

CINEMÁTICA DO GÁS IONIZADO DOS PARES DE GALÁXIAS EM INTERAÇÃO: AM1256-433 E AM1401-324

Deise Aparecida Rosa¹, Ângela Cristina Krabbe¹, Irapuan Rodrigues Oliveira Filho¹

¹Instituição/Departamento, Endereço, e-mai¹ Universidade do Vale do Paraíba / Física e Astronomia,
AV. Shishima Hifumi, 2911, CEP 12244-000,
São José dos Campos, SP, Brasil,
deiserosa@univap.br

Resumo- Neste trabalho apresentamos um estudo observacional sobre os efeitos das interações na cinemática do gás ionizado dos pares de galáxias AM1256-433 e AM1401-324. Os dados consistem de

espectros de fenda longa na faixa de comprimento de onda de 3446-7251 Å obtidos com o espectrógrafo

multi-objeto do Gemini Sul (GMOS). As curvas de rotação foram obtidas somente para a primária do pares das galáxias. Para a galáxia primária AM1256A, foi obtido uma amplitude de velocidade deprojetada de 105 km/s e uma massa dinâmica $6 \times 10^{10} M_{\odot}$. No caso da PGC543979, uma galáxia isolada, que se encontra no campo visual do sistema AM1256-433, uma massa de $7,3 \times 10^{10} M_{\odot}$ e uma amplitude de velocidade deprojetada de 66 km/s foi obtida. Do mesmo modo, para a galáxia primária AM1401A, a massa obtida foi de $3,8 \times 10^9 M_{\odot}$ dada uma amplitude de velocidade deprojetada de 44 km/s.

Palavras-chave: Interação de Galáxias - Cinemática do gás ionizado - Massa de Galáxias.

Área do Conhecimento: Astronomia Extragaláctica

Introdução

Eventos de interação e de fusão desempenham um papel importante na formação e evolução de galáxias. Fusões de galáxias mudam a função de massa destas, criando uma progressão de galáxias pequenas para maiores; o processo de fusão também pode alterar a morfologia de seus constituintes, transformando galáxias espirais ricas em gás em elípticas quiescentes. Interações podem desencadear um amplo conjunto de fenômenos físicos e morfológicos, tal como caudas de marés, núcleos cinematicamente desacoplados e aumento da taxa de formação estelar (Struck 1999).

Galáxias interagindo mostram um aumento da taxa de formação estelar quando comparadas com galáxias isoladas. Tal aumento foi proposto inicialmente por Larson e Tinsley (1978) para explicar o excesso de cores ópticas encontradas em galáxias em interação quando comparadas com galáxias isoladas. Recentemente, estudos realizados em um par de galáxias AM2306-721 (Krabbe et al. 2008) encontraram que a população estelar na galáxia secundária é dominada por componentes de população mais jovens (200 Myr), que estão espalhadas ao longo de todo o disco da galáxia. Simulações numéricas indicam

que estas galáxias colidiram a aproximadamente 200 Myr atrás e que possivelmente este episódio de população estelar deve estar relacionado com a passagem das galáxias pelo pericentro.

Existe uma conexão entre a intensidade de interação e a distorção morfológica das galáxias em pares. De acordo com os modelos de Mihos e Hernquist (1996), a resposta do gás quando as galáxias passam pelo pericentro da sua órbita depende da distribuição de massa das galáxias, e as irregularidades no campo de velocidade do gás traçam as perturbações no potencial gravitacional da galáxia como observado, por exemplo em algumas galáxias do aglomerado de Virgem (Rubin, Waterman & Kenney 1999). Simulações hidrodinâmicas e de N-corpos mostram que fusões entre galáxias perturbam o campo de velocidade do gás de forma significativa e produzem assimetrias e distorções nas curvas de rotação. No entanto, segundo estes autores estas distorções não são observados 1 Gyr após o primeiro encontro.

Este trabalho apresenta um estudo observacional para os sistemas de galáxias em interação AM1256-433 e AM1401-324, e para uma galáxia isolada PGC543979, que se encontra no campo visual do sistema AM1256-433. Para estas galáxias não existem estudos detalhados

publicados na literatura até o presente momento. AM1256-433 é constituída por uma galáxia principal bastante perturbada com dois braços espirais bem definidos e duas galáxias do tipo elíptica. AM1401-324 é composta por uma galáxia principal com um núcleo muito brilhante e um braço espiral que se enrola, dando a aparência de um anel e uma galáxia secundária do tipo elíptica.

