

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM FÍSICA

População Estelar e Cinemática em Quasares Post-Starburst*

David Sanmartim

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

Porto Alegre

Agosto, 2013

*Trabalho parcialmente financiado pelo Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq).

copyright by
David Sanmartin
2013

Somos poeira das estrelas.

Do pó viemos.

Ao pó voltaremos.

Para Francieli.

Agradecimentos

Gostaria de agradecer a todos que de alguma forma contribuíram para a realização deste trabalho. Em especial, agradeço:

- ◇ À Profa. Dra. Thaisa Storchi-Bergmann, pela orientação, paciência e entusiasmo pela ciência;
- ◇ Aos membros da banca examinadora dessa tese, que aceitaram nosso convite.
- ◇ A todos os professores do programa de Pós-Graduação em Física e do Departamento de Astronomia, que com muito profissionalismo contribuem diariamente para uma boa formação de seus alunos;
- ◇ À Francieli, pela parceria de toda hora e por todo seu apoio e compreensão.
- ◇ Aos meus bons e fiéis amigos, pela convivência e parceria;
- ◇ Ao programa de Pós-Graduação em Física da UFRGS, pelas excelentes condições de trabalho e oportunidades que oferece à todos os seus estudantes;
- ◇ Ao CNPq pelo financiamento desse trabalho.

David Sanmartim

Universidade Federal do Rio Grande do Sul
Agosto 2013

Resumo

Quasares *Post-Starburst* (PSQs) são considerados como um estágio na evolução de galáxias massivas em que se observa uma formação estelar com idade de centenas de milhões de anos (população *post-starburst*) simultaneamente a um episódio de atividade nuclear. A presença desta população *post-starburst* nestes quasares pode ser explicada por um dos seguintes cenários: (1) cessão repentina da atividade nuclear (há centenas de milhões de anos atrás, consistente com a idade da população *post-starburst*) devido ao *feedback* do AGN; ou (2) um fluxo de gás em direção ao núcleo dispara a formação estelar na região circumnuclear, a qual cessa devido ao esgotamento do gás e é seguida pela ignição posterior da atividade nuclear. Tendo em vista a ausência de estudos espacialmente resolvidos em PSQs e com a finalidade de distinguir entre esses dois cenários, apresentamos um mapeamento espacial das diferentes componentes da população estelar bem como do gás e sua cinemática para dois PSQs: PSQ J0210–0903 e PSQ J0330–0532. Este mapeamento foi realizado utilizando observações com a unidade de campo integral GMOS-IFU dos telescópios Gemini Norte e Sul. Para o PSQ J0210–0903 encontramos que a população estelar é dominada por estrelas velhas nos 300 pc internos em torno do núcleo, enquanto que a população *post-starburst* é encontrada desde o núcleo até um anel a ≈ 800 pc do núcleo, onde encontramos também grande contribuição ao fluxo ótico de uma população jovem (*starburst*). Para o PSQ J0330–0532 também encontramos que a população velha domina na região nuclear (dentro dos 260 pc centrais) e que a população *post-starburst*, juntamente com uma população *starburst* domina na região circumnuclear. No entanto, no caso do PSQ J0330–0532 não há contribuição da população *post-starburst* no núcleo, apenas em um semi-anel a cerca de 500 pc do núcleo. A cinemática do gás emissor é semelhante nos dois PSQs e pode ser descrita por uma combinação de rotação e um *outflow* observado dentro dos ≈ 300 pc internos, com *blueshifts* alcançando ≈ -600 km s⁻¹. A partir do fluxo das linhas de emissão,

geometria da distribuição do gás emissor e de sua densidade, estimamos a massa de gás bem como a taxa de ejeção do *outflow*. O estudo do PSQ J0210–0903 sugere que tanto o cenário evolutivo como o cenário de interrupção da formação estelar são válidos para esta galáxia. Ocorre que a população *post-starburst* encontra-se tanto na região circumnuclear quanto no núcleo, indicando que não há novos surtos de formação onde há influência do *feedback* do AGN. A formação estelar, no entanto, seguiu ativa onde não há influência do *feedback* do AGN. Por outro lado, os resultados para o PSQ J0330–0532 desfavorecem o cenário de supressão repentina da formação estelar, uma vez que há formação estelar ativa na região de influência *feedback* do AGN, sem haver, entretanto, população *post-starburst*. Esta população encontra-se somente a ≈ 500 pc do núcleo, onde não há influência do *feedback* do AGN.

Abstract

Post-Starburst Quasars (PSQs) are hypothesized to represent a stage in the evolution of massive galaxies in which a *post-starburst population* (age of hundreds of Myr) are observed simultaneously with the nuclear activity. The presence of this population in PSQs can be explained by one of the following scenarios: (1) quenching of the star formation (which occurred hundreds of millions of years ago, consistent with the age of the post-starburst population) due to AGN feedback; or (2) a scenario in which a gas flow towards the nucleus triggers star formation in the circumnuclear region, which ceases due to exhaustion of gas and is followed by the ignition of nuclear activity. Considering the lack of spatially resolved studies of PSQ spectra and in order to distinguish between these two scenarios, we present a spatially resolved mapping of the different components of the stellar population and of the emitting gas flux distribution as well as the kinematics of stars and gas for two PSQs: PSQ J0210–0903 e PSQ J0330–0532. The mapping of these properties was done via observations with the Integral Field Units of the Gemini GMOS instruments. For the PSQ J0210–0903 we found that the stellar population is dominated by old stars in the inner 300 pc, while the *post-starburst* population is distributed from the nucleus up to a ring at ≈ 800 pc from it, where we also find a large contribution of a young (*starburst*) stellar population to the optical flux. For the PSQ J0330–0532 we also found that the old population dominates the optical flux within the inner 260 pc and that both the *post-starburst* and the *starburst* population dominate the circumnuclear region. However, in the case of the PSQ J0330–0532 there is no contribution of the *post-starburst* population in the nucleus, just in a half-ring at ≈ 500 pc from the nucleus. The kinematics of the emitting gas is similar in both PSQs and can be described by a combination of rotation and an outflow, observed with blueshifts of up to ≈ -600 km s $^{-1}$ in the inner ≈ 300 pc. From the emission-line fluxes, the observed geometry for gas distribution and the gas density, we have estimated the mass of

ionized gas and the mass outflow rate. Our study of the PSQ J0210–0903 suggests that both the evolutionary and quenching scenarios are supported for this galaxy, as follows. The *post-starburst* population is found both at the nucleus (within the inner 300 pc) and in the circumnuclear region, while a *starburst* population is found only in the circumnuclear region. There is thus no further episodes of star formation in the inner 300 pc region where the AGN feedback is observed, what supports the quenching scenario. However, the star formation has remained active in the region where the AGN feedback has no influence. On the other hand, the results for the PSQ J0330–0532 do not support the quenching scenario, since a young *starburst* population is observed in the inner 260 pc but no *post-starburst* population is found in this region, where the AGN feedback is active. A *post-starburst* population is found only at ≈ 500 pc from the nucleus, where there is no influence of the AGN feedback.

Sumário

Agradecimentos	iii
Sumário	viii
Lista de Tabelas	x
Lista de Figuras	xi
Lista de Abreviaturas	xii
1 Introdução	13
1.1 Galáxias Ativas e AGNs	13
1.2 O Paradigma da Atividade Nuclear	15
1.3 Quasares	17
1.4 Co-evolução e a Relação AGN- <i>Starburst</i>	17
1.5 Os Quasares <i>Post-Starburst</i>	18
1.6 Motivação e Objetivos	22
2 Amostra, Observações e Redução dos Dados	25
2.1 Amostra	25
2.1.1 PSQ J0210–0903	26
2.1.2 PSQ J0330–0532	27
2.2 Observações	27
2.3 Redução dos Dados	34
3 Metodologia	36
3.1 Medidas das Linhas de Emissão	36
3.2 <i>Channel Maps</i>	39
3.3 Método de Síntese de População Estelar	41

3.4	Cinemática Estelar	42
3.5	O Modelo de Rotação	44
3.6	<i>Tomografia</i> PCA	45
4	Resultados: O objeto PSQ J0210–0903	47
5	Resultados: O objeto PSQ J0330–0532	48
6	Considerações Finais	49
6.1	Sumário para o PSQ J0210–0903	49
6.2	Sumário para o PSQ J0330–0532	51
6.3	Conclusões	52
6.4	Perspectivas Futuras	53
	Referências	55

Lista de Tabelas

2.1	Tabela com resumo de características dos quasares <i>post-starburst</i> observados	26
2.2	Tabela contendo os detalhes das observações, organizadas em ordem cronológica.	33

Lista de Figuras

1.1	Representação do modelo de um AGN.	16
1.2	Espectro e imagem da galáxia PSQ protótipo: USNO J1025-0040 . . .	20
2.1	Imagem e espectro do PSQ J0210–0903 obtido do SDSS (DR7).	28
2.2	Imagem e espectro do PSQ J1703+6141 obtido do SDSS.	29
2.3	Imagem e espectro do PSQ J0330–0532 obtido do SDSS.	30
2.4	Imagem e espectro do PSQ J1243+0357 obtido do SDSS.	31
2.5	Imagem e espectro do PSQ J1150+0346 obtido do SDSS.	32
3.1	Representação esquemática da função de Gauss-Hermite para diferentes valores dos parâmetros h_3 e h_4	38
3.2	Representação esquemática dos canais de velocidade obtidos com a técnica de <i>channel maps</i>	40
3.3	Representação esquemática do diagrama aranha	45

Lista de Abreviaturas

AGN *active galactic nucleus*

FOV *field-of-view*

FWHM *full width at half maximum*

GMOS *Gemini Multi-Object Spectrograph*

HST *Hubble Space Telescope*

IFU *Integral Field Unit*

IR *infravermelho*

IRAF *Image Reduction and Analysis Facility*

LINER *low ionization emission-line region*

NASA *National Aeronautics and Space Administration*

NED *NASA Extragalactic Database*

PCA *Principal Component Analysis*

PSQ *post-starburst quasar*

QSO *quasi-stellar object (quasar)*

SED *spectral energy distribution*

SSP *Simple Stellar Population*

ULIRG *ultraluminous infrared galaxy*

Capítulo 1

Introdução

1.1 Galáxias Ativas e AGNs

As galáxias com núcleo ativo (em inglês *Active Galactic Nuclei*, AGN) chamaram a atenção inicialmente pelo fato de que nos núcleos mais luminosos, uma região compacta no centro da galáxia, com volume $\sim 10^{30}$ vezes menor que o da galáxia pode emitir luminosidades que variam de 10^{44} erg s^{-1} até 10^{48} erg s^{-1} . Isto significa que o núcleo é capaz de emitir tanta luminosidade quanto a galáxia hospedeira ($\sim 10^{11} L_{\odot}$), para o caso dos AGNs classificados como núcleos Seyfert — e chegando a até 100–1000 vezes mais no caso dos Quasares (Peterson, 1997).

Historicamente, foi Edward A. Fath (1908), durante o seu trabalho de doutorado, o primeiro a obter o espectro nuclear de um núcleo ativo. Ao observar “nebulosas espirais”, notou que uma delas, NGC 1068, apresentava 6 linhas de emissão. Anos mais tarde, em 1917, V.M. Slipher obteve espectros com melhor resolução espectral de NGC 1068, verificando que as linhas de emissão observadas eram similares àsquelas vistas em nebulosas planetárias, além de apresentarem larguras no espaço de velocidades da ordem de centenas de quilômetros por segundo. A idéia de que essas “nebulosas espirais” tratavam-se de objetos extragalácticos (galáxias) não havia sido ainda levantada, até que Edwin Hubble, em 1926, observa novamente NGC 1068, adicionalmente a NGC 4051 e NGC 4151, como parte do seu estudo sobre “nebulosas extragalácticas”.

Aproximadamente duas décadas se passaram até Seyfert (1943) estabelecer que uma fração muito pequena das galáxias apresentava um conjunto de características que as distinguia das demais, formando uma classe distinta. Essas galáxias apresentavam um núcleo muito brilhante, de onde emergiam linhas de emissão de alta excitação, que apresentavam-se em geral mais largas ($\sim 200 - 1000 \text{ km s}^{-1}$) do que em galáxias normais e por vezes linhas de hidrogênio ainda mais largas ($\sim 1000 - 10000 \text{ km s}^{-1}$) que as outras linhas. Essas características assim passaram a definir a classe de objetos que hoje chamamos galáxias Seyfert, que estão hoje entre as classes mais comuns de galáxias com núcleo ativo.

Uma classe mais rara de AGNs, com núcleo compacto e mais brilhante do que as Seyferts passou a ser identificada a partir da década de 60 quando Maarten Schmidt (1963) percebeu que a rádio fonte 3C 273 estava localizada a uma distância atípica, com *redshift* de $z = 0.367$. Esses objetos foram chamados de quasares, uma abreviação de *quasi-stellar radio source*, devido a sua aparência estelar e emissão em comprimentos de onda de rádio. Nas décadas seguintes, novas classes de objetos foram identificados como galáxias com núcleo ativo, incluindo quasares *radio-loud* e *radio-quiet*, as Seyfert tipo 1 e 2, e os LINERS, para citar alguns.

Embora exista uma diversidade muito grande de galáxias que apresentam núcleo ativo e com propriedades espectrais muito distintas, os AGNs mais luminosos revelam algumas propriedades comuns a todos, como (Krolik, 1999, Peterson, 1997, Ferrarese & Ford, 2005):

- variabilidade no fluxo das linhas largas de emissão e no contínuo;
- a distribuição espectral de energia (SED, *Spectral Energy Distribution*) é não-estelar, emitindo excesso de raios-X, ultravioleta, infravermelho e rádio em relação a uma galáxia normal;
- espectro com linhas de emissão intensas, muitas vezes com linhas permitidas muito largas, chegando a até 10000 km s^{-1} ;

- a emissão do contínuo não estelar e das linhas de emissão tem origem numa região muito pequena ($\sim 10^{-4} pc$) que emite uma luminosidade tão grande ou mesmo maior do que a da galáxia hospedeira ($> 10^{11} L_{\odot}$).

1.2 O Paradigma da Atividade Nuclear

O paradigma atual para explicar as propriedades físicas dos AGNS consiste de um buraco negro supermassivo (*Super Massive Black Hole* — SMBH) no centro da galáxia hospedeira, com massa entre 10^6 e $10^9 M_{\odot}$, que acreta matéria do seu entorno através de um disco de acreção, adicionando massa ao buraco negro e emitindo grande quantidade de energia, proveniente da perda de energia potencial gravitacional, que é transformada em energia térmica e luminosa por meio de diferentes processos que ocorrem no plasma que compõe o disco de acreção (Peterson, 1997, Frank et al., 2002).

