





## Estudo da Atividade Nuclear e População Estelar na Galáxia Peculiar AM 0004–413 (ESO 293–IG 037)

*Study of Nuclear Activity and Stellar Population in the Peculiar Galaxy  
AM 0004–413 (ESO 293–IG 037)*

José Henrique Costa Pinto Souza,\* Paulo César da Rocha Poppe , Vera Aparecida Fernandes Martin , Elis Cristina Silva Sales, Toni Cordeiro de Almeida, Matheus do Carmo Carvalho, Raquel Silva Freitas, Bianca Ramielly Bomfim de Jesus , e Mariana da Silva Lima Santos  
*Departamento de Física/Observatório Astronômico Antares – UEFs  
Av. Transnordestina, s/n, Novo Horizonte, Feira de Santana – BA – 44031-460*

Maximiliano Faúndez-Abans e Mariângela de Oliveira-Abans   
*Laboratório Nacional de Astrofísica – MCTI  
R. Estados Unidos, 154, Bairro das Nações, Itajubá – MG – 37504-364*

Priscila Freitas-Lemes  
*IPD – Universidade do Vale do Paraíba  
Av. Shishima Hifumi, 2911, Urbanova,  
São José dos Campos – SP – 12244-390*

(SUBMETIDO: [24/07/2021] – ACEITO: [20/10/2021] – PUBLICADO: [24/11/2021])

Este trabalho espectroscópico investiga a atividade nuclear e a população estelar presente na galáxia peculiar AM 0004–413 (ESO 293–IG 037). Empregamos o código de síntese espectral STARLIGHT para subtrair a população estelar subjacente e recuperar os fluxos das linhas de emissão no intervalo óptico investigado (4500–7200 Å). De acordo com os critérios de classificação baseados em razões de linhas, os valores determinados neste estudo sugerem um núcleo do tipo LINER (Low-Ionization Nuclear Emission-line Region). A população estelar revelada pela síntese espectral é composta por estrelas jovens (29,61%) e de idades intermediárias (70,39%). Os resultados apresentados são inéditos na literatura.

**Palavras-chaves:** Espectroscopia; Galáxia Peculiar; Síntese Espectral; Diagramas de Diagnóstico.

This spectroscopic work investigates the nuclear activity and the stellar population present in the peculiar galaxy AM 0004–413 (ESO 293–IG 037). We used the STARLIGHT spectral synthesis code to subtract the underlying stellar population and recover the fluxes of the emission lines in the investigated optical range (4500–7200 Å). According to the classification criteria based on line ratios, the values determined in this study suggest a galaxy with a LINER nucleus (Low-Ionization Nuclear Emission-line Region). The stellar population revealed by the spectral synthesis is composed of young stars (29.61%) and intermediate ages (70.39%). The results are previously unpublished in the literature.

**Keywords:** Spectroscopy; Peculiar Galaxy; Spectral Synthesis; Diagnostic Diagrams.

### I. INTRODUÇÃO: do Diagrama de Hubble às Galáxias Peculiares

O pioneiro e precioso estudo observacional conduzido pelo astrônomo norte-americano Edwin Powell Hubble (1889-1953) sobre as

chamadas ‘nebulosas’ [1], objetos extensos e difusos conhecidos desde o século XVIII, permitiu responder questões fundamentais sobre a existência (ou não) de outras galáxias, no Universo e abrir uma janela de estudo em diferentes comprimentos de ondas do espectro eletromagnético.

Hubble iniciou as investigações em 1919 no

\* Endereço Eletrônico: zehcpsouza@gmail.com

Observatório do Monte Wilson, no Condado de Los Angeles, Califórnia, Estados Unidos, um ano após o armistício que pôs fim à Primeira Guerra Mundial, empregando um telescópio óptico de 2,5 metros de abertura e muitas placas fotográficas. Como resultado, Hubble descobriu que algumas das ‘nebulosas’ observadas eram objetos externos à Via Láctea e que nem todas eram semelhantes, apresentando diferentes características morfológicas.

Para sistematizar as diferenças encontradas nos objetos observados, Hubble apresentou em 1936, baseado em um esquema anteriormente proposto e publicado em 1920 [2] pelo astrônomo britânico, John Henry Reynolds (1874-1949), um esquema de classificação

através de uma sequência bastante simples que dividia as ‘nebulosas’ (agora galáxias) observadas em elípticas, espirais normais e barradas (ver Figura 1). Nesse esquema, conhecido na literatura como “*tuning fork diagram*”, os objetos com uma estrutura morfológica perturbada e sem nenhum padrão, ausentes de qualquer simetria circular ou rotacional observada nas classes anteriores, foram agrupados em uma quarta classe denominada de “irregulares”. Surgia, portanto, um resultado pilar na Astronomia [3], “*The Realm of the Nebulae*”, traduzida em uma contribuição científica que atravessaria (e ainda atravessa) gerações de pesquisadores que se dedicam ao estudo de galáxias.

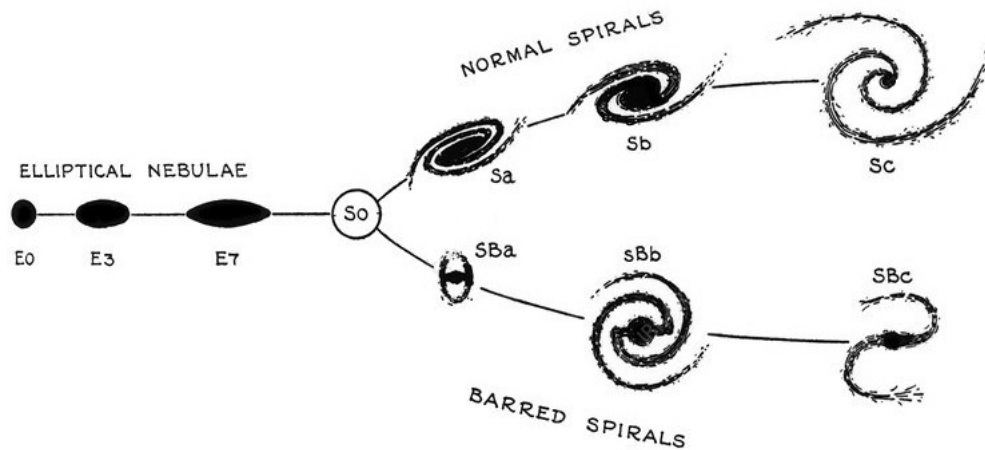


FIGURA 1. Esquema original de classificação proposta por Hubble em 1936. Fonte: E.P. Hubble, *The Realm of the Nebulae*. New Haven: Yale University (1936) [3].

As galáxias irregulares, também apresentam núcleos descentralizados e podem ser subdivididas em Irr I (ricas em estrelas jovens, gás e regiões [H II]) e Irr II (sem estrelas resolvidas e regiões [H II] visíveis; mostram, geralmente, faixas proeminentes de poeira).

Hubble ainda introduziria (de forma hipotética) um novo tipo de galáxia regular, denominada de “lenticular”, S0, e posicionaria as mesmas entre as elípticas e as espirais, algo como um estágio transacional entre estas últimas classes. Estes objetos são mais

“achatados” que as galáxias elípticas E7 e não apresentam braços de estrutura espiral ou barras. Apresentam ainda uma condensação central e um envelope ao redor do núcleo, com ausência de estrelas jovens do tipo O e B, gás e poeira. No entanto, em alguns casos, é possível notar a presença de poeira interestelar formando um anel em torno do núcleo.

Em uma primeira aproximação, a classificação de Hubble permitia concluir que, se um determinado objeto cuja morfologia observada fosse compatível com aquelas ilustradas no es-

quema definido na Figura 1, então, o mesmo era considerado como uma galáxia do tipo “normal”. No entanto, se este critério não fosse atendido, o objeto em questão era então classificado como um objeto “anormal”, “anômalo” ou “atípico”. Mas, será que este aspecto é suficiente para diferenciar estes tipos de galáxias? A resposta é não. Precisamos de mais elementos do que apenas a condição exposta acima.

Uma galáxia normal pode ser definida como aquela que apresenta um determinado número de propriedades que se revelam, estatisticamente, presentes na maior parte de seus similares, considerando uma certa margem de variação. Como exemplo, a galáxia deste estudo, AM 0004–413 (ESO 293–IG 037), Figura 2, apresenta uma simetria esférica e, como tal, poderia ser classificada como uma galáxia normal do tipo Elíptica. Entretanto, a morfologia final observada (conhecida) é o resultado de uma perturbação gravitacional entre o par de galáxias AM 0004–413 NED01 e AM 004–413 NED02, e a presença de caudas, laços de matéria e detritos, características estas apresentadas em um pequena parcela de objetos, não permitem colocá-la no grupo das galáxias normais. Portanto, este objeto será considerado como uma galáxia de outra classe, distinta, diferente, que passaremos a chamar de “peculiar”.

Peculiaridade, em galáxias, deve ser entendida como uma qualidade, condição ou característica intrínseca que se distingue por traços particulares, como anéis, caudas, detritos, discos, filamentos, jatos, laços, pontes, etc., ou seja, representam originalidade ou uma propriedade temporal associada ao natural processo evolutivo.

