

Estudo de densidade eletrônica em sistemas de galáxias interactuantes utilizando o telescópio Gemini

Deise A. Rosa¹, Ângela C. Krabbe¹, Oli Luiz Dors Jr.¹

¹Universidade do Vale do Paraíba/Instituto de Pesquisa & Desenvolvimento, Av. Shishima Hifumi, 2911- Urbanova São José dos Campos - SP, deisearosa@hotmail.com

Resumo- Neste trabalho apresentamos um estudo da variação de densidade eletrônica ao longo do disco de dois sistemas das galáxias interactuantes AM2306-721 e AM2322-821 utilizando dados espectroscópicos obtidos com o telescópio Gemini Sul. Densidades eletrônicas variando de $2 \leq N_e \leq 1930 \text{ cm}^{-3}$ e $6 \leq N_e \leq 3014 \text{ cm}^{-3}$ foram derivadas para as galáxias espirais e irregulares destes sistemas. As densidades médias estimadas $[147-743] \text{ cm}^{-3}$ são sistematicamente maiores do que aquelas obtidas em galáxias isoladas $[40-106] \text{ cm}^{-3}$. Este resultado assim como os picos de densidades observados nos sistemas interactuantes são interpretados como sendo devido a efeitos causados por interações das galáxias, onde ondas de choque e fluxos de gás oriundos de partes externas para as regiões centrais galácticas são produzidos.

Palavras-chave: Interação de galáxia – densidade eletrônica

Área do Conhecimento: Astronomia Extragaláctica

Introdução

Um dos parâmetros físicos fundamentais para caracterizar uma região de formação de estrelas é a densidade eletrônica N_e . O estudo de distribuição de densidade eletrônica em uma nebulosa ionizada pode evidenciar a estrutura presente nestes objetos e ajudar a entender a sua evolução dinâmica, pois tais estruturas estão intimamente relacionadas com a expansão natural da matéria ionizada (Copetti et al., 2000). Além disso, a densidade eletrônica é necessária para estimar a massa do gás ionizado, interpretar espectros de emissão e para calcular a composição química do gás (Castañeda et al., 1992).

A densidade eletrônica N_e , medida em número de partículas por cm^3 , representa a quantidade de elétrons por unidade de volume. Esta pode ser derivada da razão das intensidades de duas linhas de emissão de um mesmo íon, emitidas por diferentes níveis com energias de excitação próximas, de tal modo que as taxas de excitação relativas entre os dois níveis dependem somente das forças de colisão. Se os dois níveis têm diferentes probabilidades de transição radioativa, a população relativa dos níveis depende essencialmente da densidade eletrônica (Osterbrock & Ferland 2006).

As primeiras técnicas usadas no estudo de densidade eletrônica em nebulosas com linhas excitadas colisionalmente (ex. [OII]) foram proposto por Allen et al. (1949), Seaton et al. (1954) e Eissner et al. (1969). Diferentes autores têm feito estimativas de N_e em nebulosas ionizadas, tais como a nebulosa de Orion

(Osterbrock et al. 1959); Danks et al. (1971) e Cantó et al. (1980), nas nebulas planetárias (Osterbrock & Ferland (2006), e em gigante regiões HII extragaláctica do grupo local (Castañeda et al. (1992); Guitiérrez et al. (2010). Um efeito observado no gás ionizado, devido às interações de galáxias, tem sido encontrado por Puech et al. (2006). Estes autores mapearam densidades eletrônicas em seis galáxias distantes ($z \sim 0,55$) e verificaram que estas possuem alguns picos de N_e associados às colisões entre nuvens moleculares do meio interestelar e eventos de fluxo de gás expelidos para o centro da galáxia e/ou do centro para as partes externas da galáxia. No entanto, este é o único estudo publicado até o presente momento sobre o efeito das interações na densidade eletrônica. Portanto, o estudo de densidade eletrônica em galáxias em interação é importante para se obter os efeitos causados por fluxo de gás e ondas de choques das partes externas para as regiões centrais galácticas onde são produzidos.

