



Faculté des Sciences
Département d'Astrophysique, Géophysique et Océanographie

**Contribution à l'Etude du
Modèle d'Unification des Quasars
à l'Aide de la Polarimétrie et de
l'Effet de Microlentille Gravitationnelle**

Dissertation présentée en vue de l'obtention
du grade de Docteur en Sciences par
Benoit Borguet
Licencié en Sciences Physiques

Liège 2009

Remerciements

Une thèse de doctorat représente bien plus que quelques années d'études suivies par encore d'autres années d'études, mais constitue l'aboutissement d'un parcours, et le commencement d'un autre. Qu'il me soit ici donné la possibilité d'exprimer ma reconnaissance envers ceux sans qui ce parcours n'aurait pas pu être réalisé dans les meilleures conditions.



C'est avec un plaisir non dissimulé que je remercie chaleureusement Damien Hutsemékers, le promoteur de cette thèse. Son soutien et sa bonne humeur auront été au rendez-vous durant ces quatre années passées à l'institut, même lors des phases les plus délicates (aah ... ces referees). Si j'ai pu acquiescer ne serait-ce qu'une infime partie de sa rigueur scientifique et de son enthousiasme pour la recherche, je pense alors qu'une bonne partie de mes objectifs durant ces quatre années ont été remplis.

Je remercie bien sûr les Drs. R. Cabanac, F. Courbin, P. Magain, D. Sluse et J. Surdej de s'intéresser à mes travaux en étant membres de mon jury de thèse. Je tiens à remercier encore plus particulièrement Dominique Sluse pour m'avoir initié aux méthodes d'observations et de réduction des données lors d'une mission d'observation au Very Large Telescope ... et passé de bons moments au bar avec d'autres collègues astrophysiciens lors de la

soirée de clotûre de la conférence de Huatulco à laquelle j'ai eu la chance de participer.

Un grand merci à mes parents Lucie et Jean-Luc pour leur soutien constant durant ces années d'études et également à mes frères Sébastien et Yannick avec qui je partagerai avec joie mon titre de Docteur dans un avenir proche. Merci également à mes amis, qu'ils soient membres de la JSR, d'un des groupes de musique dont je fais partie ou autres, j'éviterai de citer des noms afin de n'oublier personne. Une dédicasse plus particulière à Françwè et Le Micke qui se reconnaîtront et avec qui j'aurai eu le plaisir de discuter physique, chimie ou encore statistique (hahaha ...) pendant ces quatre années.

Je n'oublie bien sûr pas les personnes du premier étage d'astrophysique pour les bons moments passés, et remercie particulièrement Géraldine, Virginie et Yannick de m'avoir initié aux joies de la déconvolution à l'aide de MCS. Merci également à Sandrine et à Andrea pour leur aide lors des nombreux problèmes informatiques rencontrés. Un mot particulier pour mon collègue Michaël, avec qui j'ai partagé mon bureau avec plaisir durant près de trois années, le Standard sera encore champion cette année, ne t'inquiètes pas.

Une thèse ne pourrait se faire sans une source de financement permettant au chercheur de travailler en toute sérénité. Je remercie donc le FNRS de m'avoir accordé une bourse de doctorat FRS-FNRS durant près de trois années. Je remercie également le Pr. J.P. Swings pour m'avoir trouvé "en catastrophe" une source de financement pour la première année de ma thèse.



Résumé de la thèse

Les quasars sont parmi les objets les plus lumineux et les plus distants de l'Univers et sont par conséquent particulièrement intéressants pour en sonder l'origine et mieux comprendre son évolution générale. Les distances astronomiques auxquelles ces objets sont généralement situés nous empêchent de résoudre angulairement leurs régions centrales. Nous ne pouvons dès lors pas vérifier directement la validité des modèles géométriques et dynamiques proposés pour rendre compte de leur propriétés observationnelles (distribution de l'énergie spectrale, profils de raies, présence de jets radio etc.). Dans notre thèse, nous utilisons deux techniques d'investigation de type indirect dans le but de mieux contraindre les modèles existants.

Ces techniques, particulièrement sensibles à la structure géométrique des régions en émission des quasars, sont la polarimétrie et l'effet de microlentille gravitationnelle. Dans la première partie de notre thèse nous étudions la corrélation entre la direction de la polarisation linéaire et l'orientation de la galaxie hôte/émission étendue que nous avons déterminée à partir d'images à haute résolution angulaire provenant des archives du télescope spatial Hubble. Nous montrons comment cette étude nous a permis d'apporter de nouveaux éléments en faveur de l'existence d'un modèle d'unification des quasars présentant ou non des raies larges dans leur spectre.

Dans la seconde partie, nous étudions dans quelle mesure l'effet de microlentille gravitationnelle permet de contraindre la géométrie des régions à l'origine des raies larges en absorption observées dans 10 à 20 % des quasars. A cette fin nous avons construit un programme de transfert radiatif permettant de simuler les profils de raies issus d'un vent à deux composantes. Les modèles ainsi produits sont utilisés pour étudier les variations de profils de raies induites par le transit de microlentilles gravitationnelles. Cette technique est finalement appliquée au cas du quasar H1413+117 afin de tester les hypothèses formulées quant à la géométrie des régions à l'origine des raies en absorption.

Summary of the thesis

Quasars are among the most luminous and the most distant objects in the Universe. Consequently they are particularly interesting to probe its origin and to understand its evolution. However, the huge distances at which these objects are generally found prevent us from resolving their central regions so that we cannot directly check the validity of the geometrical as well as the dynamical models accounting for their observational properties (spectral energy distribution, line profiles, presence or absence of radio jets etc). In our thesis, we use two indirect observational techniques in order to constrain the existing models.

These techniques which are particularly sensitive to the geometrical structure of the quasar emission regions are polarimetry and gravitational microlensing. In the first part of our thesis we study the correlation between the direction of the linear polarization and the orientation of the host galaxy/extended emission that we determined on the basis of high resolution HST images. We show how this study enables us to bring new clues favoring the existence of a unification model for the Type 1 and Type 2 quasars.

In the second part, we show how gravitational microlensing allows to constrain the geometry and size of the regions at the origin of the broad absorption lines observed in the spectrum of 10 to 20 % of quasars. For this purpose we build a radiative transfer code allowing to simulate the line profiles produced in a variety of realistic wind models. These models are then used to study the variations of line profiles induced by the transit of a gravitational microlens. This technique is finally applied to the case of the quasar H1413+117 in order to determine the geometry of the regions which produce the broad absorption lines.