Estas e outras singularidades foram sendo mapeadas e estudadas pelo astrônomo norte-americano Halton Christian Arp (1927-2013), cujo primeiro resultado foi a compilação em 1966 do catálogo de galáxias peculiares para o Hemisfério Norte, intitulado *Atlas of Peculiar Galaxies* [4]. O principal objetivo era fornecer imagens que dessem pistas para o estudo evolutivo das galáxias e mostrassem que o Universo é mais intrigante do que então imaginado. Em 1987, a versão para o Hemisfério Sul foi

compilada e publicada [5], contendo mais de 6 mil galáxias perturbadas por processos gravitacionais do tipo fusão, colisão ou maré.

Os objetos reunidos neste último catálogo são organizados em 25 Categorias distintas [6] e, nesta contribuição, estaremos investigando a galáxia peculiar AM 0004–413 (ESO 293–IG 037) ilustrada na Figura 2, parte integrante da Categoria 15: Galáxias com Caldas, Laços de Material ou Detritos. Trata-se de um objeto pouco estudado na literatura, sem informações sobre o tipo particular de atividade nuclear e da população estelar, aspectos investigados neste trabalho.

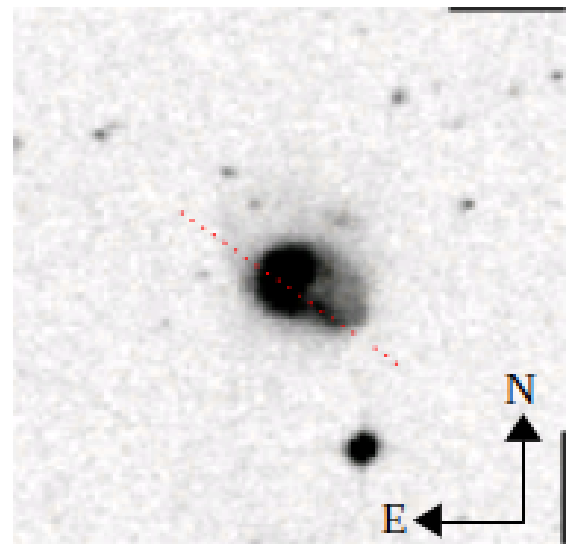


FIGURA 2. Galáxia peculiar AM 0004–413 (ESO 293–IG 037), formada pelo par AM 0004 – 413 NED01 e AM 0004–413 NED02. A linha vermelha tracejada representa a posição aproximada da fenda usada de 3 segundos de arco. A direção Norte está para cima e a Leste para a esquerda. Crédito: <https://ned.ipac.caltech.edu>.

Este estudo foi desenvolvido no âmbito da Iniciação Científica (PIBIC/CNPq-UEFS) e está pautado na análise dos espectros ópticos obtidos no Observatório do Pico dos Dias/Laboratório Nacional de Astrofísica (LNA/MCTI), dentro do projeto de longo prazo OP2012A–009 que envolve a colaboração científica entre as seguintes instituições: DFIS/UEFS, LNA/MCTI e IPD/UNIVAP.

## II. AQUISIÇÃO E REDUÇÃO DOS DADOS

A aquisição dos dados na banda do visível foi realizada no Observatório do Pico dos Dias/Laboratório Nacional de Astrofísica (OPD/LNA-MCTI), os instrumentos usados na aquisição do espectro e das imagens de calibração estão discriminados na Tabela I.

TABELA I. Instrumentação usada na aquisição dos espectros no Observatório Pico dos Dias [7]

Instrumentos
Telescópio: 1,6m (f/10, Perkin-Elmer)
Espectrógrafo: Cassegrain (Boller & Chivens)
Detector: CCD iKon-L936-BRDD SN:13739
Calibração: Lâmpada HeAr

O primeiro passo consiste em verificar se todas as informações necessárias estão presentes no “header” (cabeçalho) das imagens, como o nome do observatório, o tempo de exposição, a data de observação, a coordenada do objeto, o tempo sideral da observação, etc. Essas informações podem ser encontradas na Tabela II. Uma vez verificadas e corrigidas (caso necessário), o passo seguinte consiste na correção do perfil instrumental, ou seja, em um processamento que objetiva eliminar defeitos e contagens espúrias introduzidas nas imagens (espectros) pela óptica do telescópio, além dos defeitos térmicos ou possíveis erros ocasionados pelo sistema de detecção. As várias medidas de calibração, como “bias” e “flat-field”, da ordem de 30 imagens, representam os dados que devem ser empregados para corrigir tais problemas.

Todos os espectros empregados neste trabalho foram reduzidos usando os pacotes e as tarefas presentes no software IRAF (*Image Reduction and Analysis Facility*) [8]. As reduções envolvem um número de procedimentos que permitem a calibração dos espectros em comprimento de onda (Å) usando lâmpadas específicas de HeAr, com a posterior calibração em fluxo ( $\text{erg.cm}^{-2}.\text{s}^{-1}.\text{Å}^{-1}$ ) dos espectros extraídos a partir de um perfil bidimensional com a tarefa APALL, empregando com este

propósito um conjunto de estrelas observadas na mesma noite denominadas de padrões espectrofotométricas [9]. As estrelas usadas para as calibrações em fluxo (LTT 1020, 1788, 7987, 9239, e 9491) podem ser encontradas para consulta no ESO (*European Southern Observatory*) [10]. A Figura 3 ilustra todas as aberturas que foram realizadas no perfil bidimensional da galáxia peculiar deste estudo. Um abertura padrão de 1,5 segundos de arco ao longo do perfil espacial, incluindo o núcleo e as regiões mais externas, foi usada para cada janela de extração mostrada na Figura 3. A assimetria observada deve ser entendida como o resultado da interação gravitacional (fusão) entre o par AM 0004–413 NED01 e AM 0004–413 NED02.

TABELA II. Alguns Parâmetros e Dados Observacionais

Parâmetro	Valor
Área útil	2041 × 486 pixels
Área de corte	[70 : 555] [8 : 2048]
Tempo de exposição	2100 s
Ganho do CCD	1,0 $e^-$ ADU
Ruído de Leitura do CCD	6,0 $e^-$
Largura da Rede	3,0''
Temperatura do CCD	-79,9° C
Data de observação	08/09/2013
Ascensão reta	00° 07' 06''
Declinação	-41° 21' 20''
Massa de ar	1,067

Ao leitor interessado no processo de redução espectroscópica envolvendo as tarefas e os pacotes, indicamos o artigo publicado em [11]. Outras informações podem ser obtidas na página de documentação do IRAF [12].

## III. RESULTADOS DO ESPECTRO CALIBRADO EM FLUXO E COMPRIMENTO DE ONDA

A espectroscopia, quando aplicada aos objetos astronômicos, representa uma poderosa ferramenta que permite calcular muitas propriedades físicas (velocidade de recessão,

massa, etc.) e químicas (abundância, metalicidade do gás, etc.).

As diversas aberturas (janelas de extração) ilustradas na Figura 3 (conhecida por perfil espacial), quando processadas com as diversas tarefas no ambiente IRAF, fornecem representações que denominamos de espectros bi-dimensionais (veja a Figura 4), onde as intensidades ( $\text{erg.cm}^{-2}.\text{s}^{-1}.\text{\AA}^{-1}$ ) presentes no sistema físico estudado, quando discriminadas uma das outras em função de suas respectivas frequências (ou comprimentos de onda,  $\text{\AA}$ ), possibilitam investigar com bastante propriedade as mais variadas propriedades astrofísicas dos objetos.

O espectro presente na Figura 4 possui algumas características que podem ser explicadas quando estudamos em Física Moderna os conteúdos sobre a “Radiação Eletromagnética e a Matéria”, em particular, as três leis empíricas de Kirchoff (Gustav Robert Kirchoff, 1824-1887) da espectroscopia. A primeira nos revela que um sólido luminoso ou líquido deve emitir luz de todos os comprimentos de onda, pro-

duzindo um ‘espectro contínuo’. A segunda, por sua vez, afirma que um gás luminoso rarefeito emite luz cujo espectro revela linhas brilhantes (‘linhas de emissão’) e, algumas vezes, exibe também um fraco espectro contínuo superposto. Mas, se a luz branca de uma fonte de temperatura  $T_f$  passar através de um gás de temperatura  $T_g < T_f$ , este pode, de acordo com a sua composição, absorver certos comprimentos de onda do espectro contínuo de modo que esses serão perdidos ou diminuídos em seu espectro, produzindo assim as linhas escuras (‘linhas em absorção’). Esta é a terceira lei formulada por Kirchoff e o conjunto permite compreender de forma correta a Figura 4: a intensidade de uma linha de emissão (ou absorção) é proporcional ao número de fótons emitidos (ou absorvidos) em uma particular transição atômica. O perfil das linhas sempre apresenta uma largura finita, e estas podem ser alargadas por vários processos físicos e, a partir do estudo dos mecanismos de alargamento é possível deduzir algumas características físicas importantes sobre a fonte de radiação [13].