Observação e redução

Os dados observacionais utilizados neste trabalho foram obtidos em junho e julho de 2006, no Observatório do Gemini Sul em Cerro Pachón, Chile, como parte dos programas de tempo ruim GS-2006A-DD-6 e GS-2007A-Q-76, utilizando o espectrógrafo multi-objeto do Gemini Sul (GMOS-S) acoplado ao telescópio de 8 m. Espectros no intervalo de comprimento de onda de 4280-7130 Å, foram obtidos com a rede de 600 linhas/mm. A escala espacial foi de $0.288'' \text{ pxl}^{-1}$ e a escala de dispersão de 0.9 Å pxl^{-1} . Uma resolução espectral

de 5.5 Å, foi obtida. A fenda utilizada possui um comprimento de 5.5'x1" no plano do céu.

Os espectros observados para cada sistema de galáxias foram obtidos em diferentes ângulos de posição de fenda (PA), medidos a partir do norte, com sentido crescente de norte para leste. Na Tabela 1 são apresentados os objetos de estudo, as datas das observações, os tempos de exposição, o PA das fendas e os intervalos de comprimentos de onda dos espectros. Os tempos de exposições foram limitados em 600s e 700s para minimizar os efeitos dos raios cósmicos, com 4 a 6 espectros obtidos em cada posição de fenda para se obter uma melhor razão sinal ruído.

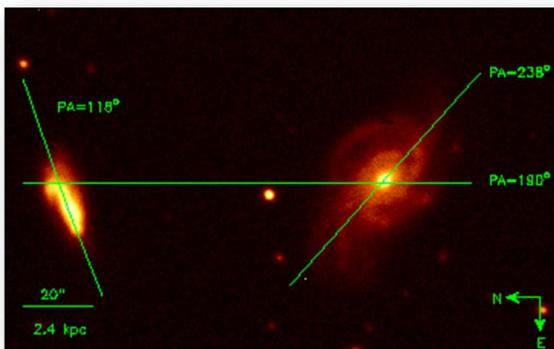


Figura 1- Posições de fendas observadas pelo espectrógrafo GMOS na banda r' da imagem AM2302-721.

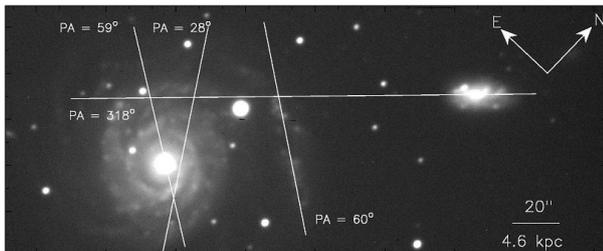


Figura 2- Posições de fendas observadas pelo espectrógrafo GMOS na banda r' da imagem AM2322-821.

Para AM2306-721, PA=190° intercepta os discos de ambas as galáxias: a galáxia espiral AM2306A e a irregular AM2306B, e PA=238° e PA=118° correspondem à posição ao longo do núcleo da galáxia principal AM1256A e galáxia secundária AM2306B, respectivamente. Na Figura 1 são mostradas estas três posições de fenda sobrepostas a uma imagem na banda r'. Para o sistema AM2322-821, o ângulo de posição de fenda PA=318°, corresponde à posição do centro da galáxia irregular AM2322B e intercepta um dos braços espirais da galáxia espiral AM2322A. Tanto quanto a PA=28° e PA=60° cruza os braços da AM2322A, mas não intercepta o seu núcleo; a

PA=59° intercepta o núcleo deste objeto. Na Figura 2, estas posições de fendas podem ser observadas para as galáxias do sistema AM2322-821.

