companion) are designated.

in the studied H II regions, as this analysis was performed using emission-line ratios with very close wavelength baseline.

We retrieved a 30 s Gemini Observatory acquisition image of AM 2229–735 (r-G0326 with 630 nm effective wavelength), presented in Fig. 1. The two component galaxies NED01 and NED02 are shown, and the slit positions are overlotted. The widths of the slits were both set at 1.6 arcsec. Slit-1 was positioned at position angle (PA) = 0° , close to the photometric major axis of NED01; Slit-2, centred at NED02, was placed along PA = 120° .

Data reductions were performed in the standard manner using IRAF routines to carry out bias, flat-fielding and cosmic ray subtraction. The wavelength calibration was established using a He–Ar lamp. 1D spectra were extracted each 2 arcsec from the 2D image, and sky subtracted. The 1D spectra were then flux calibrated and extinction corrected using five tertiary standard stars from Baldwin & Stone (1984), as revised by (Hamuy et al. 1992, see also Hamuy et al. 1994). A Galactic extinction correction of $E(B - V) = 0.027$ (Schlegel, Finkbeiner & Davis 1998) was applied using the standard IRAF routines. The emission-line intensities were measured using the IRAF SPLIT routine after a Gaussian line profile fitting.

These measured radial velocities were checked with the EMSAO package using the composite emission-line template ‘femtemp97’ distributed by RVSAO/IRAF external package. We adopted the redshift value from the highest correlated coefficient template. We thus derive a heliocentric velocity of $17518 \pm 25 \text{ km s}^{-1}$ (see also Section 3.3), which corresponds to a distance of 240 Mpc for AM 2229–735, assuming $H_0 = 73 \text{ km s}^{-1} \text{ Mpc}^{-1}$ (Spergel et al. 2007), resulting in a scale of 1 arcsec = 1.16 Kpc.

3 RESULTS AND DISCUSSION

3.1 Aperture photometry

We carried out circular aperture photometry at the positions labelled in Fig. 2. Table 3 presents the measured magnitudes in B , $(B - V)$, $(B - R)$, $(V - R)$ and $(V - I)$ for the labelled regions (assuming a radius of 2 arcsec $\approx 2.3 \text{ kpc}$), some of which were measured almost in the same places selected by Ferreiro et al. (2008).

The blue absolute magnitude measured in aperture 13, corresponding to the nuclear region of NED 01, is $M_B = -19.58 \pm 0.2$, which is in agreement with the value $M_B = -19.49 \pm 0.4$ derived

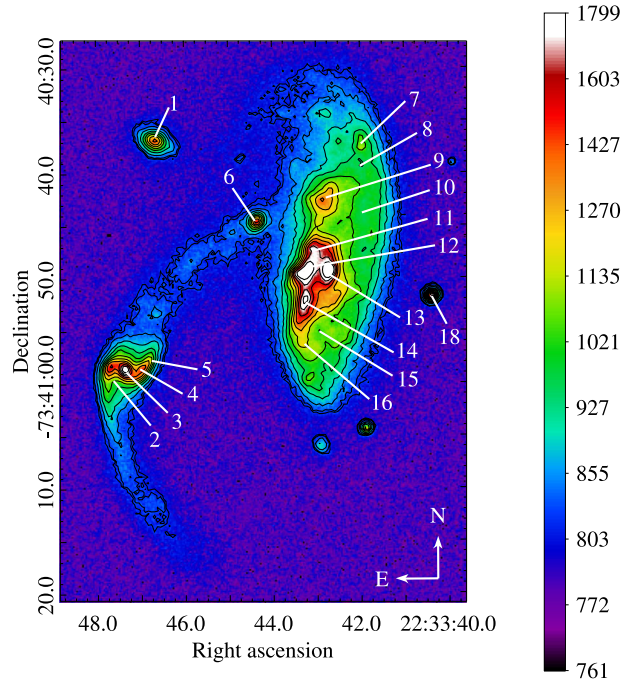


Figure 2. Positions used for aperture photometry are labelled with a GMOS-S r -band image. Measured magnitudes are presented in Table 3.

Table 3. Aperture photometry data. All measurements were done with $r = 2 \text{ arcsec}$ aperture radii. ID’s correspond to the positions marked in Fig. 2.

ID	B	$(B - V)$	$(B - R)$	$(V - R)$	$(V - I)$
1	20.64	0.69	0.85	0.16	1.20
2	19.47	0.58	0.76	0.18	1.08
3	18.15	0.53	0.72	0.19	1.09
4	18.23	0.59	0.79	0.20	1.15
5	19.49	0.60	0.8	0.20	1.10
6	19.52	0.54	0.72	0.18	1.03
7	19.49	0.71	0.83	0.12	1.15
8	19.45	0.73	0.88	0.15	1.13
9	19.07	0.78	0.86	0.08	1.32
10	19.44	0.73	0.84	0.11	1.14
11	18.98	0.74	0.8	0.06	1.26
12	18.99	0.75	0.84	0.09	1.24
13	17.32	0.64	0.86	0.22	1.17
14	18.45	0.58	0.86	0.18	1.17
15	18.46	0.63	0.85	0.13	1.18
16	18.42	0.60	0.87	0.11	1.18
17	18.43	0.60	0.85	0.05	1.19
18	22.35	0.65	0.8	0.15	1.25

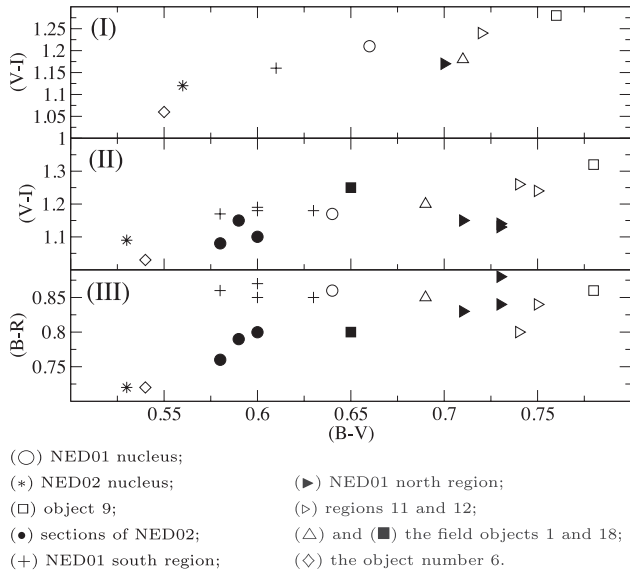


Figure 3. (I) $(V - I) \times (B - V)$ diagram, data from Ferreiro et al. (2008); (II) $(V - I) \times (B - V)$ diagram, data from this work; and (III) $(B - R) \times (B - V)$ diagram, data from this work.

by Ferreiro et al. (2008). Also for the central aperture of NED 02 (position 3) we measured $M_B = -18.75 \pm 0.2$, also agrees with their value of $M_B = -18.69 \pm 0.4$.