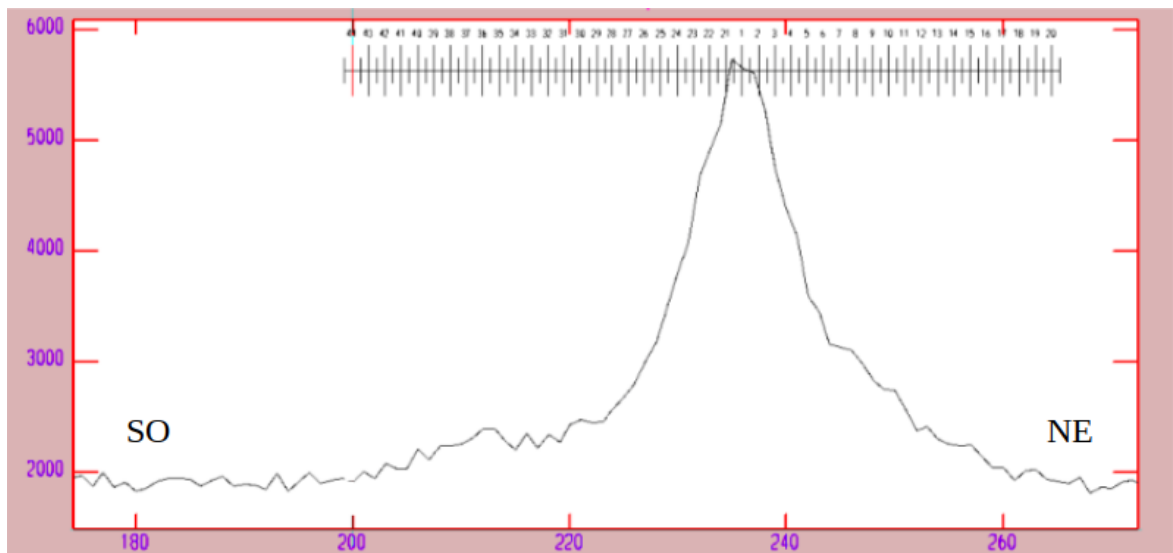


FIGURA 3. Perfil espacial. As várias aberturas (janelas de extrações de 1,5 segundos de arco) estão ilustradas na parte superior do perfil. O eixo da abscissa representa distâncias em *pixels*. O eixo da ordenada contém contagens em unidades arbitrárias.

Em adição a esta discussão, é importante ressaltar que estamos tratando de radiação emitida por muitos átomos e que quando

está é coletada e separada por uma rede de difração fornece uma banda de linhas com velocidades diferentes, onde os respectivos com-

primentos de onda são deslocados para menores (*blueshift*) ou maiores (*redshift*) valores de acordo com o efeito Doppler. No caso da luz, como no caso do som, este efeito é causado

pelo movimento relativo entre a fonte e o observador. No entanto, convém lembrar que a velocidade da luz não depende do movimento, de modo que as expressões usadas para o cálculo do desvio são diferentes nos dois casos.

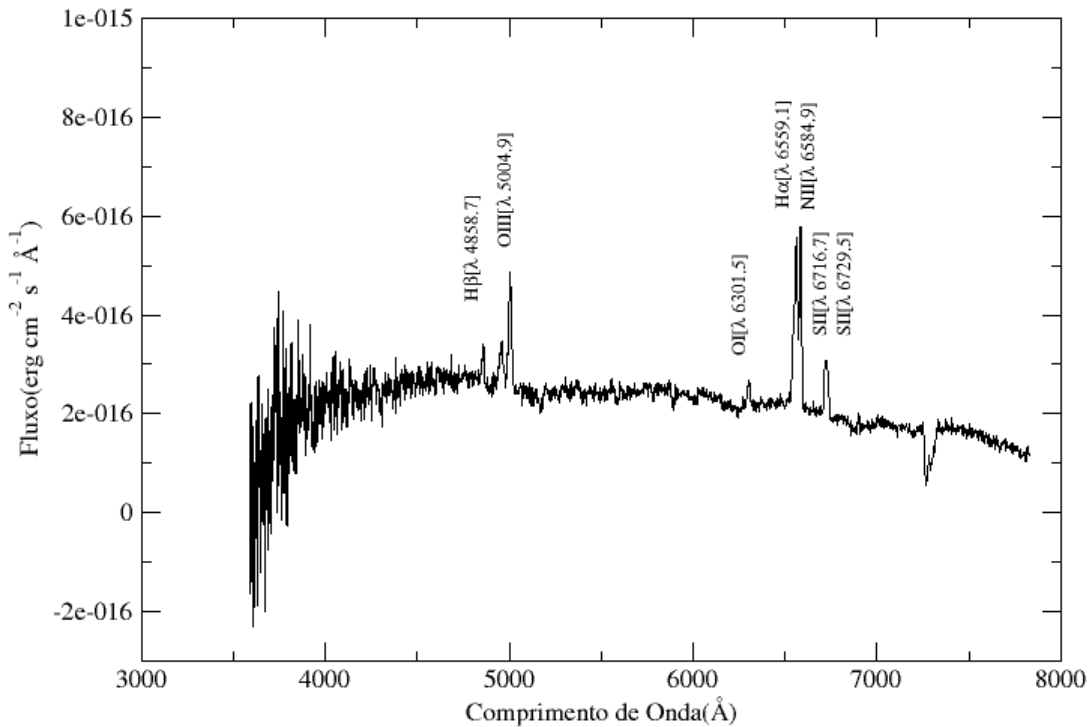


FIGURA 4. Espectro nuclear (abertura central): As principais linhas de emissão são identificadas no espectro. A dispersão observada na parte azul, em torno de 4000 Å, está relacionada com a baixa eficiência quântica do CCD empregado.

É conveniente ressaltar a grande dispersão observada na parte mais azul do espectro (pequenos comprimentos de onda) na Figura 4. Este aspecto pode ser explicado, de acordo com a Figura 5, pela baixa eficiência quântica do CCD (~ 35%) nesta região [14].

### III.1. Velocidade Radial Heliocêntrica

As velocidades de recessão das galáxias e as respectivas distâncias destas em relação ao observador, representam resultados espectroscópicos de grande importância que são diretamente extraídos dos espectros devidamente calibrados em fluxo e comprimento de onda.

O embasamento teórico é feito à luz do Efeito Doppler, descrito em 1842 pelo físico austríaco Johann Christian Doppler (1803-1853).

De acordo com o Efeito Doppler (veja, por exemplo, [13, 15]), as linhas espectrais detectadas podem ficar deslocadas, em relação àquelas no referencial do observador (laboratório), para o azul (caracterizando um *blueshift*) ou para o vermelho (caracterizando um *redshift*). Em relação a linha de visada do observador, podemos distinguir as duas componentes do movimento que, quando combinadas com a distância, permitem-nos determinar o movimento real do objeto: movimento próprio, perpendicular à linha de visada, e a velocidade radial,  $v_r$ , na mesma direção da linha de visada.

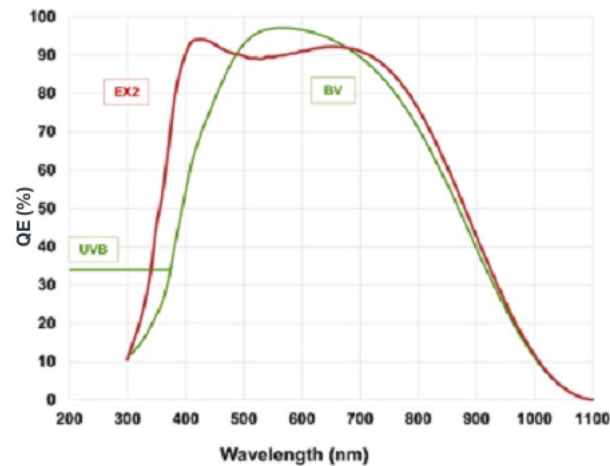


FIGURA 5. Eficiência quântica do detector CCD iKon-L936-BR-DD SN: 13739. Fonte: OPD/LNA-MCTI.

A determinação da velocidade heliocêntrica radial do objeto (galáxia, neste estudo) representa a velocidade com que a mesma se aproxima ou se afasta do observador, e é obtida através do deslocamento Doppler das linhas espectrais observadas, ou seja:

$$\Delta\lambda = \lambda - \lambda_0, \quad (1)$$

onde  $\lambda$  representa o comprimento de onda observado de uma específica linha e  $\lambda_0$  o comprimento de onda da mesma no referencial do laboratório (observador).