A luminosidade do AGN é resultado da taxa de acreção ao SMBH. Se a taxa de acreção é baixa, menor do que cerca de $10^{-4} M_{\odot} \text{ yr}^{-1}$, a atividade nuclear é baixa, e o núcleo é classificado como LINER (*Low-Ionization Nuclear EmissionLine Region*), cuja denominação é atribuída a Heckman (1980). Nas galáxias Seyfert, as taxas de acreção são mais altas, sendo que nos Quasares, ela pode chegar a mais do que $1 M_{\odot} \text{ yr}^{-1}$.

A estrutura de um AGN consiste então de um SMBH circundado por um disco de acreção — que tem dimensões que variam de dias a semanas-luz — e é a origem da emissão do contínuo não-estelar dos AGNs e também dos jatos de partículas relativísticas (que saem da sua borda mais interna). Estes jatos dão origem à emissão rádio característica principalmente das rádio galáxias. O disco de acreção está rodeado por um gás com alta dispersão de velocidades de onde emergem as linhas largas observadas nas galáxias de tipo Seyfert 1, região esta conhecida como região de linhas largas (*Broad Line Region* — BLR). Para além da BLR, mas no mesmo plano do disco de acreção, está presente uma estrutura toroidal de poeira e gás molecular (conhecida como o toro) que, dependendo da orientação do observador, obscurece o

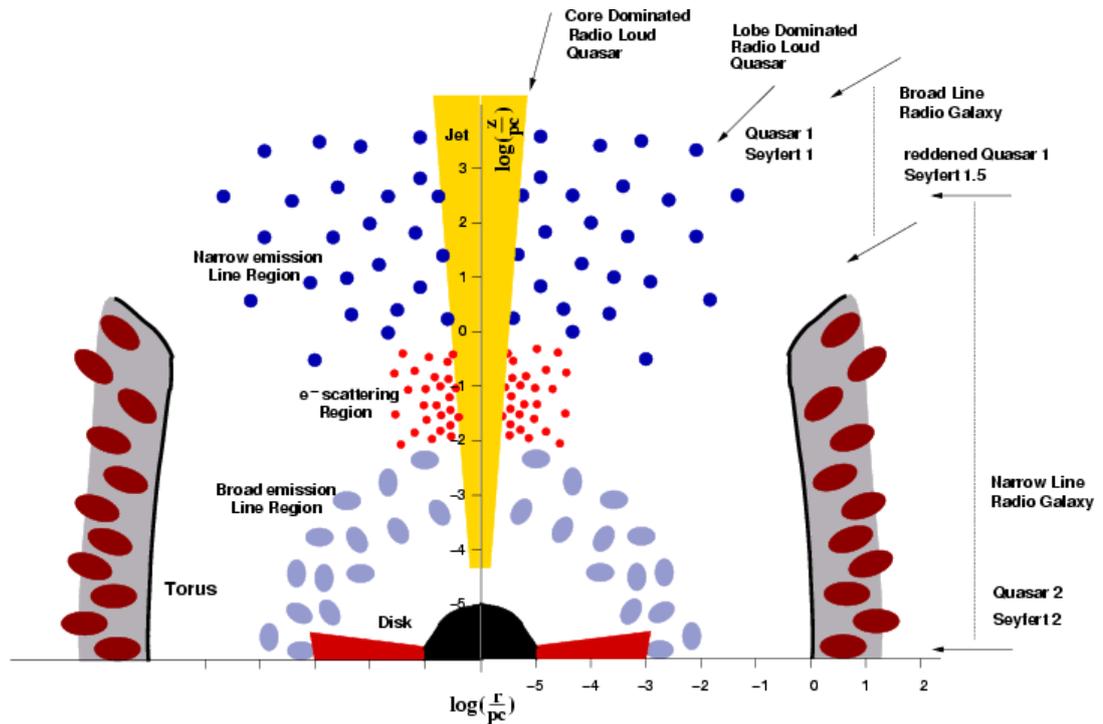


Figura 1.1: Representação do modelo de um AGN, considerando simetria cilíndrica. A figura mostra um corte no plano $r - z$, onde os eixos dados estão em escala logarítmica (em unidade de pc). Na figura são mostrados o buraco negro central, envolto pelo disco de acreção, o jato perpendicular ao plano do disco e o toro de gás e poeira, que circunda toda a estrutura. São mostradas ainda as regiões de linhas largas (BLR) e de linhas estreitas (NLR). Figura retirada de Zier & Biermann (2002).

disco de acreção e a região de linhas largas, deixando visível apenas a região que produz linhas estreitas (*Narrow Line Region* — NLR). Esta região está localizada mais para fora, se estendendo para além do toro, e tem menor dispersão de velocidades que a BLR. Neste caso, em que a BLR e o disco de acreção não são visíveis, está configurado o caso de uma galáxia Seyfert 2, onde não se observa a região mais interna do AGN. Este modelo, que explica a diferença entre galáxias Seyfert 1 e Seyfert 2 como sendo devida à orientação da linha de visada do observador em relação ao AGN ficou conhecido como Modelo Unificado (Osterbrock, 1978, Antonucci, 1993), e uma versão atualizada do mesmo é ilustrada na Figura 1.1.

1.3 Quasares

Os quasares e QSOs¹, como mencionado acima, são os AGNs mais potentes, com luminosidades bolométricas no intervalo de $10^{44} - 10^{48} \text{ erg s}^{-1}$, e emissão distribuída desde a faixa espectral do rádio até os raios-X e mesmo raios- γ . Devido à sua alta luminosidade quando comparada à da galáxia hospedeira, os QSOs possuem uma distribuição espectral de energia (*Spectral Energy Distribution* – SED) caracterizada pela emissão não-estelar e excesso de emissão ultravioleta. Esta emissão no ultravioleta é conhecida como *big blue bump*, sendo observada como uma proeminência no espectro entre os comprimentos de onda de repouso $\sim 1000 \text{ \AA}$ e 4000 \AA (Peterson, 1997), e atribuída à emissão contínua do disco de acreção. Outra característica importante dos QSOs é a presença de linhas de emissão extremamente largas da BLR, que podem ter larguras à meia altura de $\approx 10000 \text{ km s}^{-1}$. Os quasares são mais frequentemente observados a altos *redshifts*, alcançando distâncias cujos *redshifts* mais altos estão próximos de $z \approx 8$ (e.g., Fan, 2001, 2003, Fan et al., 2006, Iye et al., 2006, Bradley et al., 2008). O mais distante já observado, por exemplo, está em uma distância que corresponde a $z = 8.6$ (Lehnert et al., 2010).

1.4 Co-evolução e a Relação AGN-*Starburst*

As observações das décadas de 1990 e 2000 – principalmente as observações espectroscópicas obtidas com o Telescópio Espacial – apontam para a conclusão que todas galáxias próximas que têm um bojo estelar têm também um SMBH no centro. Com base neste resultado, é de se esperar que a evolução do bojo estelar nas galáxias ocorra paralelamente à do SMBH no seu centro. Isto foi confirmado pelo resultado obtido por Ferrarese & Merritt (2000), Gebhardt et al. (2000), de que a massa do SMBH é proporcional à massa do bojo estelar. A famosa relação $M_{BH} - \sigma_*$, resultante

¹Essa denominação resulta da abreviação de “quasi-stellar radio sources”, já que eles foram descobertos a partir da sua emissão rádio. Por outro lado, a abreviação QSOs, é frequentemente usada para denominar tanto os quasares como os objetos da mesma categoria que não são fortes fontes de rádio, mas têm espectros óticos semelhantes.

destes estudos (Tremaine et al., 2002, Onken et al., 2004, Woo et al., 2010, Graham et al., 2011), onde σ é a dispersão de velocidades estelares do bojo da galáxia, é hoje usada como um importante vínculo nos modelos cosmológicos de evolução de galáxias, sendo interpretada como indicativo da co-evolução do bojo e do SMBH.

Um possível cenário para a co-evolução pode ser o seguinte: a alimentação do buraco negro requer que gás seja canalizado para a região central da galáxia. Se houver uma acumulação deste gás na região circumnuclear, pode haver condições favoráveis à formação de novas estrelas, provocando o aparecimento de um *starburst*. De fato, vários estudos observacionais apontam para a presença de estrelas jovens ou de idade intermediária na região central de galáxias ativas (Storchi-Bergmann et al., 2000, 2005, Cid Fernandes et al., 2005a).

A presença de *starbursts* no entorno de AGNs tem sido proposta já há algum tempo. Um modelo em que um puro *starburst* explicaria a atividade nuclear de AGNs também já foi proposto na literatura (Terlevich & Melnick, 1985, Terlevich et al., 1992), sendo capaz de reproduzir muitas das propriedades observadas nos AGNs. No entanto, o modelo fracassou, uma vez que não foi capaz de explicar a rápida variabilidade observada em raios-X (Cid Fernandes, 1997). Assim, o paradigma atual para a alimentação de SMBHs segue sendo a acreção de matéria, mas a coexistência de um AGN central e formação estelar (*starburst*) circundando o AGN, ou a evolução de um estágio de *starburst* para um estágio de atividade nuclear têm sido propostos para explicar a maior incidência de populações estelares jovens ou de idade intermediária em galáxias ativas (Heckman et al., 1997, González Delgado et al., 1998, Storchi-Bergmann et al., 2001, Kauffmann et al., 2003, Davies et al., 2007), dando origem ao que se costumou chamar de conexão *starburst*-AGN.

1.5 Os Quasares *Post-Starburst*

O cenário evolutivo em que uma fase de *starburst* é seguida de uma fase de atividade nuclear foi proposto também para os QSOs há 25 anos atrás por Sanders

et al. (1988). Este autor mostrou que ULIRGs (*Ultra Luminous Infrared Galaxies*), uma fase em que as galáxias são observadas como ultraluminosas no infravermelho, com $L_{\text{IR}} > 10^{12}L_{\odot}$, têm luminosidade bolométrica e densidade espacial similares a de QSOs, sugerindo que as ULIRGs vão dar origem aos QSOs clássicos após perderem/consumirem toda a poeira e gás que envolve o núcleo ativo. O cenário seria o seguinte: um evento de *merger* ou fusão entre duas galáxias seria o ponto de partida para canalizar gás para a região central, provocando o aparecimento de *starbursts* muito luminosos ainda envoltos em poeira, provocando a emissão no infravermelho. Numa fase posterior à do *starburst*, quando o vento estelar das estrelas jovens varre o excesso de gás e poeira, é possível observar o QSO, cuja atividade foi iniciada graças ao gás que migra até o núcleo fornecendo “combustível” ao SMBH.

Claras assinaturas de eventos de formação estelar ocorridos há cerca de centenas de milhões de anos atrás são observados, em particular, nos chamados *Post-Starburst Quasars* (Brotherton et al., 1999) ou quasares “vermelhos” (Canalizo et al., 2006). Quasares *Post-Starburst* (PSQs) apresentam na sua SED saltos de Balmer e linhas de absorção de alta ordem da série de Balmer provenientes de estrelas do tipo A, abundantes em populações estelares com idade de poucas centenas de Myrs. Brotherton et al. (1999) reportam em particular a descoberta de um PSQ com as características mais marcantes dessa classe de objetos, que eles hipotetizam representar um estágio na evolução hierárquica de galáxias que sucede um evento de *merger* e a fase de ULIRGs. Nessa hipótese, os PSQs representariam justamente a fase intermediária entre o ULIRG e o quasar.

Na Figura 1.2 apresentamos o espectro do PSQ protótipo estudado no trabalho de Brotherton et al. (1999), onde está presente um contínuo azul característico de QSOs, um proeminente salto de Balmer e profundas linhas de absorção de alta ordem da série de Balmer. Modelos de síntese de população estelar mostram que a mesma corresponde a um *starburst* instantâneo de 400 Myrs e com luminosidade bolométrica comparável àquela de QSOs. Canalizo et al. (2000) reportam ainda a existência de

uma galáxia vizinha em interação com o PSQ que também possui população *post-starburst*, sugerindo que a interação pode ter dado origem tanto à formação estelar quanto a atividade do AGN.

Como já mencionado acima, a correlação entre a massa do SMBH e a dispersão de velocidade das estrelas (Ferrarese & Merritt, 2000, Gebhardt et al., 2000, Tremaine et al., 2002) traduz a proporcionalidade entre a massa do bojo estelar e massa do SMBH, sugerindo uma co-evolução entre o SMBH e a galáxia hospedeira (Hopkins et al., 2006, 2008, Di Matteo et al., 2008). Nesse cenário, os PSQs adquirem uma grande importância, uma vez que representam uma fase crítica, onde se testemunha esta co-evolução: observa-se tanto o crescimento do SMBH — através da atividade nuclear — como o da galáxia hospedeira — pela formação de novas estrelas na região central.

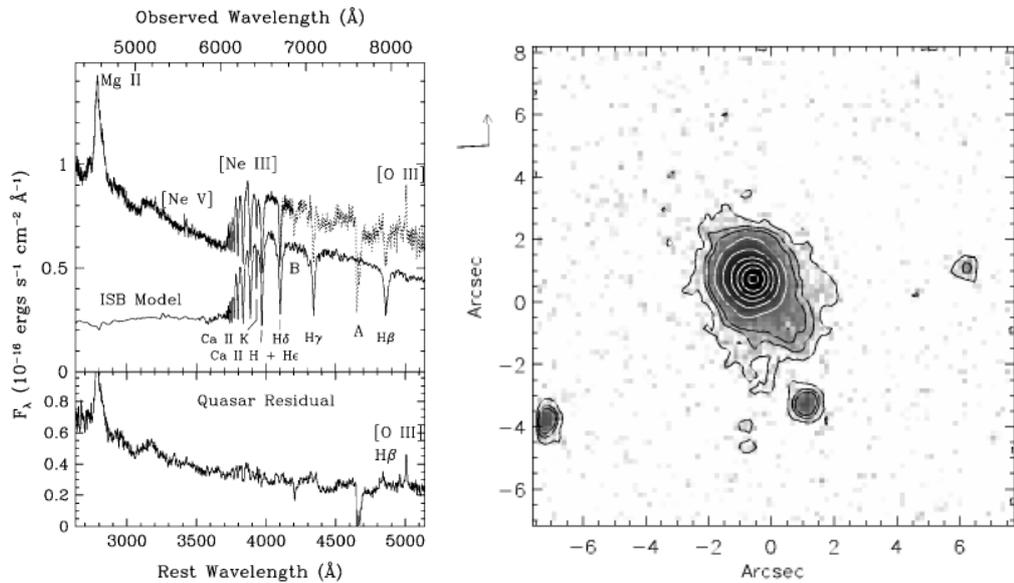


Figura 1.2: Espectro e imagem da galáxia PSQ protótipo: USNO J1025-0040 ($z=0.6344$). Figura retirada de Brotherton et al. (1999).