Tabela1- Registro das observações

Objetos	Data (UT)	Exp. (s)	PA (°)	$\Delta\lambda$ (Å)
AM2306-721	20/06/06	4 x 600	118	4280-7130
AM2302-721	20/06/06	4 x 600	190	4280-7130
AM2306-721	20/06/06	4 x 600	238	4280-7130
AM2322-821	01/07/06	3 x 700	59	4280-7130
AM2322-821	30/06/06	6 x 600	318	4280-7130
AM2322-821	01/08/08	8 x 600	28	4280-7130

A redução dos dados foi realizada através dos pacotes GEMINI.GMOS e dos pacotes genéricos do software *Image Reduction and Analysis Facility* (IRAF). Os procedimentos padrões seguidos foram de subtração dos *bias*, normalização por *flat-field*, remoção dos raios cósmicos, extração de espectros unidimensionais e calibração em comprimento de onda e em unidades de fluxo. De cada espectro bidimensional do objeto extraímos vários espectros unidimensionais. Dos espectros unidimensionais foram extraídos aberturas correspondentes a quatro linhas adjacentes do CCD, resultando em aberturas que representam uma escala física de 1x1,152 arcsec². O perfis espaciais de brilho em H α e do contínuo em λ 5735 (no qual o pico do perfil espacial do contínuo foi escolhido para ser o centro nominal) foi obtido usando um ajuste de perfil Gaussiano sobre o espectro de emissão puro.

Metodologia

A densidade eletrônica foi derivada das razão das intensidades de linhas do [SII], resolvendo numericamente as equações de equilíbrio para um átomo de cinco níveis, usando a tarefa *temden* do pacote *stsdas.nebular* do IRAF. As referências usadas para as forças de colisões, probabilidade de transição e níveis de energia, foram respectivamente de Ramsbottom et al. (1996), Verner et al. (1996), Keenan et al. (1993) e Bowen (1960).

Na determinação de densidade eletrônica, existem duas fontes de erros principais. O fator mais significativo é a saturação das razões de linhas tanto a valores altos e baixos da densidade eletrônica. A segunda fonte de erro é a dependência da densidade eletrônica N_e na temperatura eletrônica T_e . Brevemente, nós usamos a tarefa *splot* do IRAF para ajustar as linhas, com o erro associado usamos a soma

Tabela 2 - Estatística da razão do $[SII]\lambda 6716/\lambda 6731$ e a densidade eletrônica $N_e \text{ cm}^{-3}$ para os sistemas de galáxias AM2306-721 e AM2322-821.

Objetos	PA (°)	N	$[SII]\lambda 6716/\lambda 6731$					$N_e (\text{cm}^{-3})$					
			\bar{x}	M_d	Max.	Min.	σ	N	\bar{x}	M_d	Max.	Min.	σ
AM2306A	190	20	1,56	1,67	2,23	1,10	0,30	7	147	210	388	32	142
AM2306A	238	18	1,38	1,66	2,60	0,73	0,47	12	543	984	1930	37	650
AM2306B	118	17	1,24	1,12	1,49	0,76	0,19	15	322	848	1683	12	439
AM2306B	190	10	1,39	1,90	2,88	0,92	0,58	7	416	423	826	19	284
AM2322A	28	38	1,19	1,42	2,38	0,45	0,40	28	743	1511	3014	7	754
AM2322A	59	27	1,34	1,14	2,10	0,18	0,40	16	398	916	1825	6	490
AM2322A	318	23	1,39	1,40	1,76	1,03	0,18	14	168	270	532	8	154
AM2306B	318	28	1,37	1,35	1,72	0,98	0,17	20	150	342	665	19	214

N = representa o número de distintas áreas nebulares ao longo de cada posição de fenda observada, \bar{x} = média, M_d = mediana e σ = desvio padrão.

quadrática do erro associado com a intensidade da linha de emissão e erro do contínuo, dado por $\sigma^2 = \sigma_{\text{cont}}^2 + \sigma_{\text{linha}}^2$, com σ_{cont}^2 e σ_{linha}^2 sendo o contínuo *rms* e o erro de Poisson do fluxo da linha, respectivamente. Os erros da razão do [SII] foram obtidos pela propagação dos erros das intensidades das linhas, sendo que nenhuma extinção interestelar foi aplicada, uma vez que os seus comprimentos de onda são bem próximos entre si, sofrendo praticamente a mesma quantidade de extinção interestelar.