A expressão mais geral, envolvendo as velocidades, pode ser escrita na forma:

$$\frac{\Delta\lambda}{\lambda} = \frac{v}{c} \cos\theta \left( \frac{1}{1 - (v^2/c^2)} \right), \quad (2)$$

onde  $\theta$  representa o ângulo entre o vetor velocidade e a linha de visada do observador. Como as galáxias peculiares que fazem parte do Catálogo Arp & Madore estão situadas no Universo local,  $z < 0,1$ , a velocidade ( $v$ ) na equação acima é muito menor que a velocidade da luz ( $c$ ), de modo que podemos passar para o domínio não-relativístico sem maiores problemas. Adicionando ainda nesta análise a componente da velocidade na direção do observador,  $v_r$ , podemos reescrever, então, a Eq.(2),

$$\frac{\Delta\lambda}{\lambda} = \frac{v_r}{c}. \quad (3)$$

A velocidade com que uma galáxia está se afastando da Terra, a velocidade de recessão, pode ser determinada a partir do pacote externo ao IRAF, RVSAO [16, 17], desenvolvido pelo *Smithsonian Astrophysical Observatory Telescope Data Center*, que emprega o método de relação cruzada nas linhas espectrais observadas para calcular as velocidades radiais aparentes. Existem duas tarefas principais no pacote RVSAO: XCSAO e EMSAO.

O XCSAO faz a relação cruzada via a transformada de Fourier do espectro de um objeto com as transformadas de um conjunto de espectros modelados com deslocamentos espectrais conhecidos, obtendo assim as velocidades e os respectivos erros. O EMSAO já atua de forma diferente: a tarefa encontra linhas de emissão em um espectro e calcula os comprimentos de onda centrais observados, obtendo desvios e erros individuais para cada linha, fornecendo como resultado uma única velocidade correlacionada de todas as linhas detectadas.

A partir do espectro nuclear mostrado na Figura 4, empregamos a tarefa EMSAO e obtemos o valor de  $13,793 \pm 36$  km/s para a velocidade de recessão da galáxia.

A velocidade de recessão de uma galáxia está relacionada com a distância por meio da lei de Hubble,

$$v = Hd, \quad (4)$$

sendo  $H$  a constante de Hubble e neste trabalho adotamos  $67,8$  (km/s)/Mpc [18]. Em termos da Eq.(3), podemos escrever,

$$\frac{v_r}{c} = \frac{(z+1)^2 - 1}{(z+1)^2 + 1}, \quad (5)$$

de modo que,

$$z = \frac{\Delta\lambda}{\lambda} = \frac{v_r}{c} = 0,04600 \pm 0,00012. \quad (6)$$

O valor de referência na literatura obtido no projeto 6dF ou 6 dFGS (6dF *Galaxy Survey*), medida realizada pelo Observatório Anglo-Australiano é  $z = 0,04642 \pm 0,00015$  [19], com uma distância estimada de 203 Mpc.

### III.2. Massa e Curva de Rotação

O tipo morfológico da galáxia sob estudo, baseado no diagrama de Hubble, é uma espiral de acordo com a literatura: S0, NED/NASA-IPAC [20] Sc, HyperLeda [21]. Nesse caso, diferente das elípticas, as massas das espirais são determinadas a partir de suas curvas de rotação,  $v(R)$ , as quais fornecem as variações da velocidade rotacional com o raio galáctico.

As diversas aberturas presentes na Figura 3 contêm os espectros que irão fornecer as velocidades necessárias para a construção da curva de rotação da galáxia. As janelas de extração assim formadas podem ser entendidas como um deslocamento realizado na fenda do espectrógrafo ao longo da galáxia, neste caso, direção SO-NE, medindo, dessa forma, o deslocamento Doppler de seu material. A Figura 6 ilustra o resultado final. Espectros com sinal-ruído maior que 8 foram usados nesta análise.

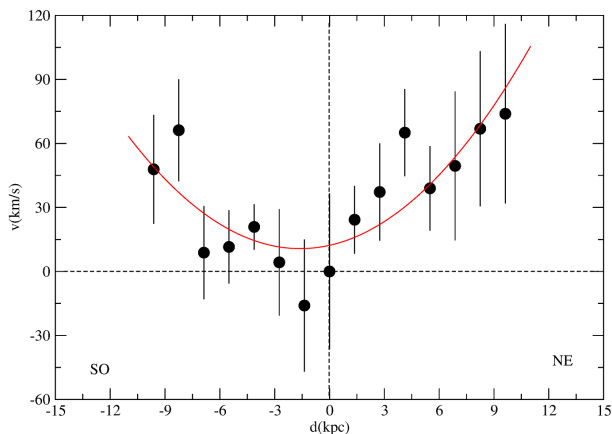


FIGURA 6. Curva de rotação observada com a forma do tipo “U”, sugerindo a ocorrência de um processo de interação gravitacional na galáxia. De fato, AM 0004–413 é formada pelo par interagente NED01 e NED02.

A curva de rotação obtida revela um formato U, interpretada na literatura como um indicador de interação gravitacional [22–26], visto em galáxias elípticas perturbadas binárias em interação [23, 27, 28], e em alguns pares Sb de galáxias peculiares como RR 24 [29].

Este é um resultado esperado, pois a galáxia de estudo é formada pelo par interagente AM

0004–413 (NED01 e NED02). Ainda, o perfil espacial observado na Figura 3 (modificado na Figura 7) revela assimetrias (regiões A e B destacadas) que reforçam o resultado obtido na curva de rotação.

No que concerne à massa, assumindo a galáxia do tipo espiral, a curva de rotação,  $v(R)$ , ou seja, a variação da velocidade rotacional com o raio permite que façamos uma estimativa direta desta, diferentemente das elípticas que é feita através da dispersão de velocidade estelar dada pelo alargamento das linhas espectrais. O método, nesse caso, é o “Teorema do Virial” via solução das equações de movimento da Mecânica Clássica [13, 30].

Para a galáxia AM 0004–413, assumindo que a maior parte da massa encontra-se concentrada no bojo esférico, a massa  $M(R)$ , pode ser estimada pela 3ª lei de Kepler,

$$M(R) = Rv^2/G, \quad (7)$$

onde  $G = 6,67408 \times 10^{-11} \text{ m}^3.\text{kg}^{-1}.\text{s}^{-2}$ . O valor estimado foi de  $\sim 1,5 \times 10^{10} M_{\odot}$ , portanto, no intervalo esperado para galáxias espirais: entre  $10^9 M_{\odot}$  e  $10^{11} M_{\odot}$ .

É importante salientar que a maior fração da massa total das galáxias encontra-se na forma invisível ou desconhecida, principalmente nas regiões mais externas. Este aspecto é conhecido na literatura como o “problema da massa faltante” [31], e representa uma das questões centrais ainda não resolvida na Astronomia Extragaláctica.

### IV. SÍNTESE ESPECTRAL

Uma galáxia pode ser definida, de forma simplificada, como um complexo sistema gravitacional constituído de estrelas e remanescentes, um meio interestelar de gás e poeira, partículas energéticas e também um importante componente denominado de matéria escura. A maior parte da luz observada de uma galáxia está associada às populações estelares de diferentes idades e metalicidades, embora uma determinada parcela constituinte não emite luz no comprimento de onda do visível.



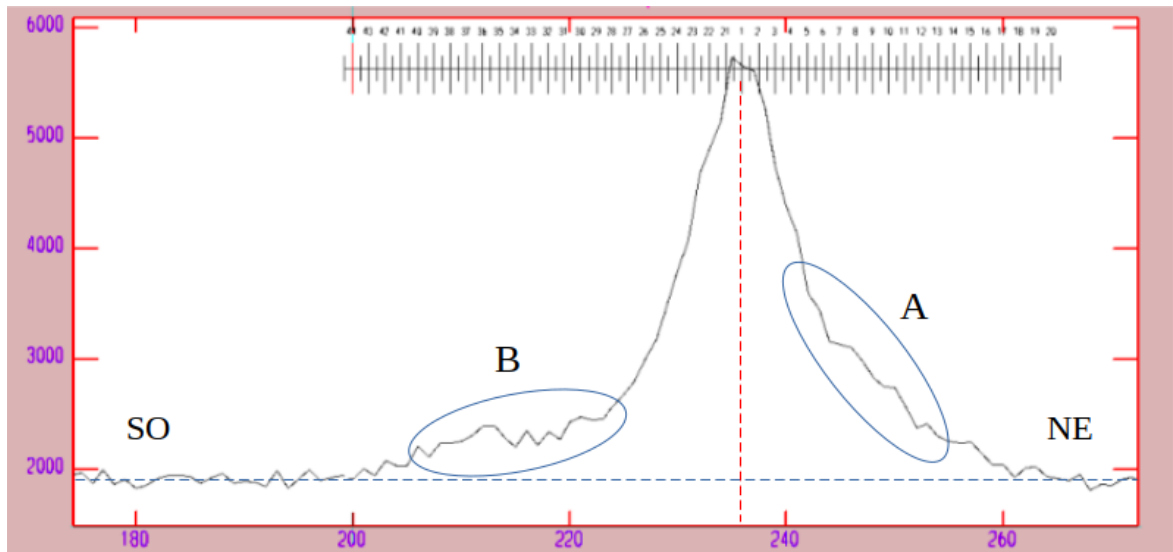


FIGURA 7. Assimetrias observadas no perfil espacial, representadas pelas regiões A e B. A linha vertical vermelha inclui a abertura central. Uma estimativa do céu é dada pela linha horizontal azul.

