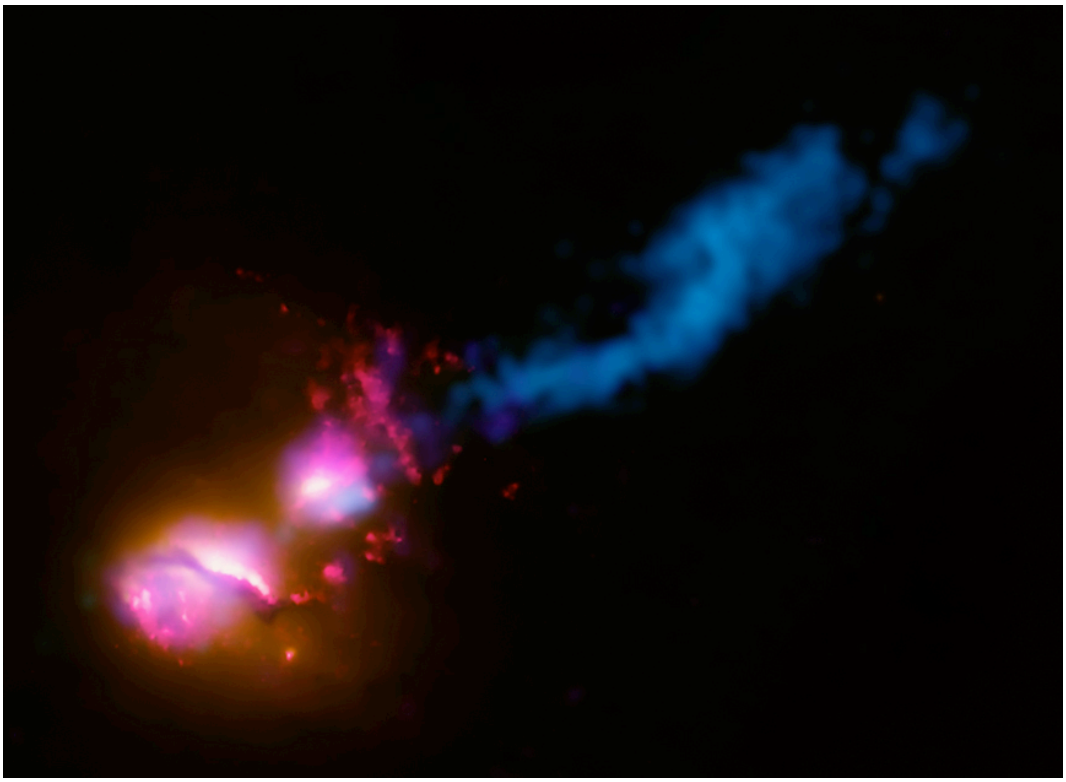
Didier GILBERT

GALAXIES À NOYAU ACTIF

Du moteur central à la galaxie hôte.



3C321 (Serpens caput), Crédit, Dec. 2007 : X-ray (violet): Nasa-CXC/CfA/D.Evans et al.
Optical (orange/doré)/UV (rouge) : Nasa/STScI
Radio (bleu) : NSF/VLA/CfA/D.Evans et al., STFC/JBO/Merlin

Mémoire sous la direction de Madame Florence DURRET

Soutenu le 30 septembre 2008, devant le jury composé de

Agnès ACKER	Examinateur
Chantal BALKOWSKI	Présidente
Alain DORESSOUNDIRAM	Examinateur
Florence DURRET	Examinateur
Marie-France LANDREA	Examinateur

Image de couverture

3C321 : une radiogalaxie à 1.4 milliard d'années-lumière de la Terre (380 Mpc).

Plusieurs radiogalaxies présentent de puissants jets émanant de leur cœur. Lorsque les astronomes observèrent cet objet, ils découvrirent un jet de 850.000 années-lumière. Le jet en question entrait en collision avec une autre galaxie située à seulement 21.000 années-lumière.

A cette distance, inférieure à celle nous séparant du centre de la Voie Lactée, la galaxie, soufflée par ce jet, pourrait subir des désordres significatifs.

En combinant les données des satellites Chandra (RX), Hubble (UV et Visible) à celle du VLA et de MERLIN (Radio), les astronomes étudient les effets de cette éruption.

Coordonnées (J2000) : α=15h 31m 42.70s, δ=+24° 04' 25.00"

Champ : 27" x 19" d'arc

Longueur d'ondes	Instrument	Fréquences / Energies	Dates de prises de vues	Durées d'exposition
Radio	VLA	1.5 and 5 GHz	April-Dec 1986	various
Radio	MERLIN	1408 and 1658 MHz	2005 June 20	14 hours
Infrared	Spitzer IRAC	3.6-8 µm	2005 March 27	1,072s
Optical	HST WFPC2	F702W (filtre rouge centré à 6940Å, largeur 1480Å)	1995 April 30	280s
Optical	HST WFPC2	FR533NR [O III] (filtre interférentiel à 5487,7Å)	1995 August 12	600s
Ultraviolet	HST STIS	NUV-MAMA (prisme-objectif, 1200 à 3000Å)	2000 June 05	1,440s
X-Ray	Chandra ACIS	0.3-8 keV	2002 April 30	46,932s

date de publication : 17 décembre 2007

TABLE DES MATIÈRES

Avant-propos 5

Remerciements 6

I. Rappels sur les galaxies 7

A. Les galaxies 'normales' 7

B. Classification 9

C. L'expansion de l'Univers et la loi de Hubble 12

II. Historique 14

A. Découverte et Identification 14

B. Référencements et Catalogues 21

III. Les AGN et Le Modèle Unifié 25

A. Introduction 25

B. Anatomie des AGN 29

1. Trou Noir central 29

2. Disque d'accrétion 35

3. Jets et Vents 41

4. Broad (Emission) Line Region (BLR) 47

5. Narrow-Line (Emission) Region (NLR) 53

6. Tore Moléculaire et Poussières 57

7. Lobes Radio 59

C. Physiologie des AGN et Unification 60

D. Le Modèle Unifié 65

IV. Taxonomie, bestiaire des Galaxies Actives et des AGN 71

A. Les Galaxies à forte Activé Stellaire 71

1. Galaxies à Flambées d'Etoiles (Starburst Galaxies) ou Galaxies à régions HII 71

2. Galaxies de Markarian 72

3. FIRG (Far InfraRed Galaxies) 72

4. Galaxies IRAS, LIRG et ULIRG 73

B. Les Galaxies à Noyau Actif 74

1. Galaxies à Noyau Actif Radio-Quiet (RQ) 78

a. LINER 78

b. Galaxies de Seyfert 80

c. QSO 83

d. Unification des AGN RQ 86

2.Galaxies à Noyau Actif Radio-Loud (RL) 87

a. Un cas à part : les Radiogalaxies 87

b. Quasars 92

c. Blazars 96

d. Unification des AGN RL 99

C. Synthèse des Acquis 100

V. Perspectives et Conclusion 104

A. Cosmologie et Evolution 104

B. Perspectives 107

C. Questions en suspens 107

D. Conclusion 109

Bibliographie 111

ANNEXES 118

A. Quelques Astronomes qui ont contribué à la découverte des AGN 118

B. Les AGN vus par les Amateurs 124

C. Quelques Rappels 130

D. Développements et Explications 132

Avant-propos

Twinkle, twinkle, quasi-star

Biggest puzzle from afar

How unlike the other ones

Brighter than a Milliard suns

Twinkle, twinkle, quasi-star

How I wonder what you are.

G. Gamow, 1964

Avertissement au lecteur :

Ce mémoire n'est qu'une compilation et une tentative d'analyse d'articles et de documents écrits par des astronomes professionnels, des chercheurs en mathématiques ou en physiques et des vulgarisateurs, ce que je ne prétend pas être.

Je ne saurais m'avancer et être affirmatif concernant certaines assertions ou hypothèses évoquées plus loin, même si elles peuvent paraître contradictoires, car je ne prétend aucunement posséder les compétences et les connaissances nécessaires.

Remerciements

A l'occasion de ce mémoire, je tiens à remercier l' Observatoire de Paris-Meudon, et féliciter Chantal BALKOWSKI et Jean-Eudes ARLOT pour avoir eu l'idée du DUOP et permettre aux profanes "que nous étions" d'appréhender le fonctionnement de l'Univers.

Mes remerciements à Florence DURRET, pour avoir accepté d'encadrer mon travail, pour ses conseils et le temps qu'elle m'a accordé pour la présentation de ce mémoire sur les AGN.

Je remercie également l'ensemble des enseignants : Agnès ACKER, Marie-France LANDREA, Alain DORESSOUNDIRAM, Wim van DRIEL, Karl-Ludwig KLEIN, Jérôme LAMY, Patrick ROCHER, David VALLS-GABAUD, pour nous avoir transmis leurs connaissances et nous avoir tant apporté lors de notre première année, sans oublier Hélène SOL, Noël DIMARCQ et Jean-Marie MALHERBE pour les cours, dispensés cette année, avec la nouvelle promotion.

Je n'oublie pas non plus les échanges toujours fructueux avec Christophe MARTAYAN, pour nous avoir soutenu lors des TD à Meudon et lors du stage pratique à l'OHP, ainsi que Benoit NEICHEL pour son appui lors des TD.

Et une mention, toute spéciale, à Nathalie et Alexandra, ma femme et ma fille, que je tiens à remercier, pour la patience et la tolérance dont elles ont su fait preuve, pendant ces derniers mois passés à assouvir une passion, à compiler et à rédiger ce mémoire.

Merci à tous.

I. Rappels sur les galaxies

Les galaxies à Noyaux Actifs sont d'abord et avant tout des galaxies. Petit rappel sur ces structures qui peuplent l'univers.

A. Les galaxies 'normales'

Des Univers-iles de Kant du XVIII° siècle et des "nébuleuses" du début du XX°, nous sommes passés aujourd'hui à une connaissance beaucoup plus approfondie des galaxies

Images réalisés par Didier GILBERT avec des télescopes du réseau G.R.A.S, pilotés par Internet.

de gauche à droite, M64, LMC, NGC 4038 et 4039, NGC 1672, NGC 6946

Dans l'univers, les étoiles ne sont généralement pas isolées mais regroupées au sein de vastes ensembles, appelés galaxies.

Une galaxie inclut aussi les gaz et poussières du milieu interstellaire et probablement de grandes quantités de matière sombre. L'ensemble de la matière constituant une galaxie est liée par la gravité et apparaît comme en orbite autour d'une concentration de masse centrale. De nombreux indices suggèrent que le centre de nombreuses galaxies est occupé par un trou noir de masse importante. La Voie lactée, la galaxie dans laquelle se trouve le système solaire, compte quelques centaines de milliards d'étoiles. La plupart des galaxies typiques comportent un nombre similaire d'astres, mais il existe aussi des galaxies naines comptant quelques millions d'étoiles seulement, et des galaxies géantes comptant plusieurs dizaines de milliers de milliards d'étoiles. Sur la base de ces chiffres et de la taille de l'univers observable, on estime que celui-ci compte quelques centaines de milliards de galaxies. L'univers dans son ensemble, dont l'extension réelle n'est pas connue, est susceptible de compter un nombre immensément plus grand d'étoiles.

Les galaxies appartiennent à trois types morphologiques principaux : elliptiques, spirales, irrégulières. Une description plus détaillée des types de galaxies est donnée par la séquence de Hubble. Des résultats récents semblent montrer qu'en réalité, une même galaxie peut passer par différentes formes. Plus précisément, la présence d'une barre dans une galaxie spirale dépendrait de son activité.

Dans les galaxies spirales, les bras ont la forme approximative de spirales logarithmiques. Comme les étoiles, les bras tournent également autour du centre, mais contrairement à celles-ci, ils le font avec une vitesse angulaire constante. Cela signifie que les étoiles passent successivement dans et hors des bras spiraux. On pense que les bras sont des régions de forte densité ou plutôt d'ondes de densité. Lorsque les étoiles et la matière interstellaire traversent un bras, elles ralentissent et de ce fait créent une densité plus élevée.

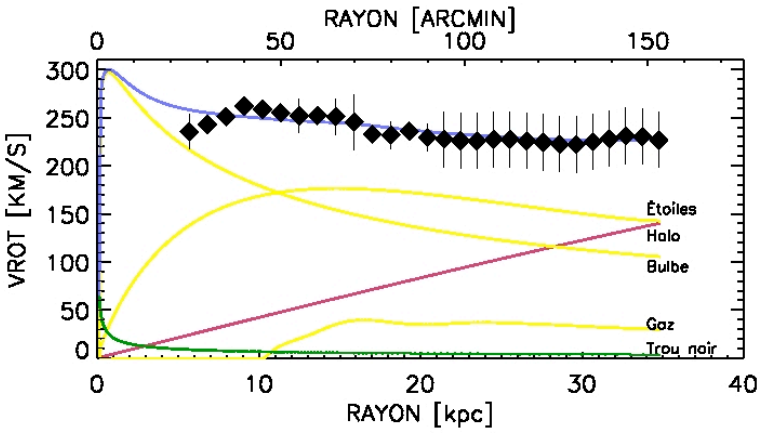
Les bras sont visibles parce que la forte densité qui y règne facilite la formation d'étoiles : ils hébergent donc beaucoup d'étoiles massives (donc jeunes) qui sont très lumineuses.

Comme les étoiles, regroupées en galaxies, la plupart des galaxies sont gravitationnellement liées à d'autres. Une structure contenant jusqu'à une cinquantaine de galaxies est un groupe de galaxies. Une structure contenant plusieurs milliers de galaxies groupées dans un secteur de quelques Mpc est un amas de galaxies. Les groupes et amas de galaxies sont eux-mêmes parfois regroupés en superamas, des collections géantes contenant des dizaines de milliers de galaxies.

À très grande échelle, la distribution des galaxies n'est pas uniforme, mais organisée en feuillets ou en filaments, les amas se trouvant à l'intersection des filaments.

L'espace entre les galaxies est relativement vide, excepté les nuages de gaz intergalactiques.

- **Courbe de rotation des galaxies**



Courbe de rotation de Messier 31. Les carrés pleins représentent les points d'observations, les courbes jaunes la contribution en vitesse de la matière lumineuse (gaz et étoiles du disque, étoiles du bulbe). La courbe verte représente la contribution en vitesse du trou noir central d'une masse ~10^8 $M_\odot$, la courbe mauve celle du halo de matière sombre, la courbe bleue la somme des différentes contributions.

Référence : The Extended H I Rotation Curve and Mass Distribution of M 31, C. Carignan, L. Chemin, W.K. Huchtmeier & F.J. Lockman 2006, The Astrophysical Journal, 641, L109

En analysant le spectre des galaxies spirales vues par la tranche, comme la galaxie d'Andromède, il est possible d'en déduire la courbe de rotation. La courbe de rotation décrit la vitesse de rotation de la galaxie en fonction de la distance au centre. Cette courbe de rotation est une mesure directe de la distribution globale de matière dans la galaxie. La vitesse maximale de rotation d'une galaxie spirale se trouve à quelques kpc du centre, puis elle est censée décroître, en suivant une décroissance képlérienne. En effet, les étoiles à la périphérie de la galaxie sont en orbite autour du centre, de la même manière que les planètes sont en orbite autour du Soleil. Les étoiles en périphérie de la galaxie doivent donc tourner moins vite que celles plus près du centre. La courbe de rotation, après un maximum, doit décroître.

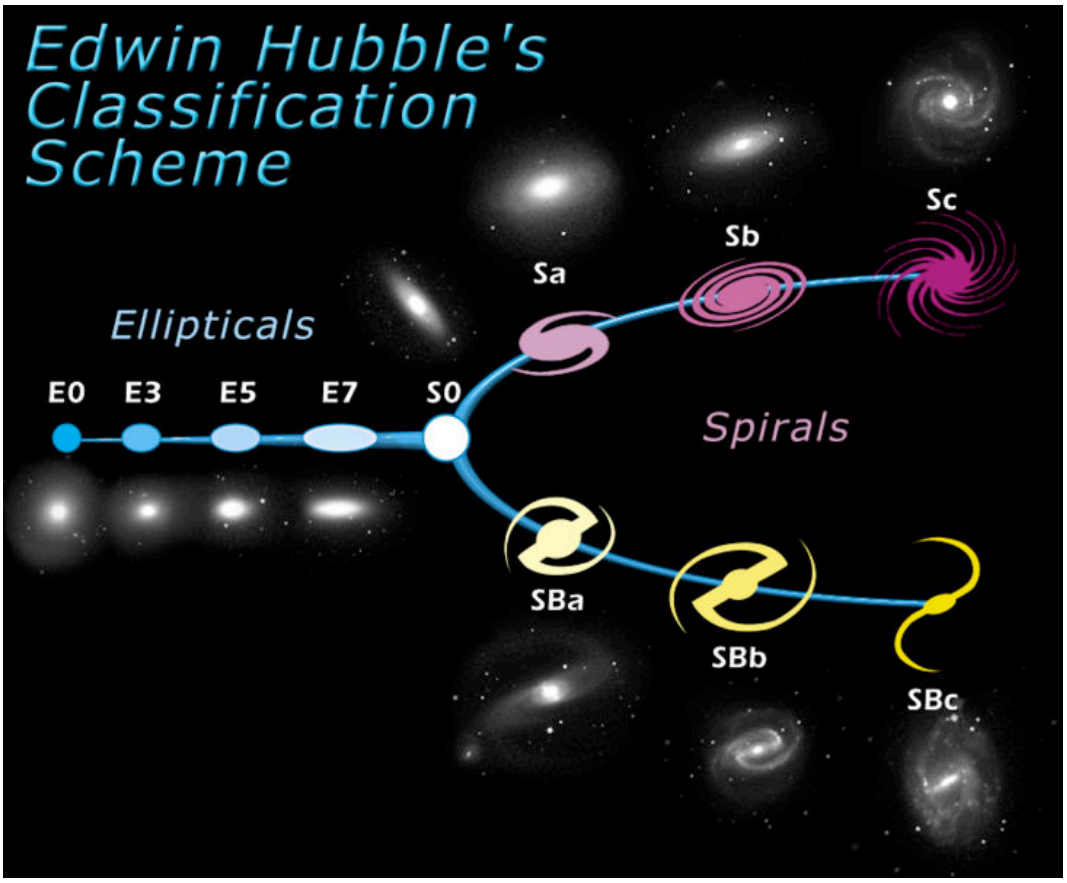
- **La matière sombre**

Dans les années 1970, on réalisa que la masse totale visible, dans les galaxies, des étoiles et du gaz, ne pouvait pas expliquer correctement la vitesse de rotation des galaxies, ce qui amena à postuler l'existence de la matière sombre. Une courbe de rotation plate, et sa décomposition en diverses contributions.

B. Classification

○ Séquence de Hubble

La séquence de Hubble est une classification des types de galaxies basée sur des critères morphologiques et fut développée en 1936 par Edwin Hubble. Les galaxies y sont divisées comme suit :



où E0-E7 désigne les galaxies elliptiques, S0 et SB0 sont les galaxies lenticulaires, un type de transition, Sa-Sc sont les galaxies spirales, SBa-SBc sont les galaxies spirales barrées et Ir (non représentées) sont les galaxies irrégulières

- Les galaxies elliptiques ont une forme ellipsoïdale avec une distribution homogène d'étoiles. Le nombre qui suit la lettre E indique le degré d'excentricité : les galaxies de type E0 sont presque sphérique alors que les galaxies de type E7 sont très aplaties [1].
- Les galaxies lenticulaires semblent avoir une structure en forme de disque avec un bulbe sphérique en leur centre. Elles ne montrent aucun signe de structure en spirale.
- Les galaxies spirales possèdent un bulbe central et un disque périphérique contenant les bras spiraux. Les bras sont centrés autour du bulbe et varient de « fortement enroulés » (Sa) à « très faiblement enroulés » (Sc). Ces derniers ont aussi un bulbe central moins prononcé.
- Les galaxies spirales barrées ont une structure similaire aux galaxies spirales mais plutôt que de partir du bulbe, les bras prennent naissance à l'extrémité d'une « barre » traversant le bulbe. À nouveau, les types SBa à SBc se réfèrent au degré d'enroulement des bras.
- Les galaxies irrégulières ne montrent aucune structure régulière ou discernable et pour cette raison sont considérées à part dans cette classification.

[1] Le nombre n qui suit E, caractérise l'ellipticité de la galaxie, tel que n = 10(a-b)/a, a et b étant les grands axes et petits axes de l'ellipse.

- **Propriétés connues des galaxies (moyenne /source Wikipedia)**

Type de galaxie	Masse ($M_\odot$)	Luminosité ($L_\odot$)	Diamètre (kpc)	Populations stellaires	Pourcentage observé de galaxies
Spirale et spirale barrée	de 10^9 à 10^{11}	de 10^8 à 10^{10}	5 à 250	disque : Population I	77%
				halo : Population II	
Elliptique	de 10^5 à 10^{13}	de 10^5 à 10^{11}	1 à 205	Population II	20%
Irrégulière	de 10^8 à 10^{10}	de 10^7 à 10^9	1 à 10	Population I	3%

Pour sa classification, Hubble se basa sur des photographies des galaxies prises par les télescopes de son époque.

Initialement, il envisagea cette classification comme une séquence évolutive où les galaxies elliptiques étaient une forme primitive pouvant évoluer en galaxies spirales.

Notre compréhension actuelle suggère que la situation est plutôt l'opposé, en particulier parce qu'on ne voit pas comment une galaxie elliptique pourrait acquérir un moment angulaire et les simulations numériques montrent que 2 spirales peuvent donner une elliptique ; cependant Hubble laissa son empreinte dans le jargon des astronomes, qui parlent toujours des galaxies de « type précoce » ou de « type tardif » selon que le type d'une galaxie apparaît vers la gauche ou vers la droite du diagramme.

Des observations plus modernes des galaxies nous ont fourni les informations suivantes sur les différents types de galaxies :

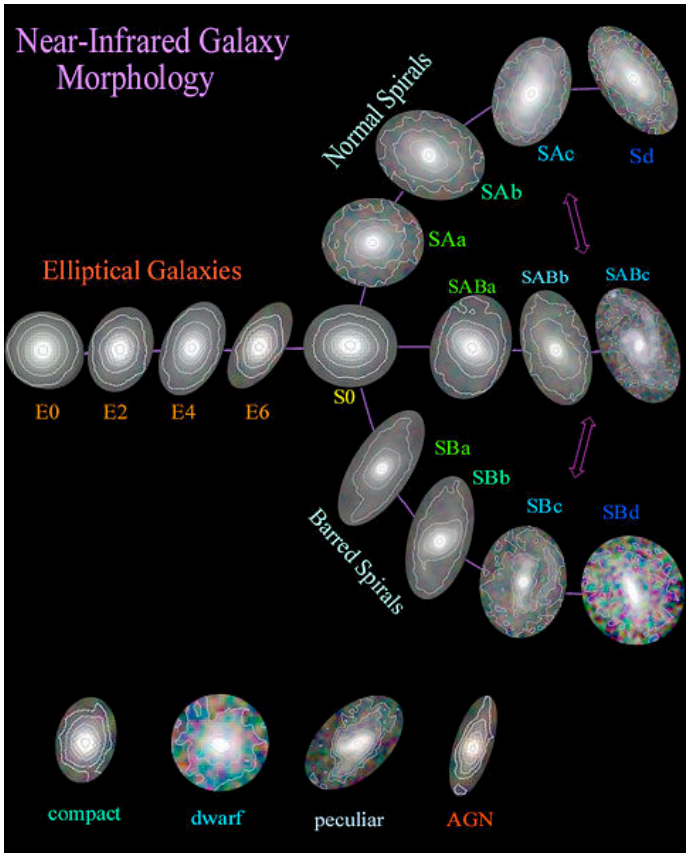
- Les galaxies elliptiques sont pauvres en gaz et en poussières et se composent principalement d'étoiles âgées
- Les galaxies spirales sont généralement riches en gaz et en poussières et possèdent un mélange d'étoiles jeunes et plus âgées
- Les galaxies irrégulières sont assez riches en gaz, poussière et en étoiles jeunes

À partir de ces informations, les astronomes ont construit une théorie de l'évolution des galaxies qui suggère que les galaxies elliptiques sont, en fait, le résultat de collisions entre galaxies spirales et/ou irrégulières ; collisions qui favorisent la génération d'étoiles par génération d'ondes de densité et qui dépouillent les galaxies en interaction d'une partie du gaz et des poussières et redistribuent de façon aléatoire les orbites des étoiles.

- **Classification de 'De Vaucouleurs'**

Le système de classification de Gérard de Vaucouleurs, date de 1959 et est une extension largement utilisée de la classification de Hubble. De Vaucouleurs argumenta que la classification en 2 dimension de Hubble, basée sur l'ouverture des bras et la présence ou l'absence de barre, ne décrivait pas complètement la diversité de morphologie des galaxies observées. En particulier, il déclarait que les anneaux et les lentilles étaient des composantes structurelles importantes des galaxies spirales.

Il introduisit un système de classification plus élaboré pour les galaxies spirales, basé sur 3 morphotypes :



• Les barres : les galaxies sont divisées sur la base de présence ou d'absence de barre centrale. De Vaucouleurs introduisit la notation SA (pendant des SB de Hubble) pour les galaxies spirales sans barre centrale. Il ajouta également une classe intermédiaire, notée SAB, galaxies présentant une faible barre centrale. Il fit de même pour les lenticulaires sans barre (S0A) ou barrée (S0B), S0 étant réservé à celles pour lesquelles il était impossible de se prononcer (généralement vues par la tranche).

•Anneaux : les galaxies sont divisées entre celles qui possèdent une structure en anneau (notée 'r'), celles sans (notées 's') et celles notées 'rs', appelées 'de transition'.

•Les bras spiraux : comme dans le schéma original de Hubble, l'assignation se fait selon l'ouverture des bras (de a à d).

De Vaucouleurs étend le schéma de Hubble et y inclut plusieurs classes additionnelles :

- Sd (SBd) - diffus, bras découpés présentant des amas d'étoiles individualisés et des nébuleuses. Bulbe central très peu lumineux
- Sm (SBm) - apparemment irrégulière, sans bulbe visible
- Im - galaxie très irrégulière

La plupart de ces 3 classes de galaxies sont classées Irr 1 dans le schéma originel de Hubble.

En plus, la classe Sd contient certaines des galaxies de la classe Sc de Hubble. Les galaxies de la classe Sm et Im font références aux spirales et irrégulières de type 'Magellan', d'après les LMC et SMC. Le LMC est de type SBm alors que le SMC est classé Im.

Les différents éléments du schéma de classification sont combinés - dans l'ordre de la liste - pour donner la classification complète. Ainsi, une galaxie faiblement barrée, avec des bras déroulés et un anneau est notée SAB(r)c.

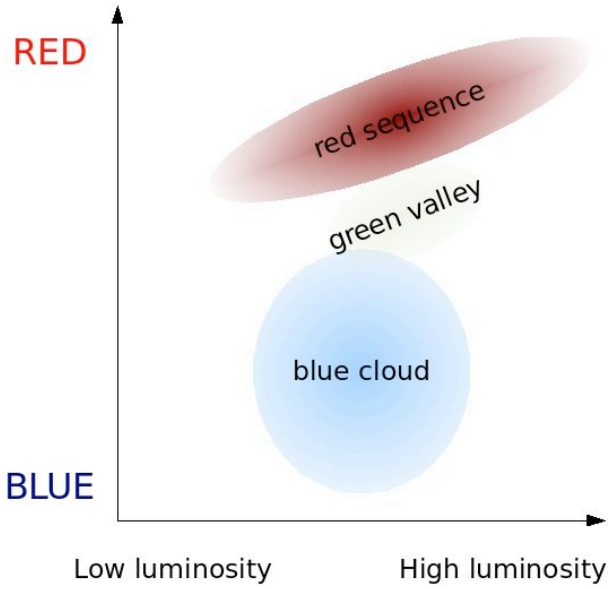
Visuellement, le système de de Vaucouleurs peut être représenté comme une version en 3-D de la classification de Hubble, avec l'étape spiralée sur l'axe des x, l'étape barrée sur celui des y et l'étape annelée sur l'axe des z.

Malgré tout, les dernières avancées (simulations numériques) semblent indiquer que rien n'est figé et que les galaxies peuvent passer par des stades de galaxies barrées successifs. Ce qui semble rendre ces classifications uniquement valables à l'instant de la découverte ou de l'observation de la galaxie [2].

[2] F. Combes, Notice des Travaux Scientifiques, OBSPM

- **Diagramme couleur-magnitude des galaxies**

Le diagramme couleur-magnitude des galaxies montre la relation entre la magnitude absolue, la luminosité et la masse des galaxies. Une description préliminaire des 3 aires a été faite en 2003 par Eric F. Bell et al. à partir du relevé COMBO-17 qui clarifia la distribution bi-modale des galaxies rouges et bleues telles qu'elles sont vues dans l'analyse des données du Sloan Digital Sky Survey et même dans l'analyse faite par de Vaucouleurs en 1961 sur la morphologie des galaxies.



