

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

Suzi Izaquiel Ferreira Diniz

Investigando a natureza LINER da
galáxia elíptica NGC 5044

Porto Alegre

2017

Suzi Izaquiel Ferreira Diniz

**Investigando a natureza LINER da
galáxia elíptica NGC 5044 ***

Tese apresentada ao Programa de Pós Graduação do Instituto de Física, da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como exigência parcial para a obtenção do Título de Doutora em Ciências.

Área de Concentração: Astrofísica

Orientadora: Prof.^a Dr.^a Miriani G. Pastoriza

Co-orientador: Prof. Dr. Rogério Riffel

Porto Alegre

2017

* Trabalho financiado pelo CNPq

Agradecimentos

À Miriani Pastoriza, pela orientação, apoio e insistência. Sem dúvida, ela foi a peça fundamental para que este trabalho fosse concluído.

Ao Rógerio Riffel, pela orientação e contribuição ao trabalho.

Ao colega José Andres, por toda a contribuição e paciência, e à Paola pela amizade e companhia.

À minha família, pelo apoio e confiança.

Ao Samuel, por ter permanecido próximo e ter me ajudado a superar esses anos longe de casa.

Ao Galileo, meu anjo da guarda que me trouxe apenas felicidades e me manteve sã.

Resumo

No presente trabalho fizemos uso do espectrógrafo multi-objeto do Gemini (GMOS) no modo de unidade de campo integral para mapear a população estelar, a distribuição do fluxo das linhas de emissão e a cinemática do gás no kpc mais interno da galáxia NGC 5044. A partir da síntese de população estelar encontramos que a emissão do contínuo é dominada por estrelas velhas de alta metalicidade (13 Gyr, $2,5 Z_{\odot}$). Também encontramos que a emissão nuclear dessa galáxia é diluída por uma emissão não térmica, a qual atribuímos à presença de um núcleo ativo galáctico (AGN) fraco. Além disso, registramos pela primeira vez uma componente alargada (FWHM 3000 km s^{-1}) na emissão da linha de $H\alpha$ na região nuclear de NGC 5044. Por meio de diagramas de diagnóstico de razões de linhas de emissão encontramos que coexistem dois processos de ionização dominantes, enquanto a região nuclear (200 pc mais internos) é ionizada por um AGN de baixa luminosidade, as estruturas filamentosas são consistentes com excitação por choques. O campo de velocidade de $H\alpha$ mostra evidências de um disco em rotação, o qual tem uma amplitude de velocidade de 240 km s^{-1} a 136 pc do núcleo. Assumindo uma aproximação Keplariana estimamos que a massa dentro desse raio é $1,9 \pm 0,9 \times 10^9 M_{\odot}$, o qual está de acordo com o valor obtido utilizando a relação $M-\sigma$, $M_{SMBH} = 1,8 \pm 1,6 \times 10^9 M_{\odot}$. Modelando o campo de velocidade do gás ionizado por uma componente de disco em rotação mais *inflows* em direção ao núcleo ao longo das estruturas filamentosas, obtivemos uma taxa de massa de *inflow* de $0,4 M_{\odot}$. Essa taxa de *inflow* é suficiente para acionar o AGN central na NGC 5044.

Abstract

We used Gemini Multi-Object Spectrograph (GMOS) in the Integral Field Unit mode to map the stellar population, emission line flux distributions and gas kinematics in the inner kpc of NGC 5044. From the stellar populations synthesis we found that the continuum emission is dominated by old high metallicity stars (13 Gyr, $2.5 Z_{\odot}$). Also, its nuclear emission is diluted by a non thermal emission, which we attribute to the presence of a weak active galactic nuclei (AGN). In addition, we report for the first time a broad component (FWHM 3000 km s^{-1}) in the $\text{H}\alpha$ emission line in the nuclear region of NGC 5044. By using emission line ratio diagnostic diagrams we found that two dominant ionization processes coexist, while the nuclear region (inner 200 pc) is ionized by a low luminosity AGN, being the filamentary structures consistent with excited by shocks. The $\text{H}\alpha$ velocity field shows evidence of a rotating disk, which has a velocity amplitude of 240 km s^{-1} at 136 pc from the nucleus. Assuming a Keplerian approach we estimated that the mass inside this radius is $1.9 \pm 0.9 \times 10^9 M_{\odot}$, which is in agreement with the value obtained through the M- σ relation, $M_{SMBH} = 1.8 \pm 1.6 \times 10^9 M_{\odot}$. Modelling the ionized gas velocity field by a rotating disk component plus inflows towards the nucleus along filamentary structures, we obtain a mass inflow rate of $0.4 M_{\odot}$. This inflow rate is enough to power the central AGN in NGC 5044.

Conteúdo

Conteúdo	IV
Lista de Figuras	VI
Lista de Tabelas	1
1 Introdução	2
1.1 Núcleos ativos de galáxias	2
1.2 LINERs	
<i>Low Ionization Nuclear Emission-line Regions</i>	6
1.3 Características do Espectro dos LINERs	9
1.4 Galáxias elípticas e ISM	12
1.5 Objetivos	14
2 Sobre NGC 5044	15
2.1 NGC 5044: Revisão da literatura	15
2.2 NGC 5044: Observações e redução de dados	21
2.2.1 Observações	21
2.2.2 Redução de dados	24
3 População Estelar	31
3.1 Metodologia	31
3.1.1 O código STARLIGHT	32
3.2 Resultados e Discussões	34
4 Cinemática do gás ionizado	40
5 Distribuição do gás ionizado e os mecanismos de ionização	47

CONTEÚDO	V
6 Modelagem cinemática do gás ionizado	53
6.1 Modelo de campo de velocidade.	53
6.2 Evidência de <i>inflow</i> de gás em NGC 5044	57
7 Conclusões e perspectivas	61
7.1 Perspectivas	62
7.2 Considerações Finais	68
Apêndice A: Artigo	69
Artigo publicado	69
Apêndice B: Artigos em colaboração	83
Artigos em colaboração	83
Referências Bibliográficas	84

Lista de Figuras

1.1	Esquema do modelo unificado para AGNs	5
1.2	Diagramas de diagnósticos de Kewley et al. (2006)	8
1.3	Função de luminosidade	10
2.1	Imagem da NGC 5044	16
2.2	Cinemática de NGC 5044 para três PAs diferentes.	18
2.3	Cavidades encontradas na NGC 5044	20
2.4	Ilustração dos CCDs do GMOS	22
2.5	Ilustração do mecanismo da IFU	22
2.6	Ilustração do princípio de uma IFS	23
2.7	Campo da IFU da NGC 5044 e Emissão de $H\alpha$	25
2.8	Imagem do contínuo de NGC 5044	28
2.9	Espectros extraídos de NGC 5044.	29
2.10	Espectros extraídos de NGC 5044.	30
3.1	Exemplos dos ajustes das SSPs	35
3.2	Mapas de Adev, χ^2 e SNR	36
3.3	Mapas das populações estelares, A_v , FC e metalicidade.	37
4.1	Canais de velocidade.	42
4.2	Mapas de velocidade das núvens de gás molecular detectadas com o Alma.	43
4.3	Ajustes dos perfis das linhas de emissão.	44
4.4	Mapa do campo de velocidade, modelo ajustado, resíduo e mapa de dispersão de velocidade.	46
5.1	Distribuição do fluxo das linhas de emissão.	50
5.2	Diagramas de diagnóstico para região nuclear.	51
5.3	Diagramas de diagnóstico para as regiões 1 - 4.	52

6.1	Curvas de rotação.	55
6.2	Representação 3D da disposição das estruturas filamentosares.	58
7.1	Intensidade das linhas de emissão versus distância	64
7.2	Imagem da emissão de $H\alpha$ de NGC 6868	64
7.3	Imagem do contínuo de NGC 6868	65
7.4	Espectros extraídos de NGC 6868.	66
7.5	Mapas de fluxos das linhas de emissão da NGC 6868	67
7.6	Diagrama de diagnóstico de NGC 6868	68

Lista de Tabelas

2.1	Propriedades da galáxia	19
2.2	Dados da observação de NGC 5044	24
4.1	Resultados dos ajustes dos perfis de $H\alpha$	45
6.1	Ajustes do campo de velocidade observado.	54

Capítulo 1

Introdução

1.1 Núcleos ativos de galáxias

Os núcleos ativos de galáxias, mais conhecidos como AGNs (do inglês *Active Galactic Nuclei*), são caracterizados por serem fontes muito compactas, com volumes menores que 1 pc^3 e luminosidade emitida pelo núcleo variando de 10^{42} a 10^{48} erg/s, o que significa que pode exceder a luminosidade do resto da galáxia (Krolik, 1999). Nas galáxias ativas, a emissão do gás é dominada por processos não estelares, como a radiação sincrotrônica (Antonucci, 1993, Peterson, 1997). Além disso, estas galáxias apresentam alta variabilidade temporal na luminosidade (sendo de meses no óptico e de dias ou horas no UV e em raios-X, Peterson, 1988), estruturas do tipo jato emergentes do núcleo e linhas de emissão de HI e de HeI intensas com componentes largas e estreitas. Acredita-se que tais núcleos ativos contenham buracos negros supermassivos para explicar as enormes quantidades de energia por eles emitidas. O gás ao redor do buraco negro é atraído por seu intenso campo gravitacional. O material sendo acretado forma um disco que irradia conforme espirala ao entrar no buraco negro. Este disco é geralmente tratado como um gás ionizado opticamente espesso, onde predomina emissão contínua no UV e em raios-X moles. Nas partes mais internas deste disco, um gás ionizado quente e opticamente fino que se mistura ao opticamente espesso emite em raios-X duros (Liebmann et al., 2014). Fluxos de gás acelerados perpendicularmente ao disco formam jatos relativísticos, estruturas colimadas e longas reveladas em observações de VLBI (*Very Long Baseline Interferometry*) (Antonucci, 1993).

Pode-se classificar os AGNs de acordo com as propriedades observadas. As principais classes de AGNs são: galáxias Seyfert, objetos BL Lacertae, radio-galáxias, quasares, QSOs, OVV's e LINERs (Heckman, 1980). Alguns autores também clas-

sificam as galáxias *Starburst*¹ como AGNs por possuírem uma luminosidade maior que uma galáxia que não possui núcleo ativo. No entanto, nestas galáxias a alta luminosidade é explicada por uma alta taxa de formação estelar, e não por um buraco negro central.

As galáxias Seyfert e os quasares compõe as duas maiores classes de AGNs. A principal diferença entre essas classes é a quantidade de radiação emitida por seus núcleos. Enquanto a fonte nuclear de uma galáxia Seyfert emite no espectro visível $10^{11} L_{\odot}$, em um quasar essa energia pode chegar a $10^{13} L_{\odot}$ (Robson, 1996).

De acordo com a definição de Schmidt & Green (1983) os quasares e QSOs diferenciam-se das galáxias Seyfert por possuírem magnitudes absolutas nucleares de $M_B < -23$ e aparência estelar. Apesar desses objetos apresentarem uma aparência estelar não resolvida no visível, muitos deles possuem emissão difusa ao seu redor, que podem ser atribuídas à populações estelares. Isso é um indício que quasares e QSOs, são hospedados por galáxias ofuscadas devido as altas luminosidades desses objetos.

Os quasares e QSOs distinguem-se basicamente pela intensidade da emissão em rádio, sendo que os quasares tem forte emissão rádio e são classificados como *radio loud*, enquanto os QSOs são classificados como *radio quiet*. Apesar desta diferença, geralmente estes dois objetos são chamados apenas de quasares. Nos espectros desses objetos são detectadas linhas de emissão de HI, HeI e HeII alargadas, além de linhas de íons pesados com alto grau de ionização, como por exemplo OVI λ 1035, NV λ 1240 e [Ne V] λ 3426.

Carl Seyfert (1943) foi o primeiro a considerar as galáxias ativas uma classe distinta de galáxias. Inicialmente, sua definição considerava o alto brilho superficial nuclear, mas posteriormente características incomuns nas linhas de emissão foram descobertas por meio de espectroscopia. Atualmente, essas galáxias são detectadas espectroscopicamente pelas intensas linhas de emissão do HI e de íons altamente ionizados. Como já foi mencionado, as galáxias Seyfert possuem menor luminosidade que os quasares, mas embora essas galáxias possuam núcleos com aparências similares às de quasares, nestes casos a galáxia ao redor é claramente detectável. Além disso, as galáxias Seyfert são em sua maioria galáxias espirais (Heckman, 1978, McLeod & Rieke, 1995).

As galáxias Seyfert se subdividem em dois grupos, de acordo com a presença ou ausência de linhas de emissão permitidas alargadas (Khachikian & Weedman, 1974),

¹O fenômeno de surto de formação estelar é conhecido como *starburst* em inglês e objetos que possuem esse fenômeno são chamados *Starbursts*. Daqui para frente serão utilizadas essas definições em inglês.

as Seyferts de tipo 1 e as Seyferts de tipo 2. Os objetos de tipo 1 apresentam dois conjuntos de linhas de emissão. O primeiro conjunto é denominado como “linhas estreitas”. Este conjunto é característico de um gás ionizado de baixa densidade eletrônica (n_e), $10^3 < n_e(\text{cm}^{-3}) < 10^6$, com velocidade de algumas centenas de km s^{-1} . O segundo conjunto apresenta linhas largas com valores típicos de FWHM (*full width at half-maximum*) da ordem de milhares de km s^{-1} , mas apenas nas linhas permitidas. Enquanto as linhas de íons pesados (linhas proibidas) são mais estreitas, com valores de FWHM da ordem de centenas de km s^{-1} . A ausência de linhas largas proibidas sugere que as linhas largas permitidas de HI são produzidas em um gás de alta densidade ($n_e > 10^9 \text{ cm}^{-3}$). Por outro lado, os objetos de tipo 2, apresentam apenas linhas estreitas, com valores de FWHM comparáveis aos das linhas estreitas dos objetos de tipo 1. Embora as linhas estreitas dessa categoria apresentem valores de FWHM consideravelmente menores do que os das linhas largas, elas ainda são mais largas do que as vistas em galáxias normais.

No entanto, o Modelo Unificado de AGNs propõe que todos esses objetos são na verdade um só, e as diferenças observadas entre eles devem-se a um efeito geométrico que depende da linha de visada (Osterbrock, 1978, Antonucci & Miller, 1985, Antonucci, 1993). De acordo com o modelo mais aceito (ver Figura 1.1), densas nuvens de gás com dispersão de velocidade de aproximadamente 10^4 km s^{-1} em torno do núcleo seriam as responsáveis pelas linhas de emissão alargadas ($\text{FWHM} = 10^3 - 10^4 \text{ km s}^{-1}$) observadas nos espectros da maior parte dos AGNs (Peterson, 1997). A região onde estas nuvens são encontradas é conhecida como região de linhas largas (BLR, do inglês *Broad Line Region*). Segundo este modelo, a BLR está rodeada por um disco toroidal, constituído de gás e poeira que, dependendo do ângulo de inclinação em relação à linha de visada, pode ocultar as nuvens de alta velocidade e fazer com que as linhas de emissão alargadas, observadas em Seyfert 1, não sejam mais detectadas pelo observador, fazendo com que a galáxia seja vista como Seyfert 2. Na região externa ao toróide, existem nuvens de gás menos densas que produzem as linhas estreitas de emissão. Esta região é conhecida como a região de linhas estreitas (NLR), do inglês *Narrow Line Region*, e tem dispersão de velocidade de aproximadamente 10^2 km s^{-1} (Peterson, 1997, e referências nele contidas). No entanto, esse modelo ainda não consegue explicar todas as diferenças entre os AGNs, e os estudos sobre a natureza destes objetos são fundamentais para seu entendimento.

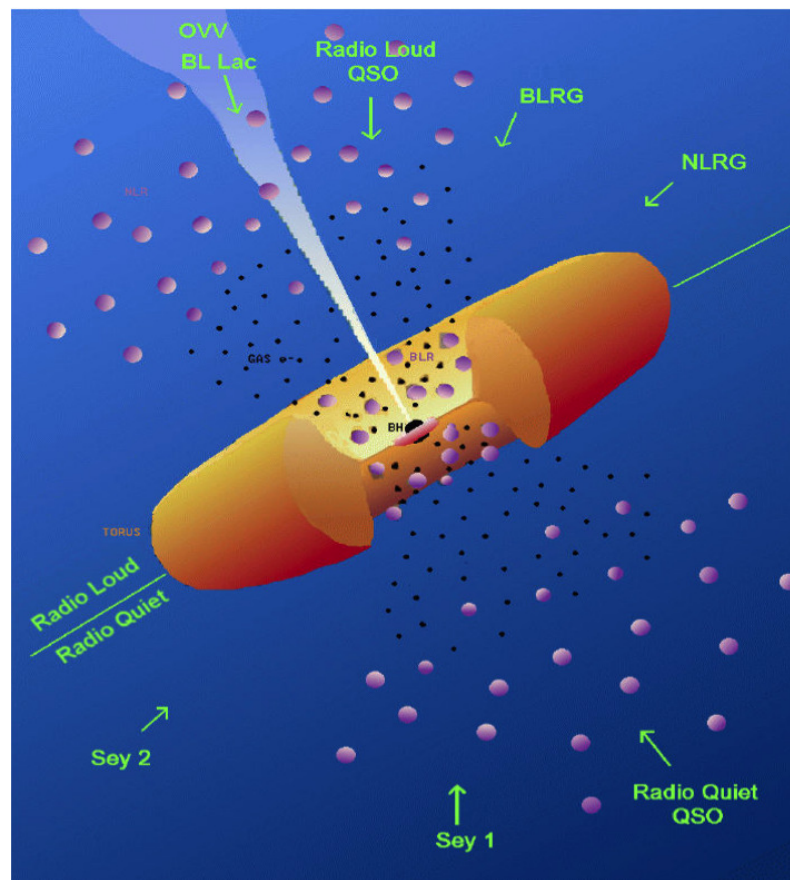


Figura 1.1: Esquema do modelo unificado para AGNs. No centro da figura está o buraco negro, ao seu redor a pequena estrutura rosa representa o disco de acreção, e o grande toróide laranja representa o tórus de poeira. As núvens mais internas constituem a BLR, enquanto as externas representam a NLR. As setas verdes indicam o ângulo de posição em que um observador deve olhar para identificar determinada classe de AGN. Figura adaptada de Urry & Padovani (1995).

1.2 LINERs

Low Ionization Nuclear Emission-line Regions

Um dos cenários que tenta explicar o que são LINERs (do inglês, *Low Ionization Nuclear Emission-Line Regions* ou em português, Regiões Nucleares de Linhas de Emissão de Baixa Ionização) diz que estes objetos são os AGNs menos luminosos e mais comuns no universo (Ho et al., 1997). A luminosidade do contínuo não estelar da maioria destes objetos é pequena comparada com o contínuo estelar, portanto não há ainda boas observações de sua forma. O termo LINER foi introduzido por Heckman (1980) ao descrever os núcleos das galáxias com razões de linhas de emissão diferentes tanto de núcleos Seyfert quanto de regiões HII. Esses núcleos são muito comuns nas galáxias espirais próximas, nas radio-galáxias e em galáxias elípticas ricas em gás (Macchetto et al., 1996). LINERs são caracterizados por apresentarem espectros com linhas proibidas de baixa ionização relativamente intensas. A intensidade destas linhas distingue LINERs de núcleos de galáxias Seyfert. Eles também diferem de regiões HII de baixa ionização, as quais são encontradas nos núcleos de algumas galáxias, em que as linhas de emissão proibidas são relativamente intensas comparadas às linhas permitidas (Willner et al., 1985).

Nos LINERs as linhas de emissão de baixo potencial de ionização, como por exemplo [OII] (o potencial de ionização do [OI] é 13,6 eV e do [OII] é 35 eV), são mais intensas que as de maior potencial, como as de [OIII]. O surgimento de [OIII] devido à fotoionização necessita de fótons com energia superior a 35 eV, os quais são relativamente raros no espectro estelar e comuns no contínuo AGN (Krolik, 1999). Já a linha de [OI] λ 6300 Å costuma ser muito intensa nessas galáxias.

Originalmente, a definição observacional de LINERs baseou-se nas razões de linhas $[\text{O II}]\lambda 3727/[\text{O III}]\lambda 5007 > 1$ e $[\text{O I}]\lambda 6300/[\text{O III}]\lambda 5007 > 1/3$ (Heckman, 1980). No entanto, a primeira razão também pode ser encontrada em regiões HII. Para uma definição mais segura outras razões de linhas também são utilizadas, são elas: $[\text{O III}]\lambda 5007/\text{H}\beta < 3$, $[\text{O I}]\lambda 6300/\text{H}\alpha > 0,05$, $[\text{S II}]\lambda 6716 + \lambda 6731/\text{H}\alpha > 0,4$ e $[\text{N II}]\lambda 6583/\text{H}\alpha > 0,5$ (Osterbrock, 1989).

Os LINERs constituem 1/3 de todas as galáxias próximas (até 40 Mpc, Ho et al., 1997) e aproximadamente metade das galáxias *early type* (E/S0), e eles apresentam fortes linhas de emissão de baixa ionização um pouco mais estreitas (FWHM=200-400 km/s) quando comparadas com as linhas estreitas de alta excitação de outros AGNs (Blandford et al., 1990). O mecanismo de ionização responsável pelas razões de linhas observadas nestes objetos ainda é controverso. Alguns dos mecanismos

sugeridos são ionização por choques (Heckman, 1980, Dopita & Sutherland, 1995, Allen et al., 2008, Dopita et al., 2015) e ionização por estrelas pós-AGBs² (Stasińska et al., 2008, Singh et al., 2013). Veron-Cetty & Veron (1986) encontraram numa amostra de 320 galáxias do *Revised Shapley Ames Catalogue* (Sandage & Tammann, 1981), que provavelmente são LINERs aproximadamente 1/4 das galáxias E/S0 e Sb/Sbc e aproximadamente metade das galáxias Sa/Sab, pois apresentam $[NII]\lambda 6583/H\alpha > 1,2$. Apenas 4% das galáxias Sc têm tais espectros. Em contraste, eles encontraram regiões nucleares do tipo RHH em 65% das galáxias Sc, cerca de 25% das Sb/Sbc, 2% de Sa/Sab e nenhuma em galáxias E/S0 (Blandford et al., 1990).

A classificação de objetos em regiões HII, Seyfert ou LINERs poder ser feita através de diagramas de diagnósticos (ver Capítulo 5). O primeiro esquema de classificação puramente teórico entre AGNs, LINERs e regiões HII, foi desenvolvido por Kewley et al. (2001). Eles usaram uma combinação de modelos de choques, fotoionização e síntese de população estelar e incluíram no diagrama de diagnósticos as chamadas ‘*maximum starburst line*’ e ‘*extreme mixing line*’. Kewley et al. (2001) argumentaram que os esquemas de classificação já existentes, incluíam Seyfert e *Starbursts* na classe de LINERs. A ‘*maximum starburst line*’ é determinada pelo limite superior dos modelos de fotoionização por estrelas. As galáxias que se encontram acima e à direita desta linha, são provavelmente dominadas por AGN, já as que se encontram abaixo e à esquerda são classificadas como *Starbursts*. No caso da ‘*extreme mixing line*’, galáxias acima e à esquerda desta linha de ‘mistura’ extrema poderiam ser excitadas por diversos mecanismos que produzam campos duros de radiação ionizante, tais como choques, ventos estelares, discos de acreção ou *cooling flows*, e as galáxias abaixo e para a direita não podem ser modeladas por fotoionização ou choques sem que haja uma ionização precursora (Kewley et al., 2001).

Kauffmann et al. (2003) selecionaram do SDSS (*Sloan Digital Sky Survey*) uma amostra de galáxias que possuíam AGNs e que apresentavam linhas estreitas para comparar suas propriedades com as de galáxias normais. Eles também estudaram como essas propriedades variavam como uma função da luminosidade do AGN através de medidas da intensidade da linha de emissão $[O III]\lambda 5007$. Para incluir no diagrama de diagnósticos uma linha empírica dividindo galáxias de formação estelar de objetos compostos, ou seja, que possuem significativa contribuição tanto de AGNs quanto de formação estelar, no caso Seyfert-HII, Kauffmann et al. (2003)

²AGB é a sigla em inglês para Ramo Assintótico das Gigantes (*Asymptotic Giant Branch*) e as estrelas pós-AGB são objetos com massa inicial menor que 8 massas solares que evoluem rapidamente da fase AGB e chegam ao estágio de nebulosa planetária.

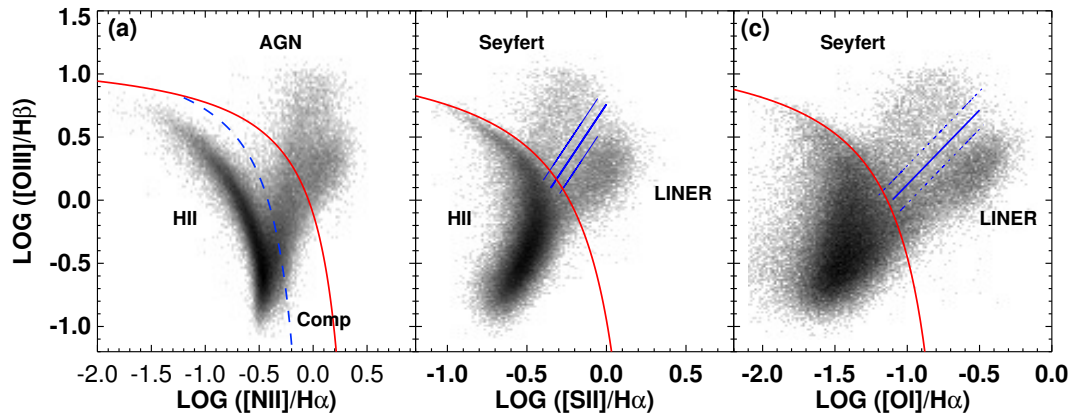


Figura 1.2: Diagramas de diagnósticos retirados de Kewley et al. (2006) mostrando os esquemas de classificação de galáxias usando razões de linhas de emissão. A linha de classificação ‘*maximum starburst line*’ (linha sólida vermelha, Kewley et al., 2001), a linha de formação estelar pura (linha tracejada azul, Kauffmann et al., 2003), e a linha Seyfert-LINER (linha sólida azul, Kewley et al., 2006), são usadas para separar galáxias em regiões HII, Seyferts, LINERs e compostas (AGN - HII)

modificaram os limites das linhas criadas em Kewley et al. (2001). Os resultados mostraram que as galáxia com AGN de baixa luminosidade tem população estelar similar às *early-type* normais, ou seja, população velha, além disso, constataram que a formação estelar em AGNs mais energéticos não é concentrada principalmente nas regiões nucleares da galáxia, mas distribuída em escalas de alguns kpc. O resultado mais interessante que obtiveram foi que os AGNs mais energéticos são encontrados em “bojos jovens”, isto é, galáxias massivas com densidade superficial estelar similar à galáxias *early type*, mas com população estelar jovem (Kauffmann et al., 2003).

Estudos sobre a classificação de galáxias com base em linhas de emissão apontaram que muitas das galáxias classificadas como LINERs são formadas predominantemente de estrelas velhas que mimetizam espectros produzidos por LLAGNs (Stasińska et al., 2008, Cid Fernandes et al., 2011).

Recentemente dados de espectroscopia de campo integral (IFS, do inglês *Integral Field Spectroscopy*) do CALIFA (*Calar Alto Legacy Integral Field Area*, Sánchez et al., 2012), revelaram que os perfis radiais de brilho superficial das linhas de emissão observadas eram inconsistentes com a ionização por uma fonte pontual central e, portanto, não poderiam ser devidos apenas a um AGN (Singh et al., 2013). Essa observação levou à conclusão que a fonte de energia para emissão tipo LINER deve ser estendida, provavelmente distribuída por toda a galáxia. A explicação mais plausível para a emissão tipo LINER que Singh et al. (2013) propuseram foi a ionização por es-

trelas evoluídas durante a fase curta, mas muito quente e energética, das pós-AGB. Além disso, Kewley et al. (2006) elaboraram um novo esquema óptico de classificação, a fim de separar com maior sucesso galáxias puramente de formação estelar, Seyferts, LINERs e galáxias compostas de AGN+formação estelar (Figura 1.2). Eles utilizaram uma amostra de galáxias de linhas de emissão retiradas do SDSS e encontraram que LINERs, em comparação com galáxias Seyferts, possuem população estelar mais velha, maior massa, menos poeira, menor concentração, maior dispersão de velocidade e menor luminosidade de [O III]. Os resultados sugeriram que a maioria dos LINERs são AGNs e que a principal diferença entre Seyferts e LINERs é a taxa de acreção (Kewley et al., 2006).

1.3 Características do Espectro dos LINERs

A primeira evidência da natureza variável dos LINERs foi o trabalho feito por Maoz et al. (2005). Por meio de análises de variabilidade, num monitoramento em UV, foi revelado que uma componente do AGN contribui para a emissão da maioria dos LINERs brilhantes em UV (Maoz et al., 2005).

Komossa et al. (1999) examinaram uma amostra de 13 LINERs com os instrumentos ROSAT (*Röntgen Satellite*) (Pfeffermann et al., 1987) e relataram os resultados de uma investigação das propriedades espectral, espacial e temporal em raios-X destas galáxias. A maioria dos objetos estudados em Komossa et al. (1999) caíram no intervalo intermediário de L_x / L_B (Figura 1.3). Uma vez que a maioria dos LINERs são encontrados em galáxia *early type* dominadas por bojos (Ho, 1999) os mesmos mecanismos de emissão podem contribuir para a luminosidade observada em raios-X. Eles também relatam que, algumas das fontes foram melhor descritas por uma única lei de potência do tipo AGN, com luminosidade de raios-X acima do esperado para fontes estelares discretas. Estes espectros provavelmente indicam a presença de AGNs de baixa luminosidade nos centros dessas galáxias LINERs. Komossa et al. (1999) não encontraram evidências de variabilidade de raios-X na escala de tempo de horas / dias, em concordância com os resultados de Ptak et al. (1998). Além disso, este resultado é consistente com a presença de discos de acreção dominados por advecção em LINERs como sugerido por Ptak et al. (1998).

De acordo com Georgantopoulos et al. (1999), os LINERs parecem contribuir substancialmente para o volume da emissividade local e desempenham um papel importante nas luminosidades $< 10^{42}$ erg/s. Em conclusão, eles encontraram que a luz extragaláctica de raios-X parece ser dominada por processos de acreção ao

invés de atividade de formação estelar (Miyaji et al., 1994, Barcons et al., 1995, Georgantopoulos et al., 1999).

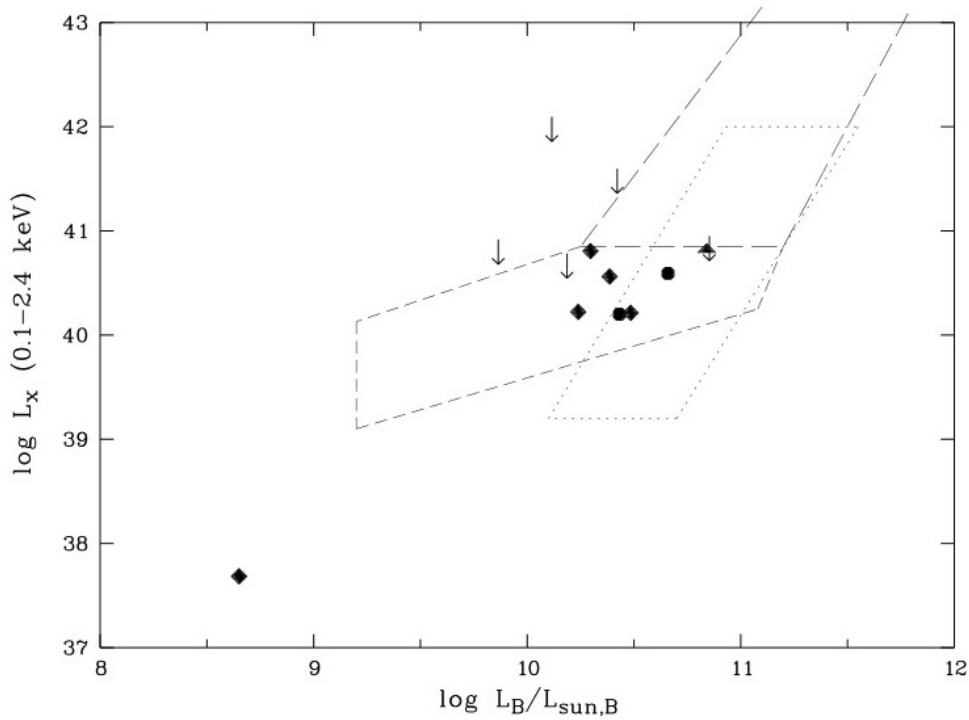


Figura 1.3: LINERS no diagrama $L_x - L_B$. Símbolos cheios denotam fontes de diferentes tipos morfológicos (círculos: S0s, losangos: SAs, triângulos: SABs), as setas apontam os limites superiores. Para comparação, as regiões povoadas por algumas amostras de galáxias elípticas são marcadas (linha pontilhada: Brown & Bregman (1998), linhas tracejadas: Beuing et al. (1999).) O ponto no canto inferior esquerdo mostra uma emissão raio-X totalmente consistente com origem de fontes discretas estelares. Retirada de Komossa et al. (1999).

Hernández-García et al. (2014) analisaram uma amostra de LINERs na qual parte dos objetos deve possuir AGNs e parte não. Eles notaram que 10 entre 13 candidatos a AGN, analisados em UV e/ou raio-X, apresentam variabilidade em pelo menos uma das duas bandas de energia, e portanto, a variabilidade de longo prazo é muito comum em LINERs.

Ainda de acordo com Hernández-García et al. (2014), as variações de raios-X se devem à mudanças no contínuo do AGN. Estes resultados concordam com as variações esperadas de acordo com as massas dos buracos negros e taxas de acreção.

Já na região óptica, Totani et al. (2005) relataram a descoberta de variabilidade nuclear por meio de uma pesquisa “cega” sobre variabilidade entre 1000 galáxias

massivas em $z=0,3 - 0,4$. Eles encontraram seis núcleos com amplitudes de variabilidade estimadas da ordem da escala de tempo de um mês, com evidência marginal para variações de dias. Espectroscopia de um dos seis núcleos variáveis revelou um espectro tipo LINER em $z=0,33$.

Sabe-se que AGNs próximos contêm grandes quantidades de gás molecular, e presumidamente este gás, como o gás molecular na vizinhança solar, contém poeira que pode absorver fótons ultravioleta e óptico e reirradiá-los como radiação IR (Blandford et al., 1990). Poeira interestelar é encontrada compondo grãos de tamanho na faixa de $30 - 3000 \text{ \AA}$ contendo predominantemente silicato, grafite e gelo. Grãos absorvem e espalham luz, ambos os processos removendo efetivamente fótons de um feixe. De fato, várias galáxias sem AGN conhecido têm muitas características similares. A detecção de gás molecular em algumas galáxias, principalmente em elípticas, é especialmente interessante (Kaviraj et al., 2012, Blandford et al., 1990). Em determinadas galáxias supõe-se que isso seja matéria que vem de fora, por um *cooling flow*, enquanto que em outros casos um encontro com um sistema de gás rico pode muito bem desempenhar este papel (Blandford et al., 1990). A poeira está associada com gás frio na maioria das nebulosas conhecidas e é difícil imaginar que AGNs sejam exceções a este respeito. Há três maneiras de descobrir a poeira: através da sua emissão térmica, através do seu efeito no espectro observado (extinção) e pela polarização da luz. O perfil de linhas de emissão estreitas fornece uma indicação para poeira em NLRs. Muitas linhas têm uma notável assimetria azul a qual é interpretada como uma combinação de movimento radial e obscurecimento de poeira (Blandford et al., 1990).

Apesar do entendimento geral de que LINERs são essencialmente versões de núcleos Seyfert menos luminosos (Barth, 2002), muito ainda precisa ser feito antes que se possa entender estes objetos no contexto global da pesquisa de AGNs. Cerca de 80% de todos os LINERs próximos são brilhantes no infravermelho (Carrillo et al., 1999), e espera-se que muitos deles tenham núcleos obscurecidos. Nestes objetos, o contínuo intrínseco da fonte de energia central é frequentemente reprocessado por poeira, e então não é observado diretamente (Satyapal et al., 2004). Muitos mecanismos diferentes têm sido propostos para explicar as linhas de emissão observadas, como um AGN central, choques ou *starbursts*. Recentemente foi sugerido que estrelas quentes pós-AGBs e anãs brancas (Stasińska et al., 2008) poderiam explicar a emissão em muitas galáxias classificadas como LINERs, e estes não teriam uma real atividade nuclear do tipo AGN.

Núcleos tipo LINERs estão associados tanto com galáxias espirais quanto com

elípticas e lenticulares. Da literatura inferimos que, em geral, nas galáxias espirais há um consenso de que a atividade nuclear é produzida pela presença de um buraco negro central. No caso das galáxias lenticulares existem controvérsias sobre a origem deste tipo de espectro, que poderia ser gerado por mecanismos de ionização como choques (Heckman, 1980, Dopita & Sutherland, 1995, Lípari et al., 2004), *cooling flows* (Fabian, 1994) ou por fontes de ionização de diferentes naturezas (AGNs de baixa luminosidade ou estrelas evoluídas) (Filippenko & Terlevich, 1992, Shields, 1992, Barth & Shields, 2000).

1.4 Galáxias elípticas e ISM

Há tempos é sabido que muitas galáxias elípticas apresentam discos, bem como filamentos de gás ionizado (Macchetto et al., 1996, Ferrari et al., 1999, Tran et al., 2001). Também, sabe-se que muitas das galáxias *early type* com linhas de emissão possuem espectros característicos de região nuclear de emissão de linhas de baixa ionização (LINER, Heckman, 1980). Uma fração da ordem de 50% das galáxias elípticas possui gás morno ionizado (10^4 K Macchetto et al., 1996), porém ainda não há consenso sobre a natureza ou origem do gás e da poeira em galáxias elípticas. É comum recorrer a três principais cenários para tentar explicar a presença desse gás. No primeiro cenário, o meio interestelar (ISM) é um componente quiescente normal dessas galáxias *early type*, enquanto no segundo cenário núvens de gás frio e poeira são acregadas por eventos como *mergers* e aquecidas por emissão raio-X (Sparks et al., 1989, Kim, 1989). Já no cenário de *cooling flows*, a perda de massa estelar aquecida a altas temperaturas ($10^6 - 10^7$ K) por explosões de estrelas supernovas durante a formação da galáxia, esfria e condensa em filamentos (Fabian, 1994). Além da origem, o mecanismo de excitação e o destino deste gás também não são ainda bem estabelecidos. A fim de estudar estas propriedades do ISM em galáxias *early type*, Macchetto et al. (1996) estudaram uma amostra de 73 galáxias elípticas e encontraram que 72% das galáxias E e 85% das S0 continham gás ionizado. Eles relatam que para a maioria das galáxias da amostra a morfologia do gás parece ser bastante suave, porém 12% delas mostram uma estrutura filamentar muito extensa, sendo que o diâmetro das regiões emissoras variam de 1 a 10 kpc, e a massa do gás ionizado entre 10^3 e $10^5 M_{\odot}$ (Caldwell, 1984, Phillips et al., 1986, Goudfrooij et al., 1994). Um outro estudo utilizou uma amostra de galáxias *early-type* com e sem atividade nuclear, o resultado mostrou que todas as galáxias da amostra que hospedavam um AGN possuíam poeira circumnuclear; por outro lado, apenas 26%

das galáxias inativas possuíam estruturas de poeira (Simões Lopes et al., 2007). A existência de poeira circumnuclear em galáxias ativas significa que também há muito gás nestas regiões. Recentemente, Ricci et al. (2015) estudou galáxias *early type* com gás ionizado usando IFS e encontrou que o fluxo de $H\alpha$ ao longo do disco não pode ser explicado apenas por fótons ionizantes emitidos por um núcleo ativo de galáxia. Isto pode sugerir que o gás nessas galáxias é ionizado por mais de um mecanismo. Além disso, grande quantidade de gás molecular (até $10^7 M_{\odot}$ revelada por emissão de CO(2-1) 1,3 mm e H_2 2.121 μm) foi encontrada em uma amostra de galáxias de bojos predominantes com faixas de poeira, revelando a complexidade destas galáxias (David et al., 2014, Davis et al., 2015, Strong et al., 1988). Foi sugerido que estes gases atômico e molecular seriam acretaados por meio de um *merger* recente com uma galáxia rica em gás e /ou que seriam originados em um *cooling flow* (O’Sullivan et al., 2015, David et al., 2014). Ainda, foi observada poeira interestelar misturada com gás atômico e molecular em galáxias *early type* (e.g. Davis et al., 2015, e referências contidas). Discos e filamentos de poeira em escalas de kpc (com massa entre 10 e $200 M_{\odot}$ e luminosidade no infravermelho médio de até $14,6 \times 10^8 L_{\odot}$) seguindo a distribuição do gás ionizado também foram registrados em galáxias *early type* (Ferrari et al., 1999, 2002, Goudfrooij et al., 1994).

As galáxias *early type* podem apresentar rotação lenta ou rápida, com uma ampla gama de subestruturas cinemáticas relatadas em sistemas individuais (Krajnović et al., 2011). Existe uma correlação entre a velocidade de dispersão e a massa das galáxias, nas mais massivas o gás e as estrelas rotam mais rápido que nas menos massivas (Emsellem et al., 2007, 2011). Boardman et al. (2017) observaram 12 *early type* próximas que apresentavam emissão de HI, e encontraram pouca evidência de transições na cinemática estelar além do raio central e efetivo. De acordo com esses autores, as galáxias de rotação rápida permaneceram com rotação rápida, e as de rotação lenta permaneceram girando lentamente, indicando que estas galáxias não experimentaram *late dry major mergers*, no entanto, várias das galáxias dessa amostra possuem gás ionizado desalinhado em relação às suas estrelas, sugerindo algum tipo de interação passada.

A distribuição, excitação e cinemática do gás e das estrelas podem ser mapeados simultaneamente com a utilização de uma unidade de campo integral (*Integral Field Unit*, IFU), e isso em escalas espaciais de dezenas a centenas de parsecs com resolução espectral suficientemente alta. O estudo espectroscópico de AGNs utilizando IFU é bem recente, e um importante resultado destes estudos é que em geral a cinemática do gás na região circumnuclear destes objetos possui componentes importantes que

diferem da cinemática usual de rotação do gás no disco e no bojo da galáxia e estas componentes são identificadas tanto como ejeções de matéria do núcleo quanto como escoamentos de gás em direção a ele (Temi et al., 2007, David et al., 2014, Diniz et al., 2015).