In Fig. 3, the colour distribution suggests that the southern region of NED01 is bluer than the northern one, with the blob object 9 being the reddest object in the colour–colour diagrams. The nucleus of NED02 is bluer than the one of NED01 (panels II and III). $(B - R)$ colour index in the central aperture of NED01 is about 0.5 mag higher than in NED02. The whole NED02 appears bluer than NED01, and the object ‘6’ in the NE line-of-sight path between both galaxies is bluer than all the regions of NED02, with colours more similar to NED01. The (△) and (■) are field objects (‘1’ and ‘18’) with characteristics of dwarf galaxies, as derived from their point spread function. In panel I, the data quoted by Ferreiro et al. (2008) are plotted with the same symbols for comparison with our own data. Although the positions of our apertures do not match up exactly with those of Pastoriza et al. (1999), our results are in agreement with these previous values.

3.2 Image enhancement

To extract as much information as possible from the images, we applied STSDAS/IRAF external package techniques of image enhancement on the $BVRI$ frames, and transform processing described in Faúndez-Abans & de Oliveira-Abans (1998). The Figs 1 and 2 show a high-pass filter applied to the R image of AM2229–735 which has better signal to noise ratio. With the filtering process, some hidden features become apparent. The north arm and disc of NED01 spread in a low-brightness bridge between NED02 and NED01. NED01 seems to be a warped SAB(s) galaxy viewed nearly edge-on (78°) in our line of sight. There is slight evidence of a bar, which appears asymmetrical. The whole object appears perturbed by the tidal interaction. NED02 seems to be a Sb(s) galaxy.

Fig. 4 is the residual image of the Gaussian filtered frame subtracted from the original GMOS r-G0326 image. This image confirms the warped general structure of NED01. It is also evident the presence of a bar extending about 3 arcsec from the nucleus, seen

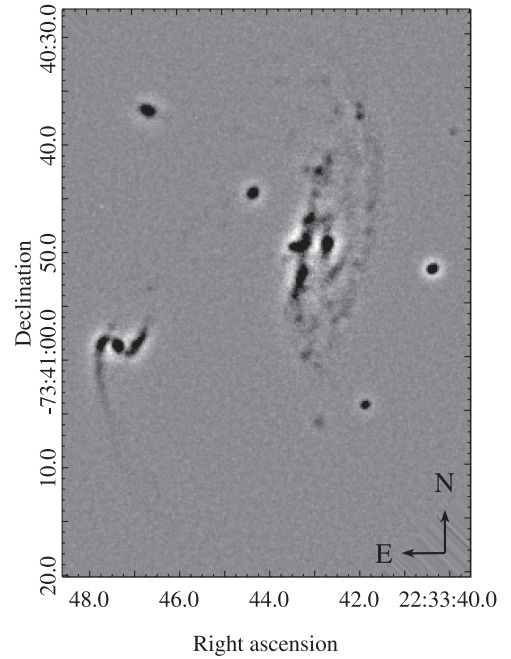


Figure 4. GMOS r-G0326 image, after a high-pass filtering.

almost in the north–south direction and more evident in the north part. Two adjacent structures are present, which suggest that there may be an inner ring of radius $r \sim 3.5$ kpc.

3.3 Kinematics

In Fig. 5, the nuclear spectra of NED01 (top panel) and NED02 (bottom panel) are shown. The following emission lines can be discerned from left to right: $H\beta$, $[O III] \lambda 4959$, $[O III] \lambda 5007$, $[N II] \lambda 6548$ blended with $H\alpha$, $[N II] \lambda 6584$ and $[S II](\lambda 6716 + \lambda 6731)$ lines. The redshift of NED01 is $z = 0.0573$, corresponding to a line-of-sight velocity of $17\,518 \pm 25$ km s^{-1} , and the redshift of NED02 is $z = 0.0583$, corresponding to a line-of-sight velocity of $17\,326 \pm 27$ km s^{-1} . Redshift values were measured using $H\alpha$ emission line.

Fig. 6 shows the rotation profile of the central part of NED01, which encompasses the nucleus and the bulge along the emission

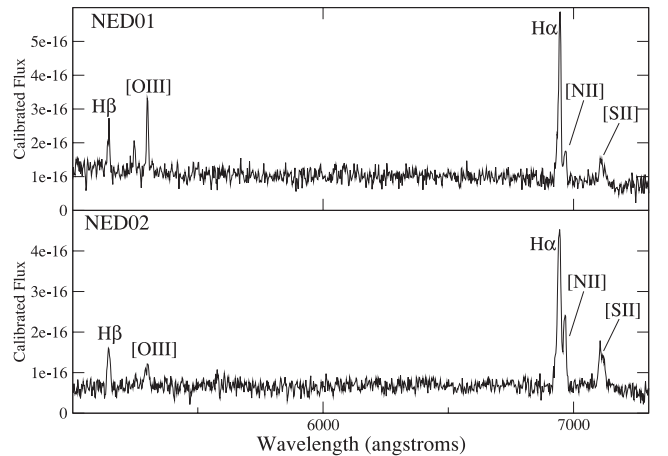


Figure 5. Optical nuclear spectra of NED01 and NED02 in units of erg $sec^{-1} cm^{-2} \text{Å}^{-1}$. Identification of main emission features are overlotted.