Table des matières

Remerciements	3
Résumé de la thèse	5
Summary of the thesis	7
Table des matières	8
Table des figures	13
1 Introduction Générale	17
1.1 L'étude des AGNs au fil des décennies	18
1.2 La ménagerie des AGNs	20
1.2.1 Les AGNs Radio-Faibles	21
1.2.2 Les AGNs Radio-Forts	22
1.2.3 Le cas des quasars BAL	23
1.3 Un premier modèle d'AGN	25
1.4 L'unification des AGNs	27
1.5 But et structure de la thèse	28
I Contribution à l'étude du modèle d'unification des quasars à l'aide de la polarisation	31
2 Introduction	33
3 Orientation de galaxie hôtes	37
3.1 La méthode MCS : Présentation générale	38
3.2 Construction des PSFs pour des observations HST	40
3.3 L'ajustement d'un modèle de galaxie	41
3.4 La modélisation des quasars en pratique	43

4	La polarisation linéaire	47
4.1	Polarisation d'une onde et paramètres de Stokes	47
4.2	Origine de la polarisation en astrophysique	49
4.2.1	Radiation synchrotron	49
4.2.2	Extinction par des poussières alignées	51
4.2.3	Diffusion par des électrons ou des poussières :	54
4.3	Mesure de la polarisation linéaire	56
5	L'article publié	59
5.1	Introduction	59
5.2	Résumé de l'article	59
6	Avancées et perspectives	63
II	Contribution à l'étude de la géométrie des régions à l'origine des BALs à l'aide l'effet de microlentille gravitationnelle	83
7	Introduction	85
8	Le code MCRT	91
8.1	Quelques éléments de transfert radiatif	91
8.1.1	Absorption, émission et fonction source	92
8.1.2	L'approximation de Sobolev	95
8.2	Choix de la méthode de calcul	97
8.3	Principe de base des codes de type MC	98
8.4	Premières applications et tests de MCRT	101
8.4.1	Le vent en expansion sphérique	101
8.4.2	Profils et influence de la turbulence	102
8.4.3	Comparaison avec les méthodes SEI et CFM	104
8.4.4	Structure en doublet de la raie	108
9	Le cas du vent à deux composantes	111
9.1	Motivations et plan	111
9.2	Loi de vitesse et de densité utilisées	112
9.2.1	La production de spectres et d'images dans la cas d'un vent à deux composantes	114
9.2.2	Comparaison avec la méthode SEI	118
9.3	L'article soumis pour publication	120
9.3.1	Résumé de l'article	120

10 MCRT et les microlentilles	133
10.1 Introduction	133
10.2 L'effet de lentille gravitationnelle	133
10.2.1 Généralités	134
10.2.2 Amplification et caustiques	138
10.3 L'effet de microlentille et les quasars	141
10.3.1 Généralités	141
10.4 MCRT et les microlentilles : en pratique	146
10.4.1 En pratique	146
10.4.2 Définition des échelles	147
10.4.3 Problèmes de résolution	147
10.4.4 Outils d'analyse des déformations spectrales	149
10.5 Microlentilles et profils de raies	151
10.5.1 Modèles de vent	151
10.5.2 Cartes d'amplification et trajectoires	154
10.5.3 Atlas des modifications de profils	155
10.5.4 Discussion et interprétations	171
10.5.5 Conclusions	176
11 Le cas du quasar BAL H1413+117	179
11.1 Carte d'identité	179
11.2 H1413+117 et les microlentilles	180
11.2.1 Seize années d'observations spectroscopiques dans le domaine visible	181
11.2.2 Différences spectrales au fil du temps	182
11.3 Interprétation à l'aide de MCRT	185
11.4 Conclusions	188
12 Conclusions et perspectives	191
A Le code MCRT en détails	203
A.1 Introduction	203
A.2 monte Carlo et le transfert de la radiation	203
A.2.1 Emission d'un photon du continuum	203
A.2.2 Zones de résonances	206
A.2.3 Diffusion des photons	210
A.2.4 Création de spectres et d'images	213
A.2.5 Opacité totale de l'enveloppe	216
A.3 Amélioration du code MCRT	217
A.3.1 First Forced Scattering (FFS)	217
A.3.2 Emission dans le vent	220

A.3.3	Doublet de résonance	221
A.4	L'approximation de Sobolev et le code MCRT	222
B	Micro lensing in H1413+117 : disentangling line profile emission and absorption in a Broad Absorption Line quasar	225
B.1	Introduction	225
C	Liste bibliographique	239

Table des figures

1.1	Le quasar 3C 273 et son mystérieux spectre	19
1.2	Se repérer dans la ménagerie des AGNs	20
1.3	Schéma d'unification par orientation des AGNs	27
3.1	Principe de la déconvolution	39
3.2	Construction typique d'une PSF HST	42
3.3	Illustration du processus de modélisation	44
4.1	La polarisation d'un faisceau lumineux	48
4.2	Radiation synchrotron	50
4.3	Polarisation dichroïque	51
4.4	Polarisation par diffusion	53
4.5	Diffusion par un miroir de particules	55
4.6	Mesure de la polarisation linéaire	57
5.1	Distributions de l'angle $\Delta\theta$ entre θ_{Pola} et PA_{host} pour les quasars RQ et les RL.	60
6.1	Quasars de Type 2 observés durant la P82	65
7.1	Interprétation des profils de type P Cygni	86
7.2	Le phénomène de lentille gravitationnelle	88
8.1	Absorption et émission radiative	93
8.2	Méthode de transformation	99
8.3	Evolution des profils de raie avec la turbulence	103
8.4	MCRT vs. CFM	105
8.5	MCRT vs. SEI	106
8.6	Profils de raies d'un doublet de résonance	109
9.1	Raie du CIV du quasar BAL H1413+117	112
9.2	Modèle de vent à deux composantes	113
9.3	Modèle de vent à deux composantes	113