1.5 Objetivos

Considerando-se a natureza complexa dos LINERS associados com galáxias elípticas e lenticulares, propomos investigar as propriedades espectrais ópticas da galáxia NGC 5044, uma galáxia próxima *early type* que apresenta espectros tipo LINER cuja fonte de energia é possivelmente um AGN, como sugerido por observações de raios-X (Matsushita, 2001, David et al., 2009). No entanto, a extensão da região emissora (da ordem de alguns kpc) indicaria que outras fontes de energia poderiam também estar presentes. NGC 5044, além de uma fonte de emissão de raios-X, apresenta emissão de gás ionizado muito brilhante na forma de filamentos longos e com uma cinemática complexa, tanto do gás ionizado, quanto das estrelas (Caon et al., 2000, Rickes et al., 2004, 2008, Zeilinger et al., 1996). As linhas de emissão observadas nesta galáxia podem indicar a presença de AGN de baixa luminosidade e de uma fonte de ionização adicional, provavelmente estrelas pós-AGBs e/ou contribuição de choques (Rickes et al., 2004, 2008, Singh et al., 2013). Essa galáxia apresenta comportamento típico de LINER em seu centro e encontra-se na região de maior luminosidade tanto em L_x , quanto em L_B .

Apresentamos neste trabalho pela primeira vez a espectroscopia de campo integral no óptico obtida com o *Gemini Multi-Object Spectrograph* (GMOS) em modo de IFU de 1 kpc central da galáxia NGC 5044, da qual a fonte de ionização do gás ainda é controversa. Além disso, não há informação sobre a cinemática do gás central. Embora forte evidência sugira possível presença da contribuição de um AGN, outra fonte de energia também parece estar presente nesta galáxia ionizando seus filamentos extensos (Macchetto et al. 1996; Rickes et al. 2004). Estes dados permitem resolver espacialmente o kpc mais interno desta galáxia e mapear o possível mecanismo de ionização através de análise da população estelar e razões de fluxo das linhas de emissão. Os objetivos deste trabalho são estabelecer a história de formação estelar, a natureza das fontes de energia que ionizam o gás e procurar pela existência de gás em *inflowing* ou *outflowing* associado ao AGN e/ou outro mecanismo, como *cooling flows*, para o kpc central de NGC 5044.

Capítulo 2

Sobre NGC 5044

De todas as evidências que indicam que um AGN seja a fonte de radiação ionizante de uma galáxia que apresenta linhas de emissão tipo LINER, a detecção de uma fonte de raios-X altamente concentrado, é talvez a mais atraente.

Para este trabalho selecionamos uma galáxia *early type* próxima que possui características peculiares. Trata-se da galáxia NGC 5044, que se encontra no centro de um grupo de galáxias brilhante em raio-X com um *cooling flow* moderado, longos filamentos e várias estruturas moleculares dentro dos 2,5 kpc centrais (Panuzzo et al., 2011, David et al., 2014). Essa galáxia elíptica é rica em gás e apresenta um espectro do tipo LINER (Rickes et al., 2004, 2008), além disso exibe significativa emissão de raios-X (Fabbiano et al., 1992, David et al., 2009). A emissão de gás ionizado nesta galáxia é muito brilhante e em forma de longos filamentos, e seu gás e cinemática estelar são complexos (Rickes et al., 2004). Neste capítulo apresentamos com mais detalhes as características da galáxia NGC 5044, como foram realizadas as observações e a redução dos dados.

2.1 NGC 5044: Revisão da literatura

NGC 5044 é o membro central e mais brilhante de um rico grupo que contém muitos membros anões (dE) (Ferguson & Sandage, 1990). Esta galáxia foi observada ao longo de quase todo o espectro electromagnético, apresentando estruturas ricas, como filamentos de gás e poeira.

A poeira em NGC 5044 é distribuída irregularmente e está concentrada nos 2.5 kpc centrais (Ferrari et al., 1999). Esta galáxia mostra filamentos de emissão de gás ionizado muito brilhantes que se estendem por até 10 kpc partindo da região central para o norte e sendo maiores na parte sul da galáxia (Macchetto et al., 1996, Ferrari

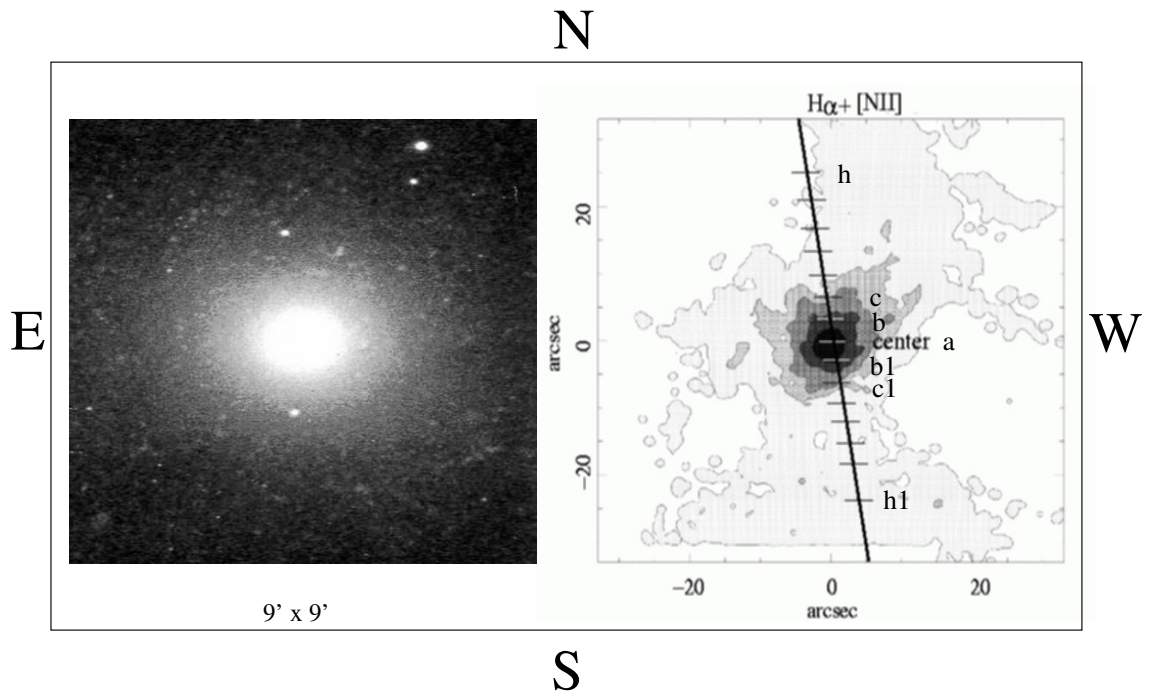


Figura 2.1: No painel da esquerda é apresentada uma imagem na banda V da NGC 5044, no painel da direita uma imagem mostrando a posição da fenda e extração espacial em $H\alpha$, onde as regiões mais escuras indicam maior fluxo. Figura retirada de Rickes et al. (2004).

et al., 1999). Galáxias com estruturas filamentosares tendem a ser mais luminosas no óptico e em $H\alpha + [NII]$; além disso, as galáxias que apresentam essa característica, também são luminosas em raio-X ($\log L_x \sim 40-42$) e apresentam uma distribuição de gás ionizado mais estendida (Figura 2.1, Macchetto et al., 1996).

O mecanismo de ionização de gás desta galáxia tem sido muito estudado, por exemplo, Rickes et al. (2004) sugere que o gás na região central da NGC 5044 é ionizado por um LLAGN (*low luminosity AGN*), enquanto que nas regiões exteriores podem ser explicados por estrelas pós-AGB (ver também Macchetto et al., 1996). Além disso, a emissão estelar geral desta galáxia parece ser dominada por estrelas velhas sobre uma grande gama de comprimentos de onda, desde o UV (Annibali et al., 2007, Marino et al., 2011), óptico (Rickes et al., 2004) até as observações no infravermelho médio (Vega et al., 2010).

A forte correlação observada entre $H\alpha + [NII]$ e a luminosidade no óptico dentro da região emissora, sugere fortemente uma origem estelar para os fótons ionizantes. Macchetto et al. (1996) encontraram que as estrelas pós-AGB em NGC 5044 podem produzir todos os fótons ionizantes necessários para explicar as observações ($\log LH\alpha \sim 40$). Segundo estes autores, estas estrelas estão distribuídas de forma adequada

para produzir efetivamente o fluxo de $H\alpha$. Porém, observações realizadas com o ALMA (*Atacama Large Millimeter/submillimeter Array*) detectaram fluxo de CO_2 em *cooling flow* para o centro da galáxia (David et al., 2014).

Dados ópticos mostram que o perfil de velocidade do gás da NGC 5044 é muito irregular e sua velocidade radial é sistematicamente desviada para o azul com respeito à velocidade sistêmica estelar por 60-100 $km\ s^{-1}$. As curvas de velocidade estelar em P.A.= 10° e 40°, apresentadas na Figura 2.2, mostram que há uma parte central da galáxia de aproximadamente 10 kpc contra-rotando com respeito às regiões externas, enquanto em P.A.=90° (eixo menor) nenhuma rotação estelar é visível. A dispersão de velocidade do gás atinge o pico em 200-230 $km\ s^{-1}$ no centro e decai para fora (Caon et al., 2000).

Esta cinemática peculiar e a morfologia do gás descrita acima podem ser sinais de interações da NGC 5044 com o ambiente após evento de fusão. Segundo Rickes et al. (2004) na região central da NGC 5044 a fonte de ionização deve ser um AGN devido a alta razão $[NII]/H\alpha$, enquanto na região externa essa taxa decai e pode ser explicada com estrelas pós-AGB.

Uma amostra de 65 galáxias *early-type*, localizadas principalmente no campo, foi selecionada com base em vestígios do ISM, em particular linhas de emissão no óptico traçando o componente quente do ISM, para ser observada com GALEX (Annibali et al., 2007). A NGC 5044 fez parte desta amostra. No estudo desses dados foram utilizados parâmetros de idade de população estelar, metalicidade, e relação $[\alpha/Fe]$ obtidos de todas as aberturas e gradientes da amostra por comparação dos índices de Lick com novos modelos de SSP (descritos em detalhes em Annibali et al. (2007) e que contam com a presença de modelos de abundância de elementos não-Solares). Os resultados deste trabalho do GALEX mostrou que, de acordo com a metalicidade, a NGC 5044 é dominada por população estelar mais velha que 10 Gyr (Marino et al., 2011, Annibali et al., 2007).

Por outro lado, observações do Spitzer-IRS revelam que há linhas de emissão iônicas proeminentes e emissão "incomum" de PAH (*Polycyclic Aromatic Hydrocarbon*), uma vez que estas são comumente associadas com formação estelar e que moléculas de poeira tão pequenas quanto as de PAHs devem ser destruídas por interação com plasma quente (Dwek & Arendt, 1992). Assim, emissão de PAH é uma característica típica de espectros no infravermelho médio ou MIR (*Mid InfraRed*) de galáxias com formação estelar.

Espectros no MIR da NGC 5044 obtidos com Spitzer-IRS (abertura de 3."6 × 18") também mostram forte emissão de gás molecular H_2 (Panuzzo et al., 2011). A

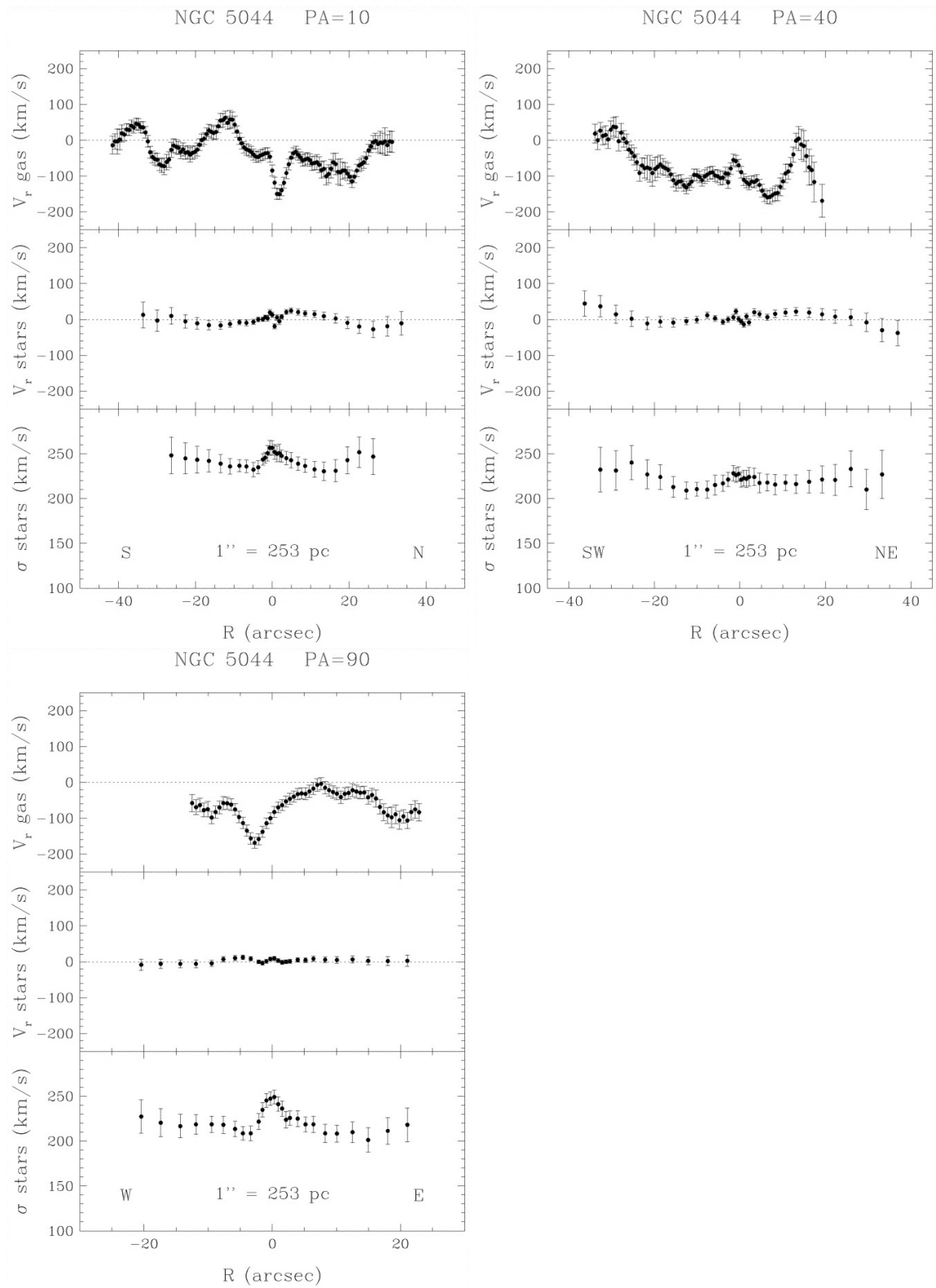


Figura 2.2: Cinemática do gás e das estrelas para diferentes posições de fenda em NGC 5044. Figura retirada de Caon et al. (2000).

Tabela 2.1: Propriedades da galáxia.

Informações	NGC 5044
Tipo Morfológico	E0
RA (h m s)	13:15:24.0
DEC (deg ' ")	-16:23:09
B (mag)	11,83
M_B (mag)	-22,39
A_v (mag)	0,192
Velocidade radial ^a (km s ⁻¹)	2782
Distância (Mpc)	37
Redshift (z)	0,009280
L_x ^b (erg/s)	6,8e+39

Dados disponíveis em NED¹

^a Velocidade radial medida por Ogando et al. (2008)

^b Luminosidade raio-X em 0,3-8 keV (Liu, 2011)

formação de H₂ é um processo importante em regiões de pós choque, já que H₂ é um participante ativo no resfriamento e na blindagem da região (Cuppen et al., 2010, Guillard et al., 2010).

Segundo David et al. (2009) um grande número de cavidades de raio-X foram detectadas com o CHANDRA na região central de NGC 5044 (Figura 2.3), e provavelmente se devem a múltiplos *outbursts* de AGN ocorridos há 10⁸ anos. Além disso, David et al. (2014) argumentam que, a detecção de emissão do contínuo em 230 GHz mostra que atualmente estaria ocorrendo outro *outburst*, provavelmente devido a um evento recente de acreção, e ainda, que o tempo de resfriamento radiativo do gás quente na região central de NGC 5044 é de aproximadamente 4×10^7 anos, o qual seria bem abaixo do limiar observado para desencadear nova formação de estrelas (Rafferty et al., 2008, Voit et al., 2008, David et al., 2014). Além disso, estes autores relatam a detecção de gás CO molecular frio em movimento em direção ao centro desta galáxia e sugeriram que isto pode ser interpretado como a presença de um *cooling flow* na direção do centro da galáxia.

Listamos algumas propriedades de NGC 5044 na Tabela 2.1.

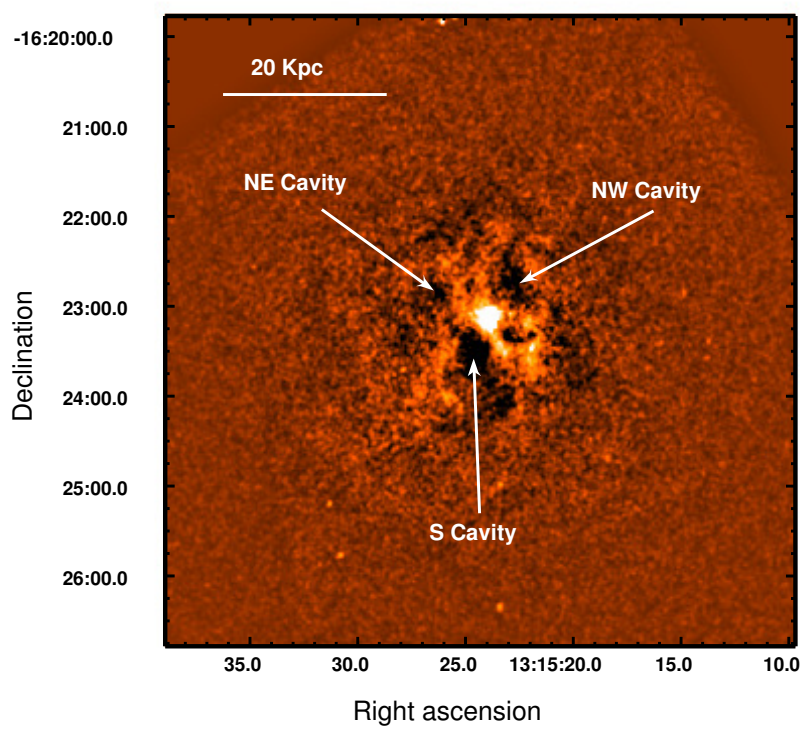


Figura 2.3: Imagem mascarada de NGC 5044 na banda de 0,3 - 2,0 keV. Figura retirada de David et al. (2009).

2.2 NGC 5044: Observações e redução de dados

A tecnologia permite a obtenção simultânea de imagens e de espectros por meio da espectroscopia de campo integral. Os resultados destas observações são os cubos de dados, onde temos informações nas duas dimensões espaciais e na dimensão espectral, chamamos então de espectroscopia 3D. Quando equipamentos capazes de realizar este tipo de espectroscopia são anexados a telescópios da classe de 8 m, eles permitem um mapeamento detalhado da região central de galáxias do universo local. Portanto, tais observações de campo integral são essenciais para quantificar e determinar as contribuições dos processos de ionização no centro e em torno de algumas centenas de parsecs centrais das galáxias. No presente trabalho apresentaremos observações obtidas com a unidade de campo integral IFU do inglês *Integral Field Unit* do GMOs (*Gemini Multi-Object Spectrograph*) do telescópio Gemini Sul, com o intuito de estudar em detalhes o mecanismo dominante na excitação do gás da galáxia NGC5044.

2.2.1 Observações

Como mencionado anteriormente, para este trabalho foram obtidos dados com o espectrógrafo GMOS no modo IFU (Allington-Smith et al., 2002, Hook et al., 2004), que realiza espectroscopia 3D. O detector deste instrumento consiste em três CCDs de 2048 x 4608 pixels alinhados linearmente com um espaço de 0,5mm entre eles, resultando em uma área de detecção final de 6144 x 4608 (Figura 2.4).

Este instrumento disponibiliza duas configurações de observação, o modo de duas fendas e o modo de fenda única. Sendo que o modo de duas fendas resulta em um campo de visão maior, mas com menor cobertura espectral (em torno de 1500 Å), enquanto o modo de fenda única apresenta um campo de visão menor, porém com cobertura espectral maior (~3000 Å). Neste trabalho foram obtidos apenas dados no modo fenda única. Com esta configuração 750 micro-lentes estão localizadas no plano focal do telescópio, das quais 500 captam a luz proveniente do objeto de interesse e 250 são destinadas ao céu, ambos separados por 1'. As micro-lentes estão acopladas a um arranjo de fibras ópticas (Figura 2.5) e repartem a imagem do objeto em fatias de 0,2". As fibras estão dispostas linearmente na localização nominal da fenda do espectrógrafo (pseudo-fenda).

A luz é então dispersada e dá origem aos espectros que são registrados no detector. O produto final é um cubo de dados, com uma dimensão espectral e duas

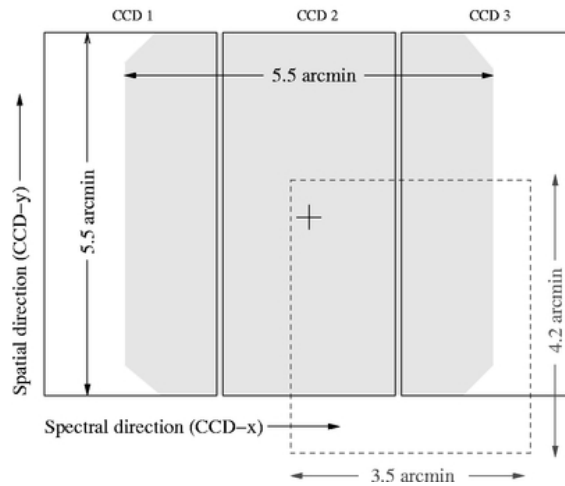


Figura 2.4: Esquema que mostra a disposição dos três CCDs do GMOS. Há pequenos intervalos entre os CCDs de $\sim 0,5$ mm. O FoV da imagem ocupa a região central da matriz e é mostrado pela região sombreada. O campo de patrulha do sensor de frente de onda no instrumento, projetado no plano do detector, é mostrado pela linha pontilhada. No modo espectroscópico, uma máscara de fenda é movida para dentro do feixe para cobrir o campo da imagem e o espectro resultante corre horizontalmente em toda a matriz CCD. No caso de fenda longa, a fenda corre verticalmente no centro do campo. Figura retirada de Hook et al. (2004).

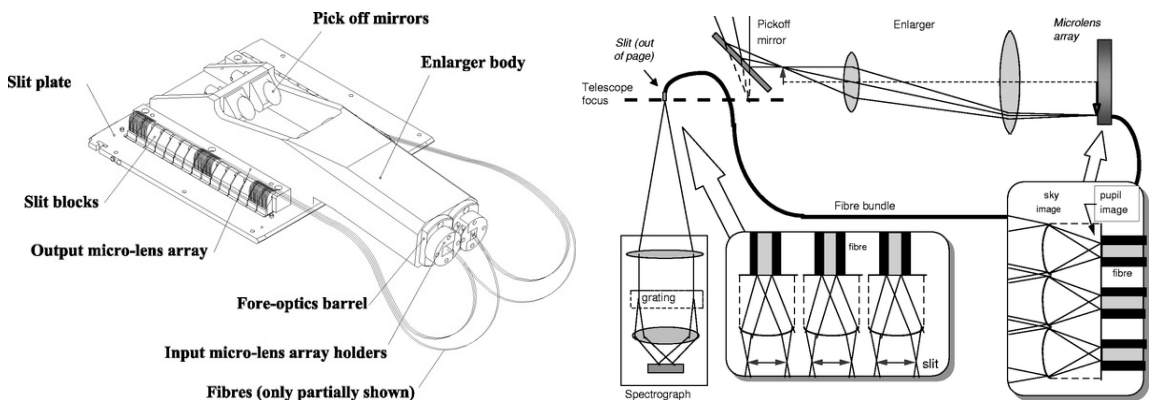


Figura 2.5: À esquerda um desenho do IFU sem tampas, mostrando sua disposição mecânica, e à direita um esquema mais detalhado de como as microlentes, fendas e fibras se conectam. Figuras retiradas de Allington-Smith et al. (2002).

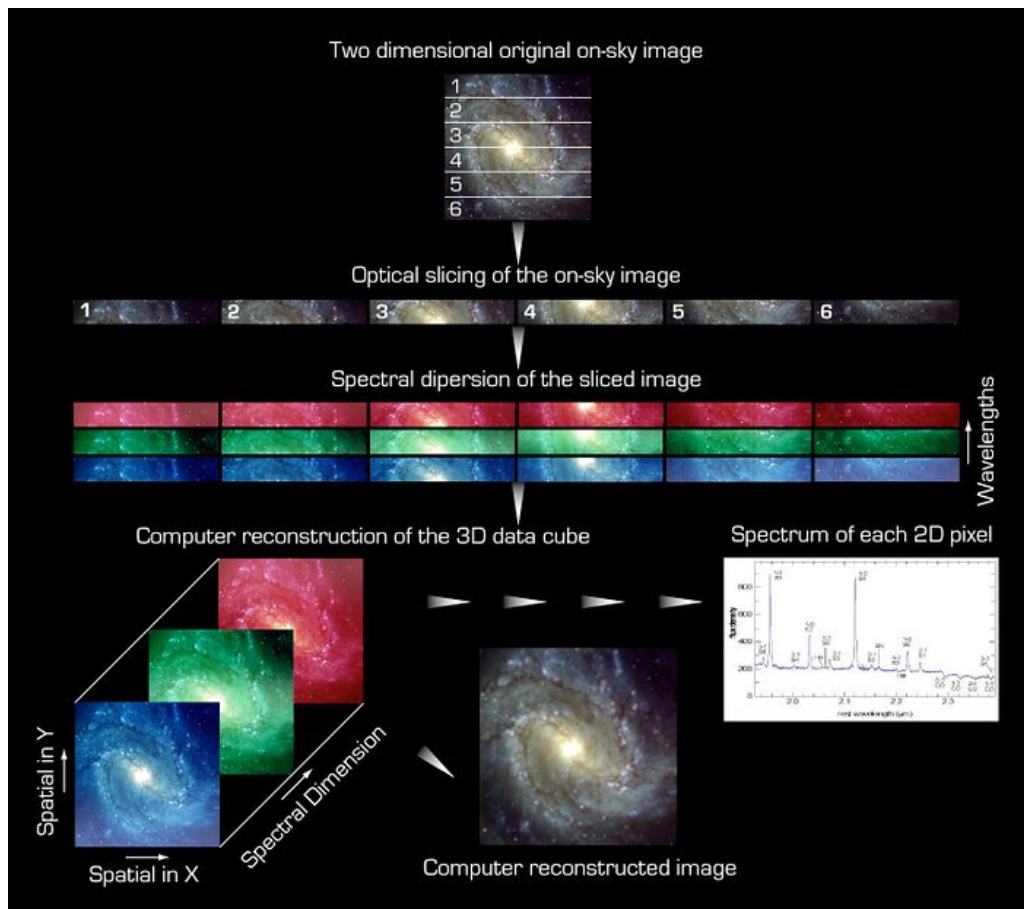


Figura 2.6: Princípio de IFS. Uma imagem originalmente bidimensional é fatiada, as fatias então são dispersadas espectralmente em uma fenda comum, e por fim, um cubo de dados 3D é reconstruído a partir dos espectros obtidos. Créditos: ESO (European Southern Observatory).

dimensões espaciais abrangendo um campo de $3'',5 \times 5''$. Com estes cubos de dados, é possível a construção de imagens em uma faixa específica de comprimento de onda ou a extração de espectros de diferentes regiões (Figura 2.6).

Os dados foram obtidos no programa GS2013A-Q-52 (PI J.E. Steiner), utilizando a rede B600-G5323, com o comprimento de onda central das observações em 5620 \AA . Os espectros cobrem uma faixa de $\sim 4300 - 6800 \text{ \AA}$ e possuem um perfil instrumental de $1,7 \text{ \AA}$ obtida a partir do FWHM das linhas da lâmpada de CuAr. Para ilustrar o tamanho do campo do GMOS-IFU com um comparativo aos campos utilizados em trabalhos anteriores, mostramos no painel esquerdo da Figura 2.7 uma imagem da emissão de $H\alpha + [NII]$ de NGC 5044 obtida com NTT+EFOSC2 (Macchetto et al., 1996), onde o retângulo preto no meio representa o FoV do GMOS. No painel da direita, apresentamos duas imagens extraídas do nosso cubo de dados.

Tabela 2.2: Dados do programa de observação GS-2013A-Q-52

Paramêtros	NGC 5044
Data	04/05/2013
Redes	B600-G5323
<i>Seeing</i> (arcsec)	$\sim 0,7$
Resolução espectral (Å)	1,7
Faixa espectral (Å)	4260 - 6795
Escala espacial (pc/arcsec)	179
Massa de ar	1,14
T_{exp} (s)	1800

A imagem do contínuo foi obtida estimando o valor médio sobre o intervalo de comprimentos de onda entre 4730Å e 4780Å com o pico do contínuo definido como o centro fotométrico da galáxia. No painel inferior mostramos a emissão de H α com contornos desenhados para destacar os extensos filamentos de gás ionizado. Fica claro a partir destes mapas que a morfologia do contínuo e H α são distintas e sugerem que o gás ionizado segue a grande estrutura filamentar de escala de kpc, enquanto o contínuo segue a distribuição estelar.

Utilizando $H_0=75\text{km s}^{-1}\text{Mpc}^{-1}$ e a velocidade radial de 2782km s^{-1} temos a distância de 37 Mpc para NGC 5044, a qual $1''$ corresponde a ~ 179 pc no plano do céu. Assim, o campo de visão de $3,5 \times 5 \text{ arcsec}^2$ corresponde a $626 \times 895 \text{ pc}^2$.

O primeiro passo para que seja possível analisar estes cubos de dados é a redução dos mesmos. Exposições de *flat field* (lâmpada e *twilight*), imagens de *bias* e espectros da lâmpada de CuAr foram obtidos para realizar as devidas reduções e calibrações dos cubos de dados da amostra. Para as calibrações espectro-fotométricas, foi observada a estrela anã branca DA EG274 (Hamuy et al., 1992). O valor do *seeing* da observação foi medido na imagem de aquisição r obtida com o imageador GMOS (SDSS system). Este valor e outros parâmetros da observação estão mostrados na Tabela 2.2.

2.2.2 Redução de dados

Seguimos o procedimento padrão para a redução de dados (que foi realizada pelo colaborador Tiago Ricci). Para tal foi utilizado o IRAF² (Tody, 1986, 1993) e as tarefas contidas no pacote do GEMINI IRAF, bem como tarefas genéricas do IRAF,

²IRAF é distribuído pelo *National Optical Astronomy Observatory*, o qual é operado pela *Association of Universities for Research in Astronomy*.

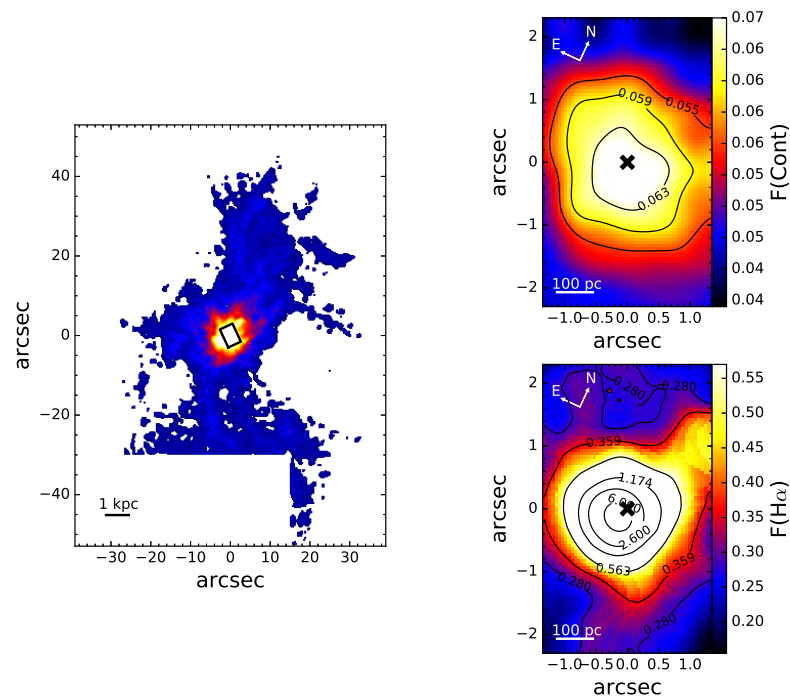


Figura 2.7: Imagem à esquerda: Imagem da emissão de $H\alpha+[NII]$ em NGC 5044 (Macchetto et al., 1996). O quadrado negro delimita o FoV do GMOS-IFU ($3,5 \times 5 \text{ arcsec}^2$). Imagem superior à direita: Imagem do contínuo médio de NGC 5044 obtido entre 4730-4780 Å com o GMOS-IFU. Imagem inferior à direita: Emissão de $H\alpha$ obtida com GMOS-IFU. Mapas do GMOS em unidades de $10^{15} \text{ erg cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$.

como descrito em detalhes em Ricci et al. (2014b).

É comum que as imagens possuam algumas regiões de píxeis em suas bordas sem dados que possam ser utilizados. Assim, essas regiões devem ser identificadas e excluídas. Além dessas regiões também é necessário eliminar o *bias*, que consiste num número de contagem de fótons na imagem que independe do tempo de exposição ou do objeto observado, e que trata-se de um efeito intrínseco do instrumento. Assim sendo, foram subtraídos *bias* e *background*, bem como foram aplicadas máscaras de *bad pixels* a cada CCD.

As posições das fibras nos detectores foram identificadas com a lâmpada de *flat field*. Em seguida, cada um dos espectros foi extraído, dividido pelo espectro médio e multiplicado pelos espectros colapsados em cada fibra da exposição *twilight flat field*, produzindo um *master-flatfield* capaz de corrigir as diferenças nas respostas entre cada fibra do espectrógrafo e também de remover padrões de alta frequência em dimensão espectral. Os raios cósmicos foram removidos com o algoritmo lacosmic (van Dokkum, 2001) e a rotina gscrej. Além disso, com o cubo de dados construído fizemos uma interpolação na dimensão espectral para remover os raios cósmicos restantes. Logo após, os espectros do objeto foram extraídos, divididos pelo *master-flatfield*, calibrados em comprimento de onda e subtraído de céu, resultando em um arquivo FITS contendo 500 espectros, cada um associado com uma posição espacial diferente do objeto.

A estrela espectrofotométrica foi reduzida da mesma maneira mencionada acima. Após subtração do céu, um espectro foi obtido a partir da soma dos espectros de cada fibra. Este espectro representativo foi utilizado para obter a função sensibilidade dos CCDs, a qual foi aplicada a todos os espectros para a calibração em fluxo das observações. Finalmente, o cubo de dados foi construído com uma amostragem espacial de $0,05 \text{ arcsec}^2$, resultando em um FoV com 66×98 spaxels³.

A luz emitida por objetos celestes sofre alteração na sua direção de propagação ao penetrar na atmosfera da Terra, este efeito denomina-se refração atmosférica. A refração atmosférica depende do comprimento de onda, e este é um parâmetro variável em cubos de dados, pois a imagem do objeto pode ser vista em diferentes regiões espectrais. Portanto, o ângulo desta refração varia ao longo de um cubo de dados, e este efeito passa a ser conhecido como refração atmosférica diferencial.

Para corrigir os efeitos de refração atmosférica, foram calculados os deslocamentos de cada imagem em relação à imagem mais vermelha dos cubos de dados usando as equações propostas por Bönsch & Potulski (1998) para descrever a dispersão de

³Píxeis espaciais de um cubo de dados.

luz causada pela atmosfera terrestre para cada comprimento de onda, e as equações propostas por Filippenko (1982) para projetar estas dispersões sobre a dimensão espacial dos cubos de dados. Assim, foi possível deslocar cada imagem do cubo de dados para posições que minimizam o efeito de refração diferencial.

Além disso, os ruídos de alta frequência espectral e espacial foram removidos com um FILTRO BUTTERWORTH ⁴ (Gonzalez & Woods, 2002, Ricci et al., 2014b). Os parâmetros de filtro usados aqui foram ordem $n=6$ e frequência de corte $F_c=0,13F_{Ny}$, onde $F_{Ny} = 0,5 \text{ spaxel}^{-1}$ é a frequência Nyquist. A frequência de corte é escolhida de tal maneira que as frequências espaciais maiores que o *seeing* da observação sejam removidas.

A fim de eliminar as assinaturas de baixa frequência espacial e espectral, conhecidas como *fingerprints* instrumentais, foi aplicada a Tomografia PCA (de *Principal Component Analysis*) ao cubo de dados (Heyer & Peter Schloerb, 1997, Steiner et al., 2009). Os tomogramas deste ruído instrumental são caracterizados por faixas verticais, enquanto os autoespectros mostram uma correlação de baixa frequência entre os comprimentos de onda. Ajustamos *splines* cúbicos de baixa ordem em cada um dos autoespectros que caracterizavam o ruído com a finalidade de considerar apenas as correlações de baixa frequência entre os comprimentos de onda. O próximo passo foi construir um cubo de dados apenas com o ruído de baixa frequência, em seguida, subtraímos este cubo do cubo de dados da galáxia. Este procedimento deve ser realizado em cada um dos cubos de dados individualmente, já que as variâncias dos autovetores que caracterizam este ruído variam de cubo para cubo.

Os espectros do cubo de dados foram corrigidos pelo avermelhamento galáctico usando a curva de extinção de Cardelli et al. (1989, daqui em diante CCM) para um $A_v = 0,192$ (Schlafly & Finkbeiner, 2011). O cubo de dados também teve o efeito Doppler corrigido pela velocidade radial da galáxia (Ogando et al., 2008).

Por fim, utilizamos a tarefa *wspectext* do IRAF para converter o cubo de dados final em espectros unidimensionais. Na Figura 2.8 vemos uma imagem do contínuo obtida do cubo de dados de NGC 5044, as letras A,B,C e D foram utilizadas para denotarem as posições dos espectros apresentados nas Figuras 2.9 e 2.10. Esses espectros foram extraídos nessas posições com a finalidade de ilustrar a variação da intensidade das linhas de emissão ao longo do eixo maior da galáxia.

A incerteza na calibração de comprimentos de onda foi estimada por meio das linhas da lâmpada (ver Capítulo 4). A estrela espectroscópica padrão não foi ob-

⁴O FILTRO BUTTERWORTH é um filtro de passa baixa, um tipo de filtro de processamento de sinal desenvolvido para ter uma resposta de frequência tão plana quanto possível na banda passante (Stephen, 1930).

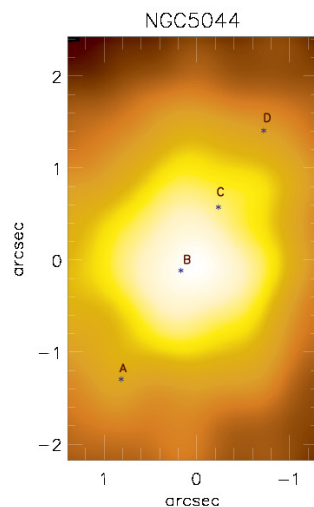


Figura 2.8: Imagem do contínuo em 4800 \AA de NGC 5044 .

servada na mesma noite em que a galáxia e isto pode ter afetado a acurácia na determinação do fluxo absoluto, dando 30 % de incerteza nesses valores. Vale mencionar que as razões de fluxo das linhas de emissão, usadas para construir os diagramas de diagnóstico, não foram afetadas pela incerteza sistemática do fluxo, uma vez que cada razão utilizada foi medida sobre linhas de emissão próximas entre si. Ainda assim, checamos as incertezas para as razões $[\text{N II}] \lambda 6584 / \text{H}\alpha \lambda 6563$ e $[\text{O III}] \lambda 5007 / \text{H}\beta \lambda 4861$ em vários spaxels e encontramos um desvio de 3 %. A dispersão instrumental foi obtida a partir da lâmpada de CuAr, e a usamos para corrigir a dispersão de velocidade. Notamos, no caso da galáxia NGC5044, que a dispersão de velocidade é maior na parte azul do espectro que na parte vermelha, dando incertezas de $\sim 8 \%$ e $\sim 4 \%$, respectivamente.

A partir desses dados foi possível realizar análises da cinemática do gás, de seus mecanismos de ionização e de sua emissão, bem como elaborar modelos de campo de velocidade e estimar a massa do buraco negro central da galáxia. Além disso, realizamos um mapeamento da população estelar presente na NGC 5044. Apresentamos o método adotado para síntese espectral e seus resultados no próximo capítulo.

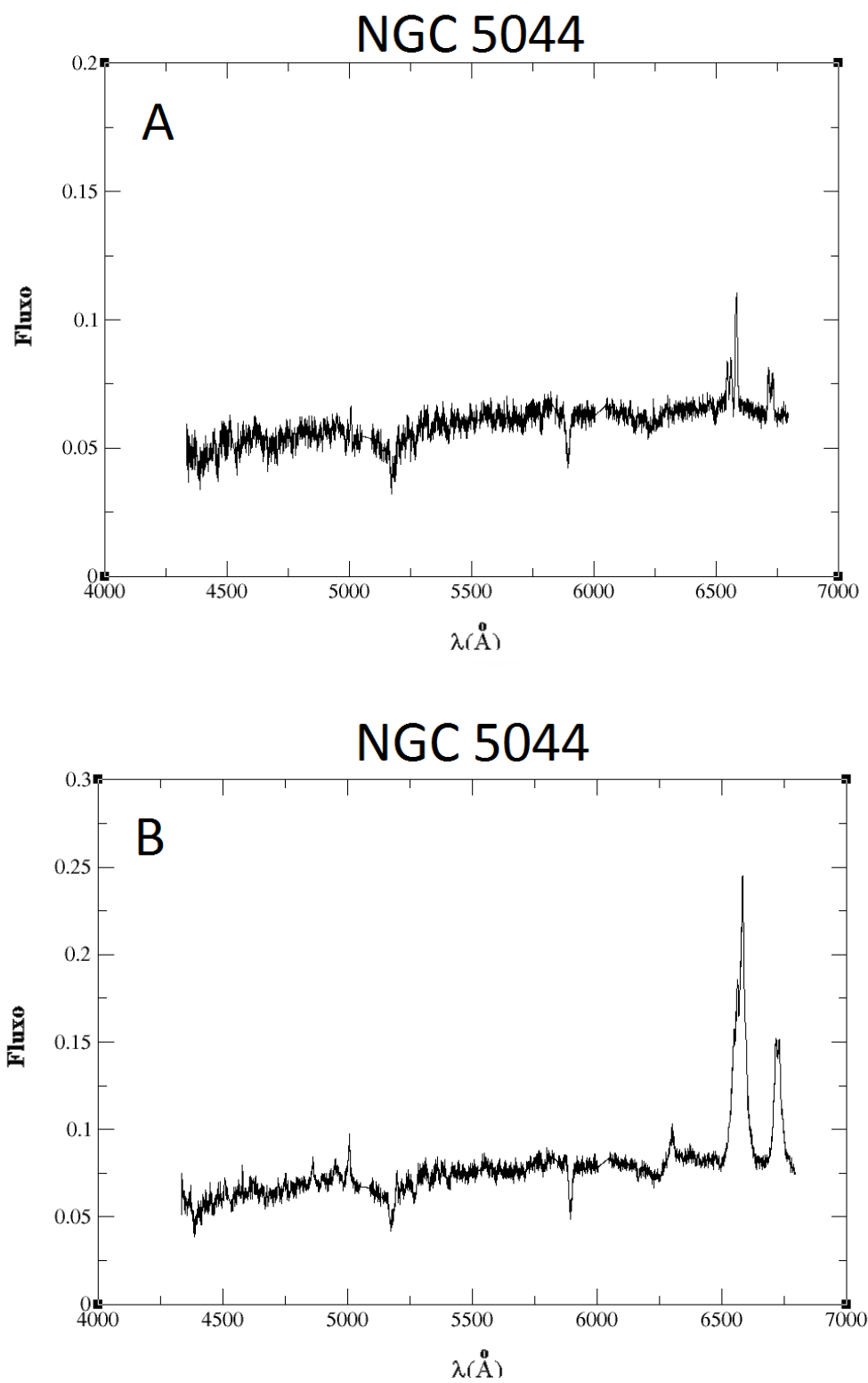


Figura 2.9: Espectros extraídos de NGC 5044 nos pontos A e B identificados na Figura 2.8.

