

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
INSTITUTO DE FÍSICA
DEPARTAMENTO DE ASTRONOMIA**

***Feeding e feedback em
rádio galáxias do Universo local***¹

Guilherme dos Santos Couto

Tese de doutorado realizado sob orientação da Professora Dra. Thaisa Storchi-Bergmann e apresentada ao Programa de Pós-Graduação do Instituto de Física da UFRGS em preenchimento parcial dos requisitos para a obtenção do título de Doutor em Ciências.

Porto Alegre, RS, Brasil

27 de Outubro de 2016

¹Trabalho Financiado pelo Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq).

Resumo

Apresentamos dados óticos de espectroscopia de campo integral dos kiloparsecs centrais de quatro rádio galáxias do Universo local ($z < 0.07$), Arp 102B, Pictor A, 3C 33 e 4C +29.30, obtidos com o instrumento GMOS-IFU dos telescópios Gemini. Estes dados foram utilizados para a análise da excitação e cinemática do gás através de mapas bi-dimensionais. Utilizando as distribuições de fluxo das linhas de emissão, identificamos emissão estendida em gás ionizado até as bordas do campo observado, que tem campo de visão de $\sim 3.5'' \times 5''$, correspondendo a $1.7\text{kpc} \times 2.5\text{kpc}$ para Arp 102B, $2.5\text{kpc} \times 3.4\text{kpc}$ para Pictor A, $4.0\text{kpc} \times 5.8\text{kpc}$ para 3C 33 e $4.3\text{kpc} \times 6.2\text{kpc}$ para 4C +29.30. As características mais marcantes do gás emissor são as presenças de estruturas semelhantes a braços espirais e barras. Razões de linha indicam que tanto fótons provenientes da fonte nuclear quanto choques originados na interação do jato rádio com o gás circumnuclear são mecanismos de excitação do gás. As razões de linhas mostram valores típicos de Seyferts para as galáxias 3C 33 e 4C +29.30, enquanto que valores intermediários entre Seyfert e LINER são observados em Arp 102B. A galáxia Pictor A apresenta baixos valores de $[\text{N II}]/\text{H}\alpha = 0.15 - 0.25$, esperado para regiões H II. Sugerimos que estes valores são observados devido à baixa metalicidade do gás ($12+\log(\text{O}/\text{H}) = 8.39$). Os mapas de velocidade centróide mostram que a cinemática do gás ionizado é dominada por rotação somente nas galáxias Arp 102B e 3C 33. *Outflows* são observados nas galáxias Arp 102B, 3C 33 e 4C +29.30. As taxas de *outflow* variam de $0.32 - 0.49 M_{\odot} \text{ano}^{-1}$, mas a potência destes *outflows* é pequena, variando de $0.04 - 0.07\%$ da luminosidade bolométrica do AGN, indicando que o *feedback* tem pouco impacto na evolução das galáxias hospedeiras. As altas massas de gás ionizado, que variam de $7.4 \times 10^7 M_{\odot}$ a $4.6 \times 10^8 M_{\odot}$, e o fato destas galáxias serem “*early-type*”, sugerem uma origem externa para o gás. De fato, evidências de interação com galáxias vizinhas são observadas em Arp 102B, Pictor A e 4C +29.30. Sugerimos que a captura desta massa tenha sido o gatilho da atividade nuclear nestas galáxias, sendo que as altas massas não só alimentam o SMBH mas podem ser fonte de formação de novas estrelas.

Abstract

We present integral field spectroscopic data covering the inner kiloparsecs of four radio galaxies of the local Universe ($z < 0.07$), Arp 102B, Pictor A, 3C 33 and 4C +29.30, obtained with the GMOS-IFU instrument of the Gemini telescopes. We use these data to analyze the gas excitation and kinematics via two-dimensional maps. Using the flux distributions of the emission lines, we identify extended emission in ionized gas up to the edges of the observed field, which corresponds to $1.7\text{kpc} \times 2.5\text{kpc}$ for Arp 102B, $2.5\text{kpc} \times 3.4\text{kpc}$ for Pictor A, $4.0\text{kpc} \times 5.8\text{kpc}$ for 3C 33 and $4.3\text{kpc} \times 6.2\text{kpc}$ for 4C +29.30. The extended line emitting gas displays structures resembling rotating disks, spiral arms and bars. Line ratios indicate that both photons from the nuclear source and shocks originated in the interaction of the radio jet with circumnuclear gas are ionizing mechanisms of the gas. Line ratio values are typical of Seyfert galaxies for 3C 33 and 4C +29.30, while intermediate values between Seyferts and LINERs are observed in Arp 102B. Pictor A galaxy, however, shows low values of $[\text{N II}]/\text{H}\alpha = 0.15 - 0.25$, expected for H II regions. We suggest that these values are observed due to the low gas metallicity ($12 + \log(\text{O}/\text{H}) = 8.39$). Centroid velocity maps show that the gas kinematics is dominated by rotation only in Arp 102B and 3C 33. Outflows are observed in the galaxies Arp 102B, 3C 33 and 4C +29.30. We obtain mass outflow rates of $0.32 - 0.49 M_{\odot} \text{ ano}^{-1}$, but the outflow kinetic power is small, ranging $0.04 - 0.07\%$ of the AGN bolometric luminosity, indicating that the feedback has little impact in the host galaxies evolution. The high masses of ionized gas, ranging from $7.4 \times 10^7 M_{\odot}$ to $4.6 \times 10^8 M_{\odot}$, and the fact that these galaxies are early-type, suggest an external origin of the gas. Indeed, it is observed evidence of interaction with companion galaxies in Arp 102B, Pictor A and 4C +29.30. We suggest that the capture of mass has triggered the nuclear activity in these galaxies, with the high masses feeding not only the SMBH but also being a possible source of star formation.

Conteúdo

| | |
|---|--------|
| Conteúdo | p. III |
| Lista de Figuras | p. V |
| 1 Introdução | p. 1 |
| 1.1 Núcleos ativos de galáxias | p. 1 |
| 1.2 Rádio galáxias | p. 4 |
| 1.3 Mecanismos de alimentação do AGN | p. 6 |
| 1.4 Cinemática do gás circumnuclear em rádio galáxias | p. 7 |
| 1.5 Mecanismos de ionização | p. 8 |
| 1.6 Motivação e objetivos | p. 9 |
| 2 Amostra, observação e redução de dados | p. 11 |
| 2.1 Amostra | p. 11 |
| 2.1.1 Arp 102B | p. 12 |
| 2.1.2 Pictor A | p. 14 |
| 2.1.3 3C 33 | p. 14 |
| 2.1.4 4C +29.30 | p. 15 |
| 2.2 Observações | p. 17 |
| 2.3 Redução dos dados | p. 19 |
| 3 Metodologia | p. 20 |
| 3.1 Deconvolução de Richardson-Lucy | p. 20 |

| | | |
|----------|--|-------|
| 3.2 | Medidas das linhas de emissão | p. 21 |
| 3.2.1 | Polinômios de Gauss-Hermite | p. 22 |
| 3.3 | <i>Channel maps</i> | p. 23 |
| 3.4 | Razão entre linhas de emissão e modelos de ionização | p. 25 |
| 3.4.1 | Avermelhamento, densidade eletrônica e metalicidade | p. 27 |
| 3.5 | Modelo de rotação | p. 28 |
| 3.6 | Análise PCA | p. 29 |
| 3.7 | Cálculos de massa do gás emissor, taxa de <i>outflow</i> e taxa de acreção | p. 30 |
| 3.7.1 | Massa do gás emissor | p. 30 |
| 3.7.2 | Taxa de <i>outflow</i> | p. 32 |
| 3.7.3 | Taxa de acreção | p. 32 |
| 4 | Resultados e discussões | p. 33 |
| 4.1 | Massa de gás ionizado | p. 54 |
| 4.2 | Taxa de acreção | p. 56 |
| 4.3 | Estimativa da taxa de formação estelar | p. 56 |
| 4.4 | Taxa de outflow | p. 57 |
| 5 | Conclusões | p. 59 |
| 5.1 | Perspectivas | p. 60 |
| | Apêndice A – Bolsa sanduíche | p. 62 |
| | Apêndice B – Participação em outros trabalhos | p. 63 |
| | Bibliografia | p. 64 |

Lista de Figuras

| | | |
|-----|--|-------|
| 1.1 | Modelo unificado de AGNs | p. 4 |
| 1.2 | A rádio galáxia Hercules A | p. 6 |
| 1.3 | Exemplo de classificação Fanaroff-Riley | p. 7 |
| 2.1 | Par de galáxias Arp 102A e Arp 102B | p. 13 |
| 2.2 | Jato rádio e raios-X de Pictor A | p. 15 |
| 2.3 | Imagem da cauda de maré de Pictor A | p. 16 |
| 2.4 | Gás estendido na rádio galáxia 3C 33 | p. 17 |
| 2.5 | Imagem em rádio da galáxia 4C +29.30 | p. 18 |
| 3.1 | Deconvolução do cubo de dados de Pictor A | p. 22 |
| 3.2 | Exemplos de polinômios de Gauss-Hermite | p. 24 |
| 3.3 | Representação de <i>channel maps</i> | p. 26 |
| 3.4 | Diagramas diagnóstico | p. 28 |
| 4.1 | Distribuição de Σ_{gas} das galáxias da amostra | p. 55 |

Abreviaturas

2MASS: De *Two Micron All Sky Survey*, survey de imageamento no infravermelho.

ACS: De *Advanced Camera for Surveys*. Câmera do Telescópio Espacial Hubble.

AGB: Ramo gigante assintótico (*Asymptotic Giant Branch*).

AGN: Núcleo ativo de galáxias (*Active Galactic Nuclei*).

BLR: Região de linhas largas (*Broad-Line Region*).

BLRG: Rádio galáxia emissora de linhas largas (*Broad-Line Radio Galaxy*).

CCD: Sensor semiconductor responsável pela captação de imagens (*Charge-Coupled Device*).

ELF: De *elongated linear feature*, nome usado para caracterizar a estrutura alongada observada na galáxia Pictor A.

ESO: Observatório Europeu do Sul (*European Southern Observatory*).

FOV: Campo de visão (de *Field-of-View*).

FWHM: Largura à meia altura (de *Full Width at Half Maximum*).

GMOS: Espectrógrafo do telescópio Gemini (de *Gemini Multi-Object Spectrograph*).

HST: Telescópio Espacial Hubble (*Hubble Spacial Telescope*).

IDL: Linguagem de programação, de *Interactive Data Language*.

IFU: Unidade de campo integral (de *Integral Field Unit*).

IRAF: *Image Reduction and Analysis Facility*. Programa para redução e análise de dados.

LINER: Núcleo com emissão de linhas de baixa ionização (de *Low-Ionization Nuclear Emission-line Region*).

NLR: Região de linhas estreitas (de *Narrow Line Region*).

NLRG: Rádio galáxia emissora de linhas estreitas (*Narrow-Line Radio Galaxy*).

NRAO: Observatório americano de radioastronomia (de *National Radio Astronomy Observatory*).

PCA: Análise de componentes principais (de *Principal Component Analysis*).

PSF: Função de dispersão pontual (de *Point Spread Function*).

SDSS: De *Sloan Digital Sky Survey*, survey de imageamento e espectroscopia.

SINFONI: Espectrógrafo de campo integral no infravermelho próximo (de *Spectrograph for Integral Field Observations in the Near Infrared*)

SMBH: Buraco negro supermassivo (de *Supermassive Black Holes*).

SMGs: Galáxias com alta emissão na faixa de submilímetro (de *Submillimeter Galaxies*).

STIS: Espectrógrafo do Telescópio Espacial Hubble (de *Space Telescope Imaging Spectrograph*).

VLA: De *Very Large Array*, observatório radioastronômico.

VLBI: De *Very Long Baseline Interferometry*, interferômetro radioastronômico.

VLT: De *Very Large Telescope*, telescópio do consórcio ESO.

1 *Introdução*

O paradigma atual para a natureza física dos núcleos ativos de galáxias (AGNs, de Active Galactic Nuclei) consiste de um buraco negro supermassivo (SMBHs, de *supermassive black holes*) nos centros das galáxias hospedeiras capturando matéria do seu entorno (Peterson, 1997, Storchi-Bergmann, 2014). Evidências observacionais indicam que não só as galáxias ativas, mas todas as galáxias que possuem um bojo estelar hospedam um SMBH em seus centros. Só que na maioria das galáxias o SMBH não está ativo. A presença de SMBH no bojo das galáxias origina na correlação entre a dispersão de velocidades do bojo e a massa do SMBH (Ferrarese & Merritt, 2000, Gebhardt et al., 2000, Kormendy & Ho, 2013), o que indica que os SMBHs evoluem juntamente com as suas galáxias hospedeiras. Fases cruciais desta evolução são as fases de atividade nuclear das galáxias. Esta atividade, caracterizada pela captura de matéria pelo SMBH através de um disco de acreção, produz também efeitos de *feedback*, através de ejeção de matéria e grande emissão de energia a partir do disco de acreção. Este *feedback* é necessário em modelos cosmológicos de evolução de galáxias para regular o crescimento das mesmas evitando que elas cresçam demais (Fabian, 2012). Sem *feedback* do AGN, nem os modelos semi-analíticos nem simulações numéricas podem reproduzir as propriedades de galáxias massivas com sucesso.

1.1 Núcleos ativos de galáxias

A atividade nuclear em galáxias e seus processos físicos ocorrem em torno do SMBH central, que tem massa entre 10^6 e $10^{10} M_{\odot}$ (Ferrarese & Ford, 2005, McConnell et al., 2011). O SMBH é delimitado pelo raio de Schwarzschild, que pode ser calculado através da expressão

$$R_{Sch} = \frac{2GM_{\bullet}}{c^2} \quad (1.1)$$

onde M_{\bullet} é a massa do SMBH, G é a constante gravitacional e c é a velocidade da luz no vácuo. O raio de Schwarzschild delimita o horizonte de eventos do SMBH, região em que a

força gravitacional é tamanha que nem mesmo fótons conseguem escapar do potencial. Para SMBHs com massas entre 10^6 e $10^{10} M_{\odot}$, o raio de Schwarzschild varia de $10^{-7} \lesssim R_{Sch} \lesssim 10^{-3}$ pc.

Modelos unificados de AGN (Antonucci, 1993, Urry & Padovani, 1995), onde procura-se explicar as diversas características observadas em AGNs como sendo em grande parte devidas às diferentes orientações através das quais observamos estes objetos, descrevem o disco de acreção como uma estrutura formada após o horizonte de eventos do SMBH. O plasma aquecido, que é formado pela matéria que cai no potencial gravitacional, dissipa energia através de fricção (ou viscosidade) à medida que a matéria migra das partes externas do disco até o SMBH, permitindo a perda de momento angular. Sendo aquecido a altas temperaturas ($T \sim 10^3 - 10^5$ K), o disco de acreção emite radiação em todos os comprimentos de onda, com pico no ultravioleta (Frank et al., 2002). Esta é a fonte central de radiação, responsável pela excitação do gás circumnuclear, que re-emite radiação em outros comprimentos de onda, como o ótico. O disco de acreção tem dimensões que dependem da massa do SMBH, variando de uma dimensão comparável ao raio da órbita de Plutão (10^{-4} pc de diâmetro) até 0.1 pc para os SMBH mais massivos (Morgan et al., 2010).

Logo após o disco de acreção, a estrutura mais próxima do SMBH é uma região formada por gás com altas velocidades orbitais, também conhecida como região de linhas largas (BLR, de *broad-line region*). Dessa região se originam as linhas de emissão permitidas mais largas, como as do Hidrogênio (sendo as mais intensas no espectro ótico $H\alpha$ e $H\beta$) e Hélio. A largura das linhas ($\sim 2000 - 5000 \text{ km s}^{-1}$) se deve à alta dispersão de velocidades do gás emissor, que se deve a seu movimento orbital no potencial gravitacional do SMBH. As nuvens localizadas nessa região são excitadas pela radiação vinda do disco de acreção, o que possibilita a análise de cinemática nas regiões mais internas do AGN. Nem o disco de acreção nem a BLR podem ser resolvidos espacialmente pelos telescópios atuais, sendo possível estimar suas dimensões apenas por métodos indiretos, como mapeamento por reverberação (Peterson et al., 2004).

Circundando a BLR, encontra-se uma estrutura toroidal formada por gás molecular e poeira. No Modelo Unificado dos AGNs, este toro é responsável por bloquear a visão do disco de acreção e da BLR para linhas de visada que interceptam o toro. O toro de poeira absorve a radiação proveniente do disco de acreção e a reprocessa, emitindo principalmente no infravermelho. Seu raio interno é dependente da intensidade da radiação originada no disco de acreção, e é definido pela distância da fonte central em que a poeira é capaz de sobreviver à radiação ionizante. Suas dimensões estão normalmente entre 1 e 10 pc (Tristram & Schartmann, 2011). A linha de visada do observador em relação ao toro de poeira é importante para a classificação de

AGNs. A observação das linhas largas típicas da BLR é característica de AGNs tipo 1, enquanto que o obscurecimento dessa região pelo toro de poeira leva à classificação de tipo 2. O formato e estrutura do toro de poeira ainda são alvos de estudo. Embora o modelo inicial proposto para o toróide tenha sido de uma estrutura contínua, logo se verificou que a mesma não seria estável, e os modelos mais recentes que permitem sua estabilidade mostram que ele não é contínuo mas formado por nuvens de poeira (Elitzur & Shlosman, 2006).

A região de linhas estreitas (NLR, de *narrow-line region*) é mais externa ao toro de poeira, logo não é obscurecida por ele. As dimensões típicas dessa região são de centenas a milhares de parsecs, e a região é formada por gás com dispersão de velocidades menor do que a da BLR, em torno de centenas de km s^{-1} . Isso se deve à maior distância do centro do potencial gravitacional, e resulta em linhas de emissão com menor alargamento, as chamadas linhas estreitas, que podem ser tanto permitidas como proibidas. O caso da emissão de linhas proibidas só é possível devido à baixa densidade do gás (tipicamente $< 10^3 \text{ cm}^{-3}$), que faz com que o gás, que é excitado colisionalmente, seja desexcitado radiativamente. As linhas $[\text{O III}]\lambda 5007\text{Å}$ e $[\text{S II}]\lambda 6731\text{Å}$ são exemplos de emissões tipicamente observadas em espectros óticos de AGNs. A escala da região de linhas estreitas nos permite resolvê-la, o que permite mapear a cinemática e excitação do gás nessa região.

Por vezes observa-se em AGNs a presença de jatos bipolares de partículas relativísticas. Esse fenômeno, acredita-se, é formado nas regiões internas do disco de acreção, perpendicularmente ao disco. O campo magnético gerado pelo plasma que forma o disco de acreção acelera as partículas a velocidades relativísticas, expulsando essas partículas em jatos colimados, em direção perpendicular ao disco de acreção (McKinney, 2006, Proga, 2007). A interação do plasma com o campo magnético resulta em emissão de radiação sincrotrônica, que é observada em comprimentos de onda de rádio, e espalhamento de Compton inverso, que emite fótons de altas energias, como raios-X e gama. Jatos relativísticos podem chegar a distâncias de centenas de kiloparsecs do núcleo, podendo influenciar a cinemática e excitação do gás circumnuclear.

Na Fig. 1.1 podemos ver um esquema ilustrando as estruturas consideradas no modelo unificado de AGNs.

Além da orientação do AGN em relação à linha de visada, que leva à sua classificação como de tipo I ou II, os AGNs são também classificados de acordo com sua luminosidade e características espectrais. Assim temos a classe dos quasares, que são os mais luminosos ($10^{45} < L_{bol} < 10^{48} \text{ erg s}^{-1}$, Runnoe et al., 2012), galáxias Seyfert (que são menos luminosas por um fator de ~ 100) e os LINERs (de *low-ionization nuclear emission-line region*), que é uma classe de galáxias com núcleo que apresenta linhas de emissão de baixa ionização e são

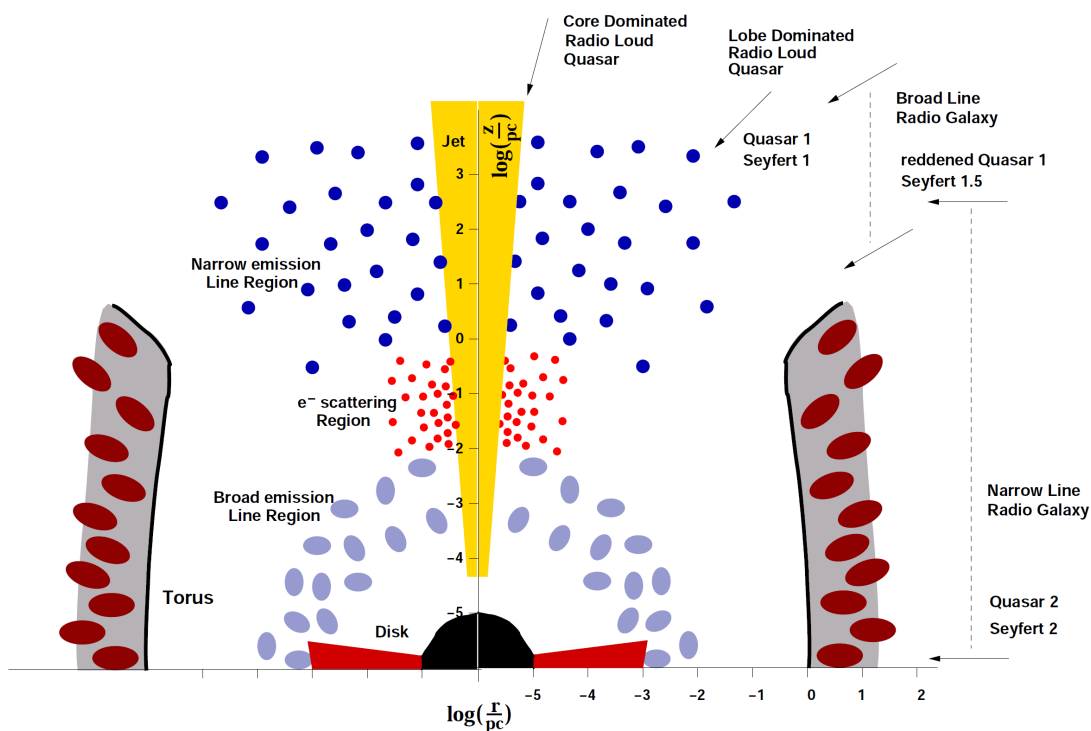


Figura 1.1: Ilustração do modelo unificado de AGNs. As principais estruturas estão representadas, assim como suas escalas. Da região central à parte mais externa observamos: o SMBH, disco de acreção, região de linhas largas, toróide de poeira, região de linhas estreitas e jatos relativísticos. Figura retirada de Zier & Biermann (2002).

consideravelmente menos luminosos.

Há também classificações que se baseiam em características da distribuição espectral de energia, como as rádio galáxias, descritas a seguir.

1.2 Rádio galáxias

Rádio galáxias são galáxias ativas caracterizadas por sua alta luminosidade em comprimentos de onda de rádio, com valores típicos de $10^{28} - 10^{36} \text{ erg s}^{-1} \text{ Hz}^{-1}$, usualmente medida em 1.5 GHz (Antonucci, 2011). A emissão em frequências de rádio se deve principalmente à radiação sincrotrônica gerada no jato relativístico, assim como em pares de lóbulos opostos que são resultado da interação dos jatos com o gás intergaláctico, muitas vezes presentes nesses objetos (como visto na rádio galáxia Hercules A, Fig. 1.2). Os jatos rádio observados nessas galáxias estendem-se, muitas vezes, a distâncias maiores que o raio da galáxia hospedeira em imagens óticas. A extensão e o formato do jato rádio pode variar entre rádio galáxias, levando a uma subclassificação: Fanaroff-Riley tipo I e II (Fanaroff & Riley, 1974). Galáxias que apresentam um jato mais luminoso próximo do núcleo são classificadas como tipo I, enquanto que

galáxias com o pico de emissão mais próximo da extensão final do jato tem classificação de tipo II (Fig. 1.3). As rádio galáxias ainda apresentam frequentemente uma componente mais fraca, bem mais compacta no núcleo. O espectro ótico das rádio galáxias pode ser classificado analogamente aos dos AGNs de tipos 1 e 2, sendo que as que apresentam linhas de emissão largas são chamadas de BLRGs (de *Broad Line Radio Galaxies*), enquanto as que apresentam somente linhas estreitas são chamadas de NLRGs (de *Narrow Line Radio Galaxies*) (Osterbrock & Ferland, 2006). Outra forma de classificar galáxias devido à sua natureza em rádio é divisão entre *radio-loud* e *radio-quiet*, primeiramente proposta por Kellermann et al. (1989). Utilizando a razão de fluxo específico $R_{r-o} = f(5GHz)/f(4400\text{\AA})$, onde se relacionam o fluxo em rádio $f(5GHz)$ (ou 6 cm) e $f(4400\text{\AA})$ (ou 680 THz). Objetos *radio-loud* são aqueles que tipicamente apresentam $R_{r-o} > 10$, enquanto objetos *radio-quiet* apresentam $R_{r-o} < 1$.

Atingindo escalas de até centenas de kiloparsecs, o jato rádio presente nas rádio galáxias mais luminosas é confinado pelo gás quente do halo, produzindo os lóbulos em expansão observados preenchidos por plasma relativístico, inflando bolhas ou cavidades no gás quente. A maior parte da energia do jato é depositada localmente, através de trabalho mecânico que infla as cavidades. Como o repositório da alimentação do AGN é o mesmo gás circundante, esse mecanismo oferece as condições necessárias para um ciclo de auto-regulagem do AGN. As bolhas em expansão tem grande parte na injeção de energia do gás circundante, em forma de choques de baixa velocidade (Fabian et al., 2006). Isso faz com que a energia do jato rádio se transfira de maneira indireta, além da interação direta do jato com o gás, visto que a energia se dissipa no meio intragaláctico (Heckman & Best, 2014). Em escalas ainda maiores, aglomerados de galáxias apresentam cavidades observadas em raios-X, ligadas exatamente à dissipação de energia ao longo do jato no meio intra-aglomerado (McNamara & Nulsen, 2007). Essas interações fazem com que o gás da galáxia ou do aglomerado se aqueça e com que a formação de novas estrelas seja dificultada.

Pelo menos metade das rádio galáxias no Universo local ($z < 0.5$) apresentam morfologia distorcida ou interação com outras galáxias, enquanto dois terços delas tem sua distribuição de brilho superficial melhor ajustado por hospedeiras massivas elípticas (Inskip et al., 2010). Usando uma amostra de rádio galáxias com *redshift* intermediário ($z < 0.7$), Ramos Almeida et al. (2011) encontraram que $\approx 80\%$ da amostra apresentam morfologia peculiar ou distorcida, o que é muito maior do que o encontrado em galáxias elípticas com nível de brilho superficial semelhante, mas quiescentes em rádio (Malin & Carter, 1983). Esses são indicativos de que interações entre galáxias são importantes como gatilho da atividade nuclear e do jato rádio. Os resultados de Raimann et al. (2005) também apoiam este cenário, já que os autores deste trabalho encontram uma grande incidência de população de idade intermediária em rádio galáxias,

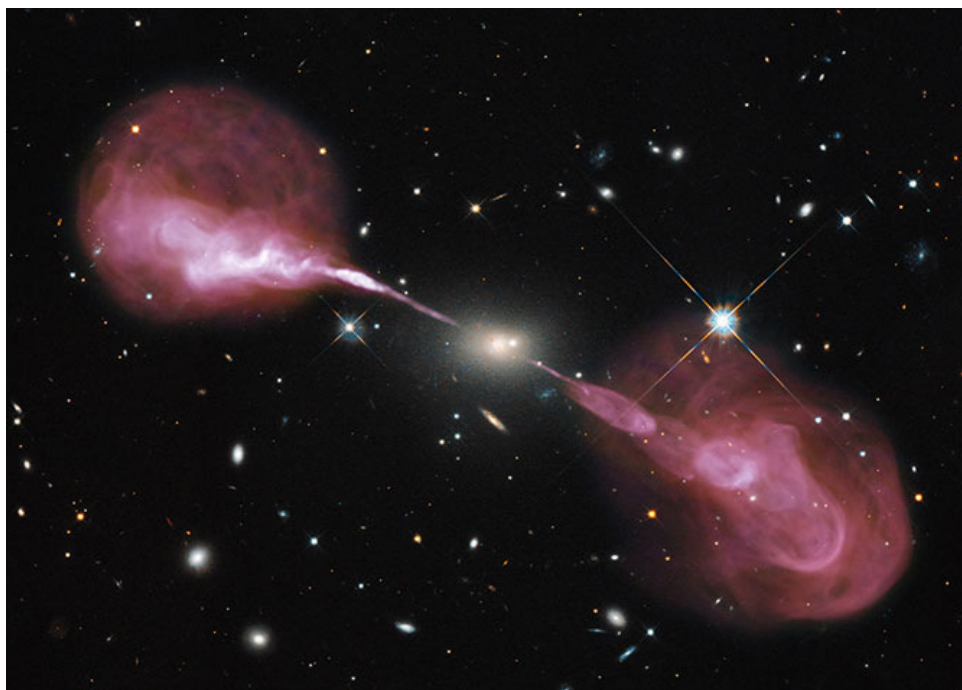


Figura 1.2: Combinação de imagens usando dados do VLA (rádio) e HST (óptico) da rádio galáxia Hercules A, mostrando o jato rádio se estendendo a distâncias maiores do núcleo que a própria galáxia (O’Dea et al., 2013).

sugerindo que a fase de atividade seja precedida por uma fase de formação estelar. Isto pode acontecer se houver uma grande captura de matéria pela galáxia, o que acontece numa interação.

1.3 Mecanismos de alimentação do AGN

Para ocorrer a acreção de matéria pelo SMBH central, deve haver no AGN mecanismos de transferência dessa matéria das regiões externas para o núcleo. Comparando dados do telescópio *Hubble* de galáxias elípticas ativas com não-ativas, Simões Lopes et al. (2007) encontraram que todas as que hospedam AGNs possuem poeira circumnuclear, enquanto apenas 26% das galáxias inativas apresentam estruturas de poeira. Como a poeira é um bom traçador da presença de gás, acredita-se que a região circumnuclear de galáxias ativas apresentam maiores reservatórios de gás. Porém esse gás precisa perder a maior parte do seu momentum angular para poder chegar às regiões nucleares. Nos kiloparsecs centrais, modelos teóricos indicam que torques gravitacionais ocasionados por interações com galáxias companheiras, ou mesmo assimetrias no potencial gravitacional como ondas de densidade espirais, barras nucleares ou discos ovais sejam mecanismos eficientes na transferência de matéria até o disco de acreção (Combes, 2003, Kormendy & Kennicutt, 2004, Maciejewski, 2004, García-Burillo et al., 2005).

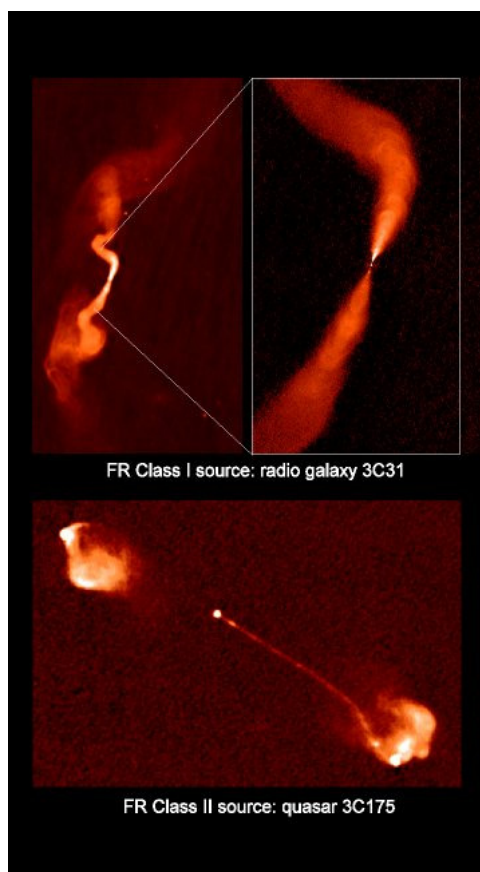


Figura 1.3: Acima a rádio galáxia 3C 31 (classificada com FR-I) e abaixo a rádio galáxia 3C 175 (classificada como FR-II). Créditos: NRAO.

Inflows de gás foram observados em várias galáxias ativas em comprimentos de onda óticos. Espirais nucleares de gás ionizado se movendo em direção ao núcleo foram observados nas galáxias NGC 1097 (Fathi et al., 2006) e NGC 6951 (Storchi-Bergmann et al., 2007). Emissão de gás molecular foi interpretada como *feeding* do AGN nos kiloparsecs centrais das galáxias NGC 1068 (Müller Sánchez et al., 2009), NGC 4051 (Riffel et al., 2008), Mrk 1066 (Riffel & Storchi-Bergmann, 2011) e Mrk 79 (Riffel et al., 2013).

1.4 Cinemática do gás circumnuclear em rádio galáxias

O estudo da cinemática do gás circumnuclear é fundamental para entender os mecanismos de alimentação do AGN, e também se e como o jato rádio afeta o gás na galáxia hospedeira. Heckman et al. (1985) encontraram que o jato rádio em fontes mais extensas (> 100 kpc) tem o eixo rádio aproximadamente alinhado com o eixo de rotação do gás ionizado, enquanto que em fontes mais compactas (< 10 kpc), há menos alinhamento. Baum & McCarthy (2000), estudando uma amostra de 52 rádio galáxias até *redshift* $z \approx 2.8$, não encontram correlação

entre o tamanho da fonte em rádio e a dispersão de velocidades ou velocidade máxima do gás nos objetos próximos ($z < 0.6$), indicando que a cinemática é dominada pelo potencial gravitacional. Comparando uma amostra de rádio galáxias próximas com galáxias elípticas quiescentes em rádio, Verdoes Kleijn & de Zeeuw (2005) encontram que a poeira em rádio galáxias tende a traçar discos em rotação, mas que seus eixos não são alinhados com o eixo dos jatos rádio (ângulo entre os dois é em média $\approx 45^\circ$). Analisando uma amostra de 21 rádio galáxias próximas, Noel-Storr et al. (2007) encontraram que a cinemática é mais turbulenta no núcleo e perpendicularmente ao disco de gás, sugerindo outras componentes além do gás em rotação. Os resultados mencionados acima indicam a presença de gás em rotação, normalmente num disco em torno do núcleo das rádio galáxias. Porém, nem sempre o jato rádio está alinhado com o eixo de rotação do gás, e em algumas galáxias se observam outras componentes, num padrão de velocidades complexo. Nestes casos, a cinemática pode estar sendo influenciada pela interação do jato com o gás.

1.5 Mecanismos de ionização

As NLRs de AGNs, por se estenderem a kiloparsecs da fonte central e portanto sendo resolvidas espacialmente no Universo local, são ótimos laboratórios para estudar em detalhe a física de ionização do gás pelo AGN, e possibilitam testar modelos de ionização que buscam explicar suas propriedades.

Modelos de fotoionização evocam uma fonte nuclear de fótons de altas energias, sendo o principal mecanismo de ionização do gás circumnuclear. De acordo com o modelo unificado, o toro de poeira, por ter esse formato, restringe a área de atuação dos fótons ionizantes do ultravioleta a uma região com formato cônico ao longo do eixo polar, excitando a NLR. O espectro ionizante normalmente é representado por uma lei de potência suave ou quebrada (Prieto & Viegas, 2000, Sazonov et al., 2004). Este espectro ionizante, incidindo em nuvens de gás com densidades entre $\sim 10^2 - 10^4 \text{ cm}^{-3}$ resulta na emissão de linhas proibidas cobrindo um intervalo grande de estados de ionização (Groves et al., 2004a,b).

Por outro lado, fotoionização não é única forma de ionização do gás circumnuclear. Em AGNs que apresentam jatos relativísticos, principalmente em rádio galáxias, a energia cinética transferida às nuvens de gás pelo movimento causado pelo jato é eventualmente dissipada através de choques radiativos. Os chamados *outflows* são por vezes muito importantes no balanço energético em AGNs e podem dominar o espectro de emissão de linhas. Ondas de choques geradas, por exemplo, pelo jato rádio podem ionizar o gás, que ainda pode ser fonte

secundária de ionização. A radiação gerada pelo gás que esfria, atrás da frente de choque, gera um campo de radiação intenso de fótons ionizantes no ultravioleta e raios-X, gerando fotoionização. Esses mecanismos estão intimamente ligados à velocidade do choque presente no gás, bem como ao poder de ionização das linhas emitidas (Dopita & Sutherland, 2003, Allen et al., 2008).

AGNs menos luminosos, como LINERs, apresentam por vezes mecanismos de ionização que não são considerados em modelos de fotoionização e ionização por choques. Estes mecanismos incluem fotoionização por estrelas jovens e estrelas na fase pós-AGB (*asymptotic giant branch*, Binette et al., 1994, Stasińska et al., 2008, Eracleous et al., 2010). Entretanto, estes mecanismos são menos importantes na ionização do gás circumnuclear em galáxias ativas mais luminosas.