Os principais objetivos deste estudo são: (a) estudar a cinemática do gás ionizado dos pares de galáxias; (b) verificar possíveis perturbações nas curvas de rotação; e (c) determinar a massa dinâmica destas galáxias.

Observação e Redução dos Dados

Os dados observacionais utilizados neste trabalho foram obtidos em maio e junho de 2007, e em agosto de 2008 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 inglês Gemini Multi-Object Spectrograph) do Gemini Sul (GMOS-S) acoplado ao telescópio de 8 m. Espectros no intervalo de

comprimento de onda de 3446-7251 Å, foram

obtidos com a rede de 600 linhas/mm. A escala espacial foi de 0.288" pxi⁻¹ e a escala de dispersão

de 0.9 Å pxi⁻¹. Uma resolução espectral de 5.5 Å,

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

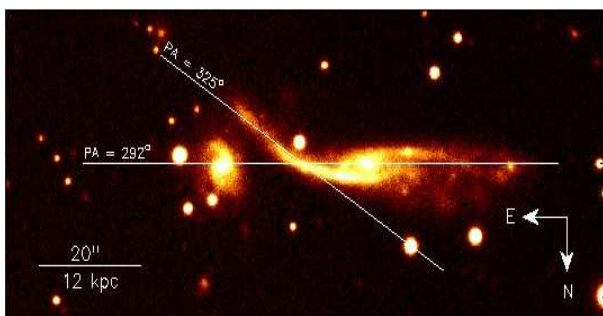


Figura 1- Posições de fendas observadas pelo espectrógrafo GMOS na banda r' da imagem AM1256-433.

Os espectros observados para cada sistema de galáxias foram obtidos em diferentes ângulos de posição de fenda (PA). Para AM1256-433,

PA=292° intercepta os discos de ambas as galáxias AM1256A e PGC543979 e PA=325° corresponde à posição ao longo de um braço da galáxia principal (AM1256A). Na Figura 1 são mostradas estas duas posições de fenda sobrepostas a uma imagem na banda r'.

Para o sistema AM1401-324, o ângulo de posição de fenda PA=294°, corresponde à posição do centro da galáxia principal AM1401A e PA=41° intercepta um dos braços espirais da AM1401A. Na Figura 2, estas posições de fendas podem ser observadas. Para a correção do ruído de leitura do CCD e das diferenças de sensibilidade de pixel a pixel, foram realizadas várias exposições de *bias* e *flat-field*. Para a calibração em comprimento de onda, durante as observações foram obtidos espectros de lâmpadas de Cobre e Argônio (CuAr), com as mesmas configurações que os espectros dos objetos observados. Para a calibração dos espectros em unidades de fluxo, foram obtidos espectros observados das estrelas padrões espectrofotométricos LTT4364, LTT7987 e LTT9239. Estas estrelas foram selecionadas por conveniência de hora, data e proximidade com relação ao objeto de estudo.

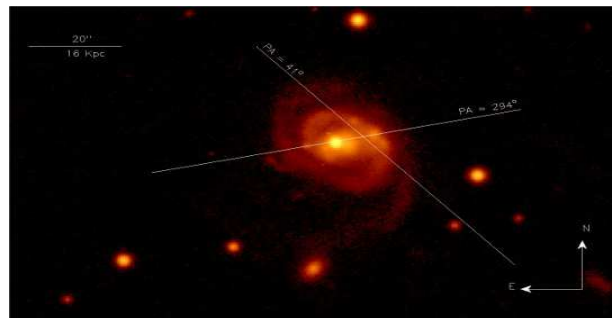


Figura 2- Posições de fendas observadas pelo espectrógrafo GMOS na banda r' da imagem AM1401-324.

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 para minimizar os efeitos dos raios cósmicos. Quatro espectros foram obtidos em cada posição de fenda para se obter uma melhor razão sinal ruído.