9.4	Peeling off du paquet de photons	115
9.5	Comparaison de spectres	116
9.6	MCRT 2D vs. SEI 2D	118
10.1	Lentilles gravitationnelles et arcs lumineux	134
10.2	Configuration d'un évènement de lentille gravitationnelle . . .	135
10.3	Cartes d'amplification pour une lentille de Chang-Refsdal . . .	140
10.4	Réseau de caustiques	141
10.5	Le phénomène de microlentille gravitationnelle	143
10.6	Réseau de caustiques	146
10.7	Lentille employée pour l'atlas de déformation de profils	154
10.8	Influence d'une microlentille sur ATMO-1	156
10.9	Influence d'une microlentille sur ATMO-2	157
10.10	Influence d'une microlentille sur ATMO-3	158
10.11	Influence d'une microlentille sur ATMO-4	159
10.12	Influence d'une microlentille sur ATMO-5	160
10.13	Influence d'une microlentille sur ATMO-6	161
10.14	Influence d'une microlentille sur ATMO-7	162
10.15	Influence d'une microlentille sur ATMO-8	163
10.16	Influence d'une microlentille sur ATMO-9	164
10.17	Influence d'une microlentille sur ATMO-10	165
10.18	Influence d'une microlentille sur ATMO-11	166
10.19	Influence d'une microlentille sur ATMO-12	167
10.20	Influence d'une microlentille sur ATMO-13	168
10.21	Influence d'une microlentille sur ATMO-14	169
10.22	Influence d'une microlentille sur ATMO-15	170
10.23	Influence de la taille du continuum	172
10.24	Variation de la largeur équivalente	173
10.25	Q0041-4023 et les microlentilles	178
11.1	Le Mirage H1413+117	180
11.2	Analyse temporelle des profils de raies du CIV et SiIV de H1413+117	183
11.3	Décomposition spectrale $F_M-F_{M\mu}$ pour H1413+117	184
11.4	Décomposition spectrale $F_M-F_{M\mu}$ du modèle MCRT	186
11.5	Effet de r_E dans la décomposition spectrale $F_M-F_{M\mu}$	189
A.1	Emission d'un photon du continuum	204
A.2	Profil d'absorption des ions	208
A.3	Localisation des zones de résonances	209
A.4	Trajectoire d'un photon dans le vent	212

A.5 Créations des images du modèle	214
A.6 First Forced Scattering	218

Chapitre 1

Introduction Générale

La grande diversité de noyaux actifs de galaxies (AGN) découverts depuis l'identification des premiers individus vers le milieu du vingtième siècle a poussé les astronomes à classer ces derniers en différentes catégories, regroupant les individus selon leurs propriétés physiques apparentes. Ainsi, alors que certains objets présentent une intense activité dans le domaine radio, d'autres sont particulièrement calmes à ces longueurs d'ondes. Certains possèdent un spectre parsemé de raies larges et étroites en émission (objets de Type 1) et d'autres semblent ne présenter que des raies étroites (objets de Type 2). D'autres encore, appelés quasars "BAL", montrent des raies en absorption liées aux raies en émission, révélant l'existence d'importants flux de matière à grande vitesse (généralement de 2000 à 20000 kms^{-1} , Turnshek [1984]).

Malgré la complexité des classifications établies, de nombreux résultats semblent suggérer que la majorité des objets observés sont bel et bien issus d'un seul et même phénomène : l'accrétion de matière par un trou noir supermassif. Les modèles d'Unification suggèrent que cette région centrale est entourée d'un "cocon" de gaz ionisé à l'origine des raies larges en émission, la BLR. Ce cocon est lui-même entouré d'une région plus étendue à l'origine des raies étroites en émission, la NLR. Les raies larges en absorption observées dans le spectre d'une partie des quasars pourraient être formées dans ces régions, ou encore être la signature d'un vent de type équatorial ne conduisant à l'apparition de telles raies que pour certains angles de vue. La différence observée entre les individus étant essentiellement liée soit à un effet d'orientation du quasar par rapport à la ligne de visée (e.g. Antonucci [1993], Elvis [2000], Ganguly et al. [2001]) soit à un scénario évolutif (Surdej & Hutsemékers [1987], Voit et al. [1993], Fabian [1999] Becker et al. [2000], Gregg et al. [2006]) soit à une combinaison des deux (Dopita [1997]).

Avant de rentrer dans le vif du sujet, nous proposons de replacer rapidement l'étude des AGNs et des quasars dans un contexte historique et actuel

afin de mieux appréhender les concepts qui seront utilisés tout au long du texte.

1.1 L'étude des AGNs au fil des décennies

Le début du vingtième siècle a certainement été une période de découvertes intense dans de nombreux domaines scientifiques, mais seule une d'entre elles est à l'origine de la présente thèse. En effet cette époque coïncide avec l'observation de bien étranges objets dans le ciel : des galaxies dont le noyau semble être à l'origine de raies spectrales en émission. Bien que pouvant sembler anodine pour la plupart des personnes, cette observation posa de sérieuses questions aux astronomes. En effet, les galaxies habituellement observées jusqu'alors consistaient en d'immenses collections d'étoiles dont le spectre était généralement dépourvu de raies en émission, impliquant l'absence de telles raies dans le spectre des galaxies.

Dans les années 1940, un certain Karl Seyfert alors employé à l'observatoire du Mont Wilson entreprend une étude systématique de ces galaxies particulières. Les résultats sont publiés dans un article paraissant en 1943 (Seyfert [1943]). Dans ce dernier, il interprète la largeur des raies observées comme étant due à un décalage Doppler dans un milieu en mouvement rapide. A cette époque, la fin de la seconde guerre mondiale laisse une grande quantité de matériel radio à l'abandon, permettant l'avènement d'une nouvelle branche de l'astronomie : l'observation du ciel dans le domaine radio, c'est à dire la radio-astronomie.

C'est ainsi qu'en 1946, une équipe de radio-astronomes découvre une intense source radio en direction de la constellation du Cygne. D'autres campagnes d'observation montrent rapidement que des centaines de sources radio sont en réalité présentes sur l'ensemble du ciel. Celles-ci furent aussitôt compilées dans différents catalogues dont le catalogue 3C¹. Parallèlement à ces observations, plusieurs équipes d'astronomes recherchent activement une contrepartie optique à ces étranges objets afin d'en étudier les propriétés spectrales.