Resultados

Os perfis espaciais do fluxo em H α e do contínuo em $\lambda 5735$, as razões do [SII] $\lambda 6716/\lambda 6731$ e as densidades eletrônicas são mostrados nas Figuras 3-6. Na Tabela 2 apresentamos as estatísticas da razão de linhas [SII] $\lambda 6716/\lambda 6731$ e das medidas da densidade eletrônica, incluindo o número *N* de distintas áreas nebulares ao longo de cada posição de fenda observado, a média, a mediana, os limites correspondentes ao valor máximo e o mínimo de densidade e o desvio padrão, ao longo de cada posição de fenda para cada objeto observado dos sistema.

Os resultados obtidos de densidade eletrônica para cada sistema serão discutidos separadamente.

AM2306-721: Este par é formado por uma galáxia espiral AM2306A com braços perturbados, interagindo com uma galáxia irregular AM2306B, observada ao longo de diferentes ângulos de posição de fenda (ver Fig. 1). Ambas as galáxias tem regiões de formação de estrelas muito luminosas em H α de $8.30 \times 10^{39} < L(\text{H}\alpha) < 1.27 \times 10^{42} \text{ erg s}^{-1}$, como estimado por imagens de H α (Ferreiro et al. 2008).

AM2306A - o perfil de densidade ao longo da orientação nordeste - sudoeste obtida para a componente principal ao longo das posições de

fenda PA=190° e PA=238° (Fig. 3) mostram um variação sistemática de densidade com uma média estimada de $145 < N_e < 543 \text{ cm}^{-3}$, respectivamente. Embora a razão do [SII] obtida por Krabbe et al. (2008) seja comparável com nossas medidas, a densidade derivada por estes autores é 14% maior em relação a nossas medidas.

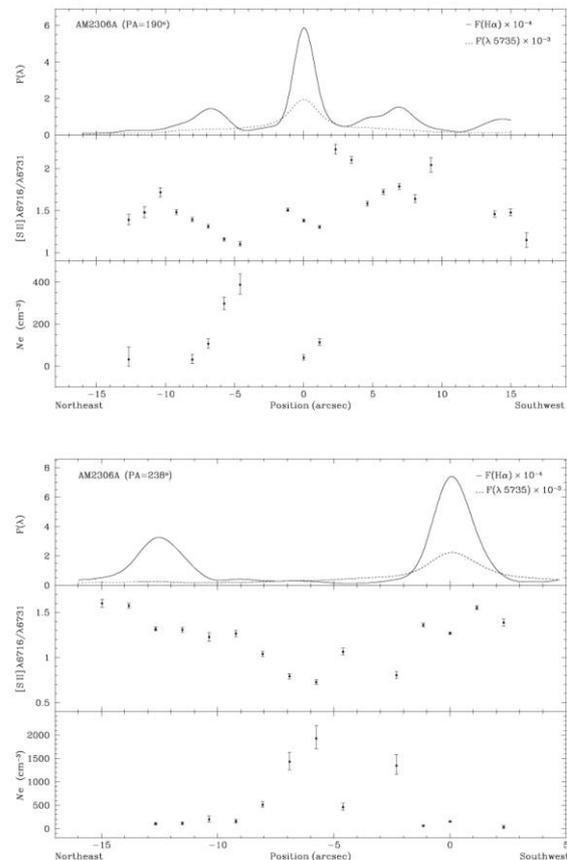


Figura 3- Observado H α (em unidades de $10^{-4} \text{ ergs cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$) e contínuo $\lambda 5735$ (em unidades de $10^{-3} \text{ ergs cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$), razão das linhas de emissão [SII] $\lambda 6716/\lambda 6731$ e a densidade eletrônica derivada ao longo da fenda PA= 190° e PA= 238° para AM2306A.