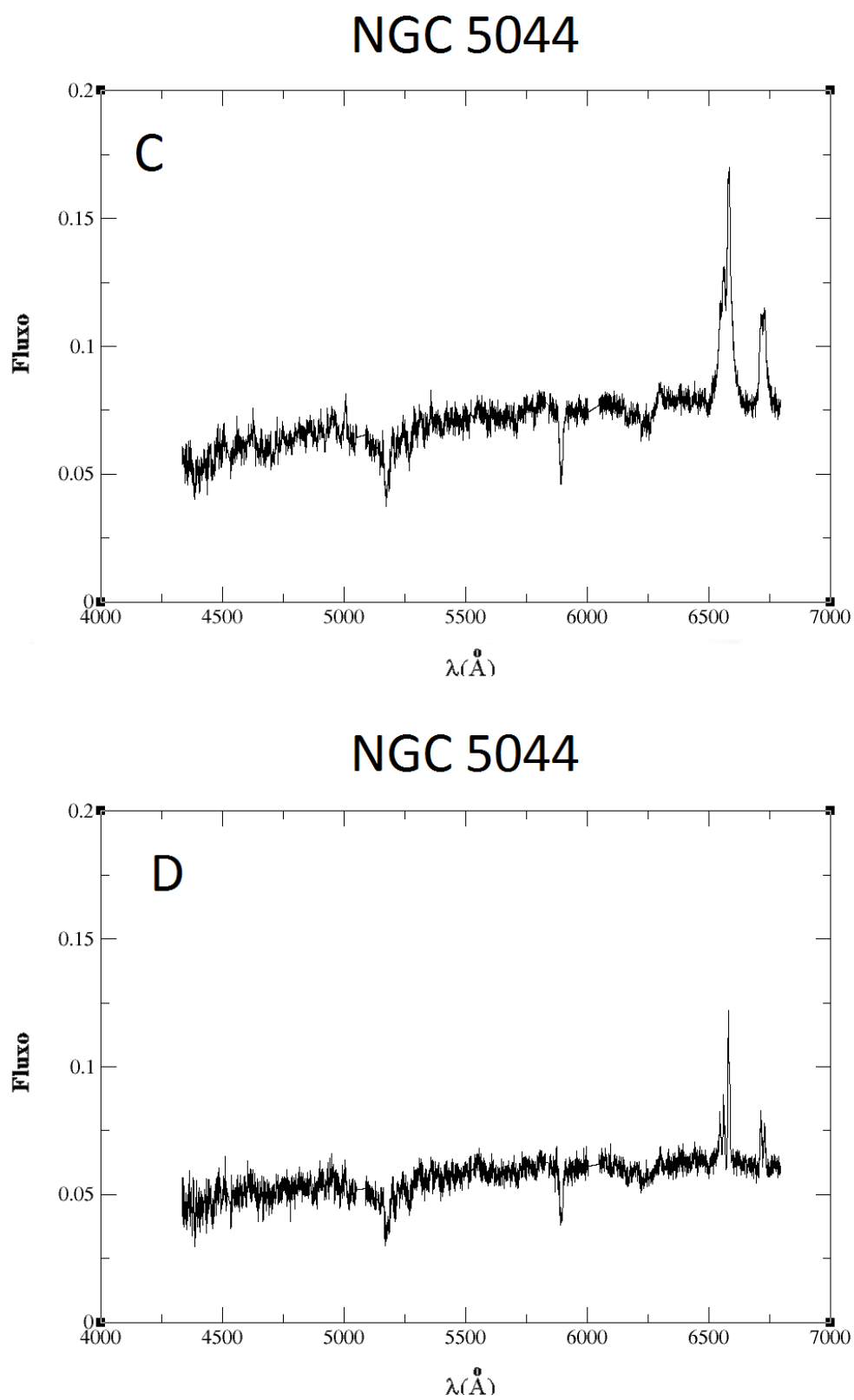


Figura 2.10: Espectros extraídos de NGC 5044 nos pontos C e D identificados na Figura 2.8.

Capítulo 3

População Estelar

3.1 Metodologia

Para compreender a formação e evolução das galáxias é necessário que sejam realizados estudos sobre sua história de formação estelar, já que as idades e metalicidades das estrelas que compõem uma determinada galáxia são importantes para entender sua formação.

Um método de síntese de população estelar comumente utilizado consiste na combinação de diversos espectros de populações estelares simples (SSPs¹) para formar o espectro da população de interesse, permitindo assim, inferir suas propriedades físicas.

Existem basicamente duas abordagens diferentes utilizadas para fazer síntese de SPs (*Stellar Populations*) em espectros integrados de galáxias a partir da combinação de SSPs. O primeiro método consiste em tentar reproduzir o espectro integrado de galáxias, a partir de uma base de espectros estelares ou de aglomerados estelares com idade e metalicidade conhecidas (Bica & Alloin, 1986). Este método possui a vantagem de ser livre de limitações da teoria de evolução estelar, assim como suposições sobre a função inicial de massa (IMF, do inglês *Initial Mass Function*), porém, SPs muito diferentes das dos aglomerados estelares próximos não podem ser sintetizadas.

No segundo método a evolução estelar para as diferentes idades e metalicidades é modelada de forma teórica e em seguida combinam-se os espectros estelares teóricos e/ou empíricos para reproduzir o espectro integrado da SSP. Este método é

¹A população de estrelas mais elementar é chamada de população estelar simples (SSP, do inglês *Simple Stellar Population*) e consiste de estrelas nascidas instantaneamente num mesmo surto de formação estelar, com a mesma composição química inicial. Aglomerados globulares e abertos são objetos observados que apresentam características semelhantes às de uma SSP.

conhecido como síntese evolutiva de população estelar (EPS, Tinsley, 1972, Tinsley & Gunn, 1976, Bruzual & Charlot, 2003, Maraston, 2005, Maraston & Strömbäck, 2011).

A abordagem para a mistura das SSPs pode ser dada combinando-se em diferentes proporções larguras equivalentes de linhas de absorção e fluxos de contínuo em regiões definidas das SSPs e comparar estas grandezas com as medidas no espectro integrado das galáxias (Bica & Alloin, 1986), ou combinando em diferentes proporções as SSPs como um todo e comparando-se o resultado dessas combinações com o espectro integrado da galáxia dentro do intervalo espectral desejado (Cid Fernandes et al., 2005b). Aqui optamos pela técnica de ajuste do espectro inteiro e para tal utilizaremos o código STARLIGHT, que está descrito abaixo.

3.1.1 O código STARLIGHT

Para realizar a síntese de população estelar usamos o código STARLIGHT (Cid Fernandes et al., 2004, 2005b, Mateus et al., 2006, Asari et al., 2007, Cid Fernandes et al., 2009). Essencialmente, o código ajusta um espectro observado, O_λ , com uma combinação em diferentes proporções de N_\star SSPs. A extinção, A_V , é parametrizada pela extinção na banda V e modelada pelo STARLIGHT assumindo uma distribuição uniforme da poeira na linha de visada. O STARLIGHT ajusta todo o espectro, excluindo linhas de emissão e dados espúrios (raios cósmicos, ruído, regiões de bandas telúricas, etc), misturando técnicas computacionais desenvolvidas originalmente para síntese de população semi empírica com ingredientes de modelos de evolução estelar (Cid Fernandes et al., 2004, 2005b). O código encontra um vetor população \mathbf{x} , do qual seus componentes representam uma fração da contribuição de cada SSP da base para o fluxo sintético total em um comprimento de onda de normalização, resolvendo a seguinte equação para um espectro modelo M_λ (Cid Fernandes et al., 2005a):

$$M_\lambda = M_{\lambda_0} \left[\sum_{j=1}^{N_\star} x_j b_{j,\lambda} r_\lambda \right] \otimes G(v_\star, \sigma_\star), \quad (3.1)$$

onde M_{λ_0} é o fluxo sintético no comprimento de onda de normalização, λ_0 , j é a fração de fluxo correspondente à j -ésima população estelar, $b_{j,\lambda}$ é o espectro de j -ésima SSP, o termo $r_\lambda = 10^{-0.4(A_\lambda - A_{\lambda_0})}$ leva em conta os efeitos de extinção por poeira, $G(v_\star, \sigma_\star)$ é uma distribuição Gaussiana usada para modelar os movimentos estelares na linha de visada, a qual é centrada na velocidade v_\star com dispersão σ_\star e o símbolo \otimes representa o operador convolução.

O ajuste final é feito minimizando a equação:

$$\chi^2 = \sum_{\lambda} [(O_{\lambda} - M_{\lambda})w_{\lambda}]^2 \quad (3.2)$$

onde O_{λ} é o espectro observado, M_{λ} o modelado e w_{λ} é o inverso do erro em O_{λ} . As linhas de emissão e contribuições espúrias são excluídas do ajuste fixando $w_{\lambda}=0$.

O ingrediente mais importante na síntese de população estelar é o conjunto de elementos da base de SSPs, esse conjunto de elementos fornece ao STARLIGHT os espectros a serem combinados até ajustar o espectro da fonte. Usamos um conjunto de SSPs retiradas do modelo de Bruzual & Charlot (2003). Estes modelos foram escolhidos por serem os mais adequados para ajustar aos nossos dados, uma vez que eles possuem uma resolução espectral de 3.0 Å, que é próxima a resolução espectral dos nossos dados e oferecem cobertura espectral suficiente (3200–9500 Å). Além disso, eles fornecem um número adequado de SSPs para ter todas as possibilidades de idades e metalicidades encontradas em galáxias. Ainda, decidimos usar os modelos BC03 por serem amplamente usados, permitindo-nos comparações com resultados publicados². Estes modelos são computados usando o código de síntese de isócronas desenvolvido por BC03 e são divididos em 221 espectros com idades entre 0.1 Myr e 20 Gyr para um grande intervalo de metalicidades. Estes modelos usam principalmente as bibliotecas BaSeL 3.1/STELIB, com uma resolução espectral de 3 Å (STELIB) na região óptica. Inicialmente nossa base foi composta de espectros sintéticos de SSPs cobrindo 15 idades ($t = 0.001, 0.003, 0.005, 0.01, 0.025, 0.04, 0.1, 0.3, 0.6, 0.9, 1.4, 2.5, 5, 11$ e 13 Gyr) e três metalicidades ($0.2 Z_{\odot}, 1 Z_{\odot}, 2.5 Z_{\odot}$), resultando em uma base composta por 45 elementos. No entanto, no caso da NGC 5044, notamos que para conseguir ajustar melhor os espectros, afim de minimizar a degenerescência entre idade e metalicidade de diferentes componentes de população, o STARLIGHT pode ter introduzido falsas contribuições de populações muito jovens ($t < 10^7$ anos), por este motivo foi necessário realizar alguns testes com bases compostas por diferentes elementos até identificarmos aquela com resultado mais confiável. Assim, a base final foi selecionada de maneira a ter elementos suficientes, representativos e não degenerados, cobrindo 7 idades ($t = 0.6, 0.9, 1.4, 2.5, 5, 11$ e 13 Gyr) com as metalicidades já mencionadas acima. Nestes ajustes, a resolução espectral dos dados foi remodelada para combinar com os modelos.

²Vale ressaltar que testamos modelos de EPS de outros grupos, como Maraston (2005), BASE GM (Cid Fernandes et al., 2013) e Vazdekis et al. (2010). Os resultados foram todos similares no que diz respeito as idades encontradas, porém produzindo ajustes de menor qualidade quando comparados a BC03.

A lei de extinção utilizada foi a de CCM (Cardelli et al., 1989). Já que estamos ajustando espectro de uma galáxia tipo LINER adicionamos uma *featureless continuum* (FC) em forma de lei de potência ($F_\nu \propto \nu^{-1.5}$) a fim de dar conta de uma possível contribuição não térmica (e.g. Cid Fernandes et al., 2005b, Riffel et al., 2009, e referências contidas neles). Além disso, a partir dos resultados obtidos com o código da síntese, é possível calcular a taxa de formação estelar (SFR) e a extinção visual (A_v) para todos os espectros. A qualidade dos ajustes é medida pelo χ^2 e pelo parâmetro ADEV (que é a porcentagem de desvio médio sobre os pixels ajustados, $|O_\lambda - M_\lambda| / O_\lambda$).

O STARLIGHT ainda nos fornece o espectro cuja mistura melhor se ajustou ao espectro observado. Assim, podemos utilizar este espectro para subtrair os efeitos da população estelar sobre o espectro integrado e analisar o gás livre da contaminação pela população estelar, ver Capítulo 5.

3.2 Resultados e Discussões

Para mapear todo o FoV de nossos dados, o ajuste de população estelar foi realizado para cada um dos spaxels. A região nuclear (200 pc) foi definida como aquela onde uma componente larga foi detectada na emissão de $H\alpha$ (ver Capítulo 4). A seguir apresentamos os resultados obtidos.

A Fig. 3.1 mostra o ajuste do espectro do spaxel nuclear, definido como a localização do pico do contínuo. As linhas de emissão e o ajuste do contínuo final também são apresentados. A porcentagem da contribuição de cada idade (em massa e frações de luz) e FC para o ajuste final são apresentados no painel inferior. Aqui, discutiremos apenas a fração de luz, uma vez que este é o parâmetro que derivamos diretamente e onde as maiores diferenças são observadas (em termos de massa, as frações são obtidas usando a razão M/L para cada SSP, e a emissão é completamente dominada por população de estrelas velhas que tem uma alta M/L).

A qualidade do ajuste sobre todo o FoV pode ser visto na Fig. 3.2 onde os parâmetros ADEV e χ^2 estão mostrados. Nesta figura, mostramos também um mapa da razão sinal ruído (SNR).

A partir deste mapa fica claro que mesmo para as bordas do FoV uma $SNR > 15$ é encontrada. Vale mencionar que de acordo com os testes feitos por Cid Fernandes et al. (2004), para espectros com valores de $SNR > 10$ o código STARLIGHT reproduz corretamente os parâmetros de entrada, produzindo então resultados confiáveis para os ajustes de população estelar. No entanto, a intensidade das linhas de $Mg\lambda 5143$ e

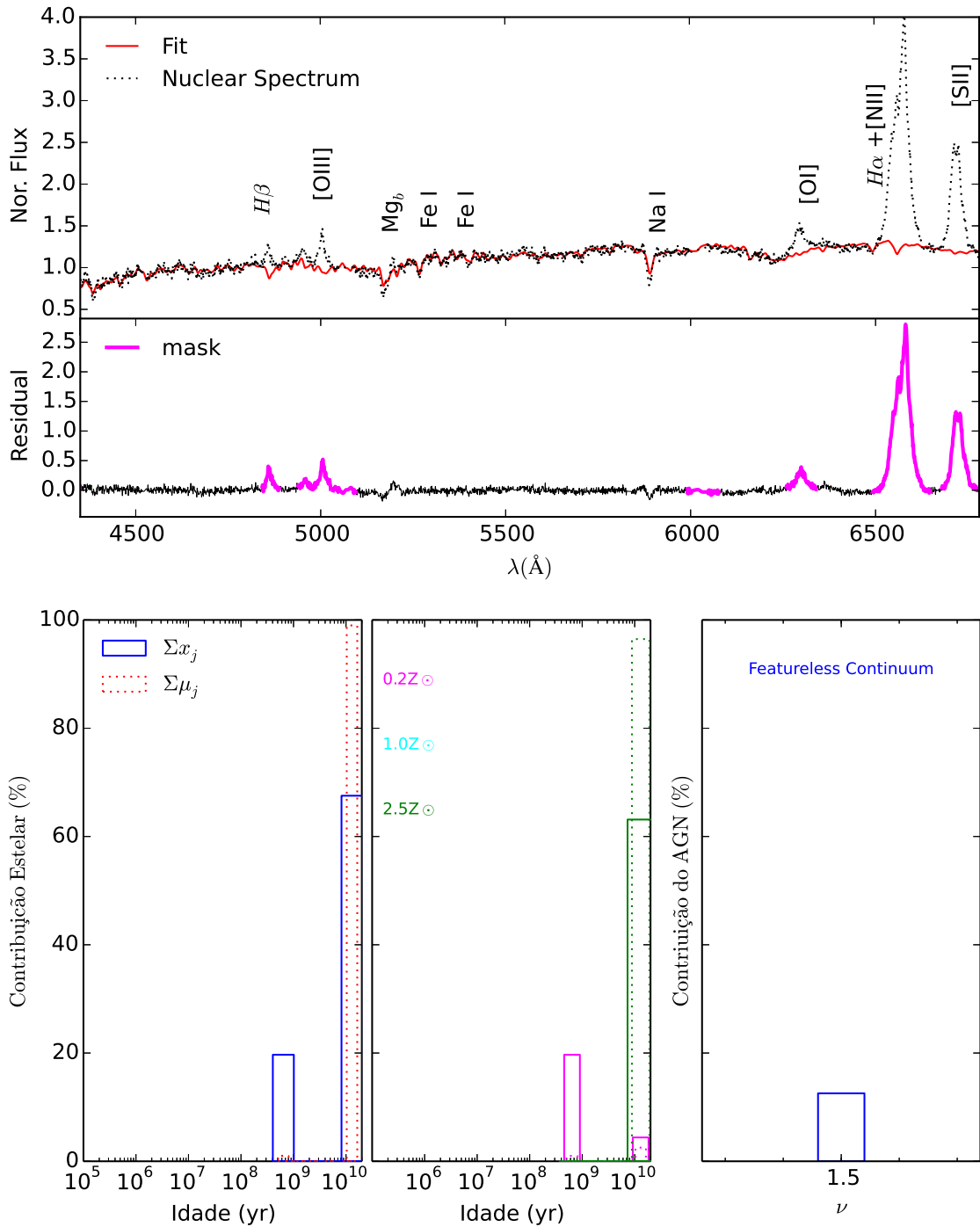


Figura 3.1: Exemplo dos ajustes. Painel superior: os espectros observado e modelado normalizado à unidade em 4755\AA , painel central: espectro residual. As regiões mascaradas estão em magenta e o espectro residual em preto. Abaixo mostramos a contribuição dos vetores de população estelar em frações de luz (x_j , linha sólida) e frações de massa (μ_j , linha tracejada). À esquerda: contribuições com as metallicidades somadas, no centro: contribuições separada por metalicidade, à direita: contribuição da FC.

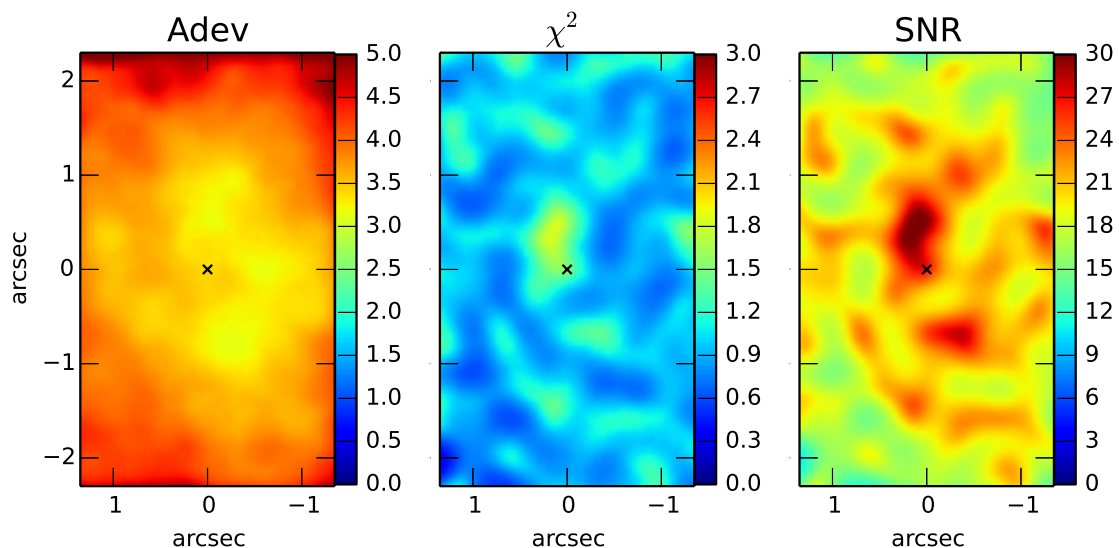


Figura 3.2: Adev, χ^2 e SNR de NGC 5044

Na λ 5894 não são bem reproduzidas por nosso ajuste, possivelmente devido ao fato que os modelos de BC03 não consideram os processos de enriquecimento α . Além disso, o duplete de NaD tem contribuição do meio interestelar (ISM) e portanto, não é corretamente representado pelas SSPs. Devido a isto testamos os ajustes de população estelar em três casos, com e sem remover ambas as linhas de NaD e Mg λ 5143 e removendo apenas o duplete de NaD. Não encontramos nenhuma diferença significativa entre os ajustes. Em todos os casos, menos de 10% da intensidade dessas linhas não foi reproduzido pelo modelo ajustado. Provavelmente o NaD residual visto na Fig. 3.1, se deve à contribuição do ISM presente no núcleo de NGC 5044 (veja p.e. Ferrari et al., 1999). Como discutido em Davis et al. (2012), o desvio para o azul do duplete de NaD fornece uma boa prova de *outflow* do meio interestelar frio. No caso de NGC 5044, não encontramos componentes deste duplete com desvios para o azul em todo nosso FoV, indicando que nesta galáxia, o material frio provavelmente não está em *outflow*. Nossos ajustes resultaram em contribuições de apenas três componentes da base: SSPs com idades 900 Myr ($0.2 Z_{\odot}$) e 13 Gyr (0.2 e $2.5 Z_{\odot}$), mais uma componente de FC. Os mapas 2D para estas três componentes (em frações de luz), junto com a idade média, A_v , FC e metalicidade média são mostradas na Fig. 3.3.

Fica claro a partir desta figura que a luz na região central de NGC 5044 é dominada por uma população estelar velha. Além disso, também está claro que há presença de uma população estelar de idade intermediária (900 Myr) ao redor do núcleo da galáxia. Até onde sabemos, a presença de populações estelares com

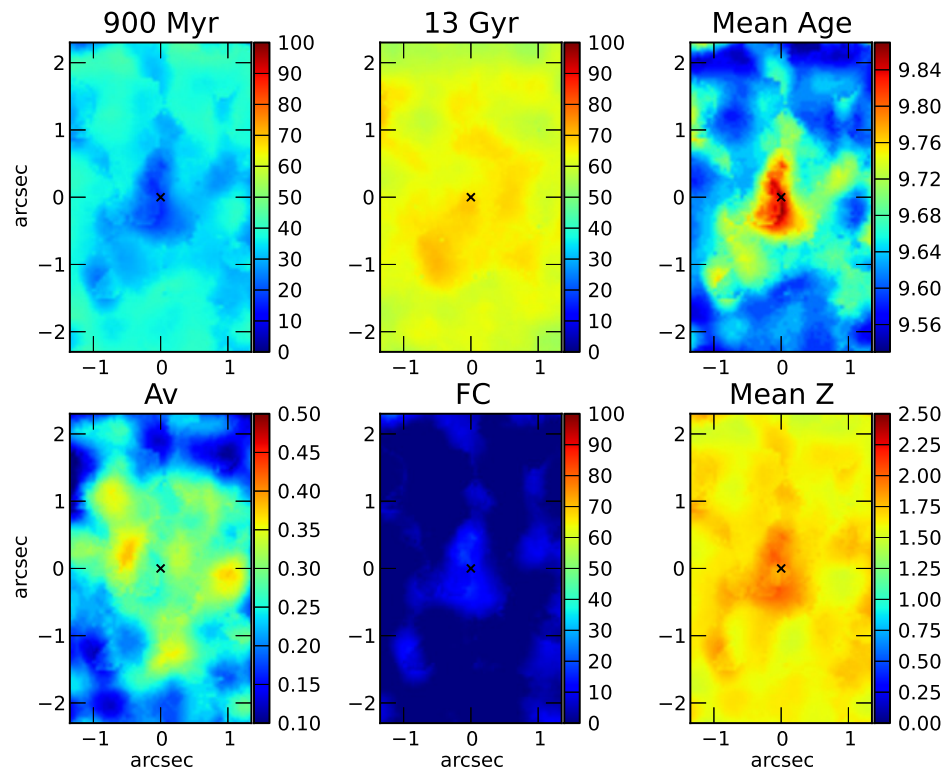


Figura 3.3: O painel superior mostra os mapas de população de NGC 5044 em idade. À esquerda podemos ver a contribuição da população de 900 Myr, no centro vemos a contribuição de população de 13 Gyr e à direita a idade média. O painel inferior mostra o mapa de A_v à esquerda, a contribuição da FC no centro e a metalicidade média (Z) à direita. A escala dos mapas está em segundos de arco e ao lado direito de cada um deles temos a escala de cores, que indica onde há maior ou menor concentração de determinada população.

essas idades (900 Myr) na região nuclear de galáxias elípticas não é comum. Por exemplo, em um estudo extensivo de população estelar realizado com dados de grande campo do CALIFA survey, González Delgado et al. (2015) encontraram que na média as galáxias S0 e E tem uma população estelar dominante com praticamente a mesma idade e elas são mais velhas que aquelas encontradas em espirais. Ainda, eles relataram que para galáxias elípticas há uma pequena variação na idade estelar ao longo do raio da galáxia (de 10^{10} a $10^{9.7}$ anos a partir do centro até 3 vezes o raio efetivo da galáxia) (ver figura 17 de González Delgado et al., 2015). As diferenças entre os resultados encontrados por González Delgado et al. (2015) e os nossos podem ser devido a resolução espacial e espectral fornecida pelo GEMINI GMOS. Até onde sabemos, por enquanto a presença de populações estelares circumnuclear espacialmente resolvidas com idade intermediária, como encontramos em NGC5044, foi reportada em bojos de galáxias espirais Seyfert (Riffel et al., 2010, 2011, Storchi-Bergmann et al., 2012).

Os mapas de idade e metalicidades médias mostram uma tendência consistente com uma população estelar tornando-se mais rica em metal e mais velha com a diminuição da distância em relação ao centro da galáxia. Alguns estudos tem mostrado que a população estelar em galáxias *early type* também ficam progressivamente mais rica em metal e mais velha com o aumento da dispersão de velocidade (Thomas et al., 2005, Clemens et al., 2006, 2009). De fato, encontramos altos valores de σ na região central de NGC 5044 ($> 300 \text{ km s}^{-1}$, ver Figura 4.4-e), então nosso resultado apoia ainda mais os resultados encontrados por estes autores. Além disso, nossos resultados de população estelar estão de acordo com os resultados encontrado por Rickes et al. (2004), que realizaram síntese de população usando dados ópticos de fenda longa em uma escala espacial muito maior que a nossa. Estes autores usaram duas bases de SSPs, uma delas com três componentes de metalicidades $[Z/Z_{\odot}] = 0, -0,4$ e $-1,1$ e idade = 10^{10} anos; e a outra base com metalicidade solar e idades (anos) = 10^{10} , 10^8 e 10^6 . Eles notaram que havia uma melhora no ajuste quando consideravam diferentes metalicidades sobre diferentes idades. Sendo que, a componente mais metálica ($[Z/Z_{\odot}] = 0$) dominava a região central da galáxia e sua contribuição decaía em regiões externas, enquanto as outras duas componentes, com metalicidades $[Z/Z_{\odot}] = -0,4$ e $[Z/Z_{\odot}] = -1,1$ se concentravam nas regiões externas. Eles também sugerem que deveria haver uma componente não térmica devido ao alto valor da $[\text{N II}]/\text{H}\alpha$, possivelmente um LINER. Esta relação apresenta valores menores nas regiões externas ao núcleo, sendo necessária portanto, uma fonte de ionização adicional na região externa, como choques ou estrelas quentes pós-AGB, para justificar

os valores encontrados.

Resultados da literatura sobre o conteúdo estelar de NGC 5044, como os apresentados por Werner et al. (2014) baseados nos dados do GALEX e WISE, relatam uma taxa de formação estelar incomum em NGC 5044 ($\text{SFR} = 0.073 M_{\odot}$ por ano, usando uma região de 10 kpc, sobre o último 1 Gyr). De fato, David et al. (2014) acreditam que as linhas de PAHs incomuns encontradas em NGC 5044 (Vega et al., 2010) e a incerteza na idade estelar (Marino et al., 2011) são consequências de episódios de formação estelar que teriam ocorrido no último bilhão de anos. Estes resultados são corroborados pelo que encontramos, que há uma contribuição significativa de uma população estelar de 900 Myrs, distribuída ao longo do centro da galáxia e alcançando valores de $\sim 50\%$ ao redor da região nuclear. Além disso, na região nuclear da galáxia há indícios de excesso de elementos α em relação ao ferro, e isso sugere que podem ter ocorrido explosões de supernovas tipo II nessa região (Rickes et al., 2004, David et al., 2014). Encontramos também uma contribuição de FC de aproximadamente 20% no centro da galáxia. Esta componente é consistente com o cenário onde o gás na região nuclear é ionizado por um AGN de baixa luminosidade. No entanto, também encontramos uma contribuição significativa de FC nas regiões externas. Uma vez que esta componente é degenerada com uma população estelar jovem avermelhada, interpretamos esta contribuição como estando relacionada com o fato dos modelos BC03 não incluírem as estrelas do ramo horizontal azul, e o ajuste do STARLIGHT tende a escolher uma população jovem para mimetizar essa população azul (para detalhes ver Cid Fernandes & González Delgado, 2010).

O mapa de extinção visual (A_V) mostra um claro obscurecimento no centro da galáxia, alcançando 0,35 mag e decaindo a 0,1 mag na região externa. Ferrari et al. (1999) encontraram uma extinção média $A_V = 0.01$ (mag) dentro de uma região de $10''$, a qual é aproximadamente duas vezes o tamanho da nossa região. A partir deste A_V , eles estimaram uma massa de poeira em torno de $10^4 M_{\odot}$ distribuída irregularmente na região dentro de $10''$. Ainda, uma massa de poeira quente de $67 M_{\odot}$ foi determinada por Ferrari et al. (2002) usando dados de Mid-IR.

Para entender melhor os resultados encontrados aqui e na literatura é necessário estudar também o gás presente na galáxia. Assim, no Capítulo 4 apresentamos a análise da cinemática do gás presente na NGC 5044.

Capítulo 4

Cinemática do gás ionizado

A fim de mapear a cinemática do gás medimos a velocidade centroide (daqui em diante campo de velocidade, v_r) e a dispersão de velocidade (σ_{v_r}) a partir do cubo de dados sem a subtração da contribuição da população estelar, pois os modelos de população estelar tem resolução ligeiramente menor que nosso cubo de dados e esta diferença poderia afetar a precisão na determinação das velocidades. Utilizamos um código de ajuste interno (Hernández-Jiménez et al. - em preparação) para ajustar funções Gaussianas aos perfis de linhas de emissão. Ajustamos componentes com uma ou múltiplas Gaussianas ao espectro a fim de obter o fluxo de cada linha de emissão. A linha do pseudo-contínuo é ajustada linearmente usando região de bandas laterais, livre de assinaturas de emissão ou absorção, o mais próximo possível da linha de emissão. A incerteza associada as medidas do campo de velocidade (δ_{v_r}), em uma dada linha em λ_0 , depende implicitamente do erro do pico da Gaussiana do centroide, (δ_{λ_0}). Então, fizemos uma propagação de erro a partir da expressão básica do pico da Gaussiana centroide (λ_0) para calcular δ_{v_r} . Derivamos a seguinte expressão:

$$\delta_{v_r} = \frac{c}{\lambda_0} \delta_{\lambda_0}; \quad \delta_{\lambda_0} = \frac{I_0 \sqrt{N}}{F_\lambda} \delta_\lambda, \quad (4.1)$$

onde I_0 é a intensidade no máximo da Gaussiana ajustada, N é o número de pixels, F_λ é o fluxo da linha, e δ_λ é o erro da dispersão espectral obtida a partir do FWHM (1,7Å) da lâmpada CuAr. O mapa de erro δ_{v_r} da linha de H α é apresentada no painel (d) da Fig. 4.4, onde podemos ver que as incertezas no campo de velocidade na região nuclear são menores que 10 km s⁻¹, enquanto na borda do cubo de dados (onde a SNR é menor), o erro é ~ 20 km s⁻¹.

Para estudar a componente cinemática do gás ionizado na região circumnuclear

de NGC 5044, por meio de modelos de campo de velocidade obtivemos um mapa de canais de velocidade entre -431 km s^{-1} e $+489 \text{ km s}^{-1}$ relativo a velocidade sistêmica da galáxia (ver Capítulo 5 e Tabela 6.1), em fatias de velocidade de 80 km s^{-1} (Figura 4.1). Identificamos nos canais de velocidade negativa -180 km s^{-1} , uma estrutura brilhante ao NE, nomeada como região 1, e uma fraca estrutura (region 2) ao oeste, a qual é também observada no canal de -96 km s^{-1} . Nos mapas de canais positivos a estrutura mais evidente foi nomeada região 3 e está localizada ao Sul, no canal de 70 km s^{-1} . Há também uma estrutura filamentar, região 4, localizada ao norte entre 405 e 489 km s^{-1} . Comparando estas estruturas de gás ionizado com as de gás molecular identificadas por David et al. (2014) usando observações do ALMA, encontramos que o pico mais brilhante localizado ao NE do canal de velocidade de -180 km s^{-1} coincide com a nuvem em aproximação 13, enquanto o filamento sul no canal de velocidade de 70 km s^{-1} coincide com a nuvem 18 de gás molecular em afastamento (ver Figura 4.2). Em ambas as regiões foram encontradas evidência que o gás molecular está caindo em direção ao centro da galáxia (David et al., 2014). Por outro lado, destacamos que a região central aparece em todos os canais de velocidade, indicando a presença de uma componente nuclear alargada com FWHM $\sim 3000 \text{ km s}^{-1}$, típico de AGN.

Ajustamos o complexo $[\text{NII}]+\text{H}\alpha$ na região nuclear com seis gaussianas, cinco correspondendo às componentes estreitas das linhas $[\text{NII}]\lambda 6548$, $\text{H}\alpha$, $[\text{NII}]\lambda 6583$, $[\text{SII}]\lambda\lambda 6717,31$ e uma para a componente alargada de $\text{H}\alpha$. Restringimos as componentes estreitas aos mesmos *redshift* e FWHM para todas as linhas, e fixamos $[\text{NII}]\lambda 6583/[\text{NII}]\lambda 6548 = 3.1$ (Osterbrock & De Robertis, 1985). O ajuste da sexta componente foi realizado com os parâmetros livres, e resultou em um grande valor de FWHM ($\sim 3000 \text{ km s}^{-1}$), assim, associamos essa componente à emissão alargada de $\text{H}\alpha$. Para reproduzir corretamente o perfil de linhas das regiões externas (1, 2, 3 e 4), foram necessários 2 conjuntos de gaussianas, com as mesmas restrições citadas acima, mas cada conjunto com seus próprios valores de *redshift* e FWHM. Consideramos apenas linhas com SNR maior que 3σ do contínuo ajustado (ver Fig. 4.3). Além disso, notamos que o segundo conjunto de Gaussianas está desviado para o azul em relação ao primeiro conjunto. Os perfis ajustados das linhas $[\text{NII}]+\text{H}\alpha$ e $[\text{SII}]\lambda\lambda 6717,31$, obtidos com aberturas de $0,7''$, são apresentados na Figura 4.3.

Na Tabela 4.1 mostramos os valores obtidos para cada ajuste, onde V_c é o pico de velocidade da linha, e $|\Delta V|$ é o desvio entre os conjuntos de linhas. A diferença em velocidade entre os conjuntos para a região 2 é 407 km s^{-1} (a maior de todas). Ressaltamos que esta região é próxima ao núcleo. A diferença de velocidade para

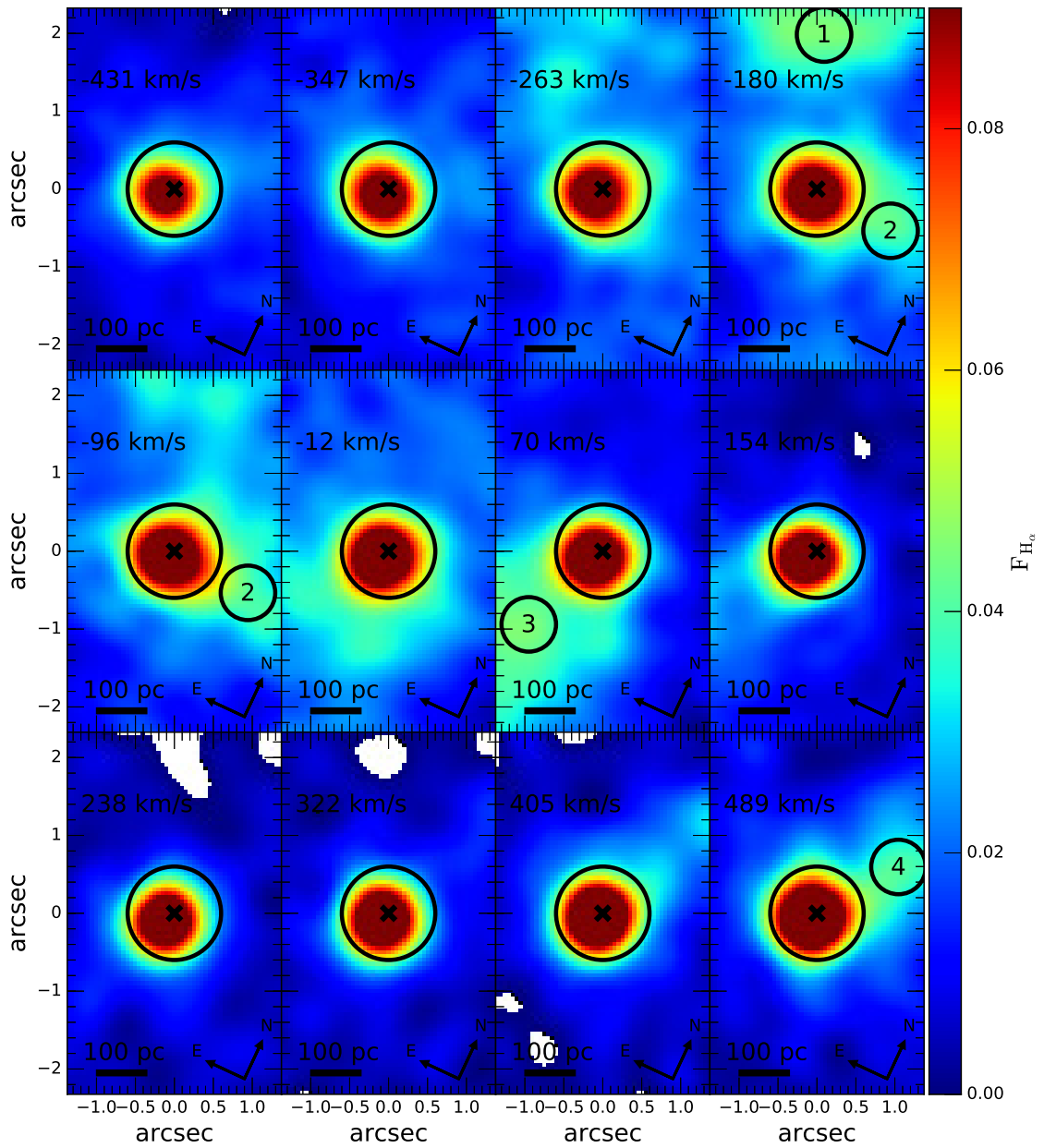


Figura 4.1: Canais de velocidade ao longo da emissão de H α em passos de ~ 80 km s $^{-1}$ centrados na velocidade indicada em cada painel. As intensidades são representadas em escala de cor à direita em unidades de fluxo de 10^{-15} erg cm $^{-2}$ s $^{-1}$.

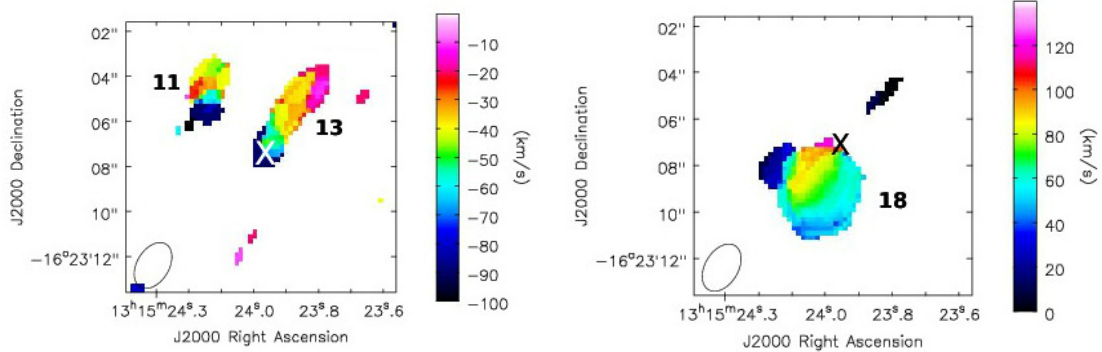


Figura 4.2: Mapa de velocidade média de CO(2-1). À esquerda são identificadas as núvens 11 e 13 e à direita a núvem 18. O "X" marca o centro do contínuo da fonte. Figuras retiradas de David et al. (2014).

as regiões 3 e 4, são $\sim 300 \text{ km s}^{-1}$. O segundo conjunto de linhas para a região 1 está desviado para o vermelho com respeito ao primeiro conjunto em aproximadamente 200 km s^{-1} . A Figura 4.3 também mostra o perfil de linhas para a região nuclear, onde a componente larga de $H\alpha$ está desviada 558 km s^{-1} para o azul em relação a componente estreita. O FWHM dessas componentes são $\sim 1080 \text{ km s}^{-1}$ e $\sim 3000 \text{ km s}^{-1}$, respectivamente. Está claro a partir desta figura, que as regiões 2 e 4 apresentam um FWHM mais largo que as regiões 1 e 3. Além disso, eles mostram uma fraca asa vermelha no complexo $[\text{NII}]+H\alpha$ (muito próximo aos 3σ do limite de detecção). Não temos uma explicação muito clara para esta componente, no entanto, especulamos que esta componente fraca é muito provavelmente originada a partir de material *outflowing* do AGN, uma vez que estas duas regiões são próximas ao centro da galáxia. Resultados similares foram encontrados para outras galáxias *early type*, por exemplo, Ricci et al. (2014a) ajustaram dois conjuntos de Gaussianas às linhas de emissão nos 100 pc mais internos de 10 galáxias *early type* e encontraram que para sete destas galáxias um dos conjuntos tem $\text{FWHM} > 390 \text{ km s}^{-1}$ e o outro (o qual corresponde a componente larga de $H\alpha$) tem $\text{FWHM} > 2000 \text{ km s}^{-1}$. Em resumo, isto indica que há três componentes cinemáticas que discutiremos nos Capítulos 5 e 6. Os mapas de dispersão e de campo de velocidade medidos em $H\alpha$ são apresentados na Figura 4.4. Eles foram obtidos do ajuste de uma única componente para cada linha de emissão sobre todo o FoV, exceto para a região nuclear onde uma componente muito alargada foi adicionada.

