

# O EFEITO DA ÓPTICA ADAPTATIVA E DE TÉCNICAS DE TRATAMENTO DE DADOS NA DETERMINAÇÃO DE MASSAS DE BURACOS NEGROS SUPERMASSIVOS EM NÚCLEOS DE GALÁXIAS

Andre Thomas Monteiro <sup>1</sup>; Roberto Bertoldo Menezes <sup>2</sup>

<sup>1</sup> Aluno de Iniciação Científica do Instituto Mauá de Tecnologia (IMT);

<sup>2</sup> Professor do Instituto Mauá de Tecnologia (IMT).

**Resumo.** *O objetivo deste projeto é avaliar os efeitos da óptica adaptativa (adaptive optics – AO) bem como do uso de técnicas de tratamento, como a deconvolução de Richardson-Lucy. AO é uma tecnologia usada para amenizar os efeitos da distorção atmosférica na observação de objetos astronômicos. Neste trabalho foi feita a determinação da massa do buraco negro supermassivo (supermassive black hole – SMBH) central na galáxia NGC 4699. Para isso foram utilizados dados do Integral Field Unit (IFU) do Gemini Multi-Object Spectrograph (GMOS) no telescópio Gemini Sul, dois cubos de dados, um sem nenhum tratamento e o outro após a aplicação de um processo de tratamento de dados. A massa do SMBH foi determinada por meio da análise da cinemática estelar. Os resultados demonstram que as técnicas de tratamento aplicadas ao cubo, em particular a deconvolução de Richardson-Lucy, proporcionaram uma redução significativa na incerteza da massa do SMBH, sem causar quaisquer prejuízos significativos aos dados.*

## Introdução

A nova geração de telescópios gigantes que está sendo desenvolvida proporcionará um grande avanço em diferentes áreas da astrofísica, focadas, por exemplo, no estudo de exoplanetas e da formação e evolução de galáxias. Um exemplo desses futuros telescópios gigantes é o *Giant Magellan Telescope* (GMT), que está sendo construído no Chile e que terá um diâmetro total de 25 m. Diversas instituições brasileiras, incluindo o Instituto Mauá de Tecnologia, estão envolvidas no projeto do GMT. Um ponto essencial do GMT será a chamada óptica adaptativa (*Adaptive Optics – AO*), que consiste em um mecanismo no qual atuadores deformam um dos espelhos do telescópio, de modo a compensar as distorções nas imagens causadas pela atmosfera terrestre, resultando assim em dados com maiores resoluções espaciais. Sem a AO, os dados obtidos com o GMT, ou outros telescópios gigantes, apesar do seu tamanho, não teriam a qualidade necessária para serem cientificamente úteis.

Uma das áreas da astrofísica que será beneficiada pelos dados que serão fornecidos pelos futuros telescópios gigantes é aquela focada nos estudos de núcleos de galáxias. Com os dados que temos disponíveis atualmente, acredita-se que buracos negros supermassivos (*supermassive black holes – SMBHs*), com massas entre  $10^6 M_{\odot}$  e  $10^{10} M_{\odot}$  (sendo  $M_{\odot}$  a massa solar), estejam presentes nos núcleos de todas as galáxias massivas (Kormendy & Richstone, 1995; Richstone et al., 1998). São claras as correlações que as massas desses SMBHs apresentam com certos parâmetros da galáxia hospedeira, como, por exemplo, a dispersão de velocidades estelar do bojo galáctico, originando a chamada relação  $M - \sigma$  (Ferrarese & Merritt, 2000; Gebhardt et al., 2000; Gültekin et al., 2009). É surpreendente a existência de tal correlação, uma vez que revela uma conexão entre o SMBH central e áreas muito distantes na galáxia que estão fora da esfera de influência gravitacional relevante dele. Uma possível explicação é que ocorre uma coevolução entre os SMBHs centrais e as galáxias hospedeiras. Entretanto, como ainda não se tem um censo estatisticamente completo, essa e muitas outras questões permanecem em aberto.