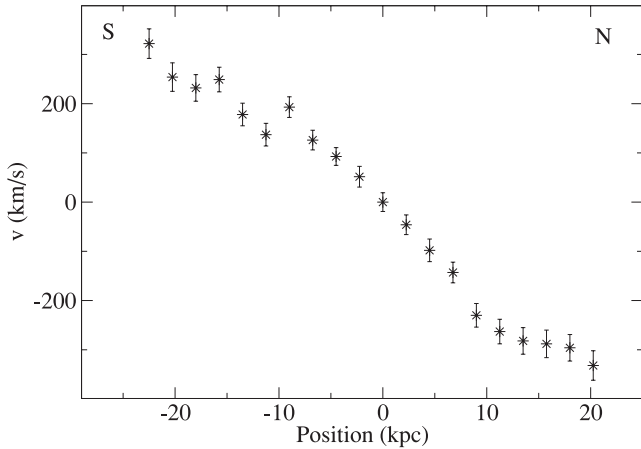


Figure 6. Rotation profile of NED01 obtained from the emission lines measured along its major axis (Slit-1).

regions. The radial velocity was estimated from the $H\alpha$ emission line observed and the errors were estimated by the deviation of the individual measurements around the mean, following the procedure considered by Krabbe et al. (2011). We realized that there are three main kinematical subsystems along the observed slit signal: (1) the symmetrical core-bulge section in the $r \leq 10$ kpc central region, encompassing the rigid rotating bar; (2) a decoupled asymmetrical structure in the southern region for $r < -10$ kpc; and (3) a smooth decoupled region out from 8 kpc in the north, whose point of inflexion coincides with the ‘blob’ (denoted as 9 in Fig. 2), suggesting an association of kinematics with structural components. The southern section of the rotation profile is receding from us, and the northern one is approaching.

NED02 shows a U-shaped radial velocity profile (see Fig. 7). U-shaped profiles are common in strongly interacting galaxies, as reported in studies of interacting binary-disturbed galaxies (e.g. Borne & Hoessel 1985, 1988; Borne 1990; Bender, Paquet & Nieto 1991; Madejsky 1991; Madejsky, Bender & Moellenhoff 1991). The physical interpretation given by Borne et al. (1994) is that there is a tidal coupling between the orbit of the companion and the resonant stellar orbits in the kinematically disturbed galaxy (Borne & Hoessel 1985; Borne 1988; Balcells, Borne & Hoessel 1989). U-shaped profiles has also been found by Faúndez-Abans et al. (2012) in interacting galaxies at the core of the Abell S0546 cluster,

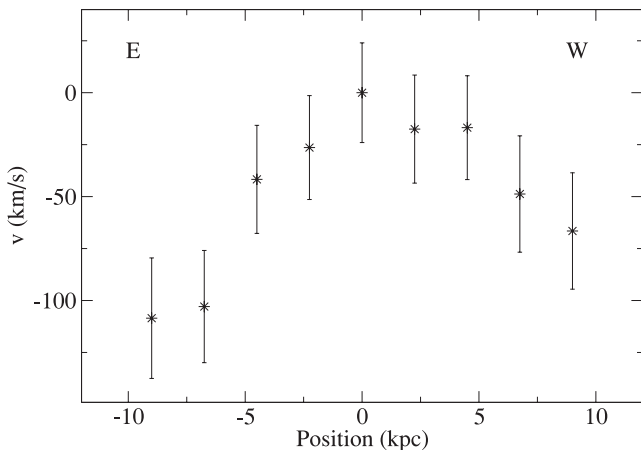


Figure 7. The U-shaped velocity profile of NED02 obtained from the emission lines measured along the Slit-2.

as a direct observational signature of tidal friction in action. The coupling of NED02 with NED01, and the U-shaped rotation profile of NED02 is thus a direct observational signature of tidal friction in this system.

The disturbed kinematics of NED02, and the morphology of the pair suggest that AM 2229–735 may be a case of proto-PRG. N -body simulations presented by Bournaud & Combes (2003) and Reshetnikov et al. (2006) to explore the accretion scenario shows in some stages, after the first perigalacticum, a morphology quite similar to the one seen in AM 2229–735. In this scenario, the polar ring forms out when a donor galaxy is in an almost polar orbit with respect to the accreting host galaxy. After the first perigalacticum, the donor stretches out due to the tidal forces, in a way very similar to that seen in NED02. The tidal tail is then pulled out by the potential well of the host galaxy, wrapping around it to become a ring.

3.4 Metal content and ionization stage of the gas phase

Determination of the metallicity of the gas phase of star-forming regions, traced by oxygen abundance, through strong line ratios has been widely discussed in the literature. Accurate oxygen abundance can only be derived by measuring emission-line ratios sensitive to electron temperature. Unfortunately, these emission lines are weak or non-observable in objects with low excitation. In these cases, calibration between abundances and more easily measured line ratios have to be used to estimate the metal abundances (e.g. Kewley & Dopita 2002; Pérez-Montero & Díaz 2005; Dors et al. 2011).

No emission-line ratio sensitive to the electron temperature was measured in our spectra of AM 2229–735; therefore, we used empirical calibrations involving strong emission lines $[O\text{ III}]\lambda 5007$, $[N\text{ II}]\lambda 6584$, $[S\text{ II}](\lambda 6717 + \lambda 6731)$ and the Balmer lines $H\beta$ and $H\alpha$ to determine the metallicity, as explained below.

We had to take into account that the $H\alpha$ flux was contaminated by the $[N\text{ II}]\lambda 6548$ line flux. We used the theoretical relation between the intensity of the emission lines $\frac{I([N\text{ II}]\lambda 6584)}{I([N\text{ II}]\lambda 6548)} = 2.95$ taken from Osterbrock (1989) and it was corrected by subtracting $F([N\text{ II}]\lambda 6548) = F([N\text{ II}]\lambda 6584)/2.95$ from the measured $H\alpha$ flux. This yielded a 16 per cent lower $H\alpha$ flux. The emission-line ratios used throughout the paper are defined in Table 4. The calibration of these strong line ratios with the oxygen abundance has been attempted by several methods, i.e. by using oxygen abundance computed from electron temperature detection (Pilyugin 2001), through photoionization models (e.g. Dors & Copetti 2005), or through mixed methods (see discussion in Kewley & Ellison 2008 and Maiolino et al. 2008). To estimate the metallicity of selected regions of AM 2229–735, we followed the same methodology used in Freitas-Lemes, Rodrigues & Faúndez-Abans (2012b). We

Table 4. The quoted emission-line ratios.