Analisando o mapa de campo de velocidade (Figura 4.4a), encontramos evidência de gás rotacionando e de assimetria no campo de velocidade, esta assimetria pode

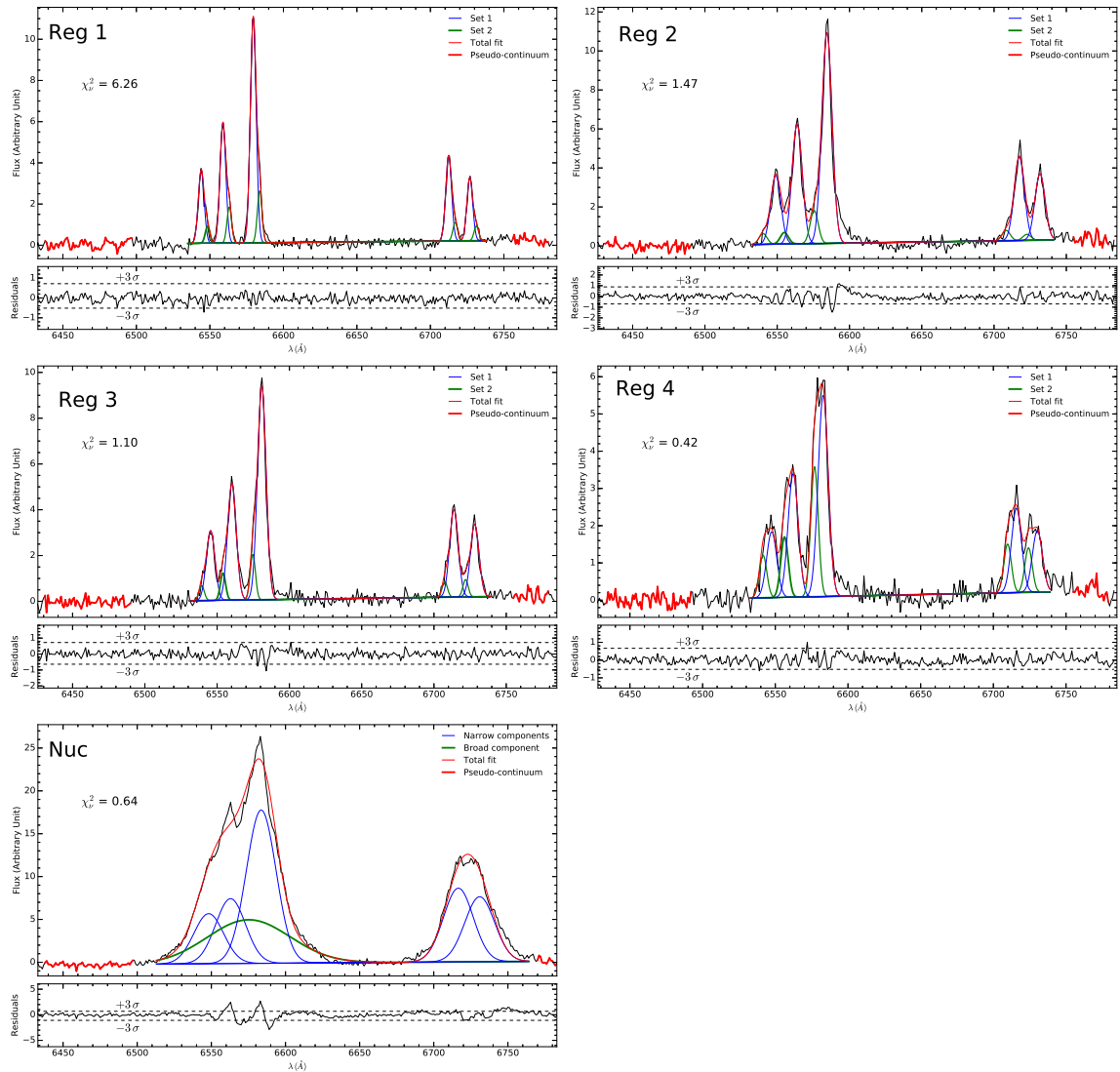


Figura 4.3: Perfis de linha de [NII] λ 6548, H α , [NII] λ 6583, [SII] $\lambda\lambda$ 6717,31 obtidos em aberturas de $\sim 0,7''$. O perfil da abertura nuclear mostra as componentes com FWHM ~ 1080 km s $^{-1}$ e uma componente alargada de H α (FWHM ~ 3000 km s $^{-1}$). Os perfis de linhas obtidos nas outras regiões são compostos por dois conjuntos de linhas estreitas (FWHM < 400 km s $^{-1}$).

Tabela 4.1: Resultados para os ajustes de perfis Gaussianos medidos para a linha de emissão de $H\alpha$ nas regiões selecionadas

Região	Set	FWHM (km s^{-1})	V_c (km s^{-1})	$ \Delta V $ (km s^{-1})
1	1	215 ± 28	-178 ± 34	196 ± 50
	2	172 ± 25	18 ± 37	
2	1	376 ± 40	46 ± 25	407 ± 37
	2	301 ± 35	-361 ± 28	
3	1	323 ± 36	-119 ± 28	283 ± 44
	2	194 ± 27	-402 ± 35	
4	1	376 ± 40	-23 ± 25	274 ± 39
	2	280 ± 33	-297 ± 30	
Nuc	Estreita	1076 ± 68	5 ± 15	558 ± 17
	Larga	3001 ± 113	562 ± 9	

ser devida aos movimentos não rotacionais de estruturas filamentosares observadas nesta galáxia (ver seção 6.1). A rotação se dá com o lado que se afasta ao sul e o que se aproxima ao norte. O valor de aproximação máxima é -120 km s^{-1} em 200 pc e o de afastamento é 200 km s^{-1} em 100 pc. A linha dos nodos encontra-se no PA 152° . O mapa da dispersão de velocidade de $H\alpha$ corrigido por alargamento instrumental (σ , Figura 4.4e), mostra um grande intervalo de valores (com uma incerteza média constante de 4 km s^{-1}) por todo o FoV, de 100 km s^{-1} até 600 km s^{-1} , o pico da distribuição tem um deslocamento de ~ 30 pc para SE com relação ao centro fotométrico, marcado com um símbolo “x” em todos os mapas. Duas regiões diferentes podem ser claramente distinguidas da distribuição dos valores de σ . A primeira é a região nuclear, que mostra um gradiente de 300 km s^{-1} até 600 km s^{-1} . A segunda região apresenta uma distribuição em forma de pombo dos valores de σ entre 150 e 300 km s^{-1} , com as “asas” nas direções leste e norte e o “corpo” na direção SW. Notamos que, no resto do FoV, o campo de velocidade e a dispersão de velocidade têm valores similares (100 km s^{-1}).

Assim, mapeamos a cinemática do gás ionizado e partimos para o próximo passo, que é identificar os mecanismos de ionização deste gás. No capítulo seguinte apresentamos os resultados do estudo do gás livre de contaminação da população estelar.

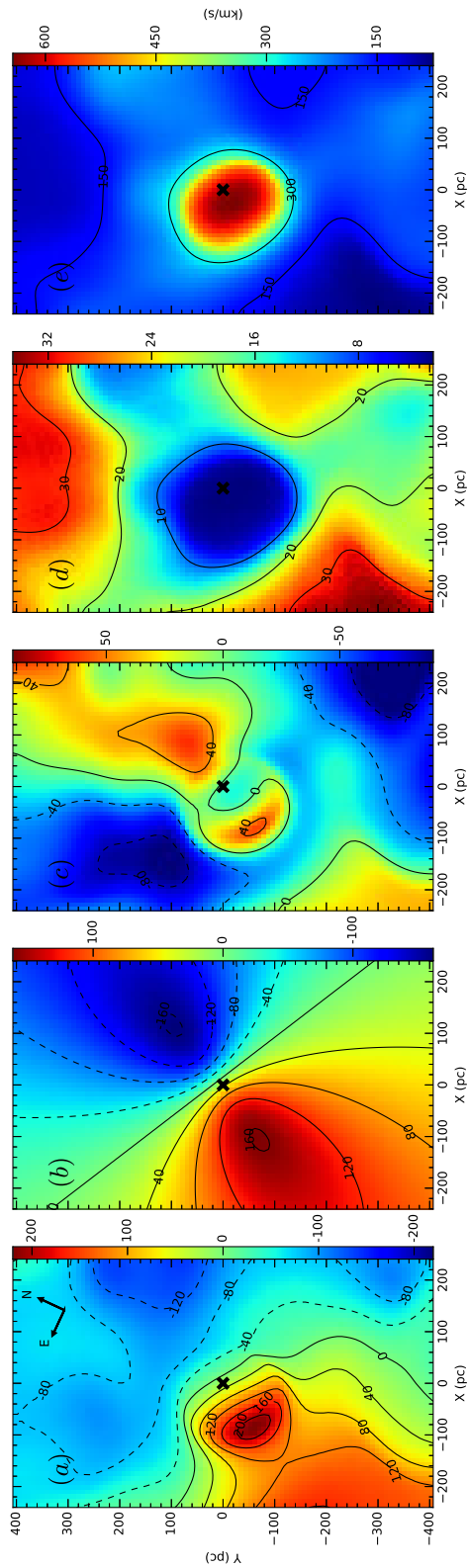


Figura 4.4: Da esquerda para direita os painéis mostram: (a) o mapa de velocidade radial com iso-velocidades, (b) o melhor modelo ajustado; (c) o mapa residual de velocidades; (d) mapa de erro do campo de velocidade δ_{v_r} , e (e) o mapa de dispersão de velocidade (σ). O centro fotométrico da galáxia está marcado com o símbolo “x” em todos os mapas, e foi definido como o pico da emissão do contínuo em 4755 Å.

Capítulo 5

Distribuição do gás ionizado e os mecanismos de ionização

Os resultados dos ajustes individuais obtidos por meio da síntese estelar pode ser subtraído spaxel-a-spaxel, nos deixando com um cubo de dados residual limpo, livre de assinaturas de absorção de população estelar (ver painel inferior de Figura 3.1), portanto, nos permitindo estudar a componente de emissão puramente de gás. Para medir o fluxo das linhas de emissão utilizamos o mesmo método descrito no Capítulo 4. A Figura 5.1 apresenta a distribuição de fluxo do gás ionizado para as seguintes linhas de emissão: fluxo total de $H\alpha$, $[\text{NII}]\lambda 6583$, $[\text{SII}]\lambda 6717 + \lambda 6731$ e $[\text{OIII}]\lambda 5007$. No kpc mais interno de NGC 5044, a distribuição do gás é irregular. Os mapas de fluxo para as linhas de emissão $[\text{NII}]$ e $[\text{SII}]$ mostram que suas emissões são mais concentradas no núcleo e indicam uma preferência de distribuição ao longo da direção norte-sul, enquanto os mapas de $[\text{OIII}]$ mostram emissão por todo FoV, com regiões de maior intensidade estendida ao longo da direção leste-oeste. A distribuição de fluxo para outras linhas de emissão detectadas em nossos dados ($H\beta$, $[\text{OIII}]\lambda 4959$ e $[\text{OI}]\lambda 6300$) tem SNR menor e são mostradas por completeza.

Dos mapas de fluxo, derivamos os seguintes valores para as razões de linhas de emissão: $0.1 < \log ([\text{NII}]\lambda 6583/H\alpha) < 0,5$; $-0,05 < \log ([\text{SII}]\lambda\lambda/H\alpha) < 0,5$ e $-0,4 < \log ([\text{OIII}]\lambda 5007/H\beta) < 0,5$, que são razões típicas de objetos com emissão tipo LINER (Heckman, 1980, Ho, 1999, 2008).

O mecanismo dominante de ionização/excitação do gás em NGC 5044 ainda é controverso. De acordo com Macchetto et al. (1996) os espectros observados podem ser explicados por estrelas pós-AGB, enquanto Rickes et al. (2004) sugere que os espectros tem contribuições de um LLAGN na região nuclear mais estrelas pós-AGB nas partes externas.

A fim de estudar o mecanismo de ionização dominante nas linhas de emissão do gás em NGC 5044, construímos diagramas de diagnóstico usando as razões de linhas de emissão mencionadas anteriormente. Os diagramas de diagnóstico para a região nuclear e para as regiões 1 a 4 estão mostrados nas Figuras 5.2 e 5.3, respectivamente.

Nos diagramas de diagnóstico, para discriminar os diferentes mecanismos de ionização, adicionamos a linha teórica “*maximum starburst*” de Kewley et al. (2001, daqui em diante KW01) e a linha teórica de Kewley et al. (2006, daqui em diante KW06) separando as galáxias puramente de formação estelar, Seyferts, LINERs e galáxias compostas. A linha empírica dividindo as galáxias de formação estelar e os objetos compostos de Kauffmann et al. (2003, daqui em diante KF03) também foi incluída. Uma vez que choques podem explicar os espectros tipo LINER (Dopita & Sutherland, 1995, Heckman, 1980, Dopita et al., 2015), adicionamos também aos diagramas de diagnóstico modelos de choque calculados usando o código para choques e fotoionização MAPPINGS III de Allen et al. (2008). Estes modelos de choque incluem um conjunto de abundâncias químicas, densidades pré-choque de 0,01 a 1000 cm^{-3} , velocidade até 1000 km s^{-1} , campos magnéticos de 10^{-10} a 10^{-4} G, e parâmetros magnéticos ($B/n^{1/2}$) de 10^{-4} a $10 \mu\text{G cm}^{3/2}$. Já que, a densidade eletrônica (n_e) do material pré-choque é uma importante quantidade física que afeta a emissão do espectro em choques radiativos, estimamos n_e usando a razão das linhas de emissão $[\text{SII}]\lambda\lambda 6717\text{\AA}, 6731\text{\AA}$ (Osterbrock & Ferland, 2006, Panuzzo et al., 2011) medida nas regiões 1 a 4. Encontramos que a densidade eletrônica varia entre $35 < n_e < 200$, o menor valor corresponde a região 4, enquanto o maior valor foi encontrado na região 3, portanto adotamos um valor médio de $n_e=100 \text{ cm}^{-3}$.

Os modelos consistentes com nossos dados observacionais são aqueles de choque sem precursor, com metalicidade solar e com densidade pré-choque de $n_e=100 \text{ cm}^{-3}$. Na Figura 5.2 mostramos as razões obtidas para todos os spaxels ao longo do FoV (amarelo) e destacamos aqueles da região nuclear (preto). Está claro que a região nuclear apresenta alguma discrepância com respeito a região circumnuclear, sugerindo uma mistura de mecanismos de ionização, uma vez que os círculos pretos estão na região de LINER, enquanto a região circumnuclear (amarelo) cai na zona de choque. Além disso, investigamos em detalhe o mecanismo de ionização das regiões selecionadas 1, 2, 3 e 4 identificadas nos mapas de canais de velocidade (Figura 4.1). Para cada uma dessas regiões construímos diagramas de diagnóstico envolvendo as razões de linhas $[\text{OIII}]/\text{H}\beta \times [\text{SII}]/\text{H}\alpha$ e $[\text{OIII}]/\text{H}\beta \times [\text{NII}]/\text{H}\alpha$ (Figura 5.3).

Para os diagramas de diagnóstico usando a razão de $[\text{SII}]/\text{H}\alpha$ (que é mais

sensível a choques), encontramos velocidades de choques $> 550 \text{ km s}^{-1}$, enquanto os modelos de choques para $[\text{NII}]/\text{H}\alpha$ não são capazes de prever os valores observados para as regiões 1, 3, e 4. No entanto, a região 2 pode ser explicada por modelos com velocidades de $\sim 400 \text{ km s}^{-1}$ para a razão $[\text{NII}]/\text{H}\alpha$. Os resultados acima sugerem que o mecanismo de ionização dominante nas regiões identificadas é compatível com ondas de choque com velocidades $> 550 \text{ km s}^{-1}$ (para a razão $[\text{SII}]/\text{H}\alpha$) movendo-se em um ambiente com densidade de $n_e = 100 \text{ cm}^{-3}$. Portanto, no kpc mais interno desta galáxia há dois mecanismos de ionização acontecendo: no centro ($\sim 200 \text{ pc}$) as linhas de emissão são dominadas por fotoionização devido a um LLAGN, enquanto na região circumnuclear a emissão do gás pode ser dominada por choques. Além disso, estes resultados estão em acordo com o fato de encontrarmos uma fração significativa de FC na região central (ver Figura 3.1) e com a componente alargada que encontramos para $\text{H}\alpha$ (ver Figura 4.3-Nuc), que indica a presença de um AGN.

Até aqui mapeamos tanto a população estelar da NGC 5044, quanto o seu gás ionizado, e também apontamos os possíveis mecanismos de ionização deste gás. No Capítulo 6, apresentamos uma modelagem da cinemática do gás ionizado e os valores estimados da massa do buraco negro hospedado por esta galáxia.

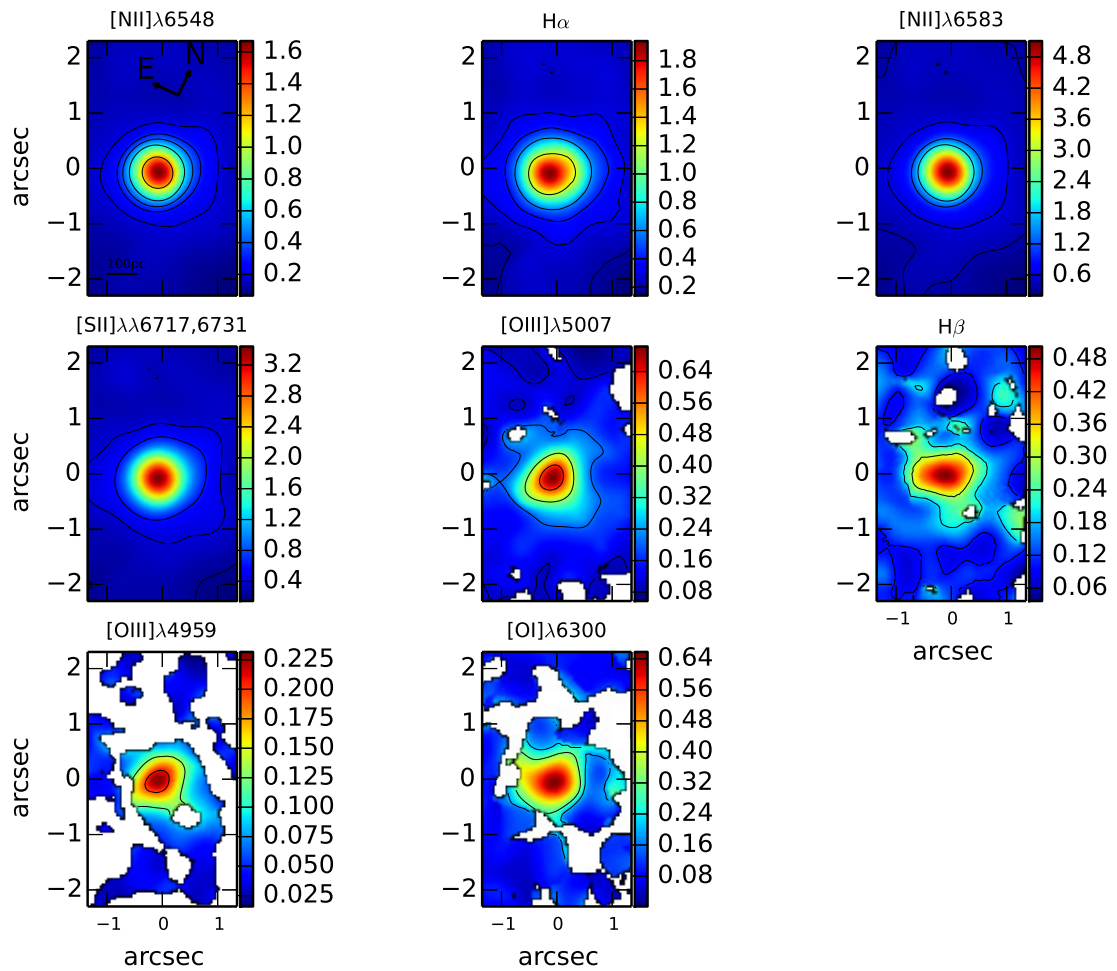


Figura 5.1: Distribuição do fluxo das linhas de emissão medidos nos espectros livres da contribuição estelar. A barra de cor mostra o intervalo dos valores de fluxo expressos em unidades de $10^{-15} \text{ erg cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$.

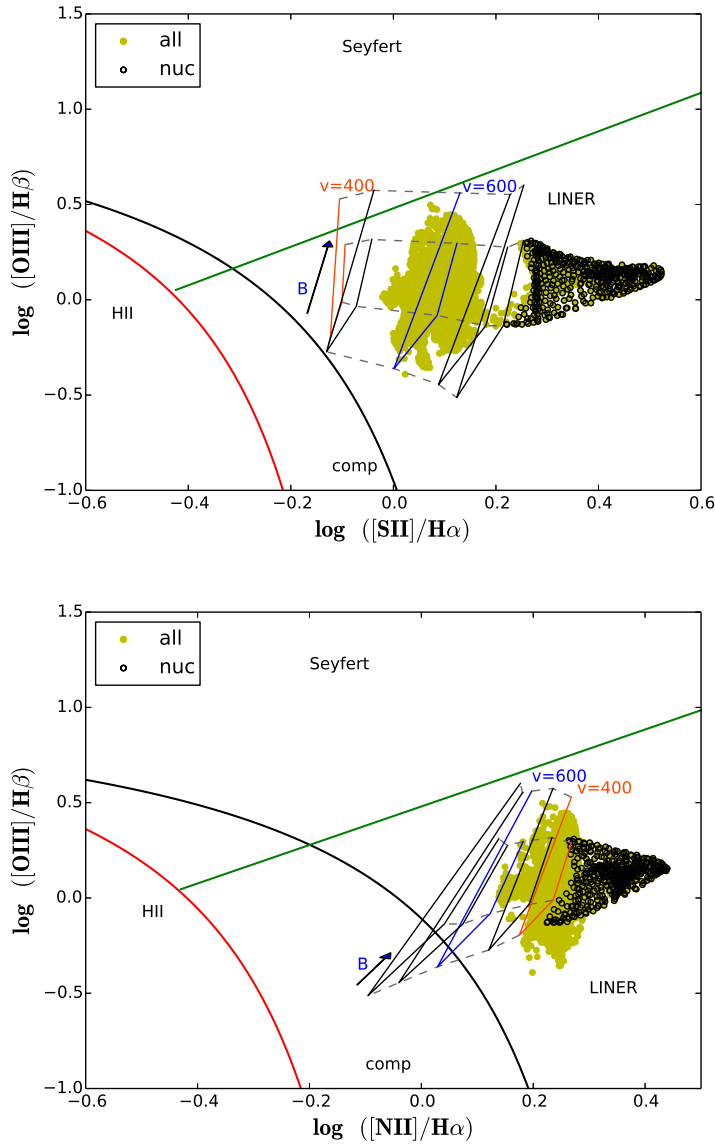


Figura 5.2: Diagramas de diagnóstico para região nuclear. Os pontos amarelos mostram as razões de linhas para todos os spaxels. A região nuclear (~ 200 pc) é apresentada em pontos pretos. As linhas preta (KW01), vermelha (KF03) e verde (KW06) são as separações entre LINERs, Seyfert e *Starbursts* derivadas empírica e teoricamente. As linhas sólida e tracejada são grids do modelo de choques de Allen et al. (2008). O grid tem as velocidade de choque (linha sólida) graficadas em passos de 50 km s^{-1} , no intervalo de 200 km s^{-1} a 1000 km s^{-1} . Os parâmetros magnéticos (linhas tracejadas) são graficados com valores 10^{-4} ; 0,5; 1,0; 2,0; 3,23; 4,0; 5,0; e $10,0 \mu\text{G cm}^{3/2}$.

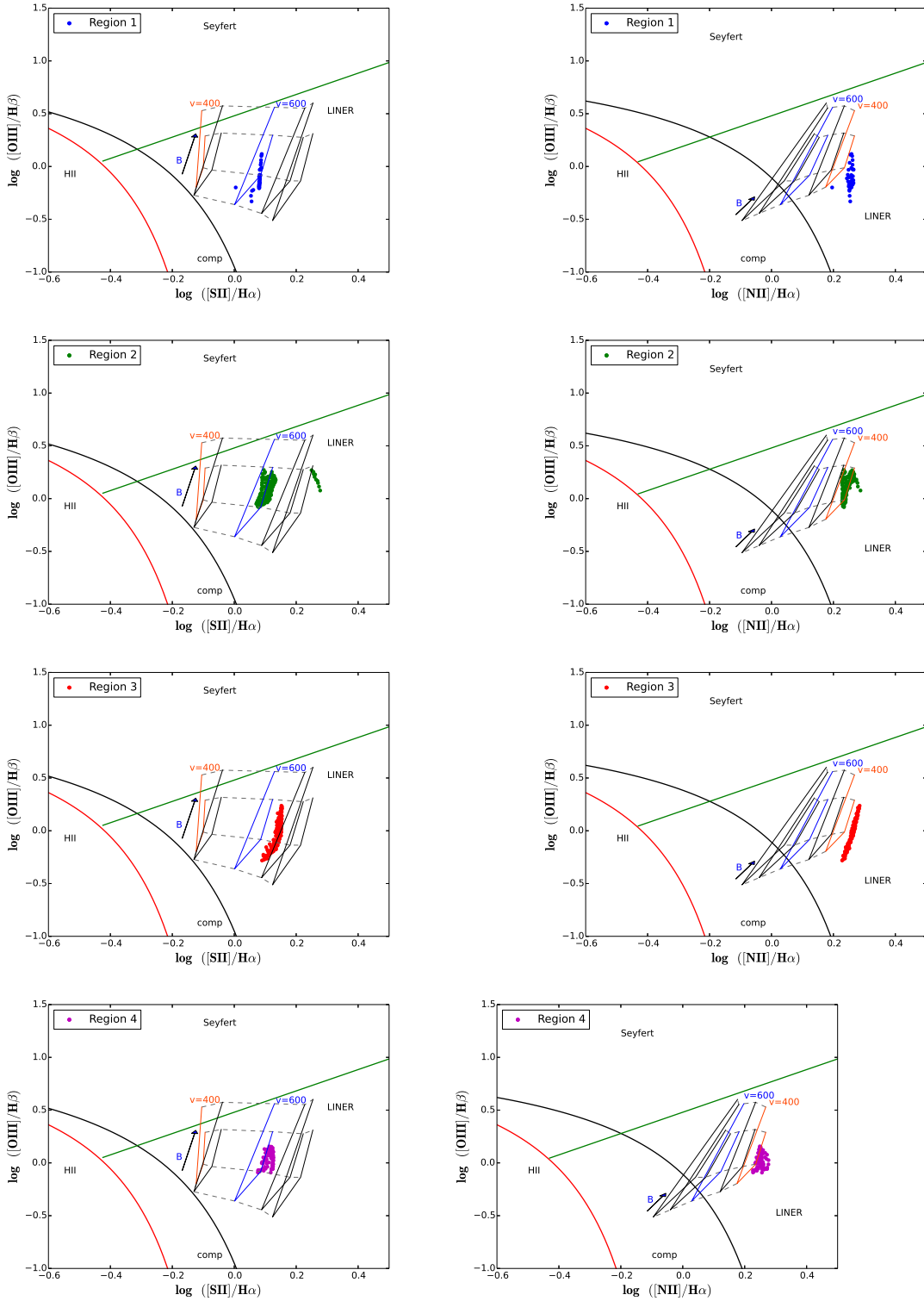


Figura 5.3: Diagrama de diagnóstico para as regiões 1 a 4, selecionadas a partir do canais de velocidade. As linhas de separação entre LINERs, Seyfert e *Starbursts*, bem como os grids do modelo de choques são os mesmos da Figura 5.2.

Capítulo 6

Modelagem cinemática do gás ionizado

6.1 Modelo de campo de velocidade.

Para entender a cinemática do gás, modelamos o campo de velocidade observado, assumindo que o gás ionizado segue uma órbita circular em um plano como proposto por Bertola et al. (1991) e sumarizado pela equação a seguir:

$$V(R, \psi) = V_s + \frac{AR \cos(\psi - \psi_0) \sin \theta \cos^p \theta}{R^2 [\sin^2(\psi - \psi_0) + \cos^2 \theta \cos^2(\psi - \psi_0)] + c_0^2 \cos^2 \theta^{\frac{p}{2}}}. \quad (6.1)$$

Isto resulta em uma curva de velocidade que cresce linearmente em um pequeno raio e torna-se proporcional a r^{1-p} para regiões externas. R e ψ são as coordenadas radial e angular de um dado pixel no plano do céu; A é a amplitude da curva de rotação; c_0 é um parâmetro de concentração. O parâmetro p define a forma da curva de rotação, variando entre 1 (potencial logaritimico) e 1,5 (potencial Kepleriano), o qual é o intervalo de valores esperado para galáxias (Bertola et al., 1991); o parâmetro V_s é a velocidade sistêmica; ψ_0 é o ângulo de posição da linha dos nodos; θ é a inclinação do disco ($\theta = 0$ para discos *face-on*); finalmente, há dois parâmetros implícitos: as coordenadas do centro cinemático, R_{cx} e R_{cy} . Os parâmetros A e θ da equação 6.1 são degenerados entre si, o que torna o valor de θ derivado para o ajuste não confiável. Então, fizemos uma estimativa para θ de 42 ± 2 a partir das isofotas externas da imagem do fluxo de $H\alpha$. Portanto, este parâmetro foi fixado para o ajuste.

Usamos o método Levenberg-Marquardt para ajustar o campo de velocidade ob-

Tabela 6.1: Ajustes do campo de velocidade observado.

Parâmetros	Valores
A (km s ⁻¹)	1285±189
c ₀ (pc)	95±5
p	1,5±0,1
v _s (km s ⁻¹)	2782±1
ψ ₀	152°±2°
Δx (pc)	0±1
Δy (pc)	18±1

servado. O ajuste ponderado foi feito considerando o mapa de erro de δ_{v_r} (Fig. 4.4d). Os parâmetros ajustados e seus respectivos erros são dados na Tabela 6.1. R_{cx} e R_{cy} não estão listados na Tabela, em vez deles, damos a diferença entre os centros cinemático e fotométrico no plano do céu, Δx e Δy . O mínimo χ^2 do ajuste é 10,8, este alto valor é devido as perturbações do campo de velocidades observado, e é refletido no mapa residual (Fig. 4.4c), o qual apresenta componentes cinemáticas fortes não rotativos, elas são discutidas e analisadas em detalhes na Seção 6.2.

O centro cinemático da galáxia tem um pequeno deslocamento, de 18 pc na direção NE, com relação ao seu centro fotométrico. Considerando que nossa resolução angular é ~ 125 pc este deslocamento é desprezível e concluímos que o centro cinemático coincide (dentro das incertezas) com o núcleo fotométrico. O modelo de disco rotacional que fornece o melhor ajuste das velocidades observadas é mostrado na Fig. 4.4b. A curva de rotação derivada a partir deste modelo é mostrada na Figura 6.1. Fica claro que o gás alcança sua velocidade rotacional máxima (240 km s⁻¹) em uma distância de 136 pc. Além disso, o valor calculado para o parâmetro p ($\sim 1,5$) indica que a distribuição do gás tem um comportamento Kepleriano e portanto, a dinâmica nesta região deve ser dominada por uma grande concentração de massa.

A fim de verificar os resultados acima, fizemos uma estimativa da massa do buraco negro hospedado por NGC 5044, M_{bh} , assumindo a aproximação Kepleriana para o movimento do gás ($M = r \times V_{rot}^2 / G$). Encontramos $1,9 \pm 0,9 \times 10^9 M_\odot$ dentro dos 136 pc mais internos. O valor desta concentração de massa pode ser verificado usando a relação M- σ (Kormendy & Ho, 2013) como segue:

$$M_{bh} = 0,309_{-0,033}^{+0,037} \times 10^9 M_\odot \left(\frac{\sigma_\star}{200 \text{ km s}^{-1}} \right)^{4,38 \pm 0,29}, \quad (6.2)$$

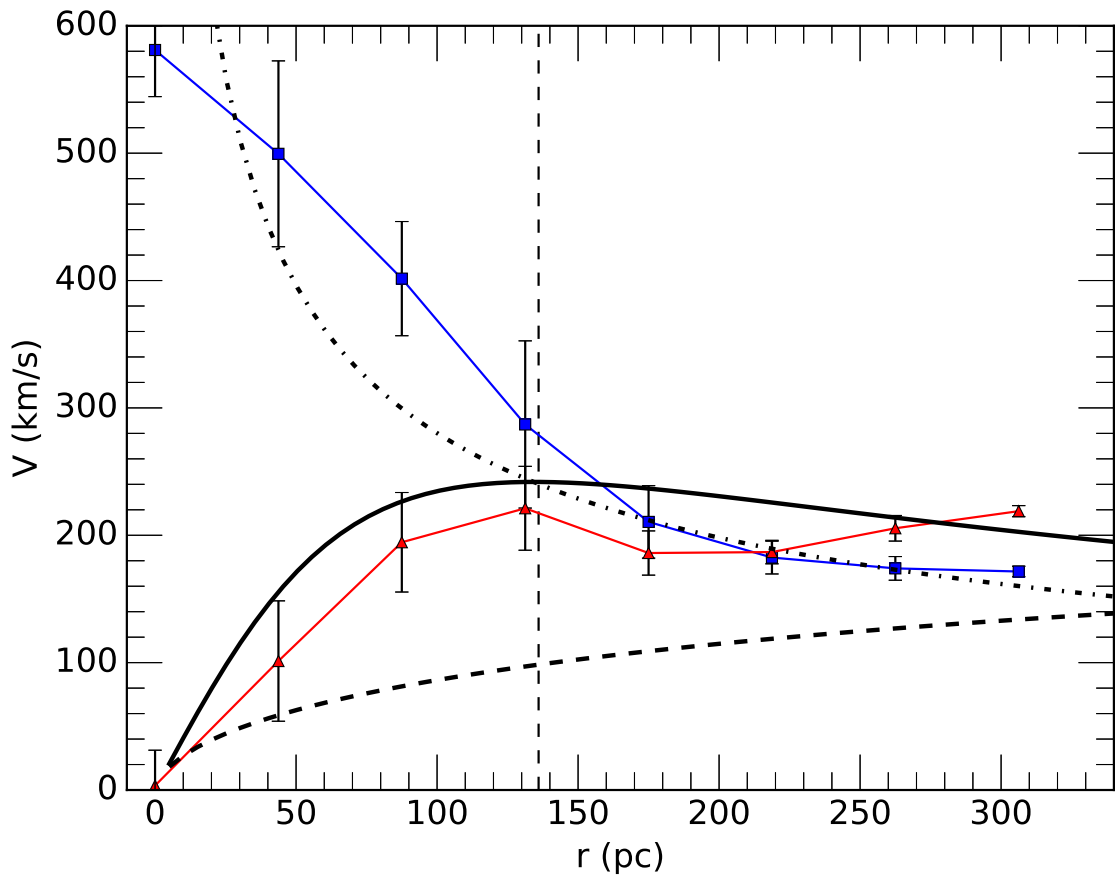


Figura 6.1: Curva de rotação observada projetada (linha vermelha), sobreposta pela modelada (preta). A linha azul é o perfil da dispersão de velocidade média ao longo da linha dos nodos. A linha tracejada-pontilhada é a curva de rotação Kepleriana do buraco negro. A linha tracejada é a curva de rotação derivada a partir do perfil de brilho de Sérsic em K. Note que a dinâmica do gás do lado esquerdo da linha vertical é dominada pelo potencial do buraco negro.

onde σ_* é a dispersão de velocidade das estrelas medida em uma abertura no raio de $R_e/8$, sendo R_e o raio efetivo, ou seja, aquele que contém metade da luminosidade total da galáxia. Encontramos este raio para NGC 5044 a partir do seu perfil de brilho superficial, usando uma imagem da banda K_s tirada do *2MASS Extended Source Image Catalogue* (Skrutskie et al., 2006). O valor obtido foi $R_e = 28,96$, o qual corresponde a 5,1 kpc, o valor requisitado de $R_e/8$ para NGC 5044 é ~ 600 pc, o qual está próximo ao FoV do cubo de dados. O σ_* foi determinado a partir das linhas de absorção Mgb λ 5167, FeI λ 5270 e FeI λ 5335 medidas em um único espectro integrado obtido colapsando todos os espectros do cubo sem a subtração estelar, já que estamos interessados apenas em medir o FWHM dessas linhas estelares. O FWHM das linhas foi corrigido por alargamento instrumental. O σ_* resultante é a média ponderada pelo fluxo de cada linha de absorção, e as incertezas foram estimadas a partir do desvio padrão destas medidas. Encontramos um σ_* de 300 ± 57 km s^{-1} . Este valor está em acordo com os 250 km s^{-1} encontrados para o centro da galáxia em Caon et al. (2000). A M_{bh} derivada usando este σ_* é $1,8 \pm 1,6 \times 10^9 M_\odot$, a qual está em completo acordo com o valor obtido com a aproximação Kepleriana.

Com o propósito de testar a possibilidade que as peculiaridades no campo de velocidade obtido no Capítulo 4 [por exemplo o aumento acentuado em direção ao centro ($300 - 600 \text{ km s}^{-1}$), e a curva de rotação alcançando seu valor máximo em um pequeno raio (136 pc)] estão associadas com a presença de um buraco negro, graficamos na Figura 6.1 a curva de rotação Kepleriana esperada para um SMBH (*super massive black hole*) com $M = 1,80 \pm 1,6 \times 10^9 M_\odot$ (linha tracejada-pontilhada), as curvas de rotação observada (linha vermelha) e modelada (linha preta) para a região central da galáxia. Incluímos também a curva de rotação derivada a partir do perfil de Sérsic (linha tracejada) usando o perfil de brilho superficial na banda K (para detalhes sobre o método ver Hernandez-Jimenez et al., 2013, 2015). Da Figura 6.1, está claro que nos 136 pc internos (linha tracejada vertical) a cinemática central é dominada pelo potencial do SMBH. Isto explicaria porque o máximo da curva de rotação do gás e o aumento acentuado no perfil da dispersão de velocidade são observados dentro deste raio pequeno. Por outro lado, sem a presença de um SMBH a curva de rotação observada seguiria o perfil de Sérsic.

Um comportamento cinemático similar como o que encontramos para NGC 5044 foi observado em outras galáxias *early type*, por exemplo na elíptica M87 que hospeda um SMBH de $3 \times 10^9 M_\odot$ (Macchetto et al., 1997, Ho & Kormendy, 2000) e a galáxia lenticular NGC 3115 ($M = 10^9 M_\odot$ Kormendy et al., 1996). Considerando as evidências apresentadas aqui, concluímos que os movimentos do gás nuclear são

dirigidos pelo potencial gravitacional do SMBH central, com massa de $1,80 \pm 1.6 \times 10^9 M_\odot$.

6.2 Evidência de *inflow* de gás em NGC 5044

A fim de calcular as velocidades não rotacionais, resultantes de movimentos radiais ou perpendiculares, obtivemos o mapa de velocidade residual subtraindo o modelo de campo de velocidade do observado (Fig. 4.4c). Podemos distinguir no mapa residual duas regiões desviadas para o azul com velocidades em torno de -40 km s^{-1} , uma ao leste e outra ao oeste. Ambas as regiões mostram um pico de 80 km s^{-1} . Em contra partida, duas estruturas filamentosas com desvio para o vermelho são claramente observadas ao longo da linha dos nodos da galáxia (norte e sul), com velocidades de 40 km s^{-1} . Estas regiões tem dispersão de velocidade de 150 km s^{-1} (ver Figura 4.4e). A detecção dessas estruturas é confiável, uma vez que suas velocidades são maiores que as incertezas (δ_{v_r}) como visto no mapa de incerteza do campo de velocidade incluso na Fig. 4.4d. Com o propósito de interpretar as estruturas descritas acima, utilizamos o *software* Shape (Steffen et al., 2010), que permite ao usuário criar interativamente estruturas espaciais 3D com seus respectivos campos de velocidade. O arquivo de saída é uma imagem de campo de velocidade projetado com uma orientação similar ao do observador. As velocidades desta saída são integradas ao longo da linha de visada. Apresentamos na Figura 6.2 o modelo 3D para NGC 5044. Assumimos um disco rotacionando representado por um cilindro, sendo sua altura um décimo do raio e seu campo de velocidade é aquele obtido na seção anterior, enquanto assumimos para todas as estruturas filamentosas do gás uma geometria de cone com uma abertura de 15° , onde o gás dentro dele tem um vetor velocidade orientado na direção do centro. As orientações dos cones e as magnitudes de seus respectivos vetores de velocidade foram restringidas de maneira que as velocidades projetadas destas estruturas, ao longo da linha de visada, coincidam com o mapa residual.

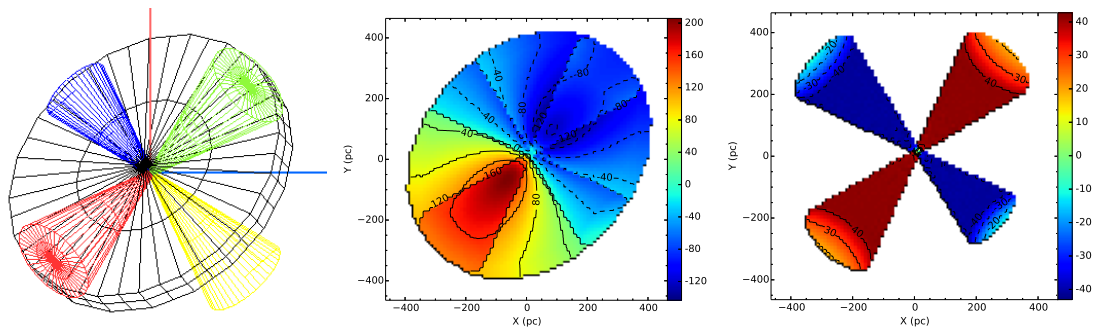


Figura 6.2: Da esquerda para direita os painéis mostram: (a) representação em 3D da disposição das estruturas filamentosares (observadas a partir da linha de visada.) O cone verde representa o filamento norte, o vermelho representa o sul, o cone azul representa o filamento no leste e o cone amarelo representa o filamento no oeste (vindo do lado distante da galáxia). (b) o modelo sintético do campo de velocidade ao longo da linha de visada. (c) velocidades projetadas dos cones ao longo da linha de visada.