Os dados obtidos para AM2306B mostram uma clara variação de densidade eletrônica, com densidade eletrônica variando a partir de $[12-1683] \text{ cm}^{-3}$. O perfil de densidade ao longo da direção nordeste - sudoeste (PA=190°, Fig. 4), com pico de $\langle N_e \rangle = 826 \text{ cm}^{-3}$ próximo a região central, no qual diminui para as partes externas da nebulosa. A distribuição de densidade ao longo da PA=118° (Fig. 4) mostra que a densidade eletrônica é relativamente homogênea para AM2306B com o valor média de $\langle N_e \rangle = 322 \text{ cm}^{-3}$, exceto por picos de densidade atingindo $\langle N_e \rangle = 1683 \text{ cm}^{-3}$ no lado nordeste da componente secundária.

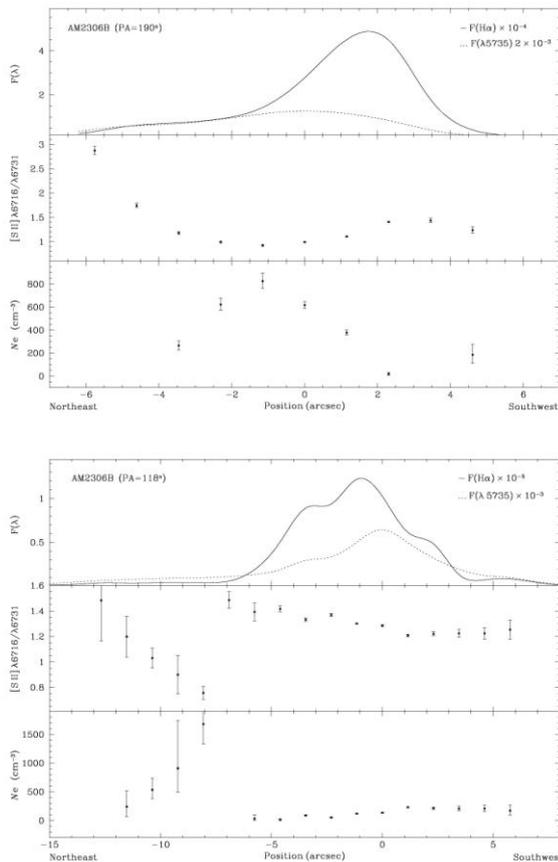


Figura 4 - O mesmo da Fig. 3, mas para AM2306B ao longo da fenda PA= 190° e PA= 118°.

AM2322-821: O par em interação deste sistema é constituído por uma galáxia espiral AM2322A com braços perturbados, classificada como uma SA(r)c e uma galáxia irregular AM2322B, observadas ao longo de diversas posições de fenda (ver, Fig. 2). Estes objetos apresentam regiões HII muito luminosas com variação de luminosidade em H α de $2.53 \times 10^{39} < L(\text{H}\alpha) < 1.45 \times 10^{41} \text{ erg s}^{-1}$ o que representa alta

taxa de formação estelar a partir de 0.02 para 1,15 M_{\odot}/yr estimados por Ferreiro et al. (2008).

AM2322A apresenta uma variação de densidade sistemática, com densidade eletrônica a partir de 6 para 3014 cm^{-3} , com uma média de 743 cm^{-3} . As estimativas de densidade ao longo da direção nordeste - sudoeste (PA=28°, Fig. 5)