1.6 Motivação e objetivos

A atividade nuclear em rádio galáxias, devida à ejeção de jatos de partículas, à radiação emitida pelo disco de acreção e pelo jato, bem como à energia cinética carregada pelo jato, afeta o meio interestelar circundante, produzindo o que é conhecido na literatura como efeitos de *feedback*. Estes efeitos têm sido observados e quantificados por vários autores (Nesvadba et al., 2009, Tremblay et al., 2009, Rosario et al., 2010, Reynaldi & Feinstein, 2013, Santoro et al., 2015). Estudos teóricos também sugerem que a atividade rádio tem um papel importante no meio interestelar e no meio circundante quente das galáxias hospedeiras (Reynolds et al., 2002, Fragile et al., 2004, Wagner & Bicknell, 2011). A interação do jato rádio com o gás circumnuclear pode gerar ionização induzida por choques e depositar energia cinética no gás, produzindo ejeção do gás circumnuclear, ou *outflows* (Baum & Heckman, 1989, Best et al., 2000, Feruglio et al., 2010, Morganti et al., 2013). Os *outflows*, combinados com efeitos da radiação ionizante do núcleo ativos, constituem o *feedback* do AGN, que influencia a evolução da galáxia hospedeira. O papel do *feedback* do AGN na evolução de galáxias ainda é motivo de debate. Alguns estudos indicaram que choques resultantes de interações com jatos podem iniciar formação estelar no meio interestelar (Oosterloo & Morganti, 2005). Por outro lado, o *feedback* do AGN pode ser um mecanismo de cessação de formação estelar, principalmente em estágios recentes da evolução de sua galáxia hospedeira (Silverman et al., 2008). Estima-se que *outflows* com energia cinética $> 5\%$ da luminosidade bolométrica do AGN são capazes de aquecer e ejetar o gás da galáxia hospedeira, afetando (cessando, muitas vezes) a formação de estrelas (Di Matteo et al., 2005). Porém, mesmo em *outflows* menos energéticos ($\approx 0.5\% L_{bol}$), foram encontradas evidências de influência na galáxia hospedeira (Hopkins & Elvis, 2010).

Está claro que AGNs e suas galáxias hospedeiras compartilham uma evolução correlacionada (Ferrarese & Merritt, 2000, Gebhardt et al., 2000, Kormendy & Ho, 2013), e, neste cenário, o estudo da excitação e da cinemática do gás circumnuclear são essências para revelar a origem desta co-evolução.

Nesta tese teremos como objetos de estudo uma amostra de quatro rádio galáxias: Arp 102B, Pictor A, 3C 33 e 4C +29.30. No Capítulo 2 vamos introduzir cada uma das galáxias. Neste trabalho temos como objetivos:

- Mapear a cinemática e excitação do gás circumnuclear nas rádio galáxias da amostra, utilizando dados óticos de espectroscopia de campo integral;
- Estudar uma possível interação do jato com o gás, apontando se há uma correlação espacial entre o jato rádio e o gás emissor, sua excitação e sua cinemática;
- Analisar os mecanismos de excitação e emissão do gás, comparando a intensidade e razão entre as linhas de emissão com valores preditos por modelos de fotoionização;
- Calcular/estimar os efeitos de *feedback* dos *outflows* na galáxia hospedeira, através da cinemática observada;
- Calcular as massas de gás ionizado da região central e comparar com as que têm sido obtidas em estudos prévios de outras rádio galáxias;
- Usar os dados obtidos para cada galáxia para investigar a origem do gás ionizado.

Este trabalho está organizado da seguinte forma: no Capítulo 2 apresentamos a amostra de galáxias, bem como detalhes do processo de observação e redução de dados. No Capítulo 3 apresentamos a metodologia utilizada, introduzindo os processos de análise dos dados das galáxias. No Capítulo 4 discutimos os resultados obtidos com a metodologia comparando com dados e modelos da literatura. Finalmente, no Capítulo 5 descrevemos nossas conclusões sobre o trabalho e as perspectivas futuras.

2 *Amostra, observação e redução de dados*

Neste capítulo apresentamos a amostra de rádio galáxias observadas até o momento, bem como a descrição das observações e o processo de redução dos dados.

2.1 Amostra

A amostra de rádio galáxias foi sendo criada ao longo do doutorado. Os dados das galáxias Arp 102B e Pictor A já haviam sido previamente observados, e se somaram os pedidos de tempo para observação das galáxia 3C 33 e 4C +29.30. A motivação principal na escolha dessas galáxias é a presença de emissão de linha espacialmente estendida, além de algumas características individuais, como a Arp 102B apresentar emissão de linha larga em duplo pico e a Pictor A ser a rádio galáxia FR II mais próxima. Algumas propriedades gerais, obtidas no banco de dados NED¹, sobre as galáxias da amostra são dadas na tabela 2.1. Todas as galáxias desta amostra podem ser classificadas como *radio-loud*, visto que o valor de $R_{r-o} > 10$ obtidos por dados de fotometria do NED.

¹NASA/IPAC Extragalactic Database, <https://ned.ipac.caltech.edu/>

Tabela 2.1: *Tabela com varios parâmetros físicos medidos para as galáxias de nossa amostra.*

| Propriedade | Arp 102B | Pictor A | 3C 33 | 4C +29.30 |
|---------------------------------|-----------|----------|-------|-------------------------|
| Tipo de Hubble | E0 | Sa/S0 | - | Sa |
| Distância de luminosidade (Mpc) | 104.9 | 152.9 | 265.7 | 289 |
| Escala (kpc'') | 0.49 | 0.69 | 1.15 | 1.24 |
| Classificação do AGN | LINER/Sy1 | LINER | Sy2 | Sy2 |
| Classificação Fanaroff-Riley | FR I | FR II | FR II | FR I/II (double-double) |

2.1.1 Arp 102B

Arp 102B é uma galáxia elíptica classificada como E0, que está a uma distância de 104.9 Mpc ($z = 0.024$), o que corresponde a uma escala de $490.2 \text{ pc arcsec}^{-1}$ (Eracleous & Halpern, 2004). O núcleo dessa galáxia é classificado como LINER/Seyfert 1, devido à emissão intensa de linhas de baixa ionização, mas com luminosidade relativamente maior que outros núcleos ativos LINERs como o de NGC 1097 (Storchi-Bergmann et al., 2003, Fathi et al., 2006). Uma característica interessante do núcleo ativo da galáxia Arp 102B é a presença de linhas de Balmer em duplo-pico bem alargadas ($\sim 10,000 \text{ km s}^{-1}$). Na verdade, ela é considerada como a galáxia prototípica de emissão em duplo-pico (Chen et al., 1989, Chen & Halpern, 1989, Newman et al., 1997, Flohic & Eracleous, 2008).

Em um estudo anterior, nosso grupo reportou a descoberta de espirais nucleares, observadas em uma imagem em banda estreita de $H\alpha$ obtida com a câmera ACS (*Advanced Camera for Surveys*) do Telescópio Espacial Hubble (HST, de *Hubble Space Telescope*) (Fathi et al., 2011), o que é inesperado, visto a classificação da galáxia como elíptica. Foi especulado que a origem dos braços espirais nucleares se deve à interação com a galáxia companheira Arp 102A (Stauffer et al., 1983). Braços espirais nucleares, localizados nas regiões internas a poucos kiloparsecs, são conhecidos como possíveis mecanismos de *inflow* de gás ao núcleo ativo, tendo tanto evidências observacionais (Davies et al., 2009, Riffel & Storchi-Bergmann, 2011, Schnorr Müller et al., 2011) como suporte teórico (Maciejewski, 2004). A Fig. 2.1 mostra a imagem das duas galáxias Arp102A e Arp102B, revelando a presença de uma ponte de maré entre elas. Num trabalho anterior de nosso grupo Fathi et al. (2011) encontramos um braço espiral nuclear a leste do núcleo e outro a oeste. O braço leste é espacialmente correlacionado com o jato rádio observado nessa galáxia, inclusive seguindo a mesma curvatura observada no jato. Isso sugere que os braços possam ser o resultado de uma interação entre o jato rádio e o gás circumnuclear da galáxia.

A primeira detecção da emissão rádio na galáxia Arp 102B foi feita por Biermann et al. (1981), mas só foi identificada como uma estrutura do tipo jato posteriormente por Puschell et al. (1986). Esses autores não conseguiram identificar o mecanismo de emissão em rádio. Caccianiga et al. (2001), estudando o par Arp 102A e Arp 102B, demonstrou que o jato rádio é originado de um AGN, já que sua temperatura de brilho ($10^6 - 10^8 \text{ K}$) é muito alta para ser devido emissão *starburst*, por exemplo. Em Fathi et al. (2011) concluímos que para entender o impacto do jato rádio no gás circumnuclear seria necessário mapear a excitação e a cinemática do gás circumnuclear.



Figura 2.1: Par de galáxias Arp 102A e Arp 102B. A orientação é a mesma que das observações com o IFU (ver Capítulo 4), com um ângulo de 65° entre o norte e o eixo vertical da imagem, estando o norte à direita. Arp 102B é a galáxia elíptica no canto inferior esquerdo da imagem, cujo campo de visão é de $\sim 600 \times 500$ kpc. Créditos: Rick Johnson. A imagem original feita pelo astrônomo pode ser vista em <http://www.spacebanter.com/attachment.php?attachmentid=4120&stc=1>.

2.1.2 Pictor A

Pictor A é uma rádio galáxia localizada a uma distância de 152.9 Mpc ($z = 0.035$ e escala de 0.69 kpc/arcsec, considerando $H_0 = 70.5 \text{ km s}^{-1} \text{ Mpc}^{-1}$) e tem classificação Fanaroff-Riley tipo II. Essa galáxia foi bastante estudada devido à sua emissão rádio, que tem como morfologia dois lóbulos proeminentes que encontram a distâncias maiores que 200 kpc (Perley et al., 1997, Tingay et al., 2000, Wilson et al., 2001, Tingay et al., 2008). A Fig. 2.2 mostra o jato em raios-X reportado por Wilson et al. (2001), onde foram usados dados do Telescópio Espacial *Chandra*. Os contornos são de dados rádio em 20 cm do jato observados com o VLA (*Very Large Array*). Nota-se que o jato em raios-X emite apenas no lado oeste, sugerindo uma certa inclinação em relação ao plano do céu, sendo esse o lado próximo ao observador. Segundo Wilson et al. (2001), o jato em raios-X tem largura de $\approx 2''$ (1.4 kpc). Além disso, Perley et al. (1997) notaram uma pequena curvatura do jato rádio no lado oeste, a $\approx 180''$ (125 kpc) do núcleo, o que contribui para uma incerteza na posição do jato rádio. Considerando os resultados já publicados na literatura, adotamos um $PA = -75 \pm 5^\circ$ (Perley et al., 1997, Simkin et al., 1999, Tingay et al., 2000, Marshall et al., 2010).

Essa galáxia também é classificada como BLRG, devido à emissão em duplo-pico de linhas de Balmer alargadas ($> 10,000 \text{ km s}^{-1}$) (Halpern & Eracleous, 1994, Lewis et al., 2010). Eracleous & Halpern (2003) modelaram o perfil de $H\alpha$ em duplo-pico como originado nas regiões externas de um disco de acreção, encontrando inclinações para o disco de $i \sim 30^\circ$ e $i > 65^\circ$ para modelos de disco elíptico e circular, respectivamente. A morfologia da galáxia hospedeira não está muito clara no ótico, mas a literatura indica a presença de um disco. Lauberts (1982) classifica essa galáxia como uma Sa, enquanto Loveday (1996) não encontra evidência de braços espirais, classificando-a como S0. Inskip et al. (2010), usando imagens na banda K e K_s do infravermelho próximo, concluíram que o brilho superficial de Pictor A é melhor modelado por um perfil de galáxia disco com uma fonte pontual nuclear. Uma cauda de maré foi descoberta recentemente por Gentry et al. (2015), começando $18''$ (12 kpc) ao norte do núcleo de Pictor A, e se estendendo ao oeste até uma distância de 60 kpc (Fig. 2.3). Esta cauda de maré indica que ocorreu um evento de fusão com uma outra galáxia há algumas centenas de milhões de anos atrás.

2.1.3 3C 33

3C 33 é uma NLRG localizada a uma distância de 265.5 Mpc ($z = 0.0597$, com $1''$ correspondendo a 1.15 kpc na galáxia) e tem classificação FR-II, com a emissão em rádio exi-

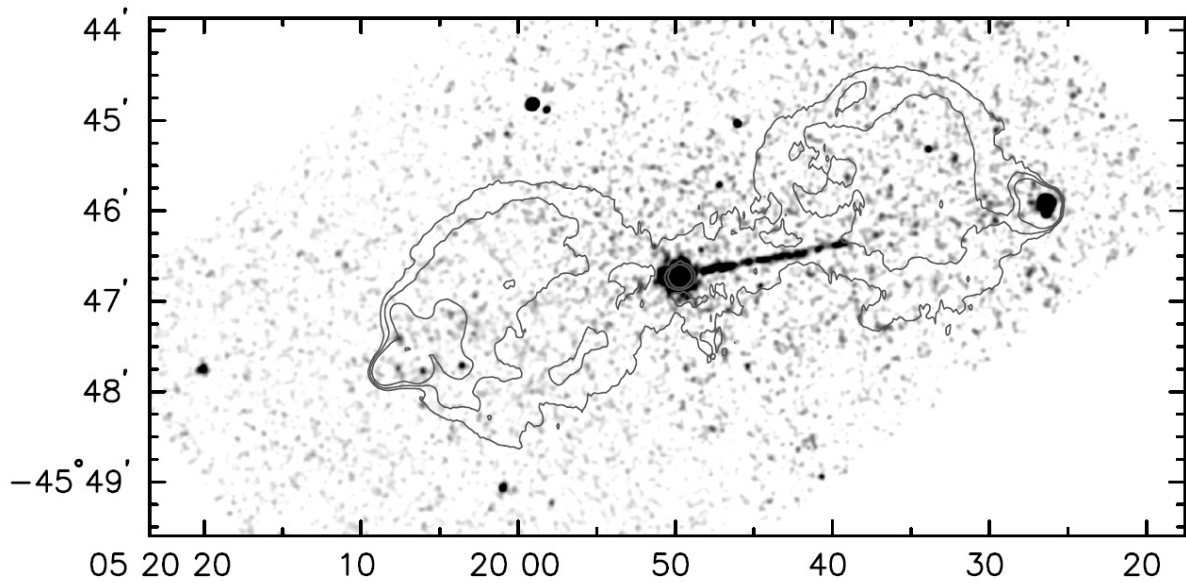


Figura 2.2: Mapa do jato em raios-X da galáxia Pictor A. Os contornos são de dados rádio em 20 cm do VLA (Wilson et al., 2001).

bindo dois lóbulos estendidos até ~ 120 kpc cada (Leahy & Perley, 1991, Giovannini et al., 2005). A razão entre as intensidades do jato e do contra-jato indicam um alto ângulo de inclinação entre o eixo do jato rádio e a linha de visada, de $75^\circ - 80^\circ$. O espectro ótico de linha de emissão de 3C 33 é típico de galáxias Seyfert 2, com alta luminosidade em [O III] de $L_{[\text{O III}]} \sim 1 \times 10^{42} \text{ erg s}^{-1}$. Tremblay et al. (2009), usando dados de *ACS-HST*, mostram que a emissão de [O III] e $\text{H}\alpha + [\text{N II}]$ se estende em um formato de “símbolo de integral” ~ 5 kpc a nordeste e sudoeste do núcleo (ver Fig. 2.4). Estudos de cinemática do gás emissor no ótico, de Simkin (1979) e Heckman et al. (1985), indicam rotação, com o eixo alinhado ao eixo do jato rádio (ângulo de posição $\text{PA} \sim 20^\circ$).

2.1.4 4C +29.30

4C +29.30 é uma rádio galáxia com morfologia elíptica caracterizada por estruturas distorcidas devido a uma interação relativamente recente com uma companheira rica em gás, e tem *redshift* de $z = 0.0647$. A distância de luminosidade correspondente é de 289 Mpc e $1''$ corresponde a 1.24 kpc na galáxia. Esta galáxia foi primeiramente estudada em rádio e ótico por van Breugel et al. (1986), onde se observou gás emissor de linha no ótico estendendo até $\sim 20''$ norte do núcleo, e um jato rádio adjacente ao longo do ângulo de posição $\sim -20^\circ$, indicando interação entre o jato rádio e o gás denso extranuclear. A emissão rádio em larga escala estendida (~ 600 kpc) é provavelmente originada de um ciclo anterior de atividade de > 200 Myr atrás, enquanto um jato rádio de menor escala (~ 30 kpc) é resultado do atual ciclo de atividade

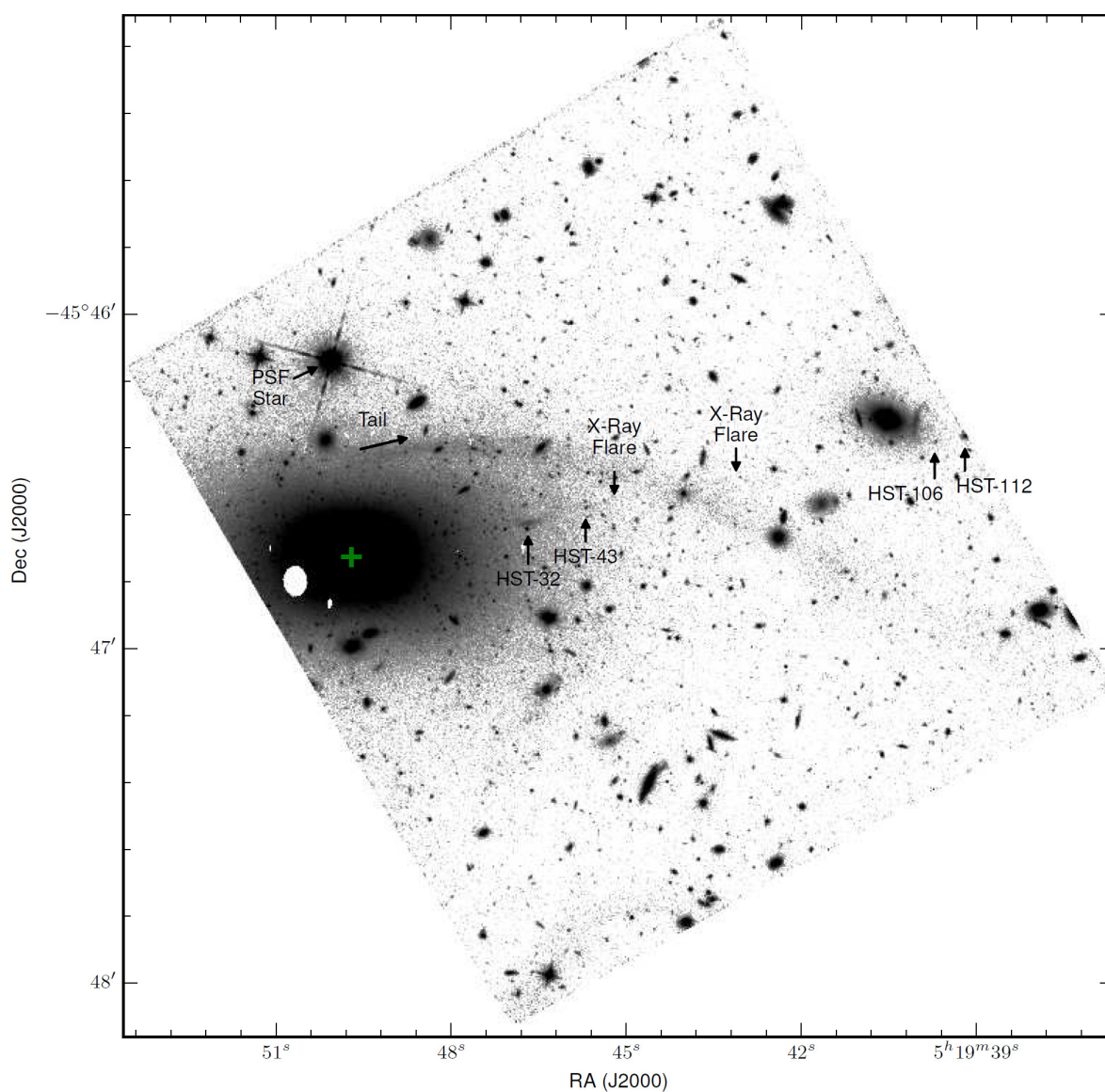


Figura 2.3: Imagem da galáxia Pictor A, obtida com a câmera WFC3/IR do *HST*, usando o filtro 160W (Gentry et al., 2015). A cauda de maré está marcada por uma seta tangente ao início. Alguns nós do jato rádio também estão identificados.

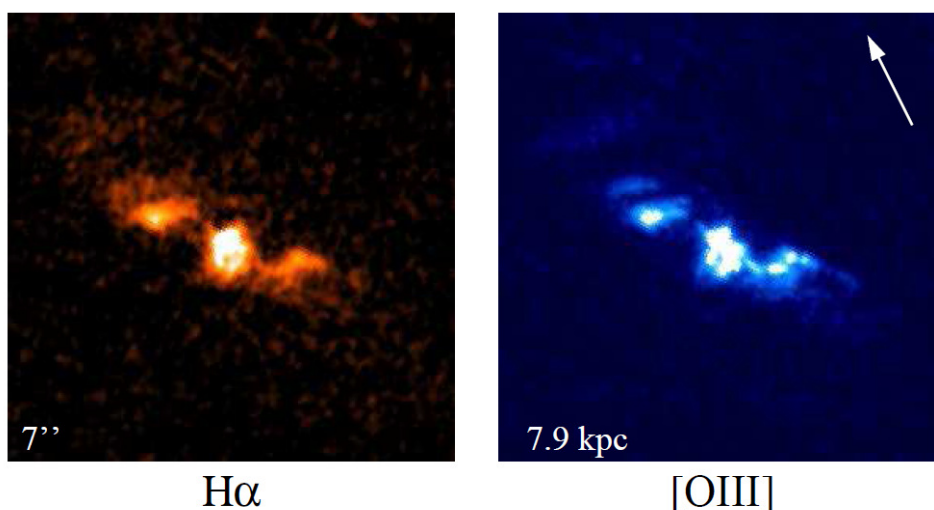


Figura 2.4: Imagens em $H\alpha$ (esquerda) e $[O III]\lambda 5007$ (direita) da galáxia 3C 33, usando dados da câmera ACS do *HST* (Tremblay et al., 2009). Note o gás estendido ao longo das direções nordeste e sudoeste do núcleo. A seta em branco aponta a direção do jato rádio.

com idade estimada de < 100 Myr (Fig. 2.5 Jamrozy et al., 2007). Dados em raios-X mostram complexas estruturas de interação entre o jato rádio e o ambiente da galáxia hospedeira, sinalizando processos de *feedback* associados a atividade nuclear (Siemiginowska et al., 2012).

2.2 Observações

As observações foram realizadas utilizando o espectrógrafo GMOS (*Gemini Multi-Object Spectrograph*) dos telescópios de 8 m do Observatório *Gemini*, Norte e Sul, operando no modo IFU (*Integral Field Unit*) (Allington-Smith et al., 2002). Neste modo de operação, pode-se obter até 1000 espectros no campo principal e mais 500 no campo do céu, no modo duas fendas, enquanto que no modo uma fenda obtém-se 500 espectros no campo principal, além de 250 no campo do céu. No caso de duas fendas, o campo de visão (FOV, *Field-of-View*) é de $7'' \times 5''$, além do campo do céu, que cobre $3.5'' \times 5''$ a 1 minuto de arco de afastamento. Já no modo uma fenda o campo principal cobre um FOV de $3.5'' \times 5''$ e o campo do céu tem FOV de $1.75'' \times 5''$. Apesar do modo uma fenda cobrir uma região espacial metade do que o modo duas fendas cobre, a vantagem de se usar esse modo é cobrir o dobro do intervalo espectral. Como as galáxias que observamos estão relativamente distantes, utilizamos o modo uma fenda, visto que este já permite cobrirmos uma extensão maior do que 1 kiloparsec nas galáxias, onde os fenômenos de nosso interesse se concentram. Na Tabela 2.2 estão as informações sobre as observações feitas.

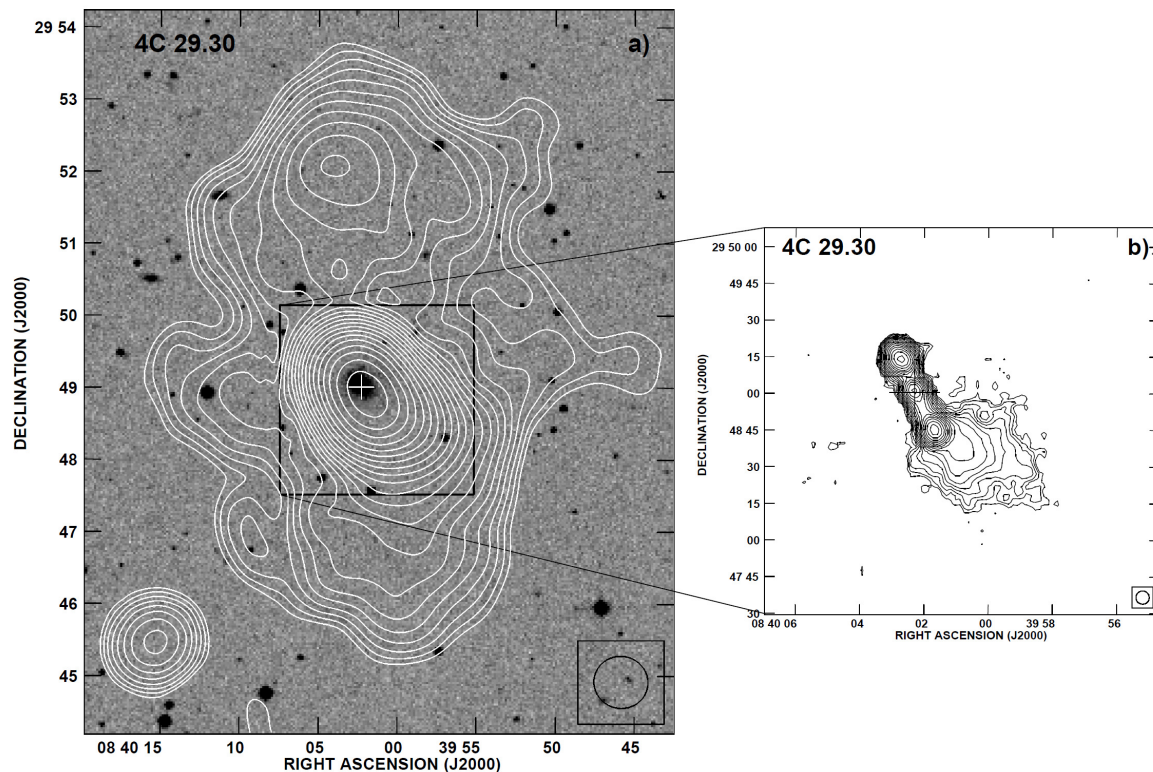


Figura 2.5: Imagens do VLA em 1400 MHz da galáxia 4C +29.30 nas configurações D-array (a) e B-array (b), mostrando as duas estruturas em rádio respectivas a cada ciclo de atividade. Figura retirada de Jamrozy et al. (2007).

Tabela 2.2: Detalhes dos turnos de observação nos telescópios Gemini Norte (GN) e Gemini Sul (GS).

| Galáxia | ID do programa | $t_{exp}(s)$ | Rede | $\Delta\lambda (\text{\AA})$ | Seeing ($''$) |
|-----------|----------------|------------------|-------------|------------------------------|-----------------------------------|
| Pictor A | GS-2004B-Q-25 | 9×600 | R400+_G5325 | 5600-9925 | $0.57'' \times 0.82''$ (elíptico) |
| Arp 102B | GN-2007A-Q-57 | 6×900 | B600+_G5303 | 4400-7300 | $0.6''$ |
| 3C 33 | GN-2010B-Q-66 | 8×940 | B600+_G5307 | 4400-7300 | $0.5''$ |
| 4C +29.30 | GN-2016A-Q-77 | 15×1140 | B600+_G5307 | 4400-7300 | $0.7''$ |

2.3 Redução dos dados

Para a redução dos dados, foi utilizado uma série de tarefas do pacote GMOS, desenvolvido como parte do pacote GEMINI, que são ferramentas de redução de dados do programa IRAF (*Image Reduction and Analysis Facility*). Os procedimentos usados na redução dos dados são descritos na documentação sobre as rotinas GMOSINFOIFU e GMOSEXAMPLES, e resumidos a seguir. Inicialmente excluimos as bordas do CCD. Após, fizemos a subtração da imagem de bias, eliminando a emissão de ponto zero do CCD. Fez-se então a correção por *flat-field*, que consiste na divisão das imagens individuais pelas imagens de campo uniformemente iluminado, para corrigir possíveis diferenças de resposta em cada pixel do CCD. Utilizamos rotinas do IRAF de remoção de raios cósmicos, e então fizemos a subtração da contribuição do céu próximo ao objeto. Aplicamos então a calibração em fluxo, onde foram utilizadas estrelas padrão observadas durante o programa: Feige 66 para as galáxias Arp 102B e 4C +29.30, LLT 3218 para Pictor A e Feige 110 para 3C 33. Após foi feita a calibração em comprimento de onda e a correção por refração atmosférica, para corrigir o deslocamento espacial causado pela refração diferencial ao longo dos diferentes comprimentos de onda. Por fim, foram construídos os cubos de dados, contendo informações espaciais em duas dimensões e espectrais na terceira, com amostragem espacial de $0.1'' \times 0.1''$. Ao final, foram adicionadas as exposições individuais, resultando em um cubo de dados final para cada galáxia.

3 *Metodologia*

Para investigar os fenômenos físicos que ocorrem na região circumnuclear das rádio galáxias observadas, construímos mapas bidimensionais da cinemática e excitação do gás, extraíndo as informações dos cubos resultantes após a redução dos dados. Neste capítulo descrevemos como construímos esses mapas através das medidas de linhas de emissão, e outras técnicas utilizadas para medir e interpretar os dados obtidos.

3.1 **Deconvolução de Richardson-Lucy**

Qualquer imagem de um objeto astronômico feita na superfície terrestre é resultado da convolução entre a imagem original do objeto e a função de dispersão pontual (PSF, de *Point Spread Function*), que é a resposta de um sistema ótico à imagem de uma fonte pontual combinada com a distorção introduzida pela atmosfera. A convolução é uma representação matemática do efeito da distorção introduzido pela atmosfera e pelos instrumentos e telescópio numa imagem pontual. Considerando que o instrumento utilizado introduz também um ruído observacional nos dados, temos que a imagem observada de um objeto $I(x,y)$ é dada por

$$I(x,y) = (P * O)(x,y) + N(x,y), \quad (3.1)$$

onde $O(x,y)$ é a imagem original do objeto, $P(x,y)$ é a PSF da observação e $N(x,y)$ é o ruído instrumental.

A deconvolução de Richardson-Lucy (Richardson, 1972, Lucy, 1974) é um procedimento iterativo cujo propósito é reverter o efeito da convolução. Assim, no caso astronômico, a deconvolução visa obter a imagem original $O(x,y)$, através da imagem observada $I(x,y)$ e a PSF $P(x,y)$, que pode ser obtida a partir da imagem de uma estrela. Esse procedimento pode ser resumido pela expressão:

$$O^{n+1}(x,y) = \left[\frac{I(x,y)}{(P * O)(x,y)} * P^T(x,y) \right] \times O^n(x,y), \quad (3.2)$$

onde $P^T(x,y)$ é a transposta de $P(x,y)$. Esse procedimento é feito utilizando um *script* escrito na linguagem de programação IDL (*Interactive Data Language*). Maiores detalhes da deconvolução de Richardson-Lucy podem ser encontrados em Menezes et al. (2014).

A deconvolução de Richardson-Lucy foi utilizada apenas em casos de necessidade. No caso do cubo de dados da galáxia Arp 102B, apenas aplicamos a deconvolução para fazer a análise PCA (ver seção 3.6). Já no caso da galáxia Pictor A, foi necessário utilizar a deconvolução logo após a redução de dados, e todas as medidas e análises foram feitas sobre esse cubo deconvoluído. Isso se deve ao fato dos dados originais serem bastante afetados pelo que acreditamos ser um problema de guiagem. A PSF adotada para Pictor A foi assumida como sendo a distribuição espacial da emissão nuclear de duplo pico, que deve ser não resolvida. Esta PSF tem uma largura à meia altura (FWHM, de full width half maximum) de $0.57''$ ao longo do eixo x e de $0.82''$ ao longo do eixo y , além de apresentar irregularidades como ilustrado no painel esquerdo da Fig. 3.1. Após a utilização da deconvolução de Richardson-Lucy a PSF medida foi de $0.43''$ no eixo x e $0.56''$ no eixo y . Na fig. 3.1 comparamos a distribuição espacial da emissão compacta com perfil de duplo pico, antes e depois da convolução, para ilustrar a melhoria na resolução angular obtida. Embora não tenhamos conseguido obter uma imagem corrigida circular, as principais irregularidades da PSF foram corrigidas.

3.2 Medidas das linhas de emissão

As medidas das linhas de emissão presentes nos espectros das galáxias foram feitas através de ajustes de funções Gaussianas aos perfis das linhas. Os parâmetros obtidos dos ajustes foram então usados no cálculo dos parâmetros físicos do gás emissor. A integral sob o perfil, o comprimento de onda central e a FWHM da função Gaussiana nos dá o fluxo integrado, a velocidade centróide e a dispersão de velocidades, respectivamente, do gás emissor. A dispersão de velocidades σ resulta da razão $\sigma = FWHM/2.355$.

Dificuldades que encontramos nas medidas foram devidas ao fato do ajuste ser feito em centenas de espectros para cada galáxia. Enquanto o ajuste em geral é muito bom para os pixels centrais, para regiões mais distantes do centro isto em geral não acontece. Além disso, cada galáxia possui um conjunto particular de espectros. Para alguns, ajustes de uma Gaussiana simples já é suficiente, mas para outros, são necessárias mais do que uma componente Gaussiana ou até outro tipo de função, como Lorenzianas ou funções de Gauss-Hermite. O grande número de

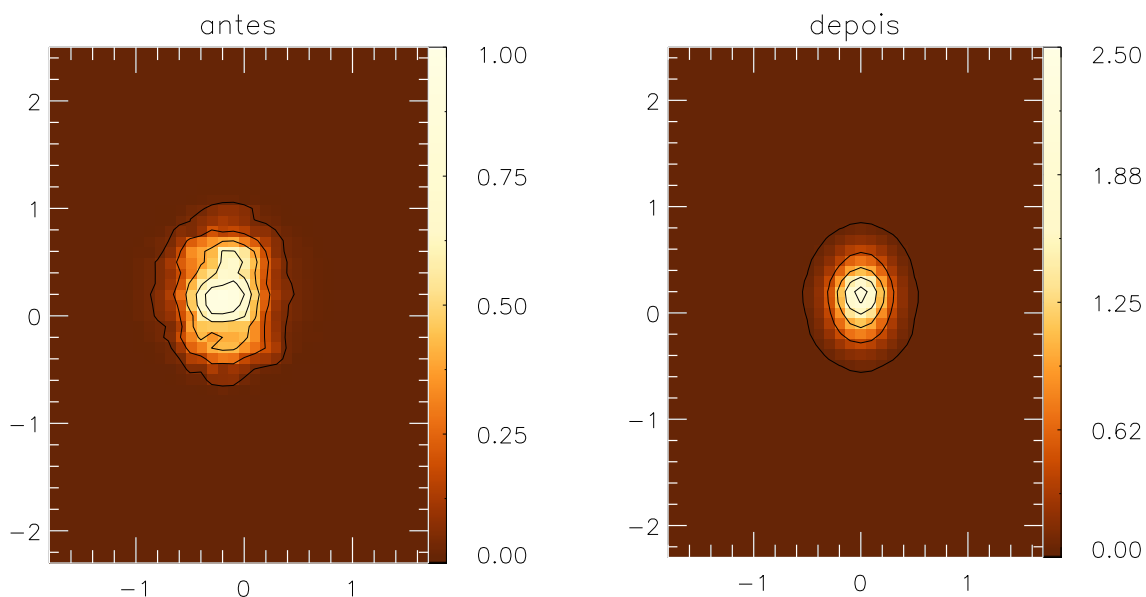


Figura 3.1: Resultado da deconvolução de Richardson-Lucy feita sobre o cubo de dados da galáxia Pictor A. Distribuição espacial da emissão compacta correspondente ao perfil de duplo pico em $H\alpha$, antes (esquerda) e depois (direita) da deconvolução. Eixos x e y em unidades de segundos de arco, e valores de fluxo em unidades de $10^{-16} \text{ erg s}^{-1}$ per pixel.

espectros que necessitamos ajustar para cada galáxia faz necessário a utilização de um método automatizado de ajuste. Assim, foram utilizados *scripts* de ajuste (escritos em IDL) em que se fornece uma estimativa inicial para os parâmetros das Gaussianas ajustadas. Esta estimativa inicial será utilizada para fazer o ajuste do primeiro pixel do cubo de dados. O resultado do ajuste, caso seja satisfatório, será utilizado como uma nova estimativa inicial para o próximo pixel. Assim, repete-se o processo sucessivamente, até que todos os pixels do cubo de dados sejam ajustados, obtendo-se um mapa dos parâmetros de ajuste.