Utilizando os novos *surveys* espectroscópicos de quasares, como o *Sloan Digital Sky survey* (SDSS) e o *Two-degree Field* (2dF), Brotherton et al. (2004, 2007) classificaram — através de um algoritmo baseado nos critérios de Zabludoff et al.

(1996)² – um total de 609 PSQs que mostram claras assinaturas de população estelar *post-starburst*. Os critérios utilizados para a seleção dos espectros de PSQs são os seguintes, de acordo com Cales et al. (2011):

1. razão sinal/ruído $S/N > 8$;
2. soma das larguras equivalentes de $H\delta$, $H\zeta$ e $H\eta$: $H_{\text{total}} > 2\text{\AA}$;
3. uma medida do nível de significância da detecção do parâmetro H_{total} , $H_{\text{sig}} > 6$;
4. Salto de Balmer > 0.9 ;

onde o S/N é calculado entre 4150 e 4250 \AA , e o Salto de Balmer é definido como a razão entre as intensidade em duas janelas espectrais de largura de 100 \AA , iniciando em 3985 e 3740 \AA (no referencial de repouso). Imagens do SDSS mostram que cerca de 40% desses objetos estão interagindo com outra galáxia em um evento de *merger* ou possuem uma galáxia companheira (Canalizo et al., 2006).

Cales et al. (2011) e Cales et al. (2013) realizaram recentemente estudos fotométricos (com a câmera HST/ACS, no filtro F606W) e espectroscópicos (via espectros óticos integrados de alto sinal/ruído, observados com o telescópio Keck/KPNO) de uma amostra de PSQs com $z \sim 0.3$, selecionadas espectroscopicamente a partir do SDSS. Nesses estudos, Cales et al. (2011, 2013) mostraram que as galáxias PSQs são compostas por uma população bastante heterogênea, contendo tanto galáxias *early-type* quanto galáxias espirais. Eles concluíram também que as galáxias PSQs *early-type* provavelmente são o resultado de *major mergers*, sendo também ULIRGS evoluídos, enquanto que galáxias PSQs espirais possuem uma história de formação estelar mais complexa, provavelmente resultante de outros eventos que não *mergers* (e.g., capturas de galáxias anãs). Além disso, eles perceberam que as galáxias PSQs espirais apresentam características morfológicas e razões de linha que indicam a existência de atividade *starburst*, além de uma população *post-starburst* dominante.

²originalmente utilizados para a seleção de galáxias *post-starburst*

Utilizando observações realizadas com o *Spitzer InfraRed Spectrograph* (IRS) no infravermelho médio de PSQs em *redshift* $z \sim 0.3$ Wei et al. (2013) encontraram que os espectros desses objetos também mostram assinaturas espectrais de população *post-starburst*, além de apresentarem linhas de emissão de PAHs (*Polycyclic Aromatic Hydrocarbons*) em 6.2 e 11.3 μm , que indicam a presença de uma população *starburst*. Assim como os espectros óticos, os espectros de Wei et al. (2013) apresentam características tanto de ULIRGs quanto de QSOs, sugerindo que os PSQs são objetos híbridos de AGNs e galáxias *starburst*.

Quasares *post-starburst* representam o mais dramático caso de formação estelar intensa e massiva em galáxias hospedeiras de QSOs. Mas são uma fração pequena da população total de QSOs e sua relação com outros tipos de quasares bem como com ULIRGs e galáxias conhecidas como E+A – nas quais também se observa uma proeminente população *post-starburst* – é atualmente desconhecida. Alguns autores (Granato et al., 2004, Di Matteo et al., 2005, Hopkins et al., 2006, Cano-Díaz et al., 2012) propõem que a população *post-starburst* indica uma supressão repentina da formação estelar causada pelo início da atividade nuclear, onde o *feedback* do AGN seria responsável por cessar a formação estelar. Uma outra hipótese possível é um cenário evolutivo como proposto por Storchi-Bergmann et al. (2000, 2001) em que a formação estelar é resultado de um fluxo de gás para a região central da galáxia que pode ter sido causado por interação com alguma galáxia vizinha. Este fluxo de gás no seu caminho em direção ao centro da galáxia produz episódios de formação estelar que eventualmente cessam por esgotamento do gás. A perda de massa devido à evolução das estrelas jovens recém formadas combinada com um possível gás residual pode então alimentar um SMBH central, e a atividade nuclear seria então um estágio posterior ao da formação das estrelas. Este é o cenário favorecido também por Davies et al. (2007).

1.6 Motivação e Objetivos

Embora os catálogos de Brotherton et al. (2004, 2007) e os estudos anteriores sobre PSQs apresentem um grande número de quasares onde se pode observar simultaneamente a presença de um AGN e massiva formação estelar de alguns 100 Myrs, nenhum estudo espacialmente resolvido das propriedades e cinemática da população estelar e do gás ionizado desses objetos é encontrado na literatura. Assim, uma vez que esses estudos são realizados apenas sobre espectros integrados, não sabemos como se distribui espacialmente o gás emissor e suas propriedades, nem qual é a distribuição espacial da população estelar, em especial a população *post-starburst*: está ela concentrada no núcleo ou distribuída em um anel ao redor do mesmo, como observamos em algumas galáxias ativas próximas?

O objetivo do nosso trabalho é mapear as diferentes componentes de idade da população estelar bem como o gás e sua cinemática em PSQs tendo em vista a ausência de estudos deste tipo – com resolução espacial – na literatura. Em particular pretendemos:

- Distinguir entre os dois cenários descritos na subseção anterior para os PSQs. Para isto, estudamos a distribuição espacial da população estelar – em particular a *post-starburst*. No cenário evolutivo, a população de idade intermediária estaria em torno do núcleo e não necessariamente no núcleo, enquanto no cenário de interrupção abrupta da formação estelar, ela deveria estar presente no núcleo, onde o efeito de *feedback* do AGN é mais importante;
- Mapear a distribuição do gás e de sua excitação, verificando a presença de outras fontes ionizantes além do núcleo ativo (como estrelas jovens);
- Calcular a massa de gás ionizado presente na região central da galáxia;
- Mapear a cinemática do gás para verificar/quantificar possíveis efeitos de *outflow* e *feedback* e/ou movimentos de *inflow*; localizar o efeito de *feedback* para

verificar sua possível correlação espacial com a população estelar de idade intermediária;

- Mapear a cinemática estelar, que deve ser dominada pelo potencial gravitacional da galáxia, e assim, comparando-a com a cinemática do gás, distinguir/separar melhor na cinemática do gás movimentos devidos ao potencial da galáxia de movimentos não gravitacionais.

Assim, utilizando a experiência acumulada nos últimos anos pelo grupo de estudo de AGNs coordenado pela minha orientadora (AGNIFS), que tem como base observações espectroscópicas com Unidades de Campo Integral (IFUs) (e.g., Riffel et al., 2009b, Storchi-Bergmann et al., 2009, 2010), selecionamos alguns PSQs para serem estudados detalhadamente com espectroscopia IFU na região ótica do espectro. Os critérios de seleção foram: (1) terem os mais baixos *redshifts* da amostra, o que possibilita uma boa resolução espacial; (2) terem fluxo suficiente para permitir uma razão sinal/ruído no espectro que possibilite sua utilização em programas de síntese espectral de população estelar ($S/N \gtrsim 25$); (3) terem assinatura bem clara da população *post-starburst* no espectro do SDSS.

No capítulo 2 apresentamos os detalhes da nossa amostra, das observações e dos processos de redução e tratamento dos dados. No Capítulo 3 apresentamos a metodologia utilizada nesse trabalho. Nos Capítulos 4 e 5 apresentamos, na forma de dois artigos, os resultados da tese e as discussões pertinentes. O artigo do Capítulo 4 já está publicado, enquanto que o artigo do Capítulo 5 está submetido. Por fim, no Capítulo 6 apresentamos um sumário dos principais resultados obtidos para cada um dos PSQs estudados (Seções 6.1 e 6.1), bem como nossas conclusões (Seção 6.3) e as perspectivas futuras para o trabalho (Seção 6.4).

Capítulo 2

Amostra, Observações e Redução dos Dados

Neste capítulo, apresentamos nossa amostra de galáxias, os procedimentos adotados para a observação dos dados, bem como uma descrição do processo de tratamento e redução dos dados.

2.1 Amostra

Nossa amostra foi escolhida a partir do catálogo de Brotherton et al. (2004, 2007), cujos objetos mais extremos e luminosos estão em alto redshift e desta forma não permitem uma boa resolução espacial, sendo também muito fracos para permitirem observações espectroscópicas com razão sinal/ruído suficiente para os nossos objetivos num tempo de exposição razoável com o instrumento GMOS-IFU. Assim, limitamos nossa amostra àqueles PSQs de mais baixo *redshift*, que nos permite uma boa resolução espacial e, para os quais os espectros apresentam claros perfis de linhas de absorção de alta ordem da série de Balmer, incluindo ainda o perfil de absorção do tripleto do Mg Ib $\lambda\lambda$ 5167, 5173, 5184. Como tivemos alguns insucessos nos pedidos de turnos de observação, a amostra observada foi de 5 objetos. Na Tabela 2.1 apresentamos algumas propriedades dos PSQs observados (obtidas a partir do

Nome CDS (1)	α (hhmmss.ss) (2)	δ (ddmmss.s) (3)	z (4)	Classificação (5)	Tipo Sy (6)	kpc'' (7)
SDSS J021011.49–090335.5	02 10 11.49	–09 03 35.5	0.0414	Sa	Sy 1	0.83
SDSS J170328.96+614109.9	17 03 28.96	61 41 09.9	0.0771	?	Sy 1	1.55
SDSS J033013.26–053236.0	03 30 13.26	–05 32 36.0	0.0131	Sb	Sy 1	0.27
SDSS J124334.01+035753.3	12 43 34.01	03 57 53.3	0.1008	?	Sy 1	2.03
SDSS J115018.40+034602.7	11 50 18.10	03 46 02.7	0.0807	?	Sy 1	1.62

Tabela 2.1: Coluna 1: nome da galáxia do *Centre de Données de Strasbourg* (CDS; <http://cdsweb.u-strasbg.fr>); Coluna 2: ascensão reta; Coluna 3: declinação; Coluna 4: *redshift*; Coluna 5: classificação de Hubble dada pelo NASA/IPAC *Extragalactic Database* (NED; <http://nedwww.ipac.caltech.edu>); Coluna 6: tipo de Seyfert; Coluna 7: escala espacial na galáxia.

NED¹) e nas Figuras 2.1, 2.2, 2.3, 2.4 e 2.5 mostramos imagens compostas do SDSS, bem como seus respectivos espectros, correspondendo a aberturas de 3''0 no plano do céu. Dois desses objetos foram observados apenas recentemente (PSQ J1243+0357 e PSQ J1150+0346), como parte dos programa GN-2013A-Q-8, cujos dados foram liberados em Abril de 2013, e assim não foi possível incluí-los na Tese.

Dentro da nossa amostra, selecionamos para a Tese os PSQ J0210–0903 e PSQ J0330–0532, que possuem melhor relação de escala espacial (kpc/arcsec), de modo que pudéssemos estudar a população estelar e a cinemática na região central de PSQs com a melhor resolução espacial possível. Além disso, o PSQ J1703+6141 (observado cronologicamente logo após o PSQ J0210–0903) possui espectros com qualidade inferior aos espectros dos PSQ J0210–0903 e PSQ J0330–0532, não permitindo um estudo espacialmente resolvido da população estelar.

2.1.1 PSQ J0210–0903

O PSQ J0210–0903, selecionado devido à sua relativa proximidade (entre os mais próximos da amostra), está a aproximadamente 170 Mpc (para $H_o = 73.0 \text{ km sec}^{-1} \text{ Mpc}^{-1}$). Nessa distância, sua escala espacial é de $\sim 0.83 \text{ kpc arcsec}^{-1}$. O PSQ J0210–0903 está

¹NASA/IPAC *Extragalactic Database* (NED) é uma base de dados astronômicos que cruza informações sobre objetos extragalácticos, sendo operado pelo *Jet Propulsion Laboratory, California Institute of Technology* em conjunto com a NASA

entre os PSQs mais brilhantes com *redshift* menor que 0.1 e seu espectro mostra claramente a presença do salto de Balmer, bem como linhas de absorção de alta ordem da série de Balmer, conforme verifica-se no espectro da Figura 2.1. O PSQ J0210–0903 está no centro de uma galáxia espiral barrada, cujo tipo da sequência de Hubble é SBa (Graham & Li, 2009), com magnitude Petrosiana absoluta $M_i = -22.32 \pm 0.50$ (SDSS DR7).

2.1.2 PSQ J0330–0532

O PSQ J0330–0532 está a uma distância de ≈ 50 Mpc (NED, para $H_o = 73.0 \pm 5 \text{ km sec}^{-1} \text{ Mpc}^{-1}$), que resulta em uma escala espacial de $\sim 0.26 \text{ kpc arcsec}^{-1}$, permitindo então um estudo espacial das propriedades físicas do núcleo dessa galáxia ainda mais detalhado do que no caso do PSQ J0210–0903. Assim como no caso do PSQ J0330–0532, esta galáxia apresenta um espectro azul dominado por linhas de absorção de alta ordem da série de Balmer (característica da atmosfera de estrelas do tipo A, que domina o espectro de absorção das galáxias *post-starburst*). O PSQ J0330–0532 está hospedado por uma galáxia espiral Sb (Graham & Li, 2009), cuja magnitude Petrosiana absoluta é $M_i = -22.22 \pm 0.05$, tendo uma galáxia companheira à Noroeste, sendo que os núcleos de ambas estão distantes (distância projetada no plano céu) de aproximadamente 26 kpc. Greene et al. (2006) e Shen et al. (2008) estimaram, respectivamente, que o buraco negro central tem massa de $\sim 10^{7.0} M_\odot$ e $\sim 10^{7.8} M_\odot$.