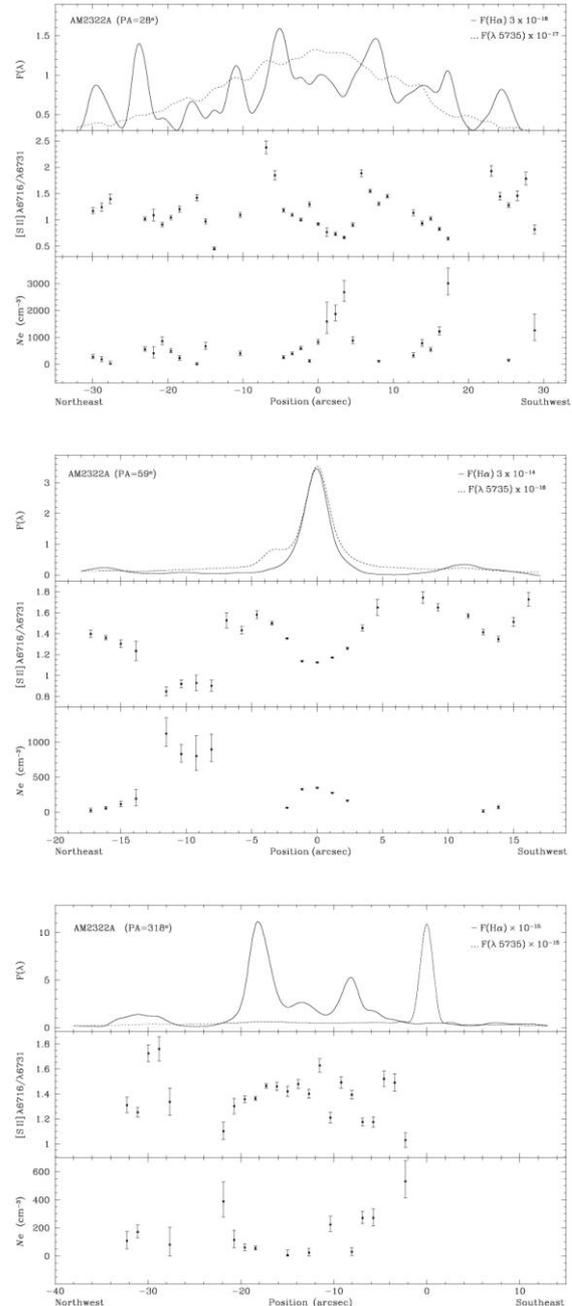


Figura 5- Observado H α (em unidades de 10^{-14} a $10^{-18} \text{ ergs cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$) e contínuo $\lambda 5735$ (em unidades de 10^{-15} e $10^{-17} \text{ ergs cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$), razão das linhas de emissão do $[\text{SII}]\lambda 6716/\lambda 6731$ e a densidade eletrônica derivada ao longo da fenda PA= 28°, PA= 59° e PA=318° para AM2322A.

Tabela 3 - Estatística da razão do $[SII]\lambda 6716/\lambda 6731$ e a densidade eletrônica $N_e \text{ cm}^{-3}$ para os sistemas de galáxias isoladas M101 e NGC2997.

Objetos	$[SII]\lambda 6716/\lambda 6731$						$N_e \text{ (cm}^{-3}\text{)}$					
	R/R ₀	\bar{x}	M _d	Max.	Min.	σ	R/R ₀	\bar{x}	M _d	Max.	Min.	σ
M101	25	1,36	1,39	1,49	1,14	0,09	18	106	148	332	19	89
NGC2997	14	1,40	1,41	1,46	1,32	0,04	12	40	24	101	3	34

R/R₀ = raio galactocêntrico, \bar{x} = média, M_d = mediana, σ = desvio padrão.

mostram baixos valores de densidade exceto por picos de densidade atingindo $\langle N_e \rangle = 3014 \text{ cm}^{-3}$ observados próximos a região central e externa da nebulosa na orientação sudoeste. O perfil de densidade eletrônica ao longo da fenda PA=59° (Fig. 5) apresenta um baixos valores de densidade na região central, com quatro picos de densidade na região obscura em orientação nordeste. A densidade eletrônica média é de $\langle N_e \rangle = 398 \text{ cm}^{-3}$, com uma variação [6-1825] cm^{-3} . A distribuição de densidade eletrônica ao longo da orientação noroeste-sudoeste (PA=318°, Fig. 5) é mais complexa, com densidade sistemática variando de 8 para 532 cm^{-3} , e uma densidade média 168 cm^{-3} .

AM2322B - as estimativas de densidade eletrônica para este objeto ao longo da posição de fenda PA=318° (Fig. 6) mostra uma variação espacial bem definida no intervalo [19-665] cm^{-3} , com densidade aumentando para noroeste em 15" a 20". A baixa densidade média $\langle N_e \rangle = 150 \text{ cm}^{-3}$ obtida para esta nebulosa concorda com valores típicos de regiões HII clássicas (Copetti et al. 2000).