Para cada espectro individual do cubo de dados foram feitos 100 ajustes, adicionando ruído randômico com uma distribuição gaussiana, modulado pelo ruído original do espectro. Isso foi feito para se estimar as incertezas nos parâmetros devido ao ruído. Os valores médios de amplitude da linha de emissão, comprimento de onda central e largura da linha foram usados para calcular a distribuição de fluxo, velocidade centróide e dispersão de velocidade, enquanto que o desvio padrão da média dos ajustes foi usado para estimar as incertezas nos parâmetros.

3.2.1 Polinômios de Gauss-Hermite

Como alternativa à função Gaussiana, pode-se ajustar o perfil das linhas de emissão com os polinômios de Gauss-Hermite, que são usados para detectar as assimetrias do perfil em relação à Gaussiana. Os polinômios de Gauss-Hermite são caracterizados pelas funções:

$$f_{gh}(\lambda) = F \frac{e^{-k^2/2}}{\sqrt{2\sigma^2}} (1 + h_3 H_3 + h_4 H_4) \quad (3.3)$$

$$H_3 = \frac{1}{\sigma} (2\sqrt{2}k^3 - 3\sqrt{2}k) \quad (3.4)$$

$$H_4 = \frac{1}{\sqrt{24}} (4k^4 - 12k^2 + 3) \quad (3.5)$$

$$k = \frac{(\lambda - \bar{\lambda})}{\sigma} \quad (3.6)$$

onde F é o fluxo da linha, σ é a dispersão de velocidade e $\bar{\lambda}$ é o comprimento de onda do pico da linha.

Além desses parâmetros medidos pelo ajuste de Gauss-Hermite, temos os momentos h_3 e h_4 , que parametrizam a diferença do perfil à uma Gaussiana. h_3 é relacionado à assimetria no perfil, como asas azuis ou vermelhas ($h_3 < 0$ e $h_3 > 0$, respectivamente). Já h_4 mede a curtose do perfil, quantificando a agudeza do pico do perfil, com $h_4 > 0$ para picos mais agudos e $h_4 < 0$ para picos mais largos. O perfil de uma Gaussiana é obtido quando $h_3 = h_4 = 0$. A Fig. 3.2 mostra alguns exemplos de perfil de Gauss-Hermite, com diferentes valores de h_3 e h_4 .

3.3 Channel maps

Como as linha de emissão do gás em galáxias ativas são relativamente “largas”, com a resolução espectral do instrumento GMOS ($R \sim 1900$ e ~ 1700 nas redes R400 e B600, respectivamente) foi possível resolver espectralmente a emissão, mapeando-a para intervalos de velocidade menores do que a largura da linha. Assim, construímos mapas de emissão do gás em cada linha para diferentes canais de velocidade (*channel maps*). Para mapear a contribuição de fluxo em determinada velocidade, integra-se o fluxo da linha dentro do canal de velocidade desejado, respeitando o limite de resolução espectral. Deve-se também subtrair a contribuição do contínuo, para que o resultado seja apenas devido à linha de emissão. Os *channel maps* possibilitam então analisar o campo de velocidades do gás ao longo de todo o perfil da linha e não apenas utilizando o comprimento de onda central, como pode ser observado na Fig. 3.3.

A Fig. 3.3 é uma representação esquemática dos *channel maps* obtidos de uma espectroscopia IFU, onde os painéis superiores mostram os perfis de uma linha de emissão em duas posições

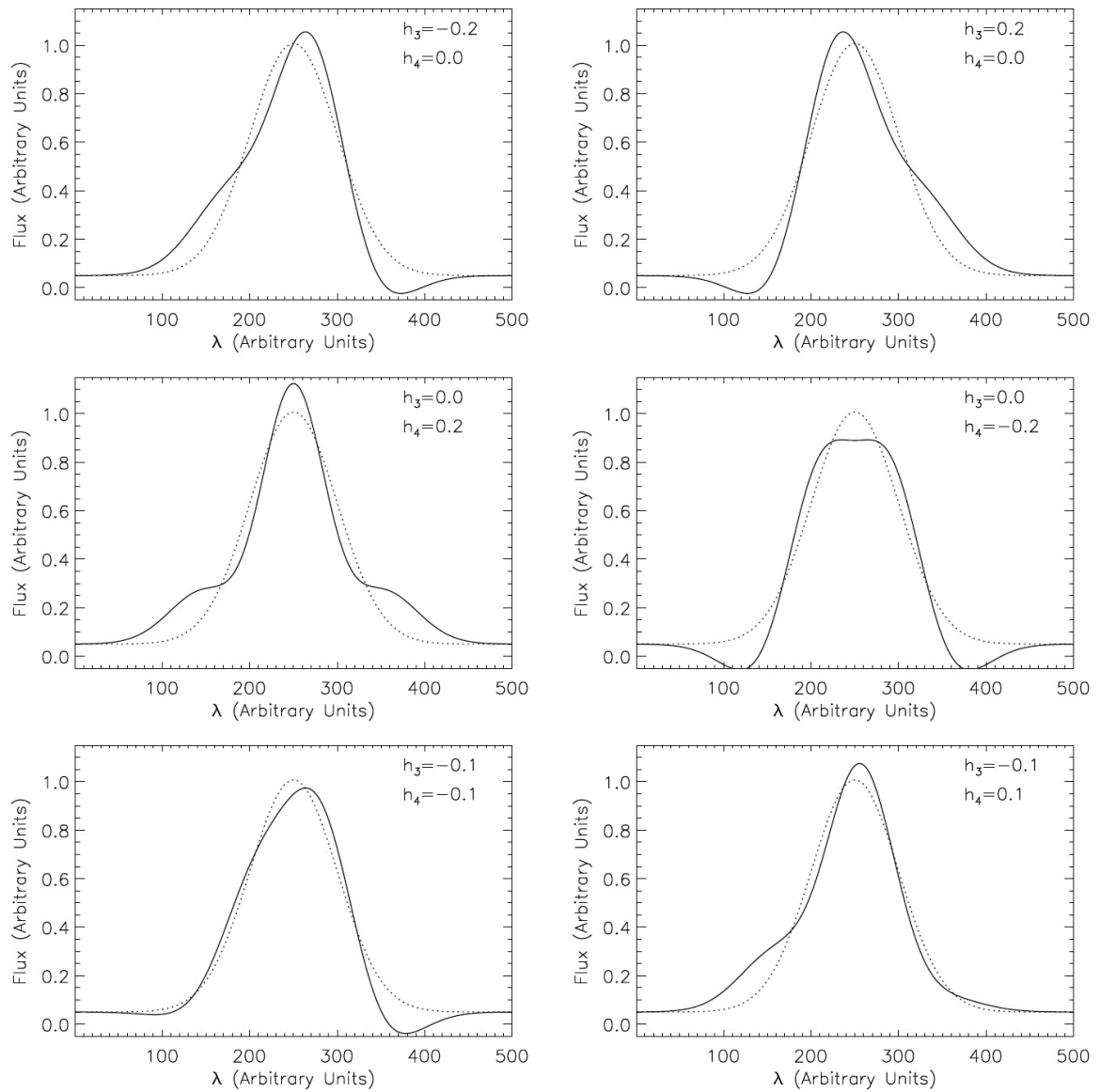


Figura 3.2: Comparação de perfis Gaussiano (linhas pontilhadas) e Gauss-Hermite (linhas contínuas), para diferentes valores de h_3 e h_4 , mostrados no topo direito dos painéis. A amplitude, o comprimento de onda central e a largura do perfil são os mesmos para as funções mostradas. Esta figura foi obtida de Riffel (2010).

especiais diferentes no cubo de dados e os painéis inferiores mostram os mapas de fluxo em três fatias de velocidade. Os mapas de fluxo foram integrados em intervalos de comprimento de onda, representados em velocidades de -150 km s^{-1} , 0 km s^{-1} e 150 km s^{-1} (da esquerda para a direita, respectivamente, nos painéis inferiores), em relação à velocidade sistêmica assumida. Essas faixas de velocidades são representadas por intervalos espectrais em azul, verde e vermelho, respectivamente, nos painéis superiores. A contribuição do contínuo é subtraída do mapa de fluxo a partir das médias de fluxo nas regiões adjacentes ao perfil da linha de emissão, conforme ilustrado na figura. Assim, obtemos um mapeamento dos fluxos integrados em cada intervalo de velocidade. As posições A e B ilustram a contribuição de fluxo nos mapas, conforme a intensidade observada no perfil da linha de emissão. Essa técnica nos permite fazer uma investigação “tridimensional” do gás emissor, uma vez que parte do mapeamento é feito ao longo da linha-de-visada.

3.4 Razão entre linhas de emissão e modelos de ionização

Razões entre os fluxos integrados de linhas de emissão, ou simplesmente razões de linha, são importantes indicadores do mecanismo de ionização do gás emissor. Os chamados diagramas diagnósticos, sendo os pioneiros e mais utilizados conhecidos como diagramas BPT (Baldwin et al., 1981), procuram determinar empiricamente a natureza da ionização do gás utilizando uma série de razões de linhas. A Fig. 3.4 mostra três dos diagramas diagnósticos mais utilizados na região espectral do ótico. No eixo y da figura temos a razão de $[\text{O III}]\lambda 5007/\text{H}\beta$ em escala logarítmica, e no eixo x temos, da esquerda para a direita, as razões de $[\text{N II}]\lambda 6584/\text{H}\alpha$, $[\text{S II}]\lambda 6716+37/\text{H}\alpha$ e $[\text{O I}]\lambda 6300/\text{H}\alpha$, respectivamente. Os pontos em cinza na figura representam milhares de valores obtidos a partir de espectros de galáxias do Sloan Digital Sky Survey (SDSS). As linhas divisórias são previsões de modelos de ionização que visam separar fontes de ionização diferentes. A linha tracejada e a linha contínua (em vermelho) são originados dos trabalhos teórico de Kewley et al. (2001) e empírico Kauffmann et al. (2003), respectivamente. Kewley et al. (2001) utilizaram modelos de síntese de população estelar e modelos de fotoionização para criar uma linha limítrofe de razões de linhas devido a regiões HII e *starburst* (galáxias com regiões HII gigantes no núcleo). Razões de linha com valores acima das linhas vermelhas devem ser dominadas por ionização por um AGN. Já Kauffmann et al. (2003) quiseram separar a contribuição de galáxias ou regiões emissoras compostas, onde a ionização é devida tanto a um AGN como a regiões de formação estelar circundante, introduzindo a linha tracejada. Assim, enquanto à esquerda da linha tracejada ficam as regiões HII e núcleos *starburst* (com intensa formação estelar), entre a linha tracejada e a linha vermelha ficam as galáxias

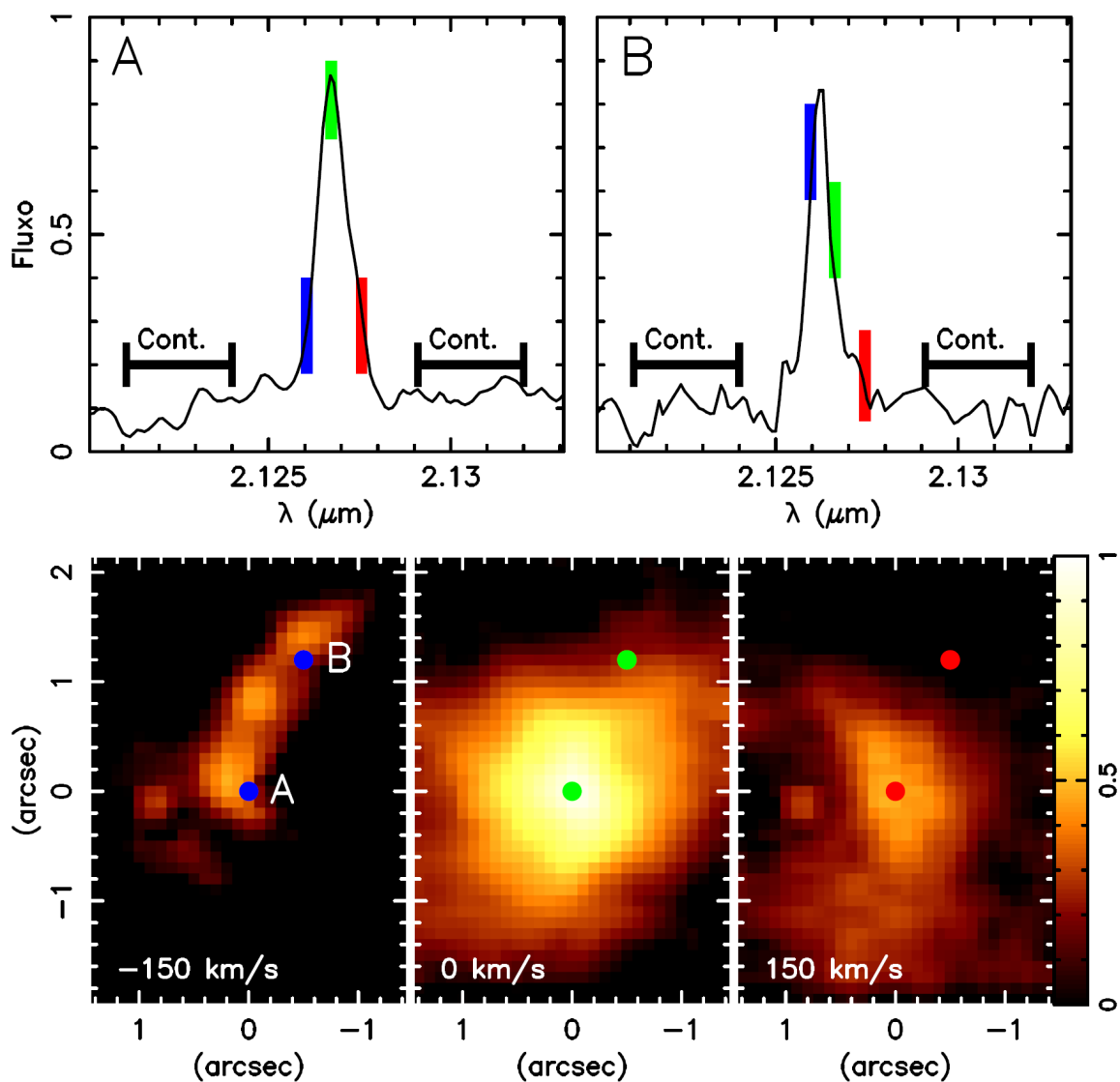


Figura 3.3: Representação esquemática dos *channel maps*. A descrição desta figura está na seção 3.3. Figura retirada da tese de doutorado de Rogemar A. Riffel (2008).

ou regiões compostas, sendo que à direita da linha ficam os AGNs. Há ainda uma subdivisão na região de AGNs. Altas razões de $[\text{O III}]\lambda 5007/\text{H}\beta$ são esperadas para objetos com emissão de linhas de alta ionização, como Seyferts, enquanto que razões baixas indicam AGNs pouco luminosos como LINERs.

Como mencionado na seção 1.5, dois dos principais mecanismos de ionização do gás circumnuclear em AGNs são fotoionização e choques. Neste trabalho consideraremos estes dois mecanismos como possíveis fontes de ionização através da construção de modelos a partir do programa MAPPINGS III. As razões obtidas com os modelos serão comparadas com as obtidas a partir dos dados. MAPPINGS III é um modelo que considera tanto a contribuição de choques à ionização quanto a fotoionização por uma fonte central. Nos modelos em que dominam os choques, se a velocidade da onda de choque é alta o suficiente (~ 200 kms), a região de recombinação atrás da frente de choque dá origem a fótons que viajam para ionizar também regiões localizadas além da frente de choque, chamada de região precursora (Allen et al., 2008). Assim, na sua grade de diferentes valores de velocidade de choque e campo magnético da região pré-choque, o modelo considera a contribuição da ionização das regiões de choque mais precursora. Já nos casos dominados por fotoionização (Groves et al., 2004a,b) considera-se a contribuição de regiões que incluem poeira, e um contínuo na forma de lei de potência do tipo $F_\nu \propto \nu^\alpha$. As razões de linha resultantes do modelo dependem do índice da lei de potência α e do parâmetro de ionização U , que é dado por (Osterbrock & Ferland, 2006):

$$U = \frac{Q(H^0)}{4\pi r^2 c n_H C}, \quad (3.7)$$

onde n_H é a densidade do gás, C é o fator de cobertura e $Q(H^0)$ é o número de fótons ionizantes.

3.4.1 Avermelhamento, densidade eletrônica e metalicidade

Podemos utilizar a razão de $\text{H}\alpha/\text{H}\beta$ para calcular o avermelhamento do gás. Adotando a lei de avermelhamento de Cardelli et al. (1989) e assumindo o caso B de recombinação (Osterbrock & Ferland, 2006) obtemos que

$$E(B - V) = 2.22 \log \frac{F(\text{H}\alpha)/F(\text{H}\beta)}{3.1}. \quad (3.8)$$

Outra utilidade das razões de linhas, nesse caso a razão $[\text{S II}]\lambda 6716/6737$, é poder estimar a densidade eletrônica do gás ionizado. Para isso, utilizamos a rotina TEMDEN do IRAF, que por sua vez utiliza o modelo de características físicas em nebulosas FIVEL (De Robertis et al.,

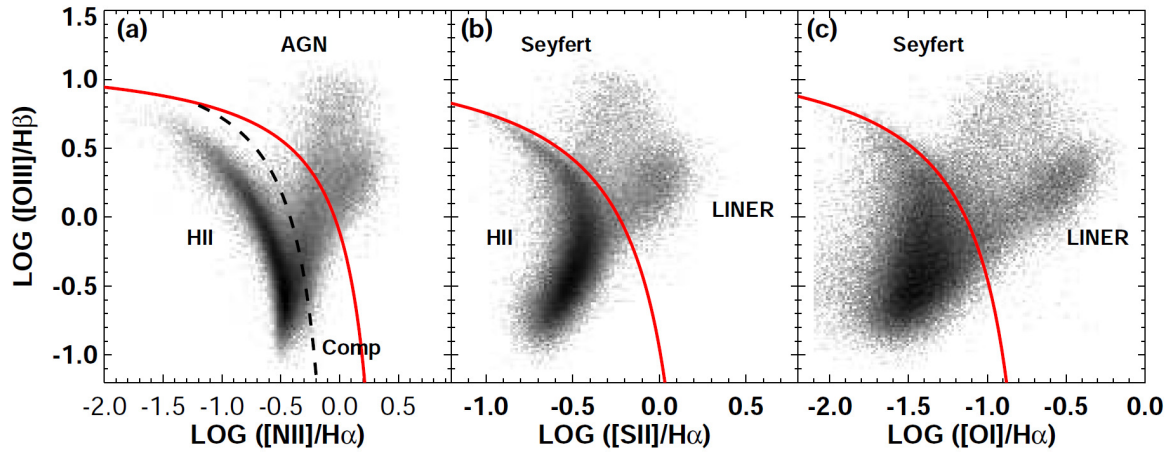


Figura 3.4: Exemplo de diagramas diagnóstico. Milhares de galáxias são representadas pelos pontos em cinza. As linhas vermelhas de Kewley et al. (2001) dividem galáxias *starburst* e regiões HII de galáxias ativas, enquanto a linha tracejada de Kauffmann et al. (2003) separa galáxias compostas de galáxias ativas. Figura retirada de Kewley et al. (2006)

1987, Shaw & Dufour, 1994). Este modelo utiliza as taxas de recombinação das linhas de emissão para estimar teoricamente a densidade necessária para uma nebulosa de temperatura definida gerar tal emissão, utilizando as relações de emissividade entre as linhas de emissão de [S II] λ 6716/6737 (Osterbrock & Ferland, 2006).

Utilizando a calibração feita por Storchi-Bergmann et al. (1998) para regiões de linhas estreitas em galáxias ativas, podemos estimar a abundância química do gás observado através das razões de linha de [N II] λ 6584/H α e [O III] λ 5007/H β . A abundância de oxigênio é dada por:

$$\begin{aligned} (O/H) = & 8.34 + 0.212x - 0.012x^2 - 0.002y + 0.007xy - 0.002x^2y + \\ & 6.52 \times 10^{-4}y^2 + 2.27 \times 10^{-4}xy^2 + 8.87 \times 10^{-5}x^2y^2, \end{aligned} \quad (3.9)$$

onde $x = [N II]\lambda 6584/H\alpha$ e $y = [O III]\lambda 5007/H\beta$.

3.5 Modelo de rotação

As galáxias estudadas nesse trabalho, bem como as outras galáxias ativas investigadas pelo grupo, quase sempre apresentam nos mapas de velocidade do gás uma componente de rotação num plano. Sabendo disso, procuramos descrever a rotação de uma forma analítica, adotando um modelo de rotação simples para descrever o campo de velocidades. Através

da utilização desse modelo, podemos obter parâmetros físicos do sistema, como velocidade sistêmica, orientação da linha de nodos e inclinação do plano de rotação em relação ao plano do céu. Além disso, podemos também identificar possíveis componentes de velocidade que não sigam o padrão rotacional, através da inspeção da diferença entre o modelo analítico e o campo observado. Assumimos que a rotação do gás segue um movimento circular kepleriano em um disco submetido a um potencial central cuja velocidade de rotação é dada por

$$v_c(r) = \frac{Ar}{(r^2 + c_0^2)^{p/2}}, \quad (3.10)$$

onde A é a amplitude da curva de rotação (em kms^{-1}), c_0 é um parâmetro de concentração, correspondendo ao raio no qual a velocidade atinge 70% da amplitude A , e p está relacionado com a inclinação da curva de rotação (Bertola et al., 1991). Considerando que esta rotação encontra-se num plano inclinado em relação à linha do céu, resulta que a velocidade radial observada em termos das coordenadas no plano do céu (R, Ψ) é dada por

$$v(R, \Psi) = v_{\text{sys}} + \frac{AR \cos(\Psi - \Psi_0) \sin \theta \cos^p \theta}{\{R^2 [\sin^2(\Psi - \Psi_0) + \cos^2 \theta \cos^2(\Psi - \Psi_0)] + c_0^2 \cos^2 \theta\}^{p/2}}, \quad (3.11)$$

onde R é a distância projetada no plano do céu com relação a um centro cinemático (X_0, Y_0), Ψ é o ângulo de posição de R em relação ao ângulo de posição da linha dos nodos (Ψ_0), θ é a inclinação do disco em rotação em relação ao plano do céu ($\theta = 90^\circ$ para o disco visto de perfil e $\theta = 0^\circ$ para o disco visto de frente) e v_{sys} é a velocidade sistêmica.

Os parâmetros livres da equação são determinados fazendo um ajuste ao campo de velocidades observado, utilizando o algoritmo de ajustes por mínimos quadrados não linear de Levenberg-Marquardt, utilizando estimativas iniciais para os parâmetros a serem ajustados.

3.6 Análise PCA

A grande quantidade de informações na forma de um cubo de dados, motivou alguns astrônomos a proporem métodos alternativos de análise, como é o caso da Análise de Componentes Principais, ou PCA (*Principal Component Analysis*), desenvolvida por Steiner et al. (2009) especificamente para dados provenientes de unidades de campo integral. Matematicamente, a PCA é uma técnica que, através de uma transformação linear ortogonal, converte o cubo de dados original, que é um sistema de coordenadas correlacionadas, em um sistema de

coordenadas não correlacionadas, que é representado pela matriz $\mathbf{T}_{\beta\kappa}$, que é dada por

$$\mathbf{T}_{\beta\kappa} = \mathbf{I}_{\beta\lambda} \cdot \mathbf{E}_{\lambda\kappa}, \quad (3.12)$$

onde $\mathbf{I}_{\beta\lambda}$ é o cubo de dados original expresso em coordenadas espaciais e espectrais, e $\mathbf{E}_{\lambda\kappa}$ é a matriz característica, que é formada pelos autovetores E_{κ} do novo sistema. Esses autovetores são chamados de autoespectros e quando projetados espacialmente produzem os chamados “tomogramas”, ordenados pelo valor decrescente de autovalor, λ_{κ} , que é a variância de cada componente. Os autoespectros mostram correlações e anti-correlações entre componentes emissores, enquanto os tomogramas mapeiam estes componentes espacialmente. Logo, essa técnica pode ser útil para identificar componentes que não são perceptíveis em outras formas de análise.

3.7 Cálculos de massa do gás emissor, taxa de *outflow* e taxa de acreção

Para investigar a origem, a quantidade de gás necessária para alimentar o AGN, bem como a potência de *feedback*, calculamos a massa de gás ionizado na região central, as taxas de *outflow* de gás bem como a taxa de acreção de matéria ao buraco negro central como explicado a seguir.

3.7.1 Massa do gás emissor

Podemos calcular a massa do gás ionizado utilizando a equação

$$M = V f n_e m_p, \quad (3.13)$$

onde V é o volume da região emissora, f é o fator de preenchimento (*filling factor*), n_e é a densidade eletrônica da região e m_p é a massa do próton.

De Osterbrock & Ferland (2006), sabemos que a emissividade da linha de emissão de $H\beta$ pode ser calculada como

$$j_{H\beta} = n_e n_p \alpha_{H\beta}^{eff} \frac{h\nu_{H\beta}}{4\pi}, \quad (3.14)$$

onde n_p é a densidade de prótons, $\alpha_{H\beta}^{eff}$ é o coeficiente de recombinação efetiva de $H\beta$ e $h\nu_{H\beta}$

é a energia correspondente a transição. Quando integrada em todo o volume e em todas as direções, a emissividade nos dá a luminosidade total em $H\beta$:

$$L(H\beta) = \int \int j_{H\beta} d\Omega dV = 1.2 \times 10^{-25} V f n_e^2 \text{ erg s}^{-1}, \quad (3.15)$$

onde usamos a aproximação em que a composição do gás emissor é puramente hidrogênio e completamente ionizado ($n_e \equiv n_p$), e adotamos o coeficiente $\alpha_{H\beta}^{eff}$ para a temperatura de 10^4 K. Manipulando esta equação podemos obter

$$V f = 8.1 \times 10^{59} \frac{L_{41}(H\beta)}{n_3^2}, \quad (3.16)$$

onde $L_{41}(H\beta)$ é a luminosidade de $H\beta$ em unidades de $10^{41} \text{ erg s}^{-1}$ e n_3 é a densidade eletrônica em unidades de 10^3 cm^{-3} . A massa estimada da região emissora vem da combinação da equação 3.16 com a equação 3.13, o que resulta em:

$$M \approx 7 \times 10^5 \frac{L_{41}(H\beta)}{n_3^2} M_{\odot}. \quad (3.17)$$

Este cálculo pode ser acompanhado com maior detalhe em Peterson (1997).

Para calcular a luminosidade total em $H\beta$, foi necessário corrigir o fluxo de $H\beta$ medido por extinção. Nesse trabalho utilizamos a lei de avermelhamento de Cardelli et al. (1989) e adotamos o valor teórico de $F_0(H\alpha)/F_0(H\beta) = 3.1$, correspondente ao caso B de recombinação. Assim, a correção é dada por

$$L(H\beta) = 4\pi d^2 F(H\beta) 10^{C(H\beta)}, \quad (3.18)$$

onde d é a distância da galáxia e $C(H\beta)$ é o coeficiente de extinção interestelar, que por sua vez é dado pela equação

$$\frac{F(H\alpha)}{F(H\beta)} = \frac{F_0(H\alpha)}{F_0(H\beta)} 10^{-C(H\beta) \frac{f(H\alpha) - f(H\beta)}{f(H\beta)}}, \quad (3.19)$$

onde $f(H\alpha) = 0.818$ e $f(H\beta) = 1.164$ são os valores da função de extinção para $H\alpha$ e $H\beta$, respectivamente, e $F(H\alpha)$ e $F(H\beta)$ são os fluxos observados.

3.7.2 Taxa de *outflow*

A taxa de massa em *outflow* pode ser estimada para uma região, desde que assumida uma geometria em que o gás esteja sendo expulso do núcleo. A taxa de *outflow* pode ser dada pela equação de continuidade (Riffel & Storchi-Bergmann, 2011., por exemplo)

$$\dot{M}_{out} = m_p n_e v_{out} A f, \quad (3.20)$$

onde A é a área da secção transversal da geometria assumida, v_{out} é a velocidade de *outflow* perpendicular a esta área e f é o chamado *filling factor*.

Podemos ainda estimar a potência energética do *outflow* como (Holt et al., 2006)

$$\dot{E} = \frac{\dot{M}_{out}}{2} (v_{out}^2 + 3\sigma^2), \quad (3.21)$$

onde σ é a dispersão de velocidades média observada na região do *outflow*.

3.7.3 Taxa de acreção

É de nosso interesse comparar a taxa de *outflow* calculada, como visto na seção passada, com a taxa de acreção de massa do AGN. Isso pode ser feito utilizando a equação (Peterson, 1997)

$$\dot{m} = \frac{L_{bol}}{c^2 \eta} \approx 1.8 \times 10^{-3} \left(\frac{L_{44}}{\eta} \right) M_{\odot} \text{yr}^{-1}, \quad (3.22)$$

onde L_{bol} é a luminosidade bolométrica nuclear, L_{44} é a luminosidade bolométrica em unidades de $10^{44} \text{ erg s}^{-1}$ e η é a eficiência de conversão de energia de repouso da massa acretada em radiação.

4 *Resultados e discussões*

Os resultados e as discussões deste trabalho estão descritos em artigos científicos sobre cada galáxia da amostra. Os artigos publicados são *Kinematics and excitation of the nuclear spiral in the active galaxy Arp 102 B* (Couto et al., 2013) e *Integral field spectroscopy of the circum-nuclear region of the radio galaxy Pictor A* (Couto et al., 2016b). Devemos ressaltar que boa parte do trabalho feito na elaboração do primeiro artigo foi realizado durante o mestrado, em particular a cinemática do gás. Durante o doutorado aprofundamos a análise da excitação do gás. Estes artigos são disponibilizados gratuitamente em <https://arxiv.org/archive/astro-ph>. Outros dois artigos estão em fase de preparação, com nomes provisórios de *Circumnuclear gaseous kinematics and excitation of radio galaxy 3C 33* e *Optical integral field spectroscopy of radio galaxy 4C +29.30*.

Ao final deste capítulo, estimamos alguns parâmetros físicos das galáxias estudadas, para auxiliar na discussão do comportamento geral da amostra.

Gas kinematics and excitation in the inner $4.0 \times 5.8 \text{ kpc}^2$ of the radio galaxy 3C 33

Guilherme S. Couto^{1*}, Thaisa Storchi-Bergmann¹, Allan Schnorr-Müller¹

¹ *Universidade Federal do Rio Grande do Sul, IF, CP 15051, Porto Alegre 91501-970, RS, Brazil*

Accepted . Received ; in original form

ABSTRACT

We present optical integral field spectroscopy – obtained with the Gemini Multi-Object Spectrograph – of the inner $4.0 \times 5.8 \text{ kpc}^2$ of the narrow-line radio galaxy 3C 33 at a spatial resolution of 0.58 kpc. The gas emission shows three brightest structures: a strong knot of nuclear emission extending up to $\approx 500 \text{ pc}$ from the nucleus and two other knots at $\approx 1''.2$ (1.4 kpc) south-west and north-east from the nucleus along the ionization axis. We detect two kinematic components in the emission lines profiles, with a “broader component” ($150\text{--}200 \text{ km s}^{-1}$) being dominant within a $\sim 1 \text{ kpc}$ strip (“the nuclear strip”) running perpendicularly to the radio jet and a narrower component dominating elsewhere. Centroid velocity maps reveal a rotation pattern with velocity amplitudes reaching $\sim \pm 450 \text{ km s}^{-1}$ in the region dominated by the narrow component, while residual blueshifts and redshifts relative to rotation are observed in the nuclear strip, where we also observe the highest values of the $[\text{N II}]/\text{H}\alpha$, $[\text{S II}]/\text{H}\alpha$ and $[\text{O I}]/\text{H}\alpha$ line ratios. We interpret these residuals and increased line ratios as due to a lateral expansion of the ambient gas in the nuclear strip due to shocks produced by the passage of the radio jet. A possible inflow stream in the rotating disk is revealed by an increase in the $[\text{O I}]/\text{H}\alpha$ ratio values and velocity dispersions in the shape of two spiral arms extending $\sim 2''$ (2.3 kpc) north-east and south-west from the nucleus.

Key words: Galaxies: individual 3C 33 – Galaxies: active – Galaxies: nuclei – Galaxies: kinematics – Galaxies: jets

1 INTRODUCTION

The connection between active galactic nuclei (AGN) and the galaxy evolution is a topic of debate in the past few decades, with substantial evidence of a link between the two. The tight correlation between the masses of the central supermassive black holes powering the AGN and the properties of the bulges of the host galaxies (e.g., Greene & Ho 2006; Kormendy & Ho 2013), indicate that AGNs and their host galaxies coevolve in some manner. Radio galaxies are interesting laboratories to study the effects of AGN feedback on properties such as energy injection into the interstellar medium (ISM) and quenching of star formation. Theoretical studies indicate that the feedback from the AGN is necessary to explain the observed galaxy masses (Di Matteo et al. 2005; Wagner & Bicknell 2011; Fabian 2012). Radio activity, in particular, influences the energetics and thermodynamics of the gas, generating gas ionization by shocks, aside from

photoionization due to the AGN radiation (Best et al. 2000; Fragile et al. 2004; Groves et al. 2004a).

Observation evidence of interaction between the AGN feedback and the ISM in radio galaxies has been claimed by several studies (Tremblay et al. 2009; Couto et al. 2013; Santoro et al. 2014; Roche et al. 2016). Integral field spectroscopy (IFS) studies, combining imaging and spectroscopy data, can provide a direct view of the impact of AGN activity on the circumnuclear ISM, spatially identifying possible correlation of the radio jet and the ambient gas. IFS data can also provide insights of the feeding mechanisms in AGNs capable of efficiently promote gas inflow towards the inner regions. Theoretical studies show that gravitational instabilities such as nuclear spiral arms, rings, clumpy disks and bars are possible mechanisms of angular momentum loss by the inflowing gas (Englmaier & Shlosman 2004; Maciejewski 2004; Emsellem et al. 2006; Hopkins & Quataert 2010). Our group have now built up great expertise with IFS data in AGN sources, mainly using GMOS-IFU data from the Gemini telescopes, studying the feeding and feedback mechanisms not only in radio galaxies but in local AGNs in gen-

* E-mail:gcouto@if.ufrgs.br

2 *Guilherme S. Couto et al.*

eral (Lena et al. 2016; Couto et al. 2016; Schnorr-Müller et al. 2016). In this work, we present IFS study of 3C 33 radio galaxy.

3C 33 is a nearby ($z = 0.0597$, $1''$ corresponds to 1.15 kpc in the galaxy¹) Fanaroff-Riley type II radio galaxy, with its radio emission exhibiting two extended lobes, with VLBI imaging showing two symmetric jets aligned with a large-scaled structure, which extends up to $\sim 120 \text{ kpc}$ each (Leahy & Perley 1991; Giovannini et al. 2005). A high inclination angle of $75^\circ - 80^\circ$ between the radio jet axis and the line of sight is indicated by the ratio between the jet and the counterjet. The optical emission line spectrum of 3C 33 is typical of Seyfert 2 galaxies, with high [O III] luminosity of $L_{[\text{O III}]} \sim 1 \times 10^{42} \text{ erg s}^{-1}$. Tremblay et al. (2009), using *HST-ACS* data, showed that the [O III] and $\text{H}\alpha + [\text{N II}]$ extends in a “integral sign” shape $\sim 5 \text{ kpc}$ oriented north-east to south-west. Optical gaseous kinematic studies from Simkin (1979) and Heckman et al. (1985) indicate rotation, with its axis aligned with the radio jet axis (position angle $\text{PA} \sim 20^\circ$).

This work presents a two-dimensional analysis of the kinematics and excitation of the gas of the inner 2 kpc in radius of 3C 33. The paper is organized as follows: in Sec. 2 we describe the observations and the reduction of the data; in Sec. 3 we explain our emission line fitting strategy, along with the resulting gas excitation and kinematic maps we obtain from it; in Sec. 4 we discuss the results and present our interpretations to explain the physical processes taking place in 3C 33 circumnuclear region; and finally in Sec. 5 we present our conclusions.