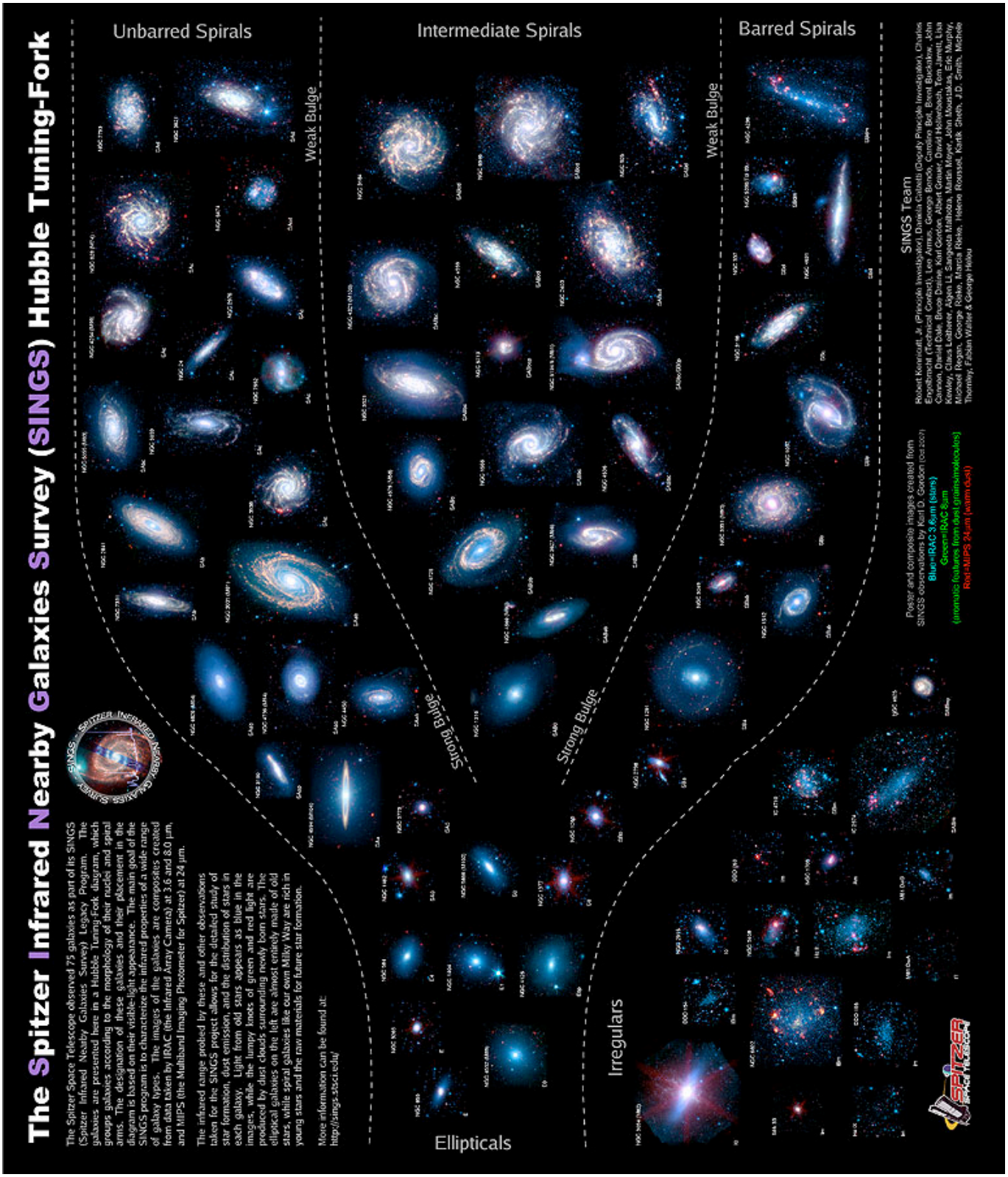
3 zones principales dans ce diagramme :

- *La séquence rouge qui inclut la plupart des galaxies 'rouges', généralement des galaxies elliptiques*
- *La vallée 'verte', entre les deux, dans laquelle se trouvent un certain nombre de galaxies spirales rouges.*
- *Le nuage 'bleu', qui comprend séquence rouge qui inclut la plupart des galaxies 'rouges', généralement des galaxies elliptiques*

Contrairement au diagramme HR, pour les étoiles, les propriétés des galaxies ne sont pas complètement, ni obligatoirement déterminées par leur localisation dans ce diagramme. Il montre également une évolution considérable dans le temps. La séquence rouge, plus précoce, dans l'évolution de l'Univers était plus constante en magnitudes, alors que le nuage bleu, moins uniformément distribué, montre la progression de la séquence.

C. L'EXPANSION DE L'UNIVERS ET LA LOI DE HUBBLE

Hubble découvrit également que les galaxies (hors du groupe local) avaient tendance à présenter des spectres décalés vers le rouge. Ce décalage spectral s'explique si on admet que les galaxies distantes s'éloignent de nous et ce à une vitesse proportionnelle à leur éloignement (en première approximation, du moins). Hubble en établit donc une loi utilisée quotidiennement pour les calculs de distances cosmologiques.



Lors d'un relevé de galaxies proches par le télescope spatial infrarouge Spitzer (Spitzer Infrared Nearby Galaxies Survey - SINGS), 75 galaxies ont été utilisées pour reprendre la classification de Hubble. Les galaxies sont réparties selon leur morphologie, dans les différentes classes prédéfinies.

II. Historique

L'étude des Galaxies à Noyaux Actifs (AGN) est un des thèmes les plus dynamiques de l'astronomie contemporaine, impliquant ~20% des astronomes professionnels [3].

Il existe des astres, apparemment banaux, qui émettent trop d'énergie pour obéir aux modèles d'évolutions standards. Les astrophysiciens les ont rassemblées dans la catégorie des objets quasi stellaires (QSO). On retrouve dans cette famille des galaxies à noyau actif, les galaxies de Seyfert, les objets BL Lacertae, les quasars, les radiogalaxies, voire des galaxies elliptiques géantes. Toutes témoignent d'une intense activité. En réalité il ne s'agit pas d'étoiles mais bien d'amas d'étoiles ou d'objets ressemblant à des galaxies mais révélant une activité extraordinaire qui est sans commune mesure avec celle de la Voie Lactée ou des galaxies proches. Ces AGN mettent en œuvre quelques-unes des plus extrêmes conditions et quelques uns des phénomènes les plus intrigants de l'univers.

A. Découverte et Identification

Le premier spectre d'une galaxie active a été obtenu à l'observatoire Lick par E.A. Fath en 1908 lors d'un travail d'étude. Il nota la présence de fortes raies d'émission dans le "nébuleuse" NGC 1068. Campbell et Moore trouvèrent également des raies d'émission dans le spectre de NGC 4151 [4] . Hubble évoque la similitude des raies d'émission avec celles des nébuleuses planétaires. Puis V.M. Slipher en 1917, à l'observatoire Lowell, obtint un spectre de bonne qualité, à haute résolution, de NGC 1068 et confirma les dires de Hubble. Il fit également le constat que ces raies étaient résolues et présentaient des valeurs de centaines de km.s^{-1} [5].

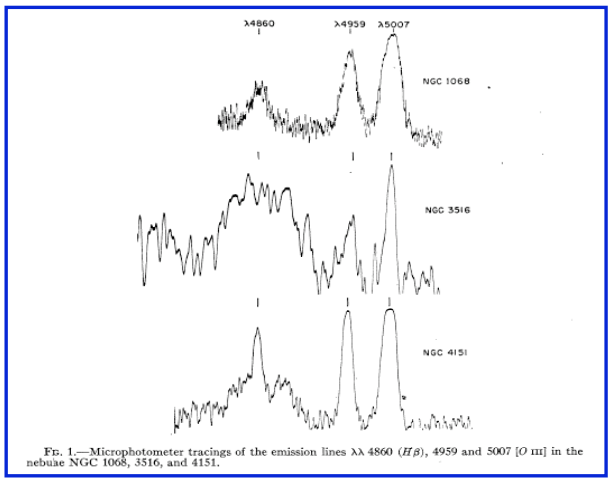


Fig. 1.—Microphotometer tracings of the emission lines λλ 4860 (*Hβ*), 4959 and 5007 [*O* III] in the nebulae NGC 1068, 3516, and 4151.

Carl Seyfert, en 1943 [6], fut le premier à réaliser qu'il y avait plusieurs galaxies similaires [7], qui formaient une classe distincte. Il sélectionna un groupe d'une douzaine de galaxies sur la base d'une grande brillance de surface centrale (comme les noyaux ponctuels).

Il obtint les spectres de ces galaxies et découvrit que le spectre visible de plusieurs de ces galaxies (NGC 1068, NGC 1275, NGC 3516, NGC 4051, NGC 4151 et NGC 7469) étaient dominés par des raies d'émission de forte ionisation.

[3] Galaxies in turmoil, the active and starburst galaxies and the black holes that drive them, Chris Kitchin, 2006.

[4] The Spectrum and Radial Velocity of the Spiral Nebula N. G. C. 4151, Publications of the Astronomical Society of the Pacific, Vol. 30, No. 173, p.68.

[5] The spectrum and velocity of the nebula N.G.C. 1068 (M 77), Lowell Observatory Bulletin, vol. 1, pp.59-62.

[6] Seyfert, C. K. 1943, Nuclear Emission in Spiral Nebulae, ApJ, 97, 28S.

[7] Carl SEYFERT s'est concentré sur 6 d'entre elles : NGC 1068, NGC 1275, NGC 3516, NGC 4051, NGC 4151 et NGC 7469.

Les caractéristiques importantes de ces spectres sont :

- Les raies sont larges (vitesses jusqu'à 8500 km.s^{-1} pour les raies permises)
- Les raies de l'hydrogène sont parfois plus larges que les autres raies.

Dans les années 50, Les premières identifications, en optique, des radiogalaxies [8] sont réalisées. En 1954, Baade et Minkowski [9] mettent en évidence l'aspect particulier de l'interaction entre galaxies aux coordonnées de Cygnus A. Il déterminent que l'énergie émise est énorme : 8.10^{42} erg.sec^{-1} en radio et 6.10^{46} erg.sec^{-1} dans le domaine optique, valeurs très largement sous-estimées en raison de la valeur de H_o utilisée (540 km.sec^{-1}.Mpc^{-1} !)

En parallèle et en une dizaine d'années, entre 1948 et 1958, les radioastronomes anglais de Jodrell Bank cataloguèrent quelque 500 objets quasi-stellaires dont environ 30 % se superposaient à des objets visibles. Ils constituèrent le catalogue 3C, d'où fut ensuite extrait en 1962 le catalogue 3CR ou troisième catalogue révisé de Cambridge (A.S.Bennett).

La découverte des quasars découle de ces premiers relevés radio du ciel à la fin des années 50.

En 1959, Burbidge [10] conclut, pour de simples questions énergétiques, que ces objets devaient contenir une formidable quantité d'énergie sous forme de champs magnétiques et/ou de particules relativistes. L'énergie considérée étant estimée à ce que devraient donner la transformation de 10^6 et 10^8 $M_\odot$. Les galaxies de Seyfert ne furent plus d'actualité jusqu'en 1959, quand NGC 1068 et NGC 1275 furent identifiées comme radiosources par Burbidge, Burbidge et Prendergast [11].

De son côté, L. Woltjer, en 1959, fit la première tentative pour comprendre la physique des galaxies de Seyfert et nota ce qui suit [12] :

- Les noyaux restent non résolus, donc la taille du cœur est inférieure à 100 parsec (pc) (mesures de l'époque).
- L'émission du noyau doit durer plus de 10^8 années, car les galaxies de Seyfert ne représentent que ~1% des galaxies spirales [13].
- Si les matériaux du noyau sont liés par la gravitation, la masse du noyau doit être extrêmement élevée, selon le théorème de Viriel (cf. Annexe D).
- La dispersion de vitesse est obtenue à partir de la largeur des raies d'émission et est de l'ordre de 10^3 km.s^{-1}. Il existe une limite supérieure à la taille du noyau ($r \leq 100$ pc) du fait de la non-résolution spatiale. Les raies d'émission sont caractéristiques de gaz faiblement dense, qui apporte une limite inférieure ($r \geq 1$ pc). Donc la masse du noyau peut être déduite et vaut $M \approx 10^{9\pm1}$ $M_\odot$.

Selon cette dernière valeur, quelque chose d'extraordinaire se produit au centre des galaxies de Seyfert. En considérant pour acquise une grande valeur de r, on peut alors conclure qu'à peu près 10 % de la masse de la galaxie est contenue dans un volume d'~100 pc de diamètre.

---

[8] Bolton, Stanley & Slee, 1949, Positions of three discrete sources of Galactic radio frequency radiation, Nature, Vol. 164, pp. 101.

[9] Identification of the Radio Sources in Cassiopeia, Cygnus a, and Puppis a, ApJ, 119, 206.

[10] Burbidge, G. R. 1959, ApJ, 129, 849.

[11] Burbidge, E. M., Burbidge, G. R. & Prendergast, K. H. 1959 ApJ, 130, 26.

[12] Woltjer, L. 1959, Emission Nuclei in Galaxies, ApJ, 130, 38.

[13] Argumentaire très simple : il suffit de poser l'hypothèse que les galaxies de Seyfert ont toujours été des galaxies de Seyfert, auquel cas, leur durée de vie est celle de l'univers soit ~10^{10} années, à contrario, on peut penser que toutes les spirales passent par une phase "Seyfert"; comme 1 % des Seyfert sont des spirales, et tenant compte du fait que l'âge de l'univers est de 10^{10} ans, $10^{10}/10^2 = 10^8$ années.

D'un autre côté, si r est plus petit que la limite supérieure déduite de la résolution spatiale des observatoires au sol, alors se pose le problème de la génération d'une telle quantité d'énergie dans un si petit volume.

Pendant les années soixante le catalogue 3CR joua un rôle prépondérant, car couvrant les fréquences radios, X et UV il offrait aux astronomes une couverture complète du ciel dans des limites bien précises. D'autre part, son spectre de fréquences était beaucoup moins sensible à l'absorption galactique et aux rayonnements parasites émis par les sources galactiques.

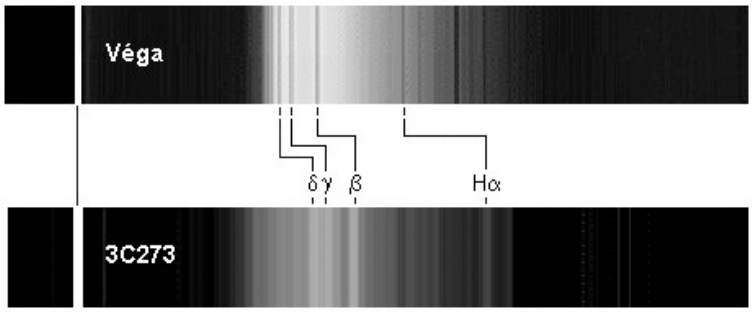
Ce catalogue s'avéra très vite être relativement homogène et complet et les astronomes tentèrent d'identifier des contreparties optiques, c'est-à-dire des sources de rayonnement dans le domaine visible du spectre électromagnétique, à ces radiosources. Il s'agissait le plus souvent de radiogalaxies, objets étendus sur le ciel mais peu lumineux. C'est à cette occasion que furent découverts, en 1961, les premiers "quasars", d'apparence stellaire sur les plaques photo d'où ce néologisme, pour "quasi-stellar radio source". Environ 60 quasars furent identifiés dont 15 appartenaient déjà au catalogue optique NGC de Dreyer. Les quasars ainsi obtenus étaient aussi appelés QSS, pour Quasi-Stellar-Sources..

Mais la chasse aux BSO (pour Blue Stellar Objects) restait et demeure une tâche difficile à réaliser dans le visible. En effet, les indices de couleur (U-B) et (B-V) du spectre continu des quasars sont très différents de la couleur de la plupart des étoiles. La définition de leur magnitude est basée sur l'étoile Véga, une étoile blanche relativement brillante de la constellation de la Lyre située au zénith dans le ciel boréal d'été dont la magnitude visuelle U-B = B-V = 0, les étoiles plus froides ayant un indice de couleur positif. L'identification d'un quasar s'établit par le fait que l'indice U-B est trop négatif par rapport aux étoiles, car ils présentent un excès d'UV. Les seules étoiles pouvant mimer l'indice de couleur des quasars étant en fait de jeunes étoiles naines blanches. De nombreux catalogues optiques de quasars sont ainsi contaminés par des étoiles mais heureusement leur nombre chute rapidement avec la magnitude. Ainsi, jusqu'à la magnitude 16 ces catalogues peuvent contenir plus de 95 % d'étoiles mais seulement 5 % à la magnitude 22. Il est donc impossible de savoir sur la seule base de l'indice de couleur UBV si un candidat est un quasar si on ne prend pas la peine d'analyser son spectre.

<En 1957 le quasar Tonantzintla 202 était classé comme étoile et ne changea de statut que lorsque les astronomes analysèrent son spectre en 1960, quelques années avant 3C273 et 3C48. Mais à cette époque il était encore considéré comme une vieille nova ou une étoile naine atypique. Il ne sera vraiment classé comme quasar qu'en 1966.>

En utilisant des prismes ou des réseaux de diffraction d'une résolution de 1000 à 2000 Å/mm devant le champ couvert par leurs puissants télescopes, les équipes d'astronomes, rassemblées autour de A.Savage et consorts, identifièrent rapidement les quasars les plus brillants car ils présentaient des raies d'émission intenses, ne laissant planer aucun doute sur la nature d'un candidat au titre de quasar plutôt qu'à celui d'étoile chaude. Un autre indice spectral révélateur était qu'à côté des intenses raies de la série de Balmer de l'hydrogène, la raie Lyman α qui se situe normalement à 360 nm apparaîssait dans les longueurs d'ondes visibles pour z-2.

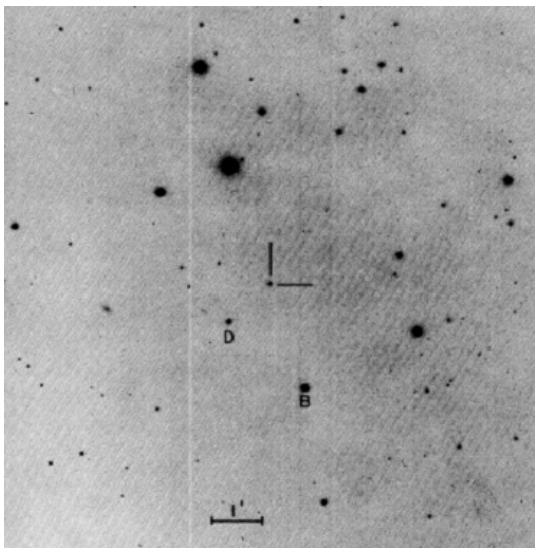
Tant que la raie Lyman α restait dans la partie ultraviolette du spectre (bande U) les quasars apparaissaient plus bleus qu'ils n'étaient en réalité mais cela n'entravait pas leur recherche sur base du critère BSO. Mais dès lors que la raie Lyman α se décalait vers la bande B (440 nm) l'indice de couleur U-B rougissait. Cela se produisait pour z ~ 2.1, et entachait grandement leur détection pour des redshift supérieurs. C'est la raison pour laquelle les catalogues établis sur base de l'indice de couleur sont de plus en plus incomplets à mesure que les quasars deviennent plus pâles.



Ci-dessus le spectre de 3C273 comparé à celui de Véga. Son profil révèle qu'il n'a rien de comparable à celui d'une étoile. Son décalage Doppler indique qu'il s'agit bien d'un objet extragalactique distant d'au moins 2 milliards d'années-lumière. Ce document de Maurice Gavin a été obtenu avec un télescope Meade de 300mm LX200 muni d'un réseau et d'une caméra CCD MX9. Pose de 24 minutes. M.Gavin fut le premier amateur qui obtint dès 1998 des spectres exploitables des quasars. Il sera suivi par K.Tanaka qui utilisa un Celestron de 200 mm d'ouverture. Présentation adaptée.

Le professeur Martin Ryle soupçonnait que les quasars se trouvaient en-dehors de la Voie Lactée mais l'équipe de Cambridge ne parvint pas à le démontrer. En 1961, Allan Sandage [14] découvrit que 3C48 se confondait avec une banale étoile bleue présentant de larges raies d'émissions à différentes longueurs d'ondes. Son continuum bleu suggérait l'émission d'un rayonnement synchrotron. Observée avec le télescope de 5 m du mont Palomar, elle révéla une étrange nébulosité qui s'étendait de part et d'autre de son noyau. Subissant des variations de luminosité en moins de 24 heures, cet objet ne devait pas être beaucoup plus étendu que le système solaire, eu égard au temps de propagation de la lumière.

La plupart des radiosources à haute latitude galactique ont été identifiées avec des galaxies résolues. Cependant, les positions de certaines de ces radiosources coïncidaient avec des objets stellaires ponctuels sur les images réalisées comme celle du Palomar Sky Survey. La première source radio puissante associée, sans ambiguïté, avec une source stellaire a été 3C 48. Les astronomes détectèrent ce qui paraissait être une pâle étoile bleue à l'endroit des sources radios et obtinrent son spectre. Contenant énormément de raies d'émission inconnues (le spectre irrégulier défiait toute interprétation), la revendication de John Bolton parlant d'un grand redshift ne fut pas acceptée.



carte de champ de 3C 273

(Hazard, Mackey, Shimmins, 1963)

En 1962, suite à l'observation d'une occultation lunaire, le radioastronome Cyril Hazard [15] et ses collègues alors à l'Université de Sydney parvinrent à déterminer la position précise du puissant émetteur 3C273 et l'associèrent à une pâle étoile de magnitude 13 de la constellation de la Vierge.

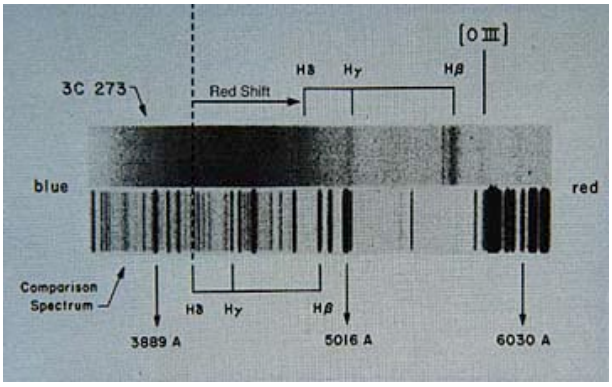
Pour Allan Sandage et le couple Burbidge [16] - celui de l'article B^2FH sur la nucléosynthèse - ces galaxies étaient plus que des assemblages d'étoiles et de gaz : certaines avaient des noyaux brillants dont les émissions ne correspondaient pas à celles d'étoiles normales.

Le spectre de 3C273 par exemple n'était pas celui d'une galaxie ni celui d'une étoile. La disposition des raies d'émission de l'hydrogène et de l'oxygène suivaient exactement les mêmes configurations que les raies spectrales des étoiles, mais elles étaient très larges et 4 à 5 fois plus éloignées de leur position "normale" par rapport aux raies d'un spectre stellaire, ce qui était très inhabituel. On découvrit enfin qu'il présentait un jet d'hydrogène très particulier équivalant à des dizaines de millions de $M_\odot$.

[14] A. Sandage, "Sky & Telescope", 21, 1961, p148.

[15] C. Hazard, M. Mackey et A. Shimmins, Nature, 197, 1963, p1037; M. Schmidt, p1040.

[16] G. Burbidge, M. Burbidge, A. Sandage, Review of Modern Physics, 35, 1963, p947.



Spectre de 3C 273 (Schmidt, M. 1963)

L'astronome hollandais Maarten Schmidt, du Caltech, prit alors un spectre de 3C 273, qui révéla d'intenses raies larges, non identifiée. Il était peu évident pour les premiers chercheurs, si ces élargissements de raies étaient des raies d'émission ou simplement le continu entre des raies d'absorption générales, comme dans les spectres de naines blanches. La photométrie de ces objets révéla qu'ils étaient anormalement bleus (comparés aux étoiles normales).

Sur la base de ses coordonnées, Matthews et Sandage, en 1963, découvrirent que la contrepartie visuelle était une étoile de 16ème magnitude [17]. Mais les images des spectres obtenus provoquaient la confusion, car ils montraient de très puissantes raies d'émission élargies, à des longueurs d'onde non identifiées.

Le premier déclic dans la compréhension de ces objets extraordinaire vint de Schmidt [18], qui réalisa que les raies d'émission étaient en fait les raies d'émission de la série de Balmer de l'hydrogène à un redshift inattendu de z = 0,158 [19]. Cet objet se déplaçait à 15.8% de la vitesse de la lumière et se situait à une distance d'environ 2 milliards d'années-lumière et cette "étoile" brillait avec la luminosité de 10^{14} soleils, l'équivalent de 1000 galaxies comme la Voie Lactée ou M 31 !

De quoi s'agissait-il donc ?

Caractéristiques recensées :

- Indice de couleur particulier (V=16.06 ; B-V=0,38 ; U-B=-0,61)
- Très larges raies d'émission
- Variabilité de la luminosité (± 0,4 mag)

Ce redshift était d'un ordre plus grand que celui des galaxies de Seyfert et l'un des plus grands mesurés à l'époque. De fait l'interprétation qui en fut faite, fut qu'il était d'origine cosmologique, conséquence de l'expansion de l'Univers. 3C 273 était et reste l'un des plus brillants quasars connus (m_B = 13,1).

Selon la loi de Hubble et la valeur de la constante de l'époque (H_o = 100 km.s^{-1}.Mpc^{-1}), pour d = cz/H_o = 474 Mpc et un diamètre de 1 kpc.

Immédiatement, Jesse Greenstein et Tom Matthews [20] ressortirent le spectre de 3C 48 et identifièrent les raies de Balmer et celle de MgII$_{\lambda 2798}$ (en UV), toutes décalées de 37%, soit z=0,3675. Sur la base de la valeur de H_o utilisée (100 km.s^{-1}.Mpc^{-1}), ils en déduisirent une distance de 1100 Mpc, soit 3,6 milliards d'années-lumière et une magnitude absolue M = -24,3.

De part la variabilité de 3C 48, en raison de la distance donnée et de la luminosité calculée, on estima que la région d'où émanait toute cette énergie était plus petite que 0,15 pc.

L'équipe de Sandage confirmait l'hypothèse de Martin Ryle. Les quasars étaient bien des objets extragalactiques, intrinsèquement très brillants.

---

[17] Optical Identification of 3c 48, 3c 196, and 3c 286 with Stellar Objects, Astrophysical Journal, vol. 138, p.30

[18] M. Schmidt, Nature, 197, 1963, p1040.

[19] 3C 273 : A Star-Like Object with Large Red-Shift, Nature 197, 1040.

[20] Greenstein et T. Matthews, Nature, 197, 1963, p1041.

Leur importance probable fut reconnue immédiatement et un premier congrès se tint à Dallas dans la foulée. Ce sont les "Texas symposium" qui, maintenant, ont lieu tous les 2 ans.

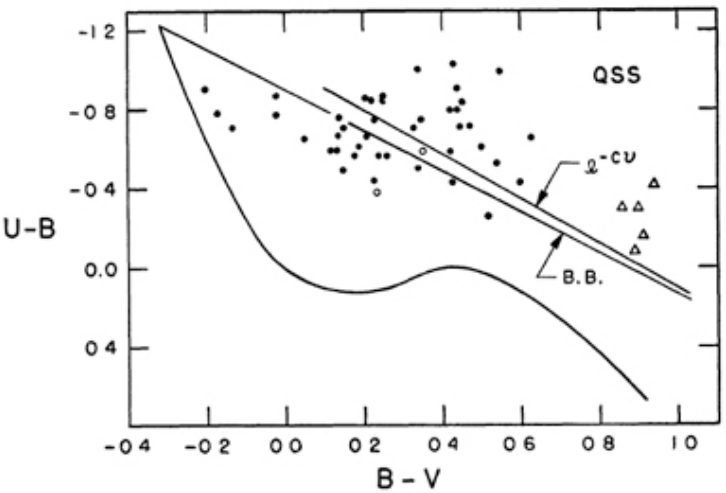
Les luminosités extrêmement fortes de ces objets impliquaient des processus physiques extrêmes qui ne furent découverts nulle part dans l'Univers proche. Et comme la nature de ces objets lumineux était incomprise, ils furent dénommés 'quasi-stellar radiosources', qui fut réduit à 'quasars' [21].

Dès 1964, Zel'dovich et Novikov suggérèrent l'implication d'un trou noir massif [22]. Le rôle probable des noyaux actifs dans la formation et l'évolution des galaxies avait également été évoqué par Burbidge, Burbidge et Sandage en 1963 [23]. La grande luminosité des quasars implique également qu'ils pouvaient servir de preuves cosmologiques du fait de leur possible détection et identification à très grande distance.

Fin 1964, Schmidt avait étudié suffisamment de quasars pour définir leurs propriétés.

- Objets de type stellaire, identifiés comme radiosources
- Flux du continu variable dans le temps
- Flux UV important
- Raies d'émission élargies
- Grand redshift (c-a-d, z < 1 en 1964)

En 1965, 44 radiosources étaient identifiées à des quasars (Sandage, 1965) [24].



Après 1965, lors de ces recherches sur un excès d'UV, Sandage met en évidence des objets qui ont les mêmes caractéristiques optiques que les radiosources quasi-stellaires mais sans contrepartie radio. Les redshifts sont élevés, la magnitude absolue moyenne dans le bleu est $M_B \approx -25$. Sandage appelle ces objets des galaxies quasi-stellaire (QSS) [24] . (courbes de droite).

Ces considérations ont apporté une forte motivation à la recherche de quasars et à l'étude de leurs propriétés. Au fur et à mesure de l'augmentation du nombre de quasars connus, le redshift s'accrût et au milieu des années 90, les plus grands redshifts avoisinaient $z \approx 5$.

---

[21] Le terme de quasar est attribué à H.-Y. Chiu (1964).
"Pour l'instant, le mot plutôt maladroit et indéterminable de "quasi-stellar radiosource" est utilisé pour décrire ces objets. Comme la nature de ces objets nous est complètement inconnue, il est difficile de leur donner une nomenclature courte et appropriée, même si leurs propriétés essentielles viennent de leur nom. Par esprit pratique, la forme abrégée "quasar" sera utilisée tout au long de cet article." (Hong-Yee Chiu, Physics Today, Mai 1964).
Nota : Il fallut quelque temps pour que le terme soit en usage au sein de la communauté astronomique, à tel que point que sous la houlette de S. Chandrasekhar, l'Astrophysical Journal résista à employer le terme de 'quasar' durant de nombreuses années, cédant en 1970 (Schmidt). Un vote informel, au terme du second "Texas Symposium" sur l'Astrophysique Relativiste en 1964, reçu 20 voix pour et 400 contre ou abstention (Robinson, Schild et Schuking, 1965).

[22] Mass of Quasi-Stellar Objects, Soviet Physics Doklady, Vol. 9, p.834

[23] Evidence for the Occurrence of Violent Events in the Nuclei of Galaxies, Reviews of Modern Physics, vol. 35, Issue 4, pp. 947-972

[24] The Existence of a Major New Constituent of the Universe: the Quasistellar Galaxies, Astrophysical Journal, vol. 141, p.1560.

En 1966, Martin Rees prédit [25] qu'un objet en déplacement relativiste dans une direction adéquate devait apparaître avec une vitesse tangentielle supérieure à c.

En 1968, une similarité des propriétés des quasars et des galaxies de Seyfert relance l'intérêt pour ces objets [26].

A la fin des années 60, les astronomes commencèrent à rechercher systématique les quasars en utilisant exclusivement leurs propriétés optiques, avec les dangers de confusions déjà évoqués. Ils ont ainsi constaté que les quasars radio (QSS) ne constituaient qu'une petite fraction des quasars (QSO). Pour chaque QSS il y a environ 100 QSO. G.Burbidge estime que jusqu'à la magnitude 20 il existerait environ un million de quasars répartis sur toute la voûte céleste tandis qu'une estimation de D.Weedman [27] porte à quelque 100 millions le nombre de quasars accessibles jusqu'à la magnitude 26, ce qui représente quelque 2000 objets pour chaque degré carré du ciel !

Quelques années plus tard (1970) d'autres sources furent découvertes en tant que radiosources à des distances cosmologiques (radiogalaxies et quasars). Elles furent dénommées sources "superluminiques". La découverte était un résultat spectaculaire de la nouvelle technique (à l'époque) du VLBI, qui permet aux astronomes de déterminer les positions à le milli-seconde d'arc près et de déterminer les changements de positions dans le ciel, que sont les mouvements propres sur une période typique de une année. La vitesse apparente est obtenue en multipliant le mouvement propre par la distance et peut être supérieure à 6 fois la vitesse de la lumière (jusqu'à 30c).