Encontramos que a melhor orientação para os cones se dá quando:

- a) Os cones dos filamentos norte e sul estão inclinados em 20° com respeito ao disco e têm um ângulo com respeito a linha dos nodos de 0° e 180° , respectivamente. As magnitudes de seus vetores velocidades são 80 km s^{-1} ;
- b) O cone associado ao filamento leste está inclinado 26° em relação ao disco, tem um ângulo de 90° , e a magnitude de seu vetor velocidade é 105 km s^{-1} ;
- c) o cone que representa o filamento oeste está inclinado em 62° em relação ao disco, tem um ângulo de 270° , e a magnitude de seu vetor velocidade é 105 km s^{-1} .

A configuração geométrica resultante, ao longo da linha de visada, para representar as estruturas filamentosares do gás é mostrada na Figura 6.2a. O modelo sintético de campo de velocidade é apresentado na Figura 6.2b. Ele foi criado a partir da soma dos modelos do disco e das estruturas filamentosares, o qual representaria o campo de velocidade como visto na Figura 4.4a. Podemos ver que o modelo é capaz de reproduzir a assimetria no campo de velocidade observado. Além disso, mostramos na Figura 6.2c as velocidades projetadas dos cones ao longo da linha de visada. Ele reproduz bem os valores do mapa residual de velocidades (Figura 4.4c). Isto sugere que uma interpretação adequada do mapa residual pode ser que o gás nas estruturas filamentosares está caindo em direção ao centro da galáxia. Este resultado concorda com os encontrados em David et al. (2014), que sugere que algumas das nuvens moleculares de CO que eles detectaram estão caindo em direção a galáxia em uma trajetória balística. No entanto, devemos ser cautelosos com nossos resultados, uma vez que eles são um simples modelo aproximado para reproduzir o

complexo campo de velocidade dos 600 pc internos de NGC 5044. Usando os resultados acima podemos fazer uma estimativa da taxa de *inflow* do gás na estrutura filamentar a partir da sua luminosidade $H\alpha$ observada e da magnitude média da velocidade dos cones dos filamentos. Assim, primeiro integramos o fluxo de $H\alpha$ em todo FoV e encontramos $F_{H\alpha} = 1,65 \times 10^{-12} \text{ erg cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$, a qual na distância da galáxia (Tabela 2.1) resulta em $L_{H\alpha} = 2,7 \times 10^{41} \text{ erg s}^{-1}$. Note que o valor obtido aqui é maior que o encontrado por Macchetto et al. (1996) integrado sobre toda a galáxia. Atribuímos esta diferença a aproximação de calibração indireta usada por Macchetto et al. (1996). A massa do gás ionizado, M_{HII} , pode ser estimada como segue:

$$M_{HII} = \frac{L_{H\alpha}}{h\nu_{H\alpha}} \frac{m_p}{n_e \alpha_{H\alpha}^{eff}}, \quad (6.3)$$

onde, m_p é a massa do próton e $\alpha_{H\alpha}^{eff}$ é o coeficiente de recombinação efetivo para $H\alpha$. Então, assumindo o “caso B” de recombinação (Osterbrock & Ferland, 2006), adotando uma $T_e = 10000 \text{ K}$ e uma densidade média $n_e = 100 \text{ cm}^{-3}$ ao redor do FoV, encontramos uma $M_{HII} = 6,38 \times 10^6 M_\odot$. Finalmente, a taxa de *inflow* é calculada com a seguinte expressão:

$$\dot{M}_{inflow} = 4N_{HII}vA, \quad (6.4)$$

onde N_{HII} é a densidade do gás ionizado, v a velocidade do material *inflowing*, A é a área da base do cone, e o fator 4 é devido ao número de cones. N_{HII} foi estimado adotando um volume de $0,2 \text{ kpc}^3$, o qual foi calculado a partir do raio equivalente da área física do FoV, $r_{FoV} = 0,41 \text{ kpc}$, e da massa de M_{HII} . $v = 93 \text{ km s}^{-1}$ é o valor médio de todos os cones. $A = 0,03 \text{ kpc}^2$ foi calculado a partir do r_{FoV} e ângulo de abertura dos cones (15). Então, encontramos um valor de $\dot{M}_{inflow} \approx 0,4 M_\odot \text{ yr}^{-1}$. Podemos agora comparar com a taxa de acreção de massa necessária para alimentar o núcleo ativo, usando:

$$\dot{M} = L_{bol}/(\eta c^2), \quad (6.5)$$

onde L_{bol} é a luminosidade bolométrica, η é a eficiência de conversão de energia da massa de repouso do material acretado em radiação, e c é a velocidade da luz. Aproximamos a luminosidade bolométrica como $L_{bol} \approx 100L_{H\alpha} \approx 2,7 \times 10^{43} \text{ erg s}^{-1}$ (Ho, 1999). Adotamos o valor de 0,1 para η , o qual é um valor típico para um disco de acreção opticamente espesso e geometricamente fino (Frank et al., 2002). Assim,

obtivemos uma taxa de acreção de $\dot{M} \approx 0,005 M_{\odot} yr^{-1}$. Este valor é um fator de 10^2 menor que a taxa de *inflow* calculada.

As estruturas filamentosas na NGC 5044 foram anteriormente estudadas por Macchetto et al. (1996). Estes autores encontraram que estes filamentos são bastante luminosos e massivos, com $LH\alpha = 1,3 \times 10^{41}$ erg/s e $M = 8 \times 10^4 M_{\odot}$. Temi et al. (2007) encontraram uma notável correlação espacial entre as estruturas filamentosas em $H\alpha$ e poeira, detectada em 8 e 70 μm . Estes autores afirmam que a poeira presente nos filamentos muito provavelmente vêm do centro da galáxia, como emissão de poeira fria de perda de massa estelar. Baseado nesses resultados, eles propuseram que NGC 5044 sofreu recentemente (10^7 anos atrás) um *feedback* onde a poeira localizada na região nuclear foi despedaçada, aquecida e transportada para fora a vários kiloparsecs seguindo um evento de aquecimento e de *feedback*.

Evidências de bolhas (regiões isentas de gás) foram encontradas por Gastaldello et al. (2009), que relatam que nos 10 kpc internos da galáxia há um par de cavidades com um conjunto de filamentos brilhantes em raio-X coincidentes com emissão de $H\alpha$ e de poeira. Além disso, Gastaldello et al. (2009) fizeram uma estimativa do tempo de desprendimento para as bolhas de $1,2 \times 10^7$ yr, dando suporte ao cenário proposto por Temi et al. (2007) para NGC 5044. Além disso, nossos resultados indicam que o gás ionizado flui em direção ao centro da galáxia, o que pode ser associado com a estrutura filamentar na escala de kpc relatada para esta galáxia. Além do que, encontramos forte evidência para a presença de um SMBH acretando na região nuclear de NGC 5044, e relatamos pela primeira vez a presença de uma componente larga de $H\alpha$, portanto, especulamos que este *inflow* de gás seria originado e transportado de grandes escalas de kpc para o núcleo de NGC 5044 através de estruturas filamentosas, parte dele sendo acretada pelo SMBH e tornando a NCG 5044 ativa. Isto estaria de acordo com o cenário onde os *cooling flows* para a galáxia central de aglomerados de galáxias (que é o caso de NGC 5044) são regulados por episódios cíclicos de *feedback* (para uma revisão ver Peterson & Fabian, 2006, e as referências nele contidas).

Capítulo 7

Conclusões e perspectivas

Apresentamos aqui, pela primeira vez, dados do Gemini GMOS / IFU de alta resolução espacial da galáxia elíptica NGC 5044 para mapear a população estelar, distribuição do fluxo das linhas de emissão e cinemática do gás no kpc interno, com uma resolução espacial de 125 pc. Nossas principais conclusões são:

- A emissão do contínuo no kpc interno de NGC 5044 é dominada por uma população estelar velha. Também detectamos uma população de idade intermediária ($\sim 40\%$ de uma SSP de 900 Myr) em torno do núcleo da galáxia. Uma contribuição *featureless* de $\sim 20\%$ foi encontrada no centro da galáxia, consistente com a detecção de uma componente alargada em $H\alpha$. Além disso, os mapas de idade média e Z média mostram uma tendência consistente com a população estelar tornando-se mais pobre em metais e mais jovem com o aumento da distância em relação ao centro da galáxia.
- A análise das intensidades das linhas de emissão revela que no kpc interno do NGC 5044, a distribuição de gás é irregular e a emissão de $H\alpha$ segue os filamentos extensos. A emissão de [NII] e [SII] está concentrada na região nuclear, enquanto a emissão do [OIII] é detectada em todo o FoV.
- Para ajustar as linhas de emissão de $H\alpha$ da região central, é necessária uma componente larga, com FWHM $\sim 3000 \text{ km s}^{-1}$ confirmando que a emissão do *featureless continuum* detectada no ajuste da população estelar de fato é devida a um núcleo galáctico ativo de baixa luminosidade.
- O FWHM da componente estreita de $H\alpha$ apresenta fortes variações sobre o FoV, de FWHM $\sim 150 \text{ km s}^{-1}$ nas regiões externas para 1080 km s^{-1} no centro da galáxia.

- O mecanismo de excitação dominante nos filamentos é compatível com ondas de choque com velocidade de 550 km s^{-1} , enquanto no centro é explicado por um LLAGN. Além disso, descobrimos que os picos mais brilhantes localizados ao leste (região 1) e ao sul (região 3) nos mapas de canais são co-espaciais com a emissão de CO detectada pela ALMA.
- A partir do mapa do campo de velocidade de $H\alpha$, encontramos evidências de gás em rotação e da presença de um buraco negro super massivo. Assumindo rotação Kepleriana, estimamos uma massa de $1,9 \times 10^9 M_{\odot}$ dentro de 136 pc. Além disso, usando σ_{*} de 279 km s^{-1} e a relação M- σ o valor do M_{bh} é estimado em $1,8 \pm 1,6 \times 10^9 M_{\odot}$.
- Estruturas filamentosas com movimentos não circulares em torno de $|40| \text{ km s}^{-1}$ são reveladas no mapa de campo de velocidade residual, obtido subtraindo o modelo de disco do campo de velocidade radial observado. Ao usar o modelo 3D para essas estruturas, concluímos que o gás dentro delas está caindo em direção ao núcleo. A taxa de *inflow* de $0,4 M_{\odot}$ por ano, foi derivada da luminosidade $H\alpha$ de $2,7 \times 10^{41} \text{ erg/s}$ e com a velocidade média de *inflow*, $\sim 90 \text{ km s}^{-1}$, estimada para o modelo 3D. Ressaltamos que a taxa de *inflow* é 10^2 maior do que a taxa de acreção necessária para alimentar o LLAGN.

Como perspectiva almejamos ampliar nossa amostra e investigar a natureza LINER de outras galáxias elípticas. Apresentamos na próxima seção os resultados preliminares da análise da galáxia NGC 6868.

7.1 Perspectivas

Neste trabalho estudamos em detalhes a natureza LINER da galáxia NGC 5044. Os resultados encontrados poderiam ser generalizados para outras galáxias elípticas ricas em gás? Para que seja possível responder esta questão é importante continuar o estudo deste tipo de objeto. Assim, seguindo os mesmos passos utilizados no estudo de NGC 5044, apresentamos aqui alguns resultados preliminares da análise do gás ionizado da galáxia elíptica NGC 6868.

A galáxia NGC 6868 é a mais brilhante do grupo de galáxias *Telescopium* e apresenta emissão raio-X fraca e espalhada ($\log L_x 41$) (Beuing et al., 1999). Apesar de apresentar algumas características semelhantes às de NGC 5044,

a galáxia NGC 6868 mostra um comportamento LINER ao longo de todo o centro da galáxia ($\sim 10''$), enquanto a NGC 5044 apenas na região mais interna ($\sim 5''$), como pode ser visto na Figura 7.1. Além disso, Macchetto et al. (1996) relataram que o gás ionizado está distribuído na forma de disco e é encontrado em até aproximadamente 3 kpc além de seu centro (ver Figura 7.2).

A observação da NGC 6868 ocorreu dentro do mesmo programa em que a NGC 5044, e portanto, sob as mesmas configurações instrumentais e condições meteorológicas similares. Utilizando $H_0=75 \text{ km s}^{-1}\text{Mpc}^{-1}$ e velocidade radial de 2854 km s^{-1} , encontramos a distância de 38 Mpc, sendo que no plano do céu $1''$ corresponde a $\sim 185 \text{ pc}$. Assim, o campo de visão de $3,5 \times 5 \text{ arcsec}^2$ corresponde a $648 \times 925 \text{ pc}^2$ em NGC 6868.

Apresentamos na Figura 7.3 uma imagem do contínuo de NGC 6868 em 4800 \AA . Para exemplificar como variam as intensidades das linhas de emissão ao longo do nosso FoV extraímos os espectros correspondentes aos pontos A, B, C e D, identificados na imagem do contínuo, e os mostramos na Figura 7.4.

A análise preliminar do gás em emissão foi realizada com espectros livres da contribuição estelar, nos quais medimos as intensidades das linhas de emissão. No entanto, por apresentar uma cinemática menos complexa que a galáxia NGC 5044, foi possível medir os fluxos das linhas de emissão da NGC6868 utilizando a rotina PROFIT (*line-PROfile FITting*, Riffel, 2010). A partir dessas medidas de fluxo produzimos mapas para analisar a distribuição do gás ionizado.

Os mapas das linhas de emissão de $[\text{S II}] \lambda 6716$, $[\text{S II}] \lambda 6731$, $[\text{N II}] \lambda 6583$ e $\text{H}\alpha$ são apresentados na Figura 7.5. Nota-se que a emissão cobre todo o campo, confirmando a presença de gás ionizado previamente detectado em imagens de $\text{H}\alpha$ (ver Figura 7.2). Todas as linhas apresentam aproximadamente o mesmo deslocamento do pico de sua intensidade em relação ao pico do contínuo, onde a intensidade é maior no centro e se estende em um eixo diagonal de SO para NE, e as linhas mostram a mesma distribuição.

Como já é sabido, as razões de intensidade das linhas de emissão são utilizadas para identificar o mecanismo de ionização presente no objeto.

Os valores encontrados para razões de fluxo das linhas de emissão da NGC 6868 a classificam como LINER. Na Figura 7.6 apresentamos o diagrama de diagnóstico de NGC 6868.

Da mesma forma que fizemos para NGC 5044, escolhemos algumas regiões

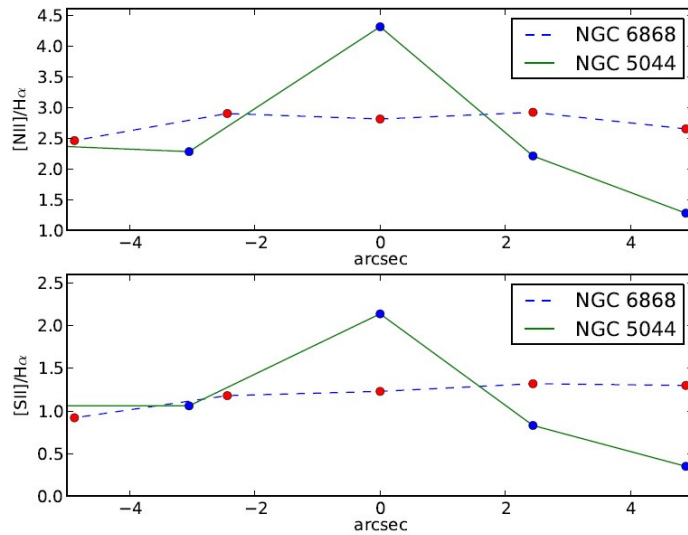


Figura 7.1: Comparação da intensidade das linhas de emissão versus distância entre as galáxias NGC 5044 e NGC 6868. No painel superior são vistos os valores de $[N II]/H\alpha$, e no painel inferior os de $[S II]/H\alpha$ versus distância ao centro da galaxia, indicando comportamento tipo LINER no centro de NGC 5044 e por todo o campo observado de NGC 6868. Adaptado de (Rickes et al., 2004, 2008).

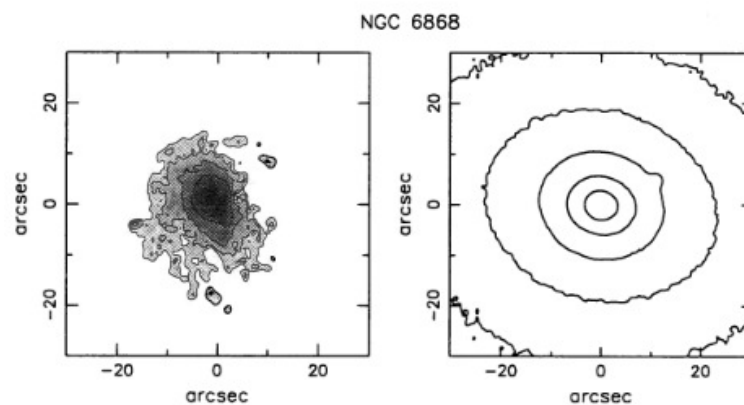


Figura 7.2: Imagem da emissão de $H\alpha$ de NGC 6868. Retirada de (Macchetto et al., 1996).

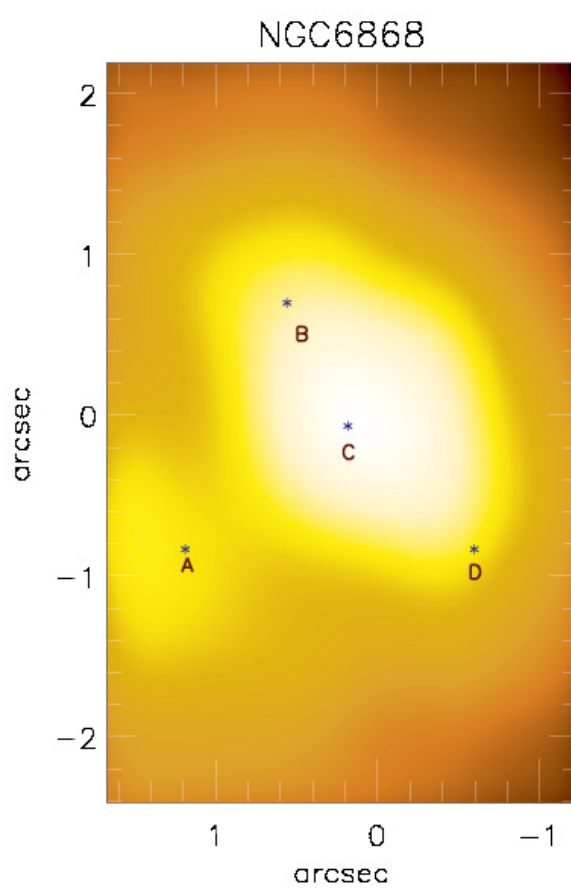


Figura 7.3: Imagem do contínuo em 4800 \AA de NGC 6868. O norte está à direita e leste para baixo.

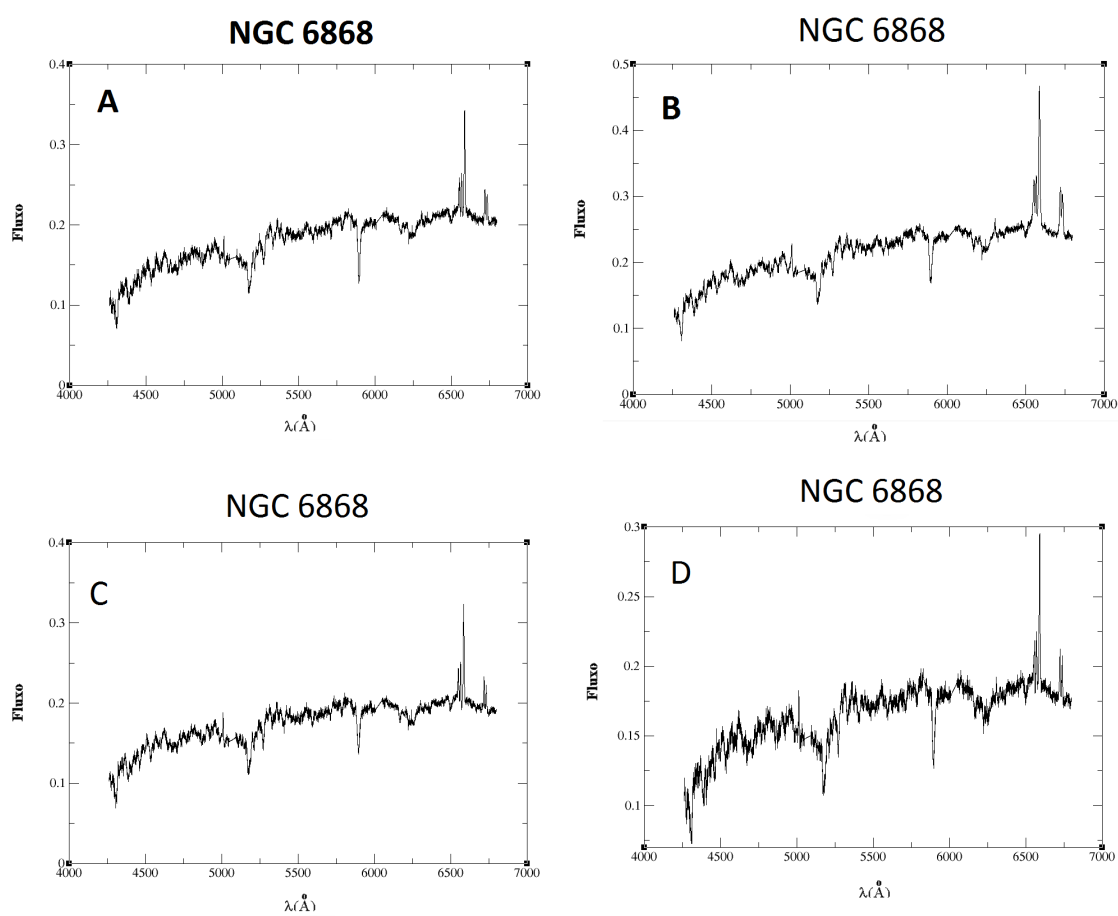


Figura 7.4: Espectros extraídos de NGC 6868 nos pontos A, B, C e D identificados na Figura 7.3

ao longo da emissão do gás, onde a região 'A' (pontos vermelhos) corresponde ao que chamamos de “pseudo segundo núcleo”. A região 'C' (pontos azuis) está localizada na região central, sobre o pico do contínuo em 4800 Å. A região 'B' (pontos verdes) fica ao SO de 'C', e 'D' (pontos roxos) encontra-se ao NE de 'C'. A emissão do gás se mostrou intensa em todas as regiões escolhidas. Ao observar a Figura 7.6 fica nítido que todos os pontos de NGC 6868 caem na região de LINERs.

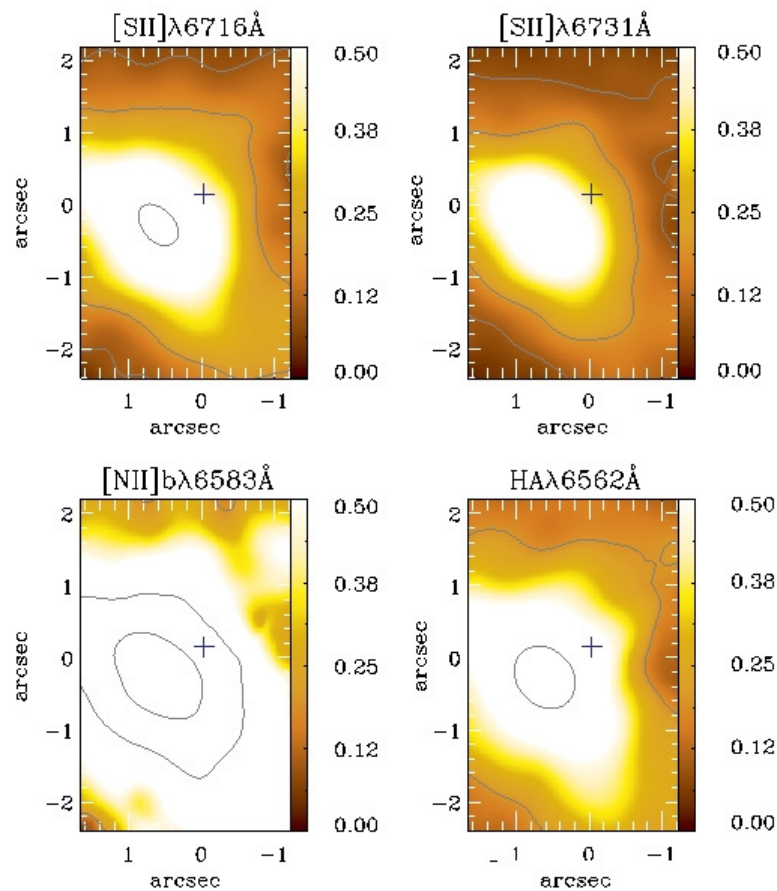


Figura 7.5: Mapas de fluxos das principais linhas de emissão medidas em NGC 6868. O centro do contínuo está marcado com uma cruz. Norte está à direita e leste para baixo.

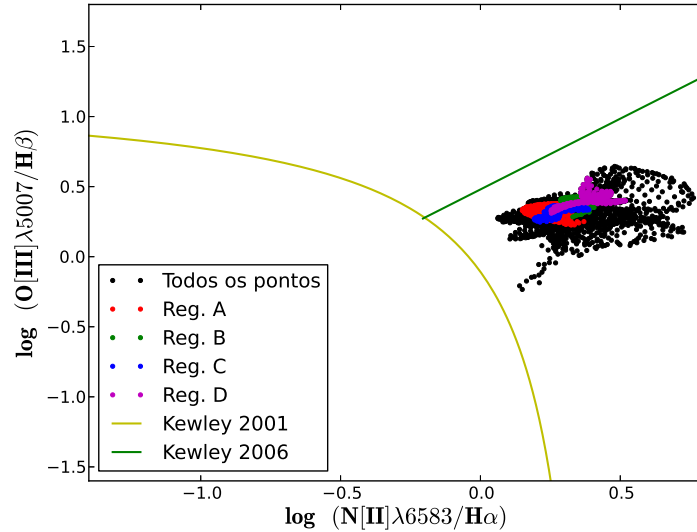


Figura 7.6: Diagrama de diagnóstico de NGC 6868. As regiões A, B, C e D são as mesmas apresentadas na Figura 7.3.

Ressaltamos que os resultados sobre a NGC868 apresentados aqui são preliminares e necessitam ainda de análises.

7.2 Considerações Finais

Os resultados obtidos neste trabalho evidenciam a necessidade de estudar as galáxias que apresentam espectro tipo LINER, já que galáxias com características peculiares e distintas apresentam espectros similares. Assim, este trabalho serve de ponto de partida para estudos futuros deste tipo de objeto, além de contribuir especificamente para o entendimento da galáxia NGC 5044.

Apêndice A

Artigo publicado

1. **Integral Field Unit Spectroscopy of the inner kpc of the elliptical galaxy NGC 5044,**

Diniz, S. I. F.; Pastoriza, M. G.; Hernandez-Jimenez, J. A.; Riffel, R.; Ricci, T.V.; Steiner, J.E.; Riffel, R. A., Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, v.470, p.1703-1717, Junho de 2017. DOI: 10.1093/mnras/stx1322

Integral Field Spectroscopy of the inner kpc of the elliptical galaxy NGC 5044

Suzi I.F. Diniz^{1*}, Miriani G. Pastoriza¹, Jose A. Hernandez-Jimenez^{1,2}, Rogerio Riffel¹,
Tiago V. Ricci², João E. Steiner³, Rogemar A. Riffel⁴

1. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Instituto de Física, CP 15051, 91501-970, Porto Alegre, RS, Brazil.

2. Universidade Federal da Fronteira Sul, Campus Cerro Largo, Rua Major Antonio Cardoso, Cerro Largo, RS, 97900-000, Brazil.

3. Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas, Universidade de São Paulo, 05508-900, São Paulo, Brasil

4. Universidade Federal de Santa Maria, Departamento de Física, Centro de Ciências Naturais e Exatas, 97105-900, Santa Maria, RS, Brazil.

ABSTRACT

We used Gemini Multi-Object Spectrograph (GMOS) in the Integral Field Unit mode to map the stellar population, emission line flux distributions and gas kinematics in the inner kpc of NGC 5044. From the stellar populations synthesis we found that the continuum emission is dominated by old high metallicity stars (~ 13 Gyr, $2.5 Z_{\odot}$). Also, its nuclear emission is diluted by a non thermal emission, which we attribute to the presence of a weak active galactic nuclei (AGN). In addition, we report for the first time a broad component (FWHM ~ 3000 km s⁻¹) in the H α emission line in the nuclear region of NGC 5044. By using emission line ratio diagnostic diagrams we found that two dominant ionization processes coexist, while the nuclear region (inner 200 pc) is ionized by a low luminosity AGN, the filamentary structures are consistent with being excited by shocks. The H α velocity field shows evidence of a rotating disk, which has a velocity amplitude of ~ 240 km s⁻¹ at ~ 136 pc from the nucleus. Assuming a Keplerian approach we estimated that the mass inside this radius is $1.9 \times 10^9 M_{\odot}$, which is in agreement with the value obtained through the M- σ relation, $M_{SMBH} = 1.8 \pm 1.6 \times 10^9 M_{\odot}$. Modelling the ionized gas velocity field by a rotating disk component plus inflows towards the nucleus along filamentary structures, we obtain a mass inflow rate of $\sim 0.4 M_{\odot}$. This inflow rate is enough to power the central AGN in NGC 5044.

Key words: galaxies: individual (NGC 5044) – galaxies: LINERs – galaxies: stellar content – galaxies: kinematics and dynamics –

1 INTRODUCTION

It is known for a long time that many elliptical galaxies show disks, as well as filaments of ionized gas (Macchetto et al. 1996; Ferrari et al. 1999; Tran 2001). Many of the early type emission line galaxies show characteristic spectra of a low-ionization nuclear emission-line region (LINER, Heckman 1980). However, the ionization mechanisms of this gas is still matter of debate. For example, very recently, Ricci et al. (2015) studied early-type galaxies with ionized gas using optical Integral Field Spectroscopy (IFS) and found that the H α flux along the disk cannot be explained only by ionizing photons emitted by an Active Galactic Nuclei (AGN). Other mechanisms, like ionization by shock (Heckman 1980; Dopita & Sutherland 1995; Allen et al. 2008; Dopita et al. 2015) or Post Asymptotic Giant Branch (Post-AGB) stars (Stasinska et al. 2008; Singh et al. 2013), can also explain the observed spectra.

This may suggest that the gas is being ionized by more than one ionization mechanism.

Furthermore, large amount of molecular gas (up to $10^7 M_{\odot}$ revealed by CO(2-1) 1.3 mm and H₂ 2.121 μ m emission) was found for a sample of bulge-dominated galaxies with dust lanes, revealing the complexity of these galaxies (David et al. 2014; Davis et al. 2015; Strong et al. 1988). It was suggested that this molecular and atomic gas would be accreted through a recent merger with a gas rich galaxy and/or that it originates from a cooling flow (O’Sullivan et al. 2015; David et al. 2014). In addition, interstellar dust, mixed with the molecular and atomic gas is observed in early type galaxies (e.g. Davis et al. 2015, and references therein). Disks and dust filaments at kpc scales (with mass between 10 and 200 M_{\odot} and Mid-Infrared luminosity up to $14.6 \times 10^8 L_{\odot}$) following the ionized gas distribution were also reported in early type galaxies (Ferrari et al. 1999, 2002; Goudfrooij et al. 1994).

Nowadays, galaxies with LINER-like spectrum are defined based on the optical line ratios (Ho 2008): [OI] λ 6300 / [OIII] λ 5007

* E-mail: suzi.diniz@ufrgs.br

$\geq 1/3$, $[\text{NII}]\lambda 6583 / \text{H}\alpha \geq 0.6$, $[\text{OIII}]\lambda 5007 / \text{H}\beta \leq 3$. In addition, over the last 30 years the most accepted explanation was that these objects are powered by weak AGNs (Ferland & Netzer 1983; Halpern & Steiner 1983). However, in the last few years contradictory results were found between the AGN-ionization scenario and predicted emission line strengths (Cid Fernandes et al. 2011) or with the spatial distribution of the ionized gas regions (e.g. Sarzi et al. 2010; Yan & Blanton 2012; Martins et al. 2013; Belfiore et al. 2015). In addition, using the Calar Alto Legacy Integral Field Area (CALIFA, Sanchez et al. 2012) survey of spatially resolved data Singh et al. (2013) have shown that galaxies with LINER-like spectrum are powered by hot old stars and accreting black holes are rare. In this work we propose to test this hypothesis by mapping in details the emission gas and stellar populations in the inner kiloparsec in a key object – the gas rich early type galaxy NGC 5044.

NGC 5044 was observed over almost the entire electromagnetic spectrum, presenting rich structures, such as gas and dust filaments (Ferrari et al. 1999). It presents a very bright ionized gas emission in form of filaments extending up to 10 kpc with a complex kinematics (Macchetto et al. 1996). Its radial velocity is blueshifted with respect to the systemic stellar velocity and the inner parts of the stellar velocity curves presents counter-rotation with respect to the galaxy outer regions (Caon et al. 2000).

The gas ionization mechanism of NGC5044 has been the aim of several studies, for example, Rickes et al. (2004) suggest that the gas in the central region ($\sim 4''$) of NGC 5044 is ionized by a Low Luminosity AGN (LLAGN), while the outer regions are explained by post-AGB stars (see also Macchetto et al. 1996). In addition, the overall stellar emission of this galaxy seems to be dominated by old stars over a large wavelength range, from UV (Annibali et al. 2007; Marino et al. 2011), optical (Rickes et al. 2004) and Mid-infrared observations (Vega et al. 2010). Unusual polycyclic aromatic hydrocarbons (PAH) emission was detected in Spitzer-IRS observations by Vega et al. (2010), this emission was not expected in this galaxy because PAH is a typical feature in star-forming galaxies. Moreover, the IRS spectrum of this object displays strong H_2 molecular and atomic gas emission (Vega et al. 2010; Panuzzo et al. 2011). Furthermore, this galaxy shows several X-ray cavities within the inner 10 kpc, which are attributed to multiple AGN outbursts over past 10^8 yrs (David et al. 2009; Gastaldello et al. 2009). Moreover, David et al. (2014) using Atacama Large Millimeter/submillimeter Array (ALMA) data argue that the detection of 230 GHz continuum emission shows that it is currently going through another outburst, probably due a recent accretion event. In addition, these authors report the detection of cold molecular CO gas moving towards the center of this galaxy, and suggested that it can be interpreted as the presence of a cooling flow in the galaxy center direction.

We present in this paper for the first time the optical IFS obtained with Gemini Multi-Object Spectrograph (GMOS) in integral field unit (IFU) of the central 1 kpc of NGC 5044, whose gas ionization source is still controversial. Beside that, there is no information about its central gas kinematics. Although strong evidence suggests possible presence of a contribution of an AGN, other energy source also seem to be present in this galaxy ionizing their extended filaments (Macchetto et al. 1996; Rickes et al. 2004). This data allowed us to spatially resolve the inner kpc of this source and to map the possible ionization mechanisms through the analysis of stellar populations and emission line flux ratios. The goals of this work are to establish the star formation history (SFH), the nature of the energy sources that ionizes the gas and search for the

Table 1. Basic parameters of NGC 5044.

Parameter	NGC 5044
RA (2000)	13h 15m 24.0s
DEC	-16° 23' 09"
Morphology	E0
B (mag)	11.83
M_B (mag)	-22.39
A_V (mag)	0.192
Radial velocity ^a (km s ⁻¹)	2782
Distance (Mpc)	37
Redshift (z)	0.009280
L_x ^b (erg s ⁻¹)	6.8e+39
Data available in NED ¹	
^a Radial velocity measured by Ogando et al. (2008).	
^b X-ray luminosity in 0.38 keV (Liu 2011).	

existence of inflowing or outflowing gas associated with the AGN and/or other mechanism, like cooling flows, for the central kpc of NGC 5044.

This paper is structured as follows: In Sec. 2 we described the observations and data reduction procedures. Details of the spectral synthesis method and its results are presented in Sec. 3. In Sec. 4 we analyse the gas kinematics. The emission gas and its ionization mechanism is studied in Sec. 5. We show the velocity field model and estimates the black hole mass in Sec. 6. The geometry and the origin of the observed gas is discussed in Sec. 7. Lastly, we present our conclusions in Sec. 8.

2 OBSERVATIONS AND DATA REDUCTIONS

NGC 5044 was observed on May 04, 2013 with the Gemini South Telescope using the GMOS in the IFU mode (Allington-Smith et al. 2002; Hook et al. 2004) using the one slit setup. In this configuration the spectrograph uses 500 hexagonal micro-lenses centered on the object, and other 250 micro-lenses, separated by 1 *arcmin* from the object, to simultaneously measure the sky emission. These micro-lenses, located at the focal plane of the telescope, divide the image in slices with a diameter of 0.2'' and are connected to a set of fibers. This setup produces a data cube with one spectral dimension and two spatial dimensions with a field-of-view of $3.5 \times 5 \text{ arcsec}^2$. We used the B600-G5323 grating, with a central wavelength of 5620Å. The spectra covered a range from 4260 to 6795 Å with a 1.7Å resolution, obtained from the full width at half maximum (FWHM) of CuAr arc lamp lines. In Table 1 we list some of the general parameters of NGC 5044. Flat-Field exposures, bias and CuAr lamp spectra were obtained for calibration and correction of the data cubes. The DA white dwarf EG 274 (Hamuy et al. 1992) was used to perform the spectrophotometric calibration. The seeing value of the observation was measured in the acquisition r image obtained with the GMOS imager (SDSS system). This value and other observation parameters are shown in Table 2.

We followed standard procedures to reduce the data, using IRAF (Tody 1986, 1993) and the tasks contained in the GEMINI IRAF

¹ The NASA/IPAC Extragalactic Database (NED) is operated by the Jet Propulsion Laboratory, California Institute of Technology, under contract with the National Aeronautics and Space Administration.

Table 2. Observation log.

Parameter	NGC 5044
Observation date	May 04 2013
Gemini Programme	GS-2013A-Q-52
Seeing (arcsec)	~ 0.7
Airmass	1.14
T_{exp} (s)	1800

package, as described in detail in Ricci et al. (2014). The data cube was built with a spatial sampling of $0.05''$, resulting in a FoV with 66×98 spaxels. The high spatial frequency noise was removed with a BUTTERWORTH FILTER (Gonzalez & Woods 2002; Ricci et al. 2014) using order $n=6$ and a cut-off frequency $F_c=0.13$ FNy, where $\text{FNy} = 0.5 \text{ spaxel}^{-1}$ is the Nyquist frequency. This cut-off frequency was chosen to remove only spatial frequencies higher than the seeing. In addition, the Principal Component Analysis (PCA) tomography (Heyer & Schloerb 1997; Steiner et al. 2009) was applied in order to remove signatures of low spatial and spectral frequency (Ricci et al. 2014). To correct the atmospheric refraction effects, we applied the equations proposed by Bönsch & Potulski (1990) and Filippenko et al. (1982).

The data cube spectra was corrected for Galactic extinction using the Cardelli, Clayton & Mathis (1989) extinction curve (CCM) for an $A_v = 0.192$ (Schlafly & Finkbeiner 2011) and by Doppler effect using the radial velocity of 2782 km s^{-1} given by Ogando et al. (2008). These authors derived the radial velocity through the cross-correlating technique by using the RVSAO package (Kurtz & MinK 1998) with stellar spectra of G and K giant stars.

We show in the left panel of the Figure 1 a $\text{H}\alpha + [\text{NII}]$ emission image of NGC 5044 obtained with NTT+EFOSC2 (Macchetto et al. 1996), where the black rectangle in the middle represents the GMOS FoV. In the right panel we presented two images extracted from our data cube. The continuum image was obtained by estimating the mean value over the wavelength range between 4730 and 4780 \AA , with the continuum peak defined as the photometric center of the galaxy. We also show the $\text{H}\alpha$ image with contours drawn to highlight the extended ionized gas filaments. It is clear from these maps that the morphology of the continuum and $\text{H}\alpha$ are distinct and suggests that the ionized gas follows the larger kpc scale filamentary structure, while the continuum follows the stellar distribution.

The wavelength calibration uncertainty was estimated from the arc lamp lines (see section 4). The spectroscopic standard star was not observed at the same night as the galaxy and this may be affected the accuracy on the absolute flux determination, given 30% of uncertainty in their values. It is worth mentioning that the emission line flux ratios, used to build the diagnostic diagrams were not affected by the systematic flux uncertainty, since each used ratio were measured over nearby emission lines. Nevertheless, we check uncertainties for $[\text{NII}]\lambda 6584/\text{H}\alpha\lambda 6563$ and $[\text{OIII}]\lambda 5007/\text{H}\beta\lambda 4861$ ratios in several spaxels and found a deviation of 3%. The instrumental dispersion was obtained from the FWHM of the CuAr arc lamp, and we used it to corrected the velocity dispersion. We noted that the deviation are larger in blueward than in redward, given an uncertainties of $\sim 8\%$ and $\sim 4\%$ respectively.

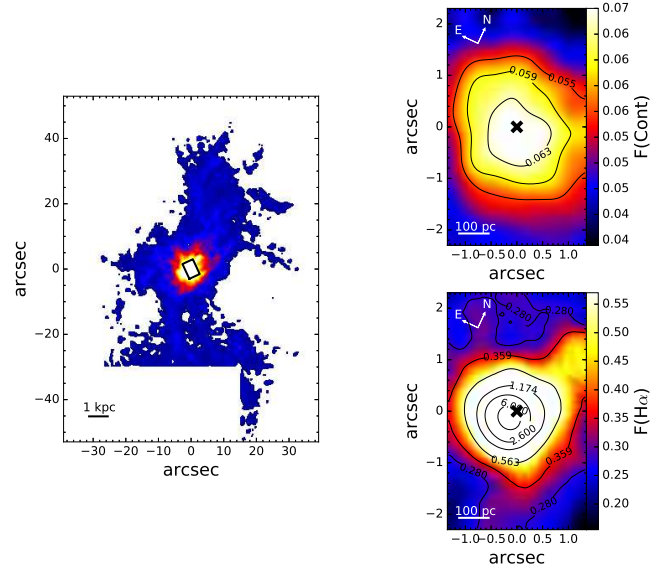


Figure 1. Flux maps for NGC 5044. Left: $\text{H}\alpha + [\text{NII}]$ emission obtained with NTT+EFOSC2 (Macchetto et al. 1996). The black rectangle represents the GMOS-IFU FoV ($5 \times 3.5 \text{ arcsec}^2$). Upper right: GMOS-IFU mean continuum image obtained in the spectral range: $4730\text{--}4780 \text{ \AA}$. Lower right: GMOS-IFU $\text{H}\alpha$ map. GMOS maps are in units of $10^{-15} \text{ erg cm}^{-2} \text{ s}^{-1} \text{ \AA}^{-1}$.