2 OBSERVATIONS AND DATA REDUCTION

The observations were obtained with the Integral Field Unit of the Gemini Multi Object Spectrograph (GMOS-IFU) at the Gemini North Telescope on August 17, 2010 (Gemini project GN-2010B-Q-66). Eight individual exposures of 3C 33 of 940s were obtained, with a spectral coverage of $\lambda 4500 - 7300 \text{ \AA}$, centered at $\lambda 5900 \text{ \AA}$. The B600+G5307 grating with the IFU-R mask was used. The GMOS-IFU has a rectangular field-of-view (FoV) of $\approx 3''.5 \times 5''$, corresponding to $4.0 \text{ kpc} \times 5.8 \text{ kpc}$ at the galaxy. The spectral resolution is $R \sim 3800$ at $\lambda 7000 \text{ \AA}$, derived from the full width half maximum (FWHM) of the CuAr emission lines. The seeing during the observations was $0''.5$, as measured from the FWHM of a spatial profile of the calibration standard star. This corresponds to a spatial resolution of $\approx 580 \text{ pc}$ at the galaxy.

The data reduction was accomplished using tasks in the GEMINI.GMOS IRAF package as well as generic IRAF² tasks. The reduction process comprised bias subtraction, flat-fielding, trimming, wavelength calibration, sky subtraction, flux calibration, differential atmospheric refraction, building of the data cubes at a sampling of $0.1 \text{ arcsec} \times 0.1 \text{ arcsec}$

(which corresponds to $116 \text{ pc} \times 116 \text{ pc}$ at the galaxy), and finally combining the eight individual data cubes into a final data cube.

3 RESULTS

Fig. 1 illustrates our IFU data and the FoV scale compared to other structures in 3C 33. In the top left panel we display a 1.4 GHz Very Large Array (VLA) radio image, originally published by Leahy & Perley (1991), with a beam size of $4''$, covering a region of $\approx 250'' \times 200''$. We have tilted the VLA image to the same orientation of our GMOS data. The image shows two compact lobes from the radio jet extending roughly to the north and south from the nucleus, along a position angle (PA) of ≈ -19.5 . An extensive but faint emission is observed between the two lobes, along with a hotspot in the galaxy core. The galaxy is displayed in the top middle panel, in an image obtained with the GMOS acquisition camera ($\lambda 5620\text{-}6980$, filter r_G0303), covering a region of $10'' \times 10''$. Faint dark lanes are observed north from the nucleus, extending along the east-west direction, probably due to dust in a disk-like structure, suggesting that this is the near side of the galaxy. The top right panel shows a *HST-ACS* narrow band image³ using the F551N ramp filter in the Wide Field Channel (WFC), with a central wavelength of $\lambda 5302$, within a region of $\approx 3''.5 \times 5''$, which is the FoV of our GMOS IFU data. This [O III] $\lambda 5007$ restframe-centred image displays its peak emission in the nucleus (position N), with extensions towards the north-east and south-west, where positions A and B are located respectively, in a structure resembling spiral arms.

The bottom panels display the spectra extracted in the positions N (nucleus, obtained from the peak of the continuum), A (located $\approx 1''$ north-east from the nucleus) and B (located $\approx 0''.6$ south-west from the nucleus) shown in the top right panel, from the GMOS IFU data-cube. Each spectrum has a spatial aperture of one spaxel, thus $0''.1 \times 0''.1$. For visual purposes, we only display in Fig. 1 the main emission-lines: $\text{H}\beta\lambda 4861$, $[\text{O III}]\lambda\lambda 4959, 5007$, $[\text{N II}]\lambda\lambda 6548, 84$, $\text{H}\alpha\lambda 6564$ and $[\text{S II}]\lambda\lambda 6717, 31$. Also strong is the $[\text{O I}]\lambda\lambda 6300, 34$. Other, weaker, emission-lines are also observed, such as the $\text{He II}\lambda 4686$, $\text{H}\gamma\lambda 4340$ and $[\text{O III}]\lambda 4363$. The profile of the emission-lines display strong red and blue wings in the spectra of positions A and B, respectively. In fact these are different kinematical components of gas emission, as we will discuss further in the next sections.

3.1 One-component fit with Gauss-Hermite Polynomials

The gaseous centroid velocities, velocity dispersions and integrated fluxes were obtained by fitting Gauss-Hermite polynomials to the emission lines. The $h3$ and $h4$ Gauss-Hermite moments parametrize the deviations from a Gaussian profile, thus are good tracers of multiple emission-line components. $h3$ is related to the skewness of the profiles, and $h4$ to its kurtosis. In other words, $h3$ measures asymmetric deviations from a Gaussian profile, such as blue or

¹ We adopt cosmological parameters $H_0 = 70.5 \text{ km s}^{-1} \text{ Mpc}^{-1}$, $\Omega_\Lambda = 0.73$ and $\Omega_M = 0.27$

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

³ obtained from <http://archive.stsci.edu>, proposal ID 10882.

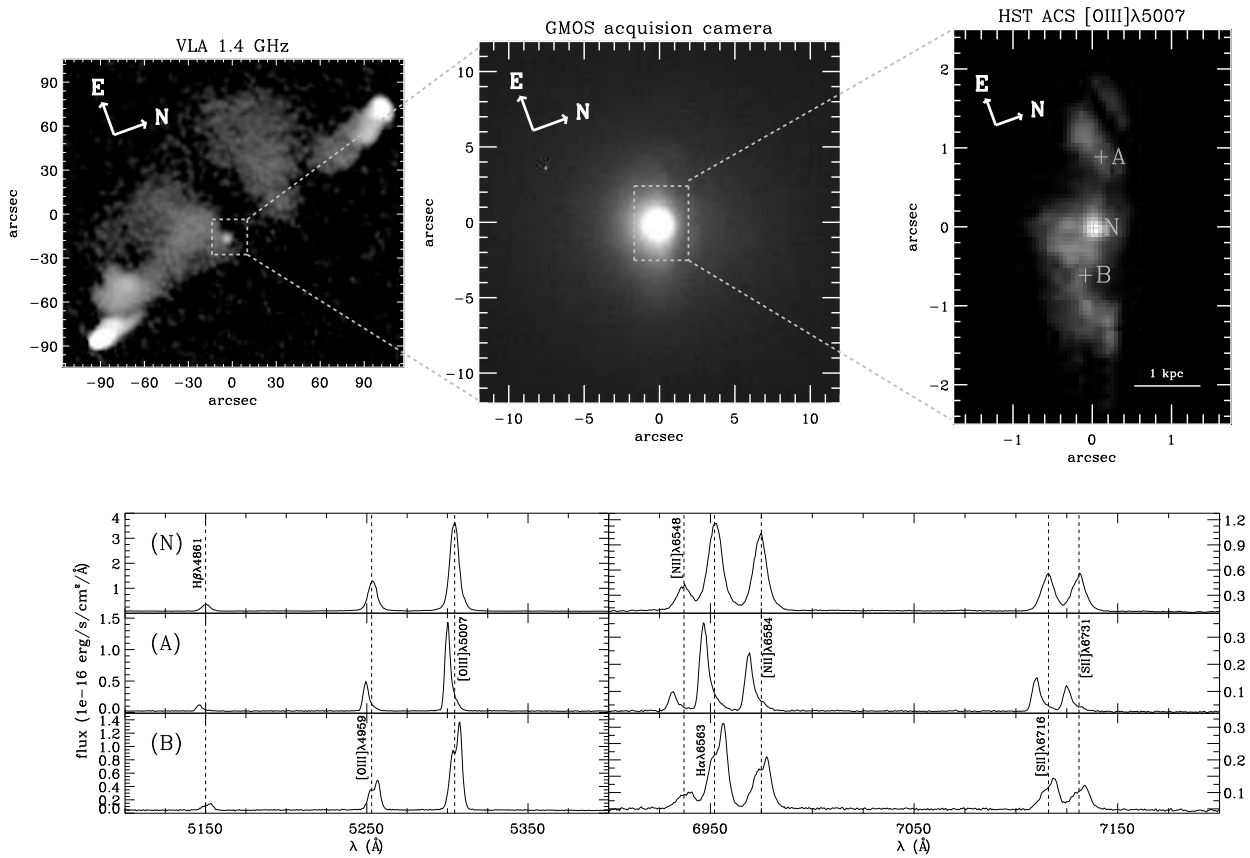


Figure 1. Top left panel: 1.4 GHz VLA radio image of radio galaxy 3C 33 and its lobes. Top middle panel: optical GMOS acquisition camera image of the galaxy. Top right panel: *HST-ACS* [O III] λ5007 narrow band image within the FoV of the GMOS IFU data. Bottom panels: Spectra extracted in positions N, A and B displayed in the top right panel.

red wings, and $h4$ quantify the peakiness of the profile, with $h4 > 0$ for a more peaked and $h4 < 0$ for a broader profile than a Gaussian curve. A Gaussian profile is obtained when $h3 = h4 = 0$. In order to reduce the number of free parameters in the fit, the following physically motivated constraints were imposed:

(i) different lines from the same ionic species have the same kinematic parameters. For example, the [S II] λλ6717,31 emission lines have the same centroid velocity and velocity dispersion. This was also done for the Gauss-Hermite parameters $h3$ and $h4$;

(ii) the [N II] λλ6548,84 emission lines have the same centroid velocity and velocity dispersion as Hα;

(iii) the [N II] λ6548 flux was fixed as 1/3 of the [[N II] λ6584 flux, in accordance with nebular physics (Osterbrock & Ferland 2006). This was also done for the [O III] λλ4959,5007 and [O I] λλ6300,34 emission lines.

In Fig. 2 we display the best Gauss-Hermite polynomial model fit to the [O III] λλ4959,5007 emission lines, in the same positions marked in the top right panel of Fig. 1. We also display the Gauss-Hermite parameters $h3$ and $h4$ for each position. Noticeably Gauss-Hermite is not a good model for the emission-line profiles of some regions, such as

positions A and B. However, for others, it does fit nicely, like in position N. The distribution of the $h3$ and $h4$ for the [O III] emission-lines are shown in Fig. 3. Almost the whole FoV present $|h3| > 0.03$, pointing to the presence of red (located mainly $\approx 1''$ east from the nucleus) and blue wings (located mainly $\approx 1''$ west from the nucleus). $h4$ parameter reaches high negative values in two elongated regions, appearing to be symmetric towards the nucleus, located in the same regions of higher positive and negative values of $h3$. These regions are where two components are most recognizable, like in the spectrum of position B, located in the elongated region west from the nucleus. For regions with $|h3|$ or $|h4|$ greater than 0.03, we performed two-Gaussian fits. For other regions a simple Gaussian fit was performed. We discuss these fits further in the next subsection.

The measured integrated flux, centroid velocity and velocity dispersion maps for [O III] λ5007, Hα and [O I] λ6300 emission lines, resulting from the Gauss-Hermite fits, are displayed in Fig. 4. Flux distributions are similar to the top right panel of Fig. 1, displaying two extended emitting regions towards the north-east and south-west, corresponding to the spiral-like distribution in the *HST* image. The centroid velocity maps display a pattern almost identical to the known “spider” diagram, expected for rotation, with

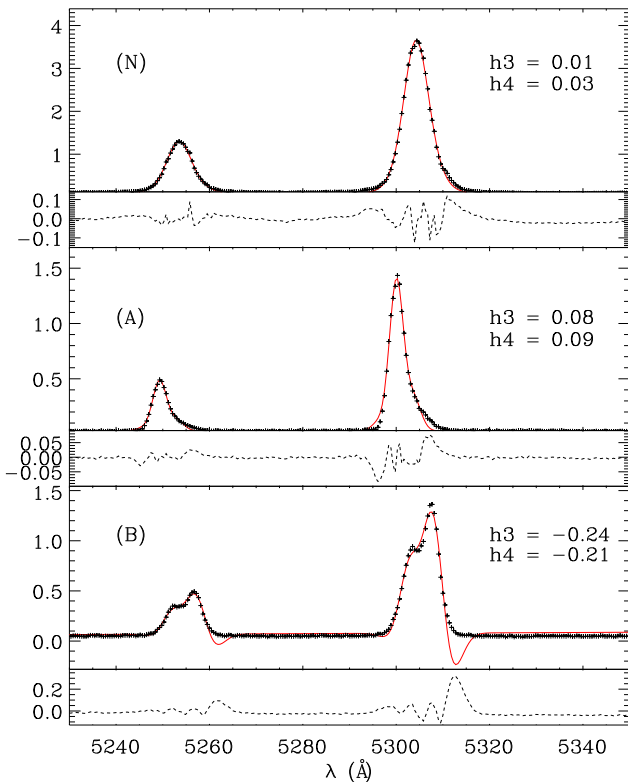
4 *Guilherme S. Couto et al.*


Figure 2. Fit of Gauss-Hermite polynomials into the $[\text{O III}]\lambda\lambda 4959, 5007$ emission-line profiles, for the three positions shown in the top right panel of Fig. 1. Black crosses display spectrum data points and red lines represent the best model fitted to the profiles, with the resulting $h3$ and $h4$ parameters displayed in the upper right corner of each panel. Residuals are shown by dashed black lines. Flux units (y axis) are $10^{-16} \text{ erg s}^{-1} \text{ cm}^{-2} \text{ \AA}^{-1}$.

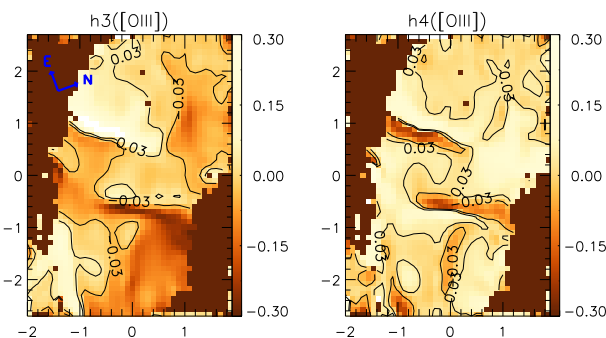


Figure 3. Gauss-Hermite $h3$ and $h4$ parameters maps, obtained from the fit of the $[\text{O III}]\lambda\lambda 4959, 5007$ emission lines.

the major axis having its position angle close to the axis of most extended emission in the flux maps. Blueshifts and redshifts are observed to east and west from the nucleus, respectively, with high velocity amplitudes ($\sim \pm 350 \text{ km s}^{-1}$). There is a noticeable distortion in the rotating pattern in the inner arcsecond or so, where we conclude there is a second kinematic component (see discussion below). This re-

gion also present high velocity dispersions, with observed values $\sim 170 \text{ km s}^{-1}$. The highest values of velocity dispersion are observed in a band $\sim 2''$ wide centered at the nucleus and running approximately perpendicularly to the radio jet, represented by the blue line. Velocity dispersions are low outside these regions ($\sigma < 100 \text{ km s}^{-1}$), with the lowest values of $< 70 \text{ km s}^{-1}$ displayed in the regions of highest centroid velocity amplitudes, which is expected for the case of rotation.

Uncertainties in the Gauss-Hermite fits were estimated using Monte Carlo simulations of 100 iterations, in which Gaussian noise is added to the spectra. Expressing the flux uncertainty, ϵ_F , as a fraction of the integrated flux, F , we find that the principal emission lines presents $\epsilon_F/F < 0.05$ throughout the whole FoV, except for the regions close to the borders of the datacube, where typical values of $\epsilon_F/F \sim 0.1$, but can reach up to $\epsilon_F/F \sim 0.3$ in weaker emission lines, like $\text{H}\beta$. The uncertainties of the centroid velocity and velocity dispersion measurements are similar, and display values of $\epsilon_v \sim \epsilon_\sigma < 10 \text{ km s}^{-1}$ (but typically $\sim 2 - 3 \text{ km s}^{-1}$) in the nucleus and its surroundings. Close to the border of the FoV, uncertainty values of up to $\sim 40 \text{ km s}^{-1}$ can be observed. In Figs. 3 and 4 (as in the other maps presented in this paper) we have masked out regions presenting uncertainty values higher than $\epsilon_F/F = 0.1$, $\epsilon_{\text{velocity}} = 10 \text{ km s}^{-1}$ or $\epsilon_\sigma = 10 \text{ km s}^{-1}$.

Fig. 5 show emission-line ratio maps obtained from the flux distributions. The highest values of $[\text{N II}]/\text{H}\alpha$, $[\text{S II}]/\text{H}\alpha$ and $[\text{O I}]/\text{H}\alpha$ (value ranges of $0.6 - 0.9$, $0.7 - 0.85$ and $0.25 - 0.35$ for each of these three ratio distributions, respectively) are observed in the nucleus, and extended toward the regions of high velocity dispersion, mainly in the former two ratio distributions. Intermediate values (~ 0.5 , ~ 0.5 and ~ 0.2 for $[\text{N II}]/\text{H}\alpha$, $[\text{S II}]/\text{H}\alpha$ and $[\text{O I}]/\text{H}\alpha$ respectively) seems to extend towards the south-western border of our FoV. A counterpart of this extension is observed in the $[\text{O I}]/\text{H}\alpha$ ratio towards north-east from the nucleus, but not in $[\text{N II}]/\text{H}\alpha$ and $[\text{S II}]/\text{H}\alpha$. The lowest ratio values (~ 0.3 , ~ 0.35 and ~ 0.15 for $[\text{N II}]/\text{H}\alpha$, $[\text{S II}]/\text{H}\alpha$ and $[\text{O I}]/\text{H}\alpha$ respectively) seems to be located in the same regions of the centroid velocity amplitudes, $\approx 1''.5$ east and west from the nucleus. The $[\text{O III}]/\text{H}\beta$ ratio is high throughout our FoV, due to the strong emission of the $[\text{O III}]\lambda 5007$ line. The highest values ($\sim 14 - 16$) are observed in the nucleus and extending in the same direction of the radio jet axis, displayed by the blue line. Ratio values then drop with the distance from the nucleus until reaches its lowest values (~ 11) close to the borders. The $\text{H}\alpha/\text{H}\beta$ ratio is highest in the nucleus (~ 5.5), with high values of ~ 5 also observed towards the north and north-east regions. Values higher than $\text{H}\alpha/\text{H}\beta = 4$ are observed north from the nucleus, extending along the east-west direction, in a very similar fashion as the faint dark lanes observed in the acquisition camera image (top middle panel of Fig. 1). Lower values of $\text{H}\alpha/\text{H}\beta \sim 3.5$ are observed south of the nucleus. Finally, the last ratio map displayed in Fig. 5, $[\text{S II}]\lambda 6717/31$, show the lowest values in the nucleus (~ 1), with low values of ~ 1.2 extending in the same regions of high velocity dispersion, along the south-east and north-west from the nucleus. Higher values of up to $[\text{S II}]\lambda 6717/31 \sim 1.5$ are observed close to the borders of the FoV.

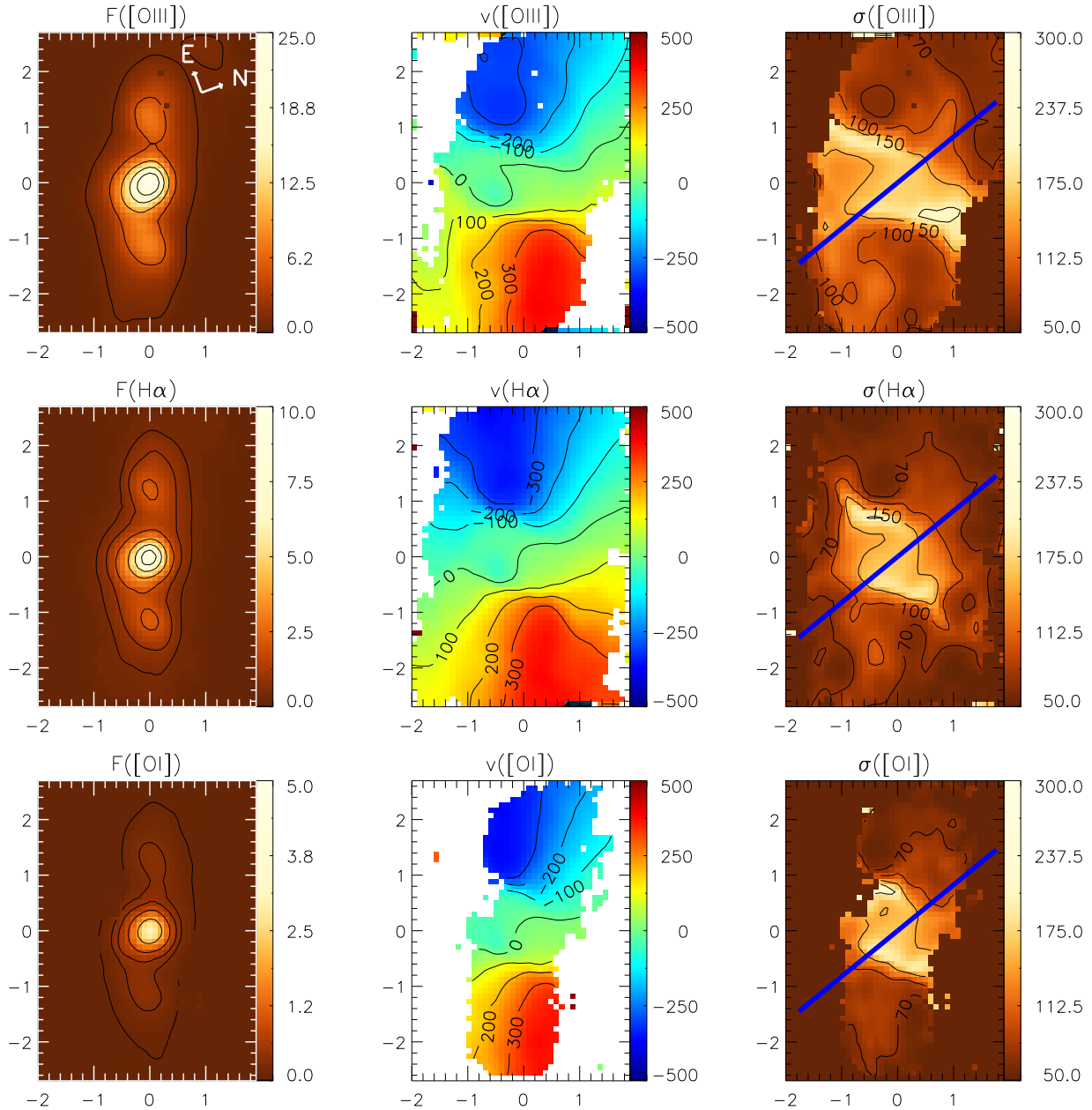


Figure 4. Line flux, centroid velocity and velocity dispersion distributions resulting from the Gauss-Hermite fit of the [O III] λ 5007, H α and [O I] λ 6300 emission lines. The blue line shows the orientation of the radio jet axis. Flux units are 10^{-16} erg s $^{-1}$ cm $^{-2}$ spaxel $^{-1}$. Centroid velocity and dispersion velocity units are km s $^{-1}$.

3.2 Two-components fit with Gaussian profiles

As mentioned in the previous section, for regions with $|h3|$ or $|h4|$ parameters (derived from the Gauss-Hermite polynomials fits) higher than 0.03 we performed a two Gaussians fit in order to separate the two components of the emission-lines. We used the same physical constraints used for the Gauss-Hermite fits, with the addition of the ratio between the two components should be the same for lines of the same ionic species, like [S II] λ 6717,31. Since the two components are well blended together, the two Gaussians

fits were difficult to constraint, and for several regions in our FoV the fit can be degenerate, where sometimes one component “steals” flux contribution from the other, mainly near the nucleus, where they appear more heavily blended. We separated the two components into what we decided to call “broad” and “narrow” components. In Fig. 6 we display the fits for positions A and B, which were selected for the two Gaussians fit. For regions with $|h3|$ and $|h4|$ close to 0, we have performed a single Gaussian fit. We then added the regions with velocity dispersion $\sigma \geq 130$ km s $^{-1}$ to the broad

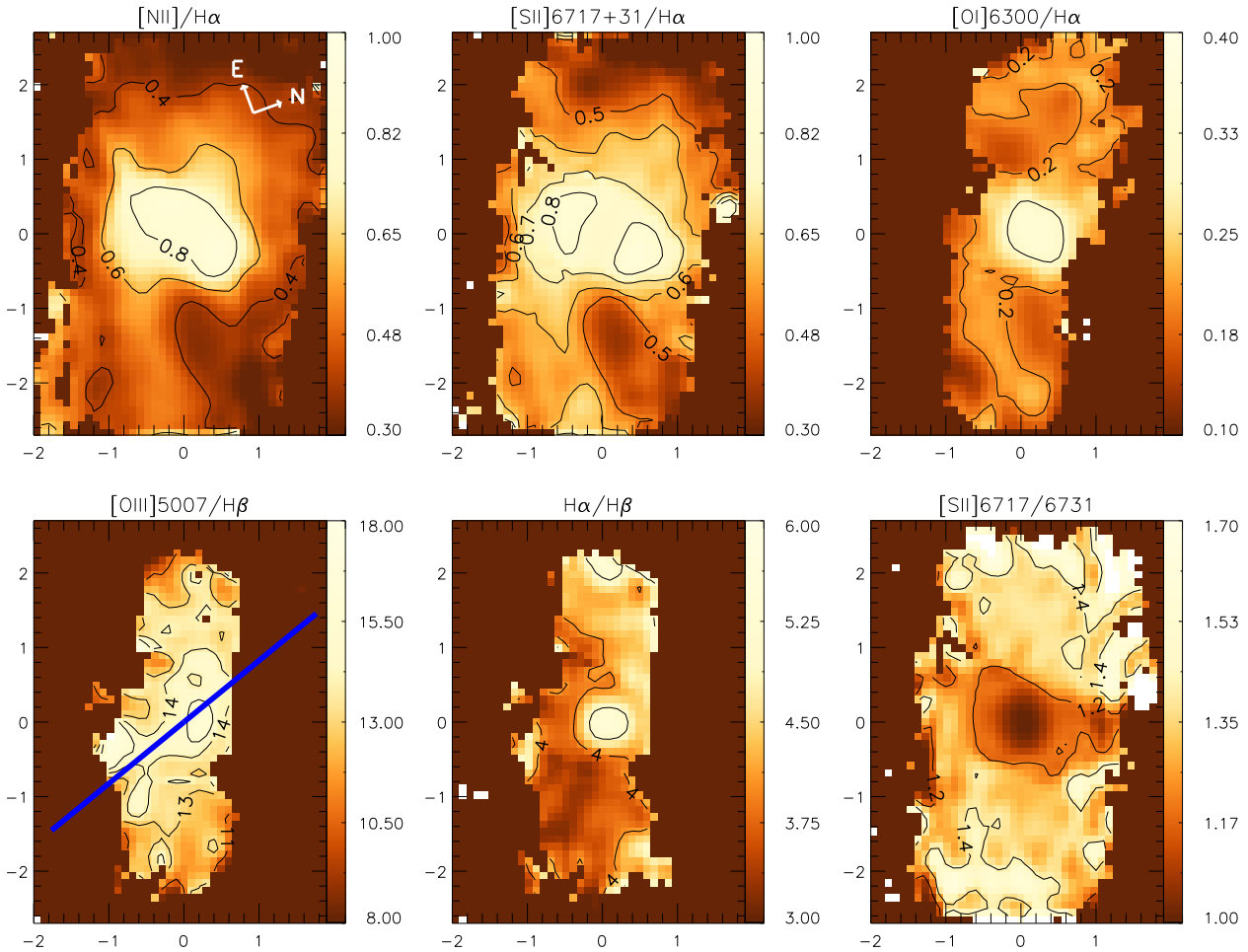
6 *Guilherme S. Couto et al.*


Figure 5. Line ratio maps, obtained from the flux distributions derived from the Gauss-Hermite fit. The blue line displays the radio jet axis.

component maps, and regions with $\sigma < 130 \text{ km s}^{-1}$ to the narrow component maps.

We show in Fig. 7 the result of the two Gaussian fits. We display the integrated flux, centroid velocity and velocity dispersion for both broad and narrow components of the $[\text{O III}]\lambda 5007$ line. The flux distribution of the broad component is concentrated in the nucleus, with some extension towards the south-west and north-east within a $\sim 1 \text{ kpc}$ strip (hereafter, “the nuclear strip”). The emitting gas extending $\sim 1''.2$ south-west and north-east from the nucleus is traced by the narrow component. However, in other emission-line flux distributions, such as $\text{H}\alpha$, we derive more contribution of the narrow component close to the nucleus, but this is result of the blending of the two components in this region. The centroid velocity maps show that the rotation pattern is indeed traced by the narrow component, with the broader component presenting velocity values close to 0 km s^{-1} without a clear pattern. Redshifted velocities are also observed in the velocity field of the broad component extending towards the west of the nucleus.

The σ distributions are not very different from the ones derived from the Gauss-Hermite fittings. The narrow compo-

nent display its highest σ values ($\sim 90 \text{ km s}^{-1}$) along north-east and south-west, while the broad component is restricted to the nuclear strip.

3.3 Channel maps

Fig. 8 display channel maps of the $[\text{O III}]\lambda 5007$ emission-line. The maps were extracted in velocity bins of $\approx 55 \text{ km s}^{-1}$ along the emission-line. The channel maps reveal blueshifted and redshifted velocities towards the north-east and south-west of the nucleus, respectively. The bulk of the extended emission has velocities of $\pm 300 \text{ km s}^{-1}$, corresponding to the extended emitting gas observed $\sim 1''.2$ north-east and south-west of the nucleus in the flux maps. At zero velocities (close to the systemic), we observe an extended emission towards the orientation of the radio jet axis.

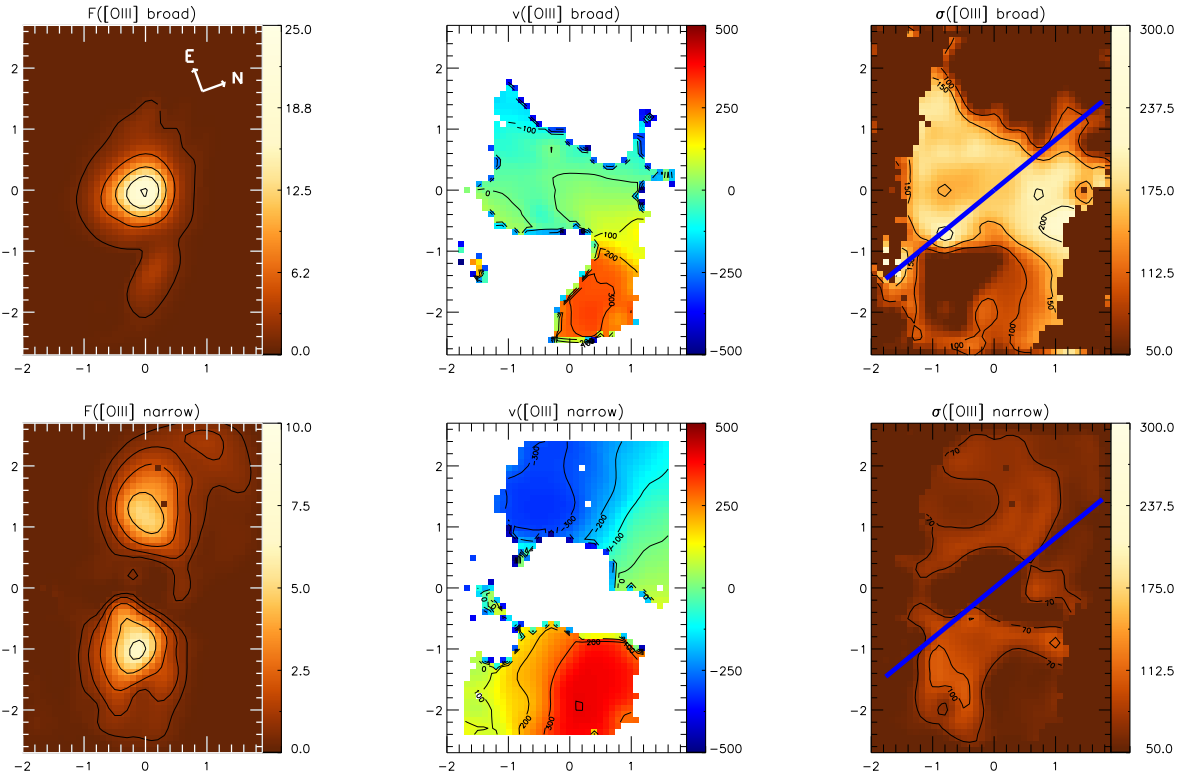


Figure 7. Integrated flux, centroid velocity and velocity dispersion distributions resulted from the two Gaussians fit of the $[\text{O III}]\lambda 5007$ line, for the broad and narrow component. The blue line displays the radio jet axis. Flux units are $10^{-16} \text{ erg s}^{-1} \text{ cm}^{-2} \text{ spaxel}^{-1}$. Centroid velocity and dispersion velocity units are km s^{-1} .

4 DISCUSSION

4.1 Gas excitation

4.1.1 Flux distributions

The flux maps of the $[\text{O III}]\lambda 5007$, $\text{H}\alpha$ and $[\text{O I}]\lambda 6300$ emission-lines derived from the Gauss-Hermite fits (Fig. 4) show an elongated structure extending to $\approx 1''.2$ north-east and south-west of the nucleus. In the two Gaussian fits, this structure is traced by the narrow component (Fig. 7). This narrow component dominates in regions farther than $\sim 600 \text{ pc}$ from the nucleus, while the broad component dominates within the inner $\sim 500 \text{ pc}$, extending also towards the north-east and south-west, but at lower intensity levels when compared to the narrow component.

4.1.2 Ratio maps

Emission-line ratios typical of Seyferts are observed over the whole FoV in Fig. 5, mainly due to the strong $[\text{O III}]\lambda 5007$ emission, which places 3C 33 well above the boundary between AGNs and starforming galaxies in the BPT diagrams (Baldwin et al. 1981; Kewley et al. 2006). The highest ratios of $[\text{N II}]/\text{H}\alpha$, $[\text{S II}]/\text{H}\alpha$ and $[\text{O I}]/\text{H}\alpha$ in the nuclear strip. The increase in the latter line ratios can be attributed to the contribution of shocks (Groves et al. 2004b; Allen et al. 2008). This hypothesis is supported by the presence of radio jets crossing this region. We propose a

scenario in which the radio jet is causing a lateral expansion of the ambient gas as it travels outwards from the nucleus, forming the observed “band” of increased line ratios perpendicularly to the radio jet. In the case of $[\text{O I}]/\text{H}\alpha$, we further observe that the increased values extend farther out (up to $\sim 2.5 \text{ kpc}$) to the north-east and south-west in the shape of two spiral arms that seem to correlate with those seen in the *HST* $[\text{O III}]\lambda 5007$ image in Fig. 1. A possible scenario is that this structure is tracing inflowing gas. Along these arms, we also observe an increase in the velocity dispersion values (when compared to neighboring regions) which would be consistent with the presence of shocks due to gas inflows towards the center.