Dans les années qui suivirent, c'est le nombre de galaxies de Seyfert répertoriées qui va croître considérablement, grâce à l'étude des catalogues de Zwicky (galaxies compactes) et de Markarian (objets à excès de luminosité en UV). Aujourd'hui, 10 % des galaxies de Markarian sont des Seyfert.

Dans les années 70, l'étude de spectres par Weedman [28], va le conduire à établir deux sous-classes en fonction de la largeur des raies d'émission.

- Les Seyfert de type 1 qui possèdent des raies d'émission large de l'hydrogène et aussi des raies plus étroites.
- Les Seyfert de type 2 dont les raies de l'hydrogène et les raies interdites sont étroites

De gauche à droite les prof. Martin Ryle (1974), Allan Sandage et Jesse Greenstein (1966). Documents Sonoma State University et U. Cambridge, Sandage, Caltech.

[25] Appearance of Relativistically Expanding Radio Sources, Rees, M. J., Nature, Vol. 211, pp. 468

[26] Proceedings of the conference on Seyfert galaxies and related objects, University of Arizona, AJ, 73, 1968.

[27] D. Weedman, "Quasar astronomy", op.cit., p44.

[28] A Spectroscopic Study of Luminous Galactic Nuclei, Bulletin of the American Astronomical Society, Vol. 3, p.237.

En 1979, l'effet de lentille gravitationnelle prédit par la théorie de la relativité générale d'Einstein fut confirmée lors de l'observation des premières images du double quasar 0957+561.

Dans les années 80, on connaissait très peu de radiosources dont le décalage vers le rouge était supérieur à 3. Le redshift des quasars OQ172 et 1351-018 oscille entre 3.4 et 3.71. Ces deux objets sont situés vers 12 milliards d'années-lumière.

Les similarités entre les quasars et les galaxies de Seyfert (surtout celles de Type I) continuent à alimenter les recherches, tendant à prouver la continuité entre toutes les composantes. Une étape décisive sera franchie en 1983, par Morgan W. W. et Dreiser R. D. qui établiront une progression depuis NGC 4151 (Seyfert), en passant par IIZw1, IZw1 jusqu'au quasar 3C 48 [29].

Antonucci & Miller, en 1985, évoquent pour la première fois l'influence de l'orientation du point de vue, ce sera le modèle unifié. Il sera ensuite affiné par Megan URRY and Paolo Padovani, en 1995.

En 1986, C. Hazard [30] et son équipe découvrirent un quasar ayant un redshift de 3.8 mais vu leur petit nombre à de si grandes distances, on considérait qu'il n'existait pratiquement plus de quasars au-delà de cette valeur. Or, depuis 1986 les équipes dirigées par Schmidt, Gunn et Spinrad ont découvert plus de dix quasars dont le redshift est supérieur à 4 dont SDSS 1044-0125 en mars 2000 dont le redshift atteint 5.82.

En 1989, Sanders et al. [31] étudièrent la SED d'un panel de quasars et conclurent à la présence d'un composante thermique du spectre et évoquèrent des explications au Big blue bump.

Dans un synthèse de 1993, Donald E. Osterbrock écrit [32]:

"Les noyaux actifs de galaxies semblent former une seule famille, depuis les galaxies de Seyfert jusqu'aux objets quasi-stellaires (QSO) et des radiogalaxies aux radiosources quasi-stellaires (quasars)".

Le 15 avril 1999 le magazine Nature rapportait que le record était à présent détenu par H-W. Chen, K.M. Lanzetta et S. Pascarelle de l'Université d'Etat de New York qui découvrirent, grâce à Hubble, une galaxie de 28ème magnitude dans la Grande Ourse, non encore baptisée. Dans son spectre les photons UV sont décalés dans le proche IR. Son redshift vaut 6.68 et correspond à une vitesse valant 95 % de celle de la lumière ! Il se trouve à une distance supérieure à 13 milliards d'années-lumière, soit ~ 5 % de l'âge de l'univers. Toutefois, ces objets ne sont pas les plus lointains découverts dans l'univers.

Tous les objets aujourd'hui appelés Noyaux Actifs de Galaxies ne partagent pas tous les critères énumérés plus haut. En fait la caractéristique la plus commune aux AGN est probablement qu'ils sont de très lumineuses sources X (travaux préliminaires par Elvis et al. 1978). Néanmoins, les caractéristiques identifiées sont importantes pour comprendre la physique des AGN, autant que de comprendre les techniques par lesquelles les AGN sont découverts.

B. Référencements et Catalogues

Comme évoqué plus haut, en une dizaine d'années, entre 1948 et 1958, les radioastronomes anglais de Jodrell Bank cataloguèrent quelque 500 objets quasi-stellaires dont environ 30 % se superposaient à des objets visibles. 2 catalogues en furent tirés :

[29] Morphology of optical forms of N galaxies, Astrophysical Journal, Part 1, vol. 269, June 15, 1983, p. 438, 439.

[30] C. Hazard et al., Nature, 322, 1986, p38 - J. Dunlop et al., Nature, 319, 1986, p564.

[31] Sanders and al., Continuum energy distribution of quasars - Shapes and origins, Astrophysical Journal, Part 1, vol. 347, Dec. 1, 1989

[32] The nature and structure of active galactic nuclei, Astrophysical Journal, Part 1 (ISSN 0004-637X), vol. 404, no. 2, p. 551-562.

- 3C et 3CR : 3ème catalogue de Cambridge (Edge et al. 1959), observation à 158 MHz, et sa révision, le catalogue 3CR (Bennett 1961) à 178 MHz, ont révélé des sources jusqu'à un flux de 9 Jy [33]. Il y a 471 sources 3C et 328 sources 3CR référencées (Epoch 1950).

Les autres catalogues notoires de l'époque furent :

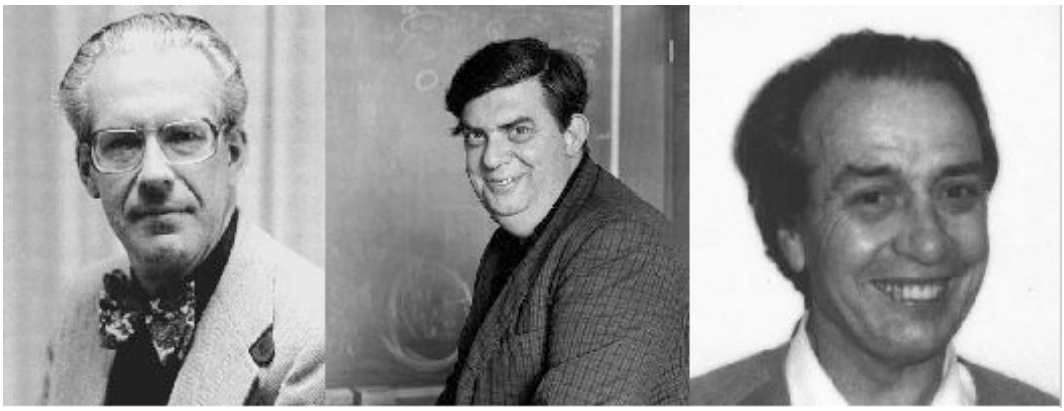
- PKS : un relevé étendu (Ekers 1969) du ciel austral ($\partial < +25°$) fait depuis Parkes en Australie. Débuté à 408 MHz (limite de détection 4 Jy) puis à 1410 MHz (jusqu'à 1 Jy) et 2650 MHz (jusqu'à 0,3 Jy). Les sources sont identifiées 'HHMM±DDT' (Epoch 1950). C'est encore le moyen le plus commun de dénommé les quasars.

- 4C : le 4ème catalogue de Cambridge est la version plus sensible (jusqu'à 2 Jy) du catalogue 3C, repris à 178 MHz (Pilkington et Scott 1965, Gower, Scott et Wills 1967).

- AO : ce relevé "Arecibo Occultation" est remarquable par l'extrême précision des positions relevées, résultat de l'observation de radiosources lors d'occultation par la Lune (Hazard, Gulkis et Bray 1967).

- Ohio : le relevé radio d'Ohio (Ehman, Dixon et Kraus 1970) utilisait un télescope de géométrie particulière à 1415 MHz. Ce télescope n'a pas apporté de précision remarquable, mais a détecté parmi les plus puissantes radiosources des années 70.

C'est à partir des années 80 et pour identifier plus aisément les sources extragalactiques à noyau actif (AGN) et les radiogalaxies ou assimilées (DRAGN, cf. page 24), que les radioastronomes ont compilé leurs propres catalogues de radiosources.



De gauche à droite les prof. Maarten Schmidt, Geoffrey Burbidge (1966) et Cyril Hazard (2000). Documents Sonoma State University et Caltech, U.California à San Diego, Hazard.

Citons : le catalogue Wall-Peacock (WP) qui reprend 233 sources extragalactiques plus brillantes que 2 Jy à 2.7 GHz. Il complète l'atlas 3CR contenant 85 DRAGN car ce dernier est biaisé envers les quasars à indice spectral pentu (SSRQ), étant réalisé à plus basse fréquence (>10.9 Jy à 178 MHz) ; le catalogue Palomar Bright Quasar Survey qui reprend 144 objets parmi les plus proches, explorant le ciel en dehors des 30° du plan galactique jusqu'à la magnitude visuelle B = 16.16; le catalogue Véron-Cetty et Véron de l'ESO et enfin celui de Hewitt et Burbidge qui rassemble plus de 2000 quasars [34].

[33] Jy=Jansky, nom donné d'après Karl Jansky. Unité spécifique de flux radio : 1 Jy = 10-26 watts.m-2.Hz-1 soit 10-23 ergs.s-1.cm-2.Hz-1. (la nouvelle unité standard est le SFU - Solar Flux Unit - 1 SFU = 10-22 W/m^2/Hz).

[34] J. Wall et J. Peacock, Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 216, 1985, p173; M. Schmidt et al., Astrophysical Journal, 305, 1986, p57; K.S. Wood et al., Astrophysical Journal Supplement Series, 56, 1984, p507; M-P. Véron-Cetty et P. Véron, ESO Science Report No.4, 1985.

On peut également citer les catalogues complémentaires Bologna (B2), Molonglo (MC), Westerbork (W) et celui de Barthel et Miley (BMSL), mais qui, comme la plupart des catalogues ne donnent aucune indication sur le spectre des sources et ne présentent qu'une seule mesure spectrale, la densité de flux à 408 ou 1420 MHz.

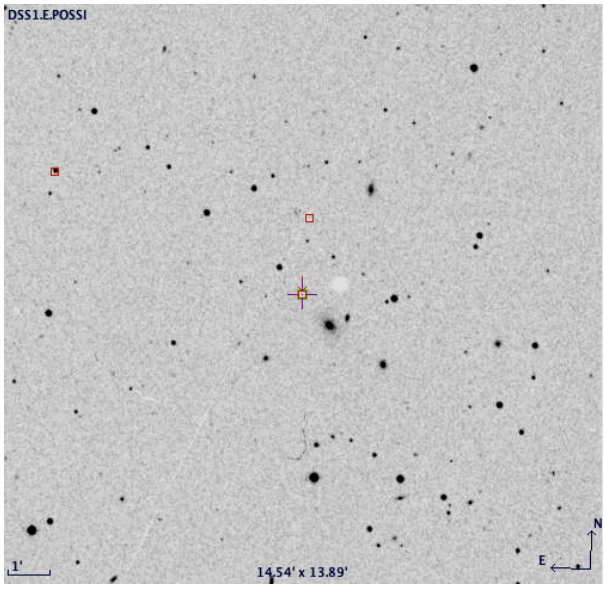
Toutes les données de ces catalogues ont été reprises dans la base extragalactique NED de la NASA ainsi que dans SIMBAD et sous forme d'images scannées des publications originales dans la base ADS de la NASA, toutes deux accessibles via le Centre de Données de l'Université de Strasbourg (CDS).

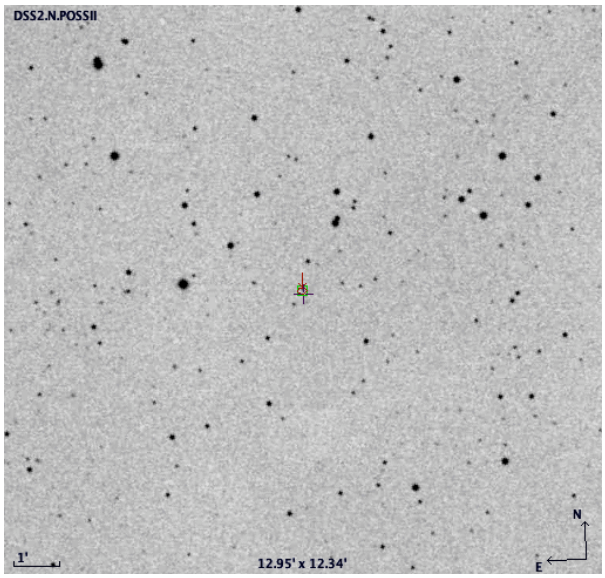
A la même époque, à l'autre extrémité du spectre, les astronomes X ont également apporté leur contribution à cette compilation de catalogues. Le ciel en "lumière" X est dominé par les quasars mais présente une densité de surface inférieure à ce qu'elle est en optique, avec environ un quasar par degré carré. A lui seul Cygnus A illumine les cieux et il est nécessaire de pointer leur intensité en valeur logarithmique pour éviter que cet AGN soit omniprésent Le principal catalogue est le High Energy Astrophysical Observatory A-1 qui reprend 90% des radiosources (842 objets) au-dessus de 1.5 mJy à 5 keV.

En 1993, les astrophysiciens avaient catalogué 7315 quasars/QSO. Depuis le nombre de QSO est passé de 23760 dans la 10ème édition du catalogue Véron à 48921 quasars dans la 11ème édition publiée en 2003. Enfin, la 12ème édition parue en 2006 recense 85221 quasars ($M_{abs} < -23$), 1122 BL Lac et 21737 AGN, dont 9628 Seyfert de type 1 ($M_{abs} > -23$). Il recense également 69 quasars vu par effet de lentille gravitationnelle et 38 quasars doubles.

Cette augmentation supérieure à 90 % provient de la compilation de deux programmes d'étude, le 2QZ et le SDSS.

- **Quasars and Active Galactic Nuclei (12th Ed.) (Veron+ 2006) - VII/248/vv06**



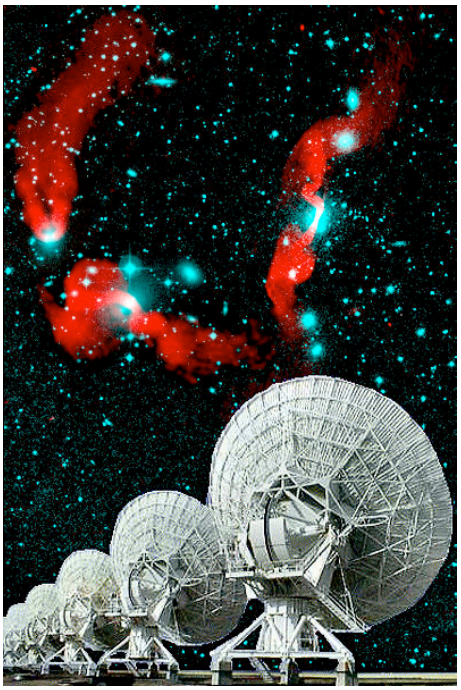


Le plus grand z référencé dans le catalogue Veron est le quasar SDSS J11482+5251 (α=11h48m16.6s, δ=+52°51'50" J2000), de M_{abs}=-25,1 et Simbad nous donne une vitesse de récession de 289125 km.s^{-1} et z=6,43±0,05 [35] !	Et la plus grande magnitude bolométrique est de M ≈ -33,3 pour le quasar SDSS J16170+4435 (α=16h17m05.7s, δ=+44°35'22" J2000), à z=5,490 [35].
Source Aladin, CDS, DSS2, SDSS J11482+5251 est représenté par la croix	*Source Aladin, CDS, DSS2, SDSS J16170+4435 est représenté par la croix*

[35] selon Astron. J., 130, 367-380 (2005), avec H_0=70km.s^{-1}.Mpc^{-1}, Ω_M=0,3 et Ω_Λ=0,7.

Le rôle des radioastronomes consiste à présent à compléter ces catalogues, évaluer les indices spectraux, la morphologie des sources, déterminer leur distance et leurs dimensions, établir des corrélations entre AGN (AGN γ et FSRQ par exemple, Mkr et BL Lac, etc.) et prédire le spectre de rayonnements des candidats non identifiés. Ces analyses permettent en corollaire d'établir des modèles plus précis des sources extragalactiques et d'imaginer les mécanismes qui président à ces émissions si particulières.

- **Atlas DRAGN**



http://www.jb.man.ac.uk/atlas/

DRAGN est un acronyme de Double Radiosource Associated with Galactic Nucleus (Leahy 1993); Cependant cela ne constitue en aucun cas une définition.

Par le passé, les objets DRAGN ont généralement été appelés radiosources extragalactiques. malheureusement ce terme désigne également d'autres objets extragalactiques émetteurs radio, découverts lors de relevés. La confusion provient du fait que lors des premiers relevés, les sources étaient presque toutes des DRAGN. Cependant, lors des relevés plus récents (Condon 1989), la majorité des sources semblent être des galaxies à flambées d'étoiles et non pas des DRAGN.

Image radio et autres données pour les 85 plus proches DRAGN (radiogalaxies et objets relatifs) du groupe « 3CRR » de Laing, de Riley et de Longair (1983).

III. Les AGN et Le Modèle Unifié

A. Introduction

Pourquoi s'intéresser aux AGN ?

- Les AGN ont produit ~10 % de toute l'énergie lumineuse émise depuis le Big Bang [36][37].
- Ce sont des laboratoires uniques pour étudier la physique dans des conditions extrêmes [36].
- Ils ont joué un rôle majeur dans l'évolution de la composante baryonique de l'Univers [36].

En général, le terme de Noyau Actif de Galaxie (AGN [38] pour Active Galactic Nucleus), se réfère à l'existence de phénomènes énergétiques dans le noyau ou dans la région centrale des galaxies et qui ne peuvent pas être clairement et directement attribués aux étoiles. Ce noyau est une région compacte, située au cœur des galaxies, qui est beaucoup plus lumineuse que la normale dans une partie ou dans l'ensemble du spectre électromagnétique (radio, IR, visible, UV, RX et/ou Rγ).

On pense que le rayonnement des AGN est le résultat de l'accrétion autour d'un trou noir supermassif situé au centre de la galaxie. Les AGN sont les sources de radiations électromagnétiques les plus lumineuses de l'univers, et sont parfois utilisés comme moyens de détection d'objets distants. Leur évolution en fonction du temps crée des contraintes aux modèles cosmologiques.

QSO [39] ou quasars, blazars, galaxies de Seyfert, radiogalaxies et parfois LINER (Low Ionization Nuclear Emission Line galaxies) - sont tous regroupés dans la catégorie des AGN, car ils partagent ensemble des caractéristiques de base : très petite extension spatiale (à l'échelle d'une galaxie), luminosité comparable ou supérieure à celle de la galaxie hôte et puissance rayonnée importante à des longueurs d'ondes auxquelles les étoiles n'émettent pas (ou si peu).

En plus de ces caractéristiques communes à tous les AGN, certains montrent des preuves de mouvements dans leur cœur à des vitesses relativistes. Quelque part à l'intérieur de chacun de ces objets, se cache un système responsable de cette énorme libération d'énergie. Du fait qu'ils partagent tant de caractères communs, on pense généralement que dans chacune des variétés de galaxies actives, c'est le moteur central qui a des caractéristiques communes.

Les spécifications de cet objet central sont celles que vous trouverez dévelopées dans les pages suivantes et qui ont servi à élaborer un modèle unifié. Maintenant, seules les observations fournissent les limites de taille de ces objets. Le "seeing" atmosphérique limite la résolution angulaire des télescopes terrestres à 1" arc, c'est-à-dire à 100 parsecs, même dans les plus proches galaxies actives.

Certains AGN sont fortement variables ; dans ce cas, la limite de causalité réduit la taille de l'objet central à la distance parcourue par la lumière dans le temps imparti à la variabilité. Cette limite est souvent bien inférieure au parsec. Cependant, les études systématiques de variabilité des AGN n'ont débuté que dans les années 80 et les mesures ne sont pas encore systématiques.

---

[36] "The phenomenon of Active galactic Nuclei", Tim Heckman, Présentation PowerPoint, 2007

[37] "Noyaux Actifs de galaxie et microquasars", G. Henri, La physique des astroparticules, OHP, 2007

[38] Le terme d'AGN désigne normalement le Noyau Actif de Galaxie, partie centrale, objet de cette étude, de la galaxie hôte. Cependant vous pourrez trouver le terme utilisé pour désigner l'objet comme un tout (classification), auquel cas, il comprend le noyau mais englobe également la galaxie, en en faisant une "Galaxie à Noyau Actif".

[39] La grande complexité provient de la propension des chercheurs à employer indifféremment les termes de quasars ou de QSO, à priori sans se préoccuper de la notion d'émission radio. Par souci de clarté, j'ai pris le parti de faire cette distinction, les quasars ou QSR étant des radiosources alors que les QSO ne le sont pas.

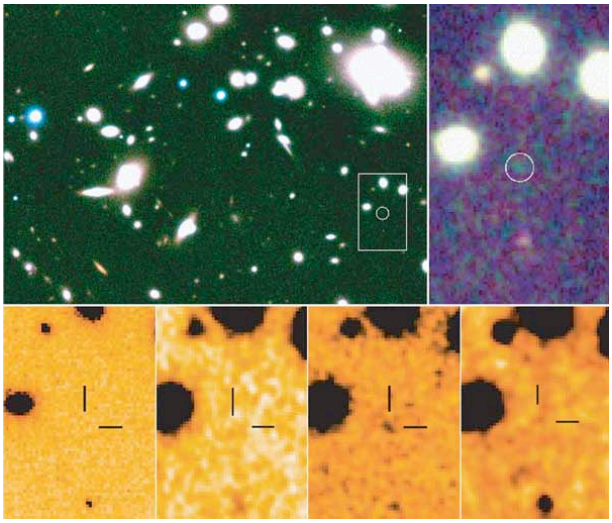
Les AGN peuvent présenter une large échelle de luminosité. Le record actuel est d'~ 10^{48} erg.s^{-1}, soit plus de 10^4 fois plus lumineux que la moyenne de la luminosité des galaxies normales. De telles luminosités, aussi élevées, restent quand même relativement rares. A z=2, les AGN avec une luminosité ≥ 10^{46} erg.s^{-1} ne représentent que 1% des galaxies, alors qu'actuellement, quelques % des galaxies possèdent des AGN dont la luminosité est d'~ 10^{44} erg.s^{-1}. Les AGN plus faibles, les LLAGN (Low Luminosity AGN) sont encore plus fréquents (10^{40} < L < 10^{43} erg.s-1) et représentent ~ 40 % des galaxies. Les 60 % restants sont donc des galaxies dont le moteur central est "endormi" [40].

Les étoiles émettent presque toute leur énergie dans une bande de fréquences large d'un facteur 3 au plus, alors que la gamme des températures stellaires élargit cette gamme d'autant pour les galaxies. La plupart des AGN produisent une quantité d'énergie équivalente à un facteur 7 en fréquence, des MIR aux RX durs. Seules les radiogalaxies produisent un aussi large apport d'énergie, mais sur des fréquences allant des ondes radio au visible. On ne peut donc les confondre avec des étoiles

Descriptif

Initialement, l'apparence des quasars, dont ce n'était pas encore la dénommination, n'a pas suggéré l'existence d'une galaxie sous-jacente.

A distance cosmologique, seule la source centrale ponctuelle est vue dans un quasar et la lumière de la galaxie qui l'héberge, du fait de sa petite taille angulaire et de sa relativement faible luminosité, est noyée dans la lumière éblouissante du noyau du quasar. Ainsi la source parait "quasi stellaire".



Abell 1835IR1916 à z=10 !

En haut, Image ISAAC en NIR du cœur de l'amas Abell 1835 IR1916 (cercle blanc). Les imagettes en bas montrent l'image de la galaxie lointaine dans la bande R (HST-WPC image) et dans les bandes J, H et K.C'est l'absence de détection dans la bande R et la forte présence en bande H qui indique un redshift d'~ 10.

Jusqu'en 1981 on croyait les galaxies nettement plus rapprochées que les quasars, tout au plus situées à quelques milliards d'années-lumière. En 1985 S.G.Djorgovski [41] du Caltech découvrit une galaxie ayant un redshift égal à 3.128, ce qui représente une distance d'environ 13 milliards d'années-lumière.

On découvrit ensuite la galaxie 8C 1435+63 dont le redshift est z = 4.25. A présent le record est détenu par la galaxie Abell 1835 IR1916 dont le redshift atteint z=10 pour la première fois ! Elle fut découverte en 2004 avec le VLT. Pour les astrophysiciens, ces objets seraient plutôt des protogalaxies.

La présence de ces galaxies isolées à une époque si reculée dans le temps n'est pas compatible avec la théorie cosmologique qui impose la formation des superamas et puis seulement leur fragmentation en galaxies au bout de plusieurs milliards d'années. Si l'on découvre d'autres galaxies ayant un redshift proche de 4, cela reposerait le problème de leur évolution. Dans tous les cas, il faut considérer que les galaxies non actives ont côtoyé les quasars quelques milliards d'années après le Big Bang.

Quel phénomène permet donc de former de tels brasiers à une époque aussi reculée ? Pour les astronomes James Gunn et Maarteen Schmidt, il est impossible que les quasars rayonnent un milliard d'années seulement après le Big Bang : "Laissons le temps à la matière de se former" !

[40] S. Collin-Zahn, Présentation IN2P3, Blois 2008

[41] S.G.Djorgovski, Astrophysical Journal Letters, 299, 1985, L1.

Cela correspond en fait à une autre théorie admise par les astronomes, en particulier par Allan Sandage. Les quasars sont assez semblables aux galaxies à noyaux actifs, comme les galaxies de Seyfert que nous décrirons un peu plus loin.

Ils présentent un noyau très actif et un spectre de raies très décalées. Des quasars âgés de 3 ou 4 milliards d'années pourraient ainsi se transformer en radiogalaxies puis en galaxies elliptiques et spirales. Si l'on considère que le noyau très actif perd graduellement son énergie au profit des étoiles de la périphérie, celles-ci pourraient se développer et permettre aux bras spiraux de se former, jusqu'à donner aux galaxies leur physionomie habituelle. Pour confirmer ce scénario, il a donc été important de découvrir des galaxies dont le redshift serait proche de 4 et plus et des quasars suffisamment étendus et brillants pour que leur enveloppe puisse être détaillée.

De toutes les études réalisées sur les AGN, ce qui permet le mieux de les distinguer est leur spectre, qui a l'avantage de présenter des particularités :

- Spectre intense et continu sur la plupart des fréquences (radio, IR, UV, X) dont l'origine n'est pas stellaire, mais synchrotron ou par effet Compton inverse, ce qui suggère que la matière est soumise à des vitesses relativistes dans un champ magnétique intense.
- Des raies apparaissent en émission, phénomène provoqué par de la poussière et des gaz chauds ionisés qui absorbent certaines longueurs d'onde. Certains éléments, tel l'oxygène ou l'hélium présentent des raies interdites. Le fer est ionisé plus de dix fois, ce qui n'est possible que si le noyau présente une température de plusieurs millions de degrés.
- On a également constaté que le noyau de ces galaxies pouvait fluctuer de deux magnitudes en l'espace d'une année, certaines fluctuations de quelques dixièmes de magnitude pouvant se produire en l'espace de quelques jours ou quelques semaines. Dans le rayonnement UV et IR des variations cycliques d'une période de 70 jours ont été enregistrées et durant seulement 15 minutes parfois dans le rayonnement X !
- Les raies de l'hydrogène et de l'hélium sont parfois élargies et décalées vers le rouge. On en déduit qu'une matière chaude proche du noyau subit des mouvements très rapides. Il pourrait s'agir d'un disque d'accrétion libérant des particules et des jets de plasma à plusieurs milliers de $km.s^{-1}$ [42]. Le décalage des raies peut également s'expliquer par des effets gravitationnels engendrés par un corps massif.
- Des raies d'absorption s'évanouissent puis réapparaissent, comme si des nuages de gaz s'interposaient temporairement dans notre ligne de visée, juste devant le noyau.
- Les émissions radioélectriques relativement puissantes sont variables, et d'autant plus si la longueur d'onde diminue. Si l'intensité décroît à mesure que la fréquence augmente, cette source n'est certainement pas d'origine thermique. Tous ces objets présentent une activité synchrotron induite par un champ magnétique plus ou moins intense.

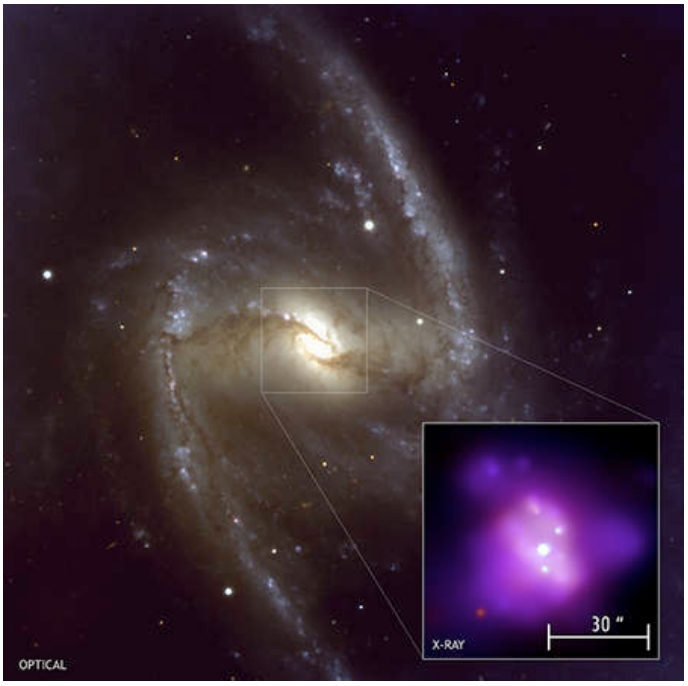
Unification

La grande difficulté, quand les astronomes veulent expliquer l'origine de l'énergie produite par les noyaux actifs des galaxies, est que cette énergie énorme provient d'une très petite région. Les mécanismes ordinairement envisagés, comme la fusion thermonucléaire à l'origine de l'énergie des étoiles, ne sont pas suffisamment efficaces pour rendre compte des observations. La seule piste susceptible de tenir ses promesses est celle de la gravitation. La conversion d'énergie gravitationnelle en rayonnement électromagnétique peut être 40 à 50 fois plus efficace que la conversion de masse (fusion) en ce même rayonnement. C'est ce constat qui est le point de départ du modèle unifié des galaxies à noyau actif.

[42] B.Peterson et G.Ferland, Nature, 324, 1986, p345 - C.Blades/D.Turnshek/C.Norman, "QSO Absorption Lines", Proceedings Baltimore Meeting, Cambridge University Press, 1987.