A determinação de massas de SMBHs é de fundamental importância para agregar dados e contribuir com a formação deste censo. Para se fazer essa determinação pode-se usar

a cinemática estelar ou do gás ao redor do núcleo. Para isso, tenta-se reproduzir a cinemática observada, incluindo valores da velocidade radial e da dispersão de velocidades ao longo de um campo de visão, assumindo-se diferentes parâmetros (como a massa do SMBH). Entretanto, essa análise cinemática apresenta uma série de desvantagens. No caso do gás, por exemplo, pode haver a influência de movimentos não keplerianos (fluxos de gás para dentro ou para fora do núcleo galáctico), o que pode inviabilizar a simulação. Já a análise da cinemática estelar só pode ser feita com objetos com elevado brilho superficial e sem grande obscurecimento por poeira. Além disso essas duas técnicas só podem ser aplicadas a objetos relativamente próximos, devido à qualidade dos dados atualmente disponíveis (Ferrarese & Ford, 2005; Kormendy & Ho, 2013). Por conta dessa limitação nas resoluções espaciais, determinações das massas de SMBHs foram feitas apenas para galáxias situadas a distâncias de, no máximo, 150 Mpc.

Uma das técnicas observacionais mais úteis para a determinação de massas de SMBHs em núcleos de galáxias é a espectroscopia 3D, que fornece os chamados cubos de dados, que nada mais são do que conjuntos de dados com duas dimensões espaciais e uma dimensão espectral. Dessa forma, os cubos de dados possibilitam a obtenção de imagens de um objeto em diferentes comprimentos de onda, bem como de espectros de diferentes regiões espaciais do objeto. Utilizando-se cubos de dados das regiões centrais de galáxias, é possível mapear as velocidades do gás ou das estrelas ao redor dos SMBHs e, com uma modelagem apropriada, obter as massas desses últimos.

Neste trabalho foi determinada a massa do SMBH central da galáxia NGC 4699, antes e depois da aplicação de um processo de tratamento de dados, que inclui técnicas como a filtragem espacial de Butterworth e principalmente a deconvolução de Richardson-Lucy, a qual melhora a resolução espacial da observação e tem um efeito bastante similar ao da AO. Assim, esse trabalho tem como objetivo avaliar o efeito que a melhora na resolução espacial das observações proporcionada pela deconvolução de Richardson-Lucy (e que também será proporcionada pela AO de futuros telescópios gigantes) tem na precisão da determinação das massas de SMBHs em núcleos de galáxias. Essa técnica de tratamento de dados não costuma ser utilizada nesse tipo de análise. Sendo assim, nesse trabalho, foi proposta uma metodologia de tratamento de dados inovadora para esse contexto, que deverá ter um impacto significativo em estudos nessa área.

## Material e Métodos

Neste trabalho foi utilizado um cubo de dados (proveniente de um banco de dados público em '<https://archive.gemini.edu/searchform>') da região central da galáxia NGC 4699, no visível, obtido com o *Integral Field Unit* (IFU) do *Gemini Multi-Object Spectrograph* (GMOS) do telescópio Gemini Sul, que possui 8 m de diâmetro. Foi aplicado ao cubo de dados um processo de tratamento de dados que inclui duas técnicas: a filtragem espacial de Butterworth (Gonzalez & Woods, 2002) e a deconvolução de Richardson-Lucy (Richardson, 1972; Lucy, 1974). A filtragem espacial de Butterworth é aplicada a cada imagem do cubo e tem como principal função remover ruídos de alta frequência espacial, sem comprometer os dados. A deconvolução de Richardson-Lucy também é aplicada a cada imagem do cubo e tem como função aumentar a resolução espacial das observações. A filtragem espacial de Butterworth tem efeito secundário nesse trabalho. A deconvolução de Richardson-Lucy, por outro lado, é muito mais significativa, reproduzindo os efeitos da AO.

Para analisar o cubo de dados foi aplicado o método *Penalized Pixel Fitting* (pPXF) (Capellari, 2017), que consiste no ajuste do espectro estelar de um objeto com uma combinação de espectros de populações estelares de uma determinada base. Tais espectros são convoluídos com uma expansão de Gauss-Hermite, com o propósito de reproduzir adequadamente os perfis das linhas de absorção (geradas pelas atmosferas das estrelas) observadas. Com isso o pPXF fornece, para cada espectro, os valores dos seguintes