We have used the channel maps in the emission lines to build also line-ratio channel maps of $[\text{N II}]/\text{H}\alpha$ and $[\text{O III}]/\text{H}\beta$, which allow us to investigate the excitation according to the kinematics of the gas. These are shown in Figs. 9 and 10. The highest $[\text{N II}]/\text{H}\alpha$ ratios are observed in the vicinity of the radio jet, and in particular perpendicularly to the radio jet, mostly noticeable in the channels with velocities close to 0 km s^{-1} . In these channel maps close to zero velocity ($-84 \text{ km s}^{-1} - 106 \text{ km s}^{-1}$) we note that the highest ratios are observed in blueshift to the west and in redshift to the east. On the other hand, the $[\text{O III}]/\text{H}\beta$ seems to have its highest values along the direction of the radio jet axis. The radio jet, which extends to far greater distances than probed by our FoV, may have “cleared a path” in its

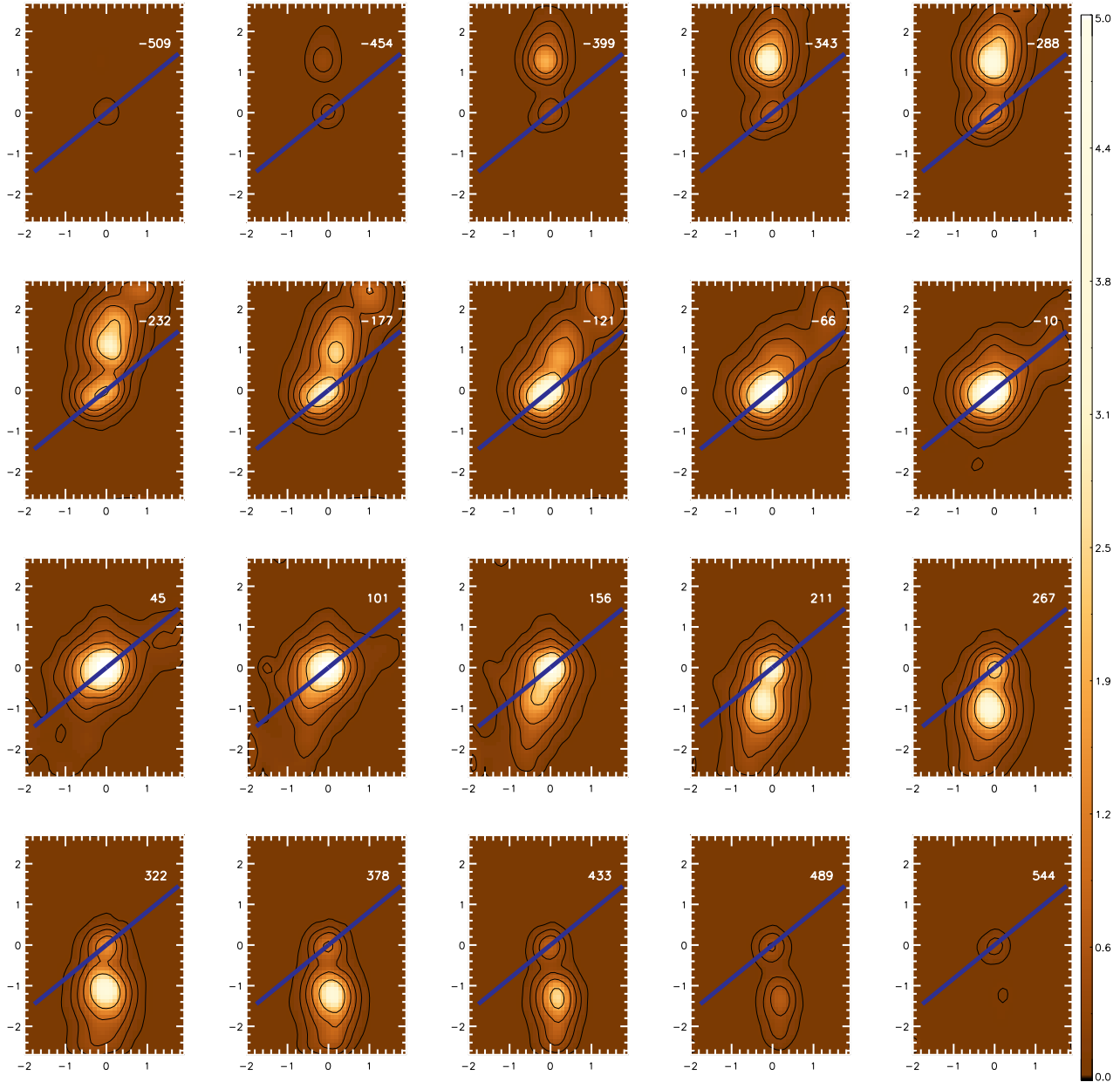
8 *Guilherme S. Couto et al.*


Figure 8. Channel maps along the $[\text{O III}]\lambda 5007$ emission-line profile, in order of increasing velocities shown in the top of each panel in units of km s^{-1} . Flux units are $10^{-16} \text{ ergs}^{-1} \text{ cm}^{-2} \text{ spaxel}^{-1}$. The green dashed line displays the radio jet axis.

way, pushing gas away in this direction and leading to an increased ionization parameter along this axis.

4.1.3 Electron density, O/H abundances and visual extinction

The $[\text{S II}]$ ratio map allows us to derive the electron density distribution (Osterbrock & Ferland 2006), which is shown in the left panel of Fig. 11. The adopted temperature was 10,000 K. The highest density values ($> 500 \text{ cm}^{-3}$) are observed at the nucleus, with intermediate values of

$\sim 200 \text{ cm}^{-3}$ extending $\sim 1''$ in the band running from the south-east to the north-west, along the nuclear strip. This is in agreement with the scenario in which this region is excited by shocks.

The middle panel of Fig. 11 shows the oxygen abundance (O/H) distribution for the emitting gas, derived from the relations of Storchi-Bergmann et al. (1998). As expected, the metallicity is higher in the nucleus, with values of $12 + \log(\text{O}/\text{H}) \sim 8.7$. A slightly higher metallicity is observed $\approx 0''.3$ north-west from the nucleus. Although 3C 33 shows metallicity values typical of AGNs, these values

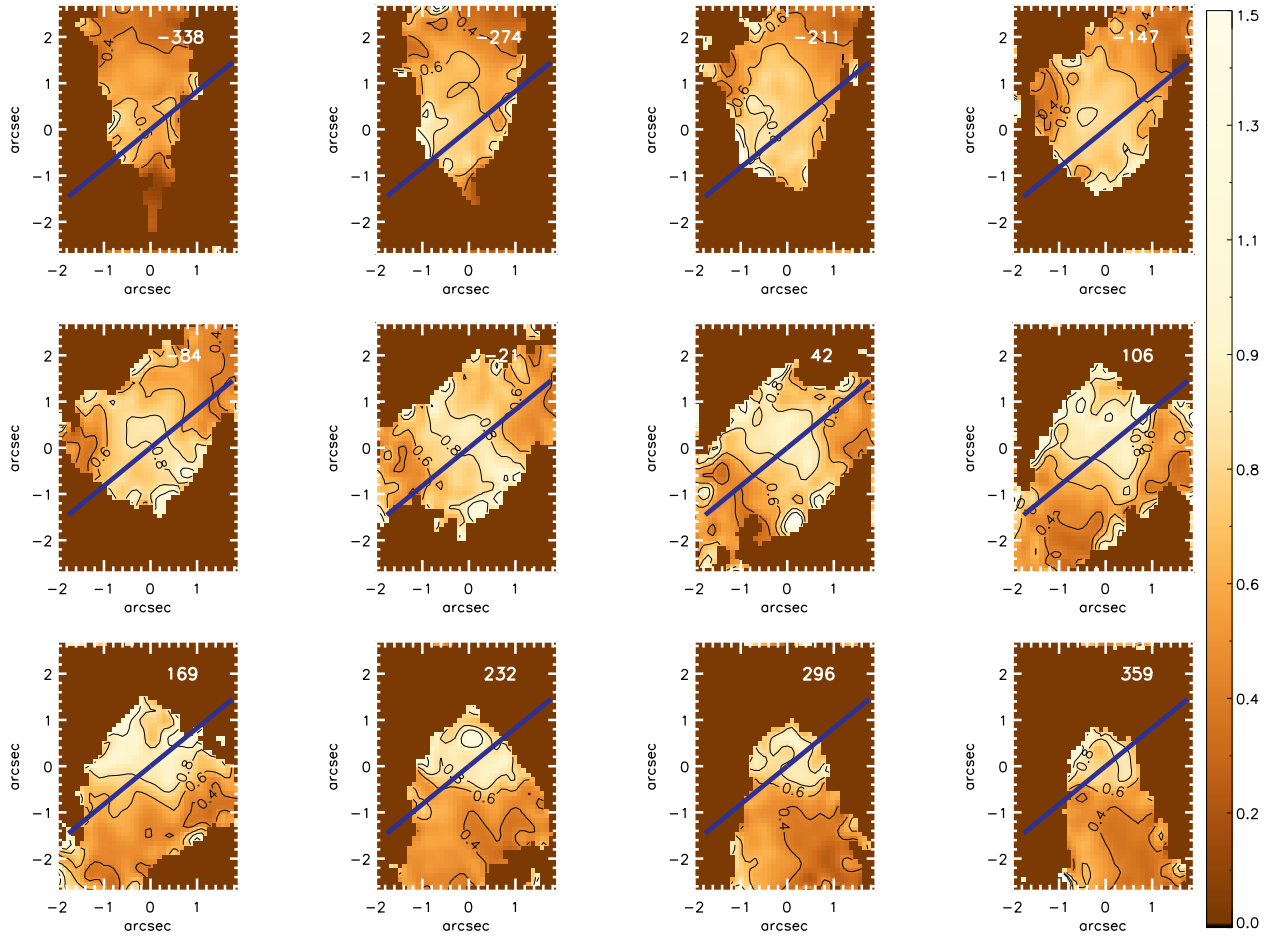


Figure 9. Channel maps of the $[\text{N II}]/\text{H}\alpha$ emission-line ratio, in order of increasing velocities shown in the top of each panel in units of km s^{-1} . Velocity bins are averages of the $[\text{N II}]$ and $\text{H}\alpha$ channels. The blue line displays the radio jet axis.

are somewhat lower than those observed for Seyfert galaxies (typically 8.9 – 9.3), and is actually comparable to values displayed by LINERs (Storchi-Bergmann et al. 1998).

The $\text{H}\alpha/\text{H}\beta$ ratio map of Fig. 5 was used to estimate the visual extinction A_V map. We adopted the reddening law from Cardelli et al. (1989), and assuming a recombination case B (Osterbrock & Ferland 2006) we obtain

$$A_V = R_V E(B - V) = 6.9 \times \log \left(\frac{\text{H}\alpha/\text{H}\beta}{2.86} \right) \quad (1)$$

The corresponding visual extinction map is shown in the right panel of Fig. 11. The highest values (~ 1.5 mag) are observed in the nucleus, while values of ~ 1 mag are observed just north of the nucleus, in the same region where faint dark lanes are observed in the optical continuum acquisition image (see top middle panel of Fig. 1). Lower values (~ 0.5 mag) are observed south from the nucleus. This map is consistent with the presence of a dust lane observed $\sim 1 - 2''$ north-west of the nucleus, extending along the north-east to south-west direction, most probably located in an inclined disk that we observe in rotation in the velocity map, as discussed below.

4.2 Kinematics

4.2.1 Disc kinematic model

Centroid velocity maps of the ionized gas display a typical rotation pattern, which is traced both by the Gauss-Hermite fit in Fig. 4 and by the narrow component in Fig. 6. We fitted a kinematic model describing circular orbits in a plane (van der Kruit & Allen 1978; Bertola et al. 1991) to the $\text{H}\alpha$ centroid velocity field derived from the Gauss-Hermite fit. The model is described by the equation:

$$v_{\text{mod}}(R, \Psi) = v_{\text{sys}} + \frac{AR \cos(\Psi - \Psi_0) \sin\theta \cos^p\theta}{\{R^2[\sin^2(\Psi - \Psi_0) + \cos^2\theta \cos^2(\Psi - \Psi_0)] + c_0^2 \cos^2\theta\}^{p/2}} \quad (2)$$

where v_{sys} is the systemic velocity, A is the centroid velocity amplitude, r and Ψ are the radial and angular coordinates of a given pixel in the plane of the sky, Ψ_0 is the position angle of the line of nodes, c_0 is a concentration parameter (constraining the radius at which the centroid velocity reaches 70% of the amplitude A) and θ is the disk inclination ($\theta = 0$ for a face-on disk). Finally, the parameter p measures the

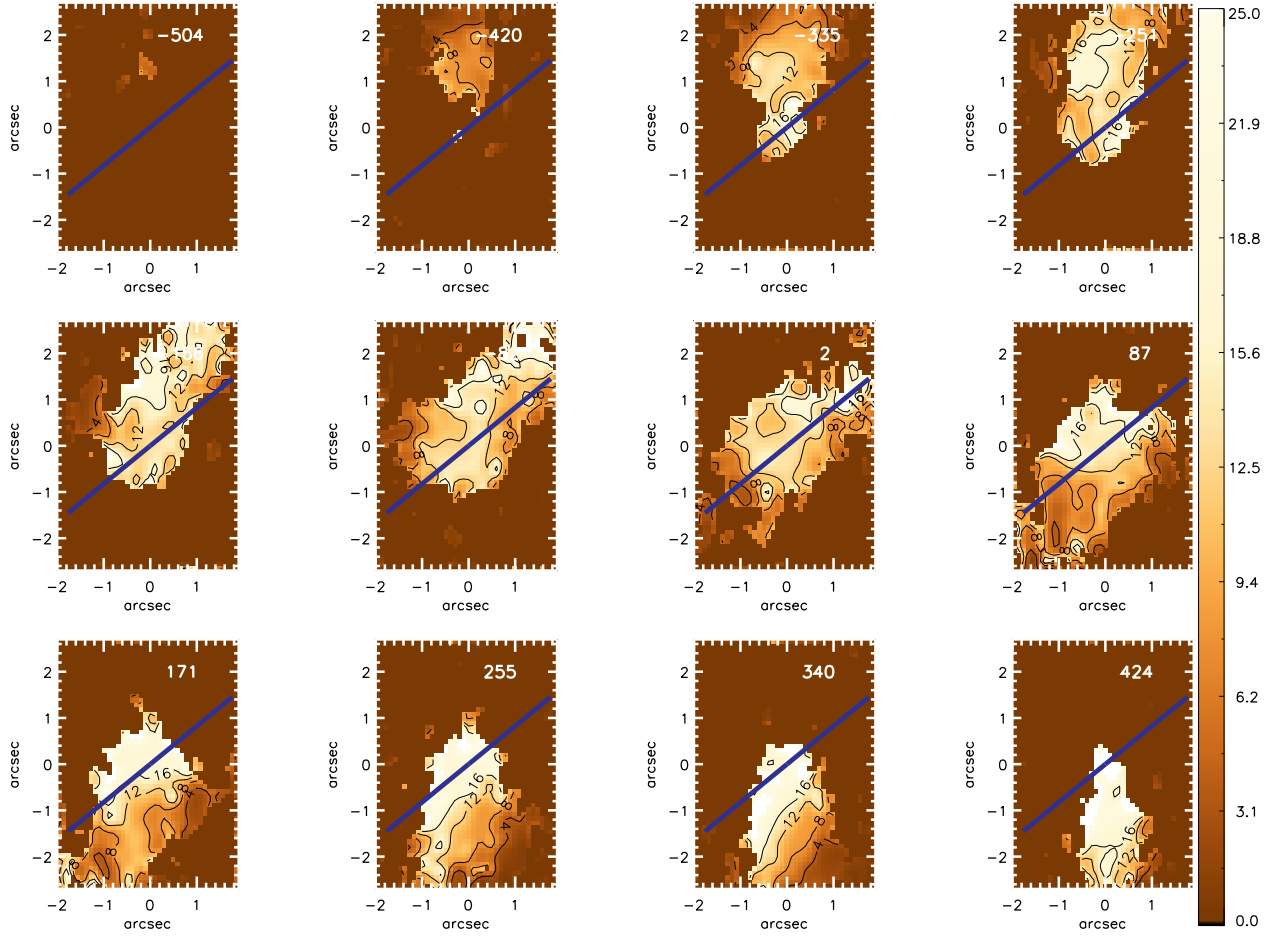
10 *Guilherme S. Couto et al.*


Figure 10. Channel maps of the $[\text{O III}]/\text{H}\beta$ emission-line ratio, in order of increasing velocities shown in the top of each panel in units of km s^{-1} . Velocity bins are averages of the $[\text{O III}]$ and $\text{H}\beta$ channels. The blue line displays the radio jet axis.

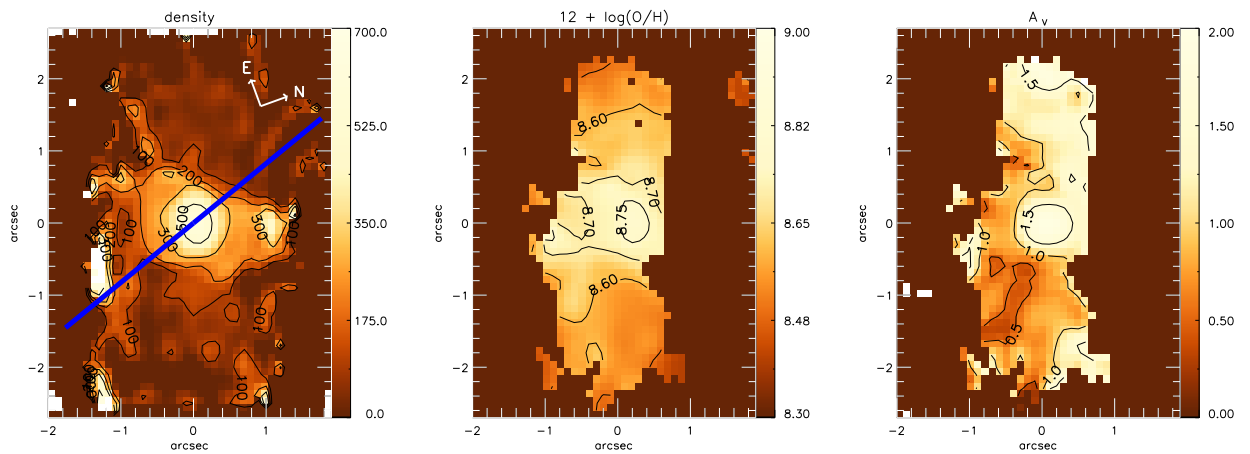


Figure 11. From left to right: electron density, oxygen abundance and visual extinction distribution maps. Density units are cm^{-3} and $A(V)$ is in magnitudes. The blue line displays the radio jet axis.

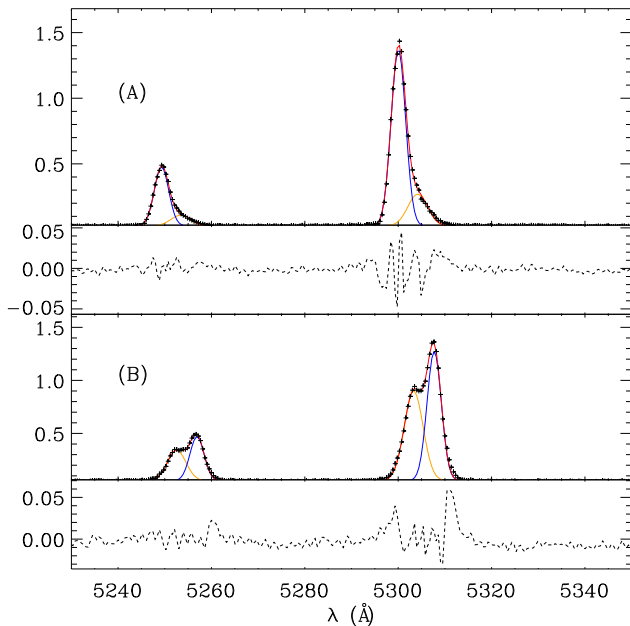


Figure 6. Two Gaussians fit into the [O III] $\lambda\lambda$ 4959,5007 emission-line profiles, for the positions A and B shown in the top right panel of Fig. 1. Black crosses display spectrum data points and red lines represent the best model fitted to the profiles, with the narrow and broad component being represented by the blue and orange lines, respectively. Residuals are shown by dashed black lines. Flux units (y axis) are $10^{-16} \text{ erg s}^{-1} \text{ cm}^{-2} \text{ \AA}^{-1}$.

slope of the rotation curve where it becomes flat. This parameter was fixed in our fitting for $p = 1$, which corresponds to an asymptotically flat rotation curve at large radii. The model also returns the center of rotation (x_0, y_0) in terms of the distance to a referenc pixel, which in our case we consider to be the peak of the continuum.

Using a Levenberg-Marquardt least-squares algorithm, we accomplished a fit of the model to the velocity field with negligible uncertainties. The maps of the best-fit model velocity field and the residual, along with the $H\alpha$ velocity field, are shown in Fig. 12. The resulting parameters from the fit are displayed in Table 1. Uncertainties are smaller than the unity, thus are not shown.

The rotation model velocity map (middle panel of Fig. 12) is a very good representation of the $H\alpha$ velocity field, which is clearly dominated by rotation. The residuals, shown in the right panel of Fig. 12 are small and very close to zero, except for the very circumnuclear region, which two patches with residuals of $\sim 100 \text{ km s}^{-1}$: one at $0''.5$ east from the nucleus showing redshifts and other at $0''.5$ west showing blueshifts. These residuals are in agreement with the scenario we propose in which this region is tracing a lateral expansion of the gas, pushed away by the radio jet. We also note that these regions are where we observe the highest [N II]/ $H\alpha$ channel maps of Fig. 10. These higher ratios trace the shocked gas in the velocity bins close to zero, with blueshifted residuals in the near side of the disk (\sim north) and redshifts in the far side of the disk (\sim south).

The best-fit rotating disk parameters give an inclination of $\Theta = 66^\circ$, with a high velocity amplitude of $A =$

Table 1. Best-fit parameters from the disk kinematic model.

| | |
|----------------------------------|---------|
| Ψ_0 (degree) | 83.1 |
| Θ (degree) | 66.0 |
| c_0 (arcsec) | 1.2 |
| A (km s^{-1}) | 453.2 |
| v_{sys} (km s^{-1}) | 17801.8 |
| x_0 (arcsec) | 0.05 |
| y_0 (arcsec) | 0.00 |
| p [fixed] | 1 |

453.2 km s^{-1} . This amplitudes is very high for rotating disks originated from secular motions within the galaxy, and may suggest that the rotating gas is resulting from an interaction with another galaxy, as mergers are quite common in radio galaxies (Ramos Almeida et al. 2011). The orientation of the line of nodes, $\Psi_0 = 83.1^\circ$, is tilted by $\sim 10^\circ$ relative to the ionization axis ($PA \sim 70^\circ$). This means that the ionization cone, whose axis probably coincides with that of the radio jet, is intercepting a narrow patch of the disk. This is supported by the [O III] channel maps (Fig. 8) that show that the bulk of the emission is not observed at the highest velocities (along the major axis) but at velocities $\sim \pm 300 \text{ km s}^{-1}$.

5 CONCLUSIONS

We have measured the gaseous kinematics in the inner $4.0 \text{ kpc} \times 5.8 \text{ kpc}$ of the Seyfert 2 radio galaxy 3C 33, from optical spectra obtained with the GMOS integral field spectrograph on the Gemini North telescope, at a spatial resolution of $\approx 580 \text{ pc}$ at the galaxy. The main results of this paper are as follows:

(i) Elongated gas emission is observed extending to $\approx 2 \text{ kpc}$ north-east and south-west of the nucleus, which we identify as the ionization axis. When fitting the lines with two components, a broader component is dominant within a 1 kpc wide “nuclear strip” – running from south-east to the north-west – approximately perpendicularly to the radio jet. Beyond this region the narrower component dominates the emission;

(ii) We observe a rotation pattern in the centroid velocity maps in the region dominated by the narrow component, with some distortion in the nuclear strip. We obtain a good fit when modeling the $H\alpha$ velocity field with a rotation model with a velocity amplitude of $\sim 450 \text{ km s}^{-1}$, an angle between the disk plane and the plane of the sky of $\sim 65^\circ$. Residual blueshifts and redshift of $\sim 100 \text{ km s}^{-1}$ are observed within the nuclear strip;

(iii) Channel maps of the [O III] λ 5007 emission line display the same rotating pattern observed in the velocity fields. We observe that the bulk of emission is located in velocity bins close to $\sim 300 \text{ km s}^{-1}$, corresponding to the orientation of the ionization axis, while the emission at higher velocity bins – and lower intensities – are shifted to a higher position angle, in agreement with the orientation of the line of nodes (65°). Regions of highest emission are also extended along the radio jet axis in the velocity channels close to zero (in the galaxy velocity frame);

(iv) The highest [N II]/ $H\alpha$, [S II]/ $H\alpha$ and [O I]/ $H\alpha$ line ratios are observed along the nuclear strip (perpendicular

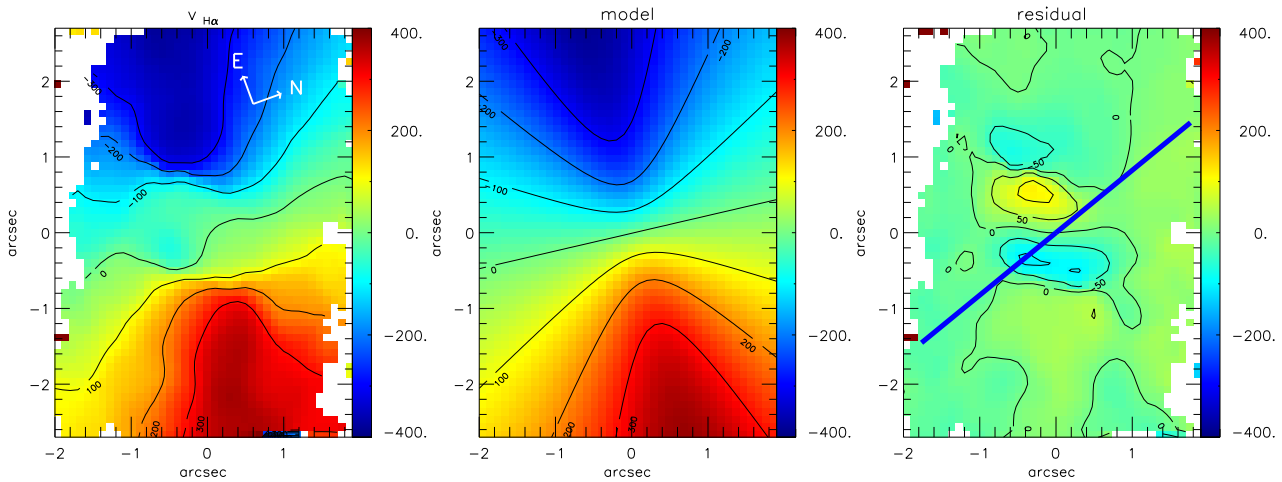
12 *Guilherme S. Couto et al.*

Figure 12. Gaseous rotating disk model for H α emission line. Left: H α velocity map obtained from the Gauss-Hermite fit. Middle: model of the rotation curve. Right: residual map. The blue line displays the radio jet axis.

to the radio jet) and indicate a contribution from shocks there, what is supported also by the high velocity dispersions (both of the broader component and Gauss-Hermite fit). The [O III]/H β ratio map, on the other hand, shows an increased ionization parameter along the radio jet axis;

(v) We observe an increase in the [O I]/H α ratio values to the north-east and south-west, resembling the spiral arms seen in the *HST* [O III] image, that we suggest may be associated to gas inflow towards the nucleus;

(vi) The high velocity amplitudes ($\sim 450 \text{ km s}^{-1}$) indicate that the rotating gas may have been acquired in an interaction event in the recent past.

ACKNOWLEDGMENTS

This work is based on observations obtained at the Gemini Observatory, which is operated by the Association of Universities for Research in Astronomy, Inc., under a cooperative agreement with the NSF on behalf of the Gemini partnership: the National Science Foundation (United States), the National Research Council (Canada), CONICYT (Chile), the Australian Research Council (Australia), Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação (Brazil) and Ministerio de Ciencia, Tecnología e Innovación Productiva (Argentina). This work has been partially supported by the Brazilian institution CNPq. This material is based upon work supported in part by the National Science Foundation under Award No. AST-1108786.

REFERENCES

- Allen M. G., Groves B. A., Dopita M. A., Sutherland R. S., Kewley L. J., 2008, *APJS*, 178, 20
- Baldwin J. A., Phillips M. M., Terlevich R., 1981, *PASP*, 93, 5
- Bertola F., Bettoni D., Danziger J., Sadler E., Sparke L., de Zeeuw T., 1991, *ApJ*, 373, 369
- Best P. N., Röttgering H. J. A., Longair M. S., 2000, *MNRAS*, 311, 23
- Bruzual G., Charlot S., 2003, *MNRAS*, 344, 1000
- Cappellari M., Emsellem E., 2004, *PASP*, 116, 138
- Cardelli J. A., Clayton G. C., Mathis J. S., 1989, *ApJ*, 345, 245
- Couto G. S., Storchi-Bergmann T., Axon D. J., Robinson A., Kharb P., Riffel R. A., 2013, *MNRAS*, 435, 2982
- Couto G. S., Storchi-Bergmann T., Robinson A., Riffel R. A., Kharb P., Lena D., Schnorr-Müller A., 2016, *MNRAS*, 458, 855
- Di Matteo T., Springel V., Hernquist L., 2005, *Nature*, 433, 604
- Emsellem E., Fathi K., Wozniak H., Ferruit P., Mundell C. G., Schinnerer E., 2006, *MNRAS*, 365, 367
- Englmaier P., Shlosman I., 2004, *ApJL*, 617, L115
- Fabian A. C., 2012, *ARAA*, 50, 455
- Fragile P. C., Murray S. D., Anninos P., van Breugel W., 2004, *ApJ*, 604, 74
- Giovannini G., Taylor G. B., Feretti L., Cotton W. D., Lara L., Venturi T., 2005, *ApJ*, 618, 635
- Greene J. E., Ho L. C., 2006, *ApJ*, 641, 117
- Groves B. A., Dopita M. A., Sutherland R. S., 2004a, *APJS*, 153, 9
- Groves B. A., Dopita M. A., Sutherland R. S., 2004b, *APJS*, 153, 75
- Heckman T. M., Illingworth G. D., Miley G. K., van Breugel W. J. M., 1985, *ApJ*, 299, 41
- Hopkins P. F., Quataert E., 2010, *MNRAS*, 407, 1529
- Kewley L. J., Groves B., Kauffmann G., Heckman T., 2006, *MNRAS*, 372, 961
- Kormendy J., Ho L. C., 2013, *ARAA*, 51, 511
- Leahy J. P., Perley R. A., 1991, *AJ*, 102, 537
- Lena D., Robinson A., Storchi-Bergmann T., Couto G. S., Schnorr-Müller A., Riffel R. A., 2016, *MNRAS*, 459, 4485
- Maciejewski W., 2004, *MNRAS*, 354, 892
- Osterbrock D. E., Ferland G. J., 2006, *Astrophysics of gaseous nebulae and active galactic nuclei*
- Ramos Almeida C., Tadhunter C. N., Inskip K. J., Mor-

ganti R., Holt J., Dicken D., 2011, MNRAS, 410, 1550
Roche N., Humphrey A., Lagos P., Papaderos P., Silva M.,
Cardoso L. S. M., Gomes J. M., 2016, MNRAS, 459, 4259
Santoro F., Oonk J. B. R., Morganti R., Oosterloo T., 2014,
ArXiv e-prints
Schnorr-Müller A., Storchi-Bergmann T., Robinson A.,
Lena D., Nagar N. M., 2016, MNRAS, 457, 972
Simkin S. M., 1979, ApJ, 234, 56
Storchi-Bergmann T., Schmitt H. R., Calzetti D., Kinney
A. L., 1998, AJ, 115, 909
Tremblay G. R., Chiaberge M., Sparks W. B., Baum S. A.,
Allen M. G., Axon D. J., Capetti A., Floyd D. J. E.,
Macchetto F. D., Miley G. K., Noel-Storr J., O’Dea C. P.,
Perlman E. S., Quillen A. C., 2009, APJS, 183, 278
van der Kruit P. C., Allen R. J., 1978, ARAA, 16, 103
Wagner A. Y., Bicknell G. V., 2011, ApJ, 728, 29

Gas kinematics and excitation in the inner $4.3 \text{ kpc} \times 6.2 \text{ kpc}$ of the radio galaxy $4\text{C} + 29.30$

Guilherme S. Couto^{1*}, Thaisa Storchi-Bergmann¹, Aneta Siemiginowska²

¹Universidade Federal do Rio Grande do Sul, IF, CP 15051, Porto Alegre 91501-970, RS, Brazil

²Harvard Smithsonian Center for Astrophysics, 60 Garden St, Cambridge, MA 02138, USA

Accepted . Received ; in original form

ABSTRACT

Key words: Galaxies: individual $4\text{C} + 29.30$ – Galaxies: active – Galaxies: nuclei – Galaxies: kinematics – Galaxies: jets

1 INTRODUCTION

In this work, we present results obtained from integral field spectroscopic observations of the circumnuclear region of $4\text{C} + 29.30$, a radio galaxy with elliptical morphology at redshift of $z = 0.0647$. The corresponding luminosity distance is 289 Mpc and 1 arcsec corresponds to 1.24 kpc in a cosmology with $H_0 = 70.5 \text{ km s}^{-1} \text{ Mpc}^{-1}$, $\Omega_\Lambda = 0.73$ and $\Omega_M = 0.27$. It was first studied in the radio and optical bands by van Breugel et al. (1986), showing optical line emitting gas extending $\sim 20''$ north of nucleus, and adjacent to the radio jet along a position angle (PA $\sim -20^\circ$), an evidence of the radio jets interacting with dense extranuclear gas. The large-scale extended relic radio emission is most probably due to an earlier cycle of activity ≥ 200 Myr ago, while a small-scaled radio jet is embedded in the relic radio emission, with estimated age of ≤ 100 Myr (Jamrozny et al. 2007). X-ray data have showed a complex view of interactions between jet-driven radio outflow and host galaxy environment, signaling feedback processes closely associated with the central active nucleus (Siemiginowska et al. 2012).

2 OBSERVATIONS AND DATA REDUCTION

$4\text{C} + 29.30$ was observed between January 12 and March 15, 2016, with the Integral Field Unit (IFU) of the Gemini Multi-object Spectrograph (GMOS; Allington-Smith et al. 2002) mounted on the Gemini North Telescope (Gemini program ID GN-2016A-Q-77). “One-slit” mode was used, with a rectangular field-of-view (FoV) of $\approx 3''.5 \times 5''.0$, corresponding to $4.3 \text{ kpc} \times 6.2 \text{ kpc}$ at the galaxy. Fifteen exposures of 1140 s were observed, slightly shifted and dithered in order to correct for detector defects after combination of the frames.

A spectral coverage of $\lambda 4500 - 7300 \text{ \AA}$, centered at

$\lambda 5900 \text{ \AA}$, were obtained with the use of the B600+G5307 grating and IFU-R mask. The spectral resolution is $R \sim 3600$ at $\sim \lambda 7000 \text{ \AA}$, derived from the full width half maximum (FWHM) of the CuAr emission lines.

The data reduction was performed using the IRAF¹ packages provided by the GEMINI Observatory, and specifically developed for the GMOS instrument. The procedure consists of sky and bias subtraction, flat-fielding, trimming, wavelength and relative flux calibration, building of the datacubes, final alignment and combination into the final datacube, which has a spatial binning of $0.1 \times 0.1 \text{ arcsec}^2$.

The program did not include standard stars observations, and we used Feige 66, taken from the Gemini archive, to relative calibrate the resulting galaxy datacube flux. The spatial profile of Feige 66 has a FWHM of $\approx 0''.7$, and we consider this to be similar to the spatial resolution of the final datacube. This corresponds to $\approx 860 \text{ pc}$ at the galaxy. This is probably a conservative assumption since Gemini North Telescope IFU observations usually present seeing of $0''.6$.

3 RESULTS

In Fig. 1 we display a general look into our IFU data and the scaled structures of $4\text{C} + 29.30$. The top left and middle panels display the same *HST-STIS* image in different scales and count limits. This image was obtained using the *MIRVIS* filter, centered at $\lambda 5852 \text{ \AA}$ and has a bandwidth of $\lambda 1873 \text{ \AA}$. The first image (top left panel) has a FoV

¹ IRAF is the Image Reduction and Analysis Facility, a general purpose software system for the reduction and analysis of astronomical data. IRAF is written and supported by the National Optical Astronomy Observatories (NOAO) in Tucson, Arizona. NOAO is operated by the Association of Universities for Research in Astronomy (AURA), Inc. under cooperative agreement with the National Science Foundation.

* E-mail:gcouto@if.ufrgs.br

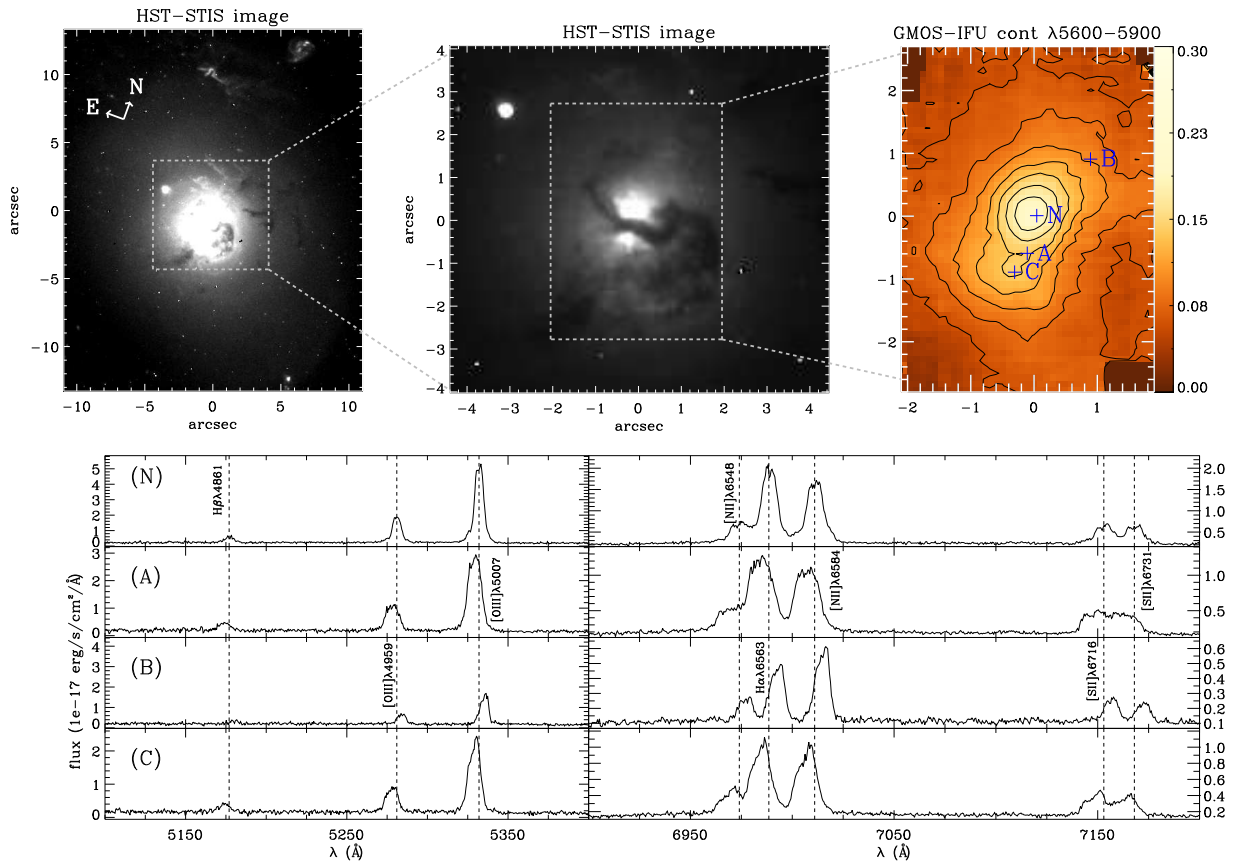
2 *Guilherme S. Couto et al.*


Figure 1. Top left and middle panels: *HST-STIS* optical image of 4C+29.30. Top right panel: optical GMOS acquisition camera image of the galaxy. Top right panel: GMOS-IFU continuum image. Bottom panels: Spectra extracted in positions N, A, B and C displayed in the top right panel. Flux units of the continuum map are $10^{-17} \text{ erg s}^{-1} \text{ cm}^{-2} \text{ spaxel}^{-1}$

of $22 \text{ arcsec} \times 26 \text{ arcsec}$ and show many dust clouds and filaments, as well as what seems to be bright gas emitting regions reaching up to $\sim 12''$ north from the nucleus. A dust lane crosses the region just below the nucleus as seen to the top middle panel, which is a closer look into the inner $\sim 8'' \times 8''$ region of 4C+29.30. In the top right panel we show a continuum image of 4C+29.30, obtained using our GMOS-IFU datacube (FoV of $\sim 4'' \times 5''$), extracted between wavelengths $\lambda 5600 - 5900 \text{ \AA}$. Due to our lower angular resolution than *HST*, instead of the abrupt transition due to the dust lane, we observe a smooth transition between the top knot of emission (that we identify with the galaxy nucleus) and bottom emission knot that we from now on call “the southern knot” (where position C is located). The three top panels have the same orientation, with the y -axis along $\text{PA} = 20$.