Symbol	Definition
$[O\text{ III}]/H\beta$	$[O\text{ III}]\lambda 5007/H\beta$
$[O\text{ I}]/H\alpha$	$[O\text{ I}]\lambda 6300/H\alpha$
$[N\text{ II}]/H\alpha$	$[N\text{ II}]\lambda 6584/H\alpha$
$[S\text{ II}]/H\alpha$	$([S\text{ II}]\lambda 6716 + \lambda 6731)/H\alpha$
N2S2	$\log\left(\frac{I([N\text{ II}]\lambda 6584)}{I([S\text{ II}]\lambda 6717, 6731)}\right)$
O3N2	$\log\left(\frac{I([O\text{ III}]\lambda 5007)}{I(H\beta)} \times \frac{I(H\alpha)}{I([N\text{ II}]\lambda 6584)}\right)$
N2	$\log\left(\frac{I([N\text{ II}]\lambda 6584)}{I(H\alpha)}\right)$

investigated what the main ionizing mechanisms are of the observed H II regions of the AM 2229–735 system. For that, the DDs [O III]/H β versus [N II]/H α and [S II]/H α ; and [N II]/H α versus [S II]/H α proposed by Baldwin, Phillips & Terlevich (1981), Coziol et al. (1999) and Pérez-Montero et al. (2013) were considered. Oxygen abundance and the total abundance ratio N/O for those regions ionized only by massive stars were derived using the following empirical calibrations for different emission-line ratios given by Pérez-Montero & Contini (2009):

$$12 + \log(\text{O}/\text{H}) = 8.73 - 0.32 \times \text{O3N2}, \quad (1)$$

$$12 + \log(\text{O}/\text{H}) = 0.57 \times \text{N2} + 9.07 \text{ and} \quad (2)$$

$$\log(\text{N}/\text{O}) = 1.26 \times \text{N2S2} - 0.86, \quad (3)$$

where O3N2, N2, and N2S2 are defined in Table 4.

The emission-line intensity measurements were normalized to the flux of H β = 100, and the nebular reddening coefficient $c(\text{H}\beta)$ was calculated by comparing the Balmer decrement H α /H β to the theoretical value 2.86 given by Osterbrock (1989) for an electron temperature of 10 000 K and considering the interstellar law of Whitford (1958). The observed H β flux for each aperture are presented in Table 5. The error associated with the line fluxes were estimated following the same procedure as in Oliveira, Copetti & Krabbe (2008).

First, we used the [N II]/H α versus [S II]/H α DD and the classifications proposed by Pérez-Montero et al. (2013) and Coziol et al. (1999) to separate objects ionized only by massive stars from those containing active nuclei (AGN) and/or shock excited gas. This is shown in Fig. 8. After, for the objects located into the ‘star-forming objects’ the abundances were determined by using the equations (1)–(3).

As seen in Fig. 8, the measured regions of NED01 are placed in the star-forming objects portion of the plot, considering both classification lines. However, for NED02 the classification is double.

Table 5. Reddening corrected emission-line intensities (relative to H β = 100) and global properties.

Dist. (kpc)	$\log(F[\text{H}\beta])$ ($\text{erg s}^{-1} \text{cm}^2$)	$c(\text{H}\beta)$	[O III] $\lambda 5007$	H α	[N II] $\lambda 6584$	[S II] $\lambda 6720$
AM 2229–735 NED01						
–15.75	–15.06	0.67	108 \pm 8	234 \pm 10	45 \pm 9	95 \pm 7
–13.50	–15.05	0.52	101 \pm 8	236 \pm 9	42 \pm 8	90 \pm 7
–11.25	–15.07	0.61	108 \pm 9	235 \pm 9	38 \pm 6	101 \pm 8
–9.00	–15.04	0.52	103 \pm 8	236 \pm 10	40 \pm 7	93 \pm 9
–6.75	–15.07	0.51	98 \pm 7	236 \pm 9	44 \pm 8	96 \pm 7
–4.50	–15.04	0.58	105 \pm 8	235 \pm 8	48 \pm 7	97 \pm 8
–2.25	–15.04	0.46	103 \pm 8	237 \pm 8	49 \pm 7	105 \pm 7
0.00	–15.03	0.39	103 \pm 7	237 \pm 7	52 \pm 6	96 \pm 6
2.25	–15.02	0.45	102 \pm 8	235 \pm 7	49 \pm 7	90 \pm 6
4.50	–15.05	0.53	108 \pm 7	235 \pm 8	46 \pm 7	107 \pm 7
6.75	–15.04	0.55	104 \pm 9	236 \pm 9	44 \pm 8	90 \pm 7
9.00	–15.06	0.57	109 \pm 8	235 \pm 10	35 \pm 9	103 \pm 8
11.25	–15.04	0.59	115 \pm 9	236 \pm 9	45 \pm 7	96 \pm 7
13.50	–15.05	0.51	113 \pm 9	236 \pm 11	48 \pm 8	98 \pm 7
AM 2229–735 NED02						
–4.50	–15.22	0.16	144 \pm 7	235 \pm 8	66 \pm 7	118 \pm 8
–2.25	–15.31	0.15	144 \pm 8	239 \pm 9	70 \pm 8	114 \pm 7
0.00	–15.32	0.04	123 \pm 7	239 \pm 7	69 \pm 7	123 \pm 7
2.25	–15.26	0.13	132 \pm 7	238 \pm 8	68 \pm 7	117 \pm 8
4.50	–15.30	0.15	134 \pm 8	239 \pm 9	68 \pm 8	118 \pm 8