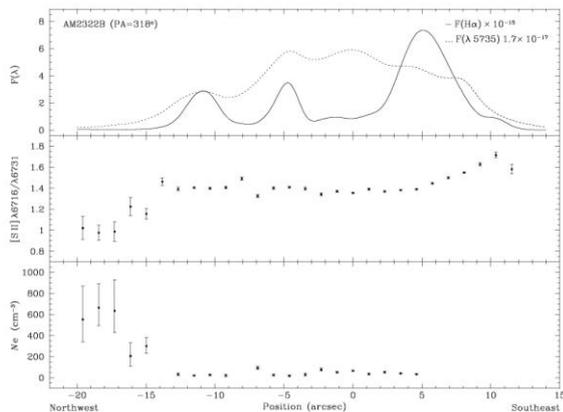


Figura 6 – O mesmo da Fig. Anterior, mas para AM2322B ao longo da fenda PA=318°.

Comparação com galáxias isoladas

Para comparar nossos resultados de perfis de densidade em galáxias interactuantes com estes em galáxias isoladas, calculamos densidades eletrônicas via medidas da razão do [SII]

encontradas na literatura para M101 (Kennicutt et al., 2003) e NGC2997 (Bresolin et al., 2005), usando os mesmos parâmetros atômicos e temperatura eletrônica adotada para os nossos dados. Os perfis espaciais das razões do $[SII]\lambda 6716/\lambda 6731$ e das densidades eletrônicas derivadas para as galáxias isoladas M101 e NGC2997 são mostrados nas Figura 7. Perfis espaciais homogêneos e de baixa densidade, ao longo do raio de cada galáxia, são observados. As densidades eletrônicas médias para esses objetos variam de [40-106] cm^{-3} (ver Tabela 3).

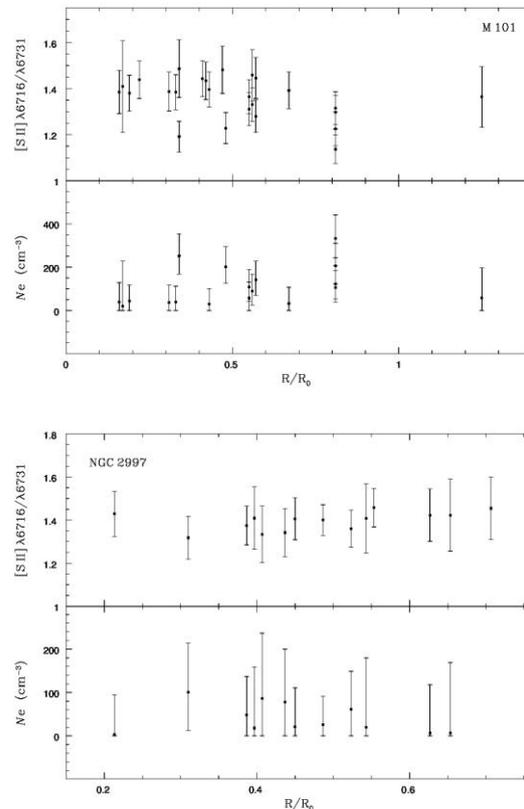


Figura 7 – O perfil de densidade eletrônica em função de R/R₀, no qual R₀ é a distância galactocêntrica deprojetada para as galáxias isoladas M101 e NGC2997.

Comparando os valores das densidades eletrônicas das galáxias isoladas com os valores medidos em nosso trabalho, para as galáxias dos

sistemas AM2306-721 e AM2322-821, verificamos valores de N_e sistematicamente maiores para as galáxias em interação em comparação com as isoladas, com variações de densidade eletrônica significativas observada somente nas galáxias em interação. Estes efeitos são provavelmente consequências das interações nas galáxias, onde fluxos de gás oriundos das partes externas para a regiões centrais das galáxias são produzidos.