3 STELLAR POPULATION DISTRIBUTION

In order to obtain the SFH and to analyse the gas emission free from the stellar population contamination, we performed stellar population synthesis spaxel by spaxel. Therefore, we use the STARLIGHT code (Cid Fernandes et al. 2004, 2005; Mateus et al. 2006; Asari et al. 2007; Cid Fernandes et al. 2009), which essentially fits the whole underlying observed spectrum, O_λ , with a model spectrum, M_λ . To create a model spectrum, M_λ , the code finds a combination of N_* simple stellar populations (SSPs) resulting in a final population vector \mathbf{x} , whose components represent the fractional contribution of each SSP to the total synthetic flux at wavelength λ_0 (Cid Fernandes et al. 2004, 2005). Extinction is parametrised by the V -band extinction A_V and modelled by STARLIGHT as due to foreground dust. In summary the code solves the following equation:

$$M_\lambda = M_{\lambda 0} \left[\sum_{j=1}^{N_*} x_j b_{j,\lambda} r_\lambda \right] \otimes G(v_*, \sigma_*), \quad (1)$$

where $M_{\lambda 0}$ is the synthetic flux at the normalisation wavelength, $G(v_*, \sigma_*)$ is a Gaussian function used to model the line-of-sight stellar velocity distribution, which is centered at velocity v_* with dispersion σ_* . The term x_j is the j th population vector component of the base set; $b_{j,\lambda}$. The spectra of the SSP of the base of elements are normalized at λ_0 , the reddening term is represented by $r_\lambda = 10^{-0.4(A_\lambda - A_{\lambda 0})}$. The final fit is carried out by minimizing an χ^2 equation. The robustness of the fits can be measured by the STARLIGHT output parameter ADEV, which is the average deviation over the fit of pixels $|O_\lambda - M_\lambda|/O_\lambda$.

It is clear from the above that the most important ingredient in stellar population synthesis are the SSPs used in the fit (what we call base set). We used SSPs taken from Bruzual & Charlot (2003) models. These models were chosen because they are the most adequate to fit our data, since they have a spectral resolution of 3.0 \AA ,

that is close to our data spectral resolution (see section 4) and do offer enough spectral coverage (3200 - 9500Å) to fit our data. Beside they do provide an adequate number of SSP in order to have all the possibilities of ages and metallicities found in galaxies. In addition, we decided to use the BC03 models because they are widely used, thus allowing for comparison with published results. These models are computed using the isochrone synthesis code developed by BC03 and are divided in 221 spectra with ages between 0.1 Myr - 20 Gyr for a wide range of metallicities. These models mainly use the BaSeL 3.1/STELIB libraries, with a spectral resolution of 3Å (STELIB) in the optical region. Following Dametto et al. (2014), our final base set was selected in order to have enough, representative and not degenerated elements, covering 7 ages ($t = 0.6, 0.9, 1.4, 2.5, 5, 11$ and 13 Gyr) and three metallicities (0.2 Z_{\odot} , 1 Z_{\odot} , 2.5 Z_{\odot}). In the fits the spectral resolution of the data was resampled to match the models. The Cardelli, Clayton & Mathis (1989) extinction law, which is typically used to fit the extinction data both for diffuse and dense interstellar medium. Since we are fitting a LINER-like spectrum galaxy, we additionally included a featureless continuum (FC) in the form of a power law ($F_{\nu} \propto \nu^{-1.5}$) in order to account for a possible non thermal contribution (e.g. Cid Fernandes et al. 2005; Riffel et al. 2009, and references therein).

To map the whole FoV, the stellar population fits were performed for each one of the spaxels. The nuclear region (~ 200 pc) was defined as the one where a broad component was detected on $H\alpha$ emission. Fig. 2 shows the fit of the spectrum at the nuclear spaxel, defined as the location of the continuum peak. The emission lines and the final continuum fit are also shown. The percentage contribution of each age (in mass² and light fractions) and FC to the final fit are presented in the bottom panels. Here we discuss only the light fractions, since it is the parameter we derive directly and where larger differences are observed (in terms of mass, the emission is completely dominated by the old stellar population which has an high M/L).

The quality of the fit over the whole FoV can be seen in Fig. 3 where the parameters ADEV and χ^2 , are shown. In this figure we do also show a signal to noise ratio (SNR) map. It is clear from this map that even for the borders of the FoV a SNR > 15 is found. It is worth mentioning that according to tests presented by Cid Fernandes et al. (2004), for spectra with values of SNR > 10 STARLIGHT does properly reproduce the input parameters, thus producing reliable results for the stellar populations fits. However, the strengths of the Mg λ 5143 and Na λ 5894 lines are not well reproduced by our fitting, possible due to the fact that the BC03 models do not consider α enhancement processes. In addition, the NaD doublet has contribution of the ISM. Due to this fact we have tested the stellar population fits in three cases, with and without removing both the NaD and Mg λ 5143 lines from the fit and only removing the NaD doublet. We have not found any significant difference between both fits. In both cases, less than $\sim 10\%$ of these lines strength was not reproduced by the fitted model. Likely the NaD residual seen in Figure 2, is due to ISM contribution present in the nucleus of NGC 5044 (see Ferrari et al. 1999, for example). As discussed in Davis et al. (2012) the blueshifted NaD doublet provides a good probe of the cold interstellar medium outflow. In the case of NGC 5044 we have not found any blue-shifted component

² The mass fractions are obtained using the M/L ratios for each SSP, see STARLIGHT manual for details

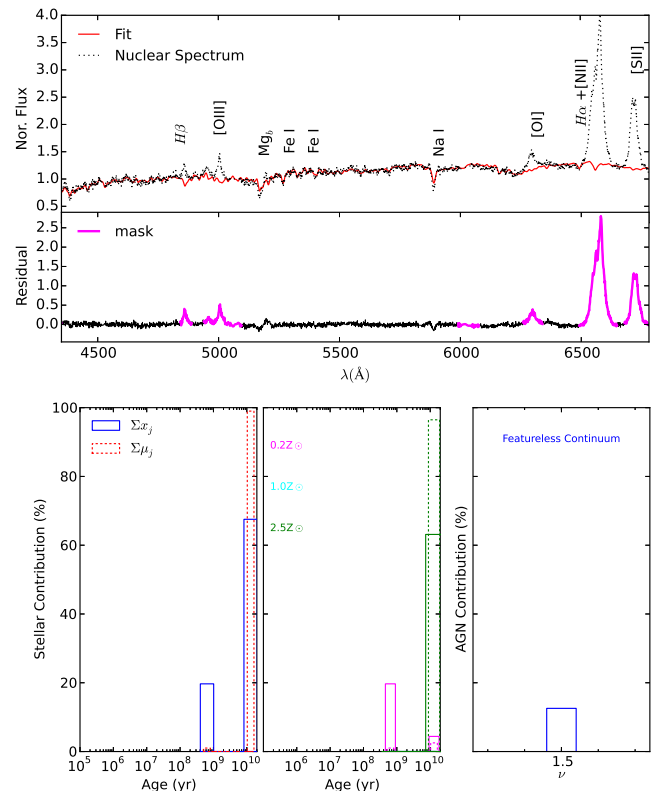


Figure 2. Example of fits. Top panel: the observed and modelled spectra normalised to unity at 4755Å, central panel: residual spectrum. The masked regions are in magenta and the residual spectrum in black lines. At the bottom we show the contribution of the stellar population vectors in light fractions (x_j , full line) and mass fractions (μ_j , dashed line). Left: metallicities summed contributions, center: contributions separate by each metallicity, right: featureless continuum contribution.

for NaD doubled in all our FoV, indicating that in this galaxy, the cold material is probably not outflowing.

Interestingly, our fitting resulted only in contributions of four of the base components: three SSPs with ages 900 Myr (0.2 Z_{\odot}) and 13 Gyrs (0.2 and 2.5 Z_{\odot}), plus a FC component. The 2D maps for these components (in light fractions), together with mean age, A_{ν} , FC and mean metallicity are shown in Fig. 4. It is clear from this figure that the light in the central region of NGC 5044 is dominated by an old stellar population. Besides, it is also clear that an intermediate age (900 Myr) stellar population is present, surrounding the galaxy nucleus. As far as we know, the presence of stellar populations with these ages (900 Myr) in the nuclear region of elliptical galaxies is not a common trend. For example, from an extensive stellar population study performed with large field data of the CALIFA survey, González-Delgado et al. (2015), found that in average the S0 and E galaxies have a dominant stellar population with almost the same age and they are older than those found in spirals. In addition, they reported for elliptical galaxies a small variation on the stellar ages along the galaxy radii (from 10^{10} to $10^{9.7}$ yr from the center to 3 Half Light Radius, (see figure 17 of González-Delgado et al. 2015). The differences in the results found by González-Delgado et al. (2015) and ours may be due to

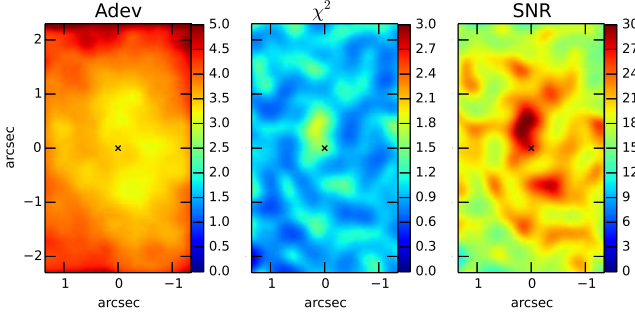


Figure 3. Quality of the fit maps. Left: percent mean deviation, center: χ^2 and right: SNR. For details see text.

the spatial and spectral resolution probed by GEMINI GMOS. For instance, the presence of spatially resolved circumnuclear intermediate age stellar populations, like we found in NGC5044, was reported for the bulges of spiral Seyfert galaxies (Riffel et al. 2010, 2011; Storchi-Bergmann et al. 2012). The maps of mean age and mean metallicities shows a trend consistent with the stellar population becoming more metal rich and older with decreasing distance with respect to the galaxy centre. Some studies have shown that the stellar population in early type galaxies also become progressively more metal rich and older with increasing velocity dispersion (Thomas et al. 2005; Clemens et al. 2006, 2009). Indeed, we found higher σ values in the central region of the NGC 5044 (see Sec. 4), thus our result does further support the findings by these authors.

In addition, our stellar population results are in agreement with the results found by Rickes et al. (2004), who performed stellar population synthesis using optical long slit data in a much larger spatial scale than ours. These authors used two different bases of elements, one with three components with metallicities $[Z/Z_\odot] = 0, -0.4$ and -1.1 and age = 10^{10} years, and another with solar metallicity and ages with 10^{10} yrs, 10^8 yrs and 10^6 yrs. They noted that there was an improvement on the fit when considering different metallicities over the different ages, with the more metallic component dominating in the central region, while the lower metallicities were enhanced in the outer regions.

Literature results on the stellar content of NGC 5044, as those presented by Werner et al. (2014) based on the GALEX and WISE data report an unusual star formation rate in NGC 5044 (SFR = $0.073 M_\odot/\text{yr}$, using a region of 10 kpc, over the last 1 Gyr). Besides, David et al. (2014) suggested that the unusual lines of PAHs found in NGC 5044 and the uncertainty in the stellar age are consequences of episodes of star formation that occurred in the last 1 Gyr (Marino et al. 2011). These results are further supported by our finding, that there is a significant contribution of the 900 Myr stellar population, distributed along the center of the galaxy (reaching values of $\sim 50\%$ at some locations).

We also found a FC contribution of about 20% in the nuclear region. This component is consistent with a scenario where the gas in the nuclear region is ionized by a weak AGN. However, we find some significant contribution of the FC in the external regions. Since this component is degenerated with a young reddened stellar population we interpret this contribution as being related with the fact that BC03 models do not include blue horizontal branch stars, and STARLIGHT fits tend to choose a young population to account for this blue population (see Cid Fernandes & Gonzalez-Delgado 2010, for details).

The visual extinction map (Av) shows a clear enhancement at the galactic centre, reaching ~ 0.35 mag and decreasing to 0.1 mag at the external region. Ferrari et al. (1999) found a mean extinction $A_v = 0.01$ (mag) within a region of $10''$, which is about twice of the size of our region. From this A_v , they estimated a dust mass of about $10^4 M_\odot$ distributed irregularly along the galaxy. In addition, a hot dust mass of $67 M_\odot$ was determined by Ferrari et al. (2002) from Mid-IR data.

4 KINEMATICS OF IONIZED GAS

In order to map the gas kinematics we measured the centroid velocity (hereafter velocity field, v_r) and velocity dispersion (σ_{v_r}) from the data cube without the subtraction of the stellar populations contribution (see Sec. 3), because the stellar population templates have slightly lower resolution than the data cube, this difference would affect the accuracy on velocities determination. We have used an in house fitting code (Hernandez-Jimenez et al. - in preparation) to fit Gaussian functions to the emission-line profiles. We fitted single- or multi-Gaussian components to the spectra in order to obtain the flux of each emission line. The line pseudo-continuum is linearly fitted using side-bands regions, free from emission or absorption features, as close as possible to the emission line. The uncertainty associated to the measurements of the velocity field (δ_{v_r}), in a given line at λ_0 , depends implicitly on the error of the Gaussian peak centroid, (δ_{λ_0}). Then, we do a straightforward error propagation of the basic expression for the Gaussian peak centroid (λ_0) to calculate δ_{v_r} . We derived the following expression:

$$\delta_{v_r} = \frac{c}{\lambda_0} \delta_{\lambda_0}; \delta_{\lambda_0} = \frac{I_0 \sqrt{N}}{F_\lambda} \delta_\lambda, \quad (2)$$

where I_0 is the intensity at maximum of the fitted Gaussian, N is the number of pixels, F_λ is the line flux, and δ_λ is the error of the spectral dispersion taken from the FWHM (1.7\AA) of the CuAr arc lamp. The error map δ_{v_r} of H α line is shown in panel (d) of Fig. 10, where we can see that the uncertainties in velocity field in the nuclear region is lower than 10 km s^{-1} , while at the data cube border (where the SNR is lower), the error is $\sim 20 \text{ km s}^{-1}$.

In order to study the kinematic components of the ionized gas in the circumnuclear region of NGC 5044, we obtained channel maps between -431 km s^{-1} and $+489 \text{ km s}^{-1}$ relative to the systemic velocity of the galaxy derived by modelling the gas velocity field (see Sec. 5 and Table 4), in velocity bins of 80 km s^{-1} (see Figure 5). We identified, in the negative channel map -180 km s^{-1} , a bright structure at NE, named as region 1, and a weak structure (region 2) at west, which is also observed at the channel -96 km s^{-1} . In the positive channel maps the most conspicuous structure was named as region 3 and is located at South, at the channel 70 km s^{-1} . There is also a filamentary structure, region 4, located at North between 405 and 489 km s^{-1} . Comparing these ionized gas structures with the ones of molecular gas identified by David et al. (2014), using ALMA observations, we found that the brighter peak located at NE of the channel map -180 km s^{-1} match with the approaching cloud 13 (see Figure 6 in David et al. 2014), whereas the south filament in channel map 70 km s^{-1} coincides with the receding molecular gas cloud 18. In both regions David et al. (2014) found evidence that the molecular gas is falling into the center of the galaxy. On the other hand, we point out that the central region appears in all channel maps, indicating the presence of a nuclear broad component with a FWHM $\sim 3000 \text{ km s}^{-1}$, typical of AGN.

We fitted the [NII]+H α complex at the nuclear region with

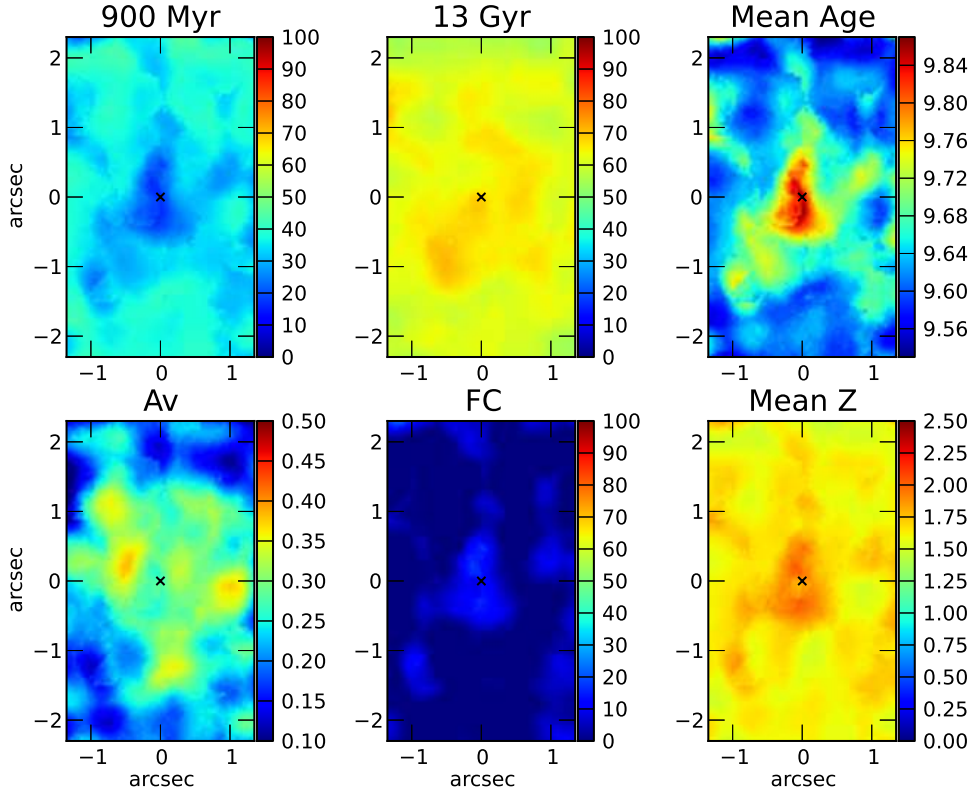


Figure 4. Top panel shows the population maps of NGC 5044 at age, wherein in the left we can see the population contribution of 900 Myr, in the center is the population contribution of 13 Gyr and at right is the mean age. The bottom panel shows A_v map at left, the FC contribution in the center and the mean metallicity (Z) at right

six gaussians, five corresponding to the narrow components of the lines $[\text{NII}]\lambda 6548$, $\text{H}\alpha\lambda 6563$, $[\text{NII}]\lambda 6583$, $[\text{SII}]\lambda\lambda 6717,31$ and one to account for the $\text{H}\alpha$ broad component. We constrained the narrow components as having the same redshift and FWHM for all lines, and fixed $[\text{NII}]\lambda 6583/[\text{NII}]\lambda 6548 = 3.1$ (Osterbrock & de Robertis 1985). The fit for the additional component was done with all parameters free, resulting in a large FWHM value ($\sim 3000 \text{ km s}^{-1}$), thus we associated it with a broad $\text{H}\alpha$ emission. To properly reproduce the emission line profiles of the outer regions (1, 2, 3 and 4), it was necessary two sets of gaussians, constrained as mentioned above, but each set with their own values for redshift and FWHM. We only considered lines with SNR above than 3σ of the fitted continuum (see Fig. 6). In Table 3 we show the values obtained for each fit, where V_c is the peak velocity of the line, and $|\Delta V|$ is the shift between the line sets. The fitted $\text{H}\alpha + [\text{NII}]$ and the $[\text{SII}]$ lines profiles, obtained with apertures of the $0.7''$, are shown in Figure 6. The secondary set of lines of regions 2, 3 and 4 are blueshifted with respect to the first one. The difference in velocity between the sets for region 2 is 407 km s^{-1} (the largest one). We point out that this region is the closest from the nucleus. The velocity difference for regions 3 and 4, are $\sim 300 \text{ km s}^{-1}$. The secondary set of lines for region 1 is redshifted with respect to the primary one in about 200 km s^{-1} . Figure 6 also shows the line profiles for the nuclear region, where the $\text{H}\alpha$ broad component is blueshifted with respect to the narrow component by 558 km s^{-1} . The FWHM of these compo-

nents are $\sim 1080 \text{ km s}^{-1}$ and $\sim 3000 \text{ km s}^{-1}$, respectively. It is clear from Figure 6, that the regions 2 and 4 do present a wider FWHM than regions 1 and 3. Besides they do show a weak red wing in the $[\text{NII}] + \text{H}\alpha$ complex (very close to the 3σ detection limit). We have not a very clear explanation for this component, however, we do speculate that this weak component is most likely originated from material outflowing from the AGN, once these two locations are closer to the galaxy center. Similar results were found for other early type galaxies, for example, Ricci et al. (2014) fitted two sets of Gaussians to the emission lines in the inner 100 pc of 10 early type galaxies and found that for seven galaxies one of these sets has $\text{FWHM} > 390 \text{ km s}^{-1}$ and the other (which corresponds to the $\text{H}\alpha$ broad component) has $\text{FWHM} > 2000 \text{ km s}^{-1}$. In summary, this exercise indicates that there are three kinematical components which we discuss in the following sections.

Velocity field and dispersion maps measured on $\text{H}\alpha$ are shown in Figure 10. They were obtained from a fit of a single component for each emission line over the whole FoV, except for the nuclear region where a very broad component was added. Analysing the velocity field map, we found evidence of rotating gas and that the velocity field is asymmetric³, with the receding side at the south and approaching side at the north. The maximum approaching value

³ This asymmetry can be due to the non-rotational motions of the filamentary structure observed in this galaxy, see section 7.

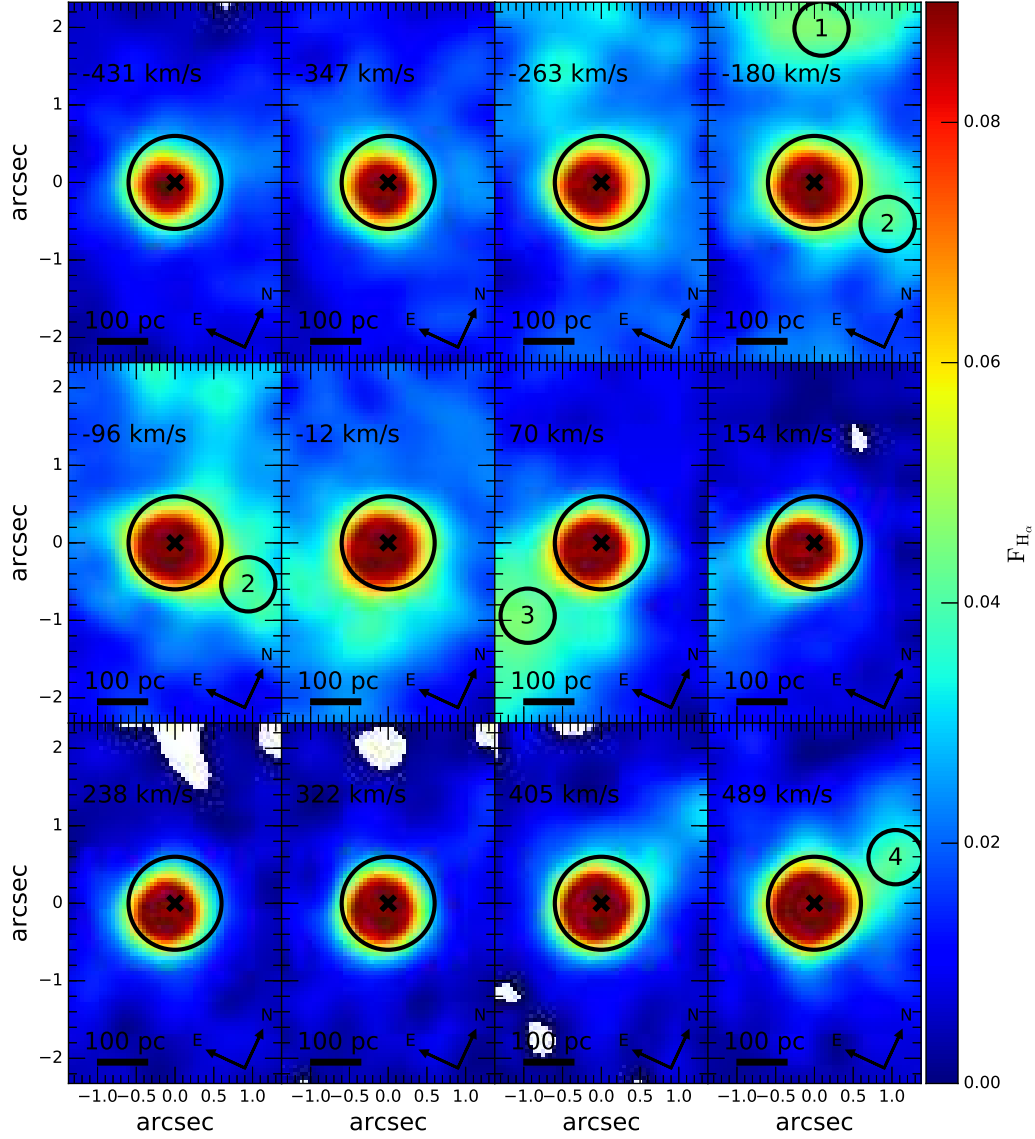


Figure 5. Velocity channels along the $H\alpha$ emission line in $\sim 80 \text{ km s}^{-1}$ bins centered on the velocities indicated in each panel. The intensities are represented in the color scale to the right in flux units of $10^{-15} \text{ erg cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$. The central circle in all channels represents the nuclear region. The photometric center of the galaxy is marked with a symbol “x” in all channels.

is -120 km s^{-1} at $\sim 200 \text{ pc}$ and the receding one is $\sim 200 \text{ km s}^{-1}$ at $\sim 100 \text{ pc}$. The line-of-nodes lies in $\text{PA} \sim 152^\circ$.

The $H\alpha$ velocity dispersion map corrected by the instrumental broadening (σ , Figure 10e), shows a large range of values (with a constant mean uncertainty of 4 km s^{-1}) of through the overall FoV, from 100 km s^{-1} up to 600 km s^{-1} , the peak of the distribution has an offset of $\sim 30 \text{ pc}$ to SE with respect to the photometric center, marked with a symbol “x” in all maps. Two different regions can be clearly distinguished from the distribution of σ values. The first one is the nuclear region that shows a σ gradient from 300 km s^{-1} to 600 km s^{-1} . The second region presents a “dove-like” distribution of σ values between 150 and 300 km s^{-1} , with “wings” on the east and north directions and the “body” in the SW direction. We noted that, in the rest of the FoV, the velocity field and dispersion velocity have similar values ($\sim 100 \text{ km s}^{-1}$).

5 DISTRIBUTION AND IONIZATION MECHANISMS OF THE IONIZED GAS

The results of the individual fits obtained from the stellar synthesis can be subtracted spaxel-by-spaxel, letting us with a clean residual data cube, free from the stellar population absorption features (see bottom Figure 2), thus, allowing us to study the pure emission gas component. To measure the emission line fluxes we used the same methodology described in Sec. 4.

Figure 7 present the ionized gas flux distribution for following emission lines: $H\alpha$ total flux, $[\text{NII}]\lambda 6583$, $[\text{SII}]\lambda 6717 + \lambda 6731$ and $[\text{OIII}]\lambda 5007$. In the inner 1 kpc of the NGC 5044, the gas distribution is irregular. The flux maps for the emission lines $[\text{NII}]$ and $[\text{SII}]$ show that their emission are more concentrated at the nucleus and indicate a preference of distribution along south-north direction, while the $[\text{OIII}]$ map shows emission over the whole FoV,

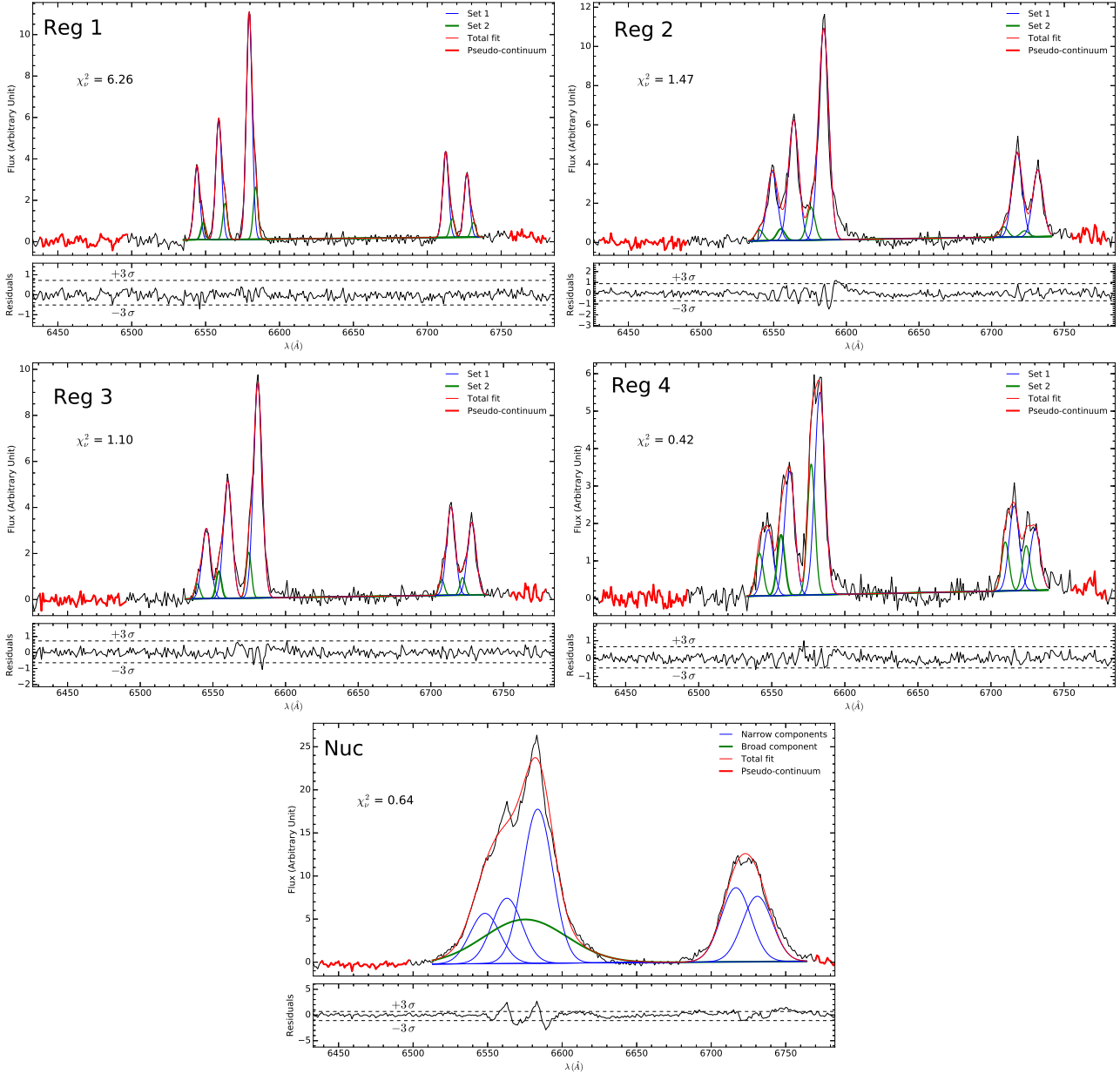


Figure 6. Line profiles of [NII]λ6548, Hα, [NII]λ6583, [SII]λλ6717,31 obtained in the apertures of $\sim 0.7''$. The profile of the nuclear aperture shows components with FWHM $\sim 1080 \text{ km s}^{-1}$ and a Hα broad component (FWHM $\sim 3000 \text{ km s}^{-1}$). The emission line profiles obtained in the other regions are composed by two set of narrow lines (FWHM $< 400 \text{ km s}^{-1}$).

with regions of higher intensity extended along the E-W direction. Also, the flux distribution for other emission lines detected in our data (Hβ, [OIII]λ4959 and [OI]λ6300), do have a lower SNR and are shown for completeness.

From the flux maps, we derived the following values for the emission line ratios: $0.1 < \log ([\text{NII}]\lambda 6583/\text{H}\alpha) < 0.5$, $-0.05 < \log [\text{SII}]\lambda\lambda/\text{H}\alpha < 0.5$ and $-0.4 < \log [\text{OIII}]\lambda 5007/\text{H}\beta < 0.5$, which are typical of LINER-like emission line objects (Heckman 1980; Ho 2008).

The dominant ionization/excitation mechanism of the ionized gas in NGC 5044 is still controversial. According to Macchetto et al. (1996) the observed spectra can be explained by post-AGB stars, while Rickes et al. (2004) suggest that the spectra

have contributions of a LLAGN in the nuclear region plus post-AGB stars in the outer parts.

In order to study the dominant ionization mechanism of the emission line gas in NGC 5044, we constructed diagnostic diagrams using the emission line ratios mentioned above. The diagnostic diagrams for the nuclear region and for the regions 1 to 4 are shown in Figures 8 and 9, respectively.

In the diagnostic diagrams, in order to discriminate among the different excitation mechanism, we added the theoretical maximum starburst line of Kewley et al. (2001, hereafter KW01) and the theoretical line separating purely star formation galaxies, Seyferts, LINERs and composite galaxies of Kewley et al. (2006, hereafter KW06 line). The empirical line dividing star-forming galaxies and

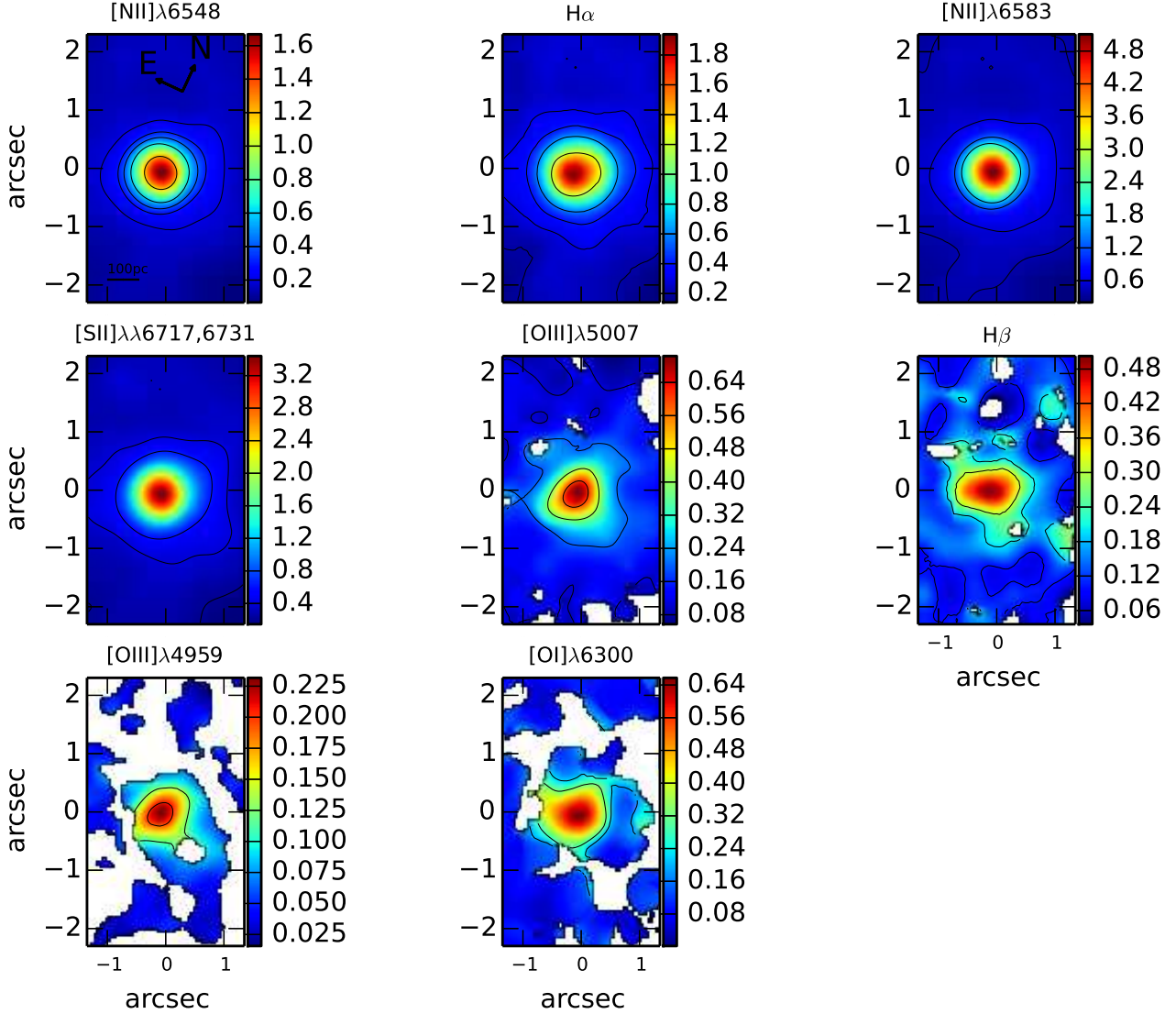


Figure 7. Flux distribution of the emission-lines measured from the spectra free from the stellar contribution. The color bar show the range of flux values expressed in units of $10^{-15} \text{ erg cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$.

composite objects of Kauffmann et al. (2003, hereafter KF03) was also included.

Since shocks could explain the LINER-like spectra (Dopita & Sutherland 1995; Heckman 1980; Dopita et al. 2015), we also added to the diagnostic diagrams shock models calculated with the MAPPINGS III shock and photoionization code from Allen et al. (2008). These shock models include a range of chemical abundance sets, pre-shock densities from 0.01 to 1000 cm^{-3} , velocities up to 1000 km/s, magnetic fields from 10^{-10} to 10^{-4} G, and magnetic parameters ($B/n^{1/2}$) from 10^{-4} to $10 \mu\text{G cm}^{3/2}$. Since, the electron density (n_e) of the pre-shock material is an important physical quantity that affects the emission spectrum in radiative shocks, we estimated n_e using [S II] $\lambda\lambda$ 6717Å, 6731Å emission line ratios (Osterbrock & Ferland 2006; Panuzzo et al. 2011) measured in the regions 1 to 4. We found $35 < n_e < 200$, the lower value corresponds to the region 4, while the higher value was found in the region 3, thus we adopted a mean value of

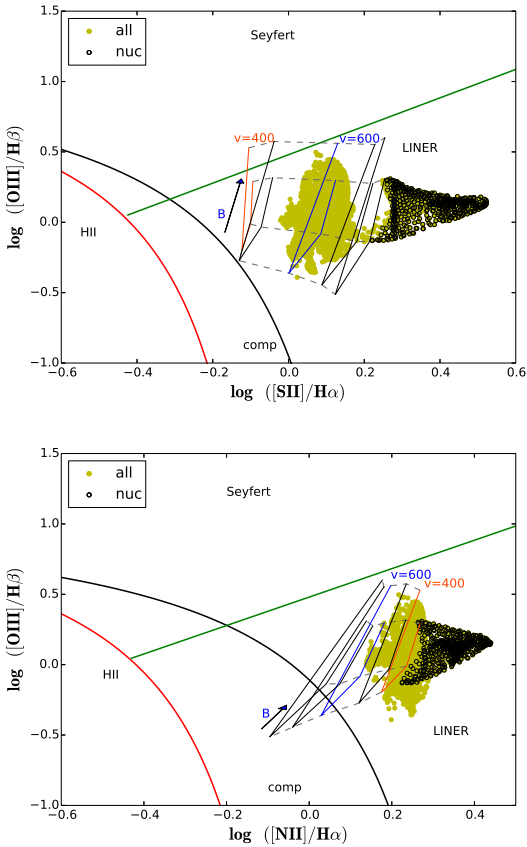
$n_e=100 \text{ cm}^{-3}$. The models consistent with our observational data are those of shock without precursor, with solar metallicity and with pre-shock density of $n_e=100 \text{ cm}^{-3}$.

In Figure 8 we show the ratios obtained for all the spaxels along the FoV (yellow) and highlight those of the nuclear region (black). It is clear that the nuclear region presents some discrepancy with respect to the circumnuclear one, suggesting a mixing of ionization mechanisms, since the black circles are in the LINER region, while the circumnuclear (yellow) lies in the shock zone.

In addition, we investigate in detail the excitation mechanism of the selected regions 1, 2, 3 and 4 identified in the $\text{H}\alpha$ channel maps (Figure 5). For each one of these regions we constructed diagnostic diagrams involving the line ratios $[\text{O III}]/\text{H}\beta \times [\text{S II}]/\text{H}\alpha$ and $[\text{O III}]/\text{H}\beta \times [\text{N II}]/\text{H}\alpha$ (Figure 9). For the diagnostic diagrams using the [S II]/ $\text{H}\alpha$ ratio (which is more sensitive to shocks), we found shock velocities $> 550 \text{ km s}^{-1}$, while the shock models for [N II]/ $\text{H}\alpha$ are not able to predict the observed values for regions

Table 3. Results for the Gaussian profile fits measured for H α emission line in selected regions.

Region	Set	FWHM (km s ⁻¹)	V _c (km s ⁻¹)	\Delta V (km s ⁻¹)
1	1	215 ± 28	-178 ± 34	196 ± 50
	2	172 ± 25	18 ± 37	
2	1	376 ± 40	46 ± 25	407 ± 37
	2	301 ± 35	-361 ± 28	
3	1	323 ± 36	-119 ± 28	283 ± 44
	2	194 ± 27	-402 ± 35	
4	1	376 ± 40	-23 ± 25	274 ± 39
	2	280 ± 33	-297 ± 30	
Nuc	Narrow	1076 ± 68	5 ± 15	558 ± 17
	Broad	3001 ± 113	562 ± 9	

**Figure 8.** Diagnostic diagrams. Line ratios of all the spaxels are shown in yellow dots. The nuclear region (~ 200 pc) are in black dots. Black (KW01), red (KF03) and green (KW06) lines are the empirically and theoretically derived nuclear activity separations between LINERs, Seyfert and Starbursts. Solid and dashed lines are the grid of the shock models by Allen et al. (2008). The grid has a range in shock velocity (solid line) plotted in steps of 100 km s^{-1} , from 400 km s^{-1} up to 800 km s^{-1} , we highlighted $v=400 \text{ km s}^{-1}$ (red) and $v=600 \text{ km s}^{-1}$ (blue). The magnetic parameter are plotted as the dashed lines with the values $3.23, 0.5, 1$ and $2 \mu\text{G cm}^{3/2}$.

1, 3, and 4. However, region 2 can be explained by models with velocities of $\sim 400 \text{ km s}^{-1}$, for the [NII]/H α ratio. The above results suggests that the dominant excitation mechanism in the identified regions is compatible with shock waves with velocity $> 550 \text{ km s}^{-1}$ (for the [SII]/H α ratio) moving in a environment with density of $n_e = 100 \text{ cm}^{-3}$. Therefore, in the inner kpc of this galaxy there are two ionization mechanisms taking place: in the center (~ 200 pc) the emission lines are dominated by photoionization due to a LLAGN, while in the circumnuclear region the gas emission is can be shock dominated. In addition this result is in agreement with the fact that we are finding a significant fraction of the FC in the central region (see Fig. 2) and with the broad component that we found for H α (see Figure. 6-Nuc), that indicates the presence of an AGN.