En 1960, Allan Sandage parvient, suite à plusieurs occultations lunaires, à identifier la contrepartie optique de l'objet dénommé 3C48 sous la forme d'une étoile de magnitude apparente proche de 16, entourée d'une faible nébulosité. A partir de cette époque, les identifications se succédèrent. Le problème avec ces objets, ressemblant à des étoiles, est qu'aucune étoile alors

¹Nom du catalogue des sources radio établi par le Mullard Radio Astronomy Laboratory de l'Université de Cambridge

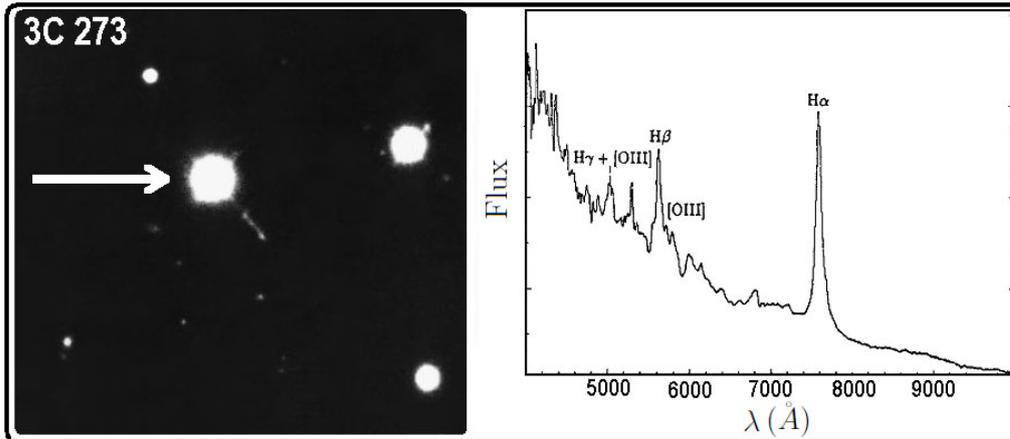


FIG. 1.1 – Image et spectre du quasar 3C 273 ($z = 0.158$). C’est en 1963 que Marteen Schmidt interprétera le décalage des raies observées dans le spectre des quasars en termes d’effet cosmologique lié à l’éloignement de la source ($\lambda_{obs} = (1 + z)\lambda_0$, où z est le “redshift”).

connue n’émet autant dans le domaine radio. Ainsi, la communauté scientifique décida d’appeler ces étoiles particulières des “Sources Radio Quasi-Stellaires” (abrégé quasars en anglais) en référence à un article de l’astronome chinois Hong-Yee Chiu. Une étude des spectres optiques de ces étoiles spéciales fut ensuite entreprise afin de répondre à la question de la source de l’intense émission radio observée.

L’étude spectroscopique de ces objets posera de nouveau un sérieux problème à la communauté astronomique : les raies en émission présentes dans leur spectre se situent à des longueurs d’ondes que l’on ne rencontre pas dans les spectres de sources typiques. En 1963, l’astronome hollandais Maarten Schmidt, étudiant alors le spectre de la source compacte 3C273 à l’aide du télescope de Hale au sommet du mont Palomar, apporte une réponse à cette question. Il repère en effet dans le spectre de cet objet une série de raies caractéristique de la série de Balmer de l’hydrogène, mais fortement décalées vers le rouge, trahissant un effet d’expansion cosmologique expliqué par la relativité générale. Cette source possède un redshift de 0.158 ; elle se situe donc à environ 2 milliards d’années lumière de nous, expliquant de ce fait l’aspect quasi ponctuel observé sur les images obtenues dans le domaine visible.

Cette découverte permit en outre d’identifier d’autres raies présentes dans les spectres de différentes sources. Il faut cependant noter que ce qui étonnait le plus la communauté scientifique de l’époque n’était pas tant l’éloignement de ces objets – en effet, plusieurs galaxies à ces redshifts étaient

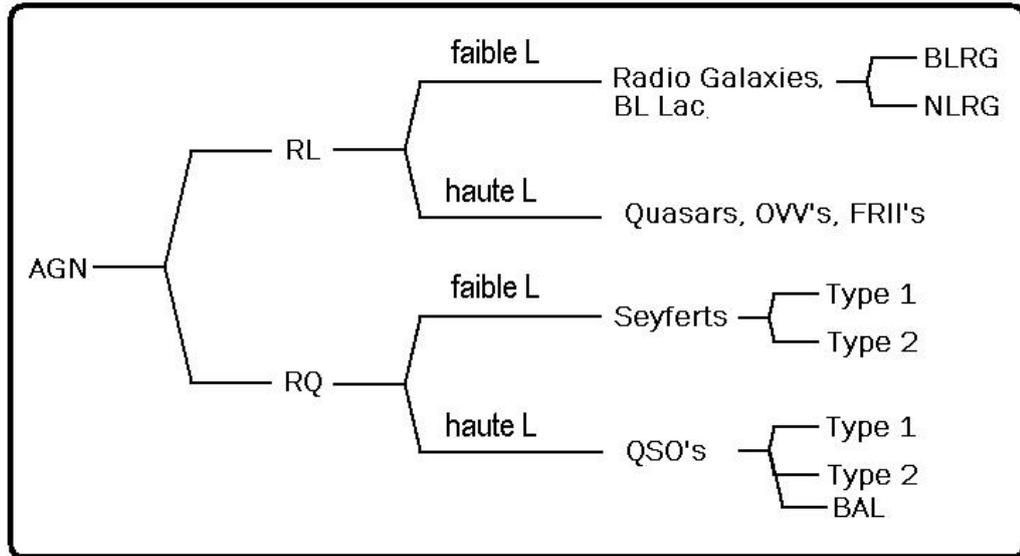


FIG. 1.2 – Ce schéma simplifié permet de se repérer dans la ménagerie des AGNs. On distingue premièrement les objets possédant une forte contrepartie radio (objets RL, voir texte) de ceux où elle est plus faible (RQ). On effectue alors une distinction au niveau de la luminosité intrinsèque de l'objet, la limite étant choisie à $M_V = -23$. La dernière distinction se situe au niveau de la présence (Type 1) ou l'absence (Type 2) de raies larges dans le spectre des AGNs.

déjà répertoriées – que l'importante luminosité intrinsèque impliquée par cet éloignement : les quasars sont cent fois plus lumineux que les plus brillantes galaxies connues. Quelle source d'énergie peut bien produire une telle quantité d'énergie ?