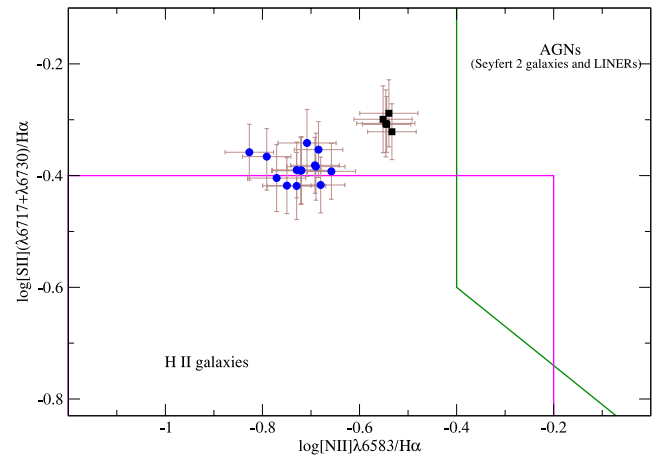


Figure 8. AM 2229–735 DD $\log[\text{N II}] \lambda 6583/\text{H}\alpha$ versus $\log[\text{S II}] (\lambda 6716 + \lambda 6730)/\text{H}\alpha$. The blue circles and black squares correspond to NED01 and NED02 regions, respectively. The green lines correspond to the separation between narrow-line AGNs and H II galaxies proposed by Pérez-Montero et al. (2013), while the magenta lines the one proposed Coziol et al. (1999).

Analysis for these objects was done by Pastoriza et al. (1999), who found the same result for NED01. They classified NED02 as having a composite spectrum, i.e. the ionizing sources being AGN and massive stars. Pastoriza et al. (1999) used the Veilleux & Osterbrock (1987) classification criteria, and used integrated spectrum of the nuclear region, leading them to a different conclusion for the ionizing mechanism of NED02. Accordingly, in Fig. 8, all measured regions of NED02 are near to the limit between star-forming region and AGN.

The line ratios in the diagrams in Fig. 9 were used to separate objects with distinct ionization sources, following the criteria of Kewley et al. (2001) and Ho et al. (1997). They showed that Seyferts and low-ionization narrow emission-line regions (LINERs) form clearly separated branches on the standard optical DD, such as the ones used in this paper. We can see all points of NED01 and NED02 occupy the star-forming objects site in these diagrams. However, NED02 regions are located near to the separation limit.

Fig. 10 shows the corresponding total abundances as derived from the calibrations cited above. The oxygen content of the NED01 and

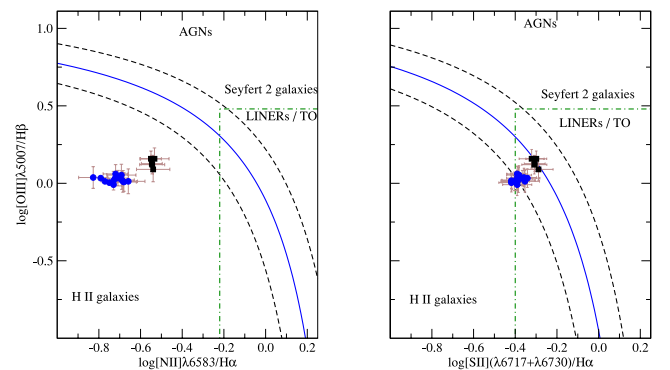


Figure 9. DD $\log[\text{O III}] \lambda 5007/\text{H}\beta$ versus $\log[\text{N II}] \lambda 6583/\text{H}\alpha$ and $\log[\text{S II}] (\lambda 6716 + \lambda 6730)/\text{H}\alpha$. The blue full lines correspond to the empirical separation between narrow-line AGNs and H II galaxies, after Kewley et al. (2001). The black dashed lines show the model uncertainty of 0.1 dex in both planes. The green dot-dashed lines, determined by Ho, Filippenko & Sargent (1997), determines an area where LINERs and transition objects. Symbols as in Fig. 8.

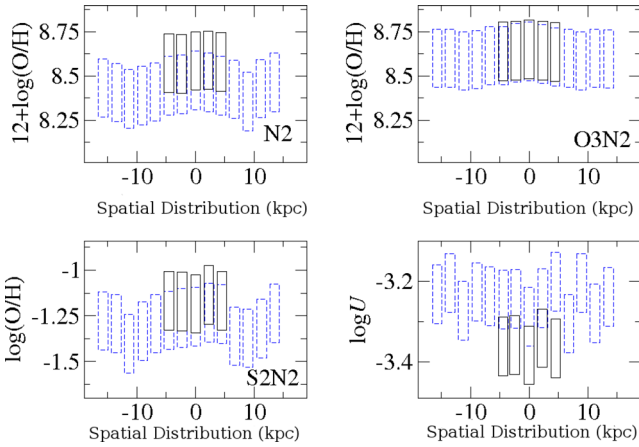


Figure 10. Spatial distribution of oxygen abundances, computed using different indicators as labelled, for NED01 (dashed lines) and NED02 (solid lines).

NED02 apertures are very similar, leading to a total oxygen abundance of $12 + \log(\text{O}/\text{H}) \approx 8.5$. About the same oxygen abundance value was derived by Brosch et al. (2007) for the PRG AM 1934–563 and for VGS31b by Spavone & Iodice (2013). The slight metallicity difference between the oxygen distribution in NED01 and NED02 by using the N2 indicator is not visible using O3N2. This difference is probably real because it is also seen in N/O, which at this metallicity depends directly on the metallicity Z, but it is still not clear because all values are consistent within the errors. In both NED01 and NED02, the empirical parameters used point towards a chemical homogeneity in the regions observed. Pérez-Montero & Contini (2009) showed that parameters involving high-excitation oxygen lines (O23; Pagel et al. 1979) and sulphur (S23; Díaz & Pérez-Montero 2000) are affected by aperture effects in knot A of the galaxy IIZw71, while N2 (Denicoló, Terlevich & Terlevich 2000), which involves low-excitation nitrogen lines, yields more homogeneous values than the parameters cited above.

Since we are dealing with photoionized regions, we could use the ionization parameter U defined as $U = Q_{\text{ion}}/4\pi R_{\text{in}}^2 n c$, where Q_{ion} is the number of hydrogen ionizing photons emitted per second by the ionizing source, R_{in} is the distance from the ionization source to the inner surface of the ionized gas cloud (in cm), n is the particle density (in cm^{-3}) and c is the speed of light.