parâmetros: velocidade radial estelar ( $V_*$ ), dispersão de velocidades estelar ( $\sigma_*$ ) e os momentos de Gauss-Hermite  $h_3$  e  $h_4$ . Como esse procedimento foi aplicado ao espectro correspondente a cada pixel espacial (spaxel) do cubo de dados, foi possível construir os mapeamentos de todos os parâmetros cinemáticos determinados. No entanto para esse trabalho utilizou-se apenas o mapeamento de  $V_*$ . O pPXF fornece ainda um espectro estelar sintético para cada espectro ajustado. A base de espectros de populações estelares utilizada para os ajustes foi baseada na *Medium-resolution Isaac Newton Telescope Library of Empirical Spectra* (MILES) (Sánchez-Blázquez et al., 2006). Também foi construído o mapeamento dos valores da incerteza de  $V_*$ , a qual foi determinada por meio de um procedimento de Monte Carlo. Para cada espectro, o espectro estelar sintético obtido com o pPXF foi subtraído do espectro original, resultando em um espectro (de emissão) contendo apenas linhas de emissão (emitidas pelo gás interestelar na galáxia observada). A partir do espectro de emissão, foi construído um histograma com os valores representativos do ruído espectral e ajustou-se uma função gaussiana ao mesmo. Após isso, foram elaboradas distribuições de ruído aleatórias, seguindo uma distribuição de probabilidade gaussiana com a mesma largura da gaussiana ajustada ao histograma do ruído espectral. Essas distribuições de ruído aleatórias foram adicionadas ao espectro estelar sintético fornecido pelo pPXF, originando “espectros ruidosos”. O pPXF foi então aplicado a cada um desses espectros ruidosos. A incerteza de  $V_*$  foi tomada como sendo o desvio padrão dos valores de  $V_*$  obtidos com o pPXF aplicado aos espectros ruidosos.

O método de Jeans foi empregado para determinar a massa do SMBH da galáxia analisada neste trabalho (NGC 4699). O algoritmo baseado no método de Jeans utilizado nesse trabalho foi desenvolvido por Cappellari (2008) e assume simetria axial na galáxia. Esse algoritmo utiliza uma solução das equações de Jeans para modelar o potencial gravitacional da região central da galáxia. Para isso é necessário o conhecimento da distribuição da massa estelar nessa região central. A fim de avaliar tal distribuição aplicou-se o *Multi-Gaussian Expansion* (MGE) (Cappellari, 2002), que consiste no ajuste da imagem do objeto observado com uma soma de funções gaussianas bidimensionais. O resultado desse procedimento é o perfil de brilho da região central da galáxia, o qual pode ser convertido em perfil de massa quando multiplicado por uma razão massa-luminosidade (M/L) apropriada.

O procedimento para a determinação da massa do SMBH foi executado da seguinte maneira: após a determinação do perfil de brilho da galáxia, com o método MGE, o método de Jeans foi aplicado tomando-se 5 parâmetros livres: inclinação (em relação à linha de visada) do disco estelar em rotação ao redor do SMBH ( $i$ ); massa do SMBH ( $M_{BH}$ ); razão M/L; anisotropia radial ( $\beta$ ) das gaussianas utilizadas no ajuste com o MGE; anisotropia tangencial ( $\gamma$ ) das gaussianas utilizadas no ajuste com o MGE. Esses dois últimos parâmetros não tiveram grande relevância nos ajustes e, por conta disso, não serão discutidos em maiores detalhes nesse trabalho. Foram feitas diferentes combinações de valores de todos esses parâmetros e o método de Jeans foi aplicado com cada uma dessas combinações. O resultado de cada aplicação foi o mapa simulado dos valores de  $V_*$ . Foi calculado então o valor do  $\chi^2$  entre o mapa observado de  $V_*$  e cada um dos mapas simulados, de acordo com a seguinte fórmula:

$$\chi^2 = \sum_i \frac{(V(sim)_i - V(obs)_i)^2}{\sigma_{v_i}^2}, \quad (1)$$

onde  $V(sim)_i$  é o valor da velocidade radial estelar no pixel  $i$  do mapa simulado,  $V(obs)_i$  é o valor da velocidade radial estelar no pixel  $i$  do mapa obtido com o pPXF e  $\sigma_{v_i}$  é a incerteza da velocidade radial estelar no pixel  $i$  do mapa obtido com o pPXF. Considerou-se a modelagem com o menor valor obtido para  $\chi^2$  como a mais adequada e o valor de  $M_{BH}$  utilizado na

modelagem em questão foi tomado como sendo o representativo. A modelagem acima foi aplicada ao cubo antes e depois do processo de tratamento de dados.