Le modèle unifié suppose, au centre de chacun des AGN, la présence d'une immense concentration de masse dans un très petit volume. D'un point de vue astrophysique, cela revient à poser l'existence d'un astre insolite. Plusieurs candidats existent : étoiles à bosons, boules de neutrinos, ... La plupart de ces objets ressortent d'une physique encore spéculative. Aussi, le candidat le plus généralement favorisé aujourd'hui est-il un trou noir supermassif. Un tel objet est sans doute assez spécial, mais il a l'avantage de se comprendre dans la cadre d'une physique déjà éprouvée : la théorie de la gravitation d'Einstein (relativité générale).

Les chercheurs ont longtemps avancé [43] que les AGN devaient être alimentés par l'accrétion autour de trous noirs massifs (allant de 10^5 à 10^{10} $M_\odot$). Les AGN sont à la fois compacts et extrêmement lumineux sur de longues périodes : l'accrétion peut potentiellement provoquer une conversion efficace d'énergie potentielle et cinétique ; les trous noirs massifs ont une haute limite d'Eddington (cf. Annexe D), ce qui peut expliquer le côté durable d'une telle luminosité du noyau. Même si des chercheurs pensent que les trous noirs supermassifs n'existent pas systématiquement au centre d'une galaxie massive, la masse d'un trou noir est en corrélation étroite avec la masse du sphéroïde (le bulbe pour les galaxies spirales, la galaxie entière pour les elliptiques) telle que $M_{TN} = M_{bulbe}.10^{-3}$ mais aussi avec la dispersion de vitesses (M_{TN}-σ) ou la luminosité du bulbe galactique [44]. Et les caractéristiques des AGN sont observées chaque fois qu'une certaine quantité de matière approche la sphère d'influence du trou noir central.



La galaxie NGC 1365 vue dans le visible avec le VLT, et en rayons X avec Chandra révèle un AGN, (Crédit : ESO/VLT et NASA/CXC).

L'immense luminosité des quasars serait le résultat d'une friction causée par le gaz et la poussière tombant dans le disque d'accrétion des trous noirs supermassifs, qui peut transformer de l'ordre de 10 % la masse d'un objet en énergie, comparé aux 0,7 % pour la réaction p-p du processus de fusion nucléaire et qui domine la production d'énergie dans les étoiles comme le Soleil.

Ce mécanisme expliquerait aussi pourquoi les quasars étaient plus communs lorsque l'Univers était plus jeune, comme le fait que cette production d'énergie se termine lorsque le trou noir supermassif consume tous les gaz et toutes les poussières se trouvant près de lui. Cela implique la possibilité que la plupart des galaxies, dont notre Voie Lactée, sont certainement passées par un stade actif (apparaissant comme étant des quasars ou une autre classe de galaxies actives) et sont maintenant paisibles car elles n'ont plus de quoi nourrir le trou noir, pour générer des rayonnements émis par les AGN.

Quels phénomènes peuvent donc expliquer à la fois les jets de plasma relativiste, les raies d'émission et les différentes composantes du fond continu ? Aujourd'hui aucune théorie ne décrit correctement tous ces effets. Les astrophysiciens savent que le rayonnement intense est émis par le cœur des AGN et irradie le plasma qui l'entoure. Mais il subsiste quelques interrogations quant à la source de cette énergie phénoménale et à la manière dont elle est transmise aux électrons.

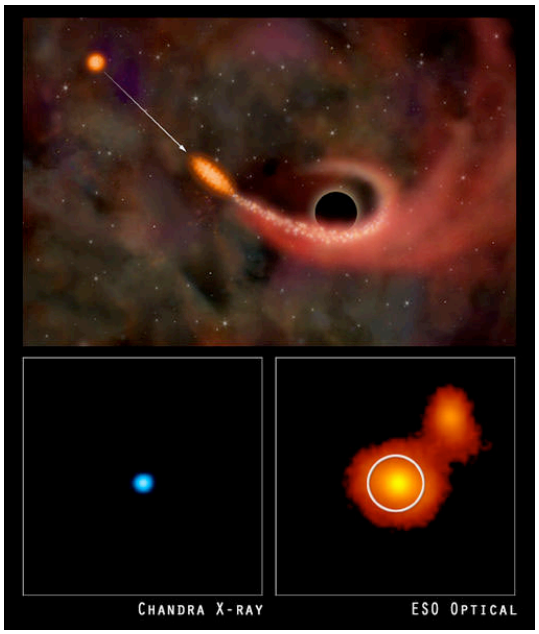
[43] Lynden-Bell, D. (1969). Nature.223:690

[44] Marconi, A. & Hunt, L.K. (2003). Astrophysical Journal.589:L21

B. Anatomie des AGN

1. Trou Noir central

Le paradigme du trou noir supermassif



à gauche : Vue d'artiste d'un trou noir supermassif absorbant de la matière dans la galaxie RXJ 1242-11. En bas à gauche : Photo prise dans les rayons X avec le télescope Chandra. En bas à droite : photo en optique prise par l'ESO.

Il existe aujourd'hui de nombreuses observations qui montrent qu'à peu près toutes les grosses galaxies possèdent un trou noir supermassif en leur centre, comme c'est le cas dans notre propre galaxie, la Voie lactée. Le suivi des trajectoires stellaires a permis de mesurer directement la masse du trou noir central : 3 ± 0,2 millions $M_\odot$ [45] (un "petit" trou noir supermassif !).

Propriétés

Un trou noir supermassif est, un trou noir dont la masse va de 10^5 à 10^{10} $M_\odot$. C'est le type de trou noir le plus grand, après le "encore hypothétique" trou noir primordial, le trou noir stellaire et le trou noir intermédiaire.

Par comparaison avec un trou noir stellaire, la densité moyenne d'un trou noir supermassif est en fait très faible – parfois plus faible que celle de l'eau [46]. Cela s'explique par le fait que le rayon de Schwarzschild du trou noir croît avec la masse, ce qui induit que la densité décroît selon le carré de la masse : plus le trou noir est grand, plus sa densité moyenne chute, même si sa masse croît sans limite. Autre fait notable, les forces de marées sont négligeables au voisinage de l'horizon des événements d'un trou noir supermassif, car la singularité gravitationnelle centrale en est très éloignée.

Quelques chiffres		
Rayon gravitationnel R_G	$2GM/c^2$	aussi écrit R_S
Rayon de la dernière orbite stable	TN de Schwarszchild	6 R_G
	TN de Kerr	1.24 R_G
Efficacité de la conversion Masse / Energie	TN de Schwarszchild	0.57%
	TN de Kerr	~ 30%

- La variabilité X s'étend sur environ 10 R_G, pour un TN de 10^8 $M_\odot$

[45] A.M. Ghez et al., High Proper-Motion Stars in the Vicinity of Sagittarius A*: Evidence for a Supermassive Black Hole at the Center of Our Galaxy, ApJ, 509, 678-686 (1998).

[46] Selon http://curious.astro.cornell.edu, si la densité d'un trou noir est calculée avec : $1{,}8.10^{16}$ g.cm^{-3} x $(M_\odot/M)^2$, alors pour le soleil transformé en trou noir, la densité sera de 1,8 10^{16} g.cm^{-3}, alors que pour un trou noir supermassif d'un milliard de $M_\odot$, elle sera de 1,8 10^{-2} g.cm^{-3}, inférieure à la densité de l'eau ! *Il ne s'agit que de "densité moyenne".*

- Comme la force de la pression de radiation diminue avec la distance à la source, de la même manière (en $1/r^2$) que la force de gravitation, il existe une luminosité critique par rapport à la masse au-delà de laquelle une structure auto-gravitante et rayonnante ne peut exister. C'est la luminosité d'Eddington, et vaut ~ 4.10^4 en unités de $L_\odot$ par $M_\odot$. A partir de là, on en déduit que le moteur central des galaxies actives doit posséder une masse au moins égale à $10^6(L/10^{44}$ erg $s^{-1})$ $M_\odot$.

- la durée de vie d'un AGN doit être d'au moins 10^8 années. C'est la moyenne de vie minimum, tirée de la fréquence d'observation des AGN, en supposant que toutes les galaxies sont passées par une phase active. Il est possible que seuls quelques pour-cents de toutes les galaxies aient jamais été actives, mais dans ce cas, la fréquence des AGN observés signifie qu'ils ont été actifs sur la durée de vie de l'univers, soit entre 10 et 20 milliards d'années. Ce qui signifie que le minimum d'énergie totale libérée par un AGN moyen est ~10^{60} erg.

Par contre, la masse des trous noirs des AGN n'est pas accessible directement comme l'est celle des galaxies proches, grâce aux mouvements stellaires. Le spectre des AGN noie toute lumière stellaire. Mais grâce à la technique de "Reverberation mapping" (cf. Annexe D), des échelles angulaires inaccessibles en optique ou en radio, peuvent être étudiées et notamment, celle de la BLR.

B.M. Peterson a ainsi trouvé une relation quasi-virielle entre le délai τ de la raie basée sur la réverbération et la largeur de cette raie ΔV, telle que $\Delta V \propto \tau^{-1/2}$, comme attendu, si les BLR sont dominées par la gravité du trou noir central.

Alors la masse du trou noir s'écrit : $M_{TN} = f\dfrac{\Delta V^2 c\tau}{G}$, et de la même manière, il existe une bonne corrélation entre la zone radiative et la largeur des raies d'émission, du type : $\Delta V \approx R^{-1/2}$.

Cette relation avait été prédite par Krolig et al. (1991), mais il n'y avait pas de consensus à l'époque pour dire que la BLR était virialisée.

Seule la conversion de l'énergie de potentiel gravitationnel en chaleur, lorsque la matière chute dans un puits de potentiel gravitationnel relativiste, produit assez d'énergie, avec un rapport proche de l'unité. L'accrétion autour d'une étoile à neutrons en restitue une fraction (0,1 à 0,2), celle autour d'un trou noir en rotation (trou noir de Kerr, au taux maximal) peut en restituer ~0,29. Même avec cette efficacité élevée, la masse minimale accumulée d'un AGN est encore de 10^7 $M_\odot$ et si seule une petite partie des galaxies devient active, la masse accumulée pourrait être bien supérieure.

Il existe également une étroite relation entre la masse du trou noir central M_{TN} et la dispersion de vitesses des étoiles du bulbe, σ (Ferrarese & Merritt, 2000 ; Gebhardt et al., 2000a) et la relation entre la M_{TN} (M_{BH} en anglais) et les mesures de la taille par "Reverberation mapping" (cf. Annexe D) sont du même ordre. La relation M_{TN}-σ est significative sous réserve de bien calibrer le facteur d'échelle $\langle f \rangle$ pour chaque mesure. Mais des biais de mesures peuvent apparaître en raison de l'inclinaison de la BLR sur la ligne de visée (Collin et al.; 2006).

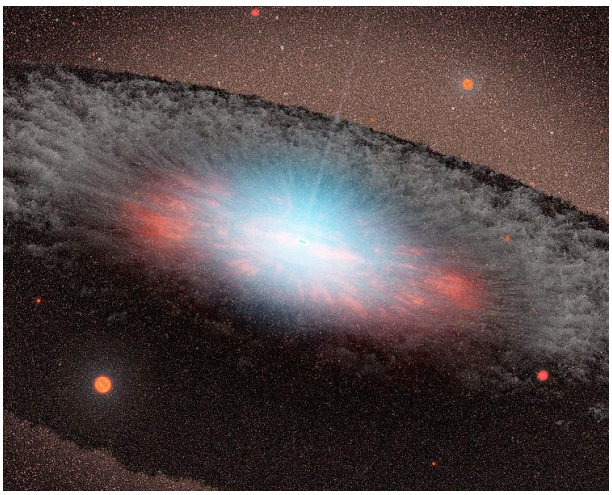
Pour un rayon d'influence $r_* = GM_{TN}/\sigma_*^2$ définissant la taille du noyau pour lequel la force de gravitation du trou noir domine la dynamique des étoiles du bulbe de la galaxie, la masse du trou noir d'un témoin (NGC3227) a été mesurée par la méthode de "Reverberation mapping" (Peterson et al., 2004) et elle a été comparée à celle obtenue avec le VLT, basé sur la dynamique stellaire (Davies et al., 2006) et à des mesures ultérieures par "Reverberation mapping". Si les résultats sont prometteurs, ils demandent à être confirmés.

La relation Rayon-Luminosité peut également être calculée, connaissant le rayon de la BLR, $R \approx c\tau$, alors $R \approx L^{0,51 \pm 0,03}$.

Formation

La formation des trous noirs supermassifs se fait certainement sur de grandes échelles de temps. L'hypothèse la plus simple de la formation des trous noirs supermassifs est évidemment de commencer par un trou noir stellaire qui ensuite accrétera de la matière sur des milliards d'années. Mais cette hypothèse a de nombreux défauts, parmi lesquels la nécessité d'une très grande densité d'étoiles pour continuellement nourrir le trou noir et surtout, des observations ont montré l'existence de trous noirs supermassifs à très grands redshifts. Ces trous noirs, aussi tôt dans la vie de l'Univers, n'ont pas eu le temps de se former par simple accrétion d'étoiles. Il est possible que la formation de tels trous noirs soit en fait très rapide au début de l'univers [47].

Les propriétés du trou noir permettent d'imaginer un scénario d'évolution pour les galaxies présentant un noyau actif, les fameux AGN.



Vue d'artiste d'un trou noir supermassif dévorant une étoile dans la galaxie RXJ 1242-11.

Statistiquement, si dans notre Galaxie, une supernova se transforme en trou noir tous les 10^3 ans, alors depuis la formation de la Voie Lactée, il s'y serait formé quelques 10^6 trous noirs ! Il est donc envisageable que les AGN contiennent également un grand nombre de trous noirs dont certains ont pu acquérir une masse colossale en l'espace de 5 ou 10 milliards d'années.

Comment une galaxie ordinaire peut-elle se transformer en AGN ? Si dans le noyau d'une galaxie encore calme, une étoile massive (2.5-100 $M_\odot$) termine sa vie sous la forme d'un trou noir de quelques kilomètres de diamètre, la concentration de la matière étant très élevée dans le noyau, une grande quantité de gaz ionisé et de poussières est rapidement attirée par l'intense champ gravitationnel qui règne dans le voisinage du trou noir. C'est ainsi qu'il grossit démesurément, jusqu'à devenir géant et supermassif. Au bout de plusieurs millions d'années, sa masse se chiffre en centaines de millions de $M_\odot$ pour une température proche du zéro absolu. Malgré sa masse et sa force gravitationnelle, ses dimensions sont inférieures à 10^9 km, un peu plus grand que l'orbite de Jupiter, ce qui représente à peine une heure-lumière, une taille infime vis-à-vis des dimensions de la galaxie toute entière. A quelques dizaines d'années-lumière un tel trou noir sous-tendrait un angle de 0.00000001" d'arc !

Bien que pratiquement aucune énergie ne puisse s'échapper d'un trou noir, drainant la matière ambiante, son environnement proche est entraîné dans un mouvement tourbillonnaire dans lequel le plasma devient lumineux suite à l'agitation électronique. Par transfert du moment angulaire, le trou noir signale sa présence par des émissions électromagnétiques intenses, des jets optiques et radio dirigés et des flash gamma qui signalent la disparition des étoiles. Le cœur de cette galaxie qui au départ brillait normalement est devenu des milliards de fois plus lumineux. Si le trou noir devient supermassif, il peut porter son influence à plusieurs dizaines d'années-lumière. Observée aux longueurs d'ondes radio, cette galaxie à noyau actif présente deux immenses lobes chauds qui partent du trou noir et s'étendent dans deux directions opposées jusqu'à plusieurs années-lumière. Les trous noirs seraient ainsi à l'origine des phénomènes les plus intenses de l'univers, du rayonnement des quasars aux jets de matière à des vitesses relativistes.

Les immenses jets qui s'en échappent par les pôles résulteraient d'un mouvement de rotation qui générerait le champ magnétique nécessaire à ces émissions gigantesques. Il ne s'agit bien sûr que d'indices indirects, mais les chercheurs croient aujourd'hui que les trous noirs sont en rotation sur eux-mêmes, comme la plupart des étoiles.

[47] Volonteri M., Rees M. J., Rapid Growth of High-Redshift Black Holes, (2005), ApJ, 633, 624

Confirmations

Des mesures Doppler directes de masers H2O entourant les noyaux de galaxies proches ont révélé un mouvement képlérien très rapide, uniquement possible s'il y a une grande concentration de matière au centre. Actuellement, le seul objet connu capable de maintenir assez de matière dans un si petit espace est un trou noir, ou quelque chose qui a évolué en trou noir sur de courtes échelles de temps astrophysiques.

Paolo Padovani et al. (2004), annoncèrent la découverte de 30 trous noirs supermassifs extragalactiques. Cette découverte suggéra qu'il devait exister 2 fois plus de trous noirs supermassifs qu'imaginé. On pense actuellement que chaque galaxie contient un trou noir supermassif en son centre, la plupart étant inactifs, sans accrétion notable de matière. A contrario, on ne s'attend pas à trouver de trou noir central dans les amas globulaires, même si certains d'entre eux comme M15 dans Pégase et Mayall II dans la M31 en possèdent un, de l'ordre de 10^4 $M_\odot$ [48] .

En janvier 2008, on annonça, lors de l' "American Astronomical Society meeting", la découverte du plus massif des trous noirs découverts à ce jour. C'est un système binaire, supposé avoir un couple de masse de 18.10^9 de $M_\odot$ et 10^5 $M_\odot$. Il est identifié sous le nom de OJ287 [49].

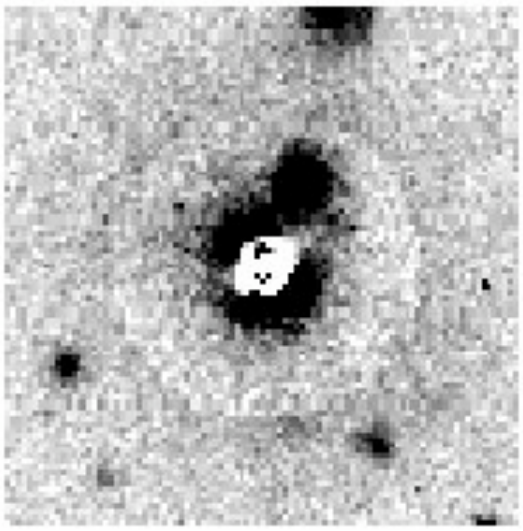


Image optique de OJ287 prise avec FORS1 au VLT-UT1. source Heidt et al., 1999

Estimation de la masse de quelques trous noirs centraux
[50]

Galaxie	Constellation	Type	Distance [1]	Luminosité [2]	Masse [3]	Taille estimée de R_G [4]
NGC 4486 = M87	Vir	E0	50 Millions	56	3 Milliards	8,86 10^{12} / 59,2
NGC 4594 = M104	Vir	Sa	30 Millions	47	1 Milliard	2,95 10^{12} / 19,7
NGC 4486b	Vir	E0	50 Millions	0.82	500 Millions	1,47 10^{12} / 9,87
NGC 3377	Leo	E5	32 Millions	5.2	100 Millions	2,95 10^{11} / 1,97
NGC 3379	Leo	E1	32 Millions	13	50 Millions	1,47 10^{11} / 0,98
NGC 224 = M31	And	Sb	2.3 Millions	5.2	30 Millions	8,86 10^{10} / 0,59
Voie Lactée		Sbc	28.000	1.9	3 Millions	8,86 10^9 / 0,06
NGC 3115	Sex	SO	27 Millions	14.2	2 Millions	5,9 10^9 / 0,04

[1] en années-lumière, [2] en multiple de 10^9 $L_\odot$. Pour les spirales c'est la luminosité du bulbe, [3] en unité de $M_\odot$. [4] R_s en m et UA

[48] L'annonce récente de la découverte d'un trou noir central au centre de l'amas globulaire du Centaure (NGC5139) suppose même que cet amas pourrait être une galaxie naine satellite de la Voie Lactée

[49] SPACE.com - Colossal Black Hole Shatters the Scales

[50] Extrait de John Kormendy's CENSUS of Black Hole Candidates in galactic nuclei et Rs calculé par mes soins

Evénements associés aux trous noirs

Les propriétés des trous noirs pourraient expliquer plusieurs types d'événements :

- *Rayonnement X et gamma* : Les étoiles les plus proches de l'horizon du trou noir se heurtent à des forces gravitationnelles qui déchirent leur enveloppe, formant un anneau d'accrétion incandescent qui tombe vers lui. La matière fortement perturbée est portée à de très hautes températures et émet de puissants rayonnements X et gamma. A plusieurs millions de degrés l'énergie potentielle gravitationnelle est convertie en rayonnement. Les abords du trou noir émettent sur un spectre continu que nous pouvons déceler, présentant en ondes radios une brillance si intense qu'elle tend à saturer les détecteurs. Au centre de ce spot intense se trouve le minuscule trou noir.

- *Emissions X oscillantes* : Le disque d'accrétion subit des mouvements turbulents qui créent des oscillations dans le plasma tombant sur le trou noir. Ces flashs ne durent que quelques centièmes à quelques dix-millièmes de seconde.

- *Rayonnement synchrotron* : Le disque d'accrétion qui se forme autour du trou noir émet un rayonnement intense, d'origine non stellaire et variable, fonction de la quantité de matière qui tombe dans le piège gravitationnel. Ces particules sont sous l'emprise d'un champ magnétique intense qui peut engendrer des vitesses relativistes et des émissions polarisées sporadiques. Ce rayonnement synchrotron ne contribue pas ou peu aux émissions infrarouges qui ne sont pas polarisées.

- *Raies d'émissions* : Les nuages de gaz qui entourent le trou noir sont ionisés par le rayonnement intense en provenance du disque d'accrétion. Les particules deviennent instables, subissent une intense agitation électronique et des perturbations magnétiques qui produisent des raies larges ou dédoublent les raies fines (effet Zeeman). Lorsque les particules sont relativement stables, loin de la fournaise du trou noir, les raies restent fines. Cet élargissement des raies indique que le plasma est animé de mouvements rapides, entraîné par la zone d'influence du trou noir. Il s'agit d'un effet Doppler d'origine gravitationnelle.

- *Jets de matière* : Le plasma entraîné à grande vitesse vers le trou noir forme un immense disque d'accrétion autour de la singularité. En s'effondrant, une certaine quantité de matière reste confinée dans la région de l'ergosphère. Sous l'emprise d'un intense champ magnétique, cette matière subit un effet accélérateur qui lui donne suffisamment d'énergie pour s'échapper à une vitesse relativiste de la sphère d'influence du trou noir. Etant donné que le disque d'accrétion l'empêche de se dissiper dans le plan du disque, les seules échappatoires sont les régions polaires du trou noir qui éjectent un important flux de matière à grande distance sous forme de jets très directifs composés de condensations brillantes.

- *Lobes radio symétriques* : Le phénomène de transfert d'énergie s'accompagne de l'éjection de plasma. Excité par la friction électronique dans un milieu raréfié, il est porté à plusieurs millions de degrés. Il est éjecté symétriquement de part et d'autre de l'axe de rotation du trou noir et forme une onde de choc qui perturbe le milieu ambiant, ce que nous captons comme des points chauds d'émissions très intenses à quelques degrés de distance.

- *Etoiles en mouvement* : Les étoiles plus éloignées sont entraînées vers ce gouffre, accélérant leur course jusqu'à acquérir une vitesse de 10000 $km.s^{-1}$ qui éjecterait n'importe quelle autre étoile de sa trajectoire ; les étoiles multiples peuvent voir une ou plusieurs des composantes éjectées de la zone d'influence du trou noir avec une vitesse de libération de l'ordre de 1000 à 4000 $km.s^{-1}$, traversant la galaxie à des vitesses 100 fois plus élevées que les étoiles ordinaires. Mais leur très petite taille ne permettrait pas de les détecter à partir de la Terre.

- *Rayonnement des quasars* : Dans les années 70, les physiciens américains Brandford et Znajeh ont démontré que si on plaçait un trou noir en rotation dans un champ magnétique extérieur, il générerait un puissant champ électrique. C'est l'effet dynamo à l'image de celui entretenu par le noyau de la Terre. Dans le voisinage d'un trou noir, le champ magnétique est transporté par le gaz interstellaire qui tombe vers la singularité suite au mouvement d'accrétion. Lorsque ce circuit externe est installé, la dynamo peut produire du courant, elle génère des particules qui se chargent près du trou noir, suite à l'interaction du rayonnement avec les particules déjà présentes alentour. Un quasar peut ainsi se former dans le noyau des galaxies actives.

- *Rayons cosmiques intenses* : Les rayons cosmiques les plus énergétiques détectés sur Terre (>$5.7.10^{18}$ eV) ont été tracés jusqu'au cœur des galaxies actives et sont émis au voisinage des trous noirs supermassifs, seuls astres capables de produire une énergie d'une telle intensité par leur disque d'accrétion et le phénomène de dynamo.

- *Formations d'étoiles massives autour des trous noirs* : Depuis le début des années 2000 environ, les astronomes ont également découvert que des étoiles massives se formaient dans le disque de poussière (notamment autour de Sgr A*). Deux modèles ont été proposés pour tenter d'expliquer ce phénomène. Selon le modèle standard de formation stellaire à partir d'un disque, c'est la forte gravité régnant dans le disque dense de poussière qui résiste aux forces de marées du trou noir, permettant aux étoiles de se former et de briller durant quelques centaines de millions à quelques milliards d'années tout au plus. Selon le modèle dit de la migration, environ un million d'étoiles de masses comparables à celle du Soleil seraient présentes à l'intérieur et autour du disque de poussière, alors que dans le modèle du disque, la quantité d'étoiles de faible masse est beaucoup plus faible. Or, selon des observations de Sgr A* faites par Nayakshin et Rashid Sunyaev du Max Planck Institut, comparé aux émissions X de la nébuleuse d'Orion, celles émises par les amas stellaires de Sgr A* correspondraient à environ 10000 étoiles solaires. La théorie de la migration n'est donc pas valable. Selon Sunyaev, les étoiles présentes aujourd'hui autour de Sgr A* n'ont pas été emmenées à cet endroit par un amas ouvert passant dans la région, mais elles sont bien nées sur place, ce qui a étonné les astronomes. Cette découverte d'une progéniture d'étoiles en formation autour d'un trou noir supermassif, bouleverse la proportion d'étoiles que l'on estimait en formation dans de telles régions. Aujourd'hui il semble évident que beaucoup plus d'étoiles massives se forment dans les disques d'accrétion entourant les trous noirs. Finalement, lorsque ces étoiles exploseront en supernova, elles viendront "fertiliser" la région en éléments lourds tels que l'oxygène et les métaux. Cela pourrait expliquer les grandes quantités de tels éléments qu'on observe dans les disques entourant les jeunes trous noirs supermassifs.

2. Disque d'accrétion

Quel que soit l'objet compact situé au cœur des galaxies à noyau actif, son grand intérêt, c'est la capacité qu'il a à accélérer à de très hautes vitesses les corps qui viennent dans son voisinage, et qu'il engloutit définitivement. En pratique, la matière ainsi avalée transite d'abord par un disque d'accrétion de l'ordre d'une unité astronomique de rayon seulement, et dans lequel cette matière spirale en prenant à chaque boucle un peu plus de vitesse. Un tel milieu évacue une énergie gigantesque sous forme de rayonnement et c'est cette énergie qui va rendre si brillant le quasar (ou l'objet apparenté) que l'on observera.

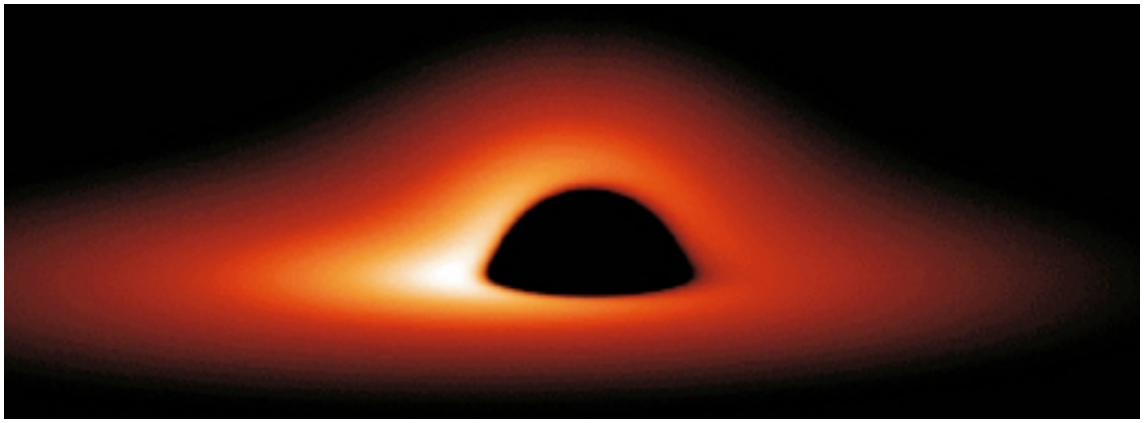


Image : Chris Reynolds - Godard Space Flight Center

Mécanisme

Un disque d'accrétion est une structure formée par de la matière en orbite autour d'un corps central et qui chute sur celui-ci en raison de la dissipation d'énergie en son sein, par viscosité. A l'origine, la force centrifuge transforme le nuage de matériaux diffus en rotation en disque et les forces de marées tendent à synchroniser la rotation du disque avec celle de l'objet central. La friction, entre les particules du disque, chauffe celui-ci et permet de dissiper du moment orbital, faisant spiraler les particules jusqu'à leur absorption par le corps central. Alors que la matière tombe en spiralant sur le trou noir central, le gradient de vitesse angulaire de rotation provoque un échauffement visqueux intense permettant une émission X au niveau de l'horizon.

Un des paramètres principaux du disque est son taux d'accrétion, à savoir la quantité de matière chutant sur l'objet central par unité de temps. L'unité du système international est le kg/s mais la $M_\odot$/an ou ses dérivés sont d'emploi plus fréquent.

La luminosité maximum d'un objet, qui tire son énergie de l'accrétion, est donnée par $L_{Edd} = 1{,}3.10^{46}\ M_\odot\ erg.s^{-1}$ et la luminosité bolométrique est donnée par $L_{bol} = \varepsilon.\dot{M}.c^2$ avec $\dot{M}$=le taux d'accrétion et ε=l'efficacité radiative de conversion (0,057 pour TN_{Sch} ou ~ 0,3 pour TN_{Kerr})

Si $\dot{m} = \dot{M} / \dot{M}_{crit}$ et $\dot{M}_{crit} = L_{Edd} / c^2$, alors deux cas se présentent :

- Si $\dot{m} < 10^{-3}$, ce sont de faibles accréteurs (LLAGN, radiogalaxies FR I, ...)
- Si $\dot{m} > 10^{-2}$, ce sont de puissants accréteurs (Seyfert, quasars, NLS1)

Le spectre attendu pour le disque d'accrétion d'un trou noir supermassif présente un pic dans l'ultraviolet et la lumière visible ; en outre, une couronne (corona) de matériaux chauds se forme au-dessus du disque d'accrétion et peut provoquer une diffusion Compton inverse, supérieure aux énergies des rayons X. Les radiations provenant du disque d'accrétion excitent les matériaux atomiques froids proches du trou noir. Une grande partie de la production primaire d'un AGN peut être obscurcie par de la poussière ou du gaz proches du disque d'accrétion. Ceux-ci absorbent alors le rayonnement et le reémettent sous d'autres longueurs d'onde, le plus souvent sous forme d'infrarouge.