Dans un même temps, le développement de diverses techniques de recherche de tels objets (essentiellement basées sur l'excès de lumière UV/bleue qu'émettent les quasars par rapport aux étoiles) mirent au jour une grande population d'objets possédant les caractéristiques optiques des quasars mais pas (ou une faible) contrepartie dans le domaine radio. Ces objets furent appelés des QSOs² (de l'anglais "Quasi Stellar Objects").

1.2 La ménagerie des AGNs

Des centaines de campagnes d'observation et de caractérisation des AGNs ont été menées depuis près de 50 ans, et ce des rayons gamma jusqu'aux

²Dans la suite de notre thèse, nous appellerons indifféremment "quasars" les objets possédant ou non une intense contrepartie radio.

ondes radio, conduisant à un nombre impressionnant d’objets répertoriés (de 202 objets dans les premiers catalogues en 1971 à plus de 100 000 de nos jours (Véron-Cetty & Véron [2006])) possédant des propriétés relativement différentes. Une classification des AGNs selon trois de leurs caractéristiques principales – la luminosité optique, la luminosité radio et les propriétés spectrales – fut proposée par Lawrence [1987] afin de clarifier la situation.

Ainsi, on divise habituellement les AGNs en deux catégories : les objets dit “Radio-Forts” (RL pour Radio-Loud) et les objets “Radio-Faibles” (RQ pour Radio-Quiet), dont la limite de séparation est définie par l’importance de la contrepartie radio à 5GHz par rapport à l’émission optique. Un objet pour lequel $\log(F_{5\text{GHz}}/F_{\text{optique}}) < 1$ sera classé comme RQ alors qu’un objet pour lequel $\log(F_{5\text{GHz}}/F_{\text{optique}}) > 1$ sera classé comme RL (Stocke et al. [1992]). On estime que près de 90% des AGNs sont RQ.

Nous présentons ci-dessous les principales classes d’objets répertoriés dans chacune des catégories RQ et RL et discutons également le cas particulier des quasars présentant des raies en absorption large dans leur spectre (quasars BAL). Le but ici poursuivi consiste à broser une vue d’ensemble afin de permettre au lecteur de mieux cerner les objets sur lesquels nous avons mené notre étude. Aussi resterons nous assez général en évitant de rentrer dans certaines subdivisions plus fines définies dans la littérature.

1.2.1 Les AGNs Radio-Faibles

Cette catégorie contenant les objets émettant faiblement dans le domaine radio est elle-même subdivisée en deux classes de luminosité dans le domaine optique. On appelle galaxie de Seyfert les objets contenant les noyaux actifs les moins lumineux ($M_V < -23$) et quasars les objets au sein desquels se trouvent les AGNs les plus lumineux. Les galaxies de Seyfert, dont la proximité et la plus faible luminosité de l’AGN permettent d’observer la galaxie hôte, possèdent généralement une galaxie hôte de morphologie spirale (Sa ou Sb selon la classification de Hubble). Leur noyau actif émet autant de lumière que toutes les étoiles de la galaxie hôte. Dans les quasars, ce rapport de luminosité est bien plus grand, le noyau actif étant de 10 à 100 fois plus brillant que la galaxie hôte.

Ces deux classes d’objets sont elles-mêmes subdivisées en sous classes selon les propriétés spectrales observées. On distingue ainsi les objets de “Type 1” des objets de “Type 2” par la présence ou l’absence de raies en émission larges dans leur spectre. La catégorie des galaxies de Seyfert de Type 1 (Sy1s) contient les objets dont le spectre est constitué d’un continuum parsemé à la fois de raies larges ($FWHM \sim 5000 \text{ kms}^{-1}$) et étroites ($FWHM \sim 500 \text{ kms}^{-1}$). Les Sy2s regroupent les objets montrant un conti-

nuum bleu plus faible, fortement rougi et ne présentant que des raies en émission étroites. Cette dichotomie est également retrouvée dans le cas des AGNs plus lumineux que sont les quasars. Ce n'est cependant que très récemment que plusieurs échantillons convaincants d'individus de Type 2 ont été découverts (Zakamska et al. [2003] et références citées).

1.2.2 Les AGNs Radio-Forts

Cette catégorie d'objets contenant les AGNs les plus lumineux dans le domaine radio est également divisée en deux classes de luminosité optique chacune étant elle-même subdivisée en deux types spectraux différents. Les AGNs RL de Type 1 sont appelés BLRGs (abréviation de l'anglais "Broad Line Radio Galaxies") à faible luminosité et quasar RL à haute luminosité ($M_V > -23$). Ces derniers sont encore subdivisés en FSRQs ("Flat Spectrum Radio Quasars") ou SSRQs ("Steep Spectrum Radio Quasars") selon la pente de leur continuum dans le domaine radio. Ainsi les FSRQs possédant un spectre à pente douce sont typiquement associés à des quasars dont l'angle d'observation est petit (ligne de visée située le long de l'axe radio), alors que les SSRQs, dont le spectre présente une pente plus abrupte sont préférentiellement observés à des angles plus grand (proche de 90°). Les AGNs RL de Type 2 sont appelés NLRGs ("Narrow Line Radio Galaxies").

Fanaroff et Riley ont également introduit une classification sur base de la morphologie radio. Les objets RL sont ainsi subdivisés en deux populations distinctes : les galaxies de Fanaroff-Riley de type 1 ou de type 2 (respectivement abrégée FR1 et FR2). Les FR1s sont des objets dont l'émission radio est caractérisée par des jets symétriques (un jet et un contre-jet) dont les parties terminales sont alimentées par un jet peu collimaté dont l'émission est relativement uniforme. Les FR2s possèdent par contre des jets radio très étendus et peu symétriques, un des jets apparaissant plus brillant suite à des effets relativistes. Les jets sont fortement collimatés sur de grandes distances et se terminent en lobes d'émission radio présentant des points chauds.

Les blazars constituent finalement une classe à part entière des AGNs RL. Ces objets présentent par définition un spectre dominé à toutes les longueurs d'ondes par un continuum d'origine non thermique fortement variable (d'un facteur deux sur une période pouvant aller d'un jour à plusieurs mois) et fortement polarisé (un degré de polarisation $P > 10\%$). La classe des blazars rassemble sous une même dénomination les objets BL Lac et les objets OVV ("Optically Violently Variable"). Les BL Lac sont des AGNs dont le spectre est dépourvu de raies spectrales, et dont les variations d'intensité sont proches de celles des étoiles de même nom. Les BL Lac sont également de puissants émetteurs dans les domaines radio et X. La classe des objets OVV regroupe

les AGNs dont les spectres présentent des raies en émission typiques des AGNs de Type 1 mais dont la luminosité montre des variations semblables à celles observées pour les BL Lac.