We computed $\log U$ by means of

$$\log U = -1.66(\pm 0.06) \log([\text{S II}]/\text{H}\alpha) - 4.13(\pm 0.07), \quad (4)$$

taken from Dors et al. (2011), and compared it with the oxygen abundance via N2 for the regions of each galaxies. Fig. 11 shows the resulting plot. Regions with larger abundances have lower ionization parameter than the less metallic ones. Bresolin, Kennicutt & Garnett (1999) found that the effective temperature of the ionizing stars in star-forming regions with high metallicity are somewhat lower than the ones (see also Dors & Copetti 2003). However, this cannot be the case for our objects, since it should imply that NED02 should be redder than NED01 and the opposite is found (see Fig. 3 and Table 5).

In Fig. 12, we compared the logarithm of the ionization parameter with oxygen abundance of the regions in NED01 and NED02 with those located in a sample of H II regions in isolated galaxies, taken from the data sample compiled by Dors et al. (2013). We also plot the H II regions located along the disc of the interacting pair

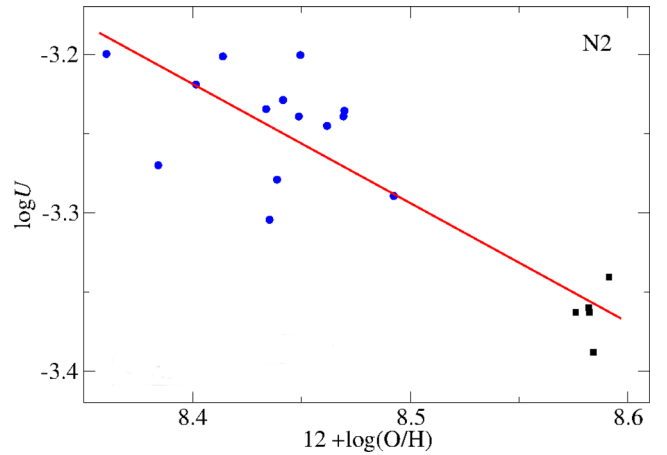


Figure 11. Logarithm of the ionization parameter versus the oxygen abundances computed from equations (4) and (2), respectively. The crosses represent H II regions located in isolated galaxies (data taken from the compilation of Dors et al. 2013). Typical errors (bars not shown) in these estimations are about 0.1 dex. Symbols as in Fig. 8.

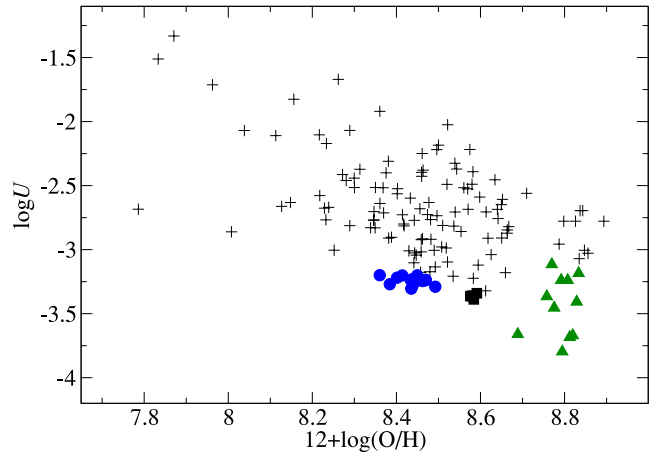


Figure 12. Same as Fig. 11, now overplotting H II regions (crosses) located in isolated galaxies, taken from Dors et al. (2013). Circles and squares are NED01 and NED02 regions, respectively. Triangles are data of the interacting pair AM 2306–721 (Krabbe et al. 2008).

AM 2306–721, taken from Krabbe et al. (2008). All U and oxygen abundance values were obtained with the same calibrations, i.e. equations (4) and (2), respectively. We can see that the regions observed in both interacting galaxies present the lowest ionization parameter values for a large range of metallicity. It should be worth investigating if this is a common behaviour among other interacting galaxies. This can be due to H II regions located in interacting galaxies, such as the ones in NED01 and NED02, which have higher electron density than the ones in isolated galaxies Krabbe et al. (2013). Unfortunately, we cannot confirm the hypothesis of a higher electron density in interacting galaxies with our data because we cannot resolve the [S II] lines.

4 CONCLUSION

We report a study based on *BVRI* broad-band imagery and long-slit spectroscopy in the wavelength range 4240–8700 Å, of the galaxy pair AM 2229–735 (ESO 048-IG26). It is formed by a disc galaxy, NED01, and a compact perturbed Sb(s)-like galaxy, NED02,

showing a tail and counter-tail arc-shaped features. The sky-projected tail is very luminous and seems to connect the galaxies.

The southern region of NED01 is bluer than the northern one, with the blob object 9 being the reddest object in the colour–colour diagrams. The nucleus of NED02 is bluer than the one of NED01 (panels II and III). The whole NED02 appears bluer than NED01, and the object ‘6’ between the galaxies is blue like the NED02 nucleus. The high-pass-filtered *R* image confirms the evidence of a bar in NED01, plus two structures which suggest that there may be an inner ring ($r \approx 1.6$ kpc).

We obtained a blue absolute magnitude of $M_B = -19.82 \pm 0.2$ for the central 5 arcsec of NED01. The $B - R$ colour index in the galaxy centre is about 0.5 higher than the one of the nucleus companion galaxy.

The line-of-sight nuclear velocities are $17\,518 \pm 25$ km s⁻¹ for NED01 and $17\,326 \pm 27$ km s⁻¹ for NED02. NED02 seems to be almost face-on in the line of sight. It presents a U-shaped radial velocity profile, a phenomenon seen in interacting binary-disturbed elliptical galaxies (Borne & Hoessel 1988; Borne et al. 1994; Combes et al. 1995), and in some Sb pairs of peculiar galaxies like RR 24 (Rampazzo et al. 2005). We could interpret this U-shaped profile as a result of an interpenetrating encounter of NED02 into the halo of NED01.