As linhas de emissão em núcleos galácticos próximos são geralmente afetadas pela absorção estelar, o que causa um sério obstáculo para as medidas precisas dos respectivos fluxos [32]. Portanto, com o objetivo de estimar a população estelar na região nuclear e remover a contribuição desta, aplicamos o código de síntese de população estelar STARLIGHT [33] no espectro nuclear calibrado da Figura 4. Este procedimento foi usado com sucesso em galáxias com *redshifts* semelhantes ao deste estudo (veja, por exemplo, [34–42]) cujo propósito foi o de medir com melhor precisão a intensidade, a largura equivalente e comprimento de onda central das linhas de emissão. O resultado da síntese espectral pode ser observada na Figura 8, envolvendo os espectros observado, modelado e o residual.

Basicamente, o STARLIGHT é um código usado para ajustar um espectro observado ( $O_\lambda$ ) em um modelo ( $M_\lambda$ ) em termos de uma combinação linear de populações estelares simples (SSP), onde cada uma contribui com uma fração  $x_j$  para o fluxo em um comprimento de onda normalizado escolhido. Neste estudo,  $\lambda = 5870 \text{ \AA}$ . Uma base de  $N = 150$  elementos de 25 diferentes idades entre 1 Myr e 18 Gyr, e seis diferentes metalicidades ( $Z =$

0,005; 0,02; 0,2; 0,4; 1,0 e 2,5  $Z_\odot$ , somando 150 SSP (para maiores detalhes veja [43–45]), foram usadas, extraídas dos modelos da referência [46], calculado para uma Função de Massa Inicial (IMF) de Chabrier (2003) e trilhas evolutivas de ‘Padova 1994’ [47–51].

No presente estudo, adotamos o mesmo intervalo de representação adotada em [52], ou seja: estrelas jovens ( $t \leq 5 \times 10^7$  anos) e de idade intermediária ( $5 \times 10^7 \leq t \leq 2 \times 10^9$  anos). Não foram detectadas populações velhas, que cobre a faixa de  $2 \times 10^9 \leq t \leq 13 \times 10^9$  anos, nesta análise. Avaliando o espectro sintético (modelado) fornecido pelo código com o menor  $\chi^2$ , obtemos dados importantes como a metalicidade média  $Z = 0,0352 \pm 0,0002 Z_\odot$  e as frações das populações estelares que compõem o espectro, distribuídas em estrelas jovens (29,61%) e de idades intermediárias (70,39%). Infelizmente, o STARLIGHT, não oferece uma medida de erro nos seus resultados, o que iria requerer uma metodologia de perturbação dos dados e uma estimativa do desvio em relação aos valores principais.

As medidas das intensidades das linhas foram obtidas diretamente do espectro residual e discutimos a seguir.

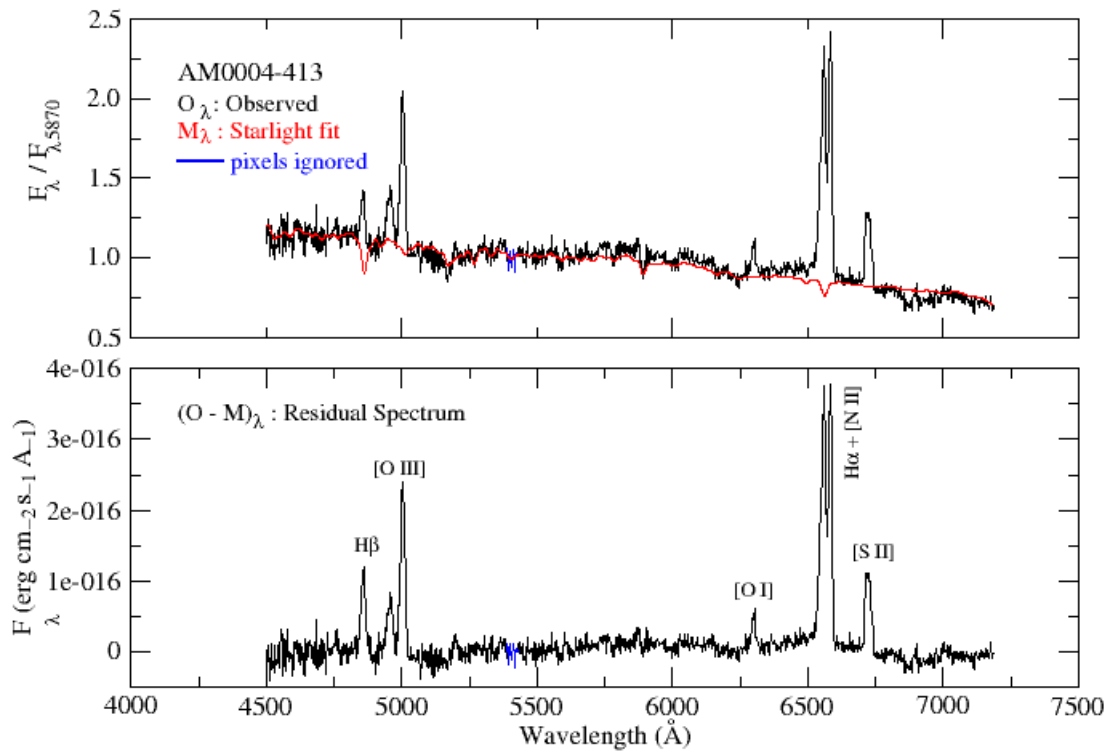


FIGURA 8. Superior: Espectro observado (preto) e modelado (vermelho). Inferior: Espectro residual (observado menos modelado) obtido a partir da subtração da população estelar subjacente. As principais linhas de emissão estão registradas.

## V. RAZÕES DE LINHAS E DIAGRAMAS DE DIAGNÓSTICOS

Os clássicos diagramas de diagnósticos baseados em pares de razões de linhas de emissão no óptico, por exemplo [53], foram propostos a partir do diagrama BPT (Baldwin, Phillips e Terlevich, [54]), o qual envolve as razões de linha, em Å,

$$\log \left( \frac{[\text{N II}]\lambda 6584}{\text{H}\alpha\lambda 6563} \right) \times \log \left( \frac{[\text{O III}]\lambda 5007}{\text{H}\beta\lambda 4861} \right),$$

Outros diagramas envolvem a razão  $[\text{O II}]\lambda 3727 / [\text{O III}]\lambda 5007$ .

A razão  $[\text{O III}]\lambda 5007 / \text{H}\beta\lambda 4861$  é representativa da excitação do gás, onde o potencial de ionização do  $[\text{O I}]$  vale  $\sim 13,6$  eV [55]. A excitação cresce à medida que o valor desta razão diminui. Diante da grande diferença em comprimento de onda (1280Å) entre as linhas

$\lambda 3727\text{Å}$  e  $[\text{O III}]\lambda 5007\text{Å}$ , esta razão é bastante sensível ao efeito da extinção.

Os diagramas de diagnósticos propostos por BPT representam uma das primeiras metodologias a serem empregadas para classificar galáxias a partir dos mecanismos de excitação das linhas espectrais. Diferentes razões de linhas revelam diferentes informações sobre o contínuo ionizante, o parâmetro de ionização, a temperatura do gás, etc. Esses diagramas podem ajudar a separar os dois tipos de nebulosas fotoionizadas, corpos negros e não térmicos, e ajudar a identificar o gás excitado por choque.

Esse aspecto é fundamental para identificar núcleos galácticos do tipo LINER (*Low-Ionization Nuclear Emission-line Region* [56]), ou seja, regiões com linhas de emissão nuclear de baixa ionização, e ajudar a separar este grupo das galáxias Starburst [57], regiões nucleares  $[\text{H II}]$  gigantes, muitas vezes são confundidas com LINER.

A parte superior da Tabela III fornece as intensidades (fluxos) das principais linhas de emissão obtidas a partir do espectro residual presente na Figura 8. Na parte seguinte, as razões calculadas das respectivas linhas sugerem, de acordo com os critérios (equações) de classificação proposta por [58], que a galáxia sob estudo é uma LINER. As equações são indicadas a seguir,

$$\begin{aligned} \frac{0,61}{\left(\log\left(\frac{[\text{N II}]}{\text{H}\alpha}\right) - 0,47\right)} + 1,19 &< \log\left(\frac{[\text{O III}]}{\text{H}\beta}\right), \\ \frac{0,72}{\left(\log\left(\frac{[\text{S II}]}{\text{H}\alpha}\right) - 0,32\right)} + 1,30 &< \log\left(\frac{[\text{O III}]}{\text{H}\beta}\right), \\ \frac{0,73}{\left(\log\left(\frac{[\text{O I}]}{\text{H}\alpha}\right) + 0,59\right)} + 1,33 &< \log\left(\frac{[\text{O III}]}{\text{H}\beta}\right), \\ \log\left(\frac{[\text{O III}]}{\text{H}\beta}\right) &< 1,89 \times \log\left(\frac{[\text{S II}]}{\text{H}\alpha}\right) + 0,76. \end{aligned} \quad (8)$$

A última linha mostra o valor da razão intrínseca  $\text{H}\alpha/\text{H}\beta = 3,1$  esperada para objetos com núcleos ativos, AGN [53, 59].