1.2.3 Le cas des quasars BAL

Introduction et statistiques

C'est en observant le spectre du quasar PHL5200 que Lynds ([1967]) fut le premier à détecter la présence de raies larges en absorption dans le spectre de certains individus auxquels les astronomes donnèrent le nom de quasars BAL (pour "Broad Absorption Line Quasars"). Ces raies en absorption généralement décalées vers le bleu par rapport aux raies en émission auxquelles elles sont associées forment un profil semblable à celui observé dans certaines sources astronomiques comme les étoiles dites de type P Cygni³. La différence majeure entre les propriétés des profils observés dans les étoiles et celles des quasars vient de leur largeur.

En faisant l'hypothèse que ces raies en absorption sont effectivement associées au quasar, plusieurs modèles dynamiques furent proposés afin d'en interpréter l'origine. Le modèle de type "nuages" (Junkkarinen [1983], Che-louche & Netzer [2001]) suppose que l'absorption est produite dans un grand nombre de nuages distribués selon une géométrie ne couvrant qu'une fraction de la source émettant le continuum. Ces nuages ne contribuent pas ou très peu au flux observé dans la partie en émission des raies, cette contribution étant principalement issue de la BLR. Ainsi les quasars BAL sont des quasars normaux vu selon un angle de visée particulier. Dans le modèle de type "P Cygni" (e.a. Murray et al. [1995], Proga & Kallman [2004]) les BALs sont supposés produits dans un flux de matière continu. Des modèles composites ont également été évoqués (Arav et al. [1994]).

Scargle et al. [1970] furent parmi les premiers à interpréter ces profils en termes de diffusion résonnante dans un milieu en mouvement rapide (voir Fig. 7.1), suggérant l'existence de phénomènes de perte de masse importants affectant les quasars et leur environnement. Les vitesses du flux de matière sont généralement bien supérieures à celles observées dans les étoiles, présentant une largeur typique de l'ordre de 2000 à 20000 $km s^{-1}$ mais pouvant aller jusqu'à 60000 $km s^{-1}$ dans certains cas (Foltz et al. [1983]).

Ces BALs sont généralement détectés dans les raies de haute ionisation du

³Le terme P Cygni fait référence à la novae du même nom observée en 1600. Mais ce type de profil est observé dans quantité d'objets astronomiques tels les étoiles de Wolf Rayet, les étoiles de type Be etc.

domaine UV⁴ comme CIV (1549 Å), SiIV (1396 Å) ou encore NV (1240 Å). Cependant près de 10% des quasars BAL recensés présentent également des BALs associés aux ions de faible potentiel d’ionisation tels MGII (2798 Å) ou encore AIII (1857 Å) (Lamy & Hutsemékers [2004]). Ces individus sont appelés quasars LoBAL par opposition aux quasars HiBAL présentant des raies en absorption uniquement pour les ions de haut potentiel d’ionisation.

Depuis l’identification des premiers individus basée sur l’analyse de spectres dans le domaine visible, de nombreuses études faisant appel aux dernières grandes campagnes d’observations tels le SDSS⁵ se sont attelées à déterminer la fraction de quasars possédant de telles raies en absorption larges. On considère, selon les techniques de détection et la fourchette de redshift utilisée, que près de 10 % à 30 % des quasars possèdent des BALs (Trump et al. [2006], Knigge et al. [2008], Ganguly & Brotherton [2008]). Une difficulté supplémentaire pour une évaluation précise de la proportion de quasars BAL vient de la définition employée pour caractériser ces raies larges. En effet, Weymann et al. [1991] proposèrent un critère simple afin de classer un quasar dans la catégorie BAL ou non : l’indice de Balnicité (BI). Ce dernier, mesuré sur la raie du CIV, se définit de manière similaire à la largeur équivalente d’une raie :

$$BI = - \int_{25000}^{3000} C [1 - F(v)] dv \quad (1.1)$$

où C est une constante valant initialement zero et dont la valeur devient unitaire lorsqu’une portion du spectre normalisé au continuum $F(v)$ est telle que l’absorption est inférieure à 90% de l’intensité du continuum pour au moins $\Delta v = 2000 \text{ kms}^{-1}$ contigus. La limite d’intégration supérieure est choisie afin d’éviter une contamination de la mesure par la raie du SiIV. Depuis, cette définition a été modifiée afin d’inclure les quasars présentant des raies d’absorption plus complexes ou plus étroites (NALs, mini-BALs), montrant la variété des signatures liées à la présence d’un vent dans au moins une partie des quasars (cf. Hall et al. [2002] Ganguly et al. [2008]).

Propriétés des quasars BAL

Les quasars BAL présentent généralement un degré de polarisation supérieur à celui observé dans les quasars non-BAL (Stockman et al. [1984]).

⁴Ceci explique pourquoi les quasars BAL sont généralement identifiés à haut redshift ($z > 1.5$) : les raies du domaine UV sont redshiftées dans le domaine visible et peuvent être observées depuis des observatoires terrestres.

⁵SDSS pour “Sloa Digital Sky Survey” : un projet visant à cartographier près du quart de la voûte céleste à l’aide d’un télescope de 2.5 m de diamètre.

Cette excès de polarisation est particulièrement marqué au niveau du continu UV/optique ainsi que dans les BALs (Ogle et al. [1999], Lamy & Hutsemékers [2004]). La polarisation est probablement associée à la diffusion de la lumière par des électrons libres ou des poussières (e.a. Wang et al. [2005]). Au niveau des rayons X, les quasars de type BAL sont généralement de faibles émetteurs de rayons X “mous”, ces derniers étant fortement absorbés par l'énorme colonne d'hydrogène (de l'ordre de 10^{22} à 10^{24} cm^{-2} , e.a. Wang et al. [1999], Gallagher et al. [2006]). Les observations menées par Brotherton et al. [2005] montrent un comportement identique dans le domaine des rayons X pour les quasars BAL de type RQ et RL.