The disturbed kinematics of NED02 and the morphology of the pair suggest that AM 2229–735 may be a case of proto-PRG. *N*-body simulations presented by Bournaud & Combes (2003) and Reshetnikov et al. (2006) to explore the accretion scenario shows in some stages, after the first perigalacticum, a morphology quite similar to the one seen in AM 2229–735. In this scenario, the polar ring forms out when a donor galaxy is in an almost polar orbit with respect to the accreting host galaxy. After the first perigalacticum, the donor stretches out due to the tidal forces, in a way very similar to what seen in NED02. The tidal tail is then pulled out by the potential well of the host galaxy, wrapping around it, to become a ring. The dynamics of the interaction in AM 2229–735 will be investigated via *N*-body simulations in a forthcoming paper.

Standard DD proposed by Baldwin et al. (1981), Coziol et al. (1999) and Pérez-Montero et al. (2013), were used to classify the main ionizing source of selected emission-line regions. All measured regions are mainly ionized by massive stars and occupy the star-forming site of those diagrams. Using two empirical methods based on easily observable emission lines, we found oxygen abundances for the H II regions located at the ring in the range of $12 + \log(\text{O}/\text{H}) = 8.3\text{--}8.6$ dex. We compared the logarithm of the ionization parameter ($\log U$) with oxygen abundance of the regions in NED01 and NED02 with those located in a sample of H II regions in isolated galaxies (Dors et al. 2013), and also with the H II regions along the disc of the interacting pair AM 2306–721 (Krabbe et al. 2008). The result is that the regions observed in both interacting galaxies present the lowest ionization parameter values for a large range of metallicity. This could be due to H II regions located in interacting galaxies, such as the ones in NED01 and NED02, which probably have higher electron density than the ones in isolated galaxies. It should be worth confirming this behaviour and investigate this frequency among other interacting galaxies.

ACKNOWLEDGEMENTS

This work was partially supported by Universidade do Vale do Paraíba – UNIVAP and the Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação (MCTI), Laboratório Nacional de Astrofísica.

PF-L thanks FAPESP for the scholarship granted under process 2010/17136-4. EP-M acknowledges project AYA2010-21887-C04-01 of the Spanish National Plan for Astronomy and Astrophysics. IR acknowledges project FAPESP 2013/17427-9.

Based on observations obtained at (a) Observatório do Pico dos Dias, operated by MCTI/Laboratório Nacional de Astrofísica, Brazil and (b) the Gemini Observatory (acquired through the Gemini Science Archive), which is operated by the Association of Universities for Research in Astronomy, Inc., under a cooperative agreement with the NSF on behalf of the Gemini partnership: the National Science Foundation (USA), the National Research Council (Canada), CONICYT (Chile), the Australian Research Council (Australia), Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação (Brazil) and Ministerio de Ciencia, Tecnología e Innovación Productiva (Argentina).

REFERENCES

- Arp H., Madore B. F., 1977, *QJRAS*, 18, 234
 Arp H. C., Madore B. F., 1986, *Catalogue of Southern Peculiar galaxies and Associations*, Vol. I, Positions and Descriptions. Cambridge Univ. Press, Cambridge
 Balcells M., Borne K. D., Hoessel J. G., 1989, *ApJ*, 336, 655
 Baldwin J. A., Stone R. P. S., 1984, *MNRAS*, 206, 241
 Baldwin J. A., Phillips M. M., Terlevich R., 1981, *PASP*, 93, 5
 Bekki K., 1997, *ApJ*, 483, 608
 Bekki K., 1998, *ApJ*, 499, 635
 Bender R., Paquet A., Nieto J.-L., 1991, *A&A*, 246, 349
 Bessell M. S., 1990, *PASP*, 102, 1181
 Borne K. D., 1988, *ApJ*, 330, 61
 Borne K. D., 1990, *Dynamics and Interactions of Galaxies*. Springer-Verlag, Berlin
 Borne K. D., Hoessel J. G., 1985, *BAAS*, 17, 601
 Borne K. D., Hoessel J. G., 1988, *ApJ*, 330, 51
 Borne K. D., Balcells M., Hoessel J. G., McMaster M., 1994, *ApJ*, 435, 79
 Bournaud F., Combes F., 2003, *A&A*, 401, 817
 Bresolin F., Kennicutt R. C., Jr, Garnett D. R., 1999, *ApJ*, 510, 104
 Brook C. B., Governato F., Quinn T., Wadsley J., Brooks A. M., Willman B., Stilp A., Jonsson P., 2008, *ApJ*, 689, 678
 Brosch N. et al., 2007, *MNRAS*, 382, 1809
 Casertano S., Sackett P. D., Briggs F. H., 1991, *Astron. Q.*, 8, 263
 Combes F., 2006, in Mamon G. A., Combes F., Deffayet C., Fort B., eds, *EAS Publ. Ser. Vol. 20, Polar Ring Galaxies and Warps*. Cambridge Univ. Press, Cambridge, p. 97
 Combes F., Rampazzo R., Bonfanti P. P., Prugniel P., Sulentic J. W., 1995, *A&A*, 297, 37
 Coziol R., Reyes R. E. C., Considère S., Davoust E., Contini T., 1999, *A&A*, 345, 733
 Denicoló G., Terlevich R., Terlevich E., 2000, *New Light on the Search for very Low Metallicity Galaxies in Ionized Gaseous Nebulae*. November 21–24, Mexico City
 Díaz A. I., Pérez-Montero E., 2000, *MNRAS*, 312, 130
 Dors O. L., Jr, Copetti M. V. F., 2003, *A&A*, 404, 969
 Dors O. L., Jr, Copetti M. V. F., 2005, *A&A*, 437, 837
 Dors O. L., Jr, Krabbe A., Hägele G. F., Pérez-Montero E., 2011, *MNRAS*, 415, 3616
 Dors O. L., Jr et al., 2013, *MNRAS*, 432, 2512
 Faúndez-Abans M., de Oliveira-Abans M., 1998, *A&AS*, 129, 357
 Faúndez-Abans M., Reshetnikov V. P., de Oliveira-Abans M., Fernandes I. F., 2009, *Astron. Lett.*, 35, 25
 Faúndez-Abans M., Krabbe A. C., de Oliveira-Abans M., da Rocha-Poppe P. C., Rodrigues I., Fernandes-Martin V. A., Fernandes I. F., 2012, *A&A*, 543, A64
 Ferreira D. L., Pastoriza M. G., 2004, *A&A*, 428, 837
 Ferreira D. L., Pastoriza M. G., Ricketts M., 2008, *A&A*, 481, 645
 Freitas-Lemes P., Rodrigues I., Faúndez-Abans M., Dors O. L., Fernandes I. F., 2012a, *MNRAS*, 427, 2772