Discussão e Conclusão

Variações sistemáticas de densidades eletrônicas ao longo do disco para as galáxias dos sistemas AM2306-721 e AM2322-821, utilizando como sensor de densidade a razão do $[SII]\lambda 6716/\lambda 6731$, foram determinados. Densidades eletrônicas variando de 12 a 930 cm^{-3} e 6 a 3014 cm^{-3} foram derivadas para as galáxias espirais e irregulares do sistema AM2306-721 e AM2322-821, respectivamente. Os valores médios de densidades eletrônicas estimados para as galáxias em interação $[147 - 743] \text{ cm}^{-3}$ são sistematicamente maiores do que aqueles obtidos para as galáxias isoladas $[40 - 106] \text{ cm}^{-3}$, com variações de densidade eletrônica significativa observada somente nas galáxias em interação. Estes efeitos são provavelmente consequências das interações nas galáxias, onde fluxos de gás oriundos das partes externas para a regiões centrais das galáxias são produzidos.

Referências

- ALLEN, L.H.; U., C. W.; van V., J.H., Multiplet Intensities for the Nebular Lines $^4S - ^2D$ of O II. **ApJ**, V.109, p. 42,1949.
- BOWEN, I. S. Wave lengths of forbidden nebular lines. II. **ApJ**, V.132, p. 1, 1960.
- BRESOLIN, F.; G.D, R. M.; S., G. A VLT study of metal-rich extragalactic H II regions. I. Observations and empirical abundances **A&A**, v V. 441, p. 981-997, 2005.
- CASTAÑEDA, H. O.; V., J.M.; C., M. V. F. Density studies on giant extragalactic HII regions, **A&A** V. 260, no. 1-2, p. 370-380, 1992.
- COPETTI, M. V. F.; C., H. O.; M., J. A. H.; S., A. A., Internal Variations of Electron Density in Galactic H II Regions. **Revista Mexicana de Astronomia & Astrofísica**. V. 9, p. 343, 2000.
- CANTO, J.; E., K. H.; M., J. On the derivation of electron density and temperature from SII and OII forbidden line intensity ratios. **MNRAS**, V. 193, p. 911-919, 1980.
- DANKS, A. C.; M., J., The Variations of the Electron Density Throughout the Orion Nebula. **Ap&SS**, V. 11, Issue 3, pp.398-406, 1971.
- EISSNER, W.; M., P. A. P.; N., H. Resonances in collision strengths for excitation of [O II] and [O III]. **MNRAS**, V. 146, p. 63, 1969.
- FERREIRO, D. L.; P., M. G.; R., M. Sample of minor of galaxies II: Modelling HII region Properties. **A&A**, V.481, p. 645-649, 2008.
- FERREIRO, D. L.; P., M. G.; Sample of minor of galaxies: Optical CCD surface photometry and HII region Properties. **ApJ**, V. 428, p. 837-846, 2004.
- GUTIÉRREZ, L.; B., J. E. The Galaxy-wide Distributions of Mean Electron Density in the H II Regions of M51 and NGC 4449. **ApJ**, V. 710, p.L44-L48, 2010.
- KRABBE, A.C; P., M. G.; W., C.; R., I.; F., D. L., Kinematics and physical properties of southern interacting galaxies: the minor merger AM2306-721. **MNRAS**, V. 389, p.1593-1604, 2008.
- KEENAN, F. P.; H., A.; O., P. C.; C., E. S. Einstein α - coefficients for transitions among the $3S^2 3P^3$ states of SII. **Phys. Scr. A.**, V. 47, p. 48-129, 1993.
- KENNICUTT, R. C.; B., F.; G., D. R. The Composition Gradient in M101 Revisited. II. Electron Temperatures and Implications for the Nebular Abundance Scale . **ApJ**, V. 591, p. 801 2003.
- OSTERBROCK, D.; F., G. H. Astrophysics of Gaseous Nebulae and Active Galactic Nuclei. United Sated of America: University Science Books, p. x, 2006.
- PUECH, M.; F., H.; H., F.; L., M. D. 3D spectroscopy with VLT/GIRAFFE. III. Mapping electron densities in distant galaxies. **A&A**, V. 455, p.131-134, 2006.
- RAMSBOTTOM, C. A.; B., K. L.; S., R. P. **Atomic Data and Nuclear Data Tables**, V. 63, p. 57, 1996.