Les similitudes des raies en émission et du continuum optique et infrarouge observés dans les quasars BAL et les quasars non-BAL (e.a. Weymann et al. [1991], Gallagher et al. [1999], Reichard et al. [2003]) ainsi que les observations spectropolarimétriques (e.a. Schmidt & Hines [1999], Lamy & Hutsemékers [2004]) suggèrent l'existence d'une structure commune aux deux types de quasars. Dans ce scénario, seule une partie de la source émettant le continuum serait “couverte” par le vent à l'origine des raies en absorption (correspondant grossièrement à la fraction de quasars BAL détectés).

Bien que les BALs ont été longtemps associés aux quasars RQ seulement (Stoche et al. [1992]), une première détection d'un quasar BAL de type RL fut reportée par Becker et al. [1997], rapidement suivie par plusieurs autres identifications. En analysant les propriétés radio de ces quasars BAL RL, Becker et al. [2000] ont montré que ces objets n'avaient pas d'orientation particulière, ces derniers possédant indifféremment un spectre radio à pente douce ou abrupte (cf. Sect. 1.2.2). De récentes études spectropolarimétriques (Brotherton et al. [2006]) ou de la microvariabilité radio (Zhou et al. [2006], Doi et al. [2009]) des quasars BAL RL suggèrent également l'existence de régions BAL de type polaire, indiquant que les propriétés d'au moins une partie de la population des quasars BAL RL ne peut être expliquée par une orientation particulière par rapport à la ligne de visée. Ces observations favorisent les modèles d'unification de type évolutif (voir Sect. 1.4). Dans de tels scénarii, les quasars perdraient assez rapidement leur région BAL au cours de leur vie, celle-ci étant soufflée par l'important champ de radiation issu du noyau (Hazard et al. [1984], Becker et al. [2000], Lipari et al. [2006]).

1.3 Un premier modèle d'AGN

Différents problèmes se posaient quant à l'élaboration d'un modèle de noyau actif, le premier consistant certainement en l'explication de la source de leur grande luminosité intrinsèque équivalente à l'éclat de centaines de

galaxies. Une contrainte supplémentaire dictée par les études de variabilité du continuum (voir Wiita [2006]) est que cette énergie est émise dans une région de dimensions à peine plus grandes que celle du système solaire ($\sim 10^{-2}$ parsec). Plusieurs scénarii furent avancés afin d’expliquer l’émission observée comme par exemple des explosions de supernovae en cascade (Burbidge [1961]) ou l’existence d’une étoile super-massive ($M \sim 10^8 M_{\text{Soleil}}$) située au cœur des AGNs (Hoyle & Fowler [1963]). L’idée de la présence d’un trou noir super-massif ($M_{TN} \sim 10^6$ à $10^{10} M_{\text{Soleil}}$) au centre des AGNs fut proposée en 1964 par Salpeter et Zeldovich. La matière accrétée par ce dernier sous forme d’un disque ($R_{DA} \sim 10^{-2}$ parsec) spiralant vers les régions internes permet d’expliquer, à l’aide d’une efficace conversion de l’énergie potentielle gravifique en radiation, l’émission d’un continuum selon une loi de puissance $F_\nu \propto \nu^{-\alpha}$. Ce scénario a également l’avantage de proposer, étant donné les phénomènes physiques mis en jeu, une explication de la largeur des raies d’émission observées ou encore des variations de luminosité de courte période (de quelques minutes à quelques jours).

Ainsi un modèle de noyau actif communément admis contient les divers éléments suivants. Premièrement, un trou noir super-massif; l’accrétion de la matière environnante permet, par frottement visqueux, d’émettre l’intense rayonnement observé. Dans le voisinage du disque d’accrétion ($R_{BLR} \sim 1$ parsec), on trouve une région contenant du gaz à l’origine des larges raies en émission observées dans les spectres d’objets de Type 1 : la BLR (pour “Broad emission Line Region”). La largeur de ces raies est dictée par les grandes vitesses képlériennes rencontrées aux abords du trou noir. La géométrie et les dimensions de cette région ne sont pas encore bien déterminées, de récentes études montrant que la BLR pourrait s’avérer plus petite qu’initialement prévu (voir Sect. 7). De même, plusieurs types de géométries sont évoqués afin d’expliquer les profils de raies observés. Alors que les profils présentant un double pic d’émission peuvent être modélisés dans une région équatoriale (Eracleous & Halpern [1994]), de récentes études suggèrent l’existence d’une structure plus complexe pour la BLR, faisant appel à plusieurs composantes parmi lesquelles un disque équatorial et une région de géométrie différente (Popovic et al. [2004], Ilic et al. [2005]). Cette BLR est ensuite entourée de ce que l’on appelle la NLR, une région bien plus étendue ($R_{NLR} \sim 100$ parsecs) à l’origine des raies étroites permises et interdites qui révèlent une densité de gaz et une dispersion de vitesses plus faibles. Cette région a déjà été imagée dans les AGNs proches, révélant une structure allongée le long des jets radio dans les sources RL plutôt qu’une symétrie sphérique (e.a. Baldwin et al. [1987], Falcke et al. [1998]). Finalement, dans le cas des AGNs RL, on considère la présence de jets radio s’échappant de part et d’autre du disque d’accrétion selon une direction proche de l’axe de symétrie de celui-ci.