2.2 Observações

As observações foram realizadas utilizando o espectrógrafo GMOS (*Gemini Multi-Object Spectrograph*) dos telescópios de 8 m do *Gemini Observatory* operando no modo IFU (*Integral Field Unit*) (Allington-Smith et al., 2002). Quando operado no modo IFU, o GMOS é capaz de obter simultaneamente, dispostos sobre um arranjo de três detetores, até 1000 espectros do objeto observado, além de outros 500 espectros

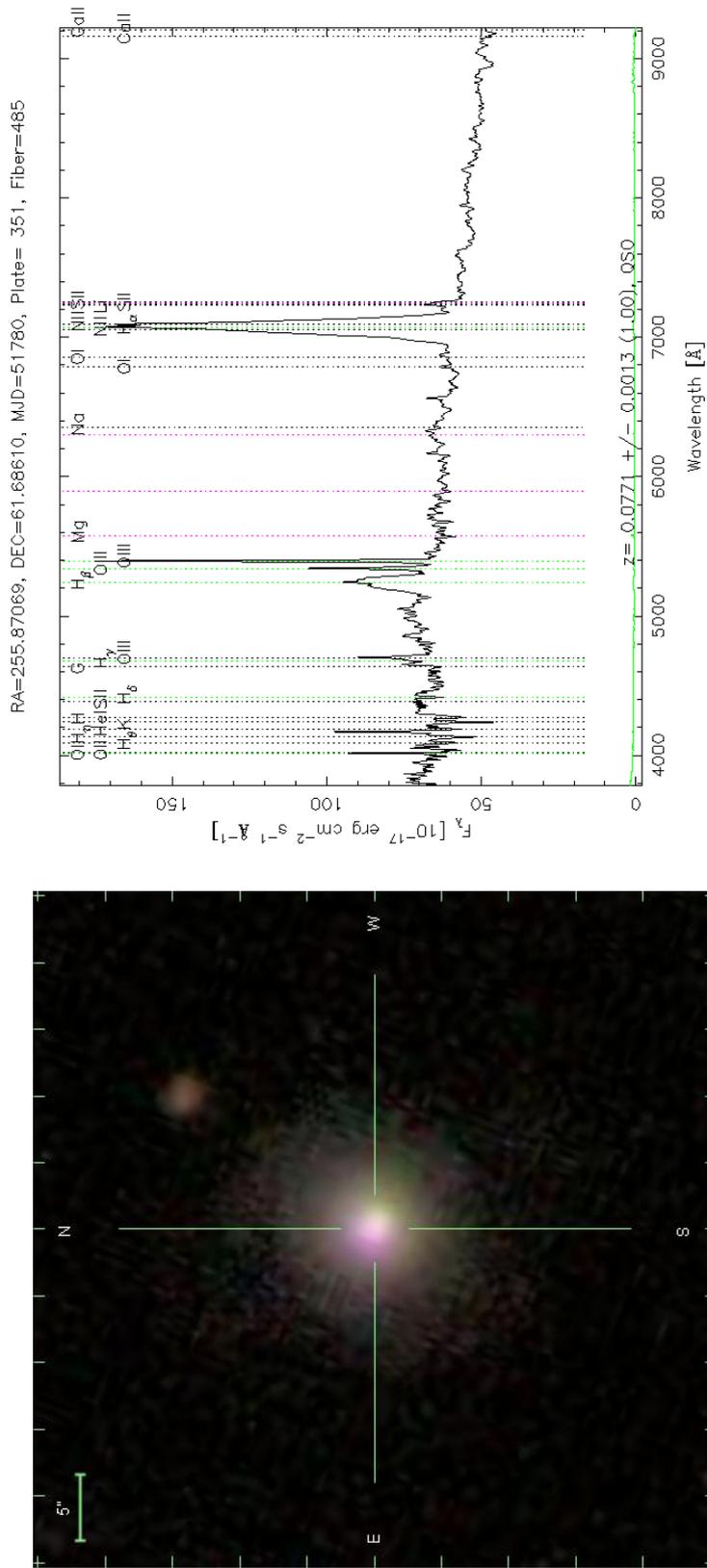


Figura 2.2: **Esquerda (figura a)**: Imagem do PSQ J1703+6141 obtida do SDSS (DR7). **Direita (figura b)**: Espectro do PSQ J1703+6141 obtida do SDSS (DR7).

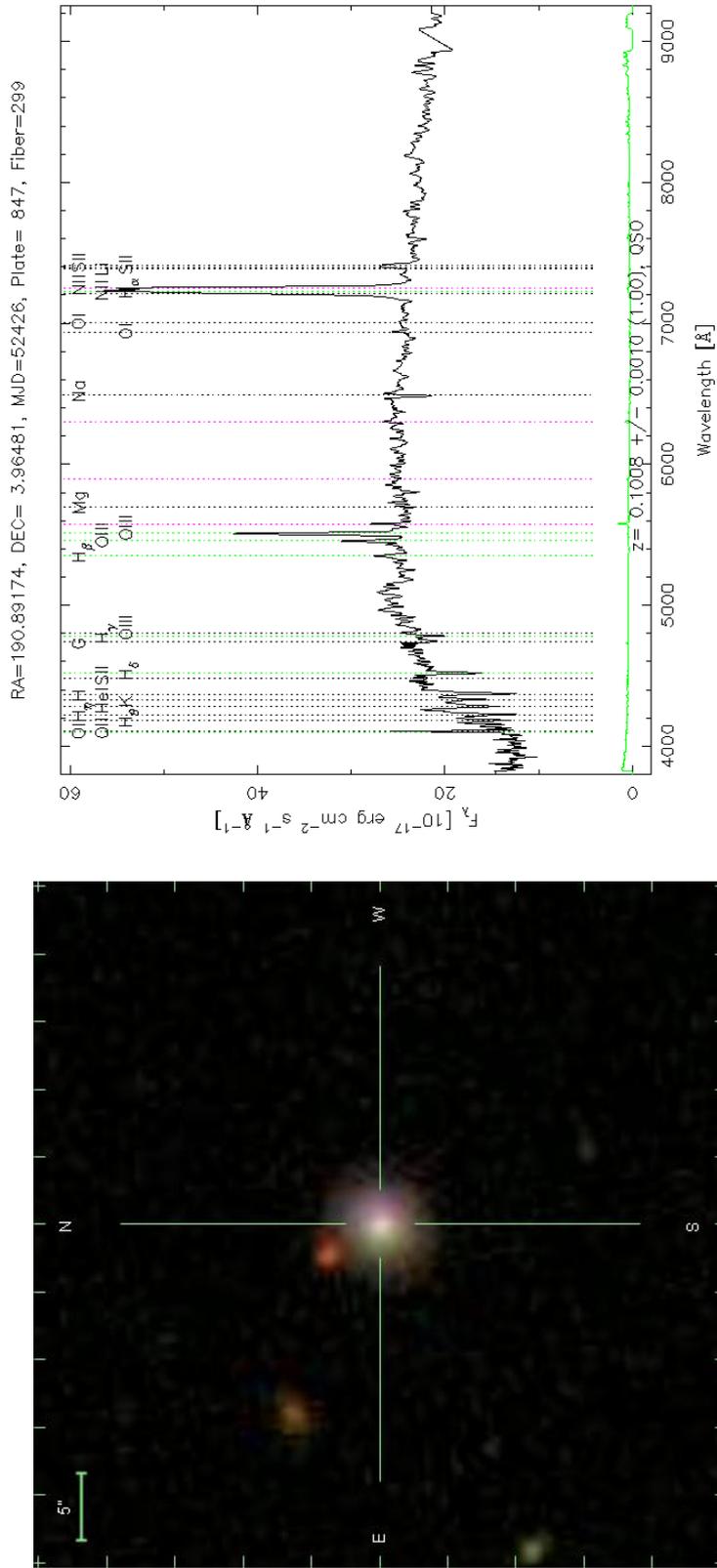


Figura 2.4: **Esquerda (figura a)**: Imagem do PSQ J1243+0357 obtida do SDSS (DR7). **Direita (figura b)**: Espectro do PSQ J1243+0357 obtida do SDSS (DR7).

do campo de céu. Nesse caso o GMOS-IFU está operando no que se denomina de modo duas fendas, capaz de cobrir um campo de $7'' \times 5''$ do objeto desejado, além do campo de $3.5'' \times 5''$ do céu próximo ao objeto, afastado em cerca de 1 minuto de arco. No modo uma fenda o campo principal é reduzido para $3.5'' \times 5''$ e o campo do céu para $1.75'' \times 5''$, no entanto a cobertura espectral dobra de tamanho. Na Tabela 2.2 estão listadas as principais características de todos os 5 turnos observacionais: o nome reduzido do objeto observado, o código de identificação do programa junto a base de dados do Gemini (*Program ID*), o tamanho do campo do céu (*field-of-view* – *FOV*), a rede utilizada, o comprimento de onda central, a cobertura espectral e o *seeing* média da(s) noite(s) de observação. Cabe salientar que os comprimentos de onda dados na Tabela 2.2 são referentes ao comprimento de onda de repouso.

PSQ (1)	Prog. ID (2)	FOV (3)	t_{EXP} (s) (4)	Rede (5)	λ_C (Å) (6)	$\Delta\lambda$ (Å) (7)	<i>Seeing</i> (") (8)
J0210–0903	GN-2008B-Q-45	$7''5 \times 5''0$	8×1800	B600_G5303	4900/5000	4200–5500	0.7–0.8
J1703+6141	GN-2010A-Q-101	$3''5 \times 5''0$	8×1750	B600_G5307	4950/5050	3900–6300	0.7–0.8
J0330–0532	GS-2010B-Q-24	$3''5 \times 5''0$	8×2750	B600_G5323	4950/5050	3900–6300	0.4–0.5
J1243+0357	GN-2013A-Q-8	$3''5 \times 5''0$	12×1735	B600_G5307	5200/5300	3900–6300	0.5–0.6
J1150+0346	GN-2013A-Q-8	$3''5 \times 5''0$	12×1735	B600_G5307	5200/5300	3900–6300	0.5–0.6

Tabela 2.2: Nesta tabela apresentamos os detalhes dos turnos de observação, organizados em ordem cronológica, nos telescópios Gemini Norte (GN) e Gemini Sul (GS).

Assim, dados espectroscópicos do PSQ J0210–0903 foram obtidas em Dezembro de 2008 sob o programa GN-2008B-Q-45 no Gemini Norte com o eixo maior da IFU orientado ao longo do $PA = 25^\circ$ e operando no modo duas fendas, com FOV de $7'' \times 5''$, utilizando a rede B600_G5303 com uma cobertura espectral desde 4200 até 5400 Å, com uma escala de dispersão de $0.913 \text{ \AA pixel}^{-1}$ e poder de resolução $R \sim 3000$ ($\text{FWHM} \sim 100 \text{ km s}^{-1}$). O intervalo espectral informado na Tabela 2.2 para o PSQ J0210–0903, no entanto, não pôde ser aproveitado integralmente, uma vez que as extremidades azul e vermelha dos espectros apresentaram uma relação sinal/ruído muito baixa. Ao todo foram realizadas 8 exposições individuais com 1700

s cada, distribuídas em dois conjuntos centrados nos comprimentos de onda de 4900 e de 5000 Å, com 4 posições levemente diferentes (frações de segundos de arco), para que se possa corrigir os dados na eventualidade de alguma característica importante cair sobre um dos *gaps* entre os CCDs do GMOS. Para os demais galáxias PSQs, considerando que no caso do PSQ J0210–0903 as extremidades dos espectros — azul e vermelha — foram perdidas e que o campo máximo da IFU ($7'' \times 5''$) teve abrangência espacial além da necessária, as observações foram realizadas no modo uma fenda, otimizando o campo de observação necessário para nossos estudos e maximizando o intervalo espectral, que a síntese de população estelar mostrou ser de suma importância. Para o PSQ J0330–0532, os detalhes da observação são similares àqueles do PSQ J0210–0903. Mais detalhes técnicos sobre as observações dos PSQ J0210–0903 e PSQ J0330–0532 são dadas nas seções correspondentes de observação e redução dos Capítulos 4 e 5, respectivamente.

2.3 Redução dos Dados

A redução dos dados foi realizada utilizando os pacotes genéricos do IRAF (*Image Reduction and Analysis Facility*) e aqueles específicos desenvolvidos para os dados do telescópio Gemini, em particular aqueles do instrumento GMOS, disponíveis no pacote GEMINI.GMOS e GEMINI.GEMTOOLS. Os procedimentos para a redução dos dados estão listados nas rotinas GMOSINFOIFU e GMOSEXAMPLES, que seguem o padrão para o tratamento e redução dos dados de imagens astronômicas. A partir das informações e exemplos contidos nessas tarefas construímos uma *pipeline* que implementa passo a passo os processos básicos de redução, que a grosso modo podem ser resumidos como: seccionamento da imagem, que exclui as bordas dos CCDs; subtração da imagem de bias, que elimina a leitura de ponto zero do CCD; divisão por *flat-field*, para eliminar a diferença de resposta pixel-a-pixel; remoção de raios cósmicos (via rotinas genéricas do IRAF); subtração do campo de céu, para descontar a luz emitida pelo céu próximo ao objeto observado; calibração em fluxo e comprimento de onda;

correção por refração atmosférica, para corrigir o deslocamento espacial causado pela refração atmosférica diferencial ao longo do comprimento de onda; montagem dos cubos de dados, que contém informação espacial e espectral e por fim, a co-adição das exposições individuais. Os cubos de dados contém então um total de $50 \times 70 = 3500$ espectros unidimensionais para o modo fenda dupla (considerando extrações de $0''.1 \times 0''.1$) e $35 \times 50 = 1750$ para o modo fenda única (com extrações também de $0''.1 \times 0''.1$). Os raios cósmicos que eventualmente permaneceram após o processo padrão de redução dos dados foram retirados do cubo de dados utilizando o algoritmo de rejeição de raios cósmicos LACOSMIC de van Dokkum (2001).

Como uma estrela padrão não foi observada na mesma noite das galáxias, a calibração obtida no processo de redução é apenas relativa, com o intuito de corrigir o perfil do contínuo do espectro e aplicar unidades físicas ao mesmo. Assim, para calibrar em unidades de fluxo absoluto ($\text{erg cm}^{-2} \text{s}^{-1} \text{Å}^{-1}$) utilizamos um espectro da base de dados do *Data Release 7* do *Sloan Digital Sky Survey* (SDSS-DR7), resultante de uma fibra ótica com diâmetro de $3''$. Para aplicar a calibração absoluta obtivemos então um espectro integrado a partir do cubo de dados com diâmetro também de $3''$, de maneira que a razão entre ambos é assumida como um “espectro de correção” para todos os espectros do cubo de dados. A esse “espectro razão”, do qual desconsideramos as linhas de emissão e absorção, ajustamos uma função suave do tipo *spline* cúbica e aplicamos a correção a cada pixel espacial do cubo dados, de maneira que tenhamos uma calibração absoluta do fluxo. Esse procedimento foi aplicado para as duas galáxias estudadas (PSQ J0210–0903 e PSQ J0330–0532).

Capítulo 3

Metodologia

Neste capítulo, apresentamos os métodos utilizados para realizar as medidas e a análise dos dados espectroscópicos, a partir dos quais obtivemos os resultados apresentados nos capítulos 4 e 5.