Physique des disques d'accrétion

La principale difficulté, dans l'apport de masses si près du centre de la galaxie, est d'évacuer du moment angulaire. A grande échelle (≥ 100 pc), l'évacuation du moment angulaire peut se faire par fusion de galaxies (quasars), par interaction (Seyfert lumineuses), par l'intermédiaire des barres (Seyfert faible) ou par friction dynamique de nuages moléculaires (dans les LLAGN). Mais pour les distances intermédiaires, c'est encore l'inconnu. Peut-être s'agit-il d'instabilité gravitationnelle ? Enfin, pour de courtes distances (≤ 1 pc), c'est à l'échelle du disque d'accrétion, que les phénomènes interviennent.

Dans les années 40, les premiers modèles furent dérivés des principes de physique de base [51]. Pour cadrer avec les observations, les modèles évoquaient un mécanisme encore inconnu de redistribution du moment angulaire. Si la matière devait tomber sur le disque d'accrétion, elle devait perdre non seulement de l'énergie gravitationnelle mais également du moment angulaire. Comme le moment angulaire total du disque est conservé, le moment angulaire perdu par la matière qui chutait au centre du disque devait être compensé par un gain de moment angulaire loin du centre. C'est-à-dire que du moment angulaire était évacué vers l'extérieur pour que la matière soit accrétée, selon les critères de stabilité de Rayleigh.

$$\frac{\partial(R^2\Omega)}{\partial R} > 0$$

Où Ω représente la vitesse angulaire d'un fluide et R sa distance au centre de rotation, attendu qu'un disque d'accrétion doit avoir un flux laminaire.

Si les contraintes de viscosité peuvent générer un échauffement et un rayonnement d'une partie de l'énergie gravitationnelle, la viscosité seule, ne suffit pas à expliquer le transport du moment angulaire vers l'extérieur.

- Modèle du disque α

Shakura et Sunyaev (1973) [52] proposèrent que des turbulences dans le gaz soient à l'origine de l'augmentation de la viscosité. Si la turbulence est subsonique et si la hauteur du disque est inférieure à la taille des cellules turbulentes, la viscosité du disque peut être estimée comme $\nu = \alpha.c_s.H$, ou c_s est la vitesse du son, H la hauteur du disque et α, paramètre libre, ajustable (entre 0, pas d'accrétion et ~ 1), décrivant l'augmentation effective de la viscosité, en raison d'entraînements turbulents dans le disque [52] [53]. Cette théorie cesse de fonctionner lorsque la pression du gaz n'est pas significative.

Si le taux d'accrétion approche la limite d'Eddington, la pression de radiation devient importante et le disque se modélise en tore ou en une autre forme tridimensionnelle comme un Advection Dominated Accretion Flow (ADAF).

---

[51] Weizsäcker, C. F. (1948), "Die Rotation Kosmischer Gasmassen", Z. Naturforsch. 3a: 524-539

[52] Shakura, N. I. & Sunyaev, R. A. (1973), "Black Holes in Binary Systems. Observational Appearance", A&A 24: 337-355

[53] Lynden-Bell, D. & Pringle, J. E. (1974), "The evolution of viscous discs and the origin of the nebular variables", Mon. Not. R. Astr. Soc. 168: 603-637

- Instabilité Magnéto-rotationelle

En 1991, avec l'instabilité magnéto-rotationnelle (MRI), Balbus et Hawley [54],[55] établirent qu'un disque d'accrétion, faiblement magnétisé, autour d'un objet compact massif serait hautement instable, provoquant un mécanisme direct de redistribution du moment angulaire et l'équation devient :

$$\frac{\partial \Omega^2}{\partial R} > 0.$$

La plupart des disques en astrophysique n'atteignent pas le critère de Rayleigh et sont mis en mouvement par instabilité magnéto-rotationnelle. Les chercheurs pensent que les champs magnétiques présents dans les objets astrophysiques (nécessaires pour que l'instabilité ait lieu) sont générés par des actions de dynamo [56].

Anatomie des disques

Les travaux de Shakura et Sunyaev de 1974, sur les disques minces d'accrétion, sont parmi les plus cités dans les publications récentes. Pringle contribua aussi à de nombreuses solutions en théorie des disques d'accrétion et écrivit un article en 1981 qui reste la principale source d'information à propos de ces disques d'accrétion.

- Modèle analytique des disques d'accrétion de type super-Eddington (disque aminci, le beignet Polonais)

Les disques amincis ne présentent qu'un modeste taux d'accrétion en régime super-Eddington, $M \geq M_{Edd}$, ils ont la forme d'un disque et un spectre dont le profil est correspond à un rayonnement thermique. La théorie de l'accrétion d'un trou noir en régime super-Eddington, où $M >> M_{Edd}$, a été développée dans les années 80 par Abramowicz, Jaroszynski, Paczynski, Sikora et al., sous le terme de "beignet Polonais" (dénomination soumise par Rees). Ces "beignets Polonais" ont une faible viscosité, sont optiquement épais et le refroidissement du disque d'accrétion se fait par advection. Ils sont radiativement très inefficaces. Ces "beignets" ont la forme de tores épais, présentant un mince tunnel axial. C'est par ce tunnel que sont collimatés les rayonnements avec une luminosité de type super-Eddington. On parle aussi de flux d'accrétion supercritique.

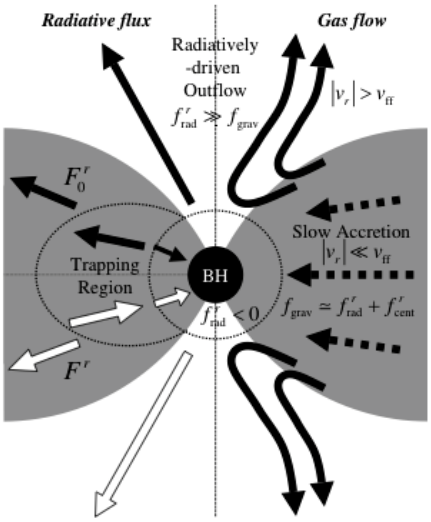


Diagramme schématique des flux d'accrétion supercritique (Ohsuga & Mineshige, 2007)

- Modèle analytique de disque d'accrétion de type sub-Eddington (disques minces, ADAF)

Lorsque le taux d'accrétion est de type sub-Eddington et que l'opacité est très forte, on a un disque géométriquement mince et fait de matière relativement froide avec une pression de radiation négligeable. Le gaz est happé en de longues spirales presque circulaires, pratiquement sans orbite képlerienne. Ces disques minces sont relativement lumineux et présentent un spectre électromagnétique de type thermique, c'est-à-dire peu différent de celui de la somme de corps noirs. Le refroidissement radiatif est très efficace dans les disques minces.

---

[54] Balbus, Steven A. & Hawley, John F. (1991), "A powerful local shear instability in weakly magnetized disks. I - Linear analysis", ApJ 376: 214-233

[55] Balbus, Steven A. (2003), "Enhanced Angular Momentum Transport in Accretion Disks", Annu. Rev. A&A 41: 555-597

[56] Rüdiger, Günther & Hollerbach, Rainer (2004), The Magnetic Universe: Geophysical and Astrophysical Dynamo Theory, Wiley-VCH, ISBN 3-527-40409-0

Lorsque le taux d'accrétion est de type sub-Eddington et l'opacité très faible, il se forme un ADAF. Ce type de disque d'accrétion a été proposé en 1977 par Ichimaru dans un article qui fut ignoré pendant pratiquement 20 ans (malgré que certains éléments du modèle ADAF aient été repris dans l'article de 1982 sur les tores ioniques par Rees, Phinney, Begelman et Blandford).

Les ADAF ont commencé à être intensément étudiés après leur découverte, au milieu des années 90, par Narayan et Yi, et indépendamment par Abramowicz, Chen, Kato, Lasota (qui proposa le nom de ADAF) et Regev. Les ADAF se refroidissent par advection (la chaleur est captée par la matière) plutôt que par rayonnement. Les ADAF sont radiativement inefficaces, leur forme ressemble plutôt à une sphère qu'à un disque et ils sont très chauds, proches de la température virielle ($T \sim 10^{12}$ K). En raison de leur faible efficacité, les ADAF sont beaucoup moins lumineux que les disques minces de Shakura-Sunyaev. Les ADAF émettent un rayonnement non thermique en loi de puissance, avec un spectre est caractéristique, avec une pente en $\nu^{1/3}$ pour l'émission radio, un rayonnement de type Compton, des ondes sub-millimétriques aux rayons X et une composante free-free (ou Bremsstrahlung, cf. Annexe D) des rayons X durs aux rayons γ (Mahadeva, 1997) [57]. Le spectre d'un ADAF est complètement déterminé par la masse du trou noir et par la rayon au-delà duquel le disque devient fin.

Tableau résultant

- Pour les forts accréteurs, ($\dot{m} > 10^{-2}$)

- si $0.1 < \dot{m} < 3$, on a à faire à un disque fin ($h/r << 0.1$), optiquement épais, générateur du "Blue bump" : c'est le cas typique des galaxies de Seyfert.
- si $3 < \dot{m} < 10$, on a un disque aminci ($h/r \sim 0.1$), optiquement épais, avec une pression de radiation, générateur du "Blue bump" : c'est le cas des quasars et des NLS1
- si $10 < \dot{m}$, on a un disque épais ($h/r \sim 1$), optiquement épais, avec une forte pression de radiation, émetteur de rayons X mous, dont les photons ne peuvent pas s'échapper et $\varepsilon << 0.1$, $L/L_{Edd} \sim 1 << \dot{m}$: peut-être le cas de NLS1 de faible masse, en cours de croissance.

Les disques d'accrétion s'approchent jusqu'à $\sim 10\ R_G$ voire même $1\ R_G$ dans certains cas.

- Pour les faibles accréteurs, ($\dot{m} \leq 10^{-3}$)

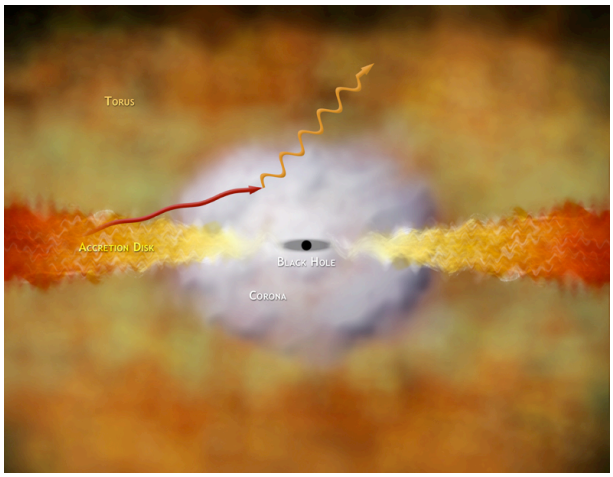
- le disque est optiquement fin, géométriquement épais, relativement chaud, émettant principalement en radio et en RX. Le gaz chute dans le trou noir avant même d'avoir rayonné, pas de "Blue bump". $\varepsilon << 1$ et $L/L_{Edd} << \dot{m}$. Ce serait le cas des LLAGN, radiogalaxies FR I, ...

Autres Manifestations

L'énergie peut être libérée et transformée en rayonnement par plusieurs méthodes. A l'intérieur du disque, ces mêmes frottements, qui causent le déplacement du moment angulaire, provoquent également un échauffement local. La source d'énergie est la lente chute de matière dans le champ gravitationnel de l'objet central. Cette chaleur peut alors être évacuée par rayonnement thermique. En raison de la plus grande quantité d'énergie gravitationnelle évacuée par l'intérieur du disque, cette région interne est prépondérante dans la puissance totale rayonnée et sa température typique de 10^5 K force la plupart des photons rayonnés par le disque à être émis dans l'UV. Des mécanismes non thermiques sont également possibles. C'est certainement le cas pour expliquer la très large plage d'énergie des photons recueillis.

[57] "The emission line spectrum of active galactic nuclei and the unifying scheme", M.P. Véron-Cetty and P. Véron, AApR (2000) 10: 81–133

Ceci implique généralement des électrons relativistes (peut-être des positrons) pour lesquels le nombre de particules, ayant une énergie donnée, est proportionnel à cette énergie. Les particules relativistes sont souvent distribuées selon leur énergie, car la seule échelle caractéristique d'énergie dont ils relèvent est celle de la différence de masse. Les électrons relativistes peuvent créer de nouveaux photons par effet synchrotron et peuvent également multiplier l'énergie de tous les photons déjà existants par diffusion Compton inverse.



Quasar SDSSp J1306 (Vue d'artiste, Chandra). Les collisions entre des photons optiques, UV et X, issus du disque d'accrétion, avec les électrons de la couronne, augmente l'énergie des photons jusqu'à atteindre celle des rayons X de haute énergie.

Illustration: NASA/CXC/M.Weiss

L'électromagnétisme peut également jouer un rôle dans cette libération d'énergie. Les champs magnétiques s'enroulant à la surface du trou noir et couplés au plasma externe peuvent permettre à l'énergie de rotation du trou noir d'être canalisée et à l'énergie, stockée dans le champ magnétique, d'être rayonnée de manière non thermique, lors de reconnexions.

On pense que l'émission de rayons X durs résulte de flashs dans la couronne chaude liée au disque d'accrétion (corona) et entourant le trou noir. Ces rayons X illuminent souvent le disque sous-jacent et la réflexion qui en résulte, imprime des profils atomiques dans le spectre, spécialement la raie K de fluorescence du Fe à 6.4 keV. Des observations en rayons X, d'AGN proches et lumineux, semblent indiquer que la raie K du Fe présente à la fois des profils étroits, indiquant une origine éloignée du trou noir, et des profils larges et asymétriques, résultant de vitesses élevées et d'une forte gravité, à moins de 10 R_G du trou noir.

- **3 causes possibles d'émission sont proposées.**

- Les flambées magnétiques, dues à la reconnexion par chauffage des électrons, sont la cause la plus fréquemment évoquée [58] .
- Les disques massifs, l'idée étant que les flux d'accrétion soient séparés en deux phases en raison des instabilités, une phase chaude, optiquement mince, et une phase froide optiquement épaisse [59].
- Les jets avortés [60], qui pour une raison encore inexpliquée seraient détruits (peut-être par manque de puissance). Lorsque la bulle de plasma retombe, l'énergie cinétique des électrons fournit assez d'énergie pour engendrer un effet Compton sur les photons UV émis par le disque d'accrétion.

Structure fine

C'est au niveau du disque que deux zones dénommées HIP (High Ionization Phase) et LIP (Low Ionization Phase) ont été mises en évidence.

---

[58] Haardt et al.,"A model for the X-ray and ultraviolet emission from Seyfert galaxies and galactic black holes", ApJ, Part 2 - Letters, vol. 432, no. 2, p. L95-L99, 1994 ; Czerny et al, "The structure and radiation spectra of illuminated accretion disks in AGN. II. Flare/spot model of X-ray variability", A&A, v.420, p.1-16, 2004

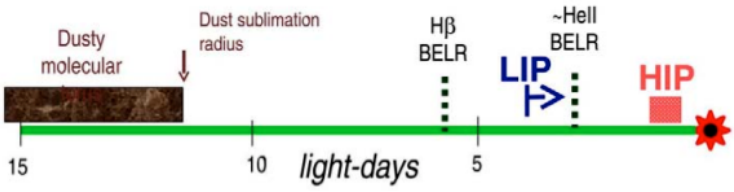
[59] Guilbert & Rees, "'Cold' material in non-thermal sources", MNRAS, vol. 233, July 15, 1988, p. 475-484

[60] Henri & Petrucci, "Anisotropic illumination of AGN's accretion disk by a non thermal source. I. General theory and application to the Newtonian geometry.", A&A, v.326, p.87-98, 1997 ; Malzac et al, "Anisotropic illumination in AGNs. The reflected component. Comparison to hard X-ray spectra from Seyfert Galaxies", A&A, v.336, p.807-814, 1998 ; Ghisellini et al., "Aborted jets and the X-ray emission of radio-quiet AGNs", A&A, v.413, p.535-545, 2004

Elles expliqueraient l'existence d'éléments ionisés absorbant les rayons X, les "Warm Absorbers" (WA) [61] qui ont été découverts dans plus de 50 % des quasars et galaxies de Seyfert , mais qui ne sont visibles qu'en absorption [62]. Ces deux composants sont denses et compacts.

Les WA seraient des vents du disque d'accrétion, avec des vitesses de 500 à 3000 km.s^{-1} et pourraient contribuer à ce que les chercheurs nomment les UV "Narrow Absorption Lines" (NALs).

La LIP se situerai (pour l'étude considérée sur NGC 4051) à une distance r < 3,5 jours-lumière, quant à la HIP elle serait située entre 0,5 < r < 1 jour-lumière, soit 2200 à 4400 R_G. Le "blueshift" des raies He II (~ 400 km.s^{-1}) pour r > 2 jour-lumière pourrait être la marque des vents des WA. Ces deux zones sont adjacentes et l'étude des densités de colonne, montre qu'elles s'interpénètrent.



Localisation de la HIP et de la LIP dans le voisinage du noyau de NGC 4051.

Source : Yair Krongold dans "Warm Absorber Distance from X-ray Variability: The case of NGC4051", The nuclear region, host galaxies and environment of Active Galaxies : A symposium to celebrate the 60th birthday of Deborah Dultzin, 2007

Donc la forte luminosité des quasars est censée être le résultat de l'émission de la matière accrétée par le trou noir central supermassif. Ce processus permet de convertir quelques 10 % de la masse accrétée en énergie, comparé aux 0,5% de taux de conversion pour les réactions de fusion nucléaire. Ces disques donnent souvent naissance à des jets, provenant donc du voisinage de l'objet central. Les jets sont un moyen efficace de perdre du moment angulaire sans que la perte de masse ne soit trop importante.

Enfin vers 10000 R_G, le disque d'accrétion deviendrait gravitationnellement instable [63].

Finalement, il est important de garder à l'esprit qu'il existe une catégorie "radiativement inefficace" de solutions aux équations concernant l'accrétion. La plus connue d'entre elles est l'accrétion dominée par un flux d'advection [64], mais d'autres existent. Dans ce type d'accrétion, la matière subissant l'accrétion ne forme pas un disque fin et par conséquent, ne refoule pas l'énergie acquise. L'existence de ce type d'accrétion pourrait expliquer le manque de puissance des radiations émises par le trou noir supermassif situé au centre de certaines galaxies elliptiques. Sinon, on pourrait s'attendre à ce que les taux élevés d'accrétion correspondent à de fortes luminosités [65],[66]. Les AGN radiativement inefficaces pourraient aussi expliquer le manque de beaucoup d'autres caractéristiques sur certains AGN munis d'un disque d'accrétion.

Dans tous les cas (forts ou faibles), les accréteurs sont, semble-t-il, radiativement inefficaces et les disques doivent donc évacuer leur énergie d'une manière ou d'une autre !

---

[61] Nicastro, Elvis & Brickhouse, "Time-evolving Photoionization: The Thin and Compact X-ray Wind of NGC 4051", ASP Conference Series, Vol. 373, p301, 2007

[62] Piconcelli et al., "The XMM-Newton view of PG quasars. I. X-ray continuum and absorption", Vol. 432, Issue 1, pp.15-30, 2005 ; Crenshaw et al., "Intrinsic UV Absorption and Reddening in Seyfert Galaxies", ASP, Conference Series, Vol. 290, p. 195, 2003

[63] Collin S., Huré J-M., 2001, Astronomy & Astrophysics, in press, astro-ph/0103303

[64] Narayan, R. & Yi, I. (1994). Astrophysical Journal.428:L13

[65] Fabian, A.C. & Rees, M.J. (1995). Monthly Notices of the Royal Astronomical Society.277:L55

[66] Laing, R.A., Jenkins, C.R. & Wall, J.V., et al. (1994). " Spectrophotometry of a Complete Sample of 3CR Radio Sources: Implications for Unified Models " in G.V. Bicknell, M.A. Dopita, and P.J. Quinn (Ed.) The First Stromlo Symposium, The Physics of Active Galaxies(p. 201). ASP Conference Series

3. Jets et Vents

L'interaction entre trou noir, disque d'accrétion et champs magnétiques produit des jets, "faisceaux" de matière extrêmement rapides, collimatés, qui émergent près du disque (la direction du jet peut être déterminée soit grâce au moment angulaire de l'axe du disque, soit grâce à l'axe de rotation du trou noir) et/ou des vents.

Même s'ils sont visibles surtout dans le domaine des ondes radio où l'interférométrie à très longue base peut être utilisée pour l'étude sur des distances inférieures au parsec, ils le sont également dans toutes les longueurs d'onde, jusqu'aux rayons γ, grâce notamment à la diffusion Compton inverse. Ainsi, les AGN produisant des jets ont une seconde source (potentielle) d'émission continue.

Mécanisme

En raison de l'énorme quantité d'énergie nécessaire pour évacuer ces jets relativistes, en plus du trou noir super massif, deux processus de transfert d'énergie s'affrontent.

- Le processus de Blandford-Znajek [67] est la théorie d'extraction de l'énergie d'un trou noir la plus communément acceptée. Les quasars tirent leur fantastique énergie des processus d'accrétion et de la magnétohydrodynamique produite par un trou noir de Kerr en rotation et dont la masse devrait dépasser le million de masses solaires. Les jets de particules observés sont ainsi alignés avec l'axe de rotation du trou noir. En tordant des lignes de champs magnétiques générées par effet dynamo, cette rotation est responsable des processus d'accélération et d'expulsion des particules présentes dans le jet.
- Le processus de Penrose [68] extrait son énergie du trou noir en rotation par effet Lense-Thirring. Il a été démontré que cette théorie était capable d'extraire de l'énergie de particules relativistes [69] et que c'était un mécanisme possible de formation des jets [70]. Les jets sont souvent associés aux disques d'accrétion dans des structures magnétiques d'accrétion-éjection dont les propriétés et le fonctionnement font encore l'objet de controverses [71].

Extrait de : A Multi - wavelength Study of Blazars with WIYN-VERITAS-IceCube, Kirsten L. Larson, The College of Wooster, University of Madison-Wisconsin. Image Ian Short, Sainte-Mary University.

[67] Blandford, R. D., Znajek, R. L. (1977), Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 179, 433

[68] Penrose, R. (1969). Gravitational collapse: The role of general relativity. Nuovo Cimento Rivista, Numero Speciale 1, 252-276.

[69] Williams, R. K. (1995, May 15). Extracting x rays, ´Y rays, and relativistic e-e+ pairs from supermassive Kerr black holes using the Penrose mechanism. Physical Review, 51(10), 5387-5427.

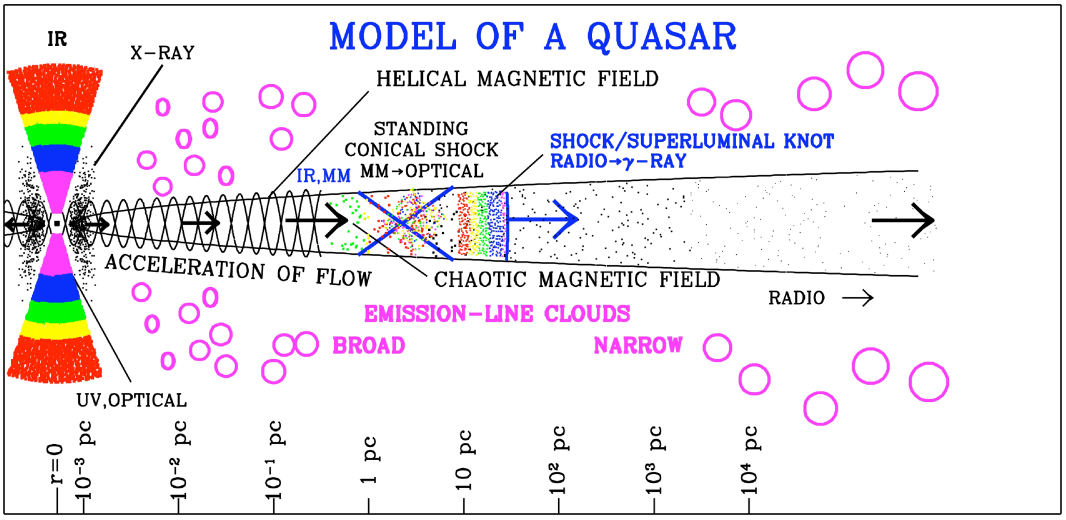
[70] Williams, R. K. (2004, August 20). Collimated escaping vortical polar e-e+ jets intrinsically produced by rotating black holes and Penrose processes. ApJ, 611, 952-963

[71] Lee Hartmann, Accretion and Ejection, in Open Issues in Local Star Formation, Astrophysics and Space Science Library, Springer, 2003, vol. 299, p. 205 (ISBN 1402017553)

Même si le mécanisme de création des jets [72] et leur composition [73] sont encore débattus dans la communauté scientifique, les jets nécessitent un "moteur", qui éjecte la matière et un processus collimateur ; la plupart des auteurs s'accordent sur le rôle important du champ magnétique [74],[75].

Ces jets seraient issus d'un processus semblable à celui d'une dynamo (comme pour les pulsars). Le plasma, entraîné autour d'un objet supermassif, crée, par friction, un champ magnétique intense qui s'aligne autour de l'axe de rotation. Le champ magnétique étant ouvert dans les régions polaires, les particules accélérées peuvent s'échapper à plusieurs millions d'années-lumière, très loin de la source optique. Ces particules, animées d'une vitesse proche de celle de la lumière, génèrent une onde de choc lorsqu'elles rencontrent la matière interstellaire. Ces ondes de choc relativistes échauffent intensément la matière ambiante qui s'ionise et rayonne des émissions électromagnétiques [76]. Les points chauds situés aux extrémités des lobes radioélectriques en sont la manifestation. Les jets seraient issus d'une région située à une distance $r < 1000\ R_G$ (source VLBI).

Les jets relativistes émettent la majeure partie de leur énergie par rayonnement synchrotron. Dans le modèle simple, la bulle contient des électrons relativistes et de forts champs magnétiques. Les électrons dans cette bulle voyagent à une vitesse proche de celle de la lumière et sont entraînés par le champ magnétique. Chaque changement de direction d'un électron est accompagné d'une libération d'énergie, sous forme de libération d'un photon. S'il y a assez d'électrons et un champ magnétique suffisamment intense, alors la bulle relativiste émet un nombre très important de photons. Photons dont les énergies se répartissent depuis les ondes radio peu énergétiques jusqu'aux puissants rayons X.



Les couleurs matérialisent la stratification des fréquences d'émission.Le fréquence la plus haute de l'émission synchrotron requiert les électrons de plus haute énergie, trouvés au plus près de leur lieu de génération, ensuite, ils perdent rapidement de l'énergie par rayonnement. Le disque d'accrétion (qui s'étend vers le haut et vers le bas sur la figure) est plus chaud au plus près du trou noir. Aussi ses émissions thermiques culminent elles aux plus hautes fréquences, au plus près du trou noir. Source : structure and locations of emission at different wavebands in a quasar/ active galactic nucleus (AGN), created by A. Marscher, http://www.bu.edu/blazars/index.html

[72] Meier, L. M. (2003). The Theory and Simulation of Relativistic Jet Formation: Towards a Unified Model For Micro- and Macroquasars, 2003, New Astron. Rev. , 47, 667.

[73] Georganopoulos, M.; Kazanas, D.; Perlman, E.; Stecker, F. (2005) Bulk Comptonization of the Cosmic Microwave Background by Extragalactic Jets as a Probe of their Matter Content, ApJ , 625, 656.

[74] Fabien Casse et Rony Keppens, "Magnetized Accretion-Ejection Structures: 2.5-dimensional Magnetohydrodynamic Simulations of Continuous Ideal Jet Launching from Resistive Accretion Disks", ApJ, 2002, 591, p. 988

[75] Christian Fendt, "Collimation of Astrophysical Jets: The Role of the Accretion Disk Magnetic Field Distribution", ApJ, 2006, 651, p. 272

[76] M.Norman et al., Nature, 335, 1988, p146.

On pense que la formation des jets relativistes est la clef pour expliquer certains GRB. Ces jets possèdent un facteur de Lorentz d' ~ 100, faisant des GRB, l'un des objets célestes les plus rapides, connus à ce jour.

Nous savons aujourd'hui que la matière, contenue dans les deux lobes symétriques, est expulsée du noyau de cette galaxie par un processus très stable. De tels jets peuvent s'étendre sur plus de 18 millions d'années-lumière ! Pour Cygnus A, l'extension des lobes radio atteint 500000 années-lumière et il est déjà considéré comme l'un des objets les plus étendus. Ces jets de plasma coïncident d'ordinaire avec les sources d'émission des raies étroites. L'énergie des lobes est équivalente à la conversion de plusieurs milliards de masses solaires.

A distance de l'AGN, les jets peuvent aussi provoquer des chocs dans le milieu interstellaire car ils conservent généralement des vitesse supersonique [77].

Les vents quant à eux prendraient leur source à une distance $r > 10000\ R_G$. Ils atteignent des vitesses de quelques centaines de $km.s^{-1}$, jusqu'à 0.1 c. Ils seraient constitués de courants de gaz chauds (10^5 à 10^6 °K). La première confirmation de l'existence de vents fut apportée par l'étude du quasar PG 1700+518 (Young, Axon & Robinson (2007).

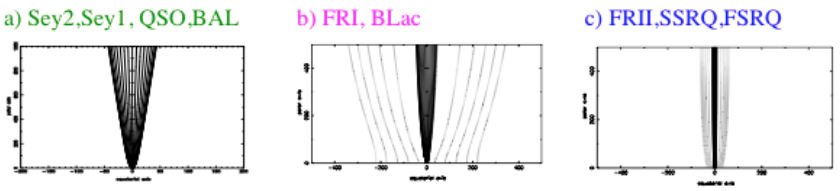
Il semble que cette dichotomie se retrouve dans les catégories de galaxies émettrices puisque ce sont les AGN Radio-Loud (RLQ) qui seraient associés à des jets relativistes collimatés alors que les AGN Radio-Quiet (RQQ) seraient associés aux vents thermiques non collimatés, détectés à l'aide des BAL et des WA (NAL) qui en sont la conséquence.

Certaines caractéristiques observationnelles des jets pourraient être interprétées en terme d'énergie du rotateur magnétique central et de l'orientation du jet en fonction de la ligne de visée [78]. Un critère pour la transition des morphologies entre les jets collimatés et les vents diffus est même proposé, en rapport avec le spin du trou noir, l'alimentation du corps central, l'environnement, ...