Tabela1- Registro das observações

Objetos	Data (UT)	Exp. (s)	PA (°)	$\Delta\lambda$ (Å)
AM1401-324	26/05/07	4 x 600	294	4398-7251
AM1401-324	05/06/07	4 x 600	41	4398-7248
AM1256-433	07/06/07	4 x 600	292	4280-7130
AM1256-433	23/06/07	4 x 600	325	4280-7130

AM1401-324	23/06/07	4 x 600	294	3534-6267
AM1401-324	01/08/08	4 x 600	41	3446-6269

A redução dos dados foi realizada através dos pacotes GEMINI.GMOS e dos pacotes genéricos do software *Image Reduction and Analysis Facility* (IRAF)¹. 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. Os espectros unidimensionais foram extraídos aberturas correspondentes a quatro linhas adjacentes do CCD, resultando em aberturas que representam uma escala física de 1 x 1.73 arcsec². Estas aberturas correspondem a uma região de 596,81 x 688 pc² para AM1256A, 1221,44 x 1407,1 pc² para PGC543979, e 666 x 768 pc² para AM1401A. O centro nominal de cada fenda foi

escolhido para ser o pico do contínuo em $\lambda 5735 \text{ \AA}$.

Cinemática do Gás Ionizado

A partir de linhas emissão presentes nos espectros, como H β , [OIII] $\lambda 4959$ e $\lambda 5007$, [NII] $\lambda 6548$ e $\lambda 6584$, H α $\lambda 6563$, a velocidade radial foi estimada. As medidas dos centróides destas linhas espectrais foram obtidas pela tarefa *splot* do pacote IRAF. Dessa forma, a velocidade radial final encontrada em cada espectro foi estimada das médias individuais das medidas das linhas de emissão, e os erros foram estimados pelo desvio padrão. O perfil espacial do fluxo em H β e do contínuo em $\lambda 5735$ (painel superior) e a velocidade radial média obtida ao longo de cada posição de fenda (painel inferior) são mostrados nas Figuras 3 (AM1256A), 4 (PGC543979), 5 (AM1256B), 6 (AM1401A) e 7 (AM1401B).

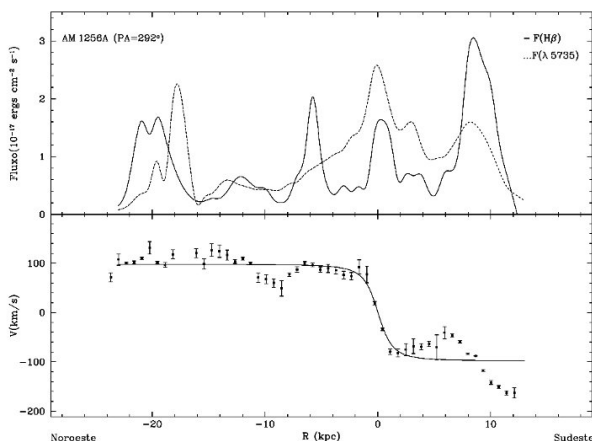


Figura 3- Perfis do fluxo em H β e do contínuo em $\lambda 5735$ observados (em unidades de $10^{17} \text{ ergs cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$) e a velocidade radial média como função da distância galactocêntrica, ao longo da PA=292° para AM1256A. A escala da velocidade corresponde aos valores do modelo e observados, após a subtração da velocidade sistêmica da galáxia, sem correção pela inclinação no plano do céu.

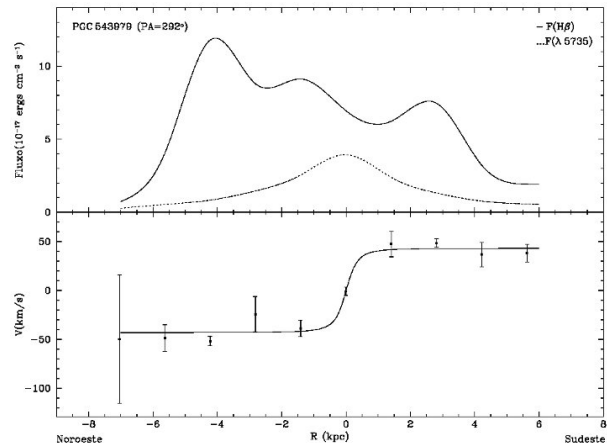


Figura 4- O mesmo da Figura 3, mas para PGC543979.