3.1 Medidas das Linhas de Emissão

Usualmente deriva-se a cinemática e distribuição do fluxo de gás de regiões nebulares pelo ajuste de Gaussianas aos perfis das linhas de emissão. No entanto, uma inspeção rigorosa desses perfis na região de linhas estreitas de galáxias com núcleo ativo (e.g., Riffel et al., 2009a, 2010), mostra distorções em relação a um perfil puramente Gaussiano, apresentando asas “azuis” ou “vermelhas”, que geralmente são modeladas pelo ajuste de duas ou mais Gaussianas. Por outro lado, o ajuste de mais do que uma Gaussiana torna-se inconveniente quando as medidas são realizadas sobre um cubo de dados, uma vez que a inspeção visual é cansativa e demorada, além de introduzir uma subjetividade indesejada às medidas. Uma alternativa para levar em conta os desvios em relação a um perfil gaussiano, sejam eles simétricos ou assimétricos, é a utilização das séries de Gauss-Hermite, onde um parâmetro h_3 mede os desvios assimétricos e um parâmetro h_4 mede os desvios simétricos.

De acordo com van der Marel & Franx (1993) e Cappellari & Emsellem (2004), a série de Gauss-Hermite pode ser descrita pela seguinte equação:

$$GH(w) = \gamma \frac{\alpha(w)}{\sigma} \sum_{j=0}^N h_j H_j(w), \quad w \equiv \frac{\lambda - \lambda_0}{\sigma}, \quad (3.1)$$

onde γ é a amplitude da série de Gauss-Hermite, λ_0 é o comprimento de onda central da linha de emissão, σ é a dispersão da linha, h_j são os momentos de Gauss-Hermite, H_j são os polinômios de Hermite e $\alpha(w)$ é uma função Gaussiana padrão, dada por

$$\alpha(w) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{w^2}{2}}. \quad (3.2)$$

No entanto, para qualquer escolha dos parâmetros livres de uma Gaussiana (γ , λ_0 e σ) há uma série de Gauss-Hermite na forma da equação 3.1 que ajusta os dados. Assim uma série que converge mais rapidamente para a solução desejada e que se aproxima da solução de uma Gaussiana pura, mas levando em conta as assimetrias, é encontrada ao truncar a série em $N = 4$, assumindo $h_0 = H_0(w) = 1$ e $h_1 = h_2 = 0$ (van der Marel & Franx, 1993). Usando essa aproximação, a série dada pela equação 3.1 pode ser escrita como

$$GH(w) = \gamma \frac{\alpha(w)}{\sigma} [1 + h_3 H_3(w) + h_4 H_4(w)], \quad (3.3)$$

onde H_3 e H_4 são polinômios de Hermite de terceira e quarta ordem, respectivamente.

A partir do ajuste da função 3.3 obtemos então, além dos parâmetros de uma Gaussiana pura, os momentos da série de Gauss-Hermite. O momento h_3 mede os desvios assimétricos de um perfil Gaussiano, como asas “azuis” ($h_3 < 0$) ou asas “vermelhas” ($h_3 > 0$). O momento h_4 mede os desvios simétricos, como o de uma linha com perfil mais largo e mais achatada do que uma Gaussiana ($h_4 < 0$) ou uma linha com perfil mais estreito e pico mais alto do que de uma Gaussiana ($h_4 > 0$). Essas características são esquematizadas na Figura 3.1. Em geral o ajuste da série de Gauss-Hermite permite que as observações sejam melhor reproduzidas do que

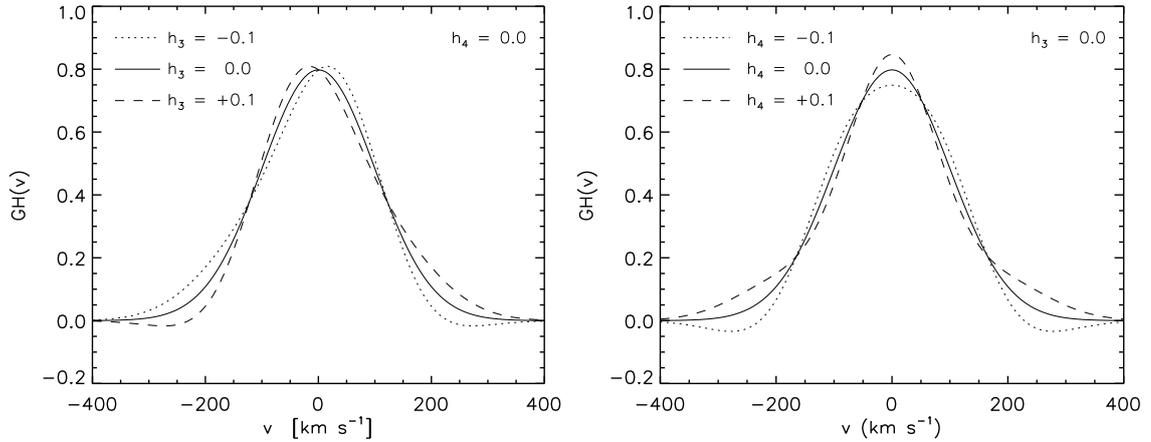


Figura 3.1: Função de Gauss-Hermite $GH(v) \equiv \gamma \frac{\alpha(v)}{\sigma} [1 + h_3 H_3(v) + h_4 H_4(v)]$ dada no espaço de velocidades. São mostradas diferentes configurações dos parâmetros h_3 e h_4 . À esquerda são mostrados perfis quando $h_4 = 0$ e os efeitos para h_3 diferente de zero, de modo que quando $h_3 < 0$ a função de GH ajusta asas “azuis” e quando $h_3 > 0$ ajusta asas “vermelhas”. À esquerda são mostrados os efeitos de h_4 diferente de zero, mantendo $h_3 = 0$. Quando $h_4 < 0$ o perfil de GH é mais achatado que um perfil gaussiano e mais agudo no caso em que $h_4 > 0$. Em ambos os casos, quando $h_3 = h_4 = 0$ a função de GH torna-se um perfil gaussiano.

pelo ajuste de uma ou mais Gaussianas, principalmente quando a região estudada apresenta um campo de velocidades que não pode ser bem descrito por uma rotação simples, como no caso em que o potencial central é perturbado por movimentos devido à turbulência no gás.

O ajuste da série de Gauss-Hermite foi realizado para as linhas de emissão $H\beta$ e $[O\text{ III}]\lambda 5007 \text{ \AA}$ do cubo de dados do PSQ J0210–0903 (Capítulo 4), usando uma rotina escrita em IDL, que encontra a melhor solução por meio do método de mínimos quadrados não-lineares de Levenberg-Marquardt. A rotina IDL utilizada é semelhante àquela detalhada em Riffel (2010). A rotina MPFIT¹ de Markwardt (2009) é usada para executar a minimização via método de Levenberg-Marquardt dada uma função a ser ajustada aos dados. Para o caso do PSQ J0330–0532 (Capítulo 5) a cinemática

¹MPFIT fornece uma robusta e relativamente rápida maneira de executar o ajuste de curvas via método dos mínimos quadrados e está disponível em <http://purl.com/net/mpfit>, como parte da *Markwardt IDL Library*.

do gás pôde ser bem descrita pela uso de uma função gaussiana simples. Nesse caso, utilizamos a mesma rotina, mas para ajustar gaussianas, desativando os parâmetros de Gauss-Hermite h_3 e h_4 .

A rotina escrita em IDL, além de fazer o ajuste das linhas de emissão, converte a função para o espaço de velocidades, de modo que quando aplicada para um cubo de dados, retorna como resultado a distribuição bidimensional do fluxo da linha ($F_{\text{H}\beta}$ e $F_{[\text{O III}]}$), a distribuição bidimensional da dispersão de velocidades do gás ($\sigma_{\text{H}\beta}$ e $\sigma_{[\text{O III}]}$), a distribuição bidimensional da velocidade ao longo da linha-de-visada ($v_{\text{H}\beta}$ e $v_{[\text{O III}]}$), bem como as respectivas distribuições espaciais dos parâmetros resultantes dos polinômios de GH (h_3 e h_4).

3.2 Channel Maps

Essa técnica consiste em mapear a distribuição do fluxo de determinada linha de emissão em intervalos pequenos de comprimento de onda, onde cada intervalo representa um canal de velocidade, medido em relação ao centro da linha. Para obter a tomografia, integra-se o fluxo da linha dentro do canal de velocidade desejado — até o limite da resolução espectral — descontando-se a contribuição do fluxo do contínuo, obtida a partir de intervalos espectrais adjacentes ao da linha de emissão. Com os mapas de fluxo para cada canal de velocidade podemos então analisar o campo de velocidades do gás ao longo de todo o perfil da linha e não apenas para o comprimento de onda central, como mostra esquematicamente a Figura 3.2. Para cada uma de nossas galáxias, escolhemos um incremento de velocidade diferente, de acordo com a resolução espectral dos dados. Com isso, obtemos um mapeamento do gás emissor de acordo com sua velocidade ao longo da linha-de-visada, o que pode ser considerado como uma tomografia das linhas de emissão, possibilitando uma investigação “tridimensional” do gás emissor.

Na Fig. 3.2 apresentamos uma representação esquemática dos canais de velocidade das linhas de emissão obtidas de uma espectroscopia IFU, onde os painéis

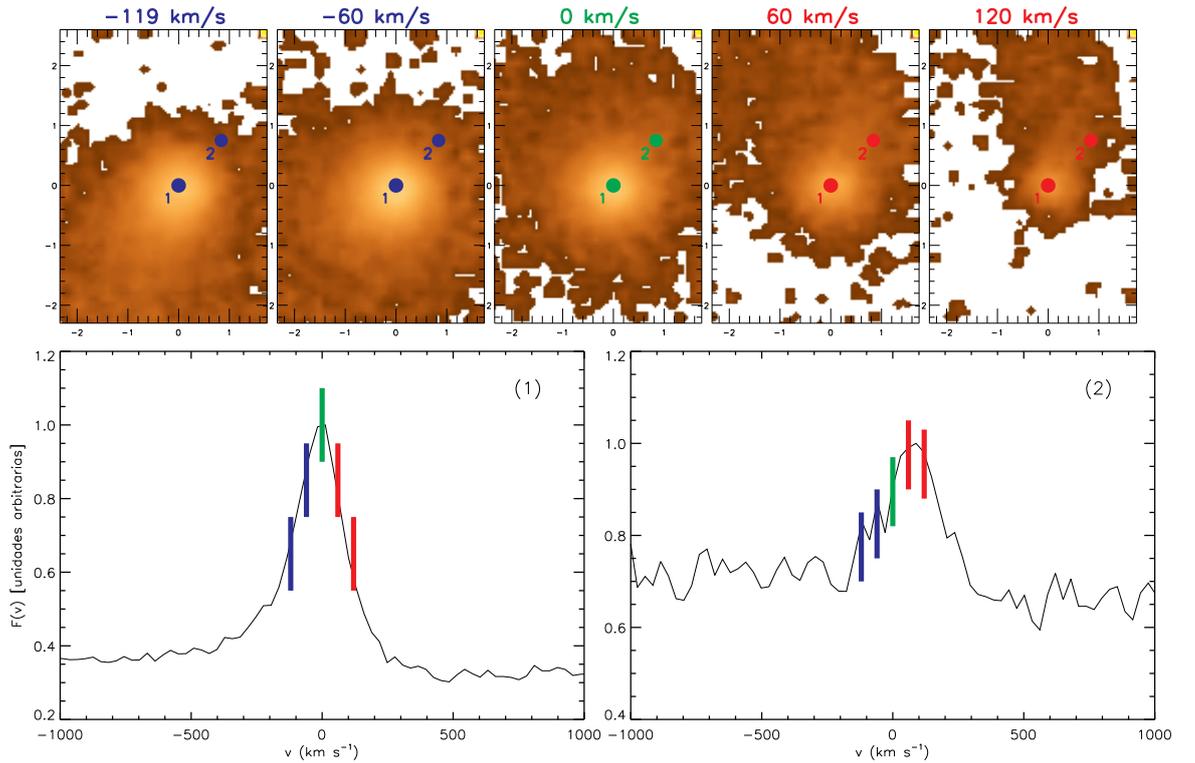


Figura 3.2: Representação esquemática dos canais de velocidade obtidos com a técnica de *channel maps*. São apresentados cinco canais de velocidade, onde cada mapa de fluxo advém de uma fatia diferente da linha de emissão. As fatias foram extraídas com incremento de $\approx 60 \text{ km s}^{-1}$ uma em relação a outra. Mais detalhes são apresentados na seção 3.2.

superiores mostram os mapas de fluxo integrado em cinco fatias de velocidade e os painéis inferiores mostram os perfis de uma linha de emissão em duas posições diferentes dos mapas de fluxo. Os fluxos foram obtidos para velocidades entre -120 km s^{-1} e $+120 \text{ km s}^{-1}$, com velocidade negativas (ou *blueshifts*) indicadas em azul e velocidades positivas (ou *redshifts*) em vermelho. A posição de velocidade zero, definida de acordo com a velocidade sistêmica da galáxia, é indicada pela cor verde. O fluxo médio do contínuo, obtido das regiões espectrais adjacentes à linha de emissão, é subtraído do fluxo de uma determinada fatia de cada pixel espacial da IFU. Cada pixel da IFU fornecerá um perfil de linha de emissão, do qual obtém-se o fluxo integrado. Os fluxos das posições 1 (núcleo) e 2 (extra nuclear), por exemplo, são obtidos para cinco *bins* de velocidade, integrados nas regiões das linhas identificadas pelas cores azul, verde

e vermelho. Assim, o fluxo de cada pixel dos mapas de fluxo será obtido para um determinado comprimento de onda, que corresponde a uma determinada velocidade com relação a velocidade sistêmica da galáxia. Essa técnica nos permite então mapear a posição do gás emissor e observar suas diferentes componentes de velocidade, uma vez que estamos observando o gás emissor em todas as suas velocidades e não apenas na velocidade do pico da emissão.