A Figura 9 fornece, como exemplo, um dos diagramas de diagnóstico envolvendo as razões de linhas  $[\text{O III}]/\text{H}\beta$  e  $[\text{N II}]/\text{H}\alpha$ , cujos efeitos de extinção, devido as proximidades relativas, são geralmente desprezados nos cálculos. Estas razões envolvem as duas linhas de emissão mais intensas em AGN:  $[\text{O III}]\lambda 5007$  e  $\text{H}\alpha$ . Uma breve discussão é apresentada a seguir em função das linhas  $\text{H}\beta$  e  $[\text{N II}]\lambda 6584$ .  $[\text{O III}]/\text{H}\beta$  é uma razão representativa da excitação do gás.

De acordo com os processos físicos reinantes, a criação da linha  $[\text{O III}]$  (ionizada duas vezes) por fotoionização necessita de fótons com energia superior a 35 eV, que corresponde ao potencial de ionização do  $[\text{O II}]$ .

Seguindo [60], estes fótons são relativamente raros no espectro estelar e comuns no contínuo AGN. Uma maior excitação do gás corresponde a um maior valor desta razão, sendo, portanto, sensível aos efeitos de metalicidade do gás. O oxigênio apresenta um mecanismo físico muito interessante: é um dos principais agentes resfriadores do gás. Logo, um aumento da metalicidade implica em um processo mais eficiente de

resfriamento, causando, assim, uma diminuição da temperatura de equilíbrio e redução da intensidade relativa do  $[\text{O III}]$  em relação ao  $\text{H}\beta$ .

TABELA III. Fluxos ( $\times 10^{-16} \text{erg}\cdot\text{cm}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{\AA}^{-1}$ ) e as razões das linhas de emissão obtidas a partir do espectro residual (veja a Figura 8).

$\lambda_{\text{central}}$	Nome	Fluxo
4861	$\text{H}\beta$	4,17
5007	$[\text{O III}]$	7,23
6300	$[\text{O I}]$	1,38
6563	$\text{H}\alpha$	13,23
6584	$[\text{N II}]$	11,03
6716	$[\text{S II}]$	4,50
6731	$[\text{S II}]$	4,18
<b>Razões</b>		
5007/4861	$[\text{O III}]/\text{H}\beta$	1,73
6300/6563	$[\text{O I}]/\text{H}\alpha$	0,10
6584/6563	$[\text{N II}]/\text{H}\alpha$	0,83
(6716 + 6731)/6584	$[\text{S II}]/\text{H}\alpha$	0,66
6563/4861	$[\text{H}\alpha]/\text{H}\beta$	3,17

A razão  $[\text{N II}]/\text{H}\alpha$ , por outro lado, está relacionada com a região de baixa excitação, visto que o potencial de ionização do  $[\text{N I}]$  é aproximadamente 14,5 eV, sendo, portanto, sensível aos efeitos de abundância química.

## VI. GALÁXIAS LINER

Os núcleos do tipo LINER (*Low-Ionization Nuclear Emission-line Region* – Regiões Nucleares de Linhas de Emissão de Baixa Ionização) são as galáxias menos luminosas e os AGN mais comuns observados (as espirais geralmente apresentam esse fenômeno). Em geral, estes objetos revelam intensas linhas de emissão de baixa excitação, quando comparadas com as linhas estreitas de alta excitação de AGN do tipo Seyfert. Por exemplo, a razão  $[\text{O II}]\lambda 3727/[\text{O III}]\lambda 5007$  é de  $\sim 1$ , enquanto que em Seyfert 1 é da ordem de 0,5 ou menor [61–63]. A linha  $[\text{O I}]\lambda 6300$  nestes objetos é relativamente forte, como pode ser observada no espectro residual da Figura 8.

Em geral, é importante ressaltar que esta linha é geralmente fraca e, devido ao baixo sinal-ruído dos espectros, a mesma não é facilmente detectada.

Esta classe de núcleo galáctico foi introduzida em 1980 pelo astrônomo Timothy Martin Heckman, onde o espectro óptico era distinto daqueles presentes em regiões [H II] e nos AGN do tipo Seyfert [64]. De acordo com o autor, mais de um terço de todas as galáxias es-

pirais podem ser caracterizadas como LINER. As referências [32, 65] mostram também que as LINER são bastante comuns, especialmente em galáxias de tipo recente (*early-type*). Diante dos levantamentos realizados, o quantitativo de objetos catalogados implica em questionar se as LINER são mini-quasares, ou seja, se são quasares de muito baixa luminosidade [66, 67]. Se este for o caso, então os mesmos podem ser incluídos na função de luminosidade dos AGN.

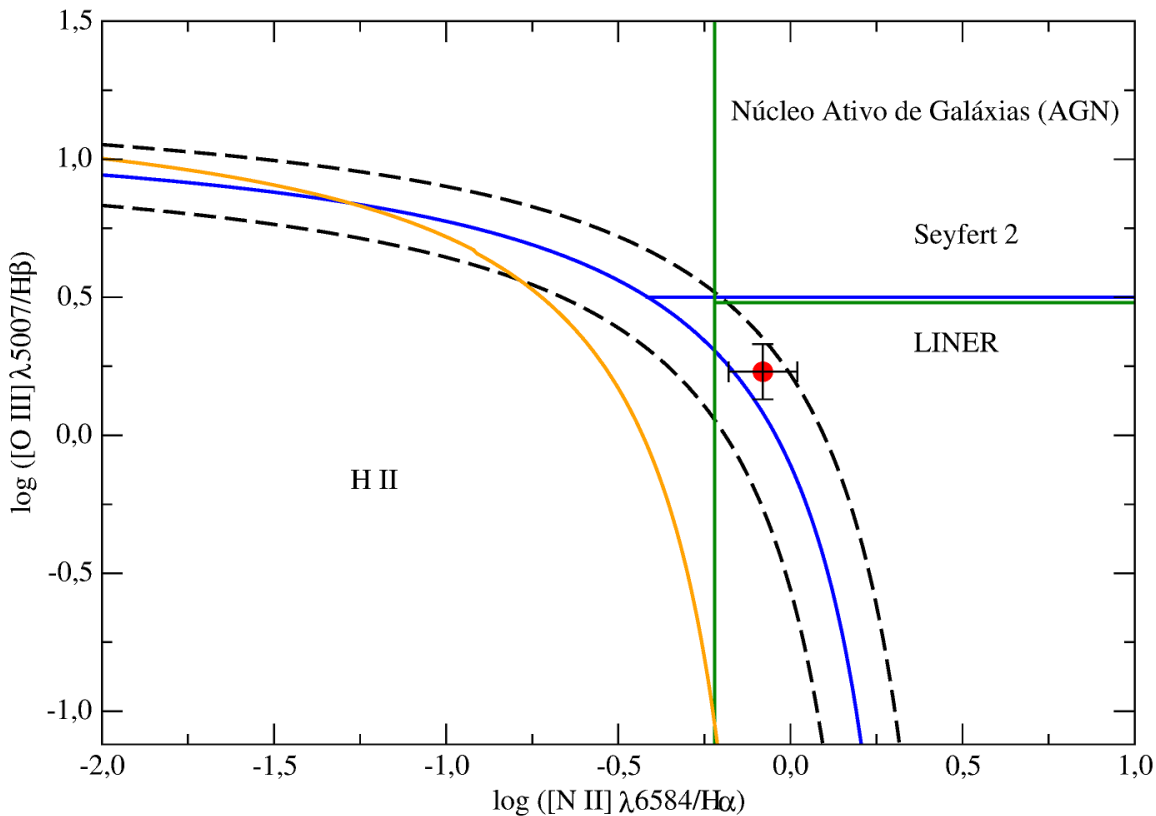


FIGURA 9. O valor das razões de linhas nucleares (Tabela III) são representados pelo ponto vermelho. A linha azul separa as galáxias [H II] do grupo das AGN (*Seyfert* e *LINER*), deduzido empiricamente em [59]. As linhas pontilhadas pretas são as incertezas no modelo de 0,1 dex nos dois planos. A linha laranja representa a divisão entre [H II] e AGN [60]. A linha azul horizontal representa a separação entre as *Seyferts* e as *LINER* [68]. Por fim, a linha verde representa a classe de galáxias transitórias definidas por [69].

Distintas explicações para as LINER foram apresentados na literatura: (i) ionização por choque [64], (ii) estrelas quentes jovens [70] e (iii) ionização favorecida por AGN de baixa luminosidade [71, 72]. Como as LINER constituem a maioria dos objetos AGN, como visto acima, esta última análise levanta algumas dis-

cussões ou inconsistências relativas à hipótese de ionização do AGN. Dois casos podem ser citados: o primeiro, relativo às intensidades das linhas de emissão previstas [73]; o segundo, nas distribuições espaciais de regiões ionizadas nas galáxias [74, 75]. Contudo, nenhum dos resultados foram conclusivos, pois ainda necessita-

mos de mais informações espaciais ou espectrais sobre estes objetos. Portanto, representam objetos interessantes e com intensas discussões na literatura.