Um ponto de grande importância nessa análise consistiu na determinação das incertezas dos valores obtidos para a massa do SMBH. Para cada cubo de dados, tal determinação foi feita da seguinte maneira: tomaram-se os valores das massas do SMBH cujas simulações apresentaram um  $\chi^2$  tal que  $\chi^2 - \chi_{min}^2 < 1$  (onde  $\chi_{min}^2$  corresponde ao menor valor de  $\chi^2$  obtido para o cubo de dados em questão). Construiu-se um histograma com tais valores e ajustou-se uma gaussiana ao histograma obtido. O desvio padrão da gaussiana ajustada foi tomado como sendo a incerteza da massa do SMBH (de Rosa et al., 2011).

## Resultados e Discussão

Após a aplicação dos métodos descritos acima, foram obtidos diversos resultados. Por meio da aplicação do pPXF foram obtidos os mapas de  $V_*$  (km/s) dos cubos de dados. A Figura 1 mostra o mapeamento de  $V_*$ , bem como a curva de valores extraída ao longo do eixo cinemático (linha passando pelos pontos de máximo e mínimo no mapa de  $V_*$ ) da galáxia (NGC 4699), antes do processo de tratamento de dados ser empregado. A Figura 2 mostra os mesmos dados, porém para o cubo de dados após o processo de tratamento de dados ser empregado. Vale mencionar que, nessas figuras, velocidades positivas indicam estrelas se afastando do observador, enquanto velocidades negativas mostram estrelas se aproximando do observador. Assim, os mapeamentos mostrados nas Figuras 1 e 2 revelam claramente o disco de estrelas em rotação ao redor do SMBH central na galáxia NGC 4699.