6 THE GAS VELOCITY FIELD OF NGC 5044: DETERMINATION OF THE SUPERMASSIVE BLACK HOLE MASS

In order to understand the gas kinematics, we have modelled the observed velocity field, assuming that the ionized gas follows circular orbits in a plane as proposed by Bertola et al. (1991), summarized by the following equation:

$$V(R, \psi) = V_s + \frac{AR \cos(\psi - \psi_0) \sin \theta \cos^p \theta}{R^2 [\sin^2(\psi - \psi_0) + \cos^2 \theta \cos^2(\psi - \psi_0)] + c_0^2 \cos^2 \theta^2}. \quad (3)$$

This results in a velocity curve that increases linearly at small radii and becomes proportional to r^{1-p} for the external regions. R and ψ are the radial and angular coordinates of a given pixel in the plane of the sky; A is related to the amplitude of the rotation curve; c_0 is a concentration parameter. The parameter p defines the form of the rotation curve, varying in the range between 1 (logarithm potential) and 1.5 (Keplerian potential), which is the range of values expected for galaxies (Bertola et al. 1991); The parameter V_s is the systemic velocity; ψ_0 is the position angle of the line of nodes; θ is the disk inclination ($\theta = 0$ for face-on disks); finally, there are two implicit parameters: the coordinates of the kinematic center, R_{cx} and R_{cy} . The equation 3 has a degeneration between A and θ parameters, which makes not reliable the θ value derived to the fit. Then, we did an estimative for θ of $42^\circ \pm 2^\circ$ from the outer isophotes of the H α flux image. Thus, this parameter was fixed for the fit.

We used a Levenberg-Marquardt method to fit the observed velocity field. The weighted fit was done considering the error map of δ_{v_r} (Fig. 10d). The fitted parameters and their respectively errors are given in Table 4. The R_{cx} and R_{cy} are not listed in this Table, instead of them, we give the difference between kinematic and photometric centres, in the sky plane, Δx and Δy . The reduce χ^2 of the fit is 10.8, this high value is due to the perturbations of the observed velocity field, and is reflected in the residual map (Fig. 10c), which presents non-rotational strong kinematic components, they are discussed and analysed in detail in Sec. 7.

The galaxy kinematic centre has a small offset, of 18 pc to NE direction, with respect to its photometric centre. Considering that our angular resolution is $\sim 125 \text{ pc}$ this offset is negligible and we conclude that the kinematic centre coincides (within the uncertainties) with the photometric nucleus.

The rotating disk model that provided the best fit of the observed velocities is shown in Fig. 10b. The rotation curve derived

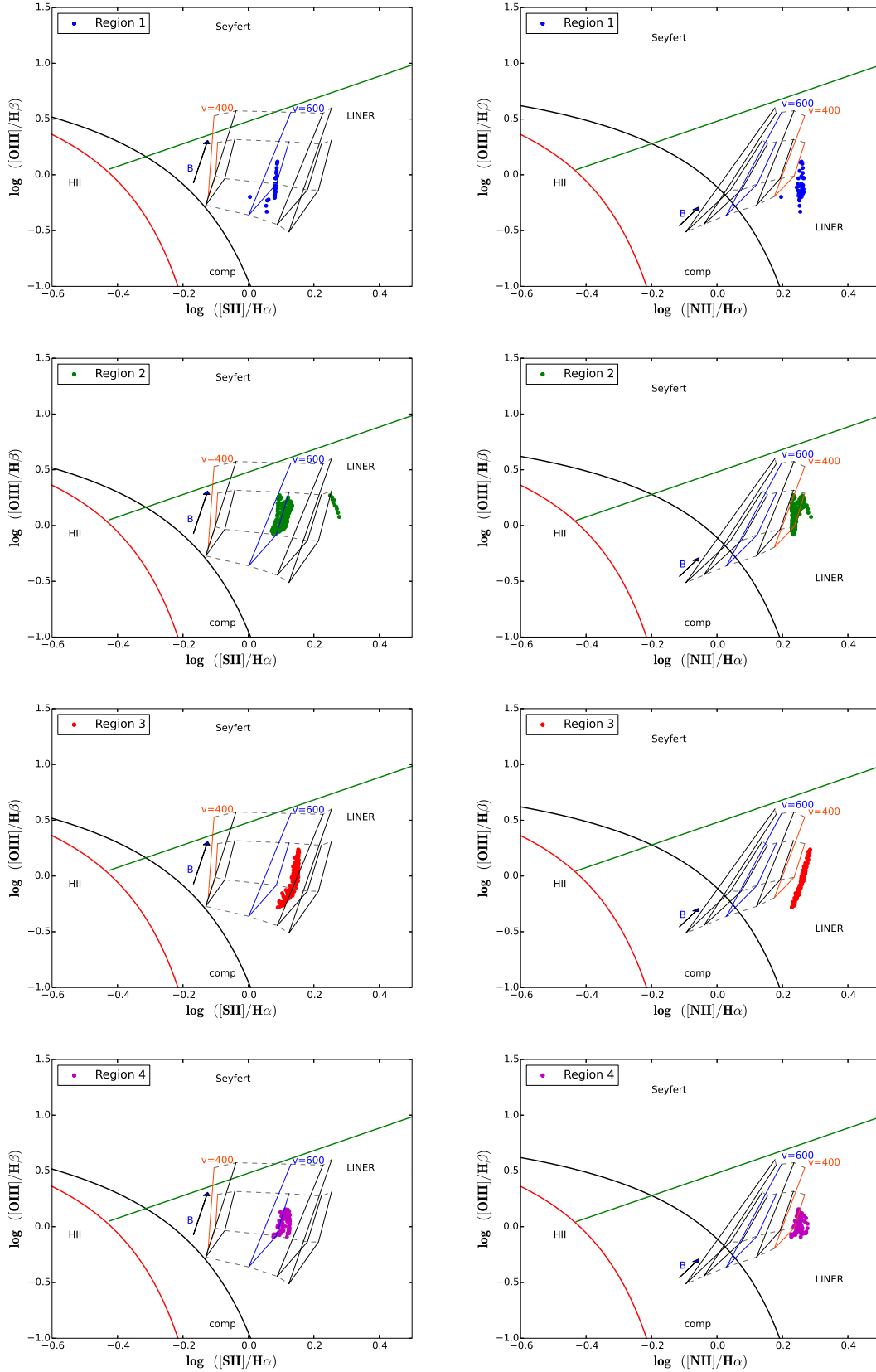


Figure 9. Same as Figure 8, but for the regions 1 to 4 selected from the channel maps.

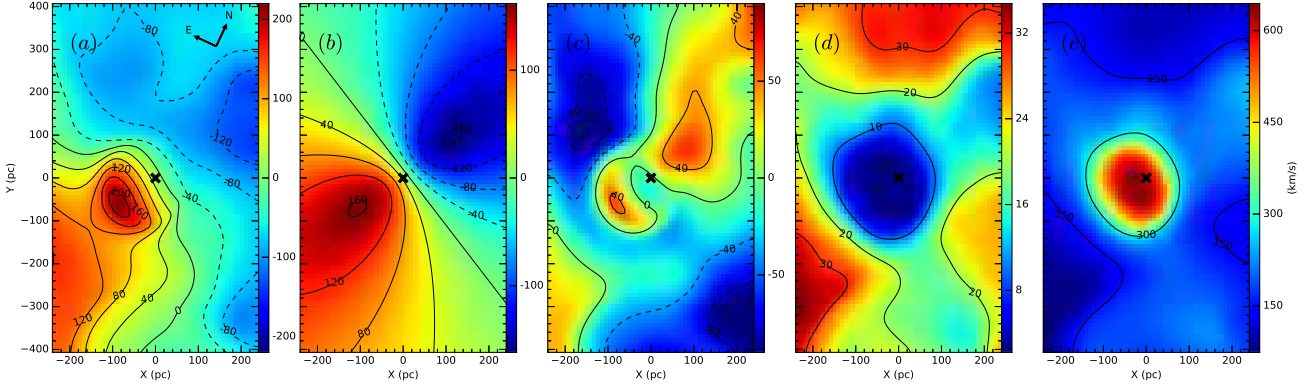


Figure 10. From left to right the panels shows: (a) the velocity field map with iso-velocities, (b) the best model fitted; (c) the residual map of velocities, (d) the error map of velocity field δ_{v_r} , and (e) the velocity dispersion (σ) map. The photometric center of the galaxy is marked with a symbol “x” in all maps, and it match well the kinematic center (panel (b)), while the peak of the velocity dispersion is at 30 pc to SE.

Table 4. Gas velocity field parameters.

Parameter	Values
A (km s ⁻¹)	1285 ± 189
c ₀ (pc)	95 ± 5
p	1.5 ± 0.1
v _s (km s ⁻¹)	2782 ± 1
ψ ₀	152° ± 2°
Δx (pc)	0 ± 1
Δy (pc)	18 ± 1

from this model is presented in Figure 11. It is clear that the gas reaches its maximum rotational velocity (240 km s⁻¹) at a distance of 136 pc. In addition, the derived value for the p parameter ($p \sim 1.5$) indicates that the gas distribution has a Keplerian behaviour and thus the dynamic in this region must be dominated by a high mass concentration. Assuming the Keplerian approximation for the gas motion ($M = r \times V_{\text{rot}}^2 / G$), we estimate a mass of $1.9 \pm 0.9 \times 10^9 M_{\odot}$ within the inner 136 pc.

The value of this mass concentration can be verified using the M - σ relation (Kormendy & Ho 2013) as follows:

$$M_{bh} = 0.309_{-0.033}^{+0.037} \times 10^9 M_{\odot} \left(\frac{\sigma_{\star}}{200 \text{ km s}^{-1}} \right)^{4.38 \pm 0.29}, \quad (4)$$

where σ_{\star} is the stellar velocity dispersion measured in an aperture with radius of $R_e/8$, with R_e being the half-light radius. We derived this radius for NGC 5044 from its brightness surface profile, using a K_s band image taken from 2MASS Extended Source Image Catalogue (Skrutskie et al. 2006). The obtained value is $R_e = 29''$, which corresponds to 5.1 kpc, the required value of $R_e/8$ is ~ 600 pc, that is close to the database FoV. The σ_{\star} was determined from the absorption lines Mg b λ 15167, Fe I λ 5270 and Fe I λ 5335 measured in a single integrated spectrum obtained collapsing all the non stellar subtracted cube spectra, since we are only interested to measure the FWHM of these stellar lines. The FWHM of the lines was corrected for instrumental broadening. The resulting σ_{\star} is the mean weighted by the flux of each absorption line, and the uncertainties was estimated from the standard deviation of these measurements. Then, the found value of σ_{\star} for NGC 5044 is 300 ± 57 km s⁻¹. This value is in agreement with the 250 km s⁻¹ found for the galaxy center in Caon et al. (2000). The M_{bh} derived using this σ_{\star}

is $1.8 \pm 1.6 \times 10^9 M_{\odot}$, which is in full agreement with the value obtained with the Keplerian approximation.

With the purpose of testing the possibility that the peculiarities in the velocity field obtained in Sec. 4 [e.g. a steep rise toward the center (300 - 600 km s⁻¹), and the rotation curve reaching its maximum value at a small radius (136 pc)] are associated with the presence of a black hole, we plotted in Figure 11 the Keplerian rotation curve expected for a SMBH with $M = 1.8 \pm 1.6 \times 10^9 M_{\odot}$ (dash-dotted line), the observed (red line) and modelled (black line) rotation curves for the central region of the galaxy. We also include the rotation curve derived from the Sérsic profile (dashed line) using the K band brightness surface profile (see Hernandez et al. 2013, 2015, for details on methodology). From Figure 11, it is clear that for the inner 136 pc (dashed vertical line), the central kinematics is dominated by the SMBH potential. This would explain why the maximum rotation curve of the gas and the steep rise in the dispersion velocity profile is observed inside this small radius. Otherwise, without the presence of a SMBH the observed rotation curve would follow that one derived from the Sérsic profile. A similar kinematic behaviors as that we found for NGC 5044 have been observed in other early type galaxies, for example the elliptical M 87 that harbor a SMBH ($3 \times 10^9 M_{\odot}$ Macchetto et al. 1997; Ho & Kormendy 2000) and the lenticular galaxy NGC 3115 ($10^9 M_{\odot}$ Kormendy & Ho 2000). Taking the evidences presented here, we conclude that the nuclear gas motions are driven by the gravitational potential of the central SMBH, with mass of $1.8 \pm 1.6 \times 10^9 M_{\odot}$.

7 EVIDENCE OF GAS INFLOW IN NGC 5044

In order to derive the non-rotational velocities, resulting from radial or perpendicular motions, we used the residual velocity map obtained by subtracting the velocity field model from the observed one (Fig. 10c). We can distinguish in the residual map two blueshifted regions with velocities around ~ -40 km s⁻¹, one at east and other at west. Both regions show a peak of -80 km s⁻¹. On the other hand, two redshifted structures are clearly observed along the galaxy’s line-of-nodes (north and south), with velocities of 40 km s⁻¹. These regions have the velocity dispersion of 150 km s⁻¹ (see Figure 10e). The detection of these structures is reliable, because their velocities are higher than the uncertainties (δ_{v_r}) as

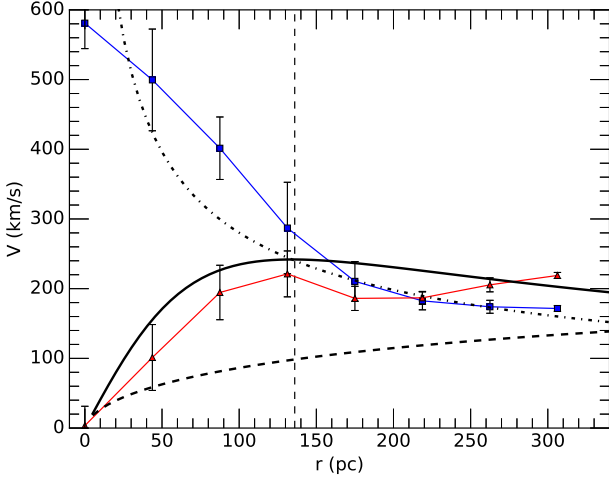


Figure 11. The projected observed rotation curve (red line), overlaid the modelled one (black). The blue line (square points) is the mean velocity dispersion profile along of line-of-nodes. The dash-dotted line is the BH Keplerian rotation curve. The dashed line is the rotation curve derived from Sérsic’s K brightness profile. Note that the gas dynamics on the left side of the vertical line (at 136 pc) is dominated by the BH potential.

seen in the velocity field uncertainty map included in Fig. 10 (panel d).

With the purpose of interpreting the structures described above, we used the Shape software (Steffen et al. 2010), which allows the user to create interactively 3D spatial structures with their respective velocity fields. The outcome is a projected synthetic velocity field image with a similar orientation to the observer. The output velocities are integrated along the line of sight. We presents in Figure 12 the 3D model for NGC 5044. We assume a rotating disk represented by a cylinder, whose height is one tenth of the radius and its velocity field is that obtained in Section 6, whereas we assume for all gas filamentary structures a geometry of cone with an aperture of 15° , where the gas inside it has a velocity vector oriented toward the center. The orientations of the cones and the magnitudes of their respective velocity vectors were constrained requiring that projected velocities of these structure, along of the line of sight, match the residual map. We found that the best orientation for the cones is when: a) The north and south cone-filaments are inclined in 20° with respect to the disk and they have a PA with respect to the line-of-node of 0° and 180° , respectively, and the magnitudes of their respective velocity vectors are 80 km s^{-1} ; b) the cone associated with the east filament is inclined 26° with respect to the disk, has a PA of 90° , and the magnitude of its velocity vector is 105 km s^{-1} ; c) the cone that represents the west filament is inclined in -62° with respect to the disk, has a PA of 270° , and the magnitude of its velocity vector is 105 km s^{-1} . The resulting geometrical configuration, along the line of sight, to represent the gas filamentary structures is shown in Fig. 12a. The synthetic model of the velocity field is presented in in Fig. 12b. It is created from the sum of the disk and the filamentary structures models, which would represent the observed velocity field as seen in Fig. 10a. We can see that the model is able to recovery the asymmetry in the observed velocity field. In addition, we present in Fig. 12c the projected velocities of the cones along the line of sight. It reproduces well the values of residual velocity map (Fig. 10c). This suggest that a suitable interpretation of the residual map could be that the gas in the filamentary structures is falling toward the galaxy center. This re-

sult is in agreement with the findings of David et al. (2014), which suggested that some of the molecular CO clouds they detect are infalling towards the galaxy in a ballistic trajectory. However, we should be caution with our results since they are a simple model approach to reproduce the complex velocity field of the inner 600 pc of NGC5044.

Using the above results we are able to make an estimative of the inflow rate of the gas in the filamentary structure from their observed $H\alpha$ luminosity and the mean magnitude of the velocity of the cone-filaments. Thus, first we integrated the $H\alpha$ flux in all FoV and found $F_{H\alpha} = 1.65 \times 10^{-12} \text{ erg cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$, which at the galaxy distance (Table 1) results in $L_{H\alpha} = 2.7 \times 10^{41} \text{ erg s}^{-1}$. Note that the value obtained here is higher than that found by Macchetto et al. (1996) integrated over the entire galaxy. We attribute this difference to indirect calibration approach used by Macchetto et al. (1996).

The ionized gas mass, M_{HII} , can be estimated as follows:

$$M_{HII} = \frac{L_{H\alpha}}{h\nu_{H\alpha}} \frac{m_p}{n_e \alpha_{H\alpha}^{eff}}, \quad (5)$$

where, m_p is the proton mass and $\alpha_{H\alpha}^{eff}$ is the effective recombination coefficient for $H\alpha$. Then, by assuming the “case B” for the recombination (Osterbrock & Ferland 2006), adopting a $T_e = 10000 \text{ K}$ and the mean $n_e = 100 \text{ cm}^{-3}$ around of FoV, we found a $M_{HII} = 6.38 \times 10^6 M_\odot$. Finally, the inflow rate is calculated with the following expression:

$$\dot{M}_{inflow} = 4N_{HII}vA, \quad (6)$$

where N_{HII} is the density of ionized gas, v the velocity of the inflowing material, A is the area of the cone base, and the factor 4 is due to the number of cones. N_{HII} was estimated adopting a volume of 0.2 kpc^3 , which was calculated from the equivalent radius of the physical area of the FoV, $r_{FoV} = 0.41 \text{ kpc}^2$. $v = 93 \text{ km s}^{-1}$ is the mean value of all cones. $A = 0.03 \text{ kpc}^2$ was calculated from the r_{FoV} and aperture angle of the cones (15°). Then, we found a value of $\dot{M}_{inflow} \approx 0.4 M_\odot \text{ yr}^{-1}$. We can now compare it to the mass accretion rate necessary to power the active nucleus, by using

$$\dot{M} = L_{bol}/(\eta c^2), \quad (7)$$

where L_{bol} is the bolometric luminosity, η is the efficiency of conversion of the rest-mass energy of the accreted material into radiation, and c is the light speed. We approximated the bolometric luminosity as $L_{bol} \approx 100L_{H\alpha} \approx 2.7 \times 10^{43} \text{ erg s}^{-1}$ (e.g., Ho 1999, et al. 2001). We adopted a value of 0.1 for η , which is a typical value for a optically thick and geometrically thin accretion disc (e.g. Frank, King & Raine 2002). Then, we obtain an accretion rate of $\dot{M} \approx 0.005 M_\odot \text{ yr}^{-1}$. This value is a factor of 10^2 lower than the inflow rate calculated.

One question which rises now is: are these filamentary structures an extension of the larger-scale (kpc) filaments earlier studied by Macchetto et al. (1996)? Temi et al. (2007) found a remarkably spatial correlation between the filamentary structures in $H\alpha$ and dust detected at 8 and $70 \mu\text{m}$. These authors claimed that the dust present in the filaments most likely comes from the galaxy centre. Based on these results, they proposed that NGC 5044 has suffered a recently (10^7 yr ago) feedback where the dust located in the nuclear region was disrupted, heated and transported outward to several kiloparsecs. Evidences of bubbles were found by Gastaldello et al. (2009) which reported that the inner 10 kpc of this galaxy harbors a pair of cavities together with a set of bright X-ray filaments coincident with $H\alpha$ and dust emission. In addition, Gastaldello et al. (2009) make an estimate of the release time for the bubbles as $1.2 \times 10^7 \text{ yr}$, supporting the scenario proposed by Temi et al. (2007)

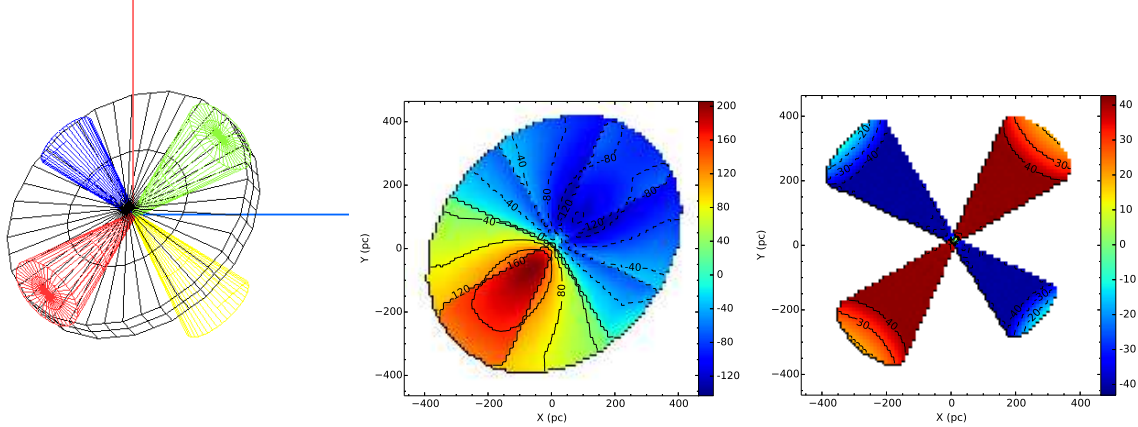


Figure 12. Left panel: representation in 3D to the arrangement of filamentary structures observed from the line of sight. The green cone represents the north filament, the red represents the south one, the blue cone represents the filament at east and the yellow cone represents the filament at west (coming from the far side of the galaxy). Middle panel: the synthetic model of the velocity field along the line of sight. Right panel: the projected velocities of the cones along the line of sight.

for this galaxy. Besides, our results point to ionized gas flowing towards the galaxy center, which one can associate with the kpc scale filamentary structure reported for this galaxy. In addition, we found strong evidence for the presence of an accreting SMBH in the nuclear region of NGC 5044, besides a broad component for $H\alpha$ therefore, we speculate that this gas inflow would be originated and transported from large kpc scale to the nucleus of NGC 5044 through the filamentary structures and part of it being accreted by the SMBH and making NGC 5044 active. This would be in agreement with the scenario where the cooling flows into central galaxy of galaxy clusters (which is the case of NGC 5044) are regulated by cyclic feedback episodes (e.g. Peterson & Fabian 2006, and references therein).

8 CONCLUSIONS

We present here, for the first time, high spatial resolution Gemini GMOS/IFU data of the elliptical galaxy NGC 5044 to map the stellar population, emission line fluxes distribution and gas kinematics in the inner kpc, with an spatial resolution of 125 pc. Our main conclusions are:

- The continuum emission of the inner kpc of NGC 5044 is dominated by an old stellar population. We also detect an intermediate age population ($\sim 40\%$ of an 900 Myr SSP) surrounding the galaxy nucleus. A featureless contribution of $\sim 20\%$ was found in the the galaxy centre, consistent with the detection of a broad component in $H\alpha$. Besides, the maps of mean age and mean Z show a trend consistent with the stellar population becoming more metal poor and younger with increasing distance from the galaxy center.
- The analysis of the emission line intensities reveals that in the inner kpc of the NGC 5044, the gas distribution is irregular and the $H\alpha$ emission follows the extended filaments. The [NII] and [SII] emission is concentrated in the nuclear region, while the [OIII] emission is detected over the whole FoV.
- To fit the central region $H\alpha$ emission lines a broad component is required, with FWHM $\sim 3000 \text{ km s}^{-1}$ confirming that the featureless continuum emission detected in the stellar population fits indeed is due to a low luminosity active galactic nuclei.
- The FWHM of $H\alpha$ narrow component present strong varia-

tions over the FoV, from FWHM $\sim 150 \text{ km s}^{-1}$ at the outer regions to 1080 km s^{-1} in the galaxy centre.

- The dominant excitation mechanism in the filaments is compatible with shock waves with velocity 550 km s^{-1} while in the centre it is explained by a LLAGN. Furthermore, we found that the brighter peak located at east (region 1) and at the south (region 3) in the channel maps are co-spatial with the CO emission detected by ALMA.
- From the $H\alpha$ velocity field map, we found evidence of rotating gas. Assuming Keplerian rotation we estimated a mass of $1.9 \times 10^9 M_\odot$ within 136 pc. Beside, using σ_* of 279 km s^{-1} and M - σ relation the estimated M_{bh} found is $1.8 \pm 1.6 \times 10^9 M_\odot$.
- Filamentary structures, with non-circular motions around 40 km s^{-1} are revealed in the residual velocity field map, obtained subtracting the disk model from the observed radial velocity field. By using 3D model for these structures we conclude that the gas inside them is falling towards the nucleus. The inflow rate of $0.4 M_\odot \text{ yr}^{-1}$, was derived from $H\alpha$ luminosity of $2.7 \times 10^{41} \text{ erg/s}$ and with the mean inflow velocity, $\sim 90 \text{ km/s}$, estimated for the 3D model. We point out that the inflow rate is 10^2 larger than the accretion rate necessary to power the LLAGN.

ACKNOWLEDGEMENTS

We thank the anonymous referee for his/her careful reading of our manuscript and for his/her insightful comments and suggestions that helped to improve the manuscript. J. A. H.J. thanks to Brazilian institution CNPq for financial support through postdoctoral fellowships (projects 158962/2014-1 and 150237/2017-0). R.R. Thanks to CNPq and FAPERGS for partial financial support to this project. R. A. R. thanks financial support from Brazilian institution CNPq (project 303373/2016-4). T.V.R. acknowledges CNPq for the financial support under the grant 304321/2016-8. 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), Ministerio de Ciencia, Tecnología e Innovación Productiva (Argentina), and Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação (Brazil).

REFERENCES

- Allen, M. G., Groves, B. A., Dopita, M. A., Sutherland, R. S., Kewley, L. J., 2008, *ApJS*, 178, 20
- Allington-Smith, J. et al., 2002, *PASP*, 114, 892
- Annibali, F., Bressan, A., Rampazzo, R., Zeilinger, W. W., Danese, L., 2007, *A&A*, 463, 455
- Asari, N. V., Cid Fernandes, R., Stasińska, G., Torres-Papaqui, J. P., Mateus, A., Sodré, L., Schoenell, W., Gomes, J. M., 2007, *MNRAS*, 381, 263
- Baldwin, J. A., Phillips, M. M., Terlevich, R., 1981, *PASP*, 93, 5
- Belfiore et al., 2015, *MNRAS*, 449, 867
- Bertola, F., Bettoni, D., Dazinger, J., Sandler, E., Sparke, L., 1991, *ApJ*, 373, 369
- Binette L., Magris, C. G., Stasińska, G., Bruzual, A. G., 1994, *A&A*, 292, 13
- Blandford, R. D., Netzer, H., Woltjer, L., "Active galactic nuclei, SaasFee advanced course 20- Lecture notes 1990", Swiss society for astrophysics and astronomy
- Bönsch, G. & Potulski, E., 1998, *Metrologia*, 35, 133
- Bregman, J. N., Snider, B. A., Grego, L., Cox, C. V., 1998, *ApJ*, 499, 670
- Bruzual, G. & Charlot, S., 2003, *MNRAS*, 344, 1000
- Byrd, R. H., Byrd, R. H., Lu, P., Lu, P., Nocedal, J., Nocedal, J., Zhu, C., & Zhu, C. 1994, *SIAM J. Sci. Comput.*, 16, 1190
- Cappellari, M., Emsellem, E., 2004, *PASP*, 116, 138
- Seyfert, C. K., 1943, *ApJ*, 97, 28
- Caon, N., Macchetto, D., Pastoriza, M., 2000, *ApJS*, 127, 39
- Capetti, A. & Baldi, R. D., 2011, *A&A*, 529, 126
- Cardelli, J. A., Clayton, G. C. & Mathis, J. S., 1989, *ApJ*, 345, 245.
- Cid Fernandes, R., Gu, Q., Melnick, J., Terlevich, E., Terlevich, R., Kunth, D., Rodrigues Lacerda, R., Jogu et, B., 2004, *MNRAS*, 355, 273
- Cid Fernandes, R., Mateus, A., Sodré, Laerte, Stasińska, G., Gomes, J. M., 2005a, *MNRAS*, 358, 363.
- Cid Fernandes, R., Schoenell, W., Gomes, J. M., Asari, N V., Schlickmann, M., Mateus, A., Stasinska, G., Sodre, L., Torres-Papaqui, J. P., for the SEAGal collaboration, 2008, 2009, *RMxAC*, 35, 127
- Cid Fernandes, R., Stasińska, G., Schlickmann, M. S., Mateus, A., Vale Asari, N., Schoenell, W., Sodré, L., 2010, *MNRAS*, 403, 1036
- Cid Fernandes, R., Gonzalez-Delgado, R. M., 2010, *MNRAS*, 403, 780
- Cid Fernandes, R., Stasińska, G., Mateus, A., Vale Asari, N., 2011, *MNRAS*, 413, 1687
- Clemens, M. S., Bressan, A., Nikolic, B., Alexander, P., Annibali, F., Rampazzo, R., 2006, *MNRAS*, 370, 702
- Clemens, M. S., Bressan, A., Nikolic, B., Rampazzo, R., 2009, *MNRAS*, 392, L35
- Cuppen, H. M., Kristensen, L. E., Gavardi, E., 2010, *MNRAS*, 406, L11
- Dametto, N. Z., Riffel, R., Pastoriza, M. G., Rodriguez-Ardila, A., Hernandez-Jimenez, J. A., Carvalho, E. A., 2014, *MNRAS*, 443, 1754
- David, L. P. et al., 2009, *ApJ*, 705, 624
- David, L. P. et al., 2014, *ApJ*, 792, 94
- Davis, T. A. et al, 2012, *MNRAS*, 426, 1574
- Davis, T. A., Rowlands, K., Allison, J. R., Shabala, S. S., Ting, Y. S., Lagos, C. del P., Kaviraj, S., Bourne, N., Dunne, L., Eales, S., Ivison, R. J., Maddox, S., Smith, D. J. B., Smith, M. W. L., Temi, P., *MNRAS*, 449, 3503
- van Dokkum, P. G., & Franx, M. 1995, *AJ*, 110, 2027
- van Dokkum, P. G., 2001, *PASP*, 113, 1420
- Dopita, M. A., 1976, *ApJ*, 209, 395.
- Dopita, M. A., Sutherland, R. S., 1995, *ApJ*, 455, 468.
- Dopita, M. A., et al., 2015, *ApJ*, 801, 42
- , Dwek, E., Arendt, R. G., 1992, *ARAA*, 30, 11
- Elvis, M., Maccararo, T., Wilson, A. S., Ward, M. J., Penston, M. V., Fosbury, R. A. E., Perola, G. C., 1978, *MNRAS*, 183, 129
- Fabian, A.C., Nulsen, P.E.J., Canizares, C.R., 1984, *Nature*, 310, 733
- Fabian, A.C., Sanders, J.S., Crawford, C.S., Conselice, C.J., Gallagher, J.S., Wyse, R.F.G., 2003, *MNRAS*, 344, 48.
- Fabbiano, G., KIM, D., W., Trinchieri, G., 1992, *ApJS*, 80, 531.
- Filippenko, A., V., 1982, *PASP*, 94, 715.
- Ferguson, H. C., Sandage, A., 1990, *AJ*, 100, 1.
- Ferland, G. J.; Netzer, H., 1983, *ApJ*, 264, 105
- Ferland, G. J., Fabian, A. C., Hatch, N. A., Johnstone, R. M., Porter, R. L., van Hoof, P. A. M., Williams, R. J. R., 2009, *MNRAS*, 392, 1475
- Ferrari, F., Pastoriza, M. G., Macchetto, F., Caon, N., 1999, *A&A*, 136, 269.
- Ferrari, F., Pastoriza, M. G., Macchetto, F. D., Bonatto, C., Panagia, N., Sparks, W. B., 2002, *A&A*, 389, 355
- Friedman S. H., Heinz S., Churazov E., 2012, *ApJ*, 746, 112
- Gastaldello, F., Buote, D. A., Temi, P., Brighenti, F., Mathews, W. G., Ettori, S., 2009, *ApJ*, 693, 43
- Georgantopoulos I., Panessa, F., Akylas, A., Zezas, A., Cappi, M., Comastri, A., 2002, *A&A*, 386, 60
- Guillard, P., Boulanger, F., Cluver, M. E., Appleton, P. N., Pineau Des For ets, G., Ogle, P., 2010, *A&A*, 518, A59
- Gonzalez R.C., Woods R.E., 2002, *Digital Image Processing*, 2nd edition, Prentice-Hall, Englewood Cliffs, NJ
- González-Delgado, R. M et al, 2015, *A&A*, 581, 103
- Goudfrooij, P., Hansen, L., Jorgensen, H. E., Norgaard-Nielsen, H. U., 1994, *A&AS*, 105, 341
- Greene, J. & Ho, L. C., 2005, *Apj*, 630, 122
- Hamuy M., Walker A. R., Suntzeff N. B., Gigoux P., Heathcote S. R., Phillips M. M., 1992, *PASP* 104, 533
- Halpern, J. P., Steiner, J. E., 1983, *ApJ*, 269, 37
- Hansen, L., Jorgensen, H. E., Norgaard-Nielsen, H. U., 1991, *A&A*, 243, 49
- Heckman, T. M., 1980, *HiA*, 5, 185.
- Heyer, M., H., Schloerb, F., P., 1997, *ApJ*, 475, 173
- Hernandez-Jimenez, J. A., Pastoriza, M. G., Rodrigues, I., Krabbe, A. C., Winge, Cludia, Bonatto, C., 2013, *MNRAS*, 435, 3342
- Hernandez-Jimenez, J. A., Pastoriza, M. G., Bonatto, C., Rodrigues, I., Krabbe, A. C., Winge, Cludia, 2015, *MNRAS*, 451, 2278
- Ho, L. C., 2008, *ARA&A*, 46, 475
- Ho, L. & Kormendy, J., 2000, *ea..bookE2365H*
- Hook, I. M., 2004, *PASP*, 116, 425
- 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., Ivezi,  . , Richards, G. T., Schneider, D. P., 2003, *MNRAS*, 346, 1055
- Kewley, L. J., Heisler, C. A., Dopita, M. A., 2001, *ApJS*, 132, 37
- Kewley, L. J., Groves, B., Kauffmann, G., Heckman, T., 2006, *MNRAS*, 372, 961
- Koski, A. T., 1978, *ApJ*, 223, 56
- Kormendy, J. & Ho, L., 2000, *ea..bookE2635K*

- Kormendy, J. & Ho, L. C., 2013, *ARA&A*, 51, 511
- Kurtz, M. J., & Mink, D. J. 1998, *PASP*, 110, 934
- Lauer, T. R., et al. 2005, *AJ*, 129, 2138
- Liu, J., 2011, *ApJS*, 192, 10
- Macchetto, F., Pastoriza, M., Caon, N., Giavalisco, M., Bender, R., Capaccioli, M., 1996, *A&AS*, 120, 463
- Macchetto, F., Marconi, A., Axon, D. J., Capetti, A., Sparks, W., Crane, P., 1997, *ApJ*, 489, 579
- Machacek, M. E., O'Sullivan, E., Randall, S. W., Jones, C., Forman, W. R., 2010, *ApJ*, 711, 1316
- Marino, A., Rampazzo, R., Bianchi, L., Annibali, F., Bressan, A., Buson, L. M., Clemens, M. S., Panuzzo, P., Zeilinger, W. W., *MNRAS*, 411, 311
- Martins, L. P., Rodriguez-Ardila, A., Diniz, S., Riffel, R., de Souza, R., 2013, *MNRAS*, 435, 2861
- Mateus, A., Sodré, L., Cid Fernandes, R., Stasińska, G., Schoenell, W., Gomes, J. M., 2006, *MNRAS*, 370, 721
- Matsushita, K., 2001, *ApJ*, 547, 693
- Mendel, J. T., Proctor, R. N., Forbes, D. A., Brough, S., 2008, *MNRAS*, 389, 749
- Ogando, Ricardo L. C., Maia, Marcio A. G., Pellegrini, Paulo S., da Costa, Luiz N. 2008, *AJ*, 135, 2424
- Osterbrock, D. E., & de Robertis, M. M., 1985, *PASP*, 97, 1129
- Osterbrock, D. E., & Ferland, G. J., 2006, *Astrophysics of Gaseous Nebulae and Active Galactic Nuclei*, Second Edition, University Science Books, Mill Valley, California.
- Panuzzo, P., Rampazzo, R., Bressan, A., Vega, O., Annibali, F., Buson, L. M., Clemens, M. S., Zeilinger, W. W., 2011, *A&A*, 528, A10
- Peterson, J. R., & Fabian, A. C. 2006, *Phys. Rep.*, 427, 1
- Rafferty, D. A., McNamara, B. R., Nulsen, P. E. J., 2008, *ApJ*, 687, 899
- Ricci, T. V., Steiner, J. E., Menezes, R. B., 2015, *MNRAS*, 451, 3728
- Ricci, T. V., Steiner, J. E., Menezes, R. B., 2014, *MNRAS*, 440, 2442
- Rickes, M. G., Pastoriza, M. G., Bonatto, C., 2004, *A&A*, 419, 449
- Rickes, M. G., Pastoriza, M. G., Bonatto, C., 2008, *MNRAS*, 384, 1427
- Riffel, R., Pastoriza, M. G., Rodriguez-Ardila, A., Maraston, C., 2007, *ApJ*, 659, 103
- Riffel, R. A., Storchi-Bergmann, T., Winge, C., McGregor, P. J., Beck, T., Schmitt, H., 2008, *MNRAS*, 385, 1129
- Riffel, R. A., Pastoriza, M. G., Rodriguez-Ardila, A., Bonatto, C., 2009, *MNRAS*, 400, 273
- Riffel, R. A., Storchi-Bergmann, T., Nagar, N. M., 2010, *MNRAS*, 404, 166
- Riffel, R., Riffel, R. A., Ferrari, F., Storchi-Bergmann, T., 2011, *MNRAS*, 416, 493
- Schlafly, E. F. & Finkbeiner, D. P. 2011, *ApJ*, 737, 103
- Sánchez, S. F. et al., 2012, *A&A* 538, 8
- Sarzi, M. et al., 2010, *MNRAS*, 402, 2187
- Singh, R. et al. and the CALIFA collaboration, 2013, *A&A*, 558, 43
- Stasińska, G., Asari, N. V., Cid Fernandes, R., Gomes, J. M., Schlickmann, M., Mateus, A., Schoenell, W., Sodré Jr., for the SEAGal collaboration, 2008, *MNRAS*, 391, 29
- Steffen, W., Koning, N., Wenger, S., Morisset, C., & Magnor, M. 2010, 2011, *ITVCG*, 17, 454S
- Steiner, J., E., Menezes, R., B., Ricci, T., V., Oliveira, A., S., 2009, *MNRAS*, 395, 64
- Storchi-Bergmann, T. et al., 2012, *ApJ*, 755, 87
- Strong, A. W.; Bloemen, J. B. G. M.; Dame, T. M.; Grenier, I. A.; Hermsen, W.; Lebrun, F.; Nyman, L.-A.; Pollock, A. M. T.; Thaddeus, P., 1988, *A&A*, 207, 1
- Skrutskie, M. F. 2006, *AJ*, 131, 1163
- Temi, P., Brighenti, F., & Mathews, W. 2007, *ApJ*, 666, 222
- Thomas, D., Maraston, C., Bender, R., Mendes de Oliveira, C., 2005, *ApJ*, 621, 673
- Tody, D. 1986, in *Proc. SPIE Instrumentation in Astronomy VI*, ed. D.L. Crawford, 627, 733
- Tody, D. 1993, *A.S.P. Conference Ser.*, Vol 52, eds. R.J. Hanisch, R.J.V. Brissenden & J. Barnes, 173
- Tran, H. D. et al., 2001 *AJ*, 121, 2928
- O'Sullivan, E., Combes, F., Hamer, S., Salom, P., Babul, A., Raychaudhury, S., 2014, *A&A*, 573, 111
- Vega, O., Bressan, A., Panuzzo, P., Rampazzo, R., Clemens, M., Granato, G. L., Buson, L., Silva, L., Zeilinger, W. W., *ApJ*, 721, 1090
- Veilleux, S., & Osterbrock, D. E., 1987, *ApJS*, 63, 295
- Véron-Cetty, M. P., & Véron, P., 1988, *A&A*, 204, 28.
- Voit, G. M., Cavagnolo, K. W., Donahue, M., Rafferty, D. A., McNamara, B. R., Nulsen, P. E. J., 2008, *ApJ*, 681, L5
- Werner N. et al., 2010, *MNRAS*, 407, 2063
- Werner N. et al., 2013, *ApJ*, 767, 153
- Werner, N., Oonk, J. B. R., Sun, M., Nulsen, P. E. J., Allen, S. W., Canning, R. E. A., Simionescu, A., Hoffer, A., Connor, T., Donahue, M., Edge, A. C., Fabian, A. C., von der Linden, A., Reynolds, C. S., Ruszkowski, M., 2014, *MNRAS*, 439, 2291
- Yan, R., Blanton, M. R., 2012, *ApJ*, 747, 61
- Zeilinger, W. W., Pizzella, A., Amico, P., Bertin, G., Bertola, F., Buson, L. M., Danziger, I. J., Dejonghe, H., Sadler, E. M., Saglia, R. P., Zeeuw, P. T., 1996, *A&A*, 120, 257
- Zhu, C., Byrd, R. H., Lu, P., & Nocedal, J. 1997, *ACM Trans. Math. Softw.*, 23, 550

Apêndice B

Artigos em colaboração

Segue relação dos artigos publicados em colaboração, decorrentes do trabalho de mestrado.