## VII. CONCLUSÕES

Este trabalho, desenvolvido no âmbito da Iniciação Científica, objetiva contribuir para o estudo das galáxias peculiares no Universo local. O objeto investigado ainda carece de informações fotométricas e espectroscópicas no visível. Os resultados obtidos a partir do espectro residual, revelou a natureza nuclear até então desconhecida na literatura, ou seja, uma LINER. Representam objetos interessantes e, apesar do consenso apontar que são partes integrantes dos AGN, ainda existe a suspeita de que correspondam a uma mistura de intrincados fenômenos [76, 77]. No contexto das ga-

laxias peculiares, este resultado irá se somar a todos aqueles já discutidos em nosso grupo de pesquisa que busca contribuir para o entendimento desta particular classe de objetos do Universo local.

## Agradecimentos

O primeiro autor agradece ao CNPq pela concessão da bolsa de Iniciação Científica (PIBIC/UEFS) obtida no Edital PPPG-IC/UEFS Nº 01/2019. Os autores agradecem as equipes do OPD/LNA-MCTI pelas muitas contribuições ao longo das observações espectroscópicas. A pesquisa realizada no Grupo de Pesquisa em Galáxias Peculiares (GPGP) foi desenvolvida no Departamento de Física e no Observatório Astronômico Antares/Museu Antares de Ciência e Tecnologia (UEFS).

- 
- [1] E.P. Hubble, *Extragalactic nebulae*. *Astrophys. J.* **64**, 321 (1926).
  - [2] J.H. Reynolds, *Photometric measures of the nuclei of some typical spiral nebulae*. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* **80**, 746 (1920).
  - [3] E.P. Hubble, *Realm of the Nebulae*. New Haven: Yale University (1936).
  - [4] H. Arp, *Atlas of Peculiar Galaxies*. *The Astrophysical Journal Supplement Series* **14**, 1 (1996).
  - [5] H.C. Arp, B.F. Madore, B. Madore, *A catalogue of southern peculiar galaxies and associations*. New York: Cambridge University Press (1987).
  - [6] O leitor pode acessar o catálogo completo através do Link: SPGA Atlas at Caltech. <https://ned.ipac.caltech.edu/level5/SPGA/-Atlas/frames.html>. Acessado em: 25 de setembro de 2021.
  - [7] Disponível em: Observatório Pico dos Dias. <https://www.gov.br/mcti/pt-br/rede-mcti/lna/composicao/coast/obs/opd/observatorio-do-pico-dos-dias>.
  - [8] IRAF é distribuído pelo Observatório Mundial de Astronomia Óptica (NOAO), operado pela Associação de Universidades para Pesquisa em Astronomia, sob acordo cooperativo com a Fundação Mundial de Ciência (NSF).
  - [9] A.U. Landolt, *UBVRI Photometric standard stars around the celestial equator*. *The Astronomical Journal* **88**, 439 (1983).
  - [10] Disponível em: <https://www.eso.org/sci/-observing/tools/standards/spectra/stanlis.html>. Acessado em: 25 de setembro de 2021.
  - [11] F. Valdes, *The IRAF Spectroscopy Reduction Packages and Tasks*. In: D.M. Worrall, C. Biemesderfer, J. Barnes, (Editors). *Astronomical Data Analysis Software and Systems I*. *Astronomical Society of the Pacific Conference Series* **25**, 417 (1992).
  - [12] Disponível em: IRAF at NOAO. <http://ast.nao.edu/data/software> Acessado em: 25 de setembro de 2021.
  - [13] B.W. Carroll, D.A. Ostlie, *An Introduction to Modern Astrophysics*. New York: Cambridge University Press (2017).
  - [14] Mais informações em: Instrumentação CCD do OPD. <https://www.gov.br/mcti/pt-br/rede-mcti/lna/composicao/coast/obs/opd/instrumentacao/ccd/detectores/ccd-andor-ikon-1936-ex2-sn-14912>. Acessado em: 25 de setembro de 2021.
  - [15] M. Alonso, E.J. Finn, *Física: Um Curso Universitário. Vol. 2 – Campos e Ondas*. São Paulo: Edgard Blücher (2015).

- [16] Disponível em: RVSAO at Harvard University. <http://tdc-www.harvard.edu/iraf/rvsao/>. Acessado em 25 de setembro de 2021.
- [17] M.J. Kurtz and D.J. Mink, *RVSAO 2.0: Digital Redshifts and Radial Velocities*. Publications of the Astronomical Society of the Pacific **110**, (750) 934 (1998).
- [18] Z.-E. Liu, H.-R. Yu, T.-J. Zhang, Y.-K. Tang, *Direct reconstruction of dynamical dark energy from observational Hubble parameter data*. Physics of the Dark Universe **14**, 21 (2016).
- [19] D.H. Jones, M.A. Read, W. Saunders, et al., *The 6dF Galaxy Survey: final redshift release (DR3) and southern large-scale structures*. Monthly Notices of the Royal Astronomical Society **399**, (2) 683 (2009).
- [20] G. de Vaucouleurs, A. de Vaucouleurs, J. Corwin, et al., *Third Reference Catalogue of Bright Galaxies*. New York: Springer (1991).
- [21] Disponível em: LEDA at Lyon University. <http://leda.univ-lyon1.fr/search.html>. Acessado em: 25 de setembro de 2021.
- [22] K.D. Borne, J.G. Hoessel, *Observational Signatures of Tidal Friction in Interacting Binary Galaxies*. Bulletin of the American Astronomical Society **17**, 601 (1985).
- [23] K.D. Borne, J.G. Hoessel, *Interacting Binary Galaxies – III. Observations of NGC 1587/1588 and NGC 7236/7237*. Astrophysics J. **330**, 51 (1988).
- [24] M. Balcells, K.D. Borne, J.G. Hoessel, *Interacting Binary Galaxies. VI. The Fast Encounter of NGC 2672 and NGC 2673 (Karachentsev 175, ARP 167)*. Astrophysics J. **336**, (1989).
- [25] M. Faúndez-Abans, M. de Oliveira-Abans, A.C. Krabbe, et al., *FM047 – 02: a collisional pair of galaxies with aring*. Astronomy & Astrophysics **558**, A13 (2013).
- [26] P. Freitas-Lemes, I. Rodrigues, O.L. Dors, M. Faúndez-Abans, E. Pérez-Montero, *The effects of interaction on the kinematics and abundance of AM 2229-735*. Monthly Notices of the Royal Astronomical Society **441**, (2) 1086 (2014).
- [27] K.D. Borne, M. Balcells, J.G. Hoessel, et al., *Interacting Binary Galaxies. VII. Kinematic Data for 12 Disturbed Ellipticals*. Astrophysics J. **435**, 79 (1994).
- [28] F. Combes, R. Rampazzo, P.P. Bonfanti, et al. *Stellar dynamics in E+E pairs of galaxies. II. Simulations and interpretation*. Astronomy & Astrophysics **297**, 37 (1995).
- [29] R. Rampazzo, H. Plana, P. Amram, et al., *Two-dimensional warm gas kinematics in interacting galaxy systems*. Monthly Notices of the Royal Astronomical Society **356**, (3) 1177 (2005).
- [30] J. Danby, *Fundamentals of Celestial Mechanics*. Richmond: Willman-Bell (1992).
- [31] J. Bekenstein, M. Milgrom, *Does the missing mass problem signal the breakdown of Newtonian gravity*. Astrophysics J. **286**, 7 (1984).
- [32] L.C. Ho, A.V. Filippenko, W.L.W. Sargent, *A Search for “Dwarf” Seyfert Nuclei. – III. Spectroscopic Parameters and Properties of the Host Galaxies*. The Astrophysical Journal Supplement Series **112**, (2) 315 (1997).
- [33] Disponível em: Starlight at UFSC. <http://www.starlight.ufsc.br> Acessado em: 25 de setembro de 2021.
- [34] A.C. Krabbe, M.G. Pastoriza, C. Winge, et al., *The effects of the interactions on the kinematics, stellar population and metallicity of AM2322 – 821 with Gemini/GMOS*. Monthly Notices of the Royal Astronomical Society **416**, (1) 38 (2011).
- [35] E. Wenderoth, M. Faúndez-Abans, A.C. Krabbe, M. de Oliveira-Abans, H. Cuevas, *A first study of the galaxy HRG 2304 and its companion AM 1646 – 795 (NED01)*. Astronomy & Astrophysics **529**, A157 (2011).
- [36] M. Faúndez-Abans, V.P. Reshetnikov, M. de Oliveira-Abans, A.C. Krabbe, P. C. da Rocha-Poppe, V.A. Fernandes-Martin, E.B. Amôres, P. Freitas-Lemes, *Visiting two objects in the field of the ring galaxy HRG 2302*. Astronomy & Astrophysics **574**, A70 (2015).
- [37] M. Faúndez-Abans, P.C. da Rocha-Poppe, V.A. Fernandes-Martin, et al., *Broad-band photometry and long-slit spectroscopy of the peculiar ring galaxy FM 287 – 14*. Astronomy & Astrophysics **559**, A8 (2013).
- [38] M. Faúndez-Abans, A.C. Krabbe, M. de Oliveira-Abans, et al., *A study of the remarkable galaxy system AM 546 – 324 (the core of Abell S0546)*. Astronomy & Astrophysics **543**, A64 (2012).
- [39] P. Freitas-Lemes, A.C. Krabbe, M. Faúndez-Abans, et al., *The peculiar ring galaxy HRG 54103 revisited*. Monthly Notices of the Royal Astronomical Society **468**, (3) 3159 (2017).
- [40] A.C. Krabbe, D. A. Rosa, M.G. Pastoriza, et al., *Interaction effects on galaxy pairs with Gemini/GMOS III: stellar population synthesis*. Monthly Notices of the Royal Astronomical Society **467**, (1) 27 (2017).
- [41] P.C. da Rocha-Poppe, V. A. Fernandes-Martin, M. Faúndez-Abans, et al., *Optical long-slit spectroscopy in the cluster Abell S0805*. Monthly Notices of the Royal Astro-