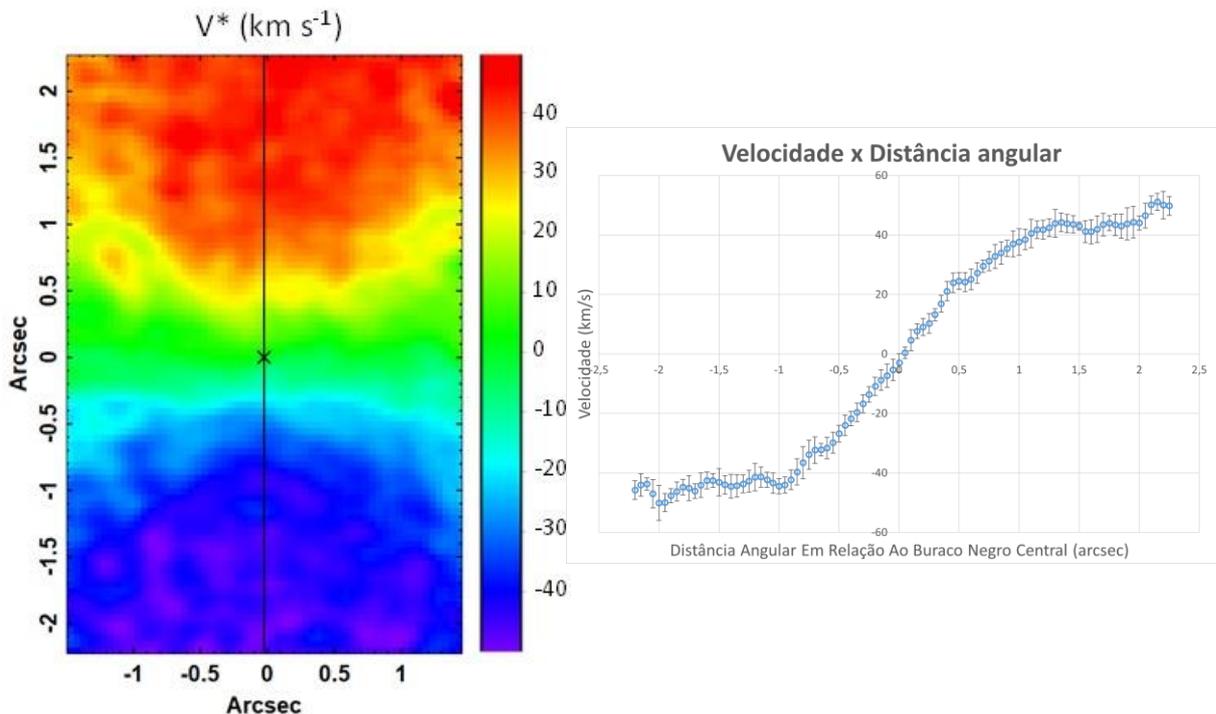


Figura 1 – Mapa de  $V_*$  obtido a partir do cubo de dados da região central da galáxia NGC 4699, antes da aplicação do processo de tratamento de dados. A cruz representa a posição do SMBH e a linha corresponde ao eixo cinemático. Ao lado está a curva de  $V_*$  extraída ao longo do eixo cinemático.

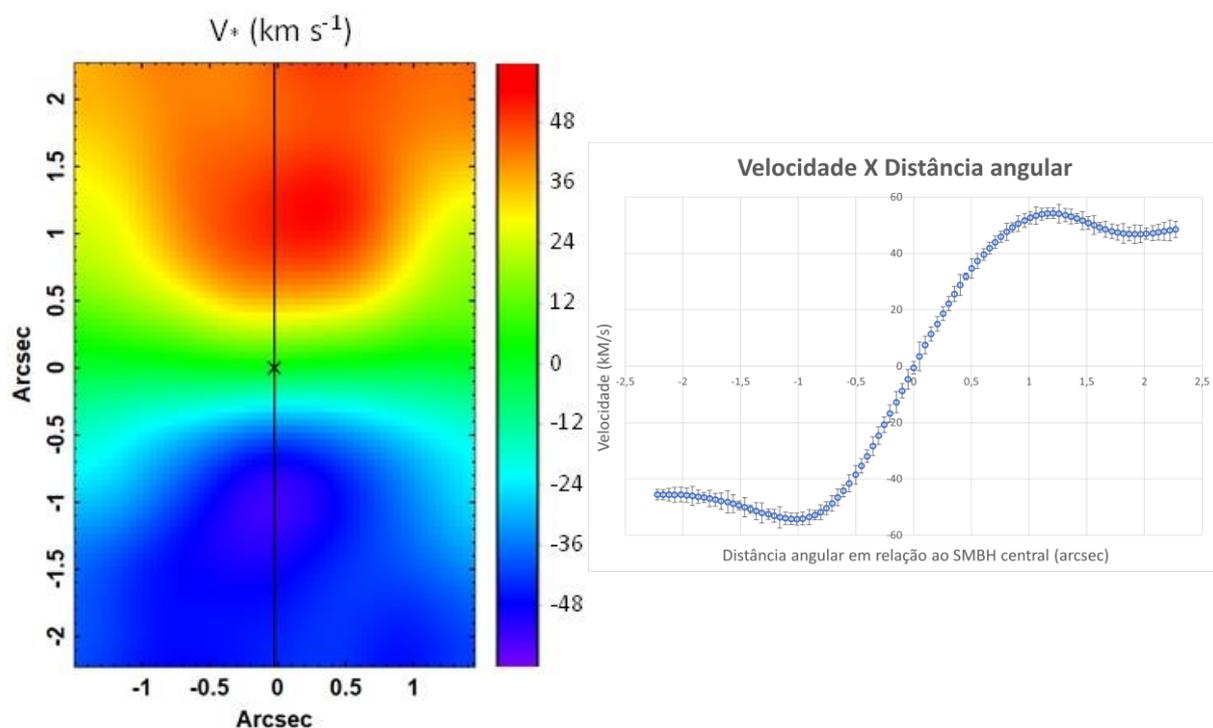


Figura 2 – Mapa de  $V_*$  obtido a partir do cubo de dados da região central da galáxia NGC 4699, após a aplicação do processo de tratamento de dados. A cruz representa a posição do SMBH e a linha corresponde ao eixo cinemático. Ao lado está a curva de  $V_*$  extraída ao longo do eixo cinemático.

As Figuras 3 e 4 mostram os melhores mapas de  $V_*$  simulados com o método de Jeans, antes e depois do processo de tratamento de dados, respectivamente. A Figura 5 mostra os histogramas com os valores da massa do SMBH cujas simulações (tanto para o cubo de dados não tratado quanto para o cubo de dados tratado) apresentaram  $\chi^2 - \chi_{min}^2 < 1$ .