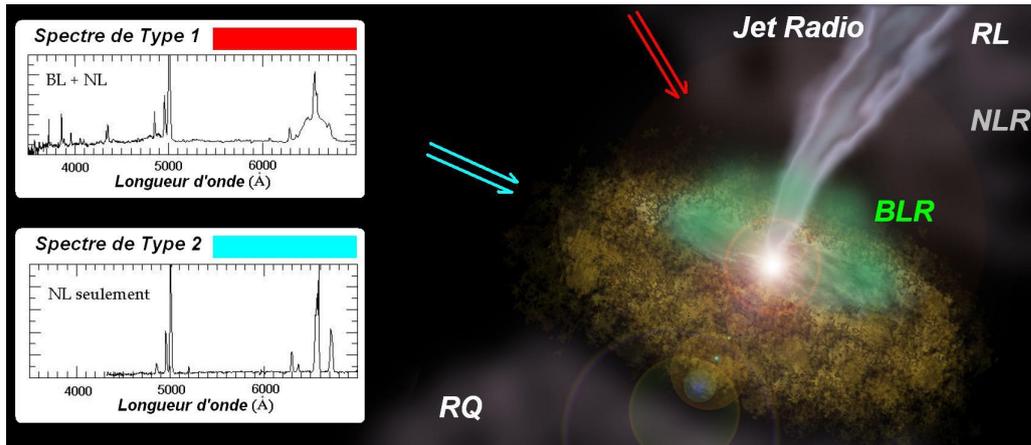


FIG. 1.3 – Ce schéma présente les différents éléments composant un noyau actif de galaxie typique, c'est-à-dire un trou noir super-massif (SMBH), entouré de son disque d'accrétion, de la BLR et de la NLR. Dans le cas des AGNs RL, on considère également la présence de jets radio de part et d'autre du disque d'accrétion. Le modèle d'unification par orientation permet d'établir un lien entre les différents types d'AGNs par l'introduction d'un tore de poussière entourant une partie des régions internes et masquant ou non l'émission de celles-ci selon l'angle de vue de l'observateur, expliquant ainsi la dichotomie Type 1/Type 2 observée dans le spectre des AGNs.

Insistons sur le fait que cette structure est uniquement dérivée à partir d'observations indirectes, essentiellement basées sur la variabilité de la luminosité et sur l'analyse spectroscopique. Vu les distances auxquelles se situent les AGNs, il ne nous est pas permis, du moins à l'aide des instruments d'observations actuels, de résoudre les régions internes de ces objets afin d'en étudier directement la structure. Seule la NLR a pu être observée dans quelques AGNs proches.

1.4 L'unification des AGNs

Devant la diversité des espèces d'AGNs existant, il fut rapidement proposé que les propriétés physiques intrinsèques de ces objets pourraient être similaires. Le principe de base de cette idée consiste en l'observation que si les AGNs sont des objets asymétriques (le disque d'accrétion définissant une direction privilégiée), les propriétés observées dépendent de l'angle de vue du système. C'est ce que l'on appelle le principe d'unification par orientation (Antonucci [1993]). Ce modèle considère la présence d'un tore de poussières masquant la vue directe de la lumière émise par les régions internes (disque

d'accrétion et BLR). Ceci permet d'interpréter les objets de Type 2 comme des objets possédant un noyau actif de Type 1, mais dont les régions à l'origine du continuum et des raies larges sont dissimulées par le tore.

Différents éléments⁶ jouent en faveur de ce modèle d'unification. L'étude spectroscopique d'un grand nombre d'AGNs RQ et RL a permis de remarquer que les régions centrales des objets de Type 2 sont effectivement obscurcies par de la poussière et du gaz probablement distribués sous la forme d'un tore (Pier & Krolik [1992]). Un élément fondamental en faveur du modèle d'unification fut apporté dans le cadre des galaxies de Seyfert par Antonucci & Miller en 1985. En effet, en étudiant le spectre en lumière polarisée de la galaxie de Seyfert de Type 2 NGC1068 (le prototype de galaxie de Seyfert de Type 2), ils observèrent la présence de raies larges caractéristiques d'un noyau de Type 1. Ainsi les galaxies de Seyfert de Type 2 abritent effectivement une BLR et une source intense de continuum. Ils interprètent la lumière polarisée comme provenant des régions centrales mais "réfléchie" (diffusée) en direction de l'observateur par une zone composée d'électrons et/ou de poussières se situant de part et d'autre du tore, fournissant une vision périscopique des phénomènes se déroulant au coeur des objets de Type 2.

Bien qu'étant relativement simple, ce scénario d'unification par orientation permet, en s'appuyant sur l'anisotropie engendrée par un tore de poussière et la présence de jets radio dans le cas RL, de rendre compte d'une grande partie des propriétés des AGNs répertoriés. Notons qu'il existe deux branches principales à ce scénario d'unification : celle de l'unification des objets Radio-Faibles, où il est maintenant relativement bien établi que les galaxies de Seyfert de Type 1 sont intrinsèquement identiques aux galaxies de Seyfert de Type 2, et celle de l'unification des objets Radio-Forts, où le lien entre les quasars RL et les NLRGs est également relativement bien établi (Barthel et al. [1989], Urry & Padovani [1995]).

1.5 But et structure de la thèse

Il est tentant, sur base de l'observation des AGNs de faible luminosité, d'étendre aux quasars le modèle d'unification par orientation liant les galaxies de Seyfert de Type 1 et de Type 2. Cependant, ce type de scénario reste à prouver, dans la mesure où le tore de poussière, à l'origine de la dichotomie dans les galaxies de Seyfert, pourrait être soufflé par la pression de radiation et les vents associés aux quasars et/ou aux supernovae. Dans ce cas, les quasars de Type 1 – non obscurcis – seraient dans un état d'évolution plus

⁶Le lecteur intéressé est invité à consulter notamment les articles de revue d'Antonucci ([1993]) et de Urry & Padovani [1995].

avancé que les quasars de Type 2 – obscurcis (e.g. Hiner et al. [2009]). De même, bien que certains scénarii suggèrent une unification par orientation des quasars BAL et non-BAL (e.a. Weymann et al. [1991], Elvis et al. [2000]), il s'avère délicat d'expliquer les vents observés dans certains quasars BAL en faisant uniquement appel à un vent de type équatorial (cf. Sect. 1.2.3).

Malgré la puissance des moyens d'observations actuellement développés notamment dans le domaine optique, il reste impossible de résoudre angulairement les régions internes de ces objets situés aux confins de l'Univers et de valider ainsi les hypothèses employées dans les modèles d'Unification. Plusieurs méthodes d'observations dites indirectes sont par contre à même de nous apporter des informations particulièrement intéressantes notamment quant à la géométrie et les dimensions des régions à l'origine de la lumière émise par les quasars.

Dans notre thèse, nous utilisons deux de ces méthodes indirectes : la polarimétrie et l'effet de microlentille gravitationnelle. Nous détaillerons brièvement ces techniques dans deux parties séparées où nous insisterons sur les résultats qu'elles nous ont chacune permis d'établir. La structure de chaque partie sera la suivante : le premier chapitre replacera le but des études réalisées dans leur contexte particulier, en insistant sur les questions fondamentales auxquelles nous avons apporté notre contribution. Les chapitres suivants détailleront les techniques d'analyse utilisées et les modèles développés. Finalement les résultats seront discutés et quelques perspectives avancées.