SUGGESTION DE CLASSIFICATION DES SOURCES DES AGN

Radio-emission (type : 2, 1, 0)	Magnetic rotator, ε	Collimation, ε′
Quiet (Sy2, Sy1, BALQSO & QSO)	Inefficient, $\varepsilon << 0$	Weak, $\varepsilon' \leq 0$
Loud (FR I, BL Lac)	Intermediate, $\varepsilon \sim 0$	Good, $\varepsilon' \geq 0$
Loud (FR II, BLRG & SSRQ, FSRQ)	Efficient, $\varepsilon > 0$	Tight, $\varepsilon' > 0$

avec $\varepsilon' = \mu + \varepsilon > 0$, μ mesure l'efficacité du confinement de pression et ε l'efficacité du confinement magnétique



Différentes morphologies des éjections, selon la table ci-dessus :

a) éjection conique

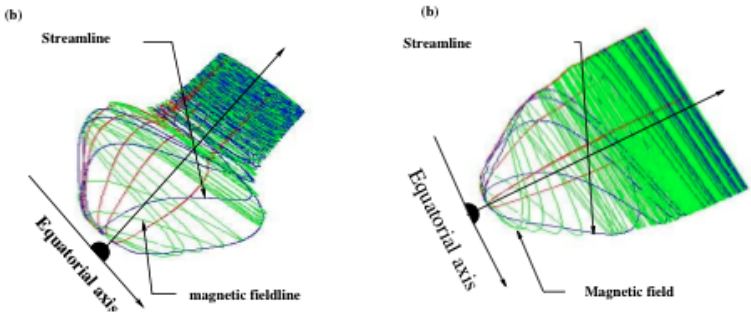
b) jet collimaté

c) jet fortement collimaté

[77] J. M. Foster, B. H. Wilde, P. A. Rosen, P. A. et coll., "High-Energy-Density Laboratory Astrophysics Studies of Jets and Bow Shocks", ApJ, 2005, 634, p. 77

[78] C. Sauty, K.Tsinganos et E. Trussoni, On a MHD classification of AGN jets, Active Galactic Nuclei, ASP Conferences.

Finalement, pour cadrer avec les critères de classification de Antonucci et de Urry & Padovani, Sauty, Tsinganos et Trussoni ont également proposé que cette classification tienne compte, à la fois de l'efficacité de l'enroulement magnétique et de l'environnement dans lequel le jet se propage. C'est ce qu'a également argumenté Zakaria Meliani [79]

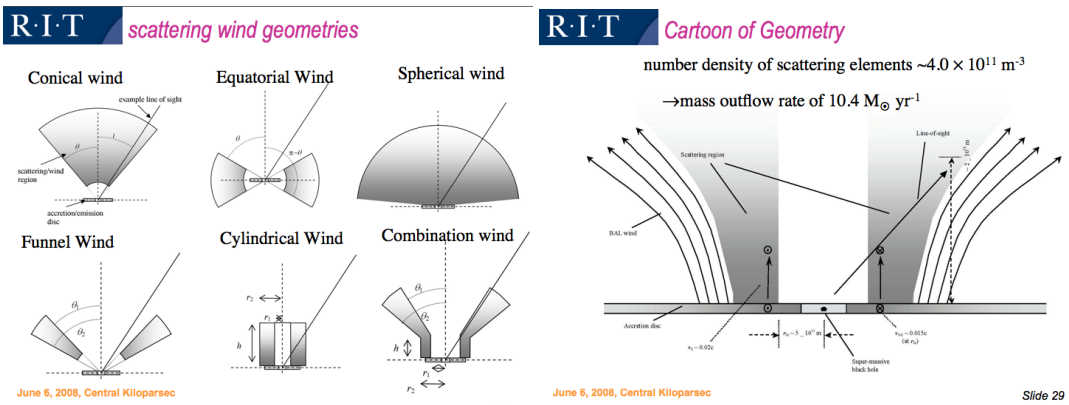


A gauche, morphologie 3D des jets de FR I, à droite morphologie des jets de FR II. Les lignes bleues sont les courants de matière et les lignes vertes, les lignes de champ magnétique. Meliani, 2007.

Pour une couronne, supposée se former sur la dernière orbite stable ($r_c = 3r_G$), il a déduit les propriétés de rotation de cette couronne dans des radiogalaxies FR I et FR II grâce aux observations des éjections. Ainsi dans les FR II, la partie interne de la couronne tourne plus vite que pour les FR I. Et lorsque la rotation ralentit et s'éloigne fortement d'une rotation képlerienne, le flux injecté dans les jets décroît et l'efficacité du pincement magnétique également alors l'influence de l'environnement sur les jets augmente et les propriétés des jets peuvent changer de FR II à FR I.

Les vents sont responsables (dans la mesure où l'orientation le permet) des phénomènes de BAL (Broad Absorption Lines) et NAL pour (Narrow Absorption Lines). Les vents générés par le disque d'accrétion et la couronne, sont beaucoup plus diffus que les jets et participent au phénomène de diffusion du rayonnement de l'AGN et semblent contraindre l'identification des AGN, selon la manière dont ils influent sur le rayonnement. De plus les raies d'absorption sont systématiquement "blueshiftées" par rapport aux restes des émissions, ce qui confirme que les composants, en cause dans l'absorption, sont en rapprochement par rapport à l'observateur. Or à l'échelle de l'AGN, seuls les vents peuvent apporter une réponse à cette constatation.

Typiquement les raies de la BAL indiquent des vitesses > 1000 km.s^{-1} et peuvent atteindre 20000 km.s^{-1}. Quant au décalage vers le bleu par rapport aux raies d'émission, il est typiquement de quelques milliers de km.s^{-1} (~ 0,01 c) et peut atteindre ~ 60000 km.s^{-1} (0,2 c).



Source : Axon, 2008

[79] "Formation and Collimation of Relativistic Jets - Application to the classification of FR I and FR II radio Galaxies", ASP Conferences Serie, Vol. 373, 2007

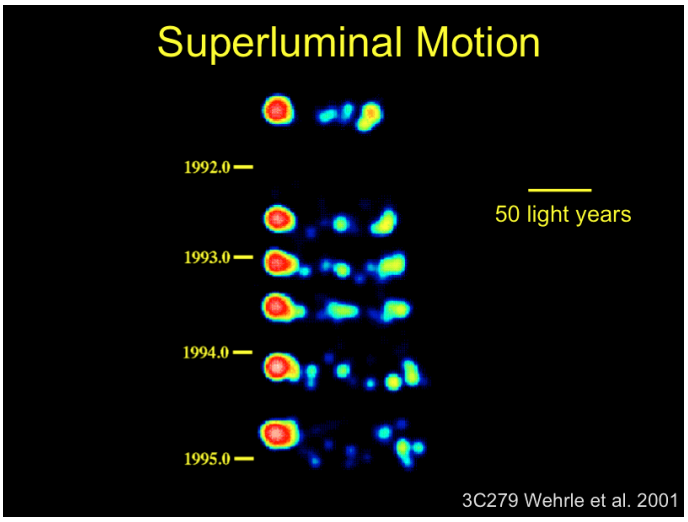
- **Cas particulier : les jets superluminiques (cf. Annexe D)**

La focalisation (Relativistic beaming) a une importance particulière lorsque le jet de l'AGN est orienté en direction de la Terre. Succinctement, le jet peut être considéré comme un série de nuages ou de bulles, émettant chacune avec une forte luminosité. Par rapport à la Terre, chaque bulle approche à une vitesse de l'ordre de 95 à 98% de la vitesse de la lumière et en raison de la relativité restreinte et de propriétés physiques des jets, la luminosité observée sera plus forte que la luminosité intrinsèque mesurée dans le reste du jet.

Pour de très petits angles, de tels effets de concentration deviennent importants et la luminosité observée peut être des centaines, voire des milliers de fois plus élevée que la luminosité intrinsèque. Le jet opposé, s'éloignant de la Terre est cependant affecté différemment. La luminosité observée de ce contre-jet est moindre que sa luminosité intrinsèque. Il peut même être indécelable.

Le simple fait de modifier l'angle de vision peut modifier l'apparence de deux AGN, qui peuvent pourtant être similaires par ailleurs et les faire apparaître très différents, sans relation entre eux. Ce qui semble être le cas pour les blazars.

D'abord observé au début des années 70, le mouvement superluminique fut un argument contre le fait que les quasars étaient à distance cosmologique. Même si quelques astrophysiciens soutiennent cet argument (Arp), la majeure partie d'entre eux pensent que cette vitesse apparente, supérieure à celle de la lumière, n'est qu'illusion et ils n'invoquent pas une physique incompatible avec la théorie de la relativité restreinte.



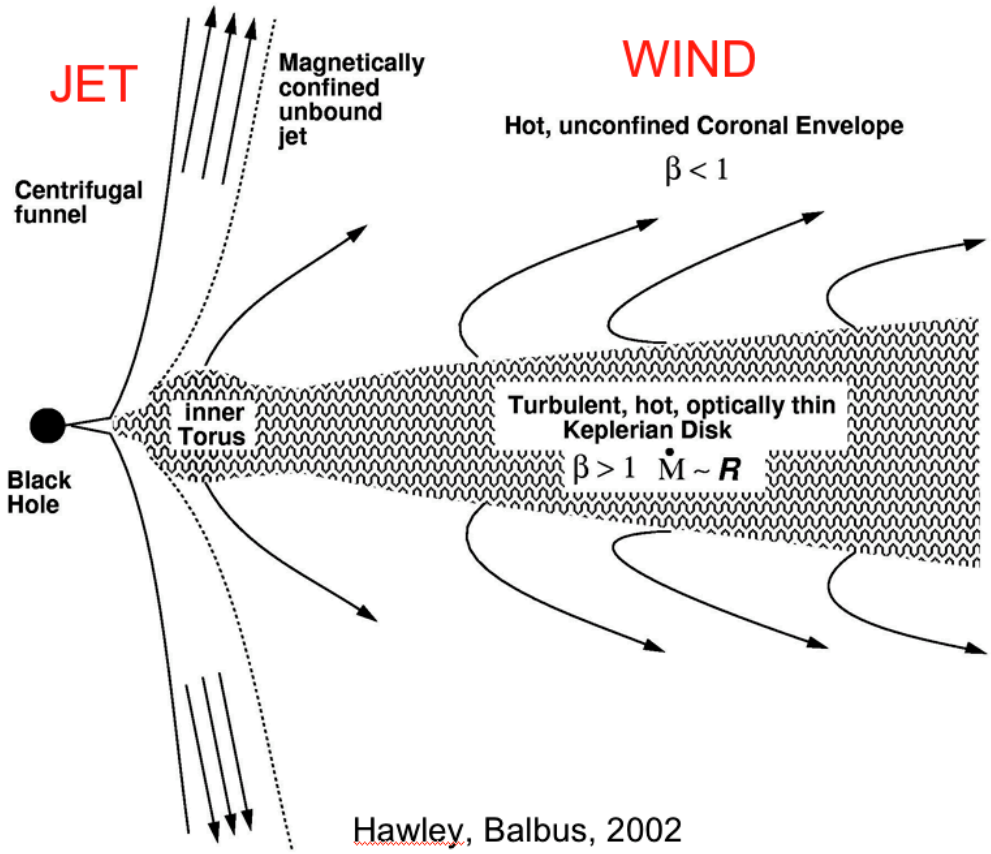
Déplacement superluminique pour 3C 279, observé au VLBI. La vitesse est estimée) 3,5c ! Source : dNRAO/AUI, Anne Wehrle & Glenn Piner

Les vitesses superluminiques observées en astrophysique résultent d'un phénomène bien compris et en aucun cas des particules de masse non-nulle ne se déplacent réellement à des vitesses supérieures à c. Il n'y a donc pas violation du postulat de la relativité restreinte. Par contre ce sont des indicateurs plutôt spécifiques d'AGN comme les blazars (BL Lac ou OVV).

Les chercheurs ne comprennent pas complètement comment un jet produit par un disque d'accrétion peut atteindre une vitesse suffisamment grande pour sembler superluminique à un observateur lointain. En effet, il faut quand même que le jet atteigne une vitesse minimale pour apparaître comme superluminique. Un modèle prometteur, développé au LAOG en France, propose qu'à l'intérieur d'un jet classique non relativiste se créent, sous certaines conditions, des paires électrons-positrons. Le jet initial, auto-collimaté par le champ magnétique, permettrait de créer un jet de ces paires atteignant alors des vitesses ultra-relativistes (très proches de c).

Un déplacement superluminique est souvent vu sous forme de deux jets opposés, se déplaçant à l'opposé l'un de l'autre. Si un décalage Doppler est détecté sur les deux sources, alors la vitesse et la distance pourront être déterminées indépendamment d'autres observations.

Les jets et les vents doivent coexister [80]**.**



[80] Hawley, J.F.; Balbus, S.A., "The Dynamical Structure of Nonradiative Black Hole Accretion Flows"; ApJ, Vol. 573, Issue 2, pp. 738-748.; 2002

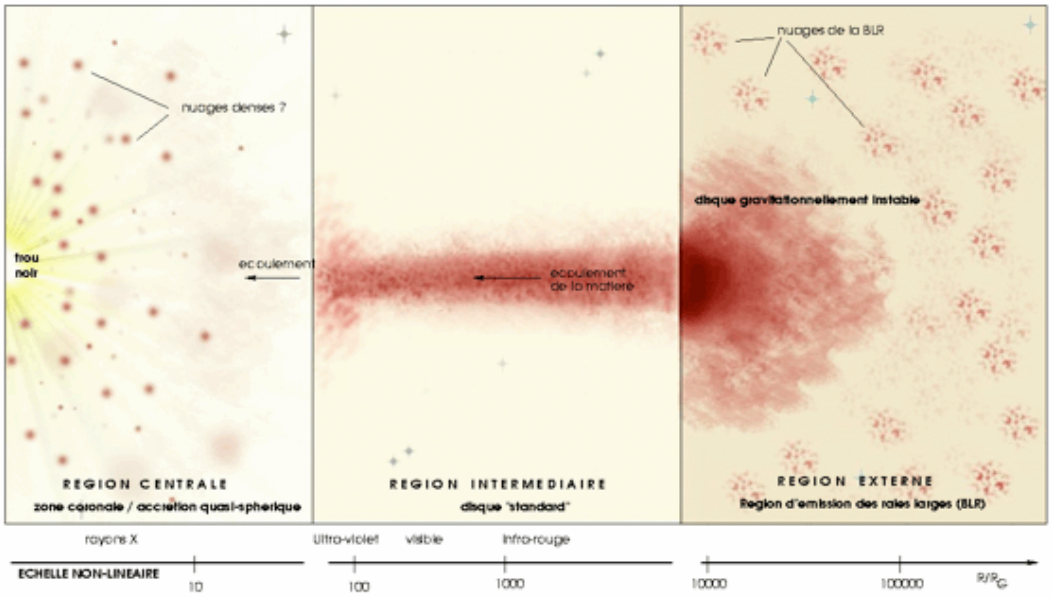
4. Broad (Emission) Line Region (BLR)

La BLR est une des figures principales du spectre des AGN. Elle joue un rôle important dans la compréhension des AGN de par sa proximité à la source centrale.

Les mouvements au sein de la BLR doivent être équilibrés entre la pression de radiation et la gravité qui sont en compétition. La BLR convertit l'énergie émise par le cœur en des énergies ionisantes dans l'UV.

Les spectres de raies élargies des AGN présentent cependant une grande diversité, tant en intensité, qu'en FWHM. Les largeurs des raies semblent indiquer des gradients de vitesses de 500 km.s^{-1} ≤ Δv_{FWHM} ≤ 10^4 km.s^{-1}, avec des valeurs moyennes de 5000 à 7000 km.s^{-1}. Les astronomes savent depuis longtemps que les raies d'émission sont produites par photoionisation et par excitation par chocs. On observe une large gamme de niveaux d'ionisation et la plupart des raies larges fluctuent en intensité, en relation avec les fluctuation du continu (Krolik, 1999).

Contrairement aux régions HII, aux nébuleuses planétaires ou aux AGN à raies étroites, il n'y a pas de diagnostics, de température ou de densité, évidents. En effet la densité électronique du milieu ambiant est telle qu'en théorie, les raies interdites ne devraient pas apparaître. Cependant, la similarité des intensité des raies avec celles d'autres gaz ionisés laisse penser que la température avoisine les 10^4 K. Or si la largeur des raies reflétait purement les mouvements thermiques, la température serait de 10^9 K ! Il existe donc d'autres mécanismes pour élargir les raies, sans recourir à des températures extrêmes. Les chercheurs attribuent souvent cet élargissement des raies à des décalages spectraux différentiels dus aux mouvements en bloc des nuages de gaz émetteurs, chacun ayant sa température propre.



Vue schématique de la partie la plus centrale d'un AGN. L'échelle dépend de la masse et du taux d'accrétion, la présentation se base sur un trou noir de 10^8 $M_\odot$ (R_G=1,5.10^{13} cm) avec un taux d'accrétion $\dot{m} \approx 0.1$.

Source : S. Collin and J.-M. Huré : "The size-mass-luminosity relations in AGN", 2001.

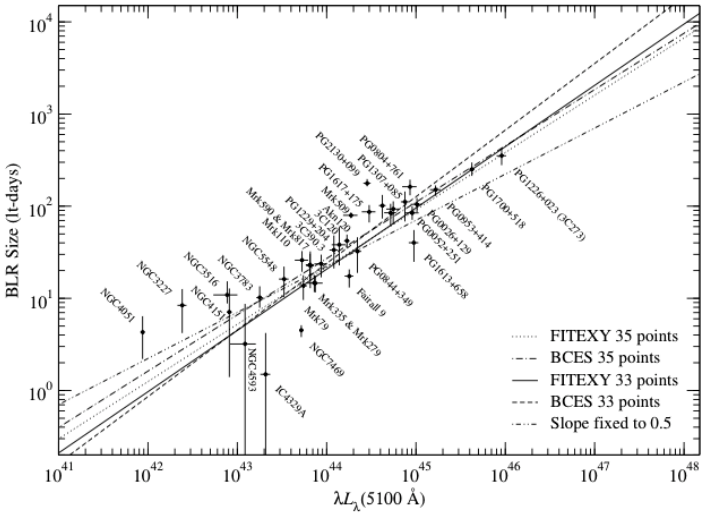
Une autre quantité importante, est celle de l'émission du continu qui est absorbée par la BLR. Comme les raies de recombinaison varient fortement, la BLR doit se composer principalement de nuages optiquement épais pour le continu ionisé. Dans ce cas, la fraction du continu absorbée par les nuages de la BLR est donnée par le "taux de couverture" $f = \Omega/4\pi$, qui est la fraction du ciel couverte par les nuages de la BLR, vue depuis la source centrale. Pour un pur nuage d'hydrogène, chaque photoionisation finira en un photon Lyα. Si tous les photons sont absorbés, il existe une relation entre le flux Lyα et l'intensité du continu, c-a-d la largeur équivalente des raies Lyα. Elle est de 580 Å si tout le rayonnement est absorbé. Ceci est d'un ordre de grandeur plus élevé que les observations, ce qui suggère que seuls 10 % du continu ionisé est absorbé par la BLR. De fait, le facteur de couverture est de $f \sim 0{,}1$.

Donc en raison de la recombinaison, la BLR doit être composée de nuages optiquement épais pour les photons d'énergie $h\nu \geq 13{,}6$ eV, mais aussi d'autres nuages, dans lesquels l'hydrogène doit être totalement ionisé et qui sont optiquement fin pour le continu Lyα.

Taille, masse, vélocité dans la BLR

On estime que la masse de la BLR des AGN est $M_{BLR} = 10^{-3}\, L_{42}(C_{IV}).M_\odot$ (Osterbrock, 1989), ce qui représente moins de 10 $M_\odot$, même pour les AGN les plus lumineux. Grâce à la technique de "Reverberation mapping", des mesures, effectuées sur des dizaines d'AGN, ont permis de déterminer la taille de la BLR et de corréler la masse du trou noir central avec la luminosité de l'AGN (sous réserve que la BLR soit gravitationnellement liée au trou noir). Elle correspond à une taille de quelques jours à quelques mois-lumière.

La taille approximative de la BLR serait de : $\frac{R_{BLR}}{R_G} = \frac{GM}{V_{BLR}^2} \cdot \frac{c^2}{GM} \approx \frac{900}{V_9^2}$ avec $V_{BLR} = V_9.10^9$ cm.s^{-1}



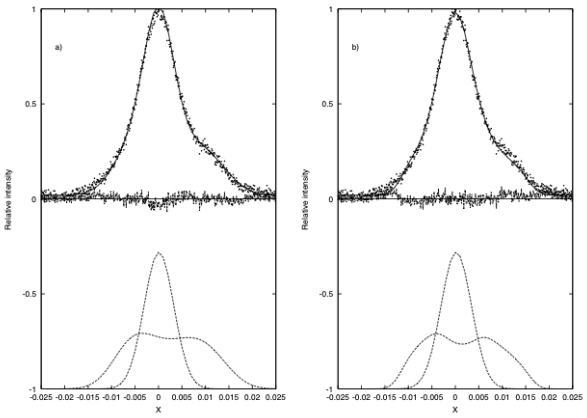
Taille de la BLR selon la luminosité à λL_λ(5100Å), en erg.s^{-1}, déterminé par les raies de Balmer. Kaspi et al. (2005).

Il n'existe pas de consensus sur la dynamique de la BLR, mais le modèle le plus souvent rapporté consiste en un très grand nombre de nuages photoionisés, couvrant ~ 10 % de la source émettrice du continu. Le nombre de nuages est estimé à ~ 6.10^9, sachant que des simulations (menées par Atwood, Baldwin et Carswell, 1982 et par Capriotti, Foltz et Byard, 1981) ont montré que le nombre minimal de nuages doit être de 5.10^4, avec une taille individuelle $l \leq 400\ R_\odot$).

Le lissage des profils de raies implique également un très grand nombre de nuages. Ces nuages, d'une température moyenne typique de 10^4 K, baigneraient dans un milieu à haute température d' ~ 10^8 K (Krolik, McKee & Tarter, 1981), les maintenant ainsi en équilibre, mais selon Rees,(1987) un confinement magnétique pourrait être nécessaire. Cette hypothèse semble inconciliable avec les variations temporelles, très courtes, du flux de rayons X. Une autre hypothèse met en œuvre la présence d'étoiles géantes massives, mais le nombre d'étoiles requises est beaucoup trop important pour cadrer avec les observations et finirait par la génération d'un trou noir supermassif en moins de 10^8 années.

Les chercheurs ont pu calculer que le densité au sein des nuages de la BLR était ≥ 10^9 cm^{-3}.

Pour expliquer le profil des raies d'émission (BEL) de la BLR, des chercheurs ont proposé un modèle à deux composantes [81], la VBLR (Very Broad Line Region) et l'ILR (Intermediate Line Region), responsables respectivement du profil des ailes des raies pour la VBLR et du centre des raies pour l'ILR. Ils ont proposé que la VBLR ait la forme d'un disque d'accrétion et que l'ILR soit une région sphérique. Un tel modèle valide très bien les raies d'émission larges et complexes des AGN (selon profils des raies H_α et H_β) [82].



2 échantillon du profils à 2 composantes de 3C 273. Les paramètres du disque sont :

a) i=14°, R_{inn}=400R_G, R_{out}=1420R_G, W_d=1620km.s^{-1}, p=3.0 (W_G=1350 km.s^{-1})

b) i=29°, R_{inn}=1250R_G, R_{out}=15000R_G, W_d=700km.s^{-1}, p=2,8 (W_G=1380 km.s^{-1})

M.S. Brotherton & Beverley J. Wills (U.Texas)

Les conséquences des effets relativistes sur l'émission de chaque région ont été étudiées sur le modèle du trou noir, avec un accent mis sur la VBLR. Les chercheurs ont constaté que des confirmations peuvent être obtenues avec les modèles relativistes pour les profils des raies d'émission en optique et ultraviolet pour des QSO à petit redshift. En particulier, pour l'émission de la VBLR, des asymétries du côté rouge des profils vus sur quelques objets, peuvent être le résultat d'un effet de redshift gravitationnel, sous réserve que cette VBLR ait la forme d'un ensemble aplati de nuages vu presque de face et à une distance moyenne de quelques dizaines de R_G du trou noir.

De même, le redshift supplémentaire d' ~ 100 km.s^{-1} des composants de l'ILR, mesuré pour quelques objets, peut être obtenu pour un ensemble aplati de nuages, vu selon la même orientation que la VBLR et s'étendant sur quelques centaines de R_G du trou noir. Les résultats sont indépendants du champ de vitesse des nuages et de la dépendance radiale de leur émissivité, même si les observations favorisent un modèle de mouvement Képlerien pour les nuages de la VBLR. Pour des trous noirs de masse ~ 10^9 $M_\odot$, ces distances sont compatibles avec les évaluations des tailles de l'ILR et de la VBLR, basées sur la variabilité des raies d'émission.

La corrélation entre l'augmentation de la largeur des profils de raies et l'asymétrie, côté rouge, trouvée dans des QSO à faible redshift, peut être produite en faisant varier la distance moyenne d'un ensemble virialisé de nuages au trou noir, dans les limites fixées ci-dessus, et l'augmentation simultanée de la luminosité en UV/rayon X peut être interprétée comme le résultat d'une corrélation Masse-Luminosité.

Les asymétries de profil observées du côté bleu du spectre pour les raies de basse et de haute ionisation de quelques objets et les pics décalés vers le bleu de 10^2 à 10^3 km.s^{-1} observés dans le raies de forte ionisation, ne sont pas produites par ces modèles, et exigent ainsi des mécanismes complémentaires, agissant sur les raies d'émission qui contrebalancent le redshift gravitationnel. La diffusion électronique des vents chauffés par les RX pourrait être une possibilité.

---

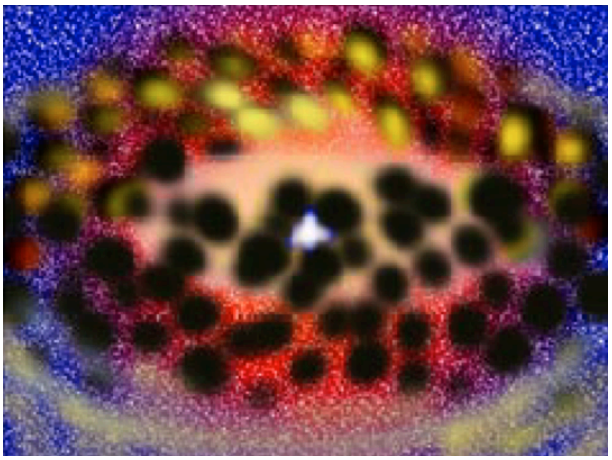
[81] The Intermediate Line Region of QSO, M.S. Brotherton & Beverley J. Wills (U.Texas), ApJ, vol. 430, no. 2, pt. 1, p. 495-504 1994. Contribution of the disk emission to the broad emission lines in AGN: Two-component model, Popovic L. C., Mediavilla E., Bon E., Ilic D., Astronomy and astrophysics, 2004, vol. 423, n03, pp. 909-918.

[82] Relativistic Effects in the QSO Broad-Line Region, Michael R. Corbin, The Astrophysical Journal, 485:517–522, 1997 August 20

Des investigations statistiques récentes sur les raies UV larges de QSO lumineux (Relevé de raies d'absorption de Steidel et Sargent et le LBQS) indiquent que la BLR traditionnelle se compose au moins de deux régions de vitesses distinctes. Une zone productrice de raies d'émission de $FWHM_{moy}$ ~ 2000 km.s^{-1}, l'ILR, systématiquement décalée vers le rouge et une autre avec une $FWHM_{moy}$ ~ 7000 km.s^{-1}, décalée vers le bleu d' ~ 1000 km.s^{-1}, la VBLR. Il a été suggéré que l'ILR soit une extension interne à la NLR.

Les rapports de raies de l'ILR diffèrent de ceux de la VBLR. Variable, la contribution de l'ILR par rapport à celle de la VBLR explique une grande partie de la diversité des profils de raies, y compris ces corrélations rapportées avec la largeur des raies, une mesure du rapport de l'ILR à la VBLR :

La comparaison avec d'autres régions d'émission des AGN montre que le spectre de l'ILR indique des conditions intermédiaires entre celles de la VBLR et celle de gaz plus éloigné du continu ionisant, comme la NLR et la nébulosité Lyα étendue. Les modèles de photoionisation suggèrent que, comparé à la VBLR, l'ILR est environ dix fois plus éloignée de la source du continuum ionisant (~ 1 pc), 100 à 1000 fois moins dense (10^{10} cm^{-3}), et a un plus petit "facteur de recouvrement [83]" (≤ 3 %, comparés à 24 % pour la VBLR).



Vue d'artiste d'un modèle de nuages.

source : "A cloud model of active galactic nuclei: the iron Kα line diagnostics" ; Karas, V., Czerny, B., Abrassart, A., & Abramowicz, M. A., MNRAS, Vol. 318, Issue 2, pp. 547-560, 2000

Origine de la BLR

Lorsqu'on a un nuage de matière sombre en rotation, très compacte (chauffée par contraction gravitationnelle ou par fusion nucléaire), on peut obtenir un AGN compact, avec une très forte luminosité de surface.

Cette très forte luminosité de surface peut générer une telle pression de radiation que les ions et atomes attirés, à l'origine, par la gravitation, vont refluer du centre de l'AGN. Ensuite après avoir acquis une certaine vitesse, les ions et les atomes vont commencer à s'éloigner de la source compacte.

Mais lorsque la pression de radiation diminue, la vitesse des ions et des atomes va être freinée par l'énorme potentiel de gravitation en provenance de l'AGN. Alors les ions et les atomes recommencent à chuter vers le cœur de l'AGN, jusqu'à ce qu'ils soient à nouveau stoppés par la pression de radiation, et le processus recommence.

C'est de cette manière que pourrait se former la BLR (évidement les ions et les atomes peuvent s'assembler en structure plus petites comme des nuages ou des courants de matière) [84].

---

[83] Pour des nuages optiquement épais, il est commun d'introduire le Facteur de recouvrement" (covering factor), qui est la fraction du ciel, vue depuis la source centrale, couverte par les nuages de gaz photoionisés. Ce facteur peut être estimé à partir des observations du continu Lyman ou en comparant les luminosités des raies et du continu. Pour les AGN les plus lumineux, il avoisine les 0,1 pour la BLR et une valeur inférieure pour la NLR. Les chercheurs ont pris l'habitude de négliger les phénomènes d'obscurcissement et considèrent que le flux lumineux qui atteint les nuages ne dépend que de r. Source : "Active Galactic Nuclei", eds. R.D. Blandford, H. Netzer and L. Woltjer, 1990.