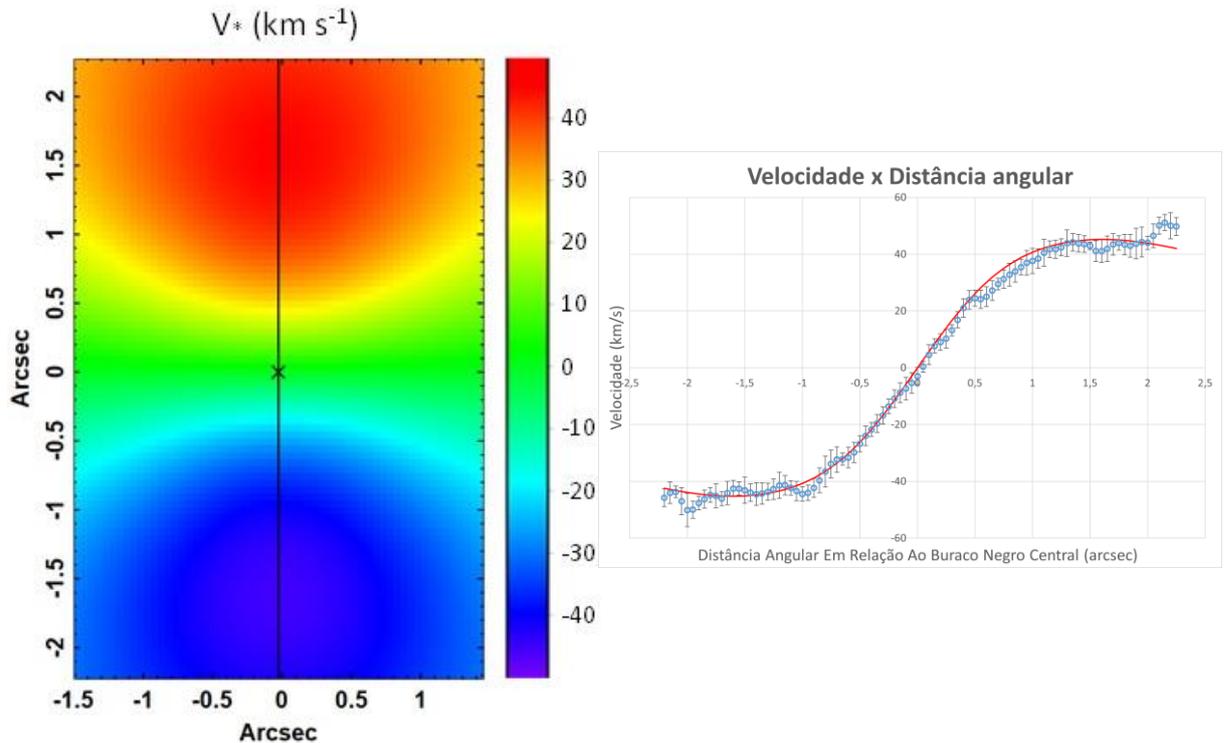


Figura 3 – Melhor mapa simulado de  $V_*$ , obtido a partir da aplicação do método de Jeans ao cubo de dados da região central da galáxia NGC 4699, antes da aplicação do processo de tratamento de dados. A cruz representa a posição do SMBH e a linha corresponde ao eixo cinemático. Ao lado estão as curvas de  $V_*$  extraídas ao longo do eixo cinemático: em vermelho, a curva da simulação e, em azul, a curva do mapa obtido através do pPXF.