2. **Spectral synthesis of star-forming galaxies in the near-infrared**,
L.P. Martins, A. Rodríguez-Ardila, S. Diniz, R. Riffel & R. de Souza, Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, v.435, p.2861-2877, Novembro de 2013. DOI: 10.1093/mnras/stt1482
1. **A spectral atlas of H II galaxies in the near-infrared**,
L.P. Martins, A. Rodríguez-Ardila, S. Diniz, R. Gruenwald & R. de Souza, Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, v.431, p.1823-1839, Maio de 2013. DOI: 10.1093/mnras/stt296

Referências Bibliográficas

- [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. **Astrophysical Journal Supplement Series**, 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] ANNIBALI, F., BRESSAN, A., RAMPAZZO, R., ZEILINGER, W. W., DANESE, L. Nearby early-type galaxies with ionized gas. III. Analysis of line-strength indices with new stellar population models. **Astronomy and Astrophysics**, v. 463, p. 455–479, February 2007.
- [4] ANTONUCCI, R. Unified models for active galactic nuclei and quasars. **Annual Review of Astronomy and Astrophysics**, v. 31, p. 473–521, 1993.
- [5] ANTONUCCI, R. R. J., MILLER, J. S. Spectropolarimetry and the nature of NGC 1068. **Astrophysical Journal**, v. 297, p. 621–632, October 1985.
- [6] ASARI, N. V., CID FERNANDES, R., STASIŃSKA, G., TORRES-PAPAQUI, J. P., MATEUS, A., SODRÉ, L., SCHOENELL, W., GOMES, J. M. The history of star-forming galaxies in the Sloan Digital Sky Survey. **Monthly Notices of the Royal Astronomical Society**, v. 381, p. 263–279, October 2007.
- [7] BARCONS, X., FRANCESCHINI, A., DE ZOTTI, G., DANESE, L., MIYAJI, T. Hard X-Ray Emission from Extragalactic IRAS 12 Micron Sources: Cons-

- straints on the Unified Active Galactic Nucleus Model and the Synthesis of the X-Ray Background. **Astrophysical Journal**, v. 455, p. 480, December 1995.
- [8] BARTH, A. J. Low-Luminosity AGNs and Unification. In: ISSUES IN UNIFICATION OF ACTIVE GALACTIC NUCLEI, Maiolino, R., Marconi, A., Nagar, N., editores, v. 258 of **Astronomical Society of the Pacific Conference Series**, p. 147, 2002.
- [9] BARTH, A. J., SHIELDS, J. C. LINER/HII “Transition” Nuclei and the Nature of NGC 4569. **Publications of the Astronomical Society of the Pacific**, v. 112, p. 753–767, June 2000.
- [10] 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.
- [11] BEUING, J., DOBEREINER, S., BOHRINGER, H., BENDER, R. X-ray luminosities for a magnitude-limited sample of early-type galaxies from the ROSAT All-Sky Survey. **Monthly Notices of the Royal Astronomical Society**, v. 302, p. 209–221, January 1999.
- [12] BICA, E., ALLOIN, D. A base of star clusters for stellar population synthesis. **Astronomy and Astrophysics**, v. 162, p. 21–31, July 1986.
- [13] BLANDFORD, R. D., NETZER, H., WOLTJER, L. **Active galactic nuclei, SaasFee advanced course 20- Lecture notes 1990**: 1990.
- [14] BOARDMAN, N. F., WEIJMANS, A.-M., VAN DEN BOSCH, R., KUNTSCHNER, H., EMSELLEM, E., CAPPELLARI, M., DE ZEEUW, T., FALCÓN-BARROSO, J., KRAJNOVIĆ, D., MCDERMID, R., NAAB, T., VAN DE VEN, G., YILDIRIM, A. Integral-field kinematics and stellar populations of early-type galaxies out to three half-light radii. **Monthly Notices of the Royal Astronomical Society**, v. 471, p. 4005–4026, November 2017.
- [15] BROWN, B. A., BREGMAN, J. N. X-Ray Emission from Early-Type Galaxies: A Complete Sample Observed by ROSAT. **Astrophysical Journal Letters**, v. 495, p. L75–L78, March 1998.
- [16] 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.

- [17] BÖNSCH, G., POTULSKI, E. Measurement of the refractive index of air and comparison with modified edlén's formulae. **Metrologia**, v. 35, n. 2, p. 133, 1998.
- [18] CALDWELL, N. A survey of O II forbidden line emission in elliptical galaxies. **Publications of the Astronomical Society of the Pacific**, v. 96, p. 287–291, April 1984.
- [19] CAON, N., MACCHETTO, D., PASTORIZA, M. A Survey of the Interstellar Medium in Early-Type Galaxies. III. Stellar and Gas Kinematics. **Astrophysical Journal Supplement Series**, v. 127, p. 39–58, March 2000.
- [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] CARRILLO, R., MASEGOSA, J., DULTZIN-HACYAN, D., ORDOÑEZ, R. A Multifrequency Catalog of LINERs. **Revista Mexicana de Astronomia y Astrofisica**, v. 35, p. 187, October 1999.
- [22] CID FERNANDES, R., GONZÁLEZ DELGADO, R. M. Testing spectral models for stellar populations with star clusters - I. Methodology. **Monthly Notices of the Royal Astronomical Society**, v. 403, p. 780–796, April 2010.
- [23] CID FERNANDES, R., GONZÁLEZ DELGADO, R. M., STORCHBERGMANN, T., MARTINS, L. P., SCHMITT, H. The stellar populations of low-luminosity active galactic nuclei - III. Spatially resolved spectral properties. **Monthly Notices of the Royal Astronomical Society**, v. 356, p. 270–294, January 2005a.
- [24] CID FERNANDES, R., GU, Q., MELNICK, J., TERLEVICH, E., TERLEVICH, R., KUNTH, D., RODRIGUES LACERDA, R., JOGUET, B. The star formation history of Seyfert 2 nuclei. **Monthly Notices of the Royal Astronomical Society**, v. 355, p. 273–296, November 2004.
- [25] CID FERNANDES, R., MATEUS, A., SODRÉ, L., STASIŃSKA, G., GOMES, J. M. Semi-empirical analysis of Sloan Digital Sky Survey galaxies - I. Spectral synthesis method. **Monthly Notices of the Royal Astronomical Society**, v. 358, p. 363–378, April 2005b.

- [26] CID FERNANDES, R., PÉREZ, E., GARCÍA BENITO, R., GONZÁLEZ DELGADO, R. M., DE AMORIM, A. L., SÁNCHEZ, S. F., HUSEMANN, B., FALCÓN BARROSO, J., SÁNCHEZ-BLÁZQUEZ, P., WALCHER, C. J., MAST, D. Resolving galaxies in time and space. I. Applying STARLIGHT to CALIFA datacubes. **Astronomy and Astrophysics**, v. 557, p. A86, September 2013.
- [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] CID FERNANDES, R., STASIŃSKA, G., MATEUS, A., VALE ASARI, N. A comprehensive classification of galaxies in the Sloan Digital Sky Survey: how to tell true from fake AGN? **Monthly Notices of the Royal Astronomical Society**, v. 413, p. 1687–1699, May 2011.
- [29] CLEMENS, M. S., BRESSAN, A., NIKOLIC, B., ALEXANDER, P., ANNIBALI, F., RAMPAZZO, R. The star formation history of early-type galaxies as a function of mass and environment. **Monthly Notices of the Royal Astronomical Society**, v. 370, p. 702–720, August 2006.
- [30] CLEMENS, M. S., BRESSAN, A., NIKOLIC, B., RAMPAZZO, R. The history of star formation and mass assembly in early-type galaxies. **Monthly Notices of the Royal Astronomical Society**, v. 392, p. L35–L39, January 2009.
- [31] CUPPEN, H. M., KRISTENSEN, L. E., GAVARDI, E. H₂ reformation in post-shock regions. **Monthly Notices of the Royal Astronomical Society**, v. 406, p. L11–L15, July 2010.
- [32] DAVID, L. P., JONES, C., FORMAN, W., NULSEN, P., VRTILEK, J., O’SULLIVAN, E., GIACINTUCCI, S., RAYCHAUDHURY, S. Isotropic Active Galactic Nucleus Heating with Small Radio-quiet Bubbles in the NGC 5044 Group. **Astrophysical Journal**, v. 705, p. 624–638, November 2009.
- [33] DAVID, L. P., LIM, J., FORMAN, W., VRTILEK, J., COMBES, F., SALOME, P., EDGE, A., HAMER, S., JONES, C., SUN, M., O’SULLIVAN, E., GAS-

- TALDELLO, F., BARDELLI, S., TEMI, P., SCHMITT, H., OHYAMA, Y., MATHEWS, W., BRIGHENTI, F., GIACINTUCCI, S., TRUNG, D.-V. Molecular Gas in the X-Ray Bright Group NGC 5044 as Revealed by ALMA. **Astrophysical Journal**, v. 792, p. 94, September 2014.
- [34] DAVIS, T. A., KRAJNOVIĆ, D., MCDERMID, R. M., BUREAU, M., SARZI, M., NYLAND, K., ALATALO, K., BAYET, E., BLITZ, L., BOIS, M., BOURNAUD, F., CAPPELLARI, M., CROCKER, A., DAVIES, R. L., DE ZEEUW, P. T., DUC, P.-A., EMSELLEM, E., KHOCHFAR, S., KUNTSCHNER, H., LABLANCHE, P.-Y., MORGANTI, R., NAAB, T., OOSTERLOO, T., SCOTT, N., SERRA, P., WEIJMANS, A.-M., YOUNG, L. M. Gemini GMOS and WHT SAURON integral-field spectrograph observations of the AGN-driven outflow in NGC 1266. **Monthly Notices of the Royal Astronomical Society**, v. 426, p. 1574–1590, October 2012.
- [35] DAVIS, T. A., ROWLANDS, K., ALLISON, J. R., SHABALA, S. S., TING, Y.-S., LAGOS, C. D. P., KAVIRAJ, S., BOURNE, N., DUNNE, L., EALES, S., IVISON, R. J., MADDOX, S., SMITH, D. J. B., SMITH, M. W. L., TEMI, P. Molecular and atomic gas in dust lane early-type galaxies - I. Low star formation efficiencies in minor merger remnants. **Monthly Notices of the Royal Astronomical Society**, v. 449, p. 3503–3516, June 2015.
- [36] DINIZ, M. R., RIFFEL, R. A., STORCHI-BERGMANN, T., WINGE, C. Feeding versus feedback in AGN from near-infrared IFU observations XI: NGC 2110. **Monthly Notices of the Royal Astronomical Society**, v. 453, p. 1727–1739, October 2015.
- [37] DOPITA, M. A., HO, I.-T., DRESSEL, L. L., SUTHERLAND, R., KEWLEY, L., DAVIES, R., HAMPTON, E., SHASTRI, P., KHARB, P., JOSE, J., BHATT, H., RAMYA, S., SCHARWÄCHTER, J., JIN, C., BANFIELD, J., ZAW, I., JAMES, B., JUNEAU, S., SRIVASTAVA, S. Probing the Physics of Narrow-line Regions in Active Galaxies. III. Accretion and Cocoon Shocks in the LINER NGC 1052. **Astrophysical Journal**, v. 801, p. 42, March 2015.
- [38] DOPITA, M. A., SUTHERLAND, R. S. Spectral Signatures of Fast Shocks. II. Optical Diagnostic Diagrams. **Astrophysical Journal**, v. 455, p. 468–+, December 1995.

- [39] DWEK, E., ARENDT, R. G. Dust-gas interactions and the infrared emission from hot astrophysical plasmas. **Annual Review of Astronomy and Astrophysics**, v. 30, p. 11–50, 1992.
- [40] EMSELLEM, E., CAPPELLARI, M., KRAJNOVIĆ, D., ALATALO, K., BLITZ, L., BOIS, M., BOURNAUD, F., BUREAU, M., DAVIES, R. L., DAVIS, T. A., DE ZEEUW, P. T., KHOCHFAR, S., KUNTSCHNER, H., LABLANCHE, P.-Y., MCDERMID, R. M., MORGANTI, R., NAAB, T., OOSTERLOO, T., SARZI, M., SCOTT, N., SERRA, P., VAN DE VEN, G., WEIJMANS, A.-M., YOUNG, L. M. The ATLAS^{3D} project - III. A census of the stellar angular momentum within the effective radius of early-type galaxies: unveiling the distribution of fast and slow rotators. **Monthly Notices of the Royal Astronomical Society**, v. 414, p. 888–912, June 2011.
- [41] EMSELLEM, E., CAPPELLARI, M., KRAJNOVIĆ, D., VAN DE VEN, G., BACON, R., BUREAU, M., DAVIES, R. L., DE ZEEUW, P. T., FALCÓN-BARROSO, J., KUNTSCHNER, H., MCDERMID, R., PELETIER, R. F., SARZI, M. The SAURON project - IX. A kinematic classification for early-type galaxies. **Monthly Notices of the Royal Astronomical Society**, v. 379, p. 401–417, August 2007.
- [42] FABBIANO, G., KIM, D.-W., TRINCHIERI, G. An X-ray catalog and atlas of galaxies. **Astrophysical Journal Supplement Series**, v. 80, p. 531–644, June 1992.
- [43] FABIAN, A. C. Cooling Flows in Clusters of Galaxies. **Annual Review of Astronomy and Astrophysics**, v. 32, p. 277–318, 1994.
- [44] FERGUSON, H. C., SANDAGE, A. Population studies in groups and clusters of galaxies. III - A catalog of galaxies in five nearby groups. **Astronomical Journal**, v. 100, p. 1–31, July 1990.
- [45] FERRARI, F., PASTORIZA, M. G., MACCHETTO, F., CAON, N. A survey of the ISM in early-type galaxies. II. The dust. **Astronomy and Astrophysics Supplement Series**, v. 136, p. 269–284, April 1999.
- [46] FERRARI, F., PASTORIZA, M. G., MACCHETTO, F. D., BONATTO, C., PANAGIA, N., SPARKS, W. B. Survey of the ISM in early-type galaxies. IV. The hot dust component. **Astronomy and Astrophysics**, v. 389, p. 355–366, July 2002.

- [47] FILIPPENKO, A. V. The importance of atmospheric differential refraction in spectrophotometry. **Publications of the Astronomical Society of the Pacific**, v. 94, p. 715–721, August 1982.
- [48] FILIPPENKO, A. V., TERLEVICH, R. O-star photoionization models of liners with weak forbidden O I 6300 Å emission. **Astrophysical Journal Letters**, v. 397, p. L79–L82, October 1992.
- [49] FRANK, J., KING, A., RAINE, D. J. **Accretion Power in Astrophysics: Third Edition**: January 2002.
- [50] GASTALDELLO, F., BUOTE, D. A., TEMI, P., BRIGHENTI, F., MATHEWS, W. G., ETTORI, S. X-Ray Cavities, Filaments, and Cold Fronts in the Core of the Galaxy Group NGC 5044. **Astrophysical Journal**, v. 693, p. 43–55, March 2009.
- [51] GEORGANTOPOULOS, I., BASILAKOS, S., PLIONIS, M. The X-ray luminosity function of local galaxies. **Monthly Notices of the Royal Astronomical Society**, v. 305, p. L31–L34, May 1999.
- [52] GONZALEZ, R. C., WOODS, R. E. **Digital Image Processing**: 2002.
- [53] GONZÁLEZ DELGADO, R. M., GARCÍA-BENITO, R., PÉREZ, E., CID FERNANDES, R., DE AMORIM, A. L., CORTIJO-FERRERO, C., LACERDA, E. A. D., LÓPEZ FERNÁNDEZ, R., VALE-ASARI, N., SÁNCHEZ, S. F., MOLLÁ, M., RUIZ-LARA, T., SÁNCHEZ-BLÁZQUEZ, P., WALCHER, C. J., ALVES, J., AGUERRI, J. A. L., BEKERAITÉ, S., BLAND-HAWTHORN, J., GALBANY, L., GALLAZZI, A., HUSEMANN, B., IGLESIAS-PÁRAMO, J., KALINOVA, V., LÓPEZ-SÁNCHEZ, A. R., MARINO, R. A., MÁRQUEZ, I., MASEGOSA, J., MAST, D., MÉNDEZ-ABREU, J., MENDOZA, A., DEL OLMO, A., PÉREZ, I., QUIRRENBACH, A., ZIBETTI, S. The CALIFA survey across the Hubble sequence. Spatially resolved stellar population properties in galaxies. **Astronomy and Astrophysics**, v. 581, p. A103, September 2015.
- [54] GOUDFROOIJ, P., HANSEN, L., JORGENSEN, H. E., NORGAARD-NIELSEN, H. U. Interstellar matter in Shapley-Ames elliptical galaxies. II. The distribution of dust and ionized gas. **Astronomy and Astrophysics Supplement Series**, v. 105, p. 341–383, June 1994.

- [55] GUILLARD, P., BOULANGER, F., CLUVER, M. E., APPLETON, P. N., PINEAU DES FORÊTS, G., OGLE, P. Observations and modeling of the dust emission from the H₂-bright galaxy-wide shock in Stephan's Quintet. **Astronomy and Astrophysics**, v. 518, p. A59, July 2010.
- [56] HAMUY, M., WALKER, A. R., SUNTZEFF, N. B., GIGOUX, P., HEATHCOTE, S. R., PHILLIPS, M. M. Southern spectrophotometric standards. **Publications of the Astronomical Society of the Pacific**, v. 104, p. 533–552, July 1992.
- [57] HECKMAN, T. M. Peculiar nuclei and their relation to galaxy type. **Publications of the Astronomical Society of the Pacific**, v. 90, p. 241–243, June 1978.
- [58] HECKMAN, T. M. Activity in the nuclei of normal galaxies. **Highlights of Astronomy**, v. 5, p. 185–190, 1980.
- [59] HERNÁNDEZ-GARCÍA, L., GONZÁLEZ-MARTÍN, O., MASEGOSA, J., MÁRQUEZ, I. X-ray spectral variability of LINERs selected from the Palomar sample. **Astronomy and Astrophysics**, v. 569, p. A26, September 2014.
- [60] HERNANDEZ-JIMENEZ, J. A., PASTORIZA, M. G., BONATTO, C., RODRIGUES, I., KRABBE, A. C., WINGE, C. Photometry and dynamics of the minor mergers AM 1228-260 and AM 2058-381. **Monthly Notices of the Royal Astronomical Society**, v. 451, p. 2278–2294, August 2015.
- [61] HERNANDEZ-JIMENEZ, J. A., PASTORIZA, M. G., RODRIGUES, I., KRABBE, A. C., WINGE, C., BONATTO, C. Photometry and dynamics of the minor merger AM 1219-430 with Gemini GMOS-S. **Monthly Notices of the Royal Astronomical Society**, v. 435, p. 3342–3352, November 2013.
- [62] HEYER, M. H., PETER SCHLOERB, F. Application of Principal Component Analysis to Large-Scale Spectral Line Imaging Studies of the Interstellar Medium. **Astrophysical Journal**, v. 475, p. 173–187, January 1997.
- [63] HO, L., KORMENDY, J. **Supermassive Black Holes in Active Galactic Nuclei**. November 2000.
- [64] HO, L. C. LINERs as low-luminosity active galactic nuclei. **Advances in Space Research**, v. 23, p. 813–822, 1999.

- [65] HO, L. C. Nuclear Activity in Nearby Galaxies. **Annual Review of Astronomy and Astrophysics**, v. 46, p. 475–539, September 2008.
- [66] HO, L. C., FILIPPENKO, A. V., SARGENT, W. L. W., PENG, C. Y. A Search for “Dwarf” Seyfert Nuclei. IV. Nuclei with Broad H alpha Emission. **Astrophysical Journal Supplement Series**, v. 112, p. 391–+, October 1997.
- [67] HOOK, I. M., JØRGENSEN, I., ALLINGTON-SMITH, J. R., DAVIES, R. L., METCALFE, N., MUROWINSKI, R. G., CRAMPTON, D. The Gemini-North Multi-Object Spectrograph: Performance in Imaging, Long-Slit, and Multi-Object Spectroscopic Modes. **Publications of the Astronomical Society of the Pacific**, v. 116, p. 425–440, May 2004.
- [68] 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. **Monthly Notices of the Royal Astronomical Society**, v. 346, p. 1055–1077, December 2003.
- [69] KAVIRAJ, S., TING, Y.-S., BUREAU, M., SHABALA, S. S., CROCKETT, R. M., SILK, J., LINTOTT, C., SMITH, A., KEEL, W. C., MASTERS, K. L., SCHAWINSKI, K., BAMFORD, S. P. Galaxy Zoo: dust and molecular gas in early-type galaxies with prominent dust lanes. **Monthly Notices of the Royal Astronomical Society**, v. 423, p. 49–58, June 2012.
- [70] KEWLEY, L. J., GROVES, B., KAUFFMANN, G., HECKMAN, T. The host galaxies and classification of active galactic nuclei. **Monthly Notices of the Royal Astronomical Society**, v. 372, p. 961–976, November 2006.
- [71] KEWLEY, L. J., HEISLER, C. A., DOPITA, M. A., LUMSDEN, S. Optical Classification of Southern Warm Infrared Galaxies. **Astrophysical Journal Supplement Series**, v. 132, p. 37–71, January 2001.
- [72] KHACHIKIAN, E. Y., WEEDMAN, D. W. An atlas of Seyfert galaxies. **Astrophysical Journal**, v. 192, p. 581–589, September 1974.
- [73] KIM, D.-W. Interstellar matter in early-type galaxies - Optical observations. **Astrophysical Journal**, v. 346, p. 653–674, November 1989.

- [74] KOMOSSA, S., BÖHRINGER, H., HUCHRA, J. P. X-ray properties of LINERs. **Astronomy and Astrophysics**, v. 349, p. 88–96, September 1999.
- [75] KORMENDY, J., BENDER, R., RICHTSTONE, D., AJHAR, E. A., DRESSLER, A., FABER, S. M., GEBHARDT, K., GRILLMAIR, C., LAUER, T. R., TREMAINE, S. Hubble Space Telescope Spectroscopic Evidence for a $2 \times 10^9 M_{sun}$ Black Hole in NGC 3115. **Astrophysical Journal Letters**, v. 459, p. L57, March 1996.
- [76] 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.
- [77] KRAJNOVIĆ, D., EMSELLEM, E., CAPPELLARI, M., ALATALO, K., BLITZ, L., BOIS, M., BOURNAUD, F., BUREAU, M., DAVIES, R. L., DAVIS, T. A., DE ZEEUW, P. T., KHOCHFAR, S., KUNTSCHNER, H., LABLANCHE, P.-Y., MCDERMID, R. M., MORGANTI, R., NAAB, T., OOSTERLOO, T., SARZI, M., SCOTT, N., SERRA, P., WEIJMANS, A.-M., YOUNG, L. M. The ATLAS^{3D} project - II. Morphologies, kinematic features and alignment between photometric and kinematic axes of early-type galaxies. **Monthly Notices of the Royal Astronomical Society**, v. 414, p. 2923–2949, July 2011.
- [78] KROLIK, J. H. **Active galactic nuclei : from the central black hole to the galactic environment**: Active galactic nuclei : from the central black hole to the galactic environment / Julian H. Krolik. Princeton, N. J. : Princeton University Press, c1999., 1999.
- [79] LIEBMANN, A. C., FABIAN, A. C., TSURUTA, S. X-ray Properties of Hard X-ray Selected AGN. **ArXiv e-prints**, December 2014.
- [80] LÍPARI, S., MEDIAVILLA, E., GARCIA-LORENZO, B., DÍAZ, R. J., ACOSTA-PULIDO, J., AGÜERO, M. P., TANIGUCHI, Y., DOTTORI, H., TERLEVICH, R. Infrared mergers and infrared quasi-stellar objects with galactic winds - II. NGC5514: two extranuclear starbursts with LINER properties and a supergiant bubble in the rupture phase. **Monthly Notices of the Royal Astronomical Society**, v. 355, p. 641–681, December 2004.

- [81] LIU, J. Chandra ACIS Survey of X-ray Point Sources in 383 Nearby Galaxies. I. The Source Catalog. **Astrophysical Journal Supplement Series**, v. 192, p. 10, January 2011.
- [82] MACCHETTO, F., MARCONI, A., AXON, D. J., CAPETTI, A., SPARKS, W., CRANE, P. The Supermassive Black Hole of M87 and the Kinematics of Its Associated Gaseous Disk. **Astrophysical Journal**, v. 489, p. 579–600, November 1997.
- [83] MACCHETTO, F., PASTORIZA, M., CAON, N., SPARKS, W. B., GIAVALISCO, M., BENDER, R., CAPACCIOLI, M. A survey of the ISM in early-type galaxies. I. The ionized gas. **Astronomy and Astrophysics Supplement Series**, v. 120, p. 463–488, December 1996.
- [84] MAOZ, D., NAGAR, N. M., FALCKE, H., WILSON, A. S. The Murmur of the Sleeping Black Hole: Detection of Nuclear Ultraviolet Variability in LINER Galaxies. **Astrophysical Journal**, v. 625, p. 699–715, June 2005.
- [85] MARASTON, C. Evolutionary population synthesis: models, analysis of the ingredients and application to high-z galaxies. **Monthly Notices of the Royal Astronomical Society**, v. 362, p. 799–825, September 2005.
- [86] MARASTON, C., STRÖMBÄCK, G. Stellar population models at high spectral resolution. **Monthly Notices of the Royal Astronomical Society**, v. 418, p. 2785–2811, December 2011.
- [87] MARINO, A., RAMPAZZO, R., BIANCHI, L., ANNIBALI, F., BRESSAN, A., BUSON, L. M., CLEMENS, M. S., PANUZZO, P., ZEILINGER, W. W. Nearby early-type galaxies with ionized gas: the UV emission from GALEX observations. **Monthly Notices of the Royal Astronomical Society**, v. 411, p. 311–331, February 2011.
- [88] MATEUS, A., SODRÉ, L., CID FERNANDES, R., STASIŃSKA, G., SCHOENELL, W., GOMES, J. M. Semi-empirical analysis of Sloan Digital Sky Survey galaxies - II. The bimodality of the galaxy population revisited. **Monthly Notices of the Royal Astronomical Society**, v. 370, p. 721–737, August 2006.
- [89] MATSUSHITA, K. Origin of the Scatter in the X-Ray Luminosity of Early-Type Galaxies Observed with ROSAT. **Astrophysical Journal**, v. 547, p. 693–704, February 2001.

- [90] MCLEOD, K. K., RIEKE, G. H. Near-infrared imaging of CfA Seyfert galaxies. **Astrophysical Journal**, v. 441, p. 96–112, March 1995.
- [91] MIYAJI, T., LAHAV, O., JAHODA, K., BOLDT, E. The cosmic X-ray background-IRAS galaxy correlation and the local X-ray volume emissivity. **Astrophysical Journal**, v. 434, p. 424–434, October 1994.
- [92] OGANDO, R. L. C., MAIA, M. A. G., PELLEGRINI, P. S., DA COSTA, L. N. Line Strengths of Early-Type Galaxies. **Astronomical Journal**, v. 135, p. 2424–2445, June 2008.
- [93] OSTERBROCK, D. E. Observational Model of the Ionized Gas in Seyfert and Radio-Galaxy Nuclei. **Proceedings of the National Academy of Science**, v. 75, p. 540–544, February 1978.
- [94] OSTERBROCK, D. E. **Astrophysics of gaseous nebulae and active galactic nuclei**: Research supported by the University of California, John Simon Guggenheim Memorial Foundation, University of Minnesota, et al. Mill Valley, CA, University Science Books, 1989, 422 p., 1989.
- [95] OSTERBROCK, D. E., DE ROBERTIS, M. M. Optical spectra of IRAS 'warm' galaxies. **Publications of the Astronomical Society of the Pacific**, v. 97, p. 1129–1141, December 1985.
- [96] OSTERBROCK, D. E., FERLAND, G. J. **Astrophysics of gaseous nebulae and active galactic nuclei**: 2006.
- [97] O'SULLIVAN, E., COMBES, F., HAMER, S., SALOMÉ, P., BABUL, A., RAYCHAUDHURY, S. Cold gas in group-dominant elliptical galaxies. **Astronomy and Astrophysics**, v. 573, p. A111, January 2015.
- [98] PANUZZO, P., RAMPAZZO, R., BRESSAN, A., VEGA, O., ANNIBALI, F., BUSON, L. M., CLEMENS, M. S., ZEILINGER, W. W. Nearby early-type galaxies with ionized gas. VI. The Spitzer-IRS view. Basic data set analysis and empirical spectral classification. **Astronomy and Astrophysics**, v. 528, p. A10, April 2011.
- [99] PETERSON, B. M. Emission-line variability in Seyfert galaxies. **Publications of the Astronomical Society of the Pacific**, v. 100, p. 18–36, January 1988.

- [100] PETERSON, B. M. **An introduction to active galactic nuclei**: 1997.
- [101] PETERSON, J. R., FABIAN, A. C. X-ray spectroscopy of cooling clusters. , v. 427, p. 1–39, April 2006.
- [102] PFEFFERMANN, E., BRIEL, U. G., HIPPMANN, H., KETTENRING, G., METZNER, G., PREDEHL, P., REGER, G., STEPHAN, K.-H., ZOMBECK, M. V., CHAPPELL, J. The focal plane instrumentation of the ROSAT telescope. In: **SOFT X-RAY OPTICS AND TECHNOLOGY**, v. 733 of **Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers (SPIE) Conference Series**, p. 519, February 1987.
- [103] PHILLIPS, M. M., JENKINS, C. R., DOPITA, M. A., SADLER, E. M., BINETTE, L. Ionized gas in elliptical and S0 galaxies. I - A survey for H-alpha and forbidden N II emission. **Astronomical Journal**, v. 91, p. 1062–1085, May 1986.
- [104] PTAK, A., YAQOUB, T., MUSHOTZKY, R., SERLEMITSOS, P., GRIFFITHS, R. X-Ray Variability as a Probe of Advection-dominated Accretion in Low-Luminosity Active Galactic Nuclei. **Astrophysical Journal Letters**, v. 501, p. L37–L40, July 1998.
- [105] RAFFERTY, D. A., MCNAMARA, B. R., NULSEN, P. E. J. The Regulation of Cooling and Star Formation in Luminous Galaxies by Active Galactic Nucleus Feedback and the Cooling-Time/Entropy Threshold for the Onset of Star Formation. **Astrophysical Journal**, v. 687, p. 899–918, November 2008.
- [106] RICCI, T. V., STEINER, J. E., MENEZES, R. B. IFU spectroscopy of 10 early-type galactic nuclei - II. Nuclear emission line properties. **Monthly Notices of the Royal Astronomical Society**, v. 440, p. 2442–2456, May 2014a.
- [107] RICCI, T. V., STEINER, J. E., MENEZES, R. B. Integral field unit spectroscopy of 10 early-type galactic nuclei - I. Principal component analysis Tomography and nuclear activity. **Monthly Notices of the Royal Astronomical Society**, v. 440, p. 2419–2441, May 2014b.
- [108] RICCI, T. V., STEINER, J. E., MENEZES, R. B. IFU spectroscopy of 10 early-type galactic nuclei - III. Properties of the circumnuclear gas emission. **Monthly Notices of the Royal Astronomical Society**, v. 451, p. 3728–3758, August 2015.

- [109] RICKES, M. G., PASTORIZA, M. G., BONATTO, C. The elliptical galaxy NGC 5044: Stellar population and ionized gas. **Astronomy and Astrophysics**, v. 419, p. 449–458, May 2004.
- [110] RICKES, M. G., PASTORIZA, M. G., BONATTO, C. Star formation, metallicity gradient and ionized gas: clues to the formation of the elliptical galaxies NGC6868 and 5903. **Monthly Notices of the Royal Astronomical Society**, v. 384, p. 1427–1436, March 2008.
- [111] RIFFEL, R., PASTORIZA, M. G., RODRÍGUEZ-ARDILA, A., BONATTO, C. Probing the near-infrared stellar population of Seyfert galaxies. **Monthly Notices of the Royal Astronomical Society**, v. 400, p. 273–290, November 2009.
- [112] RIFFEL, R., RIFFEL, R. A., FERRARI, F., STORCHI-BERGMANN, T. Intermediate-age stars as the origin of low stellar velocity dispersion nuclear rings: the case of Mrk 1157. **Monthly Notices of the Royal Astronomical Society**, v. 416, p. 493–500, September 2011.
- [113] RIFFEL, R. A. profit: a new alternative for emission-line profile fitting. **Astrophysics and Space Science**, v. 327, p. 239–244, June 2010.
- [114] RIFFEL, R. A., STORCHI-BERGMANN, T., RIFFEL, R., PASTORIZA, M. G. Intermediate-age Stars as Origin of the Low-velocity Dispersion Nuclear Ring in Mrk 1066. **Astrophysical Journal**, v. 713, p. 469–474, April 2010.
- [115] ROBSON, I. **Active galactic nuclei**, ed. Wiley:Chichester: 1996.
- [116] SÁNCHEZ, S. F., KENNICUTT, R. C., GIL DE PAZ, A., VAN DE VEN, G., VÍLCHEZ, J. M., WISOTZKI, L., WALCHER, C. J., MAST, D., AGUERRI, J. A. L., ALBIOL-PÉREZ, S., ALONSO-HERRERO, A., ALVES, J., BAKOS, J., BARTÁKOVÁ, T., BLAND-HAWTHORN, J., BOSELLI, A., BOMANS, D. J., CASTILLO-MORALES, A., CORTIJO-FERRERO, C., DE LORENZO-CÁCERES, A., DEL OLMO, A., DETTMAR, R.-J., DÍAZ, A., ELLIS, S., FALCÓN-BARROSO, J., FLORES, H., GALLAZZI, A., GARCÍA-LORENZO, B., GONZÁLEZ DELGADO, R., GRUEL, N., HAINES, T., HAO, C., HUSEMANN, B., IGLÉSIAS-PÁRAMO, J., JAHNKE, K., JOHNSON, B., JUNGWIERT, B., KALINOVA, V., KEHRIG, C., KUPKO, D.,

- LÓPEZ-SÁNCHEZ, Á. R., LYUBENOVA, M., MARINO, R. A., MÁRMOL-QUERALTÓ, E., MÁRQUEZ, I., MASEGOSA, J., MEIDT, S., MENDEZ-ABREU, J., MONREAL-IBERO, A., MONTIJO, C., MOURÃO, A. M., PALACIOS-NAVARRO, G., PAPADEROS, P., PASQUALI, A., PELETIER, R., PÉREZ, E., PÉREZ, I., QUIRRENBACH, A., RELAÑO, M., ROSALES-ORTEGA, F. F., ROTH, M. M., RUIZ-LARA, T., SÁNCHEZ-BLÁZQUEZ, P., SENGUPTA, C., SINGH, R., STANISHEV, V., TRAGER, S. C., VAZDEKIS, A., VIIRONEN, K., WILD, V., ZIBETTI, S., ZIEGLER, B. CALIFA, the Calar Alto Legacy Integral Field Area survey. I. Survey presentation. **Astronomy and Astrophysics**, v. 538, p. A8, February 2012.
- [117] SANDAGE, A., TAMMANN, G. A. A revised Shapley-Ames Catalog of bright galaxies. **Carnegie Institution of Washington**, 1981.
- [118] SATYAPAL, S., SAMBRUNA, R. M., DUDIK, R. P. A joint mid-infrared spectroscopic and X-ray imaging investigation of LINER galaxies. **Astronomy and Astrophysics**, v. 414, p. 825–838, February 2004.
- [119] SCHLAFLY, E. F., FINKBEINER, D. P. Measuring Reddening with Sloan Digital Sky Survey Stellar Spectra and Recalibrating SFD. **Astrophysical Journal**, v. 737, p. 103, August 2011.
- [120] SCHMIDT, M., GREEN, R. F. Quasar evolution derived from the Palomar bright quasar survey and other complete quasar surveys. **Astrophysical Journal**, v. 269, p. 352–374, June 1983.
- [121] SEYFERT, C. K. Nuclear Emission in Spiral Nebulae. **Astrophysical Journal**, v. 97, p. 28, January 1943.
- [122] SHIELDS, J. C. Normal O stars in dense media generate LINERs. **Astrophysical Journal Letters**, v. 399, p. L27–L30, November 1992.
- [123] 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.
- [124] SINGH, R., VAN DE VEN, G., JAHNKE, K., LYUBENOVA, M., FALCÓN-BARROSO, J., ALVES, J., CID FERNANDES, R., GALBANY, L., GARCÍA-BENITO, R., HUSEMANN, B., KENNICUTT, R. C., MARINO, R. A.,

- MÁRQUEZ, I., MASEGOSA, J., MAST, D., PASQUALI, A., SÁNCHEZ, S. F., WALCHER, J., WILD, V., WISOTZKI, L., ZIEGLER, B. The nature of LINER galaxies:. Ubiquitous hot old stars and rare accreting black holes. **Astronomy and Astrophysics**, v. 558, p. A43, October 2013.
- [125] SKRUTSKIE, M. F., CUTRI, R. M., STIENING, R., WEINBERG, M. D., SCHNEIDER, S., CARPENTER, J. M., BEICHMAN, C., CAPPAS, R., CHESTER, T., ELIAS, J., HUCHRA, J., LIEBERT, J., LONSDALE, C., MONET, D. G., PRICE, S., SEITZER, P., JARRETT, T., KIRKPATRICK, J. D., GIZIS, J. E., HOWARD, E., EVANS, T., FOWLER, J., FULLMER, L., HURT, R., LIGHT, R., KOPAN, E. L., MARSH, K. A., MCCALLON, H. L., TAM, R., VAN DYK, S., WHEELOCK, S. The Two Micron All Sky Survey (2MASS). **Astronomical Journal**, v. 131, p. 1163–1183, February 2006.
- [126] SPARKS, W. B., MACCHETTO, F., GOLOMBEK, D. Imaging observations of gas and dust in NGC 4696 and implications for cooling flow models. **Astrophysical Journal**, v. 345, p. 153–162, October 1989.
- [127] 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.
- [128] STEFFEN, W., KONING, N., WENGER, S., MORISSET, C., MAGNOR, M. Shape: A 3D Modeling Tool for Astrophysics. **ITVCG**, v. 6, March 2010.
- [129] STEINER, J. E., MENEZES, R. B., RICCI, T. V., OLIVEIRA, A. S. PCA Tomography: how to extract information from data cubes. **Monthly Notices of the Royal Astronomical Society**, v. 395, p. 64–75, May 2009.
- [130] STEPHEN, B. Theory of Filter Amplifiers. **Experimental Wireless and the Wireless Engineer**, v. 7, p. 536–541, August 1930.
- [131] STORCHI-BERGMANN, T., RIFFEL, R. A., RIFFEL, R., DINIZ, M. R., BORGES VALE, T., MCGREGOR, P. J. Two-dimensional Mapping of Young Stars in the Inner 180 pc of NGC 1068: Correlation with Molecular Gas Ring and Stellar Kinematics. **Astrophysical Journal**, v. 755, p. 87, August 2012.

- [132] STRONG, A. W., BLOEMEN, J. B. G. M., DAME, T. M., GRENIER, I. A., HERMSEN, W., LEBRUN, F., NYMAN, L.-Å., POLLOCK, A. M. T., THADDEUS, P. The radial distribution of galactic gamma rays. IV - The whole galaxy. **Astronomy and Astrophysics**, v. 207, p. 1–15, December 1988.
- [133] TEMI, P., BRIGHENTI, F., MATHEWS, W. G. Spitzer Observations of Transient, Extended Dust in Two Elliptical Galaxies: New Evidence of Recent Feedback Energy Release in Galactic Cores. **Astrophysical Journal**, v. 666, p. 222–230, September 2007.
- [134] THOMAS, D., MARASTON, C., BENDER, R., MENDES DE OLIVEIRA, C. The Epochs of Early-Type Galaxy Formation as a Function of Environment. **Astrophysical Journal**, v. 621, p. 673–694, March 2005.
- [135] TINSLEY, B. M. Galactic Evolution. **Astronomy and Astrophysics**, v. 20, p. 383, September 1972.
- [136] TINSLEY, B. M., GUNN, J. E. Evolutionary synthesis of the stellar population in elliptical galaxies. I - Ingredients, broad-band colors, and infrared features. **Astrophysical Journal**, v. 203, p. 52–62, January 1976.
- [137] TODY, D. The IRAF Data Reduction and Analysis System. In: INSTRUMENTATION IN ASTRONOMY VI, Crawford, D. L., editor, v. 627 of , p. 733, January 1986.
- [138] TODY, D. IRAF in the Nineties. In: ASTRONOMICAL DATA ANALYSIS SOFTWARE AND SYSTEMS II, Hanisch, R. J., Brissenden, R. J. V., Barnes, J., editores, v. 52 of **Astronomical Society of the Pacific Conference Series**, p. 173, January 1993.
- [139] TOTANI, T., SUMI, T., KOSUGI, G., YASUDA, N., DOI, M., ODA, T. A Discovery of Rapid Optical Flares from Low-Luminosity Active Nuclei in Massive Galaxies. **Astrophysical Journal Letters**, v. 621, p. L9–L12, March 2005.
- [140] TRAN, H. D., TSVETANOV, Z., FORD, H. C., DAVIES, J., JAFFE, W., VAN DEN BOSCH, F. C., REST, A. Dusty Nuclear Disks and Filaments in Early-Type Galaxies. **Astronomical Journal**, v. 121, p. 2928–2942, June 2001.
- [141] 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.

- [142] VAN DOKKUM, P. G. Cosmic-Ray Rejection by Laplacian Edge Detection. **Publications of the Astronomical Society of the Pacific**, v. 113, p. 1420–1427, November 2001.
- [143] VAZDEKIS, A., SÁNCHEZ-BLÁZQUEZ, P., FALCÓN-BARROSO, J., CENARRO, A. J., BEASLEY, M. A., CARDIEL, N., GORGAS, J., PELETIER, R. F. Evolutionary stellar population synthesis with MILES - I. The base models and a new line index system. **Monthly Notices of the Royal Astronomical Society**, v. 404, p. 1639–1671, June 2010.
- [144] VEGA, O., BRESSAN, A., PANUZZO, P., RAMPAZZO, R., CLEMENS, M., GRANATO, G. L., BUSON, L., SILVA, L., ZEILINGER, W. W. Unusual PAH Emission in Nearby Early-type Galaxies: A Signature of an Intermediate-age Stellar Population? **Astrophysical Journal**, v. 721, p. 1090–1104, October 2010.
- [145] VERON-CETTY, M.-P., VERON, P. Miscellaneous observations of active galactic nuclei. **Astronomy and Astrophysics Supplement Series**, v. 65, p. 241–258, August 1986.
- [146] VOIT, G. M., CAVAGNOLO, K. W., DONAHUE, M., RAFFERTY, D. A., MCNAMARA, B. R., NULSEN, P. E. J. Conduction and the Star Formation Threshold in Brightest Cluster Galaxies. **Astrophysical Journal Letters**, v. 681, p. L5–L8, July 2008.
- [147] WERNER, N., OONK, J. B. R., SUN, M., NULSEN, P. E. J., ALLEN, S. W., CANNING, R. E. A., SIMIONESCU, A., HOFFER, A., CONNOR, T., DONAHUE, M., EDGE, A. C., FABIAN, A. C., VON DER LINDEN, A., REYNOLDS, C. S., RUSZKOWSKI, M. The origin of cold gas in giant elliptical galaxies and its role in fuelling radio-mode AGN feedback. **Monthly Notices of the Royal Astronomical Society**, v. 439, p. 2291–2306, April 2014.
- [148] WILLNER, S. P., ELVIS, M., FABBIANO, G., LAWRENCE, A., WARD, M. J. Infrared observations of LINER galactic nuclei. **Astrophysical Journal**, v. 299, p. 443–461, December 1985.
- [149] ZEILINGER, W. W., PIZZELLA, A., AMICO, P., BERTIN, G., BERTOLA, F., BUSON, L. M., DANZIGER, I. J., DEJONGHE, H., SADLER, E. M.,

SAGLIA, R. P., DE ZEEUW, P. T. The distribution of ionized gas in early-type galaxies. II. The velocity field of the ionized gas. **Astronomy and Astrophysics Supplement Series**, v. 120, p. 257–266, December 1996.