3.3 Método de Síntese de População Estelar

A fim de derivar as propriedades da população estelar usamos o código de síntese espectral STARLIGHT (Cid Fernandes et al., 2004, 2005b), o qual pesquisa por uma combinação linear de N_* estrelas de população simples (*Simple Stellar Population* — SSP), a partir de uma base definida pelo usuário, que seja capaz de ajustar o espectro observado de maneira ótima. Basicamente, o código ajusta um espectro observado O_λ com um espectro modelo M_λ , que pode ser escrito como (Cid Fernandes et al., 2004):

$$M_\lambda = M_{\lambda_0} \left(\sum_{j=1}^{N_*} x_j b_{j,\lambda} r_\lambda \right) \otimes G(v_*, \sigma_*), \quad (3.4)$$

onde M_{λ_0} é o fluxo sintético no comprimento de onda de normalização λ_0 , \mathbf{x} é o vetor população, cujas componentes representam a contribuição fracional de cada SSP para o fluxo sintético total em λ_0 , $b_{j,\lambda} \equiv L_{SSP}^\lambda(t_j, Z_j)/L_{SSP}^{\lambda_0}(t_j, Z_j)$ é o espectro da j -ésima SSP, com idade t_j e metalicidade Z_j , normalizado em λ_0 , $r_\lambda \equiv 10^{-0.4(A_\lambda - A_{\lambda_0})}$ é o termo de avermelhamento, e $G(v_*, \sigma_*)$ é uma distribuição gaussiana, centrada na velocidade estelar v_* com dispersão de velocidades σ_* , usada para modelar os movimentos estelares na linha-de-visada.

O ajuste do modelo M_λ ao espectro observado O_λ é realizado pela minimização da equação (Cid Fernandes et al., 2004):

$$\chi^2 = \sum_{\lambda} [(O_{\lambda} - M_{\lambda})w_{\lambda}]^2, \quad (3.5)$$

onde w_{λ} é o espectro de peso, definido como o inverso do ruído em O_{λ} , capaz de mascarar as linhas de emissão e/ou perfis espúrios ao fixá-lo como $w_{\lambda} = 0$ nos comprimentos de onda λ correspondentes. O mínimo da equação 3.5 corresponde ao melhor conjunto de parâmetros para o modelo, que são procurados através da técnica de otimização conhecida como *simulated annealing* em conjunto com o algoritmo de Metropolis e Cadeias de Markov. Uma discussão detalhada sobre a minimização da equação 3.5 pode ser encontrada em Cid Fernandes et al. (2001), bem como no manual do código STARLIGHT².

3.4 Cinemática Estelar

Se considerarmos uma galáxia como um sistema estelar puro, o espectro observado em determinada posição espacial será composto pela soma de espectros estelares individuais de acordo com a distribuição de velocidades ao longo da linha de visada (LOSVD - *Line-Of-Sight Velocity Distribution*). Encontrar a cinemática estelar implica então em recuperar os parâmetros da distribuição de velocidades do conjunto de estrelas dispostas ao longo da linha de visada em determinada posição espacial da galáxia.

O método utilizado para obter a LOSVD das estrelas no objeto PSQ J0330–0532 foi o pPXF (*penalized Pixel-Fitting*) de Cappellari & Emsellem (2004). Somente o cubo de dados do PSQ J0330–0532 apresentou uma relação S/N suficiente para que pudéssemos medir sua cinemática estelar. Para o objeto PSQ J0210–0903 não foi possível obter a cinemática estelar, mesmo integrando espacialmente.

O método pPXF recupera a LOSVD no espaço de pixels criando um modelo $G_{\text{mod}}(x)$ para o espectro da galáxia a partir da convolução de um template de espectro estelar $T(x)$ – ou um conjunto de templates – com uma função LOSVD

²disponível em <http://www.starlight.ufsc.br>

parametrizada. Nesse processo, tanto o espectro estelar quanto o observado são rebinados para uma mesma escala do tipo $x = \ln \lambda$, preservando o número de pixels espectrais. Os parâmetros que melhor ajustam a LOSVD são encontrados através da minimização do χ^2 , que por sua vez, mede a concordância entre o modelo e o espectro da galáxia $G(x)$ sobre um conjunto de N pixels, sendo dado por:

$$\chi^2 = \sum_{n=1}^N r_n^2, \quad (3.6)$$

onde os resíduos são definidos como

$$r_n^2 = \frac{G_{\text{mod}}(x_n) - G(x_n)}{\Delta G(x_n)}, \quad (3.7)$$

sendo $\Delta G(x_n)$ a medida de erro em $G(x_n)$.

O modelo adotado para o espectro da galáxia é escrito como

$$G_{\text{mod}}(x) = \sum_{k=1}^K \omega_k [B \otimes T_k](x) + \sum_l^L b_l P_l(x); \quad \omega_k \geq 0, \quad (3.8)$$

onde T_k é o espectro da biblioteca de templates estelares, $B(x) = \mathcal{L}(cx)$ é a função de alargamento, $\mathcal{L}(v)$ é a função de LOSVD, c é a velocidade da luz e \otimes denota a operação de convolução de B e T_k . $P_l(x)$ são os polinômios de Legendre de ordem l , que devem reproduzir diferenças de baixa frequência entre o espectro da galáxia e das templates estelares. Para uma determinada $\mathcal{L}(v)$, a otimização do χ^2 é obtida minimizando-se os resíduos entre o espectro observado e o modelo por meio de ajuste via mínimos quadrados não-lineares dos pesos $(\omega_1, \dots, \omega_k, b_0, \dots, b_L)$.

A função LOSVD padrão geralmente é expandida em termos de uma série de Gauss-Hermite

$$\mathcal{L}(v) = \frac{e^{-(1/2)y^2}}{\sigma\sqrt{2\pi}} \left[1 + \sum_{m=3}^M h_m H_m(y) \right] \quad (3.9)$$

onde $y = (v - V)/\sigma$, $v = cx$, V é a velocidade radial, σ é a dispersão de velocidades e h_3, \dots, h_M são os momentos de Gauss-Hermite. Enquanto os parâmetros

de Gauss-Hermite cujo índices são pares (h_{2n} , $n = 2, \dots, M$) medem os desvios simétricos da LOSVD com relação a um perfil gaussiano os parâmetros com índice ímpar (h_{2n+1} , $n = 1, \dots, M$) medem os desvios assimétricos (van der Marel & Franx, 1993). A minimização do χ^2 portanto por meio de ajustes obtidos via mínimos quadrados não lineares dos M parâmetros $V, \sigma, h_3, \dots, h_M$. O conjunto de templates estelares foi obtido da biblioteca de SSPs de Bruzual & Charlot (2003), de modo que pudesse representar satisfatória a população estelar da galáxia. Os parâmetros ω_k (da equação 3.8) darão o peso com que cada template T_k contribui para o ajuste do espectro da galáxia.

3.5 O Modelo de Rotação

Os mapas de velocidade radial tanto do gás quanto estelar apresentam claramente um padrão de rotação na região circumnuclear no caso do PSQ J0330–0532 (Cap. 5). Desse modo, com a finalidade tanto de parametrizar as propriedades físicas dessa rotação quanto de isolar possíveis componentes de velocidade que não sigam essa padrão, adotamos um modelo analítico simples para descrevê-lo. De acordo com Bertola et al. (1991) aproximamos a rotação do gás por um movimento circular kepleriano em um disco sujeito a um potencial central cuja curva de rotação é dada por

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

onde A , c_0 e p são os parâmetros e r é o raio no plano da galáxia. Como dado em Bertola et al. (1991), a velocidade radial observada na posição (R, Ψ) no plano do céu é:

$$v(R, \Psi) = v_{\text{sys}} + \frac{AR \cos(\Psi - \Psi_0) \sin \theta \cos^p \theta}{\{R^2 [\sin^2(\Psi - \Psi_0) + \cos^2 \theta \cos^2(\Psi - \Psi_0)] + C_0^2\}^{p/2}}, \quad (3.11)$$

onde R é a distância projetada no plano do céu com relação ao centro cinemático (X_0, Y_0) , Ψ é o ângulo de posição de R com relação ao ângulo de posição da linha

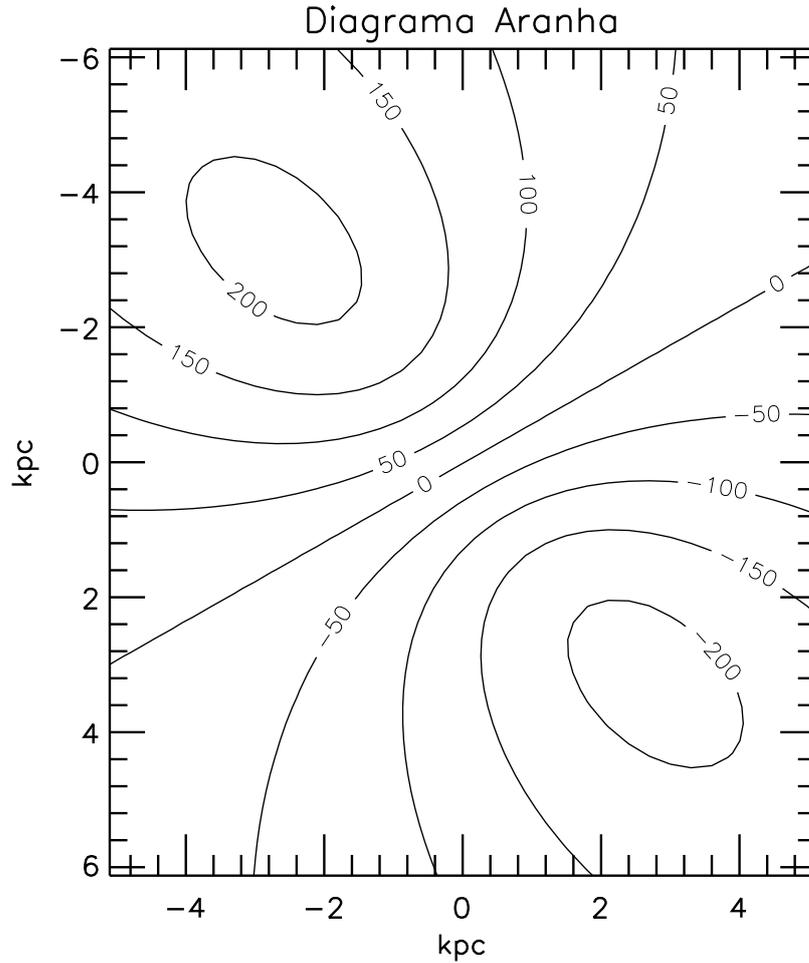


Figura 3.3: Representação esquemática das curvas de isovelocidade (em km s^{-1}) geradas pelo modelo de rotação da equação 3.11, conhecido como diagrama aranha.

dos nodos (Ψ_0), v_{sys} é a velocidade sistêmica, θ é a inclinação do disco em relação ao plano do céu ($\theta = 90^\circ$ para a galáxia vista de perfil e $\theta = 0$ para a galáxia vista de frente) e $C_0^2 = c_0^2 \cos^2 \theta$.

Na Fig. 3.3 mostramos uma representação esquemática das curvas de isovelocidade geradas a partir do modelo parametrizado pela equação 3.11 para o seguinte conjunto de parâmetros, para uma velocidade sistêmica arbitrária e que o centro cinemático no centro da figura: $A = 800$, $\psi_0 = 35^\circ$ (com relação ao Norte, em sentido anti-horário), $c_0 = 2.5$, $\theta = 55^\circ$ e $p = 2.0$ (para $v(R, \Psi)$ em km s^{-1} , R e c_0 em kpc).

3.6 Tomografia PCA

Observações astronômicas utilizando espectroscopia IFU fornecem grandes quantidades de informação, com duas dimensões espaciais e ainda uma dimensão espectral, totalizando uma quantidade de dezenas de milhões de pixels de informação. Assim, a análise desses dados é sempre complexa e bastante trabalhosa, tornando-se necessário empregar métodos alternativos para extrair o máximo de informação da maneira mais eficiente possível. Um método que possui essa característica, capaz de extrair informação do cubo de dados de maneira rápida e eficiente é a Análise de Componentes Principais desenvolvida por Steiner et al. (2009) especificamente para dados proveniente de unidades de campo integral. Essa técnica já foi empregada anteriormente na astronomia, por exemplo, por Lahav et al. (1996) para classificação morfológica de galáxias ou então por Boroson (2002) para distinguir quasares *radio-loud* de *radio-quiet*.

A fim de extrair informações adicionais do cubo de dados utilizamos então a técnica de tomografia PCA de Steiner et al. (2009), que deve ser aplicada no cubo de dados calibrado permitindo a transformação da informação contida em um sistema de coordenadas originalmente correlacionadas em um sistema de coordenadas não correlacionadas, organizadas em componentes principais de acordo com a ordem decrescente da variância. As novas coordenadas são chamadas de “autoespectros”, uma vez que são autovetores dados em função do comprimento de onda, que quando projetados sobre os dados produzem os chamados “tomogramas”. Enquanto os autoespectros mostram correlações e anti-correlações presentes nos dados, os tomogramas as mapeiam espacialmente. Os tomogramas são assim “fatias” dos dados no espaço de autovetores, cuja interpretação conjunta de “autoespectros” com as respectivas “fatias” podem revelar correlações ou anti-correlações entre características espectrais e espaciais contidas nos dados. A descrição detalhada de como a PCA pode ser aplicada a cubos de dados e exemplos da sua interpretação, que pode ser bastante

complexa ou ainda exigir um alto grau de conhecimento da técnica, é encontrada em Steiner et al. (2009).

Capítulo 4

Resultados: O objeto

PSQ J0210–0903

Os resultados para esse capítulo estão descritos no artigo científico *2D stellar population and gas kinematics of the inner 1.5 kpc of the post-starburst quasar SDSS J0210–0903* (Sanmartim et al. 2013a), que disponível está gratuitamente no site de *preprints arXiv* (<http://arxiv.org/archive/astro-ph>).

Capítulo 5

Resultados: O objeto

PSQ J0330–0532

Os resultados para esse capítulo estão descritos no artigo científico *2D stellar population and gas kinematics of the inner kiloparsec of the post-starburst quasar PSQ J0330–0532* (Sanmartim et al. 2013b), que está disponível gratuitamente no site de *preprints arXiv* (<http://arxiv.org/archive/astro-ph>).

Capítulo 6

Considerações Finais

Nos capítulos 4 e 5 apresentamos os resultados desse trabalho para dois quasares *post-starburst* (PSQs) bem como as discussões pertinentes. Neste capítulo apresentamos um sumário dos principais resultados obtidos para cada um dos PSQs estudados (Seções 6.1 e 6.2). Na Seção 6.3 apresentamos nossas conclusões e na Seção 6.4 as perspectivas futuras de prosseguimento do presente trabalho.

6.1 Sumário para o PSQ J0210–0903

No capítulo 4 apresentamos os resultados da síntese de população estelar para a região nuclear e para outras cinco posições distantes ~ 0.8 kpc do núcleo do PSQ J0210–0903. Apresentamos também mapas da emissão e excitação do gás usando as linhas $H\beta$ e $[OIII]\lambda 5007$, bem como uma estimativa da massa de gás. A cinemática do gás foi analisada a partir do ajuste de funções de Gauss-Hermite aos perfis das linhas de emissão, análise da distribuição de fluxo em canais de velocidade e da tomografia PCA.