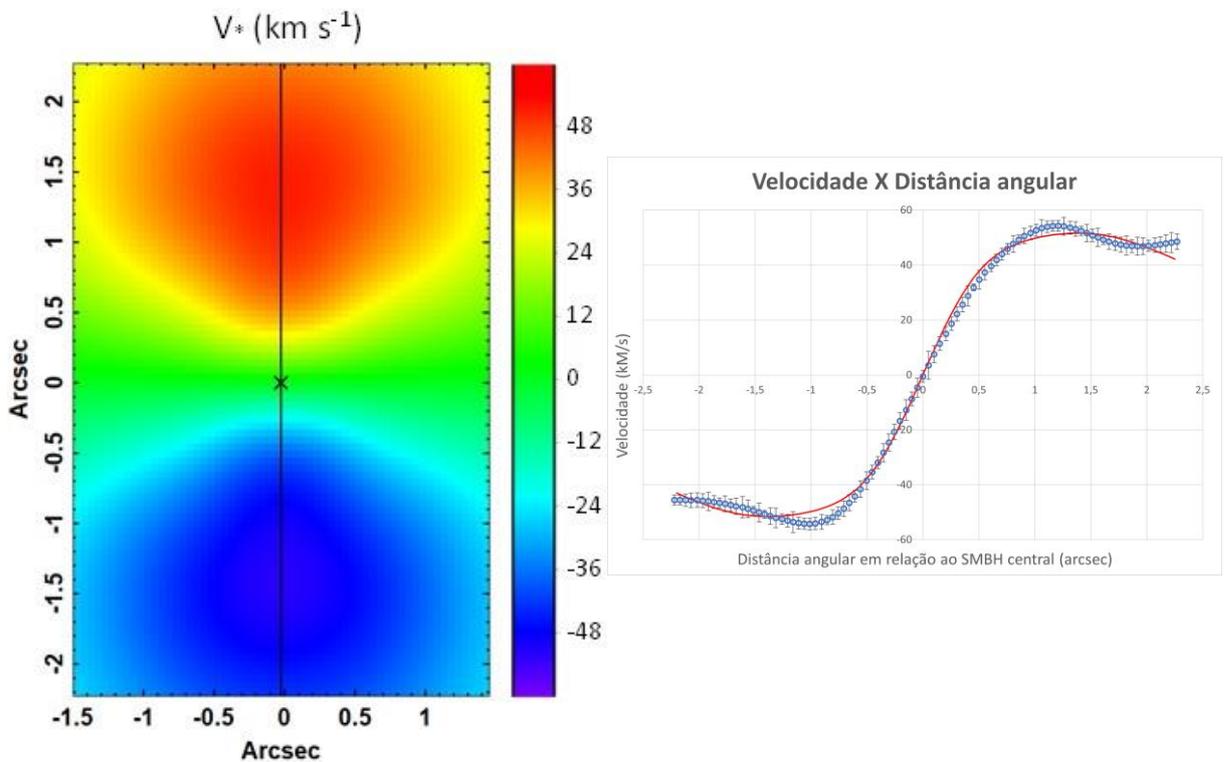


Figura 4 – Melhor mapa simulado de  $V_*$ , obtido a partir da aplicação do método de Jeans ao cubo de dados da região central da galáxia NGC 4699, após da aplicação do processo de tratamento de dados. A cruz representa a posição do SMBH e a linha corresponde ao eixo cinemático. Ao lado estão as curvas de  $V_*$  extraídas ao longo do eixo cinemático: em vermelho, a curva da simulação e, em azul, a curva do mapa obtido através do pPXF.

Nas Figuras 1 e 2 é nítido o efeito produzido pelo processo de tratamento de dados aplicado ao cubo, principalmente pela deconvolução de Richardson-Lucy, que ilustra o efeito da AO neste trabalho. Essa diferença será tratada de maneira mais objetiva com os próximos resultados.

Os valores da massa do SMBH central, fornecidos pelo método de Jeans aplicado ao cubo de dados antes e depois do processo de tratamento foram, respectivamente  $(3,3 \pm 1,3) \cdot 10^8 M_{\odot}$  e  $(1,4 \pm 0,8) \cdot 10^8 M_{\odot}$ . Tais valores são compatíveis em  $1\sigma$ . Também é possível perceber que a incerteza do valor obtido a partir do cubo de dados tratado é aproximadamente 38,5% menor do que o valor obtido a partir do cubo de dados não tratado.