[84] Ce sont exactement les mêmes mécanismes qui agissent dans la chromosphère solaire (mais la couronne solaire avec les raies interdites montre plus des caractéristiques de NLR). Plusieurs auteurs ont souligné que l'enveloppe photo-ionisée d'étoiles comme les géantes rouges et les super-géantes, possède des caractéristiques similaires à celle de la BLR. C'est tout sauf une coïncidence, spécialement lorsqu'on a à l'esprit que les géantes rouges et les super-géantes doivent posséder un cœur riche en éléments lourds, entouré d'un large manteau gazeux. Le modèle proposé d'AGN est le même, une grosse boule d'éléments lourds (le trou noir) surmontée d'un manteau gazeux (la BLR). Peut-être la BLR n'est-elle que la partie externe d'un grande sphère de gaz.

Certains chercheurs objectent que si la BLR était un manteau gazeux alors on ne devrait pas voir l'objet central, pas plus que nous ne voyons le soleil sous la chromosphère. Mais le gaz de la BLR doit être beaucoup plus dilué et moins massif que l'analogue d'une géante rouge. En effet les forces gravitationnelles et la pression de radiation sont sans commune mesure. C'est pourquoi une partie au moins des radiations trouve son chemin dans la BLR.

Une équipe d'astronomes, en analysant les données de sources X d'objets lointains, a découvert que l'abondance chimique du fer, au centre des AGN, était trois fois plus importante que celle du Soleil. Ce fut étonnant, car ils ne s'attendaient pas à trouver de telles quantités de fer aussi tôt après le Big-Bang. La largeur des raies du fer (raie Kα à 6,4 keV, cf. Annexe D) indiquait que les atomes de fer se déplaçaient à de hautes vitesses.

Si la luminosité de la source compacte augmente, il doit y avoir reflux de la BLR. La coquille de la BLR devient plus diluée et les vitesses ainsi que les largeurs des raies d'émission CIV décroissent.

Les largeurs équivalentes de la ligne d'émission C_{IV} tendent à diminuer systématiquement avec l'augmentation de la luminosité du continu. C'est l'effet Baldwin [85] (cf. Annexe D), dont l'origine n'est pas encore élucidée.

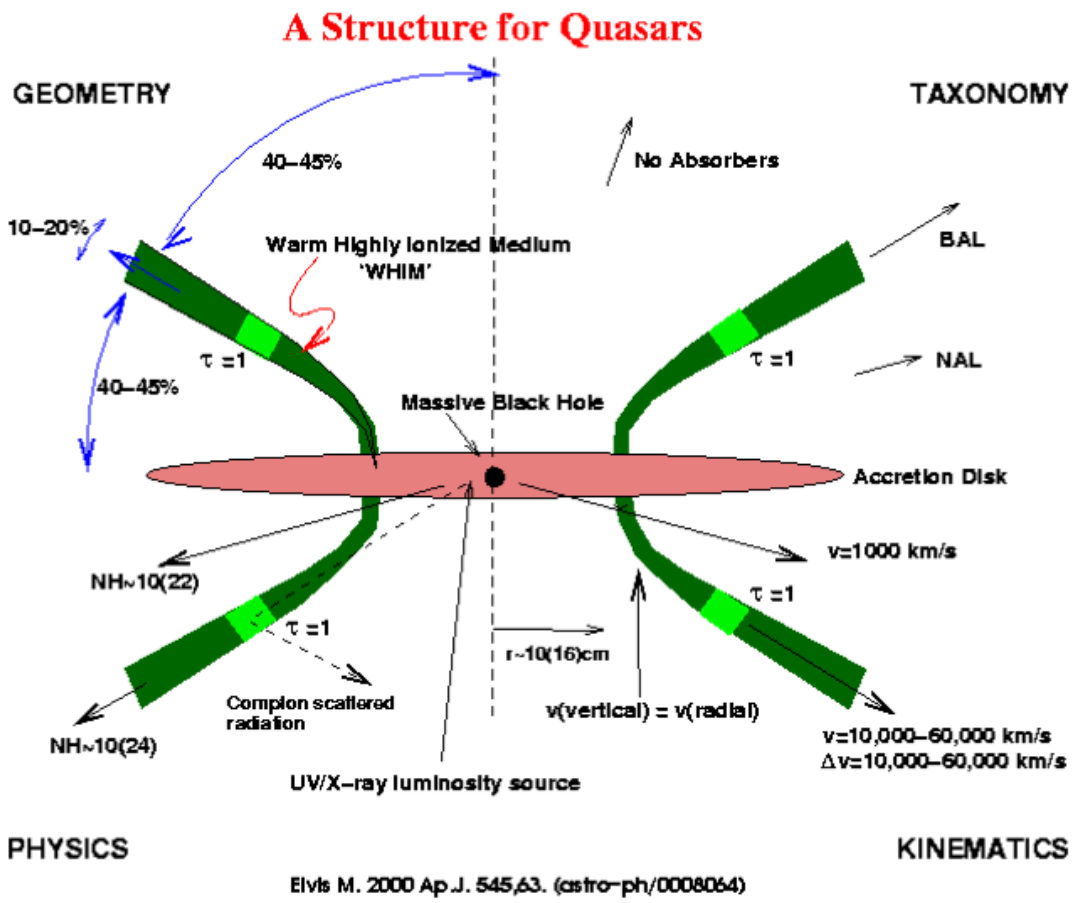
Dans un spectre de BLR, différentes raies d'émission peuvent avoir différentes largeurs. On rencontre souvent des raies dont les largeurs ne sont pas comparables (les raies de $HeII_{\lambda 4686}$ et $HeI_{\lambda 5876}$ sont souvent plus larges que celles de Balmer pour H). Ceci peut aussi être dû au fait que He s'approche plus près du cœur de l'AGN et He s'oppose ainsi aux forces de pression de radiation et de gravité et on obtient des vitesses plus élevées et des raies d'émission plus larges.

En outre les raies de haut niveau d'ionisation (comme $HeII_{\lambda 4686}$) sont décalées vers le bleu par rapport aux raies de basse ionisation ($HeI_{\lambda 5876}$). Ceci pourrait être dû au fait que HeI dépouillé d'un électron, en s'approchant de la source compacte, s'ionise en HeII et est repoussé par la pression de radiation et s'éloigne en tant que HeII (qui se rapproche donc de l'observateur par rapport à HeI). Puis HeII est freiné puis stoppé par l'attraction gravitationnelle, il redevient un HeI, en gagnant un électron et replonge vers la source centrale, d'où le HeI redshifté par rapport à HeII.

Les changements des profils de raies d'émission ne sont pas des effets de réverbération et ne sont corrélés en aucune façon avec la variabilité du continu. Les changements pourraient être dus aux atomes ou à des nuages atomiques (à différentes concentrations) s'approchant et/ou s'éloignant de la source compacte tandis que la source compacte et la BLR sont en rotation (de différentes manières, sans corrélation avec la variation du continu). La rotation pourrait amener les atomes ou nuages atomiques dans la ligne de visée de l'observateur et provoquer les changements des profils de raies.

[85] Baldwin, J.A. 1977 ApJ, 214, 679 et Baldwin, J.A., Wampler, E.J., & Gaskelll, C.M. 1989, ApJ., 338, 630

D'après Elvis [86], peut-être BLR et vents sont ils liés, comme dans l'hypothèse déjà soumise pour le disque d'accrétion.



Il reste un problème :

Comment les sources compactes des AGN sont-elles alimentées avec du gaz si un équilibre se crée entre l'attraction gravitationnelle et la pression de radiation qui repousse le gaz et les nuages de la BLR ?

[86] Elvis, M., "A Structure for Quasars" ; ApJ, Vol. 545, Issue 1, pp. 63-76., 2000

5. Narrow-Line (Emission) Region (NLR)

La NLR est intéressante à plus d'un titre. C'est la plus grande structure visible où le rayonnement ionisant de la source centrale domine encore les autres sources. Sa forme générale est celle d'un cône, peut-être une résultante des champs magnétiques initiaux, atténués.

La NLR est le seul composant des AGN résolu spatialement en optique avec les meilleurs instruments.

De plus à la différence de la BLR, la densité électronique de la NLR est suffisamment faible pour que des transitions électroniques interdites puissent apparaître. L'analyse en est simplifiée, mais en contrepartie, les spectres sont "pollués" par la présence de poussières (sublimée pour les distances inférieures).

C'est cependant un bon moyen de trouver une ligne de démarcation entre NLR et BLR.

La NLR s'étend sur quelques milliers d'années-lumière et dans les galaxies de Seyfert qui ne sont pas trop éloignées, elle peut même être résolue optiquement.

Selon Nennert, Falcke, Shchekinov et Wilson [87], la BLR est trop compacte pour que nous ayons directement accès à sa taille et les chercheurs utilisent la technique de "Reverberation mapping" (e.g. Wandel et al. 1999; Kaspi et al. 2000). Alors que Kaspi et al. (2000) rapportait un rapport Taille de la BLR-Luminosité tel que $R_{BLR} \propto L^{0.7}$, et McLure & Jarvis (2002) trouvaient $R_{BLR} \propto L^{0.5}$. Si la taille de la NLR peut s'obtenir par la luminosité de l'AGN, il est intéressant de savoir ce que cela peut nous apporter pour la connaissance de la taille de la BLR ou de la masse du TN. Les chercheurs ont comparé les tailles mesurées de BLR avec les tailles mesurées de NLR. Sur onze objets, ils ont pu estimer que la taille de la NLR et celle de la BLR étaient proportionnelles, selon :

$$R_{BLR} \approx R_{NLR,1}^{0.88\pm0.1}$$

Alors que les calculs pour évaluer la taille de la BLR sont très consommateurs de temps, les relations avec la luminosité ou la taille des NLR sont plus simples et extrêmement utiles pour le calcul des masses des TN.
Avec les tailles de NLR directement mesurées ou déduites de la $L_{[OIII]}$, ils ont pu estimer la taille de plusieurs BLR, qui, sous réserve de mouvements képleriens, permettent d'estimer la masse des TN :

$$M_{BH} = 10^{5.22} M_{\Theta} v_{3000}^{2} R_{NLR,1}^{0.88} \text{ ou } M_{BH} = 10^{8.83} M_{\Theta} v_{3000}^{2} L_{44,[OIII]}^{0.48}$$

avec v_{3000} = FWHM $_{(H\beta)}$/3000 km.s^{-1}, $R_{NLR,1}$ en parsec, $L_{44,[OIII]} = L_{[OIII]}/10^{44}$ erg.s^{-1}.

La dernière équation est similaire à $M_{BH} = L_{5100\,\mathring{A}}^{0,5}$, trouvée par Shields et al. en 2003.

Grâce à la haute résolution des profils des raies Hβ et Hα observés avec le télescope Isaac Newton Telescope [88] (La Palma), les astronomes ont réalisé une étude des sous-structures des raies (épaulements, bosses), qui peuvent indiquer une émission du disque ou du pseudo-disque de la BLR. En appliquant une analyse Gaussienne, les astronomes ont découvert qu'à la fois la BLR et la NLR présentaient deux régions d'émission. En étudiant les raies étroites de [OIII], ils s'aperçurent qu'elles résultaient de la composition de deux parties. Une NLR1, présentant des vitesses aléatoires d' ~ 200 à 500 km.s-1 et systématiquement décalée vers le bleu de 20 à 350 km.s-1 tout en respectant un redshift systémique et une NLR2, avec de plus petites vitesses aléatoires (100 à 250 km.s-1) et un redshift équivalent au redshift cosmologique [88].

---

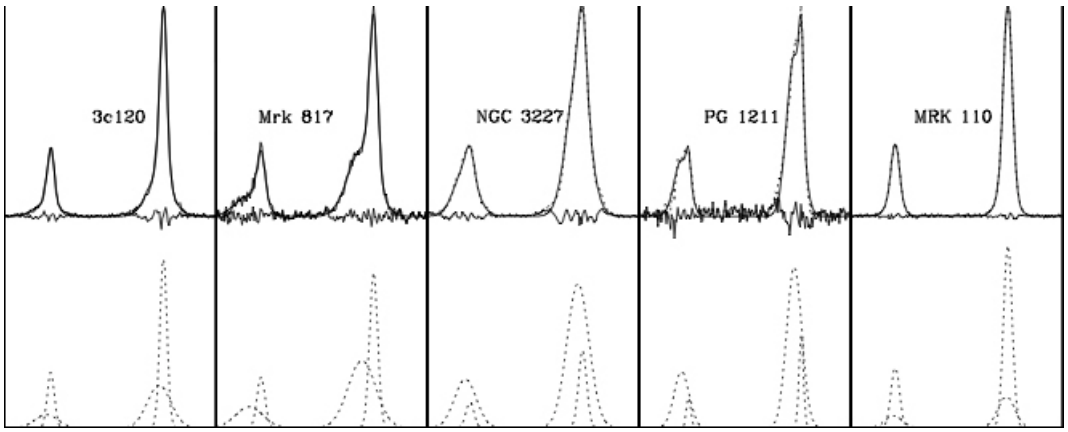
[87] Comparing AGN broad and narrow line regions, Nicola Bennert, Heino Falcke, Yuri Shchekinov and Andrew S. Wilson, The Interplay among Black Holes, Stars and ISM in Galactic Nuclei, Proceedings IAU Symposium No. 222, 2004

[88] L.C. Popovic et al.: Contribution of the Disk Emission to the Broad Emission Lines in AGN, 2004, A&A, v.423, p.909-918 (2004)

Paramètres des composants Gaussiens des raies [OIII] de l'étude concernée

Object	W_{NLR1}	R_{NLR1}	R_F	W_{NLR2}	Δz	I_B/I_C
3c 120	420	3.0	2.9 ± 0.1	130	-110	0.25
3c 273	950	2.7	-	497	-200	0.39
Mrk 1040	330	1.8	2.4 ± 0.1	190	-340	0.30
Mrk 110	300	2.6	3.0 ± 0.1	150	-40	0.17
Mrk 817	510	3.0	3.0 ± 0.1	145	-300	0.43
Mrk 841	215	2.6	2.8 ± 0.1	80	-20	0.45
NGC 3227	400	3.0	3.0 ± 0.1	140	-120	1.87
NGC 4253	340	2.8	3.0 ± 0.1	105	-55	0.55
PG 1116	650	1.8	-	239	-345	0.88
PG 1211	270	2.8	3.0 ± 0.1	81	-180	1.80

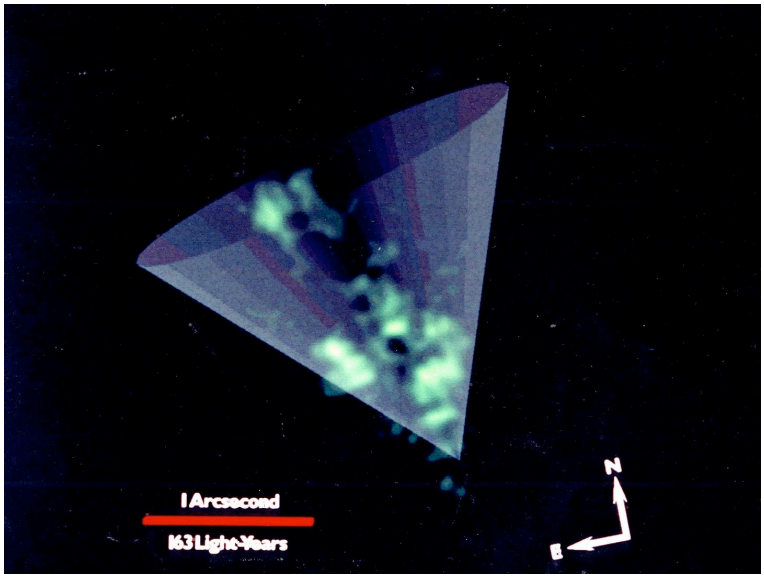
Les largeurs gaussiennes (W) et $\Delta z = z_{NLR2}-z_{NLR1}$ sont indiquées en km.s^{-1}. Le rapport d'intensité $R_{NLR1}=I_{5007}/I_{4959}$ de la composante bleue, est obtenu à partir de la courbe gaussienne, le rapport du flux mesuré $R_F=F_{5007}/F_{4959}$ et le rapport de l'intensité centrale du composant gaussien bleu, central (I_B/I_C) sont également donnés (colonnes 2.3 et 6).



Certaines mesures montrent un continuité entre la BLR et la NLR. A la fois dans la BLR et la NLR, il existe diverses stratifications, soit en densité, soit en niveau d'ionisation (ou les deux), croissants en direction du centre. Si la dispersion de densité et de vitesses augmente au fur et à mesure qu'on s'approche du noyau, alors la NLR va fusionner plus ou moins naturellement avec la BLR.

Peut-être les atomes de la NLR sont-ils plus souvent sous forme de nuages que ceux de la BLR, plus fréquemment sous forme d'atomes ou d'ions individuels ou plutôt de courants d'atomes ou d'ions. Les raies permises des Seyfert 2 possèdent la même largeur que celle des raies interdites. Ce qui voudrait dire que la concentration des gaz est différente dans différentes parties de la NLR qui ont pourtant la même distance radiale. Ceci renforce l'idée que les atomes de la NLR seraient condensés sous forme de nuages.

La NLR est la région à partir de laquelle apparaissent les poussières. Cette région devient moins froide et il ne peut plus y avoir sublimation des poussières.



Dans cette vue du cœur de la galaxie NGC 1068, le HSTrévèle beaucoup plus de détails que vus précédemment. Cette image a été prise avec un filtre Narrow-Band avec la caméra WF/PC. L'image a été traitée pour affiner les détails des nuages de gaz ionisés. Des nuages aussi petits que 10 a.l sont résolus dans la zone centrale de 150 a.l. Une représentation schématique du cône de rayonnements ionisants a été artificiellement ajoutée pour illustrer la manière dont les radiations sont focalisées.

NASA, H. Ford, and the Faint Object Spectrograph (FOS) Investigation Definition Team.

La présence de nuages dans la NLR des AGN peut être causée par l'apport de gaz intergalactique ainsi que par le gaz éjecté de la BLR en raison de la pression de radiation. Si l'émission du continu des AGN peut changer de temps en temps, il doit y avoir une zone radiative très puissante dans la source centrale qui souffle la BLR et propulse du gaz hors de celle-ci. Par conséquent, les nuages de la BLR peuvent devenir des nuages de la NLR et réciproquement, si la gravité croît dans la NLR. Le même processus d'éjection de la BLR existe dans la NLR. Les nuages peuvent être "un peu" repoussés par la pression de radiation et à contrario, ils peuvent être "un peu" attirés par la force de gravitation. Ce "un peu", implique de plus faibles vitesses que pour la BLR et des raies d'émission plus étroites.

D'autres causes peuvent intervenir, comme les étoiles. A la différence de la BLR pour laquelle la largeur des raies reflète le potentiel de la source centrale, la largeur des raies de la NLR reflète le champ gravitationnel des étoiles avoisinantes, même si les astronomes estiment que le gaz de la NLR est photo-ionisé par le spectre de l'AGN et pas par les étoiles. Le rapport des raies $[OIII]_{4363/(4959+5007)}$ permet d'estimer la température de la NLR à ~ 1,5±0,5.10^4 K et le rapport des raies $[SII]_{6717/6731}$ indique une densité de l'ordre de 10^3 à 10^6 cm^{-3}. Avec le modèle de BLR proposé, l'interpénétration de la BLR et de la NLR prend un sens dans la mesure où les atomes/ions de la BLR, par l'intermédiaire de chocs, acquièrent de la vitesse et s'intègrent à la NLR. De même, il n'y a aucune raison pour que les atomes/ions de la NLR ne puissent retomber dans la BLR.

Après avoir scindé en deux la région centrale d'émissions des AGN (BLR et NLR), une troisième zone d'émission a été évoquée pour certains AGN [89]. Cette région, extérieure à la NLR, la ENLR (pour Extended narrow Line Region), est aussi plus étendue.

Des recherches sur la ENLR de NGC 4151, ont amené à la conclusion que le gaz de l'ENLR est illuminé par un faisceau anisotrope de rayonnements UV et que l'émission provenant de la BLR ne pouvait provenir que d'un cône (schéma unifié de Antonucci & Miller, 1985). Cependant, les premiers modèles et les études spectrales ne cadraient pas. Or il s'avère que le cœur de NGC 4151 est entouré d'une région "Starburst", essentiellement constituée d'étoile WR, qui représente 3,8 10^{43} $erg.s^{-1}$ et le flux UV du rayonnement non thermique du noyau avant absorption photoélectrique ne représente que 20 à 30 % du flux UV des "Starburst" à une distance de 2 kpc [90]. En outre la forme circulaire de la zone de flambée d'étoile peut expliquer la forme conique des flux d'émission du cœur de l'AGN. Au même titre que pour le confinement des nuages de la BLR, il est envisagé que les nuages de la NLR et de l'ENLR soient confinés au sein d'un milieu inter-nuageux beaucoup plus chaud.

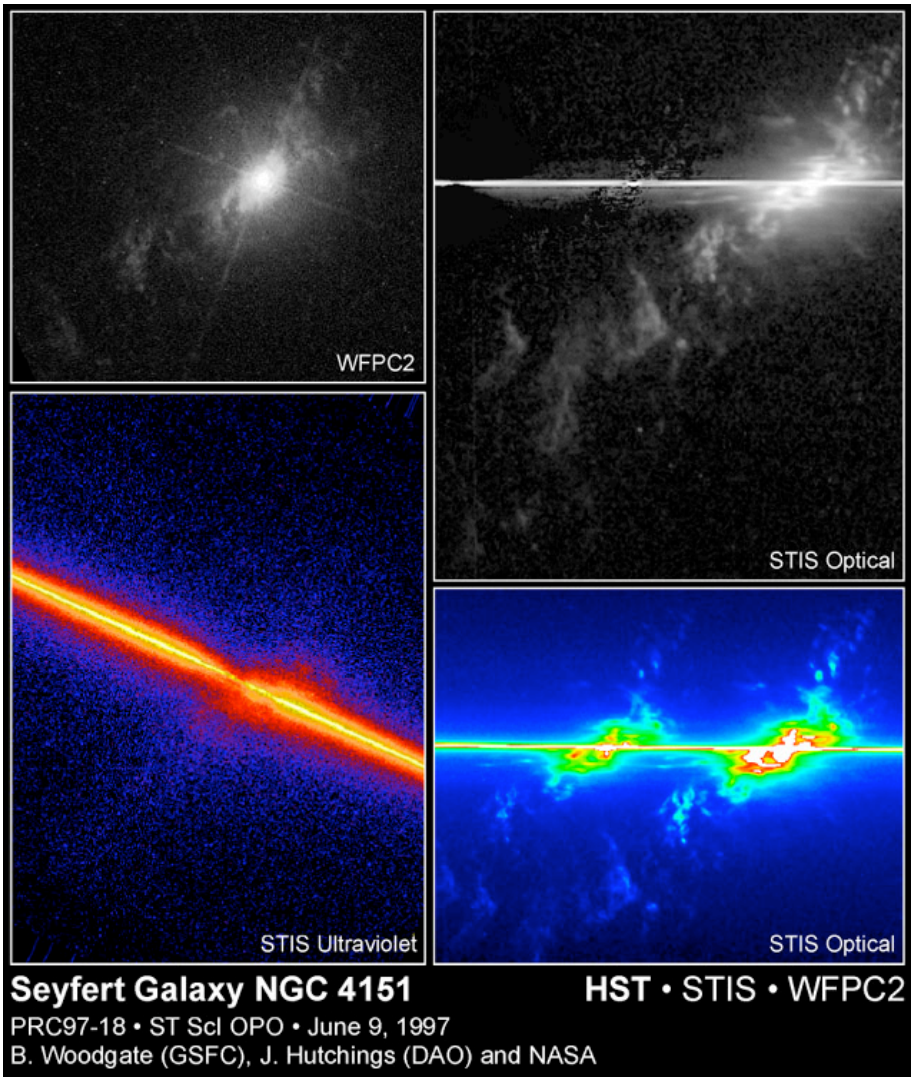
Au sein de l'ENLR, le champ de dispersion des vitesses est de l'ordre de 50 à 130 $km.s^{-1}$ et son extension est de plusieurs kpc [91].

---

[89] Unger et al., 1987 ; Bergeron & Durret, 1987

[90] Bruhweiler et al, 1991 ; Evans & Dopita, 1986

[91] "The Central Kiloparsec of Seyfert and Inactive Host Galaxies : a Comparison of Two-Dimensional Stellar and Gaseous Kinematics, Dumas, Gaëlle; Mundell, Carole G.; Emsellem, Eric; Nagar, Neil M., MNRAS 4, 379 (2007) 1249-1278

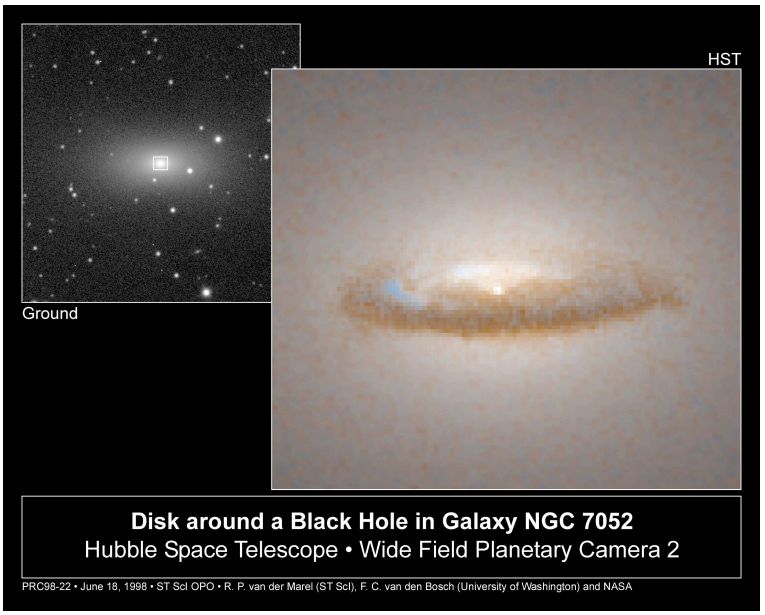


WFPC2 (en haut à gauche) — Image de l'émission de l'oxygène (λ5007 Å) issue du gaz du cœur de NGC 4151. Même si on voit les structures jumelles en cône, aucune information n'est fournie sur les mouvements de cet d'oxygène.	*STIS Visible (en haut à droite) — Image spectrale de l'oxygène, les vitesses des points brillants sont déterminées par comparaison avec les points brillants de l'image de WFPC2.*
STIS UV (en bas à gauche) — Cette image spectrale montre la distribution de vitesses des émissions du carbone issues du gaz du cœur de NGC 4151. Il faut plus d'énergie pour ioniser ce carbone ($C_{IV\lambda1549}$ Å) qu'il n'en faut pour ioniser l'oxygène. Ceci signifie que le carbone est plus proche de la source ionisante.	*STIS Visible (en bas à droite) — Dans cette image spectrale en fausse couleur, les deux raies d'émission de l'oxygène (la plus faible à λ4959 Å et la plus forte à λ5007 Å) sont nettement visibles. La raie horizontale est la lumière générée par le trou noir central de NGC 4151.*
Source NASA http://hubblesite.org/newscenter/archive/releases/1997/18/image/a/	

6. Tore Moléculaire et Poussières

Les tores de poussières ont été évoqués pour expliquer les deux principales catégories d'AGN, nommés type 1 et type 2.

Les poussières re-émettent les rayonnements absorbés à de plus grandes longueurs d'ondes, même si les AGN de type 1 montrent un spectre de puissance caractéristique des disques d'accrétion à de courtes longueurs d'onde et une bosse IR pour $\lambda \geq 1$ µm, qui peut être attribuée à un retraitement par la poussière. Les AGN de type 2 ne montrent que l'émission IR due aux poussières.



Le disque de poussières de NGC 7052

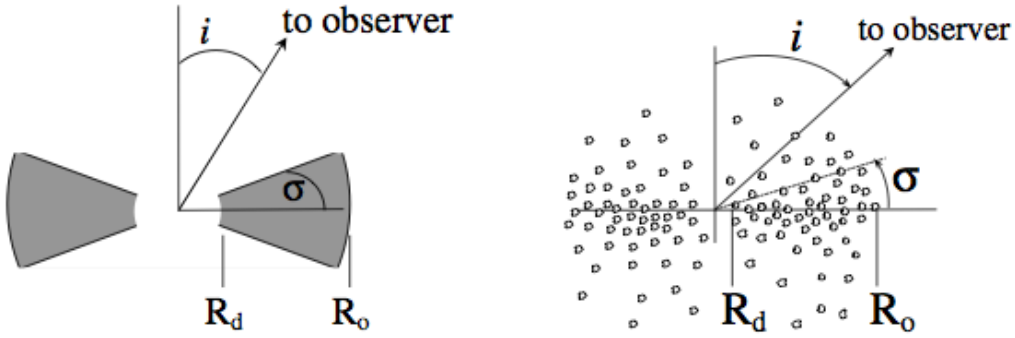
Source : R. P. van der Marel (STScI) et al., WFPC2, HST, NASA

Selon des analyses de l'émission à 10 µm du tore de NGC 1068 au VLTI, la température moyenne est estimée à 226 K, sur une extension de 1,7 à 2,7 pc. Pour une $L_{bol} \sim 2.10^{45}$ erg.s^{-1}, la température attendue, à 2 pc du cœur de l'AGN, est de T=960 K et T=320 K n'est prédite qu'à r=26 pc et T=226 K seulement à 57 pc (contrairement aux 2,7 pc trouvés). Ces soucis sont résolus si on considère que le tore est composé de nuages individuels de poussières, optiquement épais. Dans ce cas la température est supérieure du côté illuminé par l'AGN à celle relevée du côté sombre. Alors que la température, côté AGN, est estimée à 950 K à une distance de 2 pc, celle, côté obscur, est estimée à 250 K à 2 pc et à 210 K à 3 pc. Alors, les mesures du VLTI cadrent avec les estimations.

Pour le rayonnement IR, l'obscurcissement par le tore est un phénomène hautement anisotrope, alors que les émissions en IR des AGN de type 1 et 2 semblent être isotropes. Une analyse de 87 galaxies de Seyfert par Buchanan et al. (2006) à λ=5-35 µm n'a pas pu statuer sur ce point. La solution semble être la fragmentation du tore. Un disque fragmenté peut produire de fortes anisotropies d'obscurcissement alors que le rayonnement IR reste à peu près isotrope, tel qu'observé. Un modèle de tore fragmenté a été proposé par Nenkova et al. (2002, 2007) qui produit une SED qui cadre avec les observations.

- Le nombre de nuages , en moyenne, le long de l'axe radial est N_o = 5 à 10
- La largeur angulaire est σ = 30° à 60°
- L'indice de la distribution en loi de puissance est q = 1 à 2
- La densité optique (λ visuelle) de chaque nuage est τ_v = 40 à 120
- Le tore s'étend depuis la zone de sublimation des poussière à $R_d = 0{,}4.L_{45}^{1/2}$ pc jusqu'à $R_o \geq 5R_d$.

Selon Elitzur (2006) ces données apportent les preuves que le tore est plutôt compact, toutes les observations confirmant que R_o/R_d était < 20 à 30 et peut-être même seulement ~ 5 à 10.