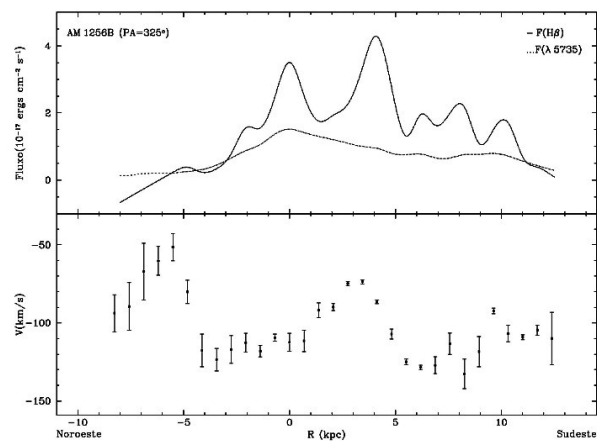


Figura 5- O mesmo da anterior, mas para AM1256B.

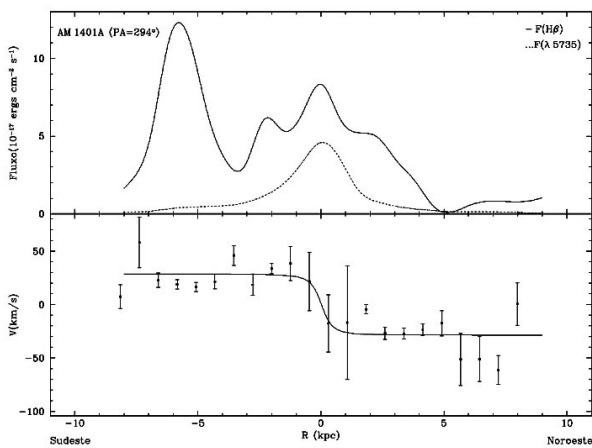


Figura 6- O mesmo da Figura 5, mas para AM1401A.

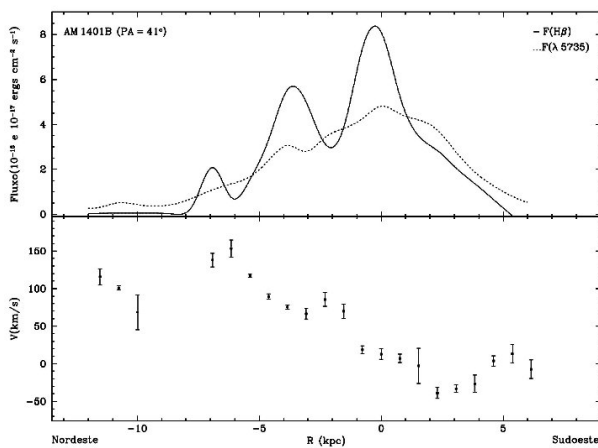


Figura 7- O mesmo da Figura anterior, mas para AM1401B.

Para as galáxias que possuem curva de rotação simétrica, foi adotada uma aproximação simples para a distribuição das velocidades observadas, assumindo que o gás se move sob um potencial gravitacional logarítmico, seguindo órbitas circulares junto ao plano $P(i, \psi_0)$, caracterizada pela inclinação ao plano do céu i e pelo ângulo de posição (PA) da linha dos nodos ψ_0 . Esta suposição resulta em uma velocidade radial circular observada $v(r, \psi)$ no plano do céu, dada por Bertola et al. (1991), como:

$$v(r, \psi) = V_s + \frac{V_0(R - R_0) \cos(\psi - \psi_0) \sin(i) \cos(i)}{\sqrt{(R - R_0)^2 \eta + R_c^2 \cos^2(i)}}$$

$$\text{com } \eta \equiv [\sin^2(\psi - \psi_0) + \cos^2(i) \cos^2(\psi - \psi_0)],$$

sendo V_s a velocidade de recessão da galáxia, R o raio no plano da galáxia, R_0 o centro cinemático, V_0 e R_c os parâmetros que definem a amplitude e

a forma da curva. Esta equação possui seis parâmetros livres, V_0 , V_s , R_c , R_0 , i e ψ_0 , que podem ser determinados pelo ajuste do modelo às curvas de velocidade observadas. No nosso caso, como dispomos somente de duas posições de fenda para cada galáxia, supomos valores iniciais para quatro parâmetros livres, V_0 , V_s , R_c , R_0 , e mantemos valores fixos para a inclinação e o ângulo de posição da linha dos nodos. Os ajustes foram feitos utilizando um algoritmo de ajustes por mínimos quadrados não lineares (Levenberg-Marquardt)