In the bottom panels we display spectra extracted in the marked positions N (nucleus), A ($\approx 0''.6$ south from the nucleus), B ($\approx 1''$ north-west from the nucleus) and C ($\approx 1''$ south from the nucleus). Each spectrum has a spatial aperture of one spaxel, thus $0''.1 \times 0''.1$. We display the main emission lines: $\text{H}\beta$, $[\text{O III}]\lambda\lambda 4959, 5007$, $[\text{N II}]\lambda\lambda 6548, 84$, $\text{H}\alpha$ and $[\text{S II}]\lambda\lambda 6716, 31$. The emission line profiles show a complex structure suggesting the presence of more than one

component in all three regions sampled by these spectra. The dashed lines, which display the emission lines wavelengths, indicate blueshift and redshift of the center of the lines relative to the nucleus in positions A and B, respectively.

3.1 Emission-line measurements

We used customized IDL routines to model the continuum and the profiles of the most prominent emission lines ($\text{H}\beta$, $[\text{O III}]\lambda\lambda 4959, 5007$, $[\text{O I}]\lambda\lambda 6300, 34$, $[\text{N II}]\lambda\lambda 6548, 84$, $\text{H}\alpha$ and $[\text{S II}]\lambda\lambda 6716, 31$). Gauss-Hermite profiles were fitted to the lines in order to derive centroid velocities, velocity dispersions and integrated fluxes. Gauss-Hermite polynomials were chosen due to the asymmetries in the emission lines profiles, and are expressed by the following equations:

$$f_{gh}(\lambda) = F \frac{e^{-k^2/2}}{\sqrt{2\sigma^2}} (1 + h_3 H_3 + h_4 H_4) \quad (1)$$

$$H_3 = \frac{1}{\sigma} (2\sqrt{2}k^3 - 3\sqrt{2}k) \quad (2)$$

$$H_4 = \frac{1}{\sqrt{24}}(4k^4 - 12k^2 + 3) \quad (3)$$

$$k = \frac{(\lambda - \bar{\lambda})}{\sigma} \quad (4)$$

where F is the flux, σ is the velocity dispersion and $\bar{\lambda}$ is the peak wavelength.

The $h3$ and $h4$ Gauss-Hermite moments parametrize the deviations from a Gaussian profile, thus are good tracers of multiple emission-line components. $h3$ is related to the skewness of the profiles, and $h4$ to its kurtosis. In other words, $h3$ measures asymmetric deviations from a Gaussian profile, such as blue or red wings, and $h4$ quantify the peakiness of the profile, with $h4 > 0$ for a more peaked and $h4 < 0$ for a broader profile than a Gaussian curve. A Gaussian profile is obtained when $h3 = h4 = 0$.

To reduce the number of free parameters in the fit, the following physically motivated constraints were imposed:

- different lines from the same ionic species have the same kinematic parameters. For example, the [S II] λ 6716, 31 emission lines have the same centroid velocity and velocity dispersion. This was also done for the Gauss-Hermite parameters $h3$ and $h4$;
- the [N II] λ 6548, 84 emission lines have the same centroid velocity and velocity dispersion as H α ;
- the [N II] λ 6548 flux was fixed as 1/3 of the [N II] λ 6584 flux, in accordance with nebular physics (Osterbrock & Ferland 2006). This was also done for the [O III] λ 4959, 5007 and [O I] λ 6300, 34 emission lines.

3.1.1 Measurement uncertainties

To estimate the errors on the measured quantities we performed Monte Carlo simulations: for each spaxel, we constructed one hundred realizations of the spectrum by adding Gaussian noise with amplitude comparable to the noise measured in the original spectrum. Mean values and standard deviations for the centroid velocities, velocity dispersions and fluxes were derived for each spaxel, with the standard deviation of the distribution in each parameter being adopted as the uncertainty.

3.2 Emission-line flux, centroid velocity and velocity dispersion distributions

Fig. 2 displays the integrated line flux, centroid velocity and velocity dispersion distributions, for the H α and [O III] λ 5007 emission lines. The flux maps are somewhat different from the continuum map we show in the top right panel of Fig. 1. Emission appears extended along the south-north axis of the galaxy, with the south and north extended emission also extending to the west and east, respectively, when reaching distances close to the FoV borders. In the nuclear region (centered at the peak of the continuum emission), we observe more intense emission extended towards the south. The northern extended emission appears to be “clumpier” than the southern emission, with its peak $\approx 1''5$ from the nucleus. The dust lane can be identified as the decrease in brightness in the continuum image (shown in Fig.

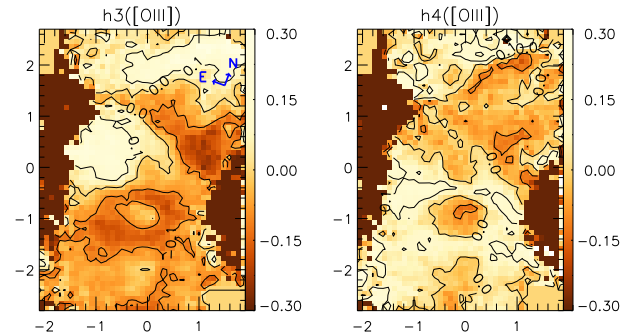


Figure 3. Distribution maps of Gauss-Hermite $h3$ and $h4$ moments, obtained from the fit of the [O III] λ 4959, 5007 emission lines.

1); it is not well defined in the flux maps, but we do observe some decrease in emission towards the east and west regions from the nucleus.

A distorted rotation pattern is observed in the centroid velocity maps, with blueshifts to the south-east and redshifts to the north-west. Although the redshifted region appears to not show any kinematic structure, with a velocity amplitude of $\sim 170 \text{ km s}^{-1}$, in the blueshifted region we observe an increase of blueshifted velocities (amplitudes of $\sim -200 \text{ km s}^{-1}$) that we identify with the southern kinematics described in the previous section. A kinematic structure is observed $\approx 2''$ north-east from the nucleus, where we observe zero velocities in the border of our FoV.

The highest velocity dispersions ($\sim 250 \text{ km s}^{-1}$) are observed in the same region presenting the highest blueshifted velocities. In fact, this region is close to the position A (see this position spectrum in Fig. 1), which presents broad emission line peaks. Intermediate values of $\sigma \approx 170 \text{ km s}^{-1}$ are observed in the northern direction from the nucleus, crossing from east to west, where the centroid isovelocity contours of $\sim -50 < v < 150 \text{ km s}^{-1}$ are closer between each other. Smaller velocity dispersions ($\sim 100 \text{ km s}^{-1}$) are observed farther from the nucleus, along the extended emitting regions observed in the flux maps.

Expressing the flux uncertainty, ϵ_F , as a fraction of the integrated flux, F , we find that H α and [O III] flux maps show typical values $\epsilon_F/F \approx 0.01$ in the nucleus and along the extended emission to the north and south. $\epsilon_F/F \approx 0.1 - 0.2$ are observed toward the east and west, and the border of the FoV in these directions present $\epsilon_F/F \approx 0.3$. The uncertainties of the centroid velocity and velocity dispersion maps are similar and present values of $\epsilon_v \approx \epsilon_\sigma \approx 5 \text{ km s}^{-1}$ in the nucleus and the regions of extended emission, with values of 20 km s^{-1} closer to the borders of the FoV. We have masked out, in Fig. 2 and in the other maps presented in this paper, regions that present uncertainty values higher than $\epsilon_F/F = 0.2$, $\epsilon_v = 20 \text{ km s}^{-1}$ or $\epsilon_\sigma = 20 \text{ km s}^{-1}$, for each emission line.

3.2.1 $h3$ and $h4$ Gauss-Hermite parameters distributions

The distribution maps of the Gauss-Hermite moments are shown in Fig. 3. Both moments show values usually higher or lower than 0 throughout our FoV, indicating that

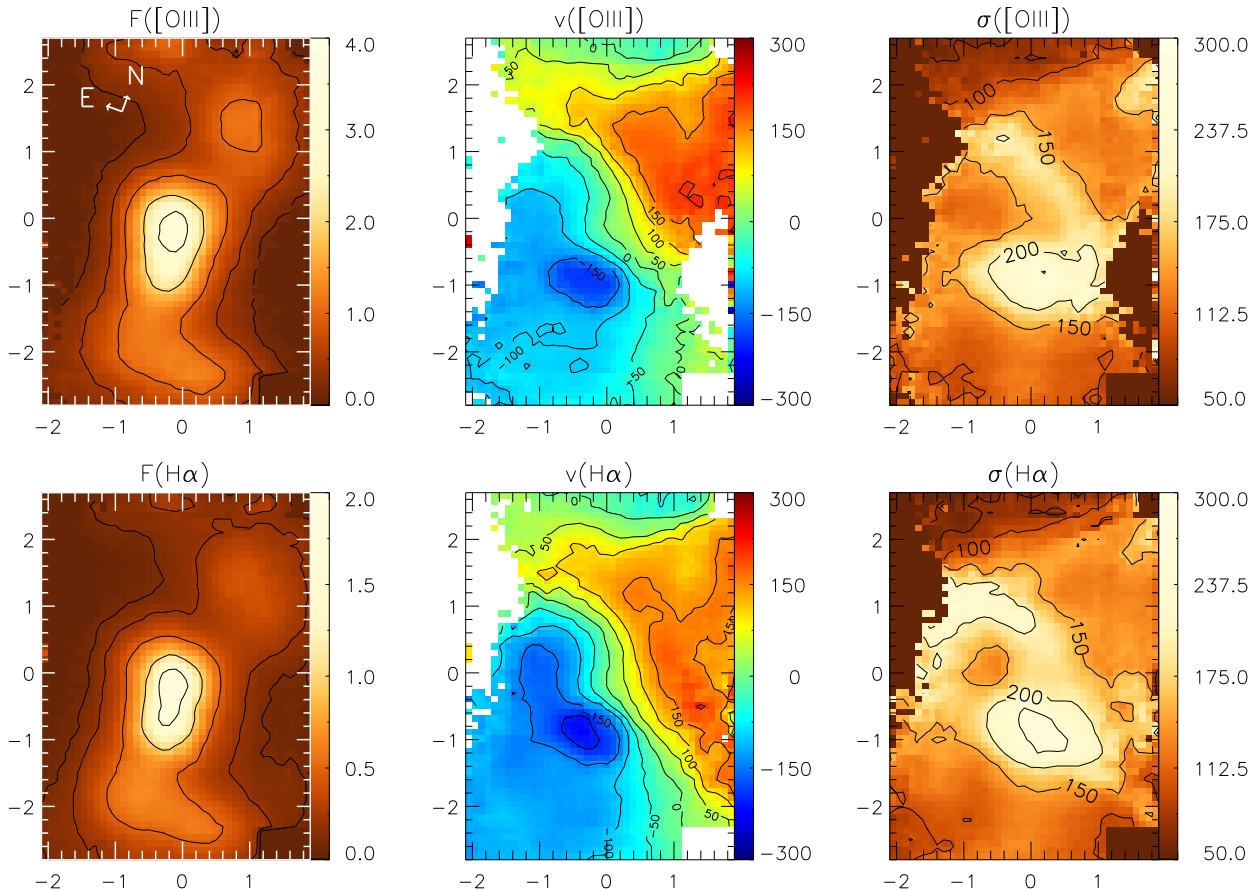
4 *Guilherme S. Couto et al.*


Figure 2. Integrated flux, centroid velocity and velocity dispersion distributions resulted from the Gauss-Hermite fit of the $[\text{O III}]\lambda 5007$ and $\text{H}\alpha$ emission lines. The blue dashed line displays the radio jet axis. Flux units are $10^{-16} \text{ erg s}^{-1} \text{ cm}^{-2} \text{ spaxel}^{-1}$. Centroid velocity and dispersion velocity units are km s^{-1} .

more than one kinematical component are present. The region presenting redshifted centroid velocities, located $\approx 1''$ north-west from the nucleus, show $h3$ values smaller than -0.1 , indicating the presence of blue wings. The opposite is observed in the region showing blueshifted velocities ($\approx 1''$ south-east from the nucleus), where the $h3$ moment present values higher than 0.1 , tracing red wings. The region presenting the highest blueshifted velocities ($\approx 1''$ south from the nucleus), in the other hand, present a ring of low $h3 \sim -0.1$ and $h4 \sim 0$, while the center has $h3 \sim 0$ and ~ -0.1 , showing that this region is dominated by another kinematic component aside from rotation, with a broad peak in the emission lines profiles. The blueshifted region close to the border of the FoV to the north-east from the nucleus also shows $h3 \sim 0.1$, thus red wings are also present in this region. The $h4$ moment distribution seems to indicate a more peaked profile in the regions presenting blueshifted velocities south-east from the nucleus, while a broader profile seems to be present in the redshifted regions north-west from the nucleus.

3.3 Line ratio distributions

Fig. 4 show the line ratio maps obtained from the emission line flux distributions. The top left and middle panels display the $[\text{N II}]/\text{H}\alpha$ and $[\text{S II}]/\text{H}\alpha$ ratio maps, which are similar to each other, and seem to be spatially well correlated with the centroid velocity maps shown in Fig. 2. The highest ratio values ($[\text{N II}]/\text{H}\alpha \sim 1.3$ and $[\text{S II}]/\text{H}\alpha \sim 0.7$) are observed in the region showing redshifted velocities north-west from the nucleus, while the lowest ratio values ($[\text{N II}]/\text{H}\alpha \sim 0.9$ and $[\text{S II}]/\text{H}\alpha \sim 0.6$) are observed in the blueshifted region, south-east from the nucleus (and including it). The blueshifted region close to the north-eastern border of the FoV also shows a decrease of these line ratio values. The southern knot $\approx 1''$ of the nucleus which show the highest blueshifted velocities displays no particular structure in the line ratio maps. The $[\text{O I}]/\text{H}\alpha$ ratio is low throughout our FoV, with values ~ 0.1 . Probably due to the weak emission of the $[\text{O I}]\lambda 6300$ line, we could not trace any clear structure, but the ratio values seems to decrease close to the borders of our FoV.

High $[\text{O III}]/\text{H}\beta$ ratio values, of ~ 13 , are observed in the nucleus of $4\text{C} + 29.30$. Although we could only measure this line ratio in the central regions of our FoV, due to the

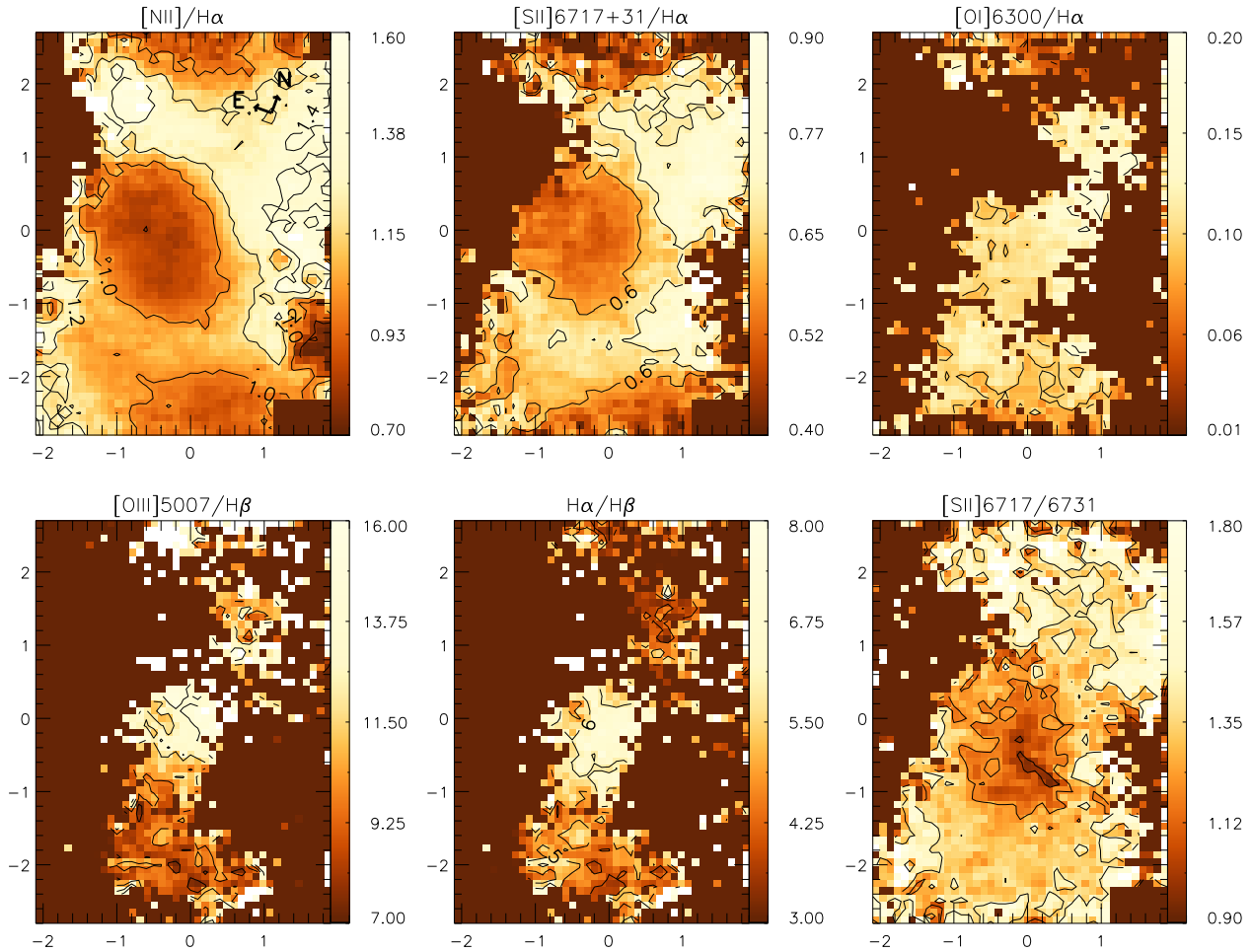


Figure 4. Line ratio maps of the identified ratios.

weak emission of the $H\beta$ line, the southern extended emission show lower values of ~ 8 . The $H\alpha/H\beta$ ratio map shows high values of ~ 6 in the nucleus, decreasing to ~ 5 and ~ 4 in the southern and northern extended emitting regions, respectively. Finally, the $[SII]6717/6731$ ratio map, which is a tracer of the gaseous density, displays its lowest values (~ 1) at the nucleus and just south of it, in the region covered by the dust lane. These line ratio values then increase with the distance to this central region, reaching values of ~ 1.4 close to the north-western border of our FoV.

3.4 Channel maps

We have mapped the gas kinematics using also channel maps extracted along the $[OIII]\lambda 5700$ emission line profile. Fig. 5 shows a sequence of the channel maps within velocity bins of $\approx 111 \text{ km s}^{-1}$ (corresponding to four spectral pixels). The highest blueshifted velocities ($\sim -600 \text{ km s}^{-1}$) are observed at the southern knot, and the bulk of emission is located in this region until the blueshifts reach values of $\sim -200 \text{ km s}^{-1}$. The emission concentrates in the nucleus from velocities $-168 < v < 164 \text{ km s}^{-1}$, along

with the southern extended emission. Between velocities -168 km s^{-1} and 164 km s^{-1} , emission in the northern border of the FoV seems to be moving from the east to the west, reaching a circular region with intense emission between velocities $164 < v < 275 \text{ km s}^{-1}$. The highest redshifted velocities ($> 300 \text{ km s}^{-1}$) then concentrate in the extended emitting region north from the nucleus, including the nucleus. The blue dashed line displays the orientation of the radio jet axis of 4C+29.30.

4 DISCUSSION

4.1 Excitation

4.1.1 Flux distribution

4C+29.30 clearly shows evidence of interaction, as supported by the presence of dust lanes crossing the nucleus of the galaxy. The flux distribution maps of the $[OIII]\lambda 5700$ and $H\alpha$ emission lines display peaked emission in the same position of the peak of the continuum emission, with an elongation to $\sim 0''.6$ south from the nucleus. This elongation is the combination of the nuclear flux and that of the southern

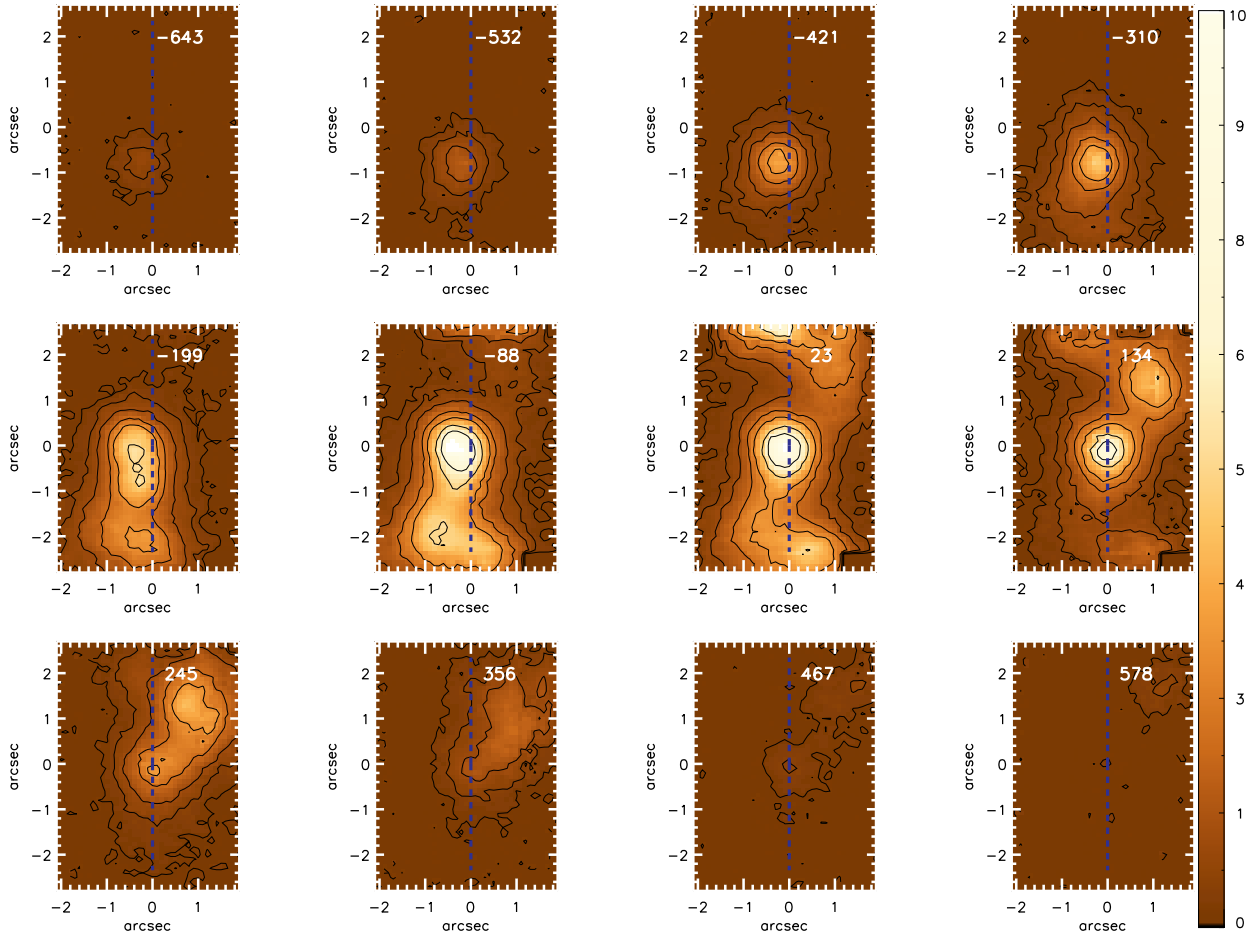
6 *Guilherme S. Couto et al.*


Figure 5. Channel maps along the $[\text{O III}]\lambda 5700$ emission-line profile, in order of increasing velocities shown in the top of each panel in units of km s^{-1} . Flux units are $10^{-17} \text{ erg s}^{-1} \text{ cm}^{-2} \text{ spaxel}^{-1}$. The blue dashed line displays the radio jet axis.

knot separated by the dust lane just south of the nucleus – seen in the *HST* image – smoothed by the poorer angular resolution of the GMOS-IFU data ($\sim 0''.7$). The region of strongest emission extends from the nucleus and southern knot towards the north and south, and does not follow the orientation of the radio jet, that is tilted by $\sim 20^\circ$ to the east. An emission knot is observed $\approx 1''.5$ north from the nucleus, and emission seems to shift from the south and north directions towards the west and east, respectively, when reaching the borders of the FoV, in a spiral or “z-like” structure.

4.1.2 Ratio maps

We observe emission-line ratios characteristic of high excitation over the whole FoV, as shown in Fig. 4. The high values of $[\text{O III}]/\text{H}\beta$ ($0.90 < \log([\text{O III}]/\text{H}\beta) < 1.11$), along with also high values of $[\text{N II}]/\text{H}\alpha$ and $[\text{S II}]/\text{H}\alpha$ ($-0.05 < \log([\text{N II}]/\text{H}\alpha) < 0.11$, $-0.22 < \log([\text{S II}]/\text{H}\alpha) < -0.15$), places 4C+29.30 in the Seyfert region of the BPT diagrams (Baldwin et al. 1981; Kewley et al. 2006). The highest $[\text{N II}]/\text{H}\alpha$ and $[\text{S II}]/\text{H}\alpha$ ratios are observed north of the nucleus at the same location where redshifts dominate the

velocity field, suggesting that these redshifts may not be just part of a rotating structure, what could be indicated by the presence of blueshifts to the south of the nucleus. In this blueshifted region these line ratios are lower. Lower ratios are also observed in the north-eastern border of the FoV.

The low values of $[\text{O I}]/\text{H}\alpha$ ($\log([\text{O I}]/\text{H}\alpha) \sim -1.0$) suggest that shocks are not an important ionization mechanism in 4C+29.30, as higher values of this ratio are usually observed in jet-cloud interactions typical in radio galaxies. Aside from its uncertainties due to the weak emission of the $\text{H}\beta$ line, the $\text{H}\alpha/\text{H}\beta$ ratio map does indicate the presence of dust extinction with its higher values just south of the nucleus, in the region where the dust lane is observed.

4.1.3 Electron density

In order to calculate the emitting gas density, we used the ratio of the $[\text{S II}]$ emission lines (bottom right panel of Fig. 4 Osterbrock & Ferland 2006). We used the IRAF TEMDEN routine, for a typical temperature of 10 000 K. The electron density map is shown in Fig. 6, with the highest densities reaching $\sim 500 \text{ cm}^{-3}$ in the region covered by the dust lane just south of the nucleus.

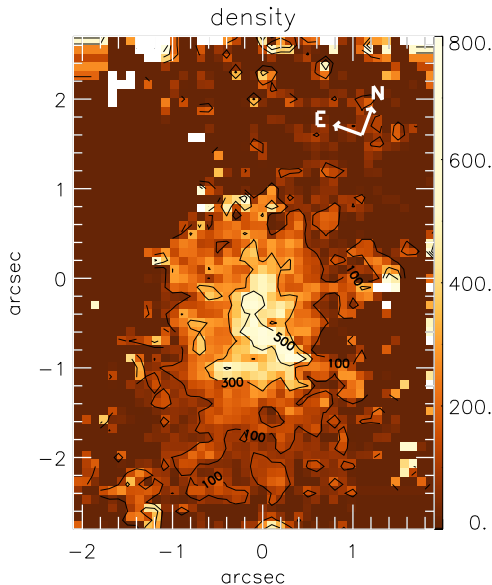


Figure 6. Electron density map, derived from the [S II] ratio. Density units are cm^{-3} .

The electron density decreases with the distance from the nucleus. The regions to the north of the nucleus, where we observe the higher [N II]/H α and [S II]/H α and redshifted centroid velocities, display the lowest densities ($\sim 50 \text{ cm}^{-3}$), supporting our interpretation that the gas is not being ionized by shocks. Photoionization from the AGN radiation is the main source of ionization and excitation of the emitting gas.

4.2 Kinematics

The centroid velocity and velocity dispersion maps shown in Fig. 2 reveal a pattern similar to rotation, but with clear disturbances, and an increase in the velocity dispersion in a strip almost $2''$ (2.5 kpc) wide running through the nucleus approximately following the dust lane along the east-west direction. The southern knot seems to be kinematically separated from the surrounding regions, since we observe higher velocity dispersions, highest blueshifted velocities, low $h4$ moment and presenting a ring of low $h3$ moment. In the channel maps the southern knot appears in the highest blueshift channels ($\sim -600 \text{ km s}^{-1}$ to -350 km s^{-1}), while the other structures appear in lower velocity channel reaching similar amplitudes in blueshift ($\sim -350 \text{ km s}^{-1}$) and redshift ($\sim 350 \text{ km s}^{-1}$).

Another apparent distinct kinematic component is observed close to the north-eastern border, with velocities close to zero. This change in velocity may be associated to the dust lane observed in the *HST-STIS* image (Fig. 1) that crosses the region just south of the nucleus and then bends towards the north-northeast, where the zero velocities are observed. The dust lane could be obscuring part of receding gas in this region.

The highest velocity dispersions ($\sim 200 - 250 \text{ km s}^{-1}$)

are observed at the southern knot. Just to the north of it, there is a $\sim 0''.8$ wide strip running from south-west to north-east, where $\sigma \sim 150 \text{ km s}^{-1}$, corresponding to the region of largest gradient in the velocity field ($\sim -100 \text{ km s}^{-1}$ to 150 km s^{-1}), that approximately coincides with the region covered by the dust lane.

We have tried to fit a rotating disc model to the H α velocity field (van der Kruit & Allen 1978; Bertola et al. 1991), but the fit does not converge, implying that the dominant kinematics is not ordered rotation.

REFERENCES

- Allington-Smith J., Murray G., Content R., Dodsworth G., Davies R., Miller B. W., Jorgensen I., Hook I., Crampton D., Murowinski R., 2002, *PASP*, 114, 892
- Baldwin J. A., Phillips M. M., Terlevich R., 1981, *PASP*, 93, 5
- Bertola F., Bettoni D., Danziger J., Sadler E., Sparke L., de Zeeuw T., 1991, *ApJ*, 373, 369
- Jamrozy M., Konar C., Saikia D. J., Stawarz L., Mack K.-H., Siemiginowska A., 2007, *MNRAS*, 378, 581
- Kewley L. J., Groves B., Kauffmann G., Heckman T., 2006, *MNRAS*, 372, 961
- Osterbrock D. E., Ferland G. J., 2006, *Astrophysics of gaseous nebulae and active galactic nuclei*
- Siemiginowska A., Stawarz L., Cheung C. C., Aldcroft T. L., Bechtold J., Burke D. J., Evans D., Holt J., Jamrozy M., Migliori G., 2012, *ApJ*, 750, 124
- van Breugel W. J. M., Heckman T. M., Miley G. K., Filippenko A. V., 1986, *ApJ*, 311, 58
- van der Kruit P. C., Allen R. J., 1978, *ARAA*, 16, 103

4.1 Massa de gás ionizado

A Fig. 4.1 mostra os mapas de densidade superficial de massa de gás ionizado (Σ_{gas}) para cada uma das galáxias de nossa amostra, corrigidos por avermelhamento, construídos utilizando os mapas de fluxo de $H\alpha$ e $H\beta$ e densidade eletrônica. No caso da galáxia Pictor A, para a qual não temos observações da linha de emissão de $H\beta$, foi utilizada a razão de $H\alpha/H\beta \sim 5$ medida por Filippenko (1985), para uma abertura de $2'' \times 4''$ centrada no núcleo.

As galáxias Arp 102B e Pictor A apresentam distribuições de Σ_{gas} muito parecidas às distribuições de fluxo, exceto por uma região em Arp 102B de alta densidade eletrônica a leste do núcleo, resultando em Σ_{gas} menor. Os valores de Σ_{gas} também são parecidos entre estas duas galáxias: $\sim 10^{7.5} M_{\odot} \text{ kpc}^{-2}$ no núcleo, caindo para $\sim 10^{6.5} M_{\odot} \text{ kpc}^{-2}$ conforme aumenta a distância do núcleo, seguindo a distribuição de fluxo. A galáxia 3C 33 apresenta maior Σ_{gas} na emissão estendida à nordeste do núcleo ($\sim 10^{7.0} M_{\odot} \text{ kpc}^{-2}$) enquanto que no núcleo e na região a sudoeste Σ_{gas} é um pouco menor ($\sim 10^{6.5} M_{\odot} \text{ kpc}^{-2}$). Já na galáxia 4C +29.30, Σ_{gas} parece relativamente uniforme, com valores $\sim 10^{6.5} M_{\odot} \text{ kpc}^{-2}$. Como a emissão de $H\beta$ nessa galáxia é fraca, não temos muita informação do avermelhamento, e resolvemos mascarar regiões onde a medição da linha de $H\beta$ tem incerteza alta.

Na tabela 4.1 apresentamos os valores totais, integrados em todo o campo de visão do GMOS-IFU, de massa de gás e luminosidade de $H\alpha$, além de $\bar{\Sigma}_{ion}$, para as galáxias de nossa amostra. Obtemos valores médios de $M_{total} = 2.6 \pm 0.2 \times 10^8 M_{\odot}$, $L_{H\alpha} = 1.5 \pm 0.2 \times 10^{42} \text{ erg s}^{-1}$ e $\bar{\Sigma}_{ion} = 5.1 \pm 4.8 \times 10^6 M_{\odot} \text{ kpc}^{-2}$. Os valores de massa total são aproximadamente uma ordem de magnitude maiores que os valores encontrados por Baum & McCarthy (2000), que encontram valores de massa de gás ionizado da ordem de $\sim 10^7 M_{\odot}$ em $z \sim 0.05$ para uma amostra de 52 rádio galáxias com dados de espectroscopia ótica em uma série de telescópios terrestres como o Kitt Peak e o Cerro Tololo. a diferença pode residir em como são derivadas as massas, visto que estes autores assumem no seu cálculo que a geometria do gás emissor é esférica e adotam um parâmetro de ionização de $U = 10^{-2}$ ao longo de toda extensão, tornando o cálculo bastante incerto. Em outro estudo, analisando a massa da poeira em 32 rádio galáxias com $0.05 < z < 0.7$, Tadhunter et al. (2014) estimaram uma massa de gás média de $M_{total} = 1.2 \times 10^9 M_{\odot}$ (intervalo de $1.0 \times 10^8 < M_{total} < 3.7 \times 10^{10} M_{\odot}$), o que parece estar de maior acordo com nossas estimativas, considerando a diferença em *redshift*.