- Freitas-Lemes P., Rodrigues I., Faúndez-Abans M., 2012b, preprint (arXiv:1208.4063)
- Hamuy M., Walker A. R., Suntzeff N. B., Gigoux P., Heathcote S. R., Phillips M. M., 1992, *PASP*, 104, 533
- Hamuy M., Suntzeff N. B., Heathcote S. R., Walker A. R., Gigoux P., Phillips M. M., 1994, *PASP*, 106, 566
- Ho L. C., Filippenko A. V., Sargent W. L. W., 1997, *ApJS*, 112, 315
- Iodice E., Arnaboldi M., De Lucia G., Gallagher J. S., III, Sparke L. S., Freeman K. C., 2002a, *AJ*, 123, 195
- Iodice E., Arnaboldi M., Sparke L. S., Gallagher J. S., Freeman K. C., 2002b, *A&A*, 391, 103
- Iodice E., Arnaboldi M., Sparke L. S., Freeman K. C., 2002c, *A&A*, 391, 117
- Kewley L. J., Dopita M. A., 2002, *ApJS*, 142, 35
- Kewley L. J., Ellison S. L., 2008, *ApJ*, 681, 1183
- Kewley L. J., Dopita M. A., Sutherland R. S., Heisler C. A., Trevena J., 2001, *ApJ*, 556, 121
- Krabbe A. C., Pastoriza M. G., Winge C., Rodrigues I., Ferreira D. L., 2008, *MNRAS*, 389, 1593
- Krabbe A. C., Pastoriza M. G., Winge C., Rodrigues I., Dors O. L., Ferreira D. L., 2011, *MNRAS*, 416, 38
- Krabbe A. C., Rosa D. A., Dors O. L., Pastoriza M. G., Winge C., Hägele G. F., Cardaci M. V., Rodrigues I., 2013, *MNRAS*, 437, 1155
- Landolt A. U., 1992, *AJ*, 104, 340
- Macciò A. V., Moore B., Stadel J., 2006, *ApJ*, 636, L25
- Madejsky R., 1991, *A&A*, 247, 348
- Madejsky R., Bender R., Moellenhoff C., 1991, *A&A*, 242, 58
- Maiolino R. et al., 2008, *A&A*, 488, 463
- Moiseev A. V., Smirnova K. I., Smirnova A. A., Reshetnikov V. P., 2011, *MNRAS*, 418, 244
- Myrrha M. L. M., Vaz L. P. R., Faúndez-Abans M., de Oliveira-Abans M., Soares D. S. L., 1999, *A&A*, 351, 860
- Oliveira V. A., Copetti M. V. F., Krabbe A. C., 2008, *A&A*, 492, 463
- Osterbrock D. E., 1989, *Astrophysics of Gaseous Nebulae and Active Galactic Nuclei*. University Science Books, Mill Valley, CA
- Pagel B. E. J., Edmunds M. G., Blackwell D. E., Chun M. S., Smith G., 1979, *MNRAS*, 189, 95
- Pastoriza M. G., Donzelli C. J., Bonatto C., 1999, *A&A*, 347, 55
- Pérez-Montero E., Contini T., 2009, *MNRAS*, 398, 949
- Pérez-Montero E., Díaz A. I., 2005, *MNRAS*, 361, 1063
- Pérez-Montero E., García-Benito R., Díaz A. I., Pérez E., Kehrig C., 2009, *A&A*, 497, 53
- Pérez-Montero E. et al., 2013, *A&A*, 549, A25
- Pilyugin L. S., 2001, *A&A*, 369, 594
- Rampazzo R., Plana H., Amram P., Bagarotto S., Boulesteix J., Rosado M., 2005, *MNRAS*, 356, 1177
- Reshetnikov V. P., 1994, *Ap&SS*, 211, 155
- Reshetnikov V., Sotnikova N., 1997, *A&A*, 325, 933
- Reshetnikov V. P., Faúndez-Abans M., de Oliveira-Abans M., 2001, *MNRAS*, 322, 689
- Reshetnikov V., Bournaud F., Combes F., Faúndez-Abans M., de Oliveira-Abans M., 2006, *A&A*, 446, 447
- Reshetnikov V. P., Faúndez-Abans M., de Oliveira-Abans M., 2011, *Astron. Lett.*, 37, 171
- Richter O.-G., Sackett P. D., Sparke L. S., 1994, *AJ*, 107, 99
- Schlegel D. J., Finkbeiner D. P., Davis M., 1998, *ApJ*, 500, 525
- Schweizer F., Whitmore B. C., Rubin V. C., 1983, *AJ*, 88, 909
- Spavone M., Iodice E., 2013, *MNRAS*, 434, 3310
- Spergel D. N. et al., 2007, *ApJS*, 170, 377
- Spinrad H., Stern D., Bunker A., Dey A., Lanzetta K., Yahil A., Pascarella S., Fernández-Soto A., 1998, *AJ*, 116, 2617
- van Driel W., Arnaboldi M., Combes F., Sparke L. S., 2000, *A&AS*, 141, 385
- van Driel W., Combes F., Arnaboldi M., Sparke L. S., 2002, *A&A*, 386, 140
- Veilleux S., Osterbrock D. E., 1987, *ApJS*, 63, 295
- Vorontsov-Velyaminov B. A., 1959, *Atlas and Catalog of Interacting Galaxies, Part 1*. Sternberg Institute, Moscow State University
- Vorontsov-Velyaminov B. A., 1977, *A&AS*, 28, 1
- Whitford A. E., 1958, *AJ*, 63, 201
- Whitmore B. C., Lucas R. A., McElroy D. B., Steiman-Cameron T. Y., Sackett P. D., Olling R. P., 1990, *AJ*, 100, 1489

This paper has been typeset from a $\text{\TeX}/\text{\LaTeX}$ file prepared by the author.