A inclinação para cada galáxia com relação ao plano do céu foi obtida da expressão $i = \cos^{-1}(b/a)$, onde a e b corresponde respectivamente os semi-eixos maior e menor das galáxias. Os semi-eixos maior e menor, assim como o ângulo de posição das linhas dos nodos de cada galáxia foram obtidos a partir das imagens de aquisição na banda r' , ajustando isofotas simples por meio da tarefa STSDAS.ELLIPSE do pacote IRAF. Os resultados dos ajustes das isofotas, com o ângulo de posição do eixo maior (PA) e a inclinação (i) em função da distância projetada ao longo do eixo maior, para AM1256A, PGC543979 e AM1401A, são mostradas nas Figuras 8, 9 e 10, respectivamente.

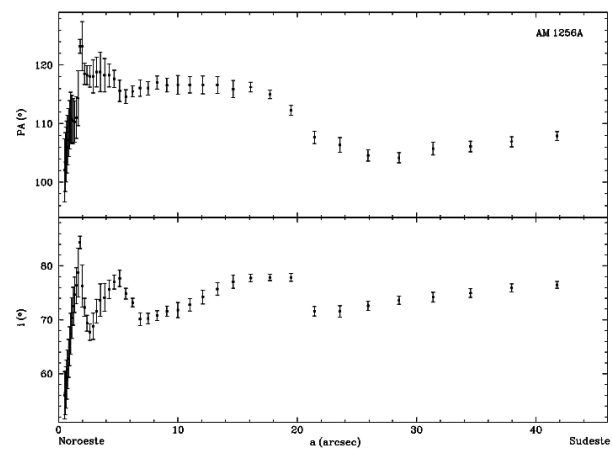


Figura 8- Resultados dos ajustes das isofotas em função da distância ao longo do semi-eixo de AM1256A.

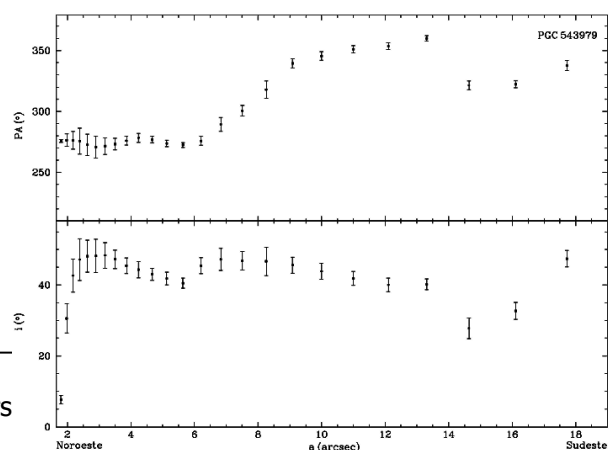


Figura 9- O mesmo da Figura 8, mas para PGC543979.

Para a galáxia primária AM1256A (Figura 8), a inclinação e o ângulo de posição do semi-eixo maior ψ_0 , apresentam variações significativas ao longo do raio. Entretanto, a partir da posição de 23", i e ψ_0 são aproximadamente constantes. Assim, considerando essa região assumimos que o ângulo de posição do semi-eixo maior da galáxia primária é de $\psi_0=116^\circ$ e a inclinação é de 75° .

No caso da PGC543979, o ângulo de posição do eixo maior e a inclinação apresentam variações significativas ao longo do semi-eixo maior. No entanto, entre os intervalos de aproximadamente 10" a 14", que representam as regiões mais externas das isofotas, os valores de ψ_0 e i são aproximadamente constantes. Considerando essas regiões, os valores encontrados para a inclinação do disco e o ângulo de posição da linha dos nodos são de $i=45^\circ$ e $\psi_0=310^\circ$. Para AM1401A, ψ_0 e i também possuem variações significativas ao longo da posição do semi-eixo maior da galáxia, mas para regiões maiores que 30" esses valores são quase constantes. Considerando essa região assumimos $i=59^\circ$ e $\psi_0=270^\circ$.