- nomical Society **488**, (3) 3685 (2019).
- [42] E.C. Silva-Sales, V. Fernandes-Martin, P. da Rocha-Poppe, *et al.*, *Estudo Espectroscópico do Par de Galáxias Interagentes ESO 505–IG 030 e ESO 505–IG 031*. *Sitientibus Série Ciências Físicas* **16**, 15 (2020).
- [43] A. Mateus, L. Sodré, R. Cid Fernandes, G. Stasínska, W. Schoenell, J.M. Gomes, *Semi-empirical analysis of Sloan Digital SkySurvey galaxies – II. The bimodality of the galaxy population revisited*. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* **370**, (2) 721 (2006).
- [44] N.V. Asari, R. Cid Fernandes, G. Stasínska, *et al.*, *The history of star-forming galaxies in the Sloan Digital Sky Survey*. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* **381**, (1) 263 (2007).
- [45] R. Cid Fernandes, N.V. Asari, L. Sodré, *et al.*, *Uncovering the chemical enrichment and mass-assembly histories of star-forming galaxies*. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* **375**, (1) 16 (2007).
- [46] G. Bruzual, S. Charlot, *Stellar population synthesis at the resolution of 2003*. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* **344**, (4) 1000 (2003).
- [47] M. Alongi, G. Bertelli, A. Bressan, *et al.*, *Evolutionary sequences of stellar models with semiconvection and convective overshoot. I.  $Z = 0.008$* . *Astronomy and Astrophysics Supplement Series* **97**, 851 (1993).
- [48] A. Bressan, F. Fagotto, G. Bertelli, *et al.*, *Evolutionary Sequences of Stellar Models with New Radiative Opacities. II.  $Z = 0.02$* . *Astronomy and Astrophysics Supplement Series* **100**, 647 (1993).
- [49] F. Fagotto, A. Bressan, G. Bertelli, *et al.*, *Evolutionary sequences of stellar models with new radiative opacities. III.  $Z = 0.0004$  and  $Z = 0.05$* . *Astronomy and Astrophysics Supplement Series* **104**, 365 (1994).
- [50] F. Fagotto, A. Bressan, G. Bertelli, *et al.*, *Evolutionary sequences of stellar models with new radiative opacities. IV.  $Z = 0.004$  and  $Z = 0.008$* . *Astronomy and Astrophysics Supplement Series* **105**, 29 (1994).
- [51] L. Girardi, A. Bressan, C. Chiosi, *et al.*, *Evolutionary sequences of stellar models with new radiative opacities. VI.  $Z = 0.0001$* . *Astronomy and Astrophysics Supplement Series* **117**, 113 (1996).
- [52] R. Cid Fernandes, A. Mateus, L. Sodré, *et al.*, *Semi-empirical analysis of Sloan Digital Sky Survey galaxies – I. Spectral synthesis method*. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* **358**, (2) 363 (2005).
- [53] S. Veilleux, D.E. Osterbrock, *Spectral Classification of Emission-Line Galaxies*. *The Astrophysical Journal Supplement Series* **63**, 295 (1987).
- [54] J.A. Baldwin, M.M. Phillips, R. Terlevich, *Classification parameters for the emission-line spectra of extragalactic objects*. *Publications of the Astronomical Society of the Pacific* **93**, 5 (1981).
- [55] A energia necessária para remover o elétron do átomo, 13,6 eV, é chamada de “energia de ionização” ou “energia de ligação” do elétron.
- [56] T.M. Heckman, *An optical and radio survey of the nuclei of bright galaxies. Activity in normal galactic nuclei*. *Astronomy & Astrophysics* **500**, 187 (1980a).
- [57] D.W. Weedman, F.R. Feldman, V.A. Balzano, *et al.*, *NGC 7714 – The prototype star-burst galactic nucleus*. *Astrophysics J.* **248**, 105 (1981).
- [58] L.J. Kewley, B. Groves, G. Kauffmann, *et al.*, *The host galaxies and classification of active galactic nuclei*. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* **372**, (3) 961 (2006).
- [59] C.M. Gaskell, G.J. Ferland, *Theoretical hydrogen-line ratios for the narrow-line regions of active galactic nuclei*. *Publications of the Astronomical Society of the Pacific* **96**, 393 (1984).
- [60] J.H. Krolik, *Active galactic nuclei: from the central black hole to the galactic environment*. Nova Jersey: Princeton University Press (1999).
- [61] H. Netzer, *AGN emission lines*. In: R.D. Blandford, H. Netzer, L. Woltjer, *et al.*, (Editors). *Active Galactic Nuclei*. Heidelberg: Springer (1990).
- [62] A.V. Filippenko, R. Terlevich, *O-star photoionization models of liners with weak forbidden OI 6300 a emission*. *The Astrophysical J.* **397**, L79 (1992).
- [63] L.C. Ho, A.V. Filippenko, W.L.W. Sargent, *A Reevaluation of the Excitation Mechanism of LINERs*. *The Astrophysics J.* **417**, 63 (1993).
- [64] T. Heckman, *Activity in the nuclei of normal galaxies*. *Highlights of Astronomy* **5**, 185 (1980).
- [65] L.C. Ho, A.V. Filippenko, W.L. Sargent, *A Search for “Dwarf” Seyfert Nuclei. II. an Optical Spectral Atlas of the Nuclei of Nearby Galaxies*. *The Astrophysical Journal Supplement Series* **98**, 477 (1995).
- [66] M. Elvis, A. Lawrence, *Astrophysics of Active Galaxies and Quasi-Stellar Objects-X-Ray*

- Spectra of Active Galaxies and Quasars*. Oxford: University Press (1985).
- [67] A. Koratkar, *Are LINERs Starbursts or Mini-Quasars? A comparative Study of their Ultraviolet Spectra in Active Galactic Nuclei and Related Phenomena*. IAU Symposium **194**, 71 (1999).
- [68] L.J. Kewley, M. Dopita, R. Sutherland, et al., *Theoretical modeling of starburst galaxies*. The Astrophysical J. **556**, (1) 121 (2001).
- [69] G. Kauffmann, T.M. Heckman, C. Tremonti, et al., Ž. Ivezić, G.T. Richards, D.P. Schneider, *The host galaxies of active galactic nuclei*. Monthly Notices of the Royal Astronomical Society **346**, (4) 1055 (2003).
- [70] R. Terlevich, J. Melnick, *Warmers: the missing link between Starburst and Seyfert galaxies*. Monthly Notices of the Royal Astronomical Society **213**, (4) 841 (1985).
- [71] G.J. Ferland, H. Netzer, *Are there any shock-heated galaxies?* The Astrophysics J. **264**, 105 (1983).
- [72] J.P. Halpern, J.E. Steiner, *Low ionization active galactic nuclei: X-ray or shock heated?* The Astrophysics J. **269**, L37 (1983).
- [73] R. Cid Fernandes, G. Stasinska, A. Mateus, et al., *A comprehensive classification of galaxies in the Sloan Digital Sky Survey: how to tell true from fake AGN?* Monthly Notices of the Royal Astronomical Society **413**, (3) 1687 (2011).
- [74] M. Sarzi, J.C. Shields, K. Schawinski, et al., *The SAURON project – XVI. On the sources of ionization for the gas in elliptical and lenticular galaxies*. Monthly Notices of the Royal Astronomical Society **402**, (4) 2187 (2010).
- [75] R. Yan, M.R. Blanton. *The Nature of LINER-like Emission in Red Galaxies*. The Astrophysics J. **747**, (1) 61 (2012).
- [76] A.V. Filippenko, *An Introduction to LINERs*. In: M. Eracleous, A. Koratkar, C. Leitherer, L. Ho, (Editors), *The Physics of Liners in View of Recent Observations*. San Francisco: Astronomical Society of the Pacific Conference Series (1996).
- [77] T.M. Heckman. Conference Summary. In: M. Eracleous, A. Koratkar, C. Leitherer, L. Ho, editors, *The Physics of Liners in View of Recent Observations*. San Francisco: Astronomical Society of the Pacific Conference Series (1996).