Os principais resultados obtidos para o PSQ J0210–0903 podem ser resumidos nos seguintes itens:

- A população estelar é dominada por estrelas velhas dentro de um raio de 0.3 kpc em torno do núcleo, enquanto que na região circumnuclear, tanto a população de

idade intermediária ($100 \text{ Myrs} \leq t \leq 2.5 \text{ G Gyrs}$) quanto a jovem ($t < 100 \text{ Myrs}$) dominam o fluxo na região ótica do espectro. Nossos resultados revelam que tanto a população *post-starburst* como a jovem estão distribuídas em um anel com raio médio de $\approx 0.8 \text{ kpc}$;

- Observamos emissão estendendo-se a até 1.5 kpc do núcleo tanto em $\text{H}\beta$ quanto em $[\text{O III}]$. A distribuição de fluxo em $[\text{O III}]$ está mais concentrada próxima ao núcleo, enquanto a distribuição de fluxo em $\text{H}\beta$ é mais estendida, principalmente ao longo da linha dos nodos, apresentando também emissão numa região separada que parece pertencer a um braço espiral, onde há formação estelar ativa;
- As razões entre as linhas de emissão são típicas de núcleos Seyfert nos 0.3 kpc internos, onde um *outflow* é observado. Além dessa região, as razões de linha são típicas de LINERs, o que pode ser atribuído a uma combinação de radiação nuclear diluída e ionização por estrelas jovens. A Análise de Componentes Principais (PCA) confirma nossa conclusão de que formação estelar recente domina o espectro da região circumnuclear;
- A massa de gás ionizado dentro de um raio de 1.25 kpc é de $8.34 \pm 0.92 \times 10^6 M_{\odot}$;
- A cinemática do gás pode ser reproduzida por uma combinação de: (1) rotação no plano da galáxia – cuja linha dos nodos está aproximadamente ao longo da direção Norte-Sul – com uma amplitude $\leq 200 \text{ km s}^{-1}$ (o que é confirmado pela análise PCA); e (2) um *outflow* observado dentro de um raio de 0.3 kpc , com velocidades negativas (*blueshifts*) de até -670 km s^{-1} ;
- A taxa de ejeção de matéria foi calculada e apresenta valor no intervalo $0.3 - 1.1 M_{\odot} \text{ yr}^{-1}$, o que é ≈ 100 vezes a taxa de acreção ao núcleo ativo, de $\approx 8.7 \times 10^{-3} M_{\odot} \text{ yr}^{-1}$. Este resultado significa que a maior parte da matéria ejetada observada tem origem no meio interestelar da galáxia hospedeira, que é “arrastado” pelo *outflow* que emana do AGN.

6.2 Sumário para o PSQ J0330–0532

No capítulo 5 apresentamos nossos resultados sobre a distribuição espacial da população estelar e da cinemática no kiloparsec central do PSQ J0330–0532, com uma resolução espacial de ≈ 130 pc ($0''.5$). Apresentamos também mapas da emissão e excitação do gás, assim como uma estimativa da massa de gás e da taxa de ejeção do gás na região central.

Este é o primeiro estudo espacialmente resolvido da população estelar combinado com o estudo da cinemática do gás e estelar de um *Post-Starburst Quasar* (PSQ). Os principais resultados obtidos para o PSQ J0330–0532 podem ser resumidos nos seguintes itens:

- A população estelar é dominada por estrelas velhas nos 260 pc internos, enquanto na região circumnuclear (em um anel a ≈ 500 pc) a população jovem domina o fluxo na região ótica do espectro. A componente *post-starburst* ($100 \text{ Myrs} < t \leq 2.5 \text{ G Gyrs}$) está distribuída exclusivamente ao longo do lado interno Norte do anel;
- Tanto a emissão em [O III] quanto em $H\beta$ estende-se por todo o campo mapeado (~ 1 kpc). A distribuição de fluxo em [O III] é mais brilhante no centro, enquanto que o fluxo em $H\beta$ é mais intenso ao longo do anel;
- As razões de linhas do [O III]/ $H\beta$ no anel da região circumnuclear são típicas de regiões HII, implicando que o gás nessa região é ionizado por estrelas. Essa conclusão é confirmada pela predominância de estrelas jovens (≤ 25 Myrs) nessa região. Nos 260 pc internos as razões de linha são típicas de excitação Seyfert;
- A massa de gás ionizado nos 400 pc internos é de $6.2 \pm 1.4 \times 10^5 M_{\odot}$;
- A cinemática do gás emissor de $H\beta$ pode ser reproduzida por um modelo de rotação no plano da galáxia, sendo que a linha dos nodos está aproximadamente ao longo da direção Leste-Oeste e cuja amplitude de rotação é de $\approx 130 \text{ km s}^{-1}$; no caso do [O III] observamos também um *outflow* dentro dos 260 pc centrais;

- Estimamos uma taxa de outflow de gás ionizado de $\approx 0.03 \text{ M}_{\odot} \text{ yr}^{-1}$, que é cerca de 30 vezes maior do que a taxa de acreção de matéria ao SMBH ($\approx 9.3 \times 10^{-4} \text{ M}_{\odot} \text{ yr}^{-1}$), implicando que a maior parte do gás em observado em *outflow* é proveniente do meio interestelar e está sendo “empurrada” para fora do núcleo pelo *feedback* do AGN;
- Por meio dispersão de velocidades das estrelas estimamos uma massa para o SMBH de $\log(M_{\text{BH}}) = 6.84 \pm 0.21$.

6.3 Conclusões

Neste trabalho apresentamos o primeiro estudo espacialmente resolvido da população estelar e da cinemática em Quasares *Post-Starburst*. Para tal utilizamos as unidades de campo integral GMOS-IFU dos telescópios Gemini Norte e Sul. Nossa principal contribuição para a comunidade científica se dá justamente pela riqueza de detalhes com que observamos essa classe de objetos, tendo mapeado de fato onde estão localizadas as populações *starburst* e *post-starburst*, uma vez que até então observava-se a presença dessas populações estelares apenas em espectros integrados da região nuclear de PSQs.

Concluimos que nossas observações do PSQ J0210–0903 sugerem que tanto o cenário evolutivo como o cenário de interrupção da formação estelar são válidos para esta galáxia, o que pode ser entendido como segue. Migração do gás para o centro da galáxia deu origem a um episódio de formação estelar dentro do kiloparsec central da galáxia há centenas de Mega-anos atrás. O gás residual que “sobrou” da formação estelar, combinado com o gás resultante da perda de massa das estrelas recém formadas, deve ter migrado até o centro para alimentar o SMBH, o que deu então origem à ejeção de gás observada. Esta ejeção de gás, observada dentro do 0.3 kpc central foi então responsável por cessar a formação estelar dentro desta região. Esta interpretação é consistente com a presença de estrelas de idade intermediária e ausência de estrelas jovens nesta região mais interna. Mais para fora, a formação

estelar continuou no anel a 0.8 kpc. A presença de estrelas de idade intermediária dentro do 0.3 kpc central é uma forte evidência de que há mesmo um atraso entre o episódio de formação estelar e a ignição da atividade nuclear.

Para o PSQ J0330–0532 a síntese de população estelar mostrou que a população *post-starburst* do PSQ J0330–0532 não se faz presente na região nuclear, mas sim em um anel que está a cerca de 500 pc do núcleo. Esses resultados, combinados com as assinaturas de *feedback* do AGN, que está restrito aos 260 pc internos, sem alcançar portanto a região circumnuclear, onde está localizada a população *post-starburst*, desfavorecem o cenário de cessão repentina da formação estelar para o PSQ J0330–0532. De fato observamos atividade de formação estelar nessa galáxia também no núcleo, assim como na região circumnuclear. Assim, nossas observações do PSQ J0330–0532 sugerem que houve um surto de formação estelar na região circumnuclear há centenas de Mega-anos atrás, tendo posteriormente fornecido combustível para alimentar o SMBH, que deu origem a atividade nuclear. O efeito de *feedback* do AGN não foi capaz de cessar a formação estelar, que continuou ocorrendo tanto no núcleo, quanto no anel circumnuclear.

6.4 Perspectivas Futuras

Ao longo desse trabalho desenvolvemos uma série de rotinas para realizar a síntese de população estelar em cubos de dados de maneira semi-automatizada, tendo acumulado experiência suficiente para aplicarmos a síntese de população estelar e demais métodos para um número maior de objetos e com mais eficiência. Assim, pretendemos dar continuidade a esse trabalho aplicando esses métodos a uma amostra mais extensa de objetos, obtendo um cenário físico mais completo estatisticamente, que nos possibilite distinguir com mais clareza entre os cenários propostos. Nossas rotinas de aplicação de síntese de população estelar para cubos de dados não estão padronizadas para uma utilização amigável de outros usuários. Assim, como subproduto resultante dessa tese, pretendemos padronizar essas rotinas em linguagem

python, tornando-as mais úteis para a utilização do grupo estudo de AGNs coordenado pela minha orientadora (AGNIFS), bem como para outros potenciais usuários externos ao grupo. Pretendemos também concluir o trabalho iniciado para os outros PSQs já observados, bem como continuar observando mais alvos, para completar uma amostra mais significativa (~ 10 objetos).

Referências

- [1] 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, Aug. 2002.
- [2] ANTONUCCI, R. Unified models for active galactic nuclei and quasars. **Annual Review of Astronomy and Astrophysics**, v. 31, p. 473–521, 1993.
- [3] 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, Jun. 1991.
- [4] BOROSON, T. A. Black Hole Mass and Eddington Ratio as Drivers for the Observable Properties of Radio-loud and Radio-quiet QSOs. **Astrophysical Journal**, v. 565, p. 78–85, Jan. 2002.
- [5] BRADLEY, L. D.; BOUWENS, R. J.; FORD, H. C.; ILLINGWORTH, G. D.; JEE, M. J.; BENÍTEZ, N.; BROADHURST, T. J.; FRANX, M.; FRYE, B. L.; INFANTE, L.; MOTTA, V.; ROSATI, P.; WHITE, R. L.; ZHENG, W. Discovery of a Very Bright Strongly Lensed Galaxy Candidate at $z \sim 7.6$. **Astrophysical Journal**, v. 678, p. 647–654, May 2008.
- [6] BROTHERTON, M.; DIAMOND-STANIC, A.; VANDEN BERK, D.; BURTON, R.; CROOM, S. Post-starburst Quasars in the 2dF and SDSS. In: AGN PHYSICS WITH THE SLOAN DIGITAL SKY SURVEY, G. T. Richards & P. B. Hall, , editor, v. 311 of **Astronomical Society of the Pacific Conference Series**, p. 285–+, Jun. 2004.

- [7] BROTHERTON, M. S.; STOLL, R.; PAUL, C.; DIAMOND-STANIC, A.; SHANG, Z.; CALES, S.; GANGULY, R.; CANALIZO, G.; VADEN BERK, D. A Catalog of Post-Starburst Quasars. In: AMERICAN ASTRONOMICAL SOCIETY MEETING ABSTRACTS #210, v. 38 of **Bulletin of the American Astronomical Society**, p. 95–+, May 2007.
- [8] BROTHERTON, M. S.; VAN BREUGEL, W.; STANFORD, S. A.; SMITH, R. J.; BOYLE, B. J.; MILLER, L.; SHANKS, T.; CROOM, S. M.; FILIPPENKO, A. V. A Spectacular Poststarburst Quasar. **Astrophysical Journal Letters**, v. 520, p. L87–L90, Aug. 1999.
- [9] BRUZUAL, G.; CHARLOT, S. Stellar population synthesis at the resolution of 2003. **Monthly Notices of the Royal Astronomical Society**, v. 344, p. 1000–1028, Oct. 2003.
- [10] CALES, S. L.; BROTHERTON, M. S.; SHANG, Z.; BENNERT, V. N.; CANALIZO, G.; STOLL, R.; GANGULY, R.; VANDEN BERK, D.; PAUL, C.; DIAMOND-STANIC, A. Hubble Space Telescope Imaging of Post-starburst Quasars. **Astrophysical Journal**, v. 741, p. 106, Nov. 2011.
- [11] CALES, S. L.; BROTHERTON, M. S.; SHANG, Z.; RUNNOE, J. C.; DIPOMPEO, M. A.; BENNERT, V. N.; CANALIZO, G.; HINER, K. D.; STOLL, R.; GANGULY, R.; DIAMOND-STANIC, A. The Properties of Post-starburst Quasars Based on Optical Spectroscopy. **Astrophysical Journal**, v. 762, p. 90, Jan. 2013.
- [12] CANALIZO, G.; STOCKTON, A.; BROTHERTON, M. S.; LACY, M. Star formation in QSO host galaxies. **New Astronomy Reviews**, v. 50, p. 650–656, Nov. 2006.
- [13] CANALIZO, G.; STOCKTON, A.; BROTHERTON, M. S.; VAN BREUGEL, W. A Companion Galaxy to the Poststarburst Quasar UN J1025-0040. **Astronomical Journal**, v. 119, p. 59–62, Jan. 2000.
- [14] CANO-DÍAZ, M.; MAIOLINO, R.; MARCONI, A.; NETZER, H.; SHEMMER, O.; CRESCI, G. Observational evidence of quasar feedback quenching star formation at high redshift. **Astronomy and Astrophysics**, v. 537, p. L8, Jan. 2012.

- [15] CAPPELLARI, M.; EMSELLEM, E. Parametric Recovery of Line-of-Sight Velocity Distributions from Absorption-Line Spectra of Galaxies via Penalized Likelihood. **Publications of the Astronomical Society of the Pacific**, v. 116, p. 138–147, Feb. 2004.
- [16] CID FERNANDES, R. The Starburst Model for Agn: Past, Present, and Future. In: REVISTA MEXICANA DE ASTRONOMIA Y ASTROFISICA CONFERENCE SERIES, J. Franco, R. Terlevich, & A. Serrano, , editor, v. 6 of **Revista Mexicana de Astronomia y Astrofisica**, vol. 27, p. 201–+, May 1997.
- [17] 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, Jan. 2005a.
- [18] 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, Nov. 2004.
- [19] 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, Apr. 2005b.
- [20] CID FERNANDES, R.; SODRÉ, L.; SCHMITT, H. R.; LEÃO, J. R. S. A probabilistic formulation for empirical population synthesis: sampling methods and tests. **Monthly Notices of the Royal Astronomical Society**, v. 325, p. 60–76, Jul. 2001.
- [21] DAVIES, R. I.; MÜLLER SÁNCHEZ, F.; GENZEL, R.; TACCONI, L. J.; HICKS, E. K. S.; FRIEDRICH, S.; STERNBERG, A. A Close Look at Star Formation around Active Galactic Nuclei. **Astrophysical Journal**, v. 671, p. 1388–1412, Dec. 2007.
- [22] DI MATTEO, T.; COLBERG, J.; SPRINGEL, V.; HERNQUIST, L.; SIJACKI, D. Direct Cosmological Simulations of the Growth of Black Holes and Galaxies. **Astrophysical Journal**, v. 676, p. 33–53, Mar. 2008.