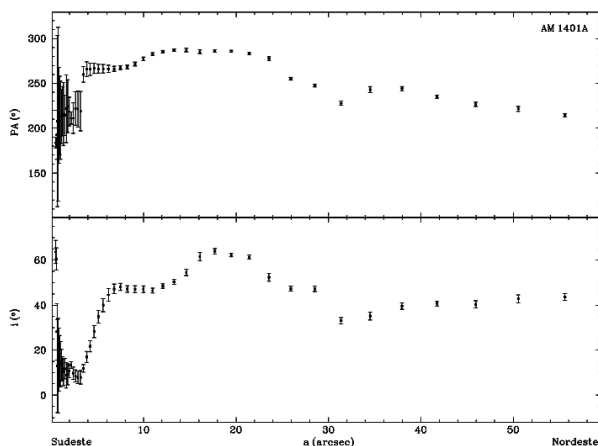


Figura 10- O mesmo da Figura 9, mas para AM1401A.

O modelo da curva de rotação descrito anteriormente resulta em uma velocidade heliocêntrica (V_s) obtida de 9231 km/s para AM1256A. As velocidades radiais observadas ao longo do eixo maior são bem representadas pelo modelo. Esta curva de rotação é típica de galáxias espirais e apresenta uma amplitude de velocidade observada de 100 km/s (Figura 3). Pequenos desvios da curva de rotação são observados, os quais são frequentemente encontrados em galáxias em interação.

Em relação à galáxia isolada PGC543979, que se encontra no campo visual do sistema AM1256-433, uma velocidade heliocêntrica aproximada de 18896 km/s foi determinada. A curva de rotação encontrada ao longo da $PA=292^\circ$ possui uma amplitude de velocidade observada de 49 km/s. Esta galáxia encontra-se visualmente ao lado da galáxia primária do sistema AM1256-433, mas não pertence a este sistema de galáxias, pois estas possuem uma diferença de velocidade de aproximadamente 9700 km/s. Entretanto, Donzelli & Pastoriza (1997) e Ferreira et al. (2004), equivocadamente afirmam que a galáxia PGC543979 possui uma velocidade similar à da galáxia primária AM1256A, e que portanto, esta pertence ao sistema de galáxias AM1256-433. No entanto, a galáxia primária AM1256A ($V_s=9231$ km/s) interage com ESO 269-IG 022 NED02 ($V_s=9183$ km/s) e com ESO 269-IG 022 NED01 ($V_s=9215$ km/s). Para a galáxia AM1256-433, ao longo da posição de fenda $PA=325^\circ$, desvios significativos são encontrados ao longo da curva de rotação.

Para o sistema AM1401-324, a curva de rotação ao longo da posição de fenda $PA=294^\circ$ (painel inferior, Figura 6) da galáxia AM1401A, apresenta pequenos desvios na curva de rotação, que são provavelmente devido às interações entre as galáxias. Este desvio se encontra a uma distância do seu núcleo na direção sudeste de aproximadamente de 2kpc. A velocidade heliocêntrica obtida para galáxia AM1401A é de 10310 km/s e uma amplitude de velocidade observada foi de 10 km/s. A velocidade observada para AM1401A, encontrada por Donzelli & Pastoriza (1997) e Ferreira et al. (2004) é de 10321 km/s, o que é compatível com nosso.

O estudo da rotação galáctica não é importante apenas na determinação das posições e deslocamentos dos objetos no disco, mas também é uma das maneiras mais simples de se obter informações sobre a distribuição das massas em galáxias espirais. Uma estimativa da massa dinâmica pode ser obtida, assumindo que a massa dentro de um determinado raio é dada por $M(R)=RV^2/G$. A massa dinâmica estimada para a galáxia primária AM1256A é de $6 \times 10^{10} M_\odot$, num raio de 23 kpc e uma amplitude de velocidade deprojetada de 105 km/s. No caso da PGC543979 uma massa de $7,3 \times 10^{10} M_\odot$ para uma amplitude de velocidade deprojetada de 67 km/s, num raio de 7 kpc foi obtida. AM1401A possui uma massa de $3,8 \times 10^9 M_\odot$, num raio de 9 kpc de distância ao núcleo, com uma amplitude de velocidade deprojetada de 44 km/s.