Na nossa amostra não observamos assinaturas claras de *inflow* de gás, mas evidências de alimentação do AGN indiretas incluem: disco em rotação em Arp 102B e 3C 33; aumento da razão de $[O\text{I}]/H\alpha$ na forma de braços espirais em 3C 33, que pode ser assinatura de choque

levando o gás a migrar para o centro; a emissão em forma de barra em Pictor A. Além disso, o fato de encontrarmos altas massas de gás ionizado nessas galáxias indica recente captura de gás e sua migração para o centro num processo de *feeding* do AGN. As galáxias Arp 102B, Pictor A e 4C +29.30 apresentam assinaturas claras de interação, sendo que na 3C 33 ainda vemos uma alta amplitude de velocidades no disco em rotação, o que pode ser também um indício de interação.

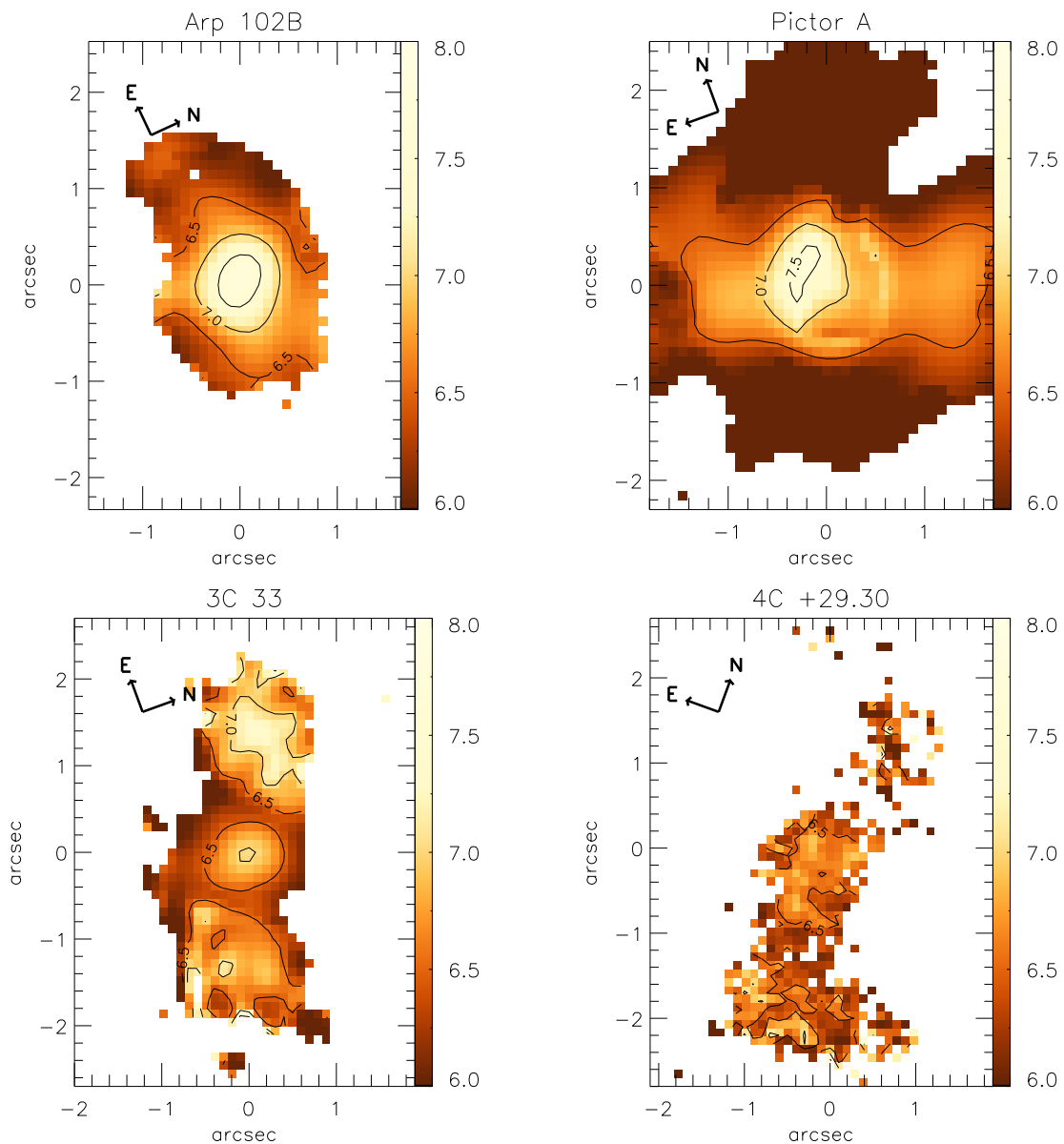


Figura 4.1: Distribuição de Σ_{gas} para as galáxias de nossa amostra. Unidades de Σ_{gas} são $M_{\odot} \text{ kpc}^{-2}$, e estão mostradas em escala logarítmica.

4.2 Taxa de acreção

Utilizando as relações apresentadas no capítulo 3, estimamos a taxa de acreção do AGN presente nas galáxias da nossa amostra. Para isso utilizamos as luminosidades bolométricas L_{bol} , que são obtidas da luminosidade em $H\alpha$, através da relação $L_{bol} \sim 100 \times L_{H\alpha}$ (Riffel & Storchi-Bergmann, 2011), listadas na tabela 2.2.

Assumindo uma eficiência de conversão da massa acreçada em radiação para um disco óticamente espesso e geometricamente fino de $\eta = 0.1$ (Frank et al., 2002), estimamos as taxas de acreção para as galáxias de nossa amostra, dadas na tabela 4.1. Obtemos uma média de $\bar{m} = 2.7 \times 10^{-2} M_{\odot} \text{ano}^{-1}$, o que significa que, se esta taxa de mantiver constante, apenas $\sim 10^6 M_{\odot}$ serão acreçadas pelo AGN, considerando ciclos de atividade típicos de 10^8 anos. Logo, da massa de gás ionizado total que observamos na seção anterior, apenas da ordem de $\sim 1\%$ é acreçada pelo AGN. Isso nos leva a especular o destino final do gás observado.

4.3 Estimativa da taxa de formação estelar

A conexão entre a taxa de formação estelar e a massa de gás interestelar foi proposta por Schmidt (1959), o que serviu de base para o estudo de Kennicutt (1998), que examinando dados de 61 galáxias encontrou uma correlação entre a taxa de formação estelar e a densidade superficial de massa. As densidades superficiais de gás que obtivemos para as galáxias de nossa amostra são altas o suficiente para dar origem a uma taxa não desprezível de formação estelar. Supondo que a grande maioria do gás ionizado que observamos eventualmente esfriará e formará estrelas, podemos fazer uma estimativa da taxa de formação estelar resultante nessas galáxias. Para isso, utilizamos a relação dada por Kennicutt (1998), onde a densidade de formação estelar Σ_{SFR} é dada por:

$$\Sigma_{SFR} = 2.5 \times 10^{-4} \left(\frac{\Sigma_{gas}}{1 M_{\odot} pc^{-2}} \right)^{1.4} M_{\odot} \text{ano}^{-1} kpc^{-2} \quad (4.1)$$

Utilizando a densidade superficial de gás ionizado obtido na seção 4.1, podemos obter a distribuição de Σ_{SFR} . Integrando a distribuição teremos a estimativa de taxa de formação estelar sobre todo o campo de visão do GMOS-IFU, o que é feito para cada galáxia de nossa amostra e mostrado na tabela 4.1. Obtemos um valor médio de taxa de formação estelar de $9.7 - 53.8 M_{\odot} \text{ano}^{-1}$, o que estaria de acordo com a massa total de gás observada sendo convertida em estrelas, ao longo de um período de $\sim 10^8$ anos.

4.4 Taxa de outflow

Podemos estimar a taxa de massa em *outflow* nas galáxias da nossa amostra utilizando a relação 3.20. Apenas para a galáxia Pictor A não foi identificada uma região clara em *outflow* (exceto por um possível *outflow* compacto sugerido pela análise PCA). Na galáxia Arp 102B identificamos um *outflow* com geometria cônica de área projetada de $A = 1.8 \times 10^{42} \text{ cm}^2$, com velocidade de $v_{out} = 1100 \text{ km s}^{-1}$. Utilizando a densidade eletrônica média de $\bar{n}_e = 440 \text{ cm}^{-3}$, obtemos que $\dot{M}_{out} \approx 0.32 M_{\odot} \text{ ano}^{-1}$. Para a galáxia 3C 33 assumimos que os resíduos resultantes da subtração do modelo de rotação são devidos a um *outflow* cilíndrico devido a expansão lateral do jato rádio. Assim, assumindo um cilindro com raio da base $0.5''$ e altura $1.0''$, centrado no núcleo, e utilizando a velocidade observada nos resíduos de $v_{out} \approx 100 \text{ km s}^{-1}$ e a densidade eletrônica média de $\bar{n}_e = 100 \text{ cm}^{-3}$, obtemos que $\dot{M}_{out} \approx 0.34 M_{\odot} \text{ ano}^{-1}$. Finalmente, para a galáxia 4C +29.30 assumimos que os altos *blueshifts* observados no “southern knot” são devidos a um *outflow* com geometria cônica com origem no núcleo, com raio da base maior $\approx 0.7''$. Utilizando a alta velocidade observada nos *channel maps* temos que $v_{out} \approx 650 \text{ km s}^{-1}$, e com $\bar{n}_e = 95 \text{ cm}^{-3}$, obtemos que $\dot{M}_{out} \approx 0.49 M_{\odot} \text{ ano}^{-1}$. Para as últimas duas galáxias assumimos um *filling factor* de $f = 1 \times 10^{-4}$, enquanto que para a galáxia Arp 102B este valor foi estimado. Os valores de taxa de *outflow* são mostrados na tabela 4.1.

Por fim, calculamos a potência do *outflow* observado utilizando a relação 3.21 e os valores mencionados no parágrafo acima, além dos seguintes valores de dispersão de velocidade média observado na região do *outflow*: $\sigma \approx 150 \text{ km s}^{-1}$ (Arp 102B), $\sigma \approx 150 \text{ km s}^{-1}$ (3C 33) e $\sigma \approx 200 \text{ km s}^{-1}$ (4C +29.30). Assim, obtivemos as potências listadas na tabela 4.1, com um valor médio de $\bar{E} = 9.9 \pm 2.7 \times 10^{40} \text{ erg s}^{-1}$. Na última linha da tabela 4.1, mostramos a razão entre a potência do *outflow* e a luminosidade bolométrica do AGN, sendo que \bar{E} estimado é quatro ordens de grandeza menor que a luminosidade bolométrica.

Efeitos de *feedback* na forma de *outflow* de gás ionizado são observados em todas as galáxias de nossa amostra. A cinemática do gás circumnuclear é altamente distorcida nesses objetos, sendo esse o efeito mais visível da presença de *outflows*. Porém, como vemos, a potência destes *outflows* não é alta o suficiente para afetar a evolução da galáxia hospedeira, como indicado por modelos como em Di Matteo et al. (2005), pelo menos nos kiloparsecs centrais cobertos pelas nossas observações. Por outro lado, observamos um aumento na dispersão de velocidades na vizinhança do núcleo, que pode ser atribuída a interação do jato com o gás circundante, certamente aquecendo-o e isto deve inibir a formação de novas estrelas.

Tabela 4.1: Tabela com varios parâmetros físicos medidos para as galáxias de nossa amostra.

| Parâmetro físico | Arp 102B | Pictor A | 3C 33 | 4C +29.30 |
|--|------------------------------|------------------------------|------------------------------|------------------------------|
| Massa de gás total (M_{\odot}) | $7.4 \pm 5.3 \times 10^7$ | $1.8 \pm 1.1 \times 10^8$ | $4.6 \pm 1.7 \times 10^8$ | $3.2 \pm 2.5 \times 10^8$ |
| Luminosidade total de H α (erg s^{-1}) | $1.8 \pm 0.1 \times 10^{42}$ | $6.9 \pm 0.2 \times 10^{41}$ | $2.0 \pm 0.1 \times 10^{42}$ | $1.7 \pm 0.2 \times 10^{42}$ |
| Densidade superficial média $\bar{\Sigma}_{ion}$ ($M_{\odot} \text{ kpc}^{-2}$) | $6.9 \pm 4.7 \times 10^6$ | $3.1 \pm 2.6 \times 10^6$ | $5.7 \pm 4.2 \times 10^6$ | $4.7 \pm 7.7 \times 10^6$ |
| Luminosidade bolométrica L_{bol} (erg s^{-1}) | 1.8×10^{44} | 6.9×10^{43} | 2.0×10^{44} | 1.7×10^{44} |
| Taxa de acreção \dot{m} ($M_{\odot} \text{ ano}^{-1}$) | 3.2×10^{-2} | 1.2×10^{-2} | 3.6×10^{-2} | 3.1×10^{-2} |
| Taxa de formação estelar ($M_{\odot} \text{ ano}^{-1}$) | 9.7 | 19.6 | 53.8 | 49.5 |
| Taxa de <i>outflow</i> \dot{M}_{out} ($M_{\odot} \text{ ano}^{-1}$) | 0.32 | - | 0.34 | 0.49 |
| Potência do <i>outflow</i> \dot{E} (erg s^{-1}) | 1.3×10^{41} | - | 8.3×10^{40} | 8.4×10^{40} |
| \dot{E} / L_{bol} (em %) | 0.07 | - | 0.04 | 0.05 |

5 *Conclusões*

Neste trabalho apresentamos dados da excitação e cinemática do gás dos kiloparsecs centrais das rádio galáxias Arp 102B, Pictor A, 3C 33 e 4C +29.30 utilizando espectroscopia de campo integral IFU do instrumento GMOS dos telescópios Gemini. Nosso principal objetivo é encontrar traços de interação entre o gás circumnuclear e o jato rádio observado nessas galáxias, procurando identificar e quantificar mecanismos de *feeding* e *feedback* do AGN nas galáxias. Nossas principais conclusões são:

- **Emissão estendida do gás:** As quatro galáxias observadas apresentam gás ionizado estendido ao longo do campo de visão do GMOS-IFU, com extensões de ~ 2 kpc a ~ 6 kpc, na forma de discos, barras e braços espirais;
- **Excitação do gás:** Razões de linha apresentam valores típicos de AGNs, com as galáxias 3C 33 e 4C +29.30 sendo classificadas como Seyfert, enquanto que a galáxia Arp 102B apresenta razões tanto de Seyfert quanto de LINER. A exceção é a galáxia Pictor A, que mostra valores de $[\text{N II}]/\text{H}\alpha$ típicos de regiões H II. Interpretamos que isto se deve à presença de gás de mais baixa metalicidade, sugerindo a captura de uma galáxia anã. Regiões identificadas com *outflow* de gás em geral apresentam maiores razões de $[\text{N II}]/\text{H}\alpha$, $[\text{S II}]/\text{H}\alpha$ e $[\text{O I}]/\text{H}\alpha$, além de aumento de dispersão de velocidades, indicando a presença de choques como fonte adicional de excitação do gás;
- **Cinemática do gás:** Conseguimos ajustar um modelo de disco em rotação em Arp 102B e 3C 33, enquanto que em Pictor A o padrão de rotação é muito distorcido, e em 4C +29.30 a cinemática pode estar dominada por *outflow*. Alta dispersão de velocidades ($\geq 200 \text{ km s}^{-1}$) na região circundando o núcleo é observada nas galáxias Arp 102B, 3C 33 e 4C +29.30, indicando interação do gás com o jato rádio;
- **Feeding:** Observamos estruturas tipicamente apontadas como mecanismos de *inflow* de gás na nossa amostra, como a emissão em forma de barra na galáxia Pictor A e os braços espirais na galáxia 3C 33, além dos discos em rotação modelados nas galáxias Arp 102B

e 3C 33, mas não foi possível observar uma clara assinatura cinemática de *inflow* de gás na direção do AGN. No entanto, o fato das galáxias apresentarem alta massa de gás ionizado ($M_{gas} \sim 3 \times 10^8 M_{\odot}$) indica que estas galáxias devem ter capturado gás através de interação, o que pode ter resultado na atividade nuclear observada. Sinais claros de interação são de fato observados nas galáxias Arp 102B, Pictor A e 4C +29.30;

- **Feedback:** Retroalimentação do AGN é observado em forma de *outflows* nas galáxias Arp 102B, 3C 33 e 4C +29.30. Uma fraca evidência de *outflow* é observada na galáxia Pictor A através da análise PCA. Os *outflows* observados estão ligados ao jato rádio. No caso da galáxia Arp 102B, observamos movimento do gás ao longo do jato rádio. Nesta galáxia e em 3C 33 e 4C +29.30 o aumento na dispersão de velocidades numa faixa circundando o núcleo é interpretado como devido à expansão lateral do gás devido à passagem do jato rádio;
- Estimamos que a potência dos *outflows* observados são de $\dot{E} = 6.6 - 13.0 \times 10^{40} \text{ erg s}^{-1}$, o que representa apenas 0.04 – 0.07% da luminosidade bolométrica do AGN destas galáxias. Estes valores sugerem que os *outflows* observados não são potentes o suficiente para terem impacto mensurável na evolução das galáxias hospedeiras;
- As densidades superficiais de gás ionizado implicam em quantidades suficientes de gás para produzir taxas de formação estelar no intervalo de 0.02 a $1.25 M_{\odot} \text{ ano}^{-1}$. A aparente ausência de formação estelar, combinada com altas dispersões de velocidades, sugere que o *feedback* está presente na forma de aquecimento do gás inibindo a formação estelar.

5.1 Perspectivas

Os trabalhos sobre as galáxias 3C 33 e 4C +29.30, que se encontram em fase final de redação, devem ser submetidos para publicação nos próximos meses. Além de terminar o trabalho com a amostra apresentada aqui, gostaria de estender o estudo sobre rádio galáxias para uma amostra maior para obter resultados de relevância estatística. Objetivo continuar no meu pós-doutorado com este estudo, selecionando uma amostra de dezenas de rádio galáxias para estudar, além do gás emissor, o histórico de formação estelar nestas galáxias. Para isso, serão utilizados dados do SDSS para ajustar o contínuo estelar nessas galáxias com o código STARDLIGHT, obtendo, além da história de formação estelar, distribuições de idade e metalicidade destas populações nas rádio galáxias. Estas características podem ser comparadas em subamostras, como galáxias FR I e II, e analisar se há diferenças na população estelar dependendo da morfologia do jato rádio.

Para testar a hipótese de que, no estudo apresentado nesta tese, estamos analisando apenas uma parte do *outflow* em rádio galáxias próximas, pretendemos submeter pedidos de tempo para instrumentos como o MUSE, do telescópio VLT, que apresentam campo de visão maior que o GMOS, além de melhor resolução. As galáxias Pictor A e 4C +29.30 são bons objetos para este projeto, visto que claramente apresentam componentes cinemáticos que se estendem além do campo de visão do GMOS-IFU.

APÊNDICE A – Bolsa sanduíche

Durante o segundo semestre do ano de 2015, o aluno recebeu a oportunidade de trabalhar com o Prof. Luis Robledo Colina na Universidade Autônoma de Madrid, contemplado com uma bolsa sanduíche do programa Ciências Sem Fronteiras, da agência de fomento CNPq (Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico). A motivação do trabalho era obter medições das linhas de emissão $[OII]\lambda\lambda 3726,29\text{\AA}$ de galáxias intensas em comprimentos de onda de submilímetro (SMGs, de *Submillimeter Galaxies*) em alto *redshift*, para estudar a cinemática do gás emissor, em especial tentar identificar efeitos de *feedback*, para traçar um comparativo com as rádio galáxias locais, objeto de estudo desta tese. Infelizmente não foi possível detectar as linhas de emissão nas duas SMGs estudadas, BR 1202-0725 ($z = 4.69$) e J1000+0234 ($z = 4.55$), com as incertezas obtidas no dados do instrumento SINFONI (de *Spectrograph for INtegral Field Observations in the Near Infrared*) no telescópio VLT (*Very Large Telescope*), do ESO (Observatório Europeu do Sul, de *European Southern Observatory*), servindo de estimativas dos limites superiores das quantidades físicas medidas. Este trabalho gerou um artigo publicado, com título de *K band SINFONI spectra of two $z \sim 5$ SMGs: upper limits to the unobscured star formation from $[O II]$ optical emission line searches* (Couto et al., 2016a). Este artigo é disponibilizado gratuitamente em <https://arxiv.org/archive/astro-ph>.

APÊNDICE B – Participação em outros trabalhos

Durante o trabalho de doutorado, o aluno participou da análise de dados de espectroscopia de campo integral de galáxias Seyferts. Estes trabalhos foram publicados com os títulos de *Feeding and feedback in the inner kiloparsec of the active galaxy NGC 2110* (Schnorr-Müller et al., 2014), *The Complex Gas Kinematics in the Nucleus of the Seyfert 2 Galaxy NGC 1386: Rotation, Outflows, and Inflows* (Lena et al., 2015) e *Ionized gas kinematics within the inner kiloparsec of the Seyfert galaxy NGC 1365* (Lena et al., 2016). Estes artigos são disponibilizados gratuitamente em <https://arxiv.org/archive/astro-ph>.

Bibliografia

- [1] ALLEN, M. G., GROVES, B. A., DOPITA, M. A., SUTHERLAND, R. S., KEWLEY, L. J. The MAPPINGS III Library of Fast Radiative Shock Models. **APJS**, v. 178, p. 20–55, September 2008.
- [2] ALLINGTON-SMITH, J., MURRAY, G., CONTENT, R., DODSWORTH, G., DAVIES, R., MILLER, B. W., JORGENSEN, I., HOOK, I., CRAMPTON, D., MUROWINSKI, R. Integral Field Spectroscopy with the Gemini Multiobject Spectrograph. I. Design, Construction, and Testing. **Publications of the Astronomical Society of the Pacific**, v. 114, p. 892–912, August 2002.
- [3] ANTONUCCI, R. Unified models for active galactic nuclei and quasars. **Annual Review of Astronomy and Astrophysics**, v. 31, p. 473–521, 1993.
- [4] ANTONUCCI, R. Thermal and Nonthermal Radio Galaxies. **ArXiv e-prints**, January 2011.
- [5] ANTONUCCI, R., HURT, T., AGOL, E. Spectropolarimetric Test of the Relativistic Disk Model for the Broad H alpha Line of ARP 102B. **ApJL**, v. 456, p. L25, January 1996.
- [6] BALDWIN, J. A., PHILLIPS, M. M., TERLEVICH, R. Classification parameters for the emission-line spectra of extragalactic objects. **Publications of the Astronomical Society of the Pacific**, v. 93, p. 5–19, February 1981.
- [7] BARBOSA, F. K. B., STORCHI-BERGMANN, T., CID FERNANDES, R., WINGE, C., SCHMITT, H. Gemini/GMOS Integral Field Unit stellar kinematics of the nuclear region of six nearby active galaxies. **Monthly Notices of the Royal Astronomical Society**, v. 371, p. 170–184, September 2006.
- [8] BARBOSA, F. K. B., STORCHI-BERGMANN, T., CID FERNANDES, R., WINGE, C., SCHMITT, H. Gemini/GMOS IFU gas velocity ‘tomography’ of the narrow line region of nearby active galaxies. **Monthly Notices of the Royal Astronomical Society**, v. 396, p. 2–18, June 2009.

- [9] BAUM, S. A., HECKMAN, T. Extended optical line emitting gas in powerful radio galaxies - What is the radio emission-line connection? **Astrophysical Journal**, v. 336, p. 702–721, January 1989.
- [10] BAUM, S. A., MCCARTHY, P. J. Emission-Line Properties of 3CR Radio Galaxies. III. Origins and Implications of the Velocity Fields. **AJ**, v. 119, p. 2634–2644, June 2000.
- [11] BERTOLA, F., BETTONI, D., DANZIGER, J., SADLER, E., SPARKE, L., DE ZEEUW, T. Testing the gravitational field in elliptical galaxies - NGC 5077. **Astrophysical Journal**, v. 373, p. 369–390, June 1991.
- [12] BEST, P. N., RÖTTGERING, H. J. A., LONGAIR, M. S. Ionization, shocks and evolution of the emission-line gas of distant 3CR radio galaxies. **MNRAS**, v. 311, p. 23–36, January 2000.
- [13] BIERMANN, P., PREUSS, E., KRONBERG, P. P., SCHILIZZI, R. T., SHAFFER, D. B. VLBI and X-ray observations of compact nuclei in pairs of galaxies. **ApJL**, v. 250, p. L49–L53, November 1981.
- [14] BINETTE, L., MAGRIS, C. G., STASIŃSKA, G., BRUZUAL, A. G. Photoionization in elliptical galaxies by old stars. **Astronomy and Astrophysics**, v. 292, p. 13–19, December 1994.
- [15] BRUZUAL, G., CHARLOT, S. Stellar population synthesis at the resolution of 2003. **Monthly Notices of the Royal Astronomical Society**, v. 344, p. 1000–1028, October 2003.
- [16] CACCIANIGA, A., MARCHÃ, M. J. M., THEAN, A., DENNETT-THORPE, J. EVN observations of low-luminosity flat-spectrum active galactic nuclei. **MNRAS**, v. 328, p. 867–872, December 2001.
- [17] CALZETTI, D., ARMUS, L., BOHLIN, R. C., KINNEY, A. L., KOORNNEEF, J., STORCHI-BERGMANN, T. The Dust Content and Opacity of Actively Star-forming Galaxies. **Astrophysical Journal**, v. 533, p. 682–695, April 2000.
- [18] CAPAK, P., CARILLI, C. L., LEE, N., ALDCROFT, T., AUSSEL, H., SCHINNERER, E., ET AL., . Spectroscopic Confirmation of an Extreme Starburst at Redshift 4.547. **Astrophysical Journal Letters**, v. 681, p. L53–L56, July 2008.

- [19] CAPPELLARI, M., EMSELLEM, E. Parametric Recovery of Line-of-Sight Velocity Distributions from Absorption-Line Spectra of Galaxies via Penalized Likelihood. **Publications of the Astronomical Society of the Pacific**, v. 116, p. 138–147, February 2004.
- [20] CARDELLI, J. A., CLAYTON, G. C., MATHIS, J. S. The relationship between infrared, optical, and ultraviolet extinction. **Astrophysical Journal**, v. 345, p. 245–256, October 1989.
- [21] CARILLI, C. L., KOHNO, K., KAWABE, R., OHTA, K., HENKEL, C., MENTEN, K. M., YUN, M. S., PETRIC, A., TUTUI, Y. High-Resolution Imaging of Molecular Line Emission from High-Redshift QSOs. **AJ**, v. 123, p. 1838–1846, April 2002.
- [22] CARILLI, C. L., RIECHERS, D., WALTER, F., MAIOLINO, R., WAGG, J., LENTATI, L., MCMAHON, R., WOLFE, A. The Anatomy of an Extreme Starburst within 1.3 Gyr of the Big Bang Revealed by ALMA. **Astrophysical Journal**, v. 763, p. 120, February 2013.
- [23] CARNIANI, S., MARCONI, A., BIGGS, A., CRESCI, G., CUPANI, G., D’ODORICO, V., HUMPHREYS, E., MAIOLINO, R., MANNUCCI, F., MOLARO, P., NAGAO, T., TESTI, L., ZWAAN, M. A. Strongly star-forming rotating disks in a complex merging system at $z = 4.7$ as revealed by ALMA. **Astronomy and Astrophysics**, v. 559, p. A29, November 2013.
- [24] CHABRIER, G. The Initial Mass Function: from Salpeter 1955 to 2005. In: THE INITIAL MASS FUNCTION 50 YEARS LATER, Corbelli, E., Palla, F., Zinnecker, H., editores, v. 327 of **Astrophysics and Space Science Library**, p. 41, January 2005.
- [25] CHEN, K., HALPERN, J. P. Structure of line-emitting accretion disks in active galactic nuclei - ARP 102B. **Astrophysical Journal**, v. 344, p. 115–124, September 1989.
- [26] CHEN, K., HALPERN, J. P., FILIPPENKO, A. V. Kinematic evidence for a relativistic Keplerian disk - ARP 102B. **Astrophysical Journal**, v. 339, p. 742–751, April 1989.
- [27] CID FERNANDES, R., SCHOENELL, W., GOMES, J. M., ASARI, N. V., SCHLICKMANN, M., MATEUS, A., STASINSKA, G., SODRÉ, L., JR., TORRES-PAPAQUI, J. P., SEAGAL COLLABORATION, . The Star Formation Histories of Galaxies: A tour through the STARLIGHT-SDSS database. In: REVISTA MEXICANA DE ASTRONOMIA Y ASTROFISICA CONFERENCE SERIES, v. 35 of **Revista Mexicana de Astronomia y Astrofisica Conference Series**, p. 127–132, May 2009.

- [28] CLARK, N. E., TADHUNTER, C. N., MORGANTI, R., KILLEEN, N. E. B., FOSBURY, R. A. E., HOOK, R. N., SIEBERT, J., SHAW, M. A. Radio, optical and X-ray observations of PKS 2250-41: a jet/galaxy collision? **Monthly Notices of the Royal Astronomical Society**, v. 286, p. 558–582, April 1997.
- [29] COMBES, F. AGN Fueling: The observational point of view. In: ACTIVE GALACTIC NUCLEI: FROM CENTRAL ENGINE TO HOST GALAXY, Collin, S., Combes, F., Shlosman, I., editores, v. 290 of **Astronomical Society of the Pacific Conference Series**, p. 411, 2003.
- [30] CONWAY, J. E., MURPHY, D. W. Helical jets and the misalignment distribution for core-dominated radio sources. **Astrophysical Journal**, v. 411, p. 89–102, July 1993.
- [31] CORBETT, E. A., ROBINSON, A., AXON, D. J., YOUNG, S., HOUGH, J. H. The profiles of polarized broad H α lines in radio galaxies. **MNRAS**, v. 296, p. 721–738, May 1998.
- [32] COUTO, G. S., COLINA, L., PIQUERAS LÓPEZ, J., STORCHI-BERGMANN, T., ARRIBAS, S. K band SINFONI spectra of two $z \sim 5$ SMGs: upper limits to the un-obscured star formation from [O II] optical emission line searches. **ArXiv e-prints**, July 2016a.
- [33] COUTO, G. S., STORCHI-BERGMANN, T., AXON, D. J., ROBINSON, A., KHARB, P., RIFFEL, R. A. Kinematics and excitation of the nuclear spiral in the active galaxy Arp 102B. **MNRAS**, v. 435, p. 2982–3000, November 2013.
- [34] COUTO, G. S., STORCHI-BERGMANN, T., ROBINSON, A., RIFFEL, R. A., KHARB, P., LENA, D., SCHNORR-MÜLLER, A. Integral field spectroscopy of the circum-nuclear region of the radio Galaxy Pictor A. **Monthly Notices of the Royal Astronomical Society**, v. 458, p. 855–867, May 2016b.
- [35] DAVIES, R. I., MACIEJEWSKI, W., HICKS, E. K. S., TACCONI, L. J., GENZEL, R., ENGEL, H. Stellar and Molecular Gas Kinematics Of NGC 1097: Inflow Driven by a Nuclear Spiral. **Astrophysical Journal**, v. 702, p. 114–128, September 2009.
- [36] DE ROBERTIS, M. M., DUFOUR, R. J., HUNT, R. W. A five-level program for ions of astrophysical interest. **Journal of the Royal Astronomical Society of Canada**, v. 81, p. 195–220, December 1987.
- [37] DE VAUCOULEURS, G., DE VAUCOULEURS, A., CORWIN, H. G., JR., BUTA, R. J., PATUREL, G., FOUQUÉ, P. **Third Reference Catalogue of Bright Galaxies. Volume I: Explanations and references. Volume II: Data for galaxies between 0^h and 12^h . Volume III: Data for galaxies between 12^h and 24^h .** 1991.

- [38] DI MATTEO, T., SPRINGEL, V., HERNQUIST, L. Energy input from quasars regulates the growth and activity of black holes and their host galaxies. **Nature**, v. 433, p. 604–607, February 2005.
- [39] DOPITA, M. A., SUTHERLAND, R. S. **Astrophysics of the diffuse universe**: 2003.
- [40] ELITZUR, M., SHLOSMAN, I. The AGN-obscuring Torus: The End of the “Doughnut” Paradigm? **ApJL**, v. 648, p. L101–L104, September 2006.
- [41] EMSELLEM, E., FATHI, K., WOZNIAK, H., FERRUIT, P., MUNDELL, C. G., SCHINNERER, E. Gas and stellar dynamics in NGC 1068: probing the galactic gravitational potential. **MNRAS**, v. 365, p. 367–384, January 2006.
- [42] ERACLEOUS, M., HALPERN, J. P. Completion of a Survey and Detailed Study of Double-peaked Emission Lines in Radio-loud Active Galactic Nuclei. **Astrophysical Journal**, v. 599, p. 886–908, December 2003.
- [43] ERACLEOUS, M., HALPERN, J. P. Accurate Redshifts and Classifications for 110 Radio-Loud Active Galactic Nuclei. **APJS**, v. 150, p. 181–186, January 2004.
- [44] ERACLEOUS, M., HWANG, J. A., FLOHIC, H. M. L. G. Spectral Energy Distributions of Weak Active Galactic Nuclei Associated with Low-Ionization Nuclear Emission Regions. **APJS**, v. 187, p. 135–148, March 2010.
- [45] FABIAN, A. C. Observational Evidence of Active Galactic Nuclei Feedback. **Annual Review of Astronomy and Astrophysics**, v. 50, p. 455–489, September 2012.
- [46] FABIAN, A. C., SANDERS, J. S., TAYLOR, G. B., ALLEN, S. W., CRAWFORD, C. S., JOHNSTONE, R. M., IWASAWA, K. A very deep Chandra observation of the Perseus cluster: shocks, ripples and conduction. **MNRAS**, v. 366, p. 417–428, February 2006.
- [47] FANAROFF, B. L., RILEY, J. M. The morphology of extragalactic radio sources of high and low luminosity. **MNRAS**, v. 167, p. 31P–36P, May 1974.
- [48] FATHI, K., AXON, D. J., STORCHI-BERGMANN, T., KHARB, P., ROBINSON, A., MARCONI, A., MACIEJEWSKI, W., CAPETTI, A. An $H\alpha$ Nuclear Spiral Structure in the E0 Active Galaxy Arp 102B. **Astrophysical Journal**, v. 736, p. 77, August 2011.
- [49] FATHI, K., STORCHI-BERGMANN, T., RIFFEL, R. A., WINGE, C., AXON, D. J., ROBINSON, A., CAPETTI, A., MARCONI, A. Streaming Motions toward the Supermassive Black Hole in NGC 1097. **ApJL**, v. 641, p. L25–L28, April 2006.

- [50] FERRARESE, L., FORD, H. Supermassive Black Holes in Galactic Nuclei: Past, Present and Future Research. **Space Science Reviews**, v. 116, p. 523–624, February 2005.
- [51] FERRARESE, L., MERRITT, D. A Fundamental Relation between Supermassive Black Holes and Their Host Galaxies. **ApJL**, v. 539, p. L9–L12, August 2000.
- [52] FERUGLIO, C., MAIOLINO, R., PICONCELLI, E., MENCI, N., AUSSEL, H., LAMASTRA, A., FIORE, F. Quasar feedback revealed by giant molecular outflows. **Astronomy and Astrophysics**, v. 518, p. L155, July 2010.
- [53] FILIPPENKO, A. V. New evidence for photoionization as the dominant excitation mechanism in Liners. **Astrophysical Journal**, v. 289, p. 475–489, February 1985.
- [54] FLOHIC, H. M. L. G., ERACLEOUS, M. Interpreting the Variability of Double-Peaked Emission Lines in Active Galactic Nuclei with Stochastically Perturbed Accretion Disk Models. **Astrophysical Journal**, v. 686, p. 138–147, October 2008.
- [55] FONTANA, A., D'ODORICO, S., GIALLONGO, E., CRISTIANI, S., MONNET, G., PETITJEAN, P. Star Formation at $Z = 4.7$ in the Environment of the Quasar BR 1202-07. **Astronomical Journal**, v. 115, p. 1225–1229, April 1998.
- [56] FRAGILE, P. C., MURRAY, S. D., ANNINOS, P., VAN BREUGEL, W. Radiative Shock-induced Collapse of Intergalactic Clouds. **Astrophysical Journal**, v. 604, p. 74–87, March 2004.
- [57] FRANK, J., KING, A., RAINE, D. J. **Accretion Power in Astrophysics: Third Edition:** January 2002.
- [58] GARCÍA-BURILLO, S., COMBES, F., SCHINNERER, E., BOONE, F., HUNT, L. K. Molecular gas in Nuclei of GALaxies (NUGA). IV. Gravitational torques and AGN feeding. **Astronomy and Astrophysics**, v. 441, p. 1011–1030, October 2005.
- [59] 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. A Relationship between Nuclear Black Hole Mass and Galaxy Velocity Dispersion. **ApJL**, v. 539, p. L13–L16, August 2000.
- [60] GENTRY, E. S., MARSHALL, H. L., HARDCASTLE, M. J., PERLMAN, E. S., BIRKINSHAW, M., WORRALL, D. M., LENC, E., SIEMIGINOWSKA, A., URRY, C. M.