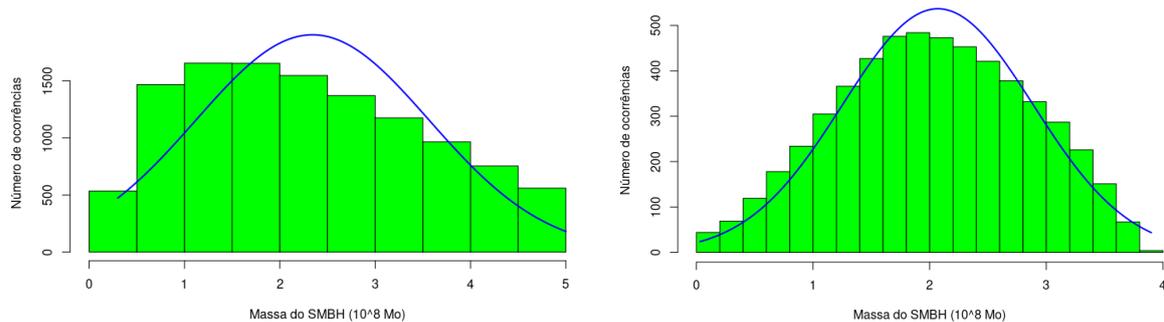


Figura 5 – Histogramas com os valores de  $M_{BH}$  cujas simulações apresentaram  $\chi^2 - \chi_{min}^2 < 1$ , obtidos a partir das modelagens dos cubos de dados de NGC 4699, antes (esquerda) e após (direita) a aplicação do processo de tratamento de dados.

## Conclusões

Neste trabalho foi feito um estudo para avaliar, em linhas gerais, o efeito da AO na determinação da massa de SMBHs centrais de galáxias. Para isso foi feita uma análise do cubo de dados, no visível, da região central da galáxia NGC 4699, obtido com o GMOS/IFU do telescópio Gemini Sul. Os valores obtidos para a massa do SMBH, juntamente com as incertezas, mostram claramente que o método de tratamento de dados, em particular a deconvolução de Richardson-Lucy (que possui um efeito análogo ao da AO), reduziu significativamente a incerteza associada, sem comprometer os resultados, uma vez que os valores encontrados, com e sem a aplicação do tratamento de dados, são compatíveis em  $1\sigma$ . Esses resultados demonstram a importância que a deconvolução de Richardson-Lucy e a AO poderão ter para a análise de massas de SMBHs, bem como para outras análises que dependam de uma alta resolução espacial dos dados.

## Referências Bibliográficas

- Cappellari, M. 2002, MNRAS, 333, 400  
 Cappellari, M. 2008, MNRAS, 390, 71  
 Cappellari, M. 2017, MNRAS, 466, 798  
 de Rosa, G., Decarli, R., Walter, F., Fan, X., Jiang, L., Kurk, J., Pasquali, A. & Rix, H. W. 2011, ApJ, 739, 56  
 Ferrarese, L. & Ford, H. 2005, *Space Science Reviews*, 116, 523  
 Ferrarese, L. & Merritt, D. 2000, ApJ, 539, L9  
 Gebhardt, K., Bender, R., Bower, G., Dressler, A., Faber, S. M., Filippenko, A. V., Green, R., Grillmair, C., Ho, L. C., Kormendy, J., Lauer, T. R., Magorrian, J., Pinkney, J., Richstone, D. & Tremaine, S. 2000, ApJ, 539, L13

- Gonzalez, R. C. & Woods, R. E. 2002, *Digital Image Processing*, 2<sup>nd</sup> edition, Prentice-Hall, Englewood Cliffs, NJ
- Gültekin, K., Richstone, D. O., Gebhardt, K., Lauer, T. R., Tremaine, S., Aller, M. C., Bender, R., Dressler, A., Faber, S. M., Filippenko, A. V., Green, R., Ho, L. C., Kormendy, J., Magorrian, J., Pinkney, J. & Siopis, C. 2009, *ApJ*, 698, 198
- Kormendy, J. & Ho, L. C. 2013, *ARA&A*, 51, 511
- Kormendy, J. & Richstone, D. 1995, *ARA&A*, 33, 581
- Lucy, L. B. 1974, *AJ*, 79, 745
- Richardson, W. H. 1972, *JOSA*, 62, 55
- Richstone, D., Ajhar, E. A., Bender, R., Bower, G., Dressler, A., Faber, S. M., Filippenko, A. V., Gebhardt, K., Green, R., Ho, L. C., Kormendy, J., Lauer, T. R., Magorrian, J. & Tremaine, S. 1998, *Nature*, 385, A14
- Sánchez-Blázquez, P., Peletier, R. F., Jiménez-Vicente, J., Cardiel, N., Cenarro, A. J., Falcón-Barroso, J., Gorgas, J., Selam, S. & Vazdekis, A. 2006, *MNRAS*, 371, 703