Importante enfatizar que o raio máximo que podemos observar em espectros de emissão do gás é certamente menor que o raio da galáxia.

Assim, nossas estimativas fornecem um limite inferior da massa de cada galáxia.

Agradecimentos

Deise A. Rosa, agradece ao departamento do IP&D /Univap, CAPES e FAPESP, que proporcionaram e proporcionam bolsa auxílio, para realização do curso de mestrado em Física e Astronomia e aos orientadores pela paciência e dedicação.

Conclusão

Um estudo observacional sobre os efeitos das interações na cinemática do gás ionizado dos pares de galáxias AM1256-433 e AM1401-324, foi realizada. Os dados consistem de espectros de fenda longa na faixa de comprimento de onda de 3446-7251 Å obtidos com o espectrógrafo multi-objeto do Gemini Sul (GMOS). As principais conclusões são as seguintes:

As curvas de rotação foram obtidas somente para as galáxias primárias do pares. Para as galáxias AM1256A, PGC543979 e AM1401A a amplitude da velocidade deprojetada é de 105 km/s, 67 km/s e 44 km/s, respectivamente. Uma estimativa da massa dinâmica foi derivada para cada galáxia, usando a amplitude da velocidade deprojetada de cada galáxia. Para a galáxia primária AM1256A, sua massa dinâmica é de $6 \times 10^{10} M_{\odot}$ num raio de 23kpc; para PGC543979, a massa dinâmica estimada é de $7,3 \times 10^{10} M_{\odot}$ num raio de 7kpc; e para AM1401A, sua massa dinâmica encontrada num raio de 9kpc é de $3,8 \times 10^9 M_{\odot}$.

Os desvios de velocidades radiais das curvas de rotação observadas nas galáxias são provavelmente devido à interação com as galáxias secundárias.

Referências

BARTON E.J.; G. M. J.; K. S.J., Stellar Populations and Dust in Galaxies in Close Pairs: Measuring the Impact of Interactions, **Astrophysical Journal**, 530-660, 2000.

BERTOLA F.; B. D.; D. J.; S. L.; de Z. T., Testing the gravitational field in elliptical galaxies - NGC 5077 , **Astrophysical Journal** , 373, 369, 1991.

DONZELLI C. J.; P. M. G., Optical spectroscopic properties of a sample of interacting galaxies, **Astrophysical Journal**, 111, 181, 1997.

GELLER M. J.; K. S. J.; B. E. J.; J.T. H.; K. L. J., Infrared Properties of Close Pairs of Galaxies, **Astronomical Journal**, 132, 2243, 2006.

FERREIRO D. L.; P. M. G., Sample of minor merger of galaxies: Optical CCD surface photometry and HII region properties, **Astronomy & Astrophysics**, 428, 837, 2004 (FP04).

KRABBE, A. C.; P. M. G.; C. W.; I. R.; D. L. F. Kinematics and physical properties of southern interacting galaxies: the minor merger AM2306-721, **Monthly Notices of the Royal Astronomical Society**, 1593, 1604, 2008.

LARSON R. B.; T. B.M. Star formation rates in normal and peculiar galaxies, **Astrophysical Journal**, 219, 46, 1978.

MIHOS, J. C.; H. L. Gasdynamics and Starbursts in Major Mergers, **Astrophysical Journal**, 464, 641, 1996.

RUBIN, V. C.; W. A. H.; K. J. D.P. Kinematic Disturbances in Optical Rotation Curves among 89 Virgo Disk Galaxies, **Astronomical Journal**, 118, 236, 1999.

STRUCK C. Galaxy collisions. **Phys. Rep.**, 321, 1, 1999.

WOODS D. F.; G.M. J., Minor Galaxy Interactions: Star Formation Rates and Galaxy Properties, **Astronomical Journal**, 134, 527, 2007.