- [23] DI MATTEO, T.; SPRINGEL, V.; HERNQUIST, L. Energy input from quasars regulates the growth and activity of black holes and their host galaxies. **Nature**, v. 433, p. 604–607, Feb. 2005.
- [24] FAN, X.; STRAUSS, M. A.; BECKER, R. H.; WHITE, R. L.; GUNN, J. E.; KNAPP, G. R.; RICHARDS, G. T.; SCHNEIDER, D. P.; BRINKMANN, J.; FUKUGITA, M. Constraining the Evolution of the Ionizing Background and the Epoch of Reionization with $z \sim 6$ Quasars. II. A Sample of 19 Quasars. **Astronomical Journal**, v. 132, p. 117–136, Jul. 2006.
- [25] FAN, X. ET AL. A Survey of $z \lesssim 5.7$ Quasars in the Sloan Digital Sky Survey. II. Discovery of Three Additional Quasars at $z \lesssim 6$. **Astronomical Journal**, v. 125, p. 1649–1659, Apr. 2003.
- [26] FAN, X. P. ET AL. High-Redshift Quasars Found in Sloan Digital Sky Survey Commissioning Data. IV. Luminosity Function from the Fall Equatorial Stripe Sample. **Astronomical Journal**, v. 121, p. 54–65, Jan. 2001.
- [27] FERRARESE, L.; FORD, H. Supermassive Black Holes in Galactic Nuclei: Past, Present and Future Research. **Space Science Reviews**, v. 116, p. 523–624, Feb. 2005.
- [28] FERRARESE, L.; MERRITT, D. A Fundamental Relation between Supermassive Black Holes and Their Host Galaxies. **Astrophysical Journal Letters**, v. 539, p. L9–L12, Aug. 2000.
- [29] FRANK, J.; KING, A.; RAINE, D. J. **Accretion Power in Astrophysics**. 3.ed. Cambridge: Cambridge University Press, 2002.
- [30] GEBHARDT, K.; BENDER, R.; BOWER, G.; DRESSLER, A.; FABER, S. M.; FILIPPENKO, A. V.; GREEN, R.; GRILLMAIR, C.; HO, L. C.; KORMENDY, J.; LAUER, T. R.; MAGORRIAN, J.; PINKNEY, J.; RICHSTONE, D.; TREMAINE, S. A Relationship between Nuclear Black Hole Mass and Galaxy Velocity Dispersion. **Astrophysical Journal Letters**, v. 539, p. L13–L16, Aug. 2000.
- [31] GONZÁLEZ DELGADO, R. M.; HECKMAN, T.; LEITHERER, C.; MEURER, G.; KROLIK, J.; WILSON, A. S.; KINNEY, A.; KORATKAR, A. Ultraviolet-Optical Observations of the Seyfert 2 Galaxies NGC 7130, NGC 5135, and IC

- 3639: Implications for the Starburst-Active Galactic Nucleus Connection. **Astrophysical Journal**, v. 505, p. 174–198, Sep. 1998.
- [32] GRAHAM, A. W.; LI, I.-H. The $M_{\text{bh}}-\sigma$ Diagram and the Offset Nature of Barred Active Galaxies. **Astrophysical Journal**, v. 698, p. 812–818, Jun. 2009.
- [33] GRAHAM, A. W.; ONKEN, C. A.; ATHANASSOULA, E.; COMBES, F. An expanded $M_{\text{bh}}-\sigma$ diagram, and a new calibration of active galactic nuclei masses. **mnras**, v. 412, p. 2211–2228, Apr. 2011.
- [34] GRANATO, G. L.; DE ZOTTI, G.; SILVA, L.; BRESSAN, A.; DANESE, L. A Physical Model for the Coevolution of QSOs and Their Spheroidal Hosts. **Astrophysical Journal**, v. 600, p. 580–594, Jan. 2004.
- [35] GREENE, J. E.; HO, L. C.; ULVESTAD, J. S. The Radio Quiescence of Active Galaxies with High Accretion Rates. **Astrophysical Journal**, v. 636, p. 56–62, Jan. 2006.
- [36] HECKMAN, T. M. An optical and radio survey of the nuclei of bright galaxies - Activity in normal galactic nuclei. **Astronomy and Astrophysics**, Heidelberg, v. 87, p. 152–164, Jul. 1980.
- [37] HECKMAN, T. M.; GONZALEZ-DELGADO, R.; LEITHERER, C.; MEURER, G. R.; KROLIK, J.; WILSON, A. S.; KORATKAR, A.; KINNEY, A. A Powerful Nuclear Starburst in the Seyfert Galaxy Markarian 477: Implications for the Starburst–Active Galactic Nucleus Connection. **Astrophysical Journal**, v. 482, p. 114–+, Jun. 1997.
- [38] HOPKINS, P. F.; HERNQUIST, L.; COX, T. J.; DI MATTEO, T.; ROBERTSON, B.; SPRINGEL, V. A Unified, Merger-driven Model of the Origin of Starbursts, Quasars, the Cosmic X-Ray Background, Supermassive Black Holes, and Galaxy Spheroids. **Astrophysical Journal Supplement Series**, v. 163, p. 1–49, Mar. 2006.
- [39] HOPKINS, P. F.; HERNQUIST, L.; COX, T. J.; KEREŠ, D. A Cosmological Framework for the Co-Evolution of Quasars, Supermassive Black Holes, and Elliptical Galaxies. I. Galaxy Mergers and Quasar Activity. **Astrophysical Journal Supplement Series**, v. 175, p. 356–389, Apr. 2008.

- [40] IYE, M.; OTA, K.; KASHIKAWA, N.; FURUSAWA, H.; HASHIMOTO, T.; HATTORI, T.; MATSUDA, Y.; MOROKUMA, T.; OUCHI, M.; SHIMASAKU, K. A galaxy at a redshift $z = 6.96$. **nat**, v. 443, p. 186–188, Sep. 2006.
- [41] 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, Dec. 2003.
- [42] KROLIK, J. H. **Active galactic nuclei : from the central black hole to the galactic environment**: Princeton, N. J. : Princeton University Press, 1999.
- [43] LAHAV, O.; NAIM, A.; SODRÉ, L., JR.; STORRIE-LOMBARDI, M. C. Neural computation as a tool for galaxy classification: methods and examples. **Monthly Notices of the Royal Astronomical Society**, v. 283, p. 207–+, Nov. 1996.
- [44] LEHNERT, M. D.; NESVADBA, N. P. H.; CUBY, J.-G.; SWINBANK, A. M.; MORRIS, S.; CLÉMENT, B.; EVANS, C. J.; BREMER, M. N.; BASA, S. Spectroscopic confirmation of a galaxy at redshift $z = 8.6$. **nat**, v. 467, p. 940–942, Oct. 2010.
- [45] MARKWARDT, C. B. Non-linear Least-squares Fitting in IDL with MPFIT. In: ASTRONOMICAL DATA ANALYSIS SOFTWARE AND SYSTEMS XVIII, D. A. Bohlender, D. Durand, & P. Dowler, , editor, v. 411 of **Astronomical Society of the Pacific Conference Series**, p. 251–+, Sep. 2009.
- [46] ONKEN, C. A.; FERRARESE, L.; MERRITT, D.; PETERSON, B. M.; POGGE, R. W.; VESTERGAARD, M.; WANDEL, A. Supermassive Black Holes in Active Galactic Nuclei. II. Calibration of the Black Hole Mass-Velocity Dispersion Relationship for Active Galactic Nuclei. **Astrophysical Journal**, v. 615, p. 645–651, Nov. 2004.
- [47] 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, Feb. 1978.
- [48] PETERSON, B. M. **An Introduction to Active Galactic Nuclei**: Feb. 1997.

- [49] RIFFEL, R. A. profit: a new alternative for emission-line profile fitting. **Astrophysics and Space Science**, v. 327, p. 239–244, Jun. 2010.
- [50] RIFFEL, R. A.; STORCHI-BERGMANN, T.; DORS, O. L.; WINGE, C. AGN-starburst connection in NGC7582: Gemini near-infrared spectrograph integral field unit observations. **Monthly Notices of the Royal Astronomical Society**, v. 393, p. 783–797, Mar. 2009a.
- [51] RIFFEL, R. A.; STORCHI-BERGMANN, T.; MCGREGOR, P. J. The Dusty Nuclear Torus in NGC 4151: Constraints from Gemini Near-Infrared Integral Field Spectrograph Observations. **Astrophysical Journal**, v. 698, p. 1767–1770, Jun. 2009b.
- [52] RIFFEL, R. A.; STORCHI-BERGMANN, T.; NAGAR, N. M. Near-infrared dust and line emission from the central region of Mrk1066: constraints from Gemini NIFS. **Monthly Notices of the Royal Astronomical Society**, v. 404, p. 166–179, May 2010.
- [53] SANDERS, D. B.; SOIFER, B. T.; ELIAS, J. H.; MADORE, B. F.; MATTHEWS, K.; NEUGEBAUER, G.; SCOVILLE, N. Z. Ultraluminous infrared galaxies and the origin of quasars. **Astrophysical Journal**, v. 325, p. 74–91, Feb. 1988.
- [54] SEYFERT, C. K. Nuclear Emission in Spiral Nebulae. **Astrophysical Journal**, v. 97, p. 28–+, Jan. 1943.
- [55] SHEN, J.; VANDEN BERK, D. E.; SCHNEIDER, D. P.; HALL, P. B. The Black Hole-Bulge Relationship in Luminous Broad-Line Active Galactic Nuclei and Host Galaxies. **Astronomical Journal**, v. 135, p. 928–946, Mar. 2008.
- [56] 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.
- [57] STORCHI-BERGMANN, T.; GONZÁLEZ DELGADO, R. M.; SCHMITT, H. R.; CID FERNANDES, R.; HECKMAN, T. Circumnuclear Stellar Population, Morphology, and Environment of Seyfert 2 Galaxies: An Evolutionary Scenario. **Astrophysical Journal**, v. 559, p. 147–156, Sep. 2001.

- [58] STORCHI-BERGMANN, T.; LOPES, R. D. S.; MCGREGOR, P. J.; RIFFEL, R. A.; BECK, T.; MARTINI, P. Feeding versus feedback in NGC4151 probed with Gemini NIFS - II. Kinematics. **Monthly Notices of the Royal Astronomical Society**, v. 402, p. 819–835, Feb. 2010.
- [59] STORCHI-BERGMANN, T.; MCGREGOR, P. J.; RIFFEL, R. A.; SIMÕES LOPES, R.; BECK, T.; DOPITA, M. Feeding versus feedback in NGC4151 probed with Gemini NIFS - I. Excitation. **Monthly Notices of the Royal Astronomical Society**, v. 394, p. 1148–1166, Apr. 2009.
- [60] STORCHI-BERGMANN, T.; NEMMEN, R. S.; SPINELLI, P. F.; ERACLEOUS, M.; WILSON, A. S.; FILIPPENKO, A. V.; LIVIO, M. Evidence of a Starburst within 9 Parsecs of the Active Nucleus of NGC 1097. **Astrophysical Journal Letters**, v. 624, p. L13–L16, May 2005.
- [61] STORCHI-BERGMANN, T.; RAIMANN, D.; BICA, E. L. D.; FRAQUELLI, H. A. The Frequency of Nuclear Star Formation in Seyfert 2 Galaxies. **Astrophysical Journal**, v. 544, p. 747–762, Dec. 2000.
- [62] TERLEVICH, R.; MELNICK, J. Warmers - The missing link between Starburst and Seyfert galaxies. **Monthly Notices of the Royal Astronomical Society**, v. 213, p. 841–856, Apr. 1985.
- [63] TERLEVICH, R.; TENORIO-TAGLE, G.; FRANCO, J.; MELNICK, J. The starburst model for active galactic nuclei - The broad-line region as supernova remnants evolving in a high-density medium. **Monthly Notices of the Royal Astronomical Society**, v. 255, p. 713–728, Apr. 1992.
- [64] TREMAINE, S.; GEBHARDT, K.; BENDER, R.; BOWER, G.; DRESSLER, A.; FABER, S. M.; FILIPPENKO, A. V.; GREEN, R.; GRILLMAIR, C.; HO, L. C.; KORMENDY, J.; LAUER, T. R.; MAGORRIAN, J.; PINKNEY, J.; RICHSTONE, D. The Slope of the Black Hole Mass versus Velocity Dispersion Correlation. **Astrophysical Journal**, v. 574, p. 740–753, Aug. 2002.
- [65] VAN DER MAREL, R. P.; FRANX, M. A new method for the identification of non-Gaussian line profiles in elliptical galaxies. **Astrophysical Journal**, v. 407, p. 525–539, Apr. 1993.

- [66] VAN DOKKUM, P. G. Cosmic-Ray Rejection by Laplacian Edge Detection. **Publications of the Astronomical Society of the Pacific**, v. 113, p. 1420–1427, Nov. 2001.
- [67] WEI, P.; SHANG, Z.; BROTHERTON, M. S.; CALES, S. L.; HINES, D. C.; DALE, D. A.; GANGULY, R.; CANALIZO, G. Mid-infrared Spectral Properties of Post-Starburst Quasars. **ArXiv e-prints**, May 2013.
- [68] WOO, J.-H.; TREU, T.; BARTH, A. J.; WRIGHT, S. A.; WALSH, J. L.; BENTZ, M. C.; MARTINI, P.; BENNERT, V. N.; CANALIZO, G.; FILIPPENKO, A. V.; GATES, E.; GREENE, J.; LI, W.; MALKAN, M. A.; STERN, D.; MINEZAKI, T. The Lick AGN Monitoring Project: The $M_{BH}-\sigma_*$ Relation for Reverberation-mapped Active Galaxies. **Astrophysical Journal**, v. 716, p. 269–280, Jun. 2010.
- [69] ZABLUDOFF, A. I.; ZARITSKY, D.; LIN, H.; TUCKER, D.; HASHIMOTO, Y.; SHECTMAN, S. A.; OEMLER, A.; KIRSHNER, R. P. The Environment of “E+A” Galaxies. **Astrophysical Journal**, v. 466, p. 104–+, Jul. 1996.
- [70] ZIER, C.; BIERMANN, P. L. Binary black holes and tori in AGN. II. Can stellar winds constitute a dusty torus? **Astronomy and Astrophysics**, v. 396, p. 91–108, Dec. 2002.