- Optical Detection of the Pictor A Jet and Tidal Tail: Evidence against an IC/CMB jet. **Astrophysical Journal**, v. 808, p. 92, July 2015.
- [61] GIOVANNINI, G., TAYLOR, G. B., FERETTI, L., COTTON, W. D., LARA, L., VENTURI, T. The Bologna Complete Sample of Nearby Radio Sources. **Astrophysical Journal**, v. 618, p. 635–648, January 2005.
- [62] GORDON, K. D., CLAYTON, G. C., MISSELT, K. A., LANDOLT, A. U., WOLFF, M. J. A Quantitative Comparison of the Small Magellanic Cloud, Large Magellanic Cloud, and Milky Way Ultraviolet to Near-Infrared Extinction Curves. **Astrophysical Journal**, v. 594, p. 279–293, September 2003.
- [63] GREENE, J. E., HO, L. C. Measuring Stellar Velocity Dispersions in Active Galaxies. **Astrophysical Journal**, v. 641, p. 117–132, April 2006.
- [64] GROVES, B. A., DOPITA, M. A., SUTHERLAND, R. S. Dusty, Radiation Pressure-Dominated Photoionization. I. Model Description, Structure, and Grids. **APJS**, v. 153, p. 9–73, July 2004a.
- [65] GROVES, B. A., DOPITA, M. A., SUTHERLAND, R. S. Dusty, Radiation Pressure-Dominated Photoionization. II. Multiwavelength Emission Line Diagnostics for Narrow-Line Regions. **APJS**, v. 153, p. 75–91, July 2004b.
- [66] GROVES, B. A., HECKMAN, T. M., KAUFFMANN, G. Emission-line diagnostics of low-metallicity active galactic nuclei. **Monthly Notices of the Royal Astronomical Society**, v. 371, p. 1559–1569, October 2006.
- [67] HALPERN, J. P., ERACLEOUS, M. Emergence of double-peaked emission lines in the broad-line radio galaxy Pictor A. **ApJL**, v. 433, p. L17–L20, September 1994.
- [68] HARDCASTLE, M. J., LENC, E., BIRKINSHAW, M., CROSTON, J. H., GOODGER, J. L., MARSHALL, H. L., PERLMAN, E. S., SIEMIGINOWSKA, A., STAWARZ, Ł., WORRALL, D. M. Deep Chandra observations of Pictor A. **Monthly Notices of the Royal Astronomical Society**, v. 455, p. 3526–3545, February 2016.
- [69] HECKMAN, T. M., BEST, P. N. The Coevolution of Galaxies and Supermassive Black Holes: Insights from Surveys of the Contemporary Universe. **Annual Review of Astronomy and Astrophysics**, v. 52, p. 589–660, August 2014.

- [70] HECKMAN, T. M., ILLINGWORTH, G. D., MILEY, G. K., VAN BREUGEL, W. J. M. The kinematics of stars and gas in radio galaxies. **Astrophysical Journal**, v. 299, p. 41–58, December 1985.
- [71] HOLT, J., TADHUNTER, C., MORGANTI, R., BELLAMY, M., GONZÁLEZ DELGADO, R. M., TZIOUMIS, A., INSKIP, K. J. The co-evolution of the obscured quasar PKS 1549-79 and its host galaxy: evidence for a high accretion rate and warm outflow. **MNRAS**, v. 370, p. 1633–1650, August 2006.
- [72] HOLT, J., TADHUNTER, C. N., MORGANTI, R. Fast outflows in compact radio sources: evidence for AGN-induced feedback in the early stages of radio source evolution. **MNRAS**, v. 387, p. 639–659, June 2008.
- [73] HOPKINS, P. F., ELVIS, M. Quasar feedback: more bang for your buck. **MNRAS**, v. 401, p. 7–14, January 2010.
- [74] HOPKINS, P. F., HERNQUIST, L., COX, T. J., KERESŤ, D. A Cosmological Framework for the Co-Evolution of Quasars, Supermassive Black Holes, and Elliptical Galaxies. I. Galaxy Mergers and Quasar Activity. **ApJS**, v. 175, p. 356–389, April 2008.
- [75] INSKIP, K. J., TADHUNTER, C. N., MORGANTI, R., HOLT, J., RAMOS ALMEIDA, C., DICKEN, D. A near-IR study of the host galaxies of 2 Jy radio sources at $0.03 < z < 0.5$ - I. The data. **MNRAS**, v. 407, p. 1739–1766, September 2010.
- [76] IONO, D., YUN, M. S., ELVIS, M., PECK, A. B., HO, P. T. P., WILNER, D. J., HUNTER, T. R., MATSUSHITA, S., MULLER, S. A Detection of [C II] Line Emission in the $z = 4.7$ QSO BR 1202-0725. **ApJL**, v. 645, p. L97–L100, July 2006.
- [77] JAMROZY, M., KONAR, C., SAIKIA, D. J., STAWARZ, Ł., MACK, K.-H., SIEMIGI-
NOWSKA, A. Intermittent jet activity in the radio galaxy 4C29.30? **Monthly Notices of the Royal Astronomical Society**, v. 378, p. 581–593, June 2007.
- [78] KAUFFMANN, G., HECKMAN, T. M., TREMONTI, C., BRINCHMANN, J., CHARLOT, S., WHITE, S. D. M., RIDGWAY, S. E., BRINKMANN, J., FUKUGITA, M., HALL, P. B., IVEZIĆ, Ž., RICHARDS, G. T., SCHNEIDER, D. P. The host galaxies of active galactic nuclei. **MNRAS**, v. 346, p. 1055–1077, December 2003.
- [79] KELLERMANN, K. I., SRAMEK, R., SCHMIDT, M., SHAFFER, D. B., GREEN, R. VLA observations of objects in the Palomar Bright Quasar Survey. **Astronomical Journal**, v. 98, p. 1195–1207, October 1989.

- [80] KENNICUTT, R. C., JR. Star Formation in Galaxies Along the Hubble Sequence. **Annual Review of Astronomy and Astrophysics**, v. 36, p. 189–232, 1998.
- [81] KEWLEY, L. J., DOPITA, M. A., LEITHERER, C., DAVÉ, R., YUAN, T., ALLEN, M., GROVES, B., SUTHERLAND, R. Theoretical Evolution of Optical Strong Lines across Cosmic Time. **Astrophysical Journal**, v. 774, p. 100, September 2013.
- [82] KEWLEY, L. J., DOPITA, M. A., SUTHERLAND, R. S., HEISLER, C. A., TREVENA, J. Theoretical Modeling of Starburst Galaxies. **Astrophysical Journal**, v. 556, p. 121–140, July 2001.
- [83] KEWLEY, L. J., GROVES, B., KAUFFMANN, G., HECKMAN, T. The host galaxies and classification of active galactic nuclei. **MNRAS**, v. 372, p. 961–976, November 2006.
- [84] KHARB, P., LISTER, M. L., COOPER, N. J. Extended Radio Emission in MOJAVE Blazars: Challenges to Unification. **Astrophysical Journal**, v. 710, p. 764–782, February 2010.
- [85] KHARB, P., O’DEA, C. P., BAUM, S. A., COLBERT, E. J. M., XU, C. A Radio Study of the Seyfert Galaxy Markarian 6: Implications for Seyfert Life Cycles. **Astrophysical Journal**, v. 652, p. 177–188, November 2006.
- [86] KORMENDY, J., HO, L. C. Coevolution (Or Not) of Supermassive Black Holes and Host Galaxies. **Annual Review of Astronomy and Astrophysics**, v. 51, p. 511–653, August 2013.
- [87] KORMENDY, J., KENNICUTT, R. C., JR. Secular Evolution and the Formation of Pseudobulges in Disk Galaxies. **Annual Review of Astronomy and Astrophysics**, v. 42, p. 603–683, September 2004.
- [88] KROUPA, P. On the variation of the initial mass function. **Monthly Notices of the Royal Astronomical Society**, v. 322, p. 231–246, April 2001.
- [89] LAUBERTS, A. **ESO/Uppsala survey of the ESO(B) atlas**: 1982.
- [90] LAUBERTS, A., VALENTIJN, E. A. **The surface photometry catalogue of the ESO-Uppsala galaxies**: 1989.
- [91] LEAHY, J. P., PERLEY, R. A. VLA images of 23 extragalactic radio sources. **AJ**, v. 102, p. 537–561, August 1991.
- [92] LENA, D., ROBINSON, A., STORCHI-BERGMAN, T., SCHNORR-MÜLLER, A., SEELIG, T., RIFFEL, R. A., NAGAR, N. M., COUTO, G. S., SHADLER, L. The Complex

- Gas Kinematics in the Nucleus of the Seyfert 2 Galaxy NGC 1386: Rotation, Outflows, and Inflows. **Astrophysical Journal**, v. 806, p. 84, June 2015.
- [93] LENA, D., ROBINSON, A., STORCHI-BERGMANN, T., COUTO, G. S., SCHNORR-MÜLLER, A., RIFFEL, R. A. Ionized gas kinematics within the inner kiloparsec of the Seyfert galaxy NGC 1365. **Monthly Notices of the Royal Astronomical Society**, v. 459, p. 4485–4498, July 2016.
- [94] LEWIS, K. T., ERACLEOUS, M., STORCHI-BERGMANN, T. Long-term Profile Variability in Active Galactic Nucleus with Double-peaked Balmer Emission Lines. **APJS**, v. 187, p. 416–446, April 2010.
- [95] LI, Y., HERNQUIST, L., ROBERTSON, B., COX, T. J., HOPKINS, P. F., SPRINGEL, V., GAO, L., DI MATTEO, T., ZENTNER, A. R., JENKINS, A., YOSHIDA, N. Formation of $z \sim 6$ Quasars from Hierarchical Galaxy Mergers. **ApJ**, v. 665, p. 187–208, August 2007.
- [96] LOVEDAY, J. The APM Bright Galaxy Catalogue. **MNRAS**, v. 278, p. 1025–1048, February 1996.
- [97] LUCY, L. B. An iterative technique for the rectification of observed distributions. **AJ**, v. 79, p. 745, June 1974.
- [98] MACIEJEWSKI, W. Nuclear spirals in galaxies: gas response to an asymmetric potential - II. Hydrodynamical models. **MNRAS**, v. 354, p. 892–904, November 2004.
- [99] MADAU, P., DICKINSON, M. Cosmic Star-Formation History. **Annual Review of Astronomy and Astrophysics**, v. 52, p. 415–486, August 2014.
- [100] MALIN, D. F., CARTER, D. A catalog of elliptical galaxies with shells. **Astrophysical Journal**, v. 274, p. 534–540, November 1983.
- [101] MARSHALL, H. L., HARDCASTLE, M. J., BIRKINSHAW, M., CROSTON, J., EVANS, D., LANDT, H., LENC, E., MASSARO, F., PERLMAN, E. S., SCHWARTZ, D. A., SIEMIGINOWSKA, A., STAWARZ, Ł., URRY, C. M., WORRALL, D. M. A Flare in the Jet of Pictor A. **ApJL**, v. 714, p. L213–L216, May 2010.
- [102] MARTINI, P., POGGE, R. W. Hubble Space Telescope Observations of the CFA Seyfert 2 Galaxies: The Fueling of Active Galactic Nuclei. **AJ**, v. 118, p. 2646–2657, December 1999.

- [103] MARTINI, P., REGAN, M. W., MULCHAEY, J. S., POGGE, R. W. Circumnuclear Dust in Nearby Active and Inactive Galaxies. II. Bars, Nuclear Spirals, and the Fueling of Active Galactic Nuclei. **Astrophysical Journal**, v. 589, p. 774–782, June 2003.
- [104] MCCONNELL, N. J., MA, C.-P., GEBHARDT, K., WRIGHT, S. A., MURPHY, J. D., LAUER, T. R., GRAHAM, J. R., RICHESTONE, D. O. Two ten-billion-solar-mass black holes at the centres of giant elliptical galaxies. **Nature**, v. 480, p. 215–218, December 2011.
- [105] MCKINNEY, J. C. General relativistic force-free electrodynamics: a new code and applications to black hole magnetospheres. **MNRAS**, v. 367, p. 1797–1807, April 2006.
- [106] MCNAMARA, B. R., NULSEN, P. E. J. Heating Hot Atmospheres with Active Galactic Nuclei. **Annual Review of Astronomy and Astrophysics**, v. 45, p. 117–175, September 2007.
- [107] MENÉNDEZ-DELMESTRE, K., BLAIN, A. W., SWINBANK, M., SMAIL, I., IVISON, R. J., CHAPMAN, S. C., GONÇALVES, T. S. Mapping the Clumpy Structures within Submillimeter Galaxies Using Laser-Guide Star Adaptive Optics Spectroscopy. **Astrophysical Journal**, v. 767, p. 151, April 2013.
- [108] MENEZES, R. B., STEINER, J. E., RICCI, T. V. A treatment procedure for Gemini North/NIFS data cubes: application to NGC 4151. **MNRAS**, v. 438, p. 2597–2620, March 2014.
- [109] MOR, R., NETZER, H., TRAKHTENBROT, B., SHEMMER, O., LIRA, P. Extreme Star Formation in the Host Galaxies of the Fastest Growing Supermassive Black Holes at $z = 4.8$. **Astrophysical Journal Letters**, v. 749, p. L25, April 2012.
- [110] MORGAN, C. W., KOCHANÉK, C. S., MORGAN, N. D., FALCO, E. E. The Quasar Accretion Disk Size-Black Hole Mass Relation. **Astrophysical Journal**, v. 712, p. 1129–1136, April 2010.
- [111] MORGANTI, R., FOGASY, J., PARAGI, Z., OOSTERLOO, T., ORIENTI, M. Radio Jets Clearing the Way Through a Galaxy: Watching Feedback in Action. **Science**, v. 341, p. 1082–1085, September 2013.
- [112] MÜLLER SÁNCHEZ, F., DAVIES, R. I., GENZEL, R., TACCONI, L. J., EISENHAUER, F., HICKS, E. K. S., FRIEDRICH, S., STERNBERG, A. Molecular Gas Streamers Feeding and Obscuring the Active Nucleus of NGC 1068. **Astrophysical Journal**, v. 691, p. 749–759, January 2009.

- [113] NESVADBA, N. P. H., LEHNERT, M. D., GENZEL, R., EISENHAUER, F., BAKER, A. J., SEITZ, S., DAVIES, R., LUTZ, D., TACCONI, L., TECZA, M., BENDER, R., ABUTER, R. Intense Star Formation and Feedback at High Redshift: Spatially Resolved Properties of the $z = 2.6$ Submillimeter Galaxy SMM J14011+0252. **Astrophysical Journal**, v. 657, p. 725–737, March 2007.
- [114] NESVADBA, N. P. H., NERI, R., DE BREUCK, C., LEHNERT, M. D., DOWNES, D., WALTER, F., OMONT, A., BOULANGER, F., SEYMOUR, N. CO line emission in the halo of a radio galaxy at $z = 2.6$. **MNRAS**, v. 395, p. L16–L20, May 2009.
- [115] NETZER, H., MOR, R., TRAKHTENBROT, B., SHEMMER, O., LIRA, P. Star Formation and Black Hole Growth at $z \sim 4.8$. **ApJ**, v. 791, p. 34, August 2014.
- [116] NEWMAN, J. A., ERACLEOUS, M., FILIPPENKO, A. V., HALPERN, J. P. Measurement of an Active Galactic Nucleus Central Mass on Centiparsec Scales: Results of Long-Term Optical Monitoring of Arp 102B. **Astrophysical Journal**, v. 485, p. 570–580, August 1997.
- [117] NOEL-STORR, J., BAUM, S. A., O’DEA, C. P. Emission-Line Gas Kinematics in the Vicinity of the Supermassive Black Holes in Nearby Radio Galaxies. **Astrophysical Journal**, v. 663, p. 71–80, July 2007.
- [118] O’DEA, C. P., BAUM, S. A., TREMBLAY, G. R., KHARB, P., COTTON, W., PERLEY, R. Hubble Space Telescope Observations of Dusty Filaments in Hercules A: Evidence for Entrainment. **Astrophysical Journal**, v. 771, p. 38, July 2013.
- [119] OHTA, K., MATSUMOTO, T., MAIHARA, T., IWAMURO, F., TERADA, H., GOTO, M., MOTOHARA, K., TAGUCHI, T., HATA, R., YOSHIDA, M., IYE, M., SIMPSON, C., TAKATA, T. [O {II}] $\lambda 3727$ Emission from the Companion to the Quasar BR 1202-0725 at $z=4.7$. **Publications of the Astronomical Society of Japan**, v. 52, p. 557–562, August 2000.
- [120] OHYAMA, Y., TANIGUCHI, Y., SHIOYA, Y. Subaru Deep Spectroscopy of a Star-forming Companion Galaxy of BR 1202-0725 at $z=4.7$. **Astronomical Journal**, v. 128, p. 2704–2711, December 2004.
- [121] OMONT, A., PETITJEAN, P., GUILLOTEAU, S., MCMAHON, R. G., SOLOMON, P. M., PÉCONTAL, E. Molecular gas and dust around a radio-quiet quasar at redshift 4.69. **Nature**, v. 382, p. 428–431, August 1996.

- [122] OOSTERLOO, T. A., MORGANTI, R. Anomalous HI kinematics in Centaurus A: Evidence for jet-induced star formation. **Astronomy and Astrophysics**, v. 429, p. 469–475, January 2005.
- [123] OSTERBROCK, D. E., FERLAND, G. J. **Astrophysics of gaseous nebulae and active galactic nuclei**: 2006.
- [124] PERLEY, R. A., ROSER, H.-J., MEISENHEIMER, K. The radio galaxy PictorA – a study with the VLA. **Astronomy and Astrophysics**, v. 328, p. 12–32, December 1997.
- [125] PETERSON, B. M. **An Introduction to Active Galactic Nuclei**: February 1997.
- [126] PETERSON, B. M., FERRARESE, L., GILBERT, K. M., KASPI, S., MALKAN, M. A., MAOZ, D., MERRITT, D., NETZER, H., ONKEN, C. A., POGGE, R. W., VESTERGAARD, M., WANDEL, A. Central Masses and Broad-Line Region Sizes of Active Galactic Nuclei. II. A Homogeneous Analysis of a Large Reverberation-Mapping Database. **Astrophysical Journal**, v. 613, p. 682–699, October 2004.
- [127] PIQUERAS LÓPEZ, J., COLINA, L., ARRIBAS, S., ALONSO-HERRERO, A. VLT-SINFONI integral field spectroscopy of low-*z* luminous and ultraluminous infrared galaxies. II. 2D extinction structure and distance effects. **Astronomy and Astrophysics**, v. 553, p. A85, May 2013.
- [128] POGGE, R. W., MARTINI, P. Hubble Space Telescope Imaging of the Circumnuclear Environments of the CfA Seyfert Galaxies: Nuclear Spirals and Fueling. **Astrophysical Journal**, v. 569, p. 624–640, April 2002.
- [129] PRIETO, M. A., VIEGAS, S. M. On the Ionizing Continuum in Active Galactic Nuclei: Clues from the Infrared Space Observatory. **Astrophysical Journal**, v. 532, p. 238–246, March 2000.
- [130] PROGA, D. Theory of Winds in AGNs. In: THE CENTRAL ENGINE OF ACTIVE GALACTIC NUCLEI, Ho, L. C., Wang, J.-W., editores, v. 373 of **Astronomical Society of the Pacific Conference Series**, p. 267, October 2007.
- [131] PUSCHELL, J. J., MOORE, R., COHEN, R. D., OWEN, F. N., PHILLIPS, A. C. Observations of the low-luminosity broad-line radio galaxy 1717 + 49. **AJ**, v. 91, p. 751–754, April 1986.

- [132] RAIMANN, D., STORCHI-BERGMANN, T., QUINTANA, H., HUNSTEAD, R., WISOTZKI, L. Stellar populations in a complete sample of local radio galaxies. **MNRAS**, v. 364, p. 1239–1252, December 2005.
- [133] RAMOS ALMEIDA, C., TADHUNTER, C. N., INSKIP, K. J., MORGANTI, R., HOLT, J., DICKEN, D. The optical morphologies of the 2 Jy sample of radio galaxies: evidence for galaxy interactions. **MNRAS**, v. 410, p. 1550–1576, January 2011.
- [134] REYNALDI, V., FEINSTEIN, C. Shock ionization in the extended emission-line region of 3C 305: the last piece of the (optical) puzzle. **MNRAS**, v. 435, p. 1350–1357, October 2013.
- [135] REYNOLDS, C. S., HEINZ, S., BEGELMAN, M. C. The hydrodynamics of dead radio galaxies. **MNRAS**, v. 332, p. 271–282, May 2002.
- [136] RICCI, T. V., STEINER, J. E., MENEZES, R. B. NGC 7097: The Active Galactic Nucleus and its Mirror, Revealed by Principal Component Analysis Tomography. **ApJL**, v. 734, p. L10, June 2011.
- [137] RICHARDSON, W. H. Bayesian-Based Iterative Method of Image Restoration. **Journal of the Optical Society of America (1917-1983)**, v. 62, p. 55, January 1972.
- [138] RIFFEL, R. A. profit: a new alternative for emission-line profile fitting. **Astrophysics and Space Science**, v. 327, p. 239–244, June 2010.
- [139] RIFFEL, R. A., STORCHI-BERGMANN, T. Feeding and feedback in the active nucleus of Mrk 1157 probed with the Gemini Near-Infrared Integral-Field Spectrograph. **MNRAS**, v. 417, p. 2752–2769, November 2011.
- [140] RIFFEL, R. A., STORCHI-BERGMANN, T., WINGE, C. Feeding versus feedback in AGNs from near-infrared IFU observations: the case of Mrk 79. **MNRAS**, v. 430, p. 2249–2261, April 2013.
- [141] RIFFEL, R. A., STORCHI-BERGMANN, T., WINGE, C., MCGREGOR, P. J., BECK, T., SCHMITT, H. Mapping of molecular gas inflow towards the Seyfert nucleus of NGC4051 using Gemini NIFS. **MNRAS**, v. 385, p. 1129–1142, April 2008.
- [142] ROCHE, N., HUMPHREY, A., LAGOS, P., PAPADEROS, P., SILVA, M., CARDOSO, L. S. M., GOMES, J. M. MUSE three-dimensional spectroscopy and kinematics of the

- gigahertz peaked spectrum radio galaxy PKS 1934-63: interaction, recently triggered active galactic nucleus and star formation. **Monthly Notices of the Royal Astronomical Society**, v. 459, p. 4259–4280, July 2016.
- [143] ROSARIO, D. J., SHIELDS, G. A., TAYLOR, G. B., SALVIANDER, S., SMITH, K. L. The Jet-driven Outflow in the Radio Galaxy SDSS J1517+3353: Implications for Double-peaked Narrow-line Active Galactic Nucleus. **Astrophysical Journal**, v. 716, p. 131–143, June 2010.
- [144] RUNNOE, J. C., BROTHERTON, M. S., SHANG, Z. Updating quasar bolometric luminosity corrections. **Monthly Notices of the Royal Astronomical Society**, v. 422, p. 478–493, May 2012.
- [145] SALOMÉ, P., GUÉLIN, M., DOWNES, D., COX, P., GUILLOTEAU, S., OMONT, A., GAVAZZI, R., NERI, R. BR1202-0725: an extreme multiple merger at $z = 4.7$. **Astronomy and Astrophysics**, v. 545, p. A57, September 2012.
- [146] SANDERS, D. B., SOIFER, B. T., ELIAS, J. H., NEUGEBAUER, G., MATTHEWS, K. Warm ultraluminous galaxies in the IRAS survey - The transition from galaxy to quasar? **ApJL**, v. 328, p. L35–L39, May 1988.
- [147] SANTORO, F., OONK, J. B. R., MORGANTI, R., OOSTERLOO, T. The jet-ISM interaction in the outer filament of Centaurus A. **Astronomy and Astrophysics**, v. 574, p. A89, February 2015.
- [148] SAZONOV, S. Y., OSTRIKER, J. P., SUNYAEV, R. A. Quasars: the characteristic spectrum and the induced radiative heating. **MNRAS**, v. 347, p. 144–156, January 2004.
- [149] SCHINNERER, E., CARILLI, C. L., CAPAK, P., MARTINEZ-SANSIGRE, A., SCOVILLE, N. Z., SMOLČIĆ, V., TANIGUCHI, Y., YUN, M. S., BERTOLDI, F., LE FEVRE, O., DE RAVEL, L. Molecular Gas in a Submillimeter Galaxy at $z = 4.5$: Evidence for a Major Merger at 1 Billion Years after the Big Bang. **Astrophysical Journal Letters**, v. 689, p. L5–L8, December 2008.
- [150] SCHMIDT, M. The Rate of Star Formation. **Astrophysical Journal**, v. 129, p. 243, March 1959.
- [151] SCHNORR-MÜLLER, A., STORCHI-BERGMANN, T., NAGAR, N. M., ROBINSON, A., LENA, D., RIFFEL, R. A., COUTO, G. S. Feeding and feedback in the inner kiloparsec of the active galaxy NGC 2110. **MNRAS**, v. 437, p. 1708–1724, January 2014.

- [152] SCHNORR MÜLLER, A., STORCHI-BERGMANN, T., RIFFEL, R. A., FERRARI, F., STEINER, J. E., AXON, D. J., ROBINSON, A. Gas streaming motions towards the nucleus of M81. *MNRAS*, v. 413, p. 149–161, May 2011.
- [153] SCHNORR-MÜLLER, A., STORCHI-BERGMANN, T., ROBINSON, A., LENA, D., NAGAR, N. M. Feeding and feedback in NGC 3081. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, v. 457, p. 972–985, March 2016.
- [154] SHAW, R. A., DUFOUR, R. J. The FIVEL Nebular Modelling Package in STSDAS. In: *ASTRONOMICAL DATA ANALYSIS SOFTWARE AND SYSTEMS III*, Crabtree, D. R., Hanisch, R. J., Barnes, J., editores, v. 61 of *Astronomical Society of the Pacific Conference Series*, p. 327, 1994.
- [155] SIEMIGINOWSKA, A., STAWARZ, Ł., CHEUNG, C. C., ALDCROFT, T. L., BECHTOLD, J., BURKE, D. J., EVANS, D., HOLT, J., JAMROZY, M., MIGLIORI, G. Deep Chandra X-Ray Imaging of a nearby Radio Galaxy 4C+29.30: X-Ray/Radio Connection. *Astrophysical Journal*, v. 750, p. 124, May 2012.
- [156] SIKORA, M., STAWARZ, Ł., LASOTA, J.-P. Radio Loudness of Active Galactic Nuclei: Observational Facts and Theoretical Implications. *Astrophysical Journal*, v. 658, p. 815–828, April 2007.
- [157] SILVERMAN, J. D., GREEN, P. J., BARKHOUSE, W. A., KIM, D.-W., KIM, M., WILKES, B. J., CAMERON, R. A., HASINGER, G., JANNUZI, B. T., SMITH, M. G., SMITH, P. S., TANANBAUM, H. The Luminosity Function of X-Ray-selected Active Galactic Nuclei: Evolution of Supermassive Black Holes at High Redshift. *Astrophysical Journal*, v. 679, p. 118–139, May 2008.
- [158] SIMÕES LOPES, R. D., STORCHI-BERGMANN, T., DE FÁTIMA SARAIVA, M., MARTINI, P. A Strong Correlation between Circumnuclear Dust and Black Hole Accretion in Early-Type Galaxies. *Astrophysical Journal*, v. 655, p. 718–734, February 2007.
- [159] SIMKIN, S. M. The rotation axes of 3C 33, 3C 98, 3C 184.1, and 3C 218. *Astrophysical Journal*, v. 234, p. 56–67, November 1979.
- [160] SIMKIN, S. M., SADLER, E. M., SAULT, R., TINGAY, S. J., CALLCUT, J. Pictor A (PKS 0518-45): From Nucleus to Lobes. *APJS*, v. 123, p. 447–465, August 1999.
- [161] STASIŃSKA, G., VALE ASARI, N., CID FERNANDES, R., GOMES, J. M., SCHLICKMANN, M., MATEUS, A., SCHOENELL, W., SODRÉ, L., JR., SEAGAL COLLABORATION, . Can retired galaxies mimic active galaxies? Clues from the Sloan Digital

- Sky Survey. **Monthly Notices of the Royal Astronomical Society**, v. 391, p. L29–L33, November 2008.
- [162] STAUFFER, J., SCHILD, R., KEEL, W. ARP 102B - A new and unusual broad-line galaxy. **Astrophysical Journal**, v. 270, p. 465–470, July 1983.
- [163] STEINER, J. E., MENEZES, R. B., RICCI, T. V., OLIVEIRA, A. S. PCA Tomography: how to extract information from data cubes. **MNRAS**, v. 395, p. 64–75, May 2009.
- [164] STORCHI-BERGMANN, T. The co-evolution of galaxies and supermassive black holes in the near Universe. **ArXiv e-prints**, March 2014.
- [165] STORCHI-BERGMANN, T., BALDWIN, J. A., WILSON, A. S. Double-peaked broad line emission from the LINER nucleus of NGC 1097. **ApJL**, v. 410, p. L11–L14, June 1993.
- [166] STORCHI-BERGMANN, T., DORS, O. L., JR., RIFFEL, R. A., FATHI, K., AXON, D. J., ROBINSON, A., MARCONI, A., ÖSTLIN, G. Nuclear Spirals as Feeding Channels to the Supermassive Black Hole: The Case of the Galaxy NGC 6951. **Astrophysical Journal**, v. 670, p. 959–967, December 2007.
- [167] STORCHI-BERGMANN, T., LOPES, R. D. S., MCGREGOR, P. J., RIFFEL, R. A., BECK, T., MARTINI, P. Feeding versus feedback in NGC4151 probed with Gemini NIFS - II. Kinematics. **MNRAS**, v. 402, p. 819–835, February 2010.
- [168] STORCHI-BERGMANN, T., NEMMEN DA SILVA, R., ERACLEOUS, M., HALPERN, J. P., WILSON, A. S., FILIPPENKO, A. V., RUIZ, M. T., SMITH, R. C., NAGAR, N. M. Evolution of the Nuclear Accretion Disk Emission in NGC 1097: Getting Closer to the Black Hole. **Astrophysical Journal**, v. 598, p. 956–968, December 2003.
- [169] STORCHI BERGMANN, T., PASTORIZA, M. G. On the metal abundance of low-activity galactic nuclei. **Astrophysical Journal**, v. 347, p. 195–200, December 1989.
- [170] STORCHI-BERGMANN, T., SCHMITT, H. R., CALZETTI, D., KINNEY, A. L. Chemical Abundance Calibrations for the Narrow-Line Region of Active Galaxies. **Astronomical Journal**, v. 115, p. 909–914, March 1998.
- [171] SU, M., FINKBEINER, D. P. Evidence for Gamma-Ray Jets in the Milky Way. **Astrophysical Journal**, v. 753, p. 61, July 2012.
- [172] SWINBANK, A. M., WEBB, T. M., RICHARD, J., BOWER, R. G., ELLIS, R. S., ILLINGWORTH, G., JONES, T., KRIEK, M., SMAIL, I., STARK, D. P., VAN DOKKUM,

- P. A spatially resolved map of the kinematics, star formation and stellar mass assembly in a star-forming galaxy at $z = 4.9$. **Monthly Notices of the Royal Astronomical Society**, v. 400, p. 1121–1131, December 2009.
- [173] TADHUNTER, C., DICKEN, D., MORGANTI, R., KONYVES, V., YSARD, N., NESVADBA, N., RAMOS ALMEIDA, C. The dust masses of powerful radio galaxies: clues to the triggering of their activity. **Monthly Notices of the Royal Astronomical Society**, v. 445, p. L51–L55, November 2014.
- [174] TINGAY, S. J., JAUNCEY, D. L., REYNOLDS, J. E., TZIOUMIS, A. K., MCCULLOCH, P. M., ELLINGSEN, S. P., COSTA, M. E., LOVELL, J. E. J., PRESTON, R. A., SIMKIN, S. M. The Parsec-Scale Structure and Evolution of the Nearby Fanaroff-Riley Type II Radio Galaxy Pictor A. **AJ**, v. 119, p. 1695–1700, April 2000.
- [175] TINGAY, S. J., LENC, E., BRUNETTI, G., BONDI, M. A High Resolution View of the Jet Termination Shock in a Hot Spot of the Nearby Radio Galaxy Pictor A: Implications for X-Ray Models of Radio Galaxy Hot Spots. **AJ**, v. 136, p. 2473–2482, December 2008.
- [176] TREMBLAY, G. R., CHIABERGE, M., SPARKS, W. B., BAUM, S. A., ALLEN, M. G., AXON, D. J., CAPETTI, A., FLOYD, D. J. E., MACCHETTO, F. D., MILEY, G. K., NOEL-STORR, J., O’DEA, C. P., PERLMAN, E. S., QUILLEN, A. C. HST/ACS Emission Line Imaging of Low-redshift 3CR Radio Galaxies. I. The Data. **APJS**, v. 183, p. 278–294, August 2009.
- [177] TREMONTI, C. A., HECKMAN, T. M., KAUFFMANN, G., BRINCHMANN, J., CHARLOT, S., WHITE, S. D. M., SEIBERT, M., PENG, E. W., SCHLEGEL, D. J., UOMOTO, A., FUKUGITA, M., BRINKMANN, J. The Origin of the Mass-Metallicity Relation: Insights from 53,000 Star-forming Galaxies in the Sloan Digital Sky Survey. **Astrophysical Journal**, v. 613, p. 898–913, October 2004.
- [178] TRISTRAM, K. R. W., SCHATMANN, M. On the size-luminosity relation of AGN dust tori in the mid-infrared. **Astronomy and Astrophysics**, v. 531, p. A99, July 2011.
- [179] URRY, C. M., PADOVANI, P. Unified Schemes for Radio-Loud Active Galactic Nuclei. **Publications of the Astronomical Society of the Pacific**, v. 107, p. 803, September 1995.
- [180] VAN BREUGEL, W. J. M., HECKMAN, T. M., MILEY, G. K., FILIPPENKO, A. V. 4C 29.30 - Extended optical line and radio emission in a probable galaxy merger. **Astrophysical Journal**, v. 311, p. 58–84, December 1986.

- [181] VAN DER KRUIT, P. C., ALLEN, R. J. The kinematics of spiral and irregular galaxies. **Annual Review of Astronomy and Astrophysics**, v. 16, p. 103–139, 1978.
- [182] VERDOES KLEIJN, G. A., DE ZEEUW, P. T. A dichotomy in the orientation of dust and radio jets in nearby low-power radio galaxies. **Astronomy and Astrophysics**, v. 435, p. 43–64, May 2005.
- [183] VIEIRA, J. D., MARRONE, D. P., CHAPMAN, S. C., DE BREUCK, C., HEZAVEH, Y. D., ET AL., . Dusty starburst galaxies in the early Universe as revealed by gravitational lensing. **Nature**, v. 495, p. 344–347, March 2013.
- [184] VILLAR-MARTIN, M., TADHUNTER, C., MORGANTI, R., CLARK, N., KILLEEN, N., AXON, D. PKS 1932-464: a jet-cloud interaction in a radio galaxy? **Astronomy and Astrophysics**, v. 332, p. 479–492, April 1998.
- [185] WAGG, J., WIKLIND, T., CARILLI, C. L., ESPADA, D., PECK, A., RIECHERS, D., ET AL., . [C II] Line Emission in Massive Star-forming Galaxies at $z = 4.7$. **Astrophysical Journal Letters**, v. 752, p. L30, June 2012.
- [186] WAGNER, A. Y., BICKNELL, G. V. Relativistic Jet Feedback in Evolving Galaxies. **Astrophysical Journal**, v. 728, p. 29, February 2011.
- [187] WILLIAMS, R. J., WAGG, J., MAIOLINO, R., FOSTER, C., ARAVENA, M., WIKLIND, T., CARILLI, C. L., MCMAHON, R. G., RIECHERS, D., WALTER, F. Constraining the nature of two Ly α emitters detected by ALMA at $z = 4.7$. **Monthly Notices of the Royal Astronomical Society**, v. 439, p. 2096–2101, April 2014.
- [188] WILSON, A. S., YOUNG, A. J., SHOPBELL, P. L. Chandra X-Ray Observations of Pictor A: High-Energy Cosmic Rays in a Radio Galaxy. **Astrophysical Journal**, v. 547, p. 740–753, February 2001.
- [189] WUYTS, S., COX, T. J., HAYWARD, C. C., FRANX, M., HERNQUIST, L., HOPKINS, P. F., JONSSON, P., VAN DOKKUM, P. G. On Sizes, Kinematics, M/L Gradients, and Light Profiles of Massive Compact Galaxies at $z \sim 2$. **Astrophysical Journal**, v. 722, p. 1666–1684, October 2010.
- [190] ZIER, C., BIERMANN, P. L. Binary black holes and tori in AGN. II. Can stellar winds constitute a dusty torus? **Astronomy and Astrophysics**, v. 396, p. 91–108, December 2002.