En accord avec le schéma unifié. A gauche, dans un tore à "densité lisse", l'angle de vision i=1/2π-σ, est la frontière entre AGN de type 1 et de type 2. A droite, dans tore fragmenté, "à bord doux", la probabilité de voir le cœur de l'AGN décroît, mais est toujours finie. Elitzur, 2007

La classification des AGN en type 1 ou 2 est basée sur la manière dont la région nucléaire est visible. Dans le cadre de l'unification, le seul critère de détermination du type, est l'angle de vue, ce qui est le cas du modèle à "densité lisse", où $0 \leq i \leq \sigma$ donne les AGN de type 1 et $\sigma \leq i \leq \pi/2$ donne des AGN de type 2 et σ a été calculé ~45° (Schmidt et al., 2001). Cependant, Hao et al. (2005) on trouvé une valeur de σ inférieure, ~ 30°.

En raison de cette possible fragmentation, la différence entre AGN de type 1 et de type 2 n'est plus vraiment une fonction de l'orientation, mais une probabilité de vue directe sur le cœur de l'AGN. Ce qui serait une explication à certains spectres de galaxies de Seyfert identifiées comme type 1 (Alonso-Herrero, 2003), mais dont les SED ressemblent à celles des type 2. De même, si un nuage venait à masquer le cœur de l'AGN, la classification serait de type 2, indépendamment de l'angle de vue. Les changements de type rencontrés pourraient être fonction des mouvements orbitaux des nuages. Auquel cas une campagne d'observations serait judicieuse pour détecter de telles transitions.

Le tore était considéré jusqu'à présent comme une sorte de "beignet" de poussière, sensé être comme la partie externe des AGN (avec la NLR/ENLR perpendiculairement), qui pouvait être une entité distincte, composée de nuages moléculaires, constitués à partir de matériaux de la galaxie hôte. L'ensemble est contrôlé par la gravité, mais l'origine de la forme torique reste inconnue depuis les premières théories (Krolik & Begelman, 1988).

Une série d'observations montre que le tore serait en réalité dans la continuité de la BLR et non pas une entité nettement séparée. La distance de sublimation de la poussière est corrélée à $L^{1/2}$, mais surtout, la taille de la BLR est du même ordre que la région de sublimation. Pour toutes les sources pour lesquelles les deux types de données existent, le décalage temporel obtenu, en IR, correspond à la valeur haute de tous les décalages mesurés des raies larges de la BLR. Cela veut dire que la BLR s'étend jusqu'à la bordure du tore de poussière (Netzer & Laor, 1993) ; relation vérifiée sur une échelle de luminosité de six ordres de grandeur.

Risaliti et al. (2002) ont trouvé que la colonne d'absorption des rayons X des Seyfert 2 affichait des variations temporelles causées par le passage de nuages devant la ligne de visée. Si la plupart des variations provenaient de nuages sans poussières du fait de leur proximité à la source (< 0,1 pc), certaines variations impliquaient des nuages poussiéreux à quelques pc de distance. Et hormis les décalages temporels, rien ne distinguait les nuages poussiéreux des nuages non poussiéreux. Ces observations montrent que l'absorption des RX, les BEL, l'obscurcissement et le retraitement étaient produits par une simple distribution régulière de nuages dans la zone de sublimation des poussières et les différentes signatures radiatives refléteraient plutôt des changements de compositions des nuages.

Les nuages les plus externes du tore sont donc composés ou chargés de poussières, leurs gaz sont protégés des rayonnements ionisants et les raies atomiques sont éteintes. A la place, les nuages sont composés de molécules et de poussières, qui atténuent les rayonnements UV et visibles, issus de l'AGN et qui reémettent des IR.

Peut-être faut-il évoquer, en raison des théories avancées, une nouvelle appellation du tore, en TOR (Toroïdal Obscuration Region).

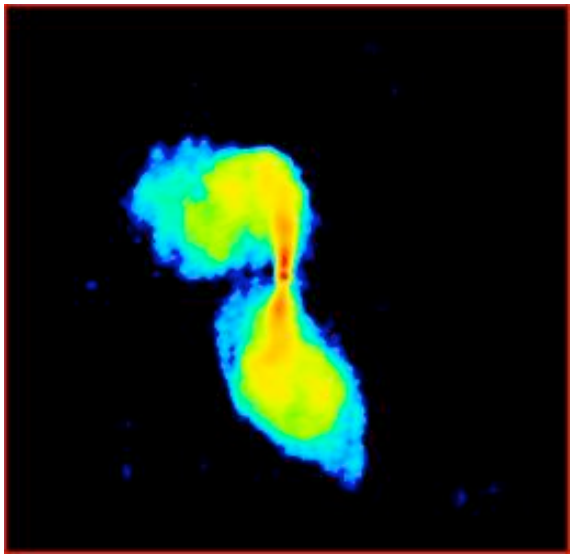
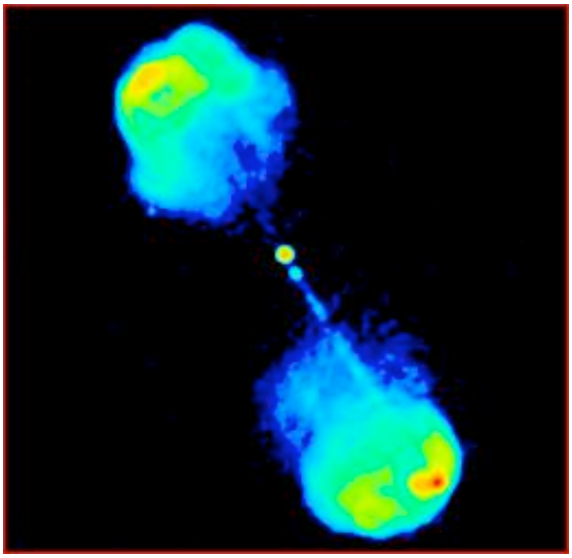
L'interpénétration des nuages ionisés et poussiéreux en une population unifiée apporte une solution au problème du maintien et de la cohérence de la structure verticale du tore. Des preuves additionnelles de flux vers l'extérieur des nuages (Elvis, 2004) indiquent qu'en lieu et place du "beignet hydrostatique", le TOR est une région baignée par un vent provenant du disque d'accrétion (Elitzur & Shlosman, 2006).

Les propriétés des nuages du TOR sont déterminées par les émissions IR et par leur résistance aux cisaillements dus aux forces de marées. Pour les AGN de faible luminosité bolométrique ($L_{bol} \leq 10^{42}$ erg.s^{-1}) et confirmant l'hypothèse des vents, le TOR disparaît car l'accrétion ne peut pas retenir les forces de dispersion des nuages. Prédictions corroborées par les observations faites à la fois sur des galaxies FR I et des LINERs (Chiaberge et al, 1999 ; Maoz et al., 2005).

En 2002, Ho a constaté que la puissance radio-émettrice est inversement corrélée au taux d'accrétion. C'est-à-dire que lorsque $\dot{M}_{acc}$ décroît, le taux d'expansion des nuages décroît également, alors que la puissance radio augmente. Une proposition d'évolution du modèle unifié a donc été proposée.

7. Lobes Radio

Nous venons de voir que les disques d'accrétion produisent des jets. Or, ces jets ne s'évanouissent pas toujours dans le vide interstellaire, mais peuvent, au contraire, générer l'apparition de lobes d'émission radio. Ce sont généralement des structures à grande échelle. Ces lobes ont des tailles comprises entre quelques kpc et 4 Mpc (3C 236). La plupart des sources ont une extension comprise entre 150 et 300 kpc et les valeurs supérieures à 1 Mpc sont rares (< 5 %). En général, les sources les plus puissantes sont les plus étendues, associées aux éjections les plus énergétiques. Ce sont les caractéristiques de jets et des lobes qui ont mené à la classification de Fanaroff et Riley (voir Chap. IV).

FR I	**FR II**
	
3C272.1	*3C47*
Faible énergie, L178 -< 2x1026 W.Hz-1	*Haute énergie, L178 >-2x1026 W.Hz-1*

C. Physiologie des AGN et Unification

Une théorie peut faire de fausses prédictions, et l'unification des AGN est une théorie. Elle nécessite que pour tous les objets de "type 1", il y ait une classe correspondante de "type 2" et la théorie prédit que les QSO de type 2 doivent exister. Après des années de recherche, ces QSO ont été découverts, grâce au SDSS et à Chandra. De plus, la spectro-polarimétrie des quasars de type 2 a même révélé les noyaux masqués de type 1 jusqu'à z ~ 0.6 (Zakamska et al. 2005). C'est un résultat spectaculaire de l'approche du modèle unifié.

A la lumière de ce succès, il sera délicat de remettre en cause la validité de cette approche unifiée. Mais il n'y a aucune raison que le disque de poussière soit le même pour tous les AGN ; il est irréaliste d'espérer que les AGN ne diffèrent que par leur luminosité, et soient identiques sur tous les autres aspects.

L'analyse radioélectrique et spectrale des AGN révèle des objets d'une nature très particulière, présentant souvent un décalage spectral très important, 3C273 s'éloigne à 48000 km/s et se situe à environ 2 milliards d'années-lumière. Un grand nombre d'AGN sont situés à quelques 10 milliards d'années-lumière et présentent des décalages spectraux proches ou supérieurs à 2. En fonction de la fréquence, l'intensité du rayonnement est dominée par certains phénomènes physiques, chacun étant associé à un mécanisme d'émission particulier.

- Raies d'émission

Entre quelques cm de longueur d'onde et 10^{-10} m peuvent apparaître 3 composantes :

- L'émission radio à 5GHz (λ = 6 cm), due à l'effet synchrotron (pour 10 % des AGN vus dans le visible), présente un spectre relativement plat, d'indice α ~ 0,5. Il peut être lié à une densité plus élevée de l'IGM, qui varie en $(1+z)^3$.

- Le rayonnement infrarouge, provoqué par les poussières chaudes, de 100 µm jusqu'au visible, a un spectre en loi de puissance, d'indice α, tel que $1 < \alpha < 1{,}2$. Cette partie du spectre recueille ~3 % de l'énergie totale émise. Ce rayonnement est certainement de nature thermique, issu des poussières situées autour des AGN entre 10 pc et 1 kpc et chauffées par le rayonnement UV de la source centrale.

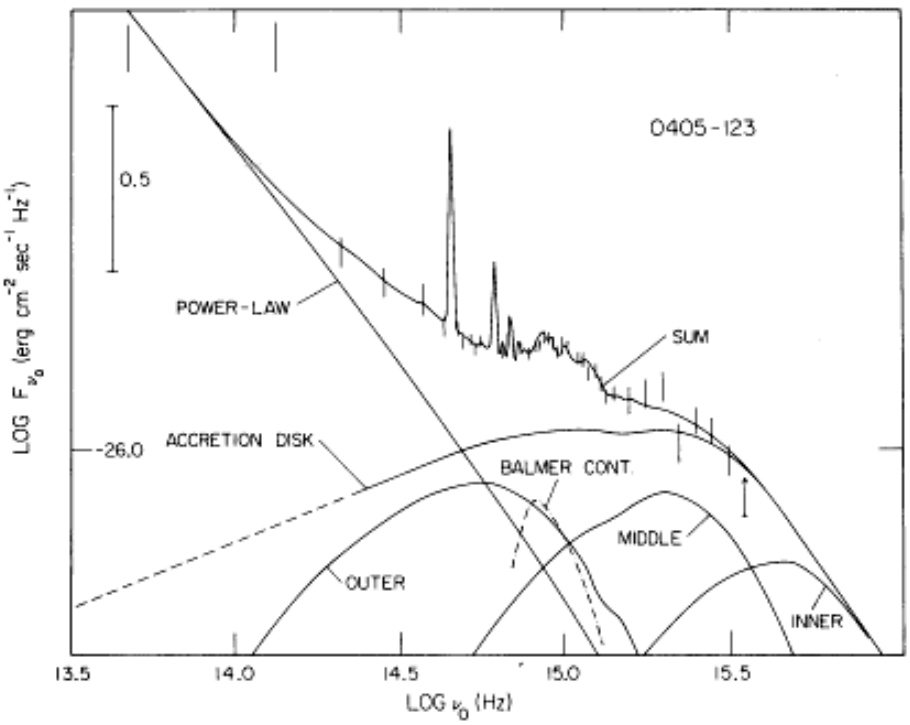
- Les rayonnements optique et UV : Dans la partie visible, le spectre est nettement plus plat, avec α ~ 0,5, il est caractérisé par une bosse centrée sur λ ~ 2500 Å, supposé être la signature thermique du disque d'accrétion (T ~ 10^4 K). Dans l'UV, le continu observé est cohérent avec le degré d'ionisation nécessaire à la présence des raies de l'hydrogène, notamment Lyman α.

puis

- Les rayonnements X, issus du disque d'accrétion. Le spectre pour des énergies < 2 keV présente une coupure, due à l'absorption par des éléments lourds. Pour des énergies comprises entre 2 keV et 100 keV, le spectre suit une loi de puissance d'indice spectral α ~ 0,7. Pour relier les domaines UV et X, la région intermédiaire doit présenter un indice spectral, compris entre 1 et 2. Ces processus sont certainement dus à un rayonnement synchrotron ou peut-être Compton inverse. Les données X apportent une information sur les structures très proches du cœur des AGN.

- Les rayons gamma sont produits par effet Compton inverse [92]

[92] Notons que les quasars qui rayonnent des ondes gamma sont rares. Avant le lancement du satellite CGRO (Compton Gamma Ray Observatory), la seule source de rayonnement gamma de plus de 100 MeV, située en-dehors de la Galaxie, était le quasar 3C273. Fin 1992 le télescope EGRET (Energetic Gamma Ray Experiment Telescope) installé à bord du satellite CGRO avait découvert 14 AGN gamma dont 11 FSRQ.



Spectre de PKS 0405-123 (z ~ 0,57) montrant la SED en IR, Visible et UV. 3 composantes sont présentes : émission synchrotron, émission thermique du disque d'accrétion et continu de Balmer (Malkan, ApJ 268, 582, 1983)

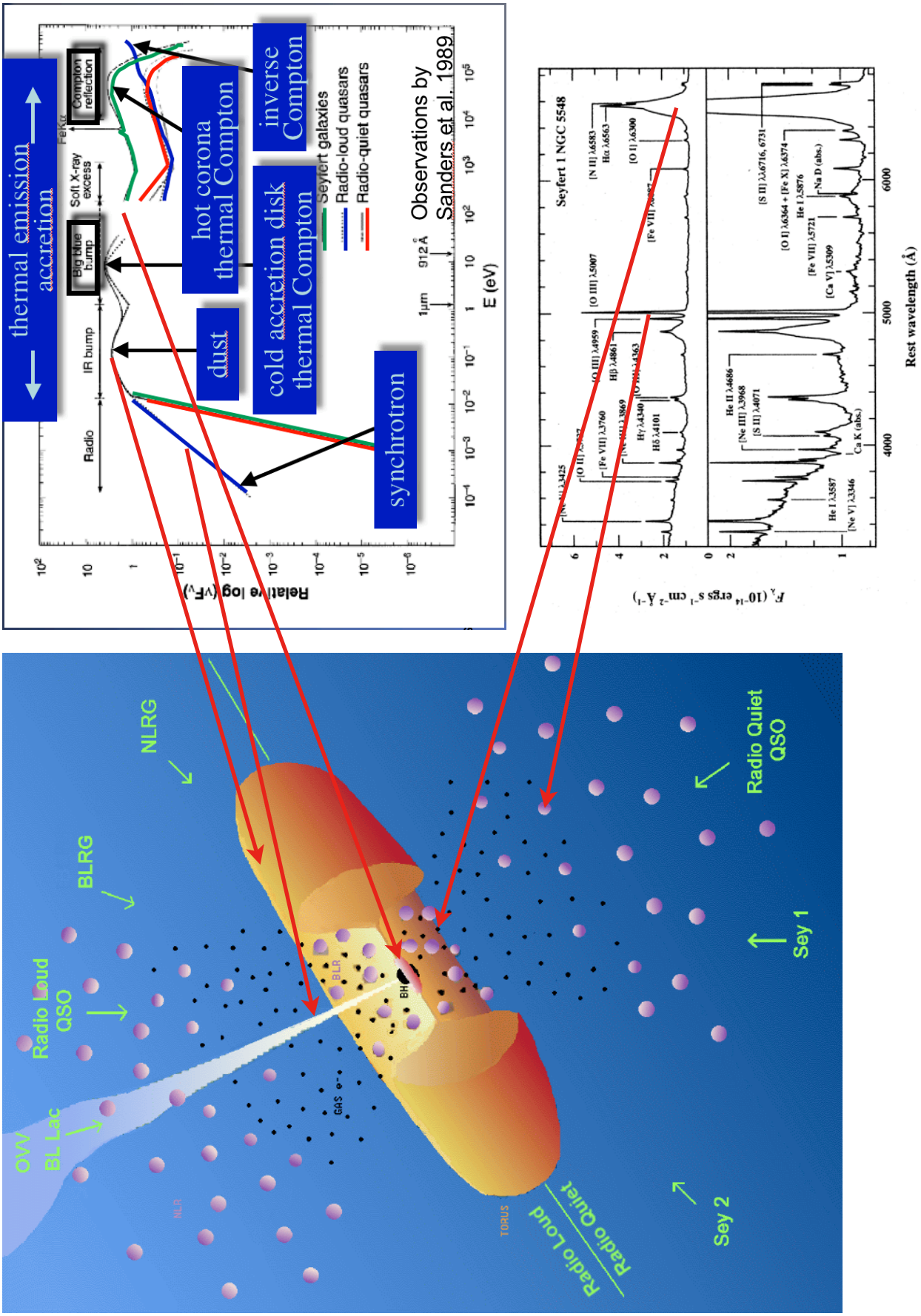
Ces rayonnements sont issus de processus bien différenciés :

- Une minorité des AGN sont des radiosources. L'émission radio provient de deux lobes de plasma (dont la masse équivaut à des millions de $M_\odot$), diamétralement opposés, très éloignés de l'objet central, contenant des particules excitées par le rayonnement intense du quasar. Cette émission radio rappelle la structure des galaxies elliptiques.

- En général le rayonnement très intense décroît à mesure que la fréquence augmente. Le rayonnement radio ne représente que 1% du spectre total d'émission. Cette énergie fluctue de façon irrégulière, l'amplitude du continu pouvant varier de 50 % en quelques jours ou quelques mois (type OVV). Au maximum de leur éclat, les quasars brillent avec une luminosité équivalente à 10^4 fois celle d'une galaxie ordinaire. Ce rayonnement très irrégulier n'a pas une origine thermique et n'est pas généré par la nucléosynthèse des étoiles.

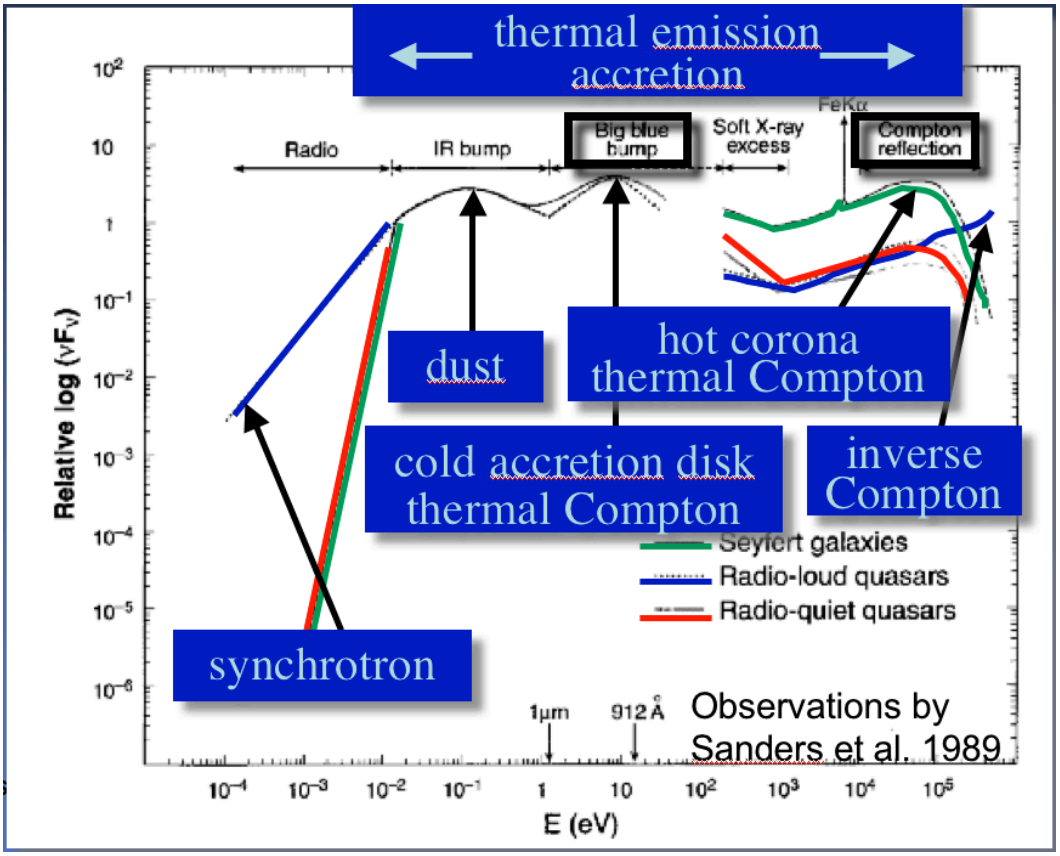
- Le gaz, fortement excité par un fond continu UV et X, libère ses électrons en émettant des raies d'émission intenses, dont celles de l'hydrogène, de l'oxygène, du carbone et de l'azote qui sont plusieurs fois ionisées. Les chocs entre particules agitent très fortement le milieu, sous forme de plasma, animé d'une vitesse de l'ordre de 10^5 km.s^{-1}. Ces nuages incandescents (3.10^4 K) restent invisibles en lumière blanche.

Le paradigme des AGN



La SED (Spectral Energy Distribution) résultante

Une synthèse du profil spectral d'un AGN est ici représenté, indiquant les différentes énergies mises en œuvre et les parties contributives de l'AGN.

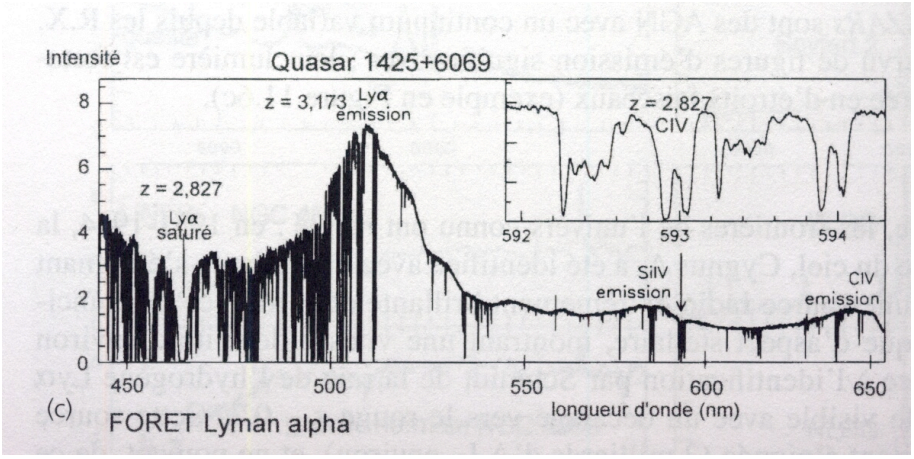


SED synthétique, présentation de Suzy Collin-Zahn (AGN, Massive Black Hole, Accretion or are AGN factories of high energy particles and photons ?, Rencontre de Blois, IN2P3, 2008), reprise de travaux de Sanders & al. 1989

Selon une étude de Sanders, sur l'observation du continu, de 0.3 nm à 6 cm, moyennée pour 109 quasars sélectionnés du relevé Palomar-Green (PG), les continus des RQQ et des RLQ à spectre pentu, peuvent être décrits avec un modèle comportant deux pics larges : une "bosse infrarouge" d'environ 2 µm à 1 mm et la "grande bosse bleue" d'environ 10 nm à 0.3 µm. Tous les quasars du relevé PG émettent une fraction significative de leur L_{bol} dans l'IR, entre 1.5 et 100 µm. La proportion varie de 10 à 50 % avec une valeur typique de 30 %. Le rapport de la densité de flux à 6 cm par rapport à cette densité de flux à 1 µm, présente une distribution bimodale. Il n'existe aucune évidence d'une étroite corrélation entre les continus en IR et en rayons X. Sanders suggère que la partie de l'émission entre 2 µm et 1 mm dans la "bosse infrarouge" des RQQ et des RLQ à spectre radio pentu du relevé PG, soit produite par des processus thermiques.

- Raies d'absorption

A partir de 1966 les astrophysiciens découvrirent que les spectres présentaient également des raies d'absorption, dont la célèbre "forêt" Lyman α (de 98 à 121 nm) et des ions carbone, oxygène et silicium, plusieurs fois ionisés. Ces doublets et autres séquences de raies présentent pour la plupart un même décalage spectral et constituent ce que l'on appelle un "système". Ils sont associés à de gigantesques halos de plusieurs dizaines de milliers d'années-lumière situés au premier plan, dans la ligne de visée du quasar. Ces nuages intergalactiques ont une si faible métallicité (10^{-4} fois la métallicité solaire) qu'ils n'ont probablement pas évolué depuis l'époque du Big-Bang. Ces halos ne sont pas homogènes et se divisent en plusieurs fragments qui filtrent la lumière des quasars distants [93].



Spectre du quasar 1425+6039, dont l'émission Lyα est décalée dans le visible. Un important système plus proche émet et absorbe des raies métalliques. Sources L. Lu & M. Rauch, ApJ, 1998

A peu près 10 % des quasars présentent des raies d'absorption très larges (BAL) pour certaines éléments métalliques faiblement ionisés (SiIII, MgIII) dont le mécanisme demeure incertain, tel le "low-BALQSO" 1556+3517.

- Ejection de matière

Pour les jets, lorsque du plasma est émis avec un angle proche de notre ligne de visée, nous assistons à des effets relativistes, le centre émissif semble se déplacer plus rapidement que la vitesse de la lumière (presque jusqu'à 30c) ! Ces effets ont été observés dans 3C273, 3C47 et des dizaines d'autres sources superluminiques depuis 1966 [94]. (cf. Annexe D)

[93] J.Bahcall et E.Salpeter, Astrophysical Journal Letters, 142, 1965, p1677 - M.Burbidge et al., Astrophysical Journal Letters, 144, 1966, L447 - J.Bergeron, Astrophysical Journal Letters, 155, 1966, L8 - J.Bahcall/L.Spitzer, Astrophysical Journal Letters, 156, 1969, L63 - P.Petitjean et J.Bergeron, Astronomy and Astrophysics, 231, 1990, p309 - J.Bergeron/P.Boissé, Astronomy and Astrophysics, 243, 1991, p344 - A.Smette et al., Astrophysical Journal, 389, 1992, p39 - S.Monis et al., Astrophysical Journal, 419, 1993, p524.

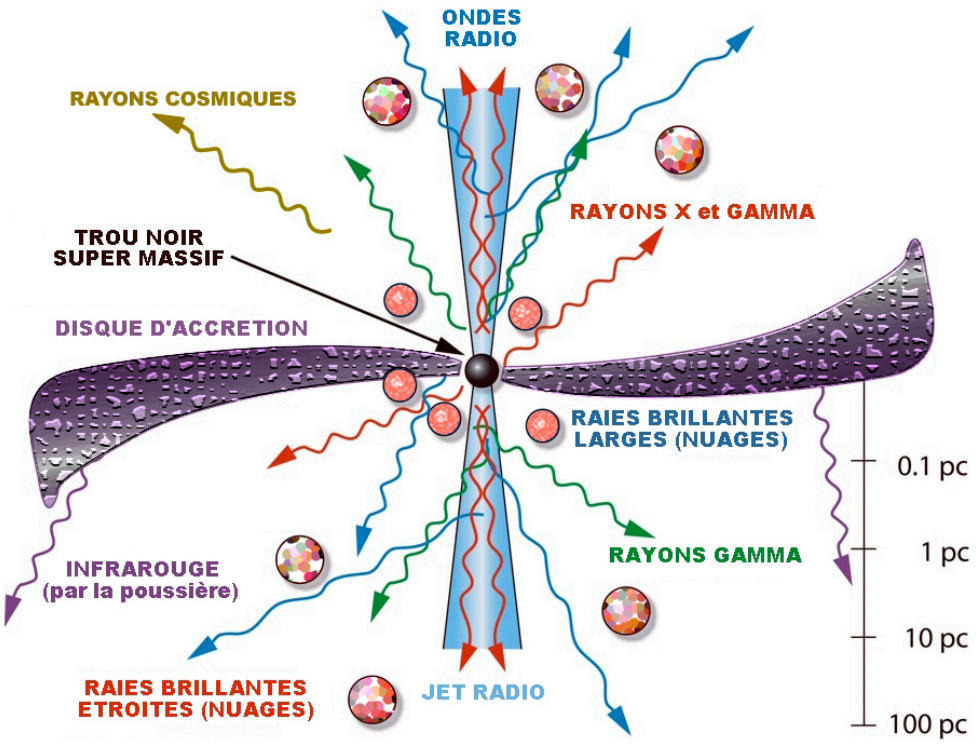
[94] M.Rees, Nature, 211, 1966, p468.

D. Le Modèle Unifié

"Regarder le ciel dans l'eau, c'est risquer de voir des poissons dans les arbres ! " - Proverbe Chinois.

Nous avons vu que le modèle de base pour les AGN consiste en un trou noir massif (au centre), un disque d'accrétion avec une couronne de gaz chaud autour du trou noir, quantité de nuages denses de matière se déplaçant à haute vitesse (BLR), des nuages moins denses, et plus lents, plus à l'extérieur (NLR+ENLR) et un tore fragmenté de poussières. Le tout surmonté de jets perpendiculaires à la structure d'ensemble.

La géométrie du cœur



Dessin original issu de http://universe.nasa.gov/be/Library/images-library4.html

Deux grandes classes de Galaxies à Noyaux Actifs sont les galaxies de Seyfert et les Quasars. La différence fondamentale entre ces deux sous-classes est dans la quantité de radiations émises par la source compacte centrale; dans le cas des galaxies de Seyfert, l'énergie totale émise par le noyau, aux longueurs d'ondes visibles, est comparable à celle de l'énergie émise par toutes les étoiles de la galaxie (~ 10^{11} $L_\odot$), mais dans un quasar typique, la source centrale brillante est plus brillante que la galaxie qui l'héberge d'un facteur 100 au moins (> 10^{13} $L_\odot$).

Les modèles unifiés les plus favorisés à ce jour sont les "modèles basés sur l'orientation". Ceux-ci proposent que les différences apparentes entre différents types d'objets sont simplement dues à des orientations différentes par rapport à l'observateur.

- Le modèle unifié permet d'envisager la classification des AGN, en fonction de la ligne de visée et/ou de la présente ou l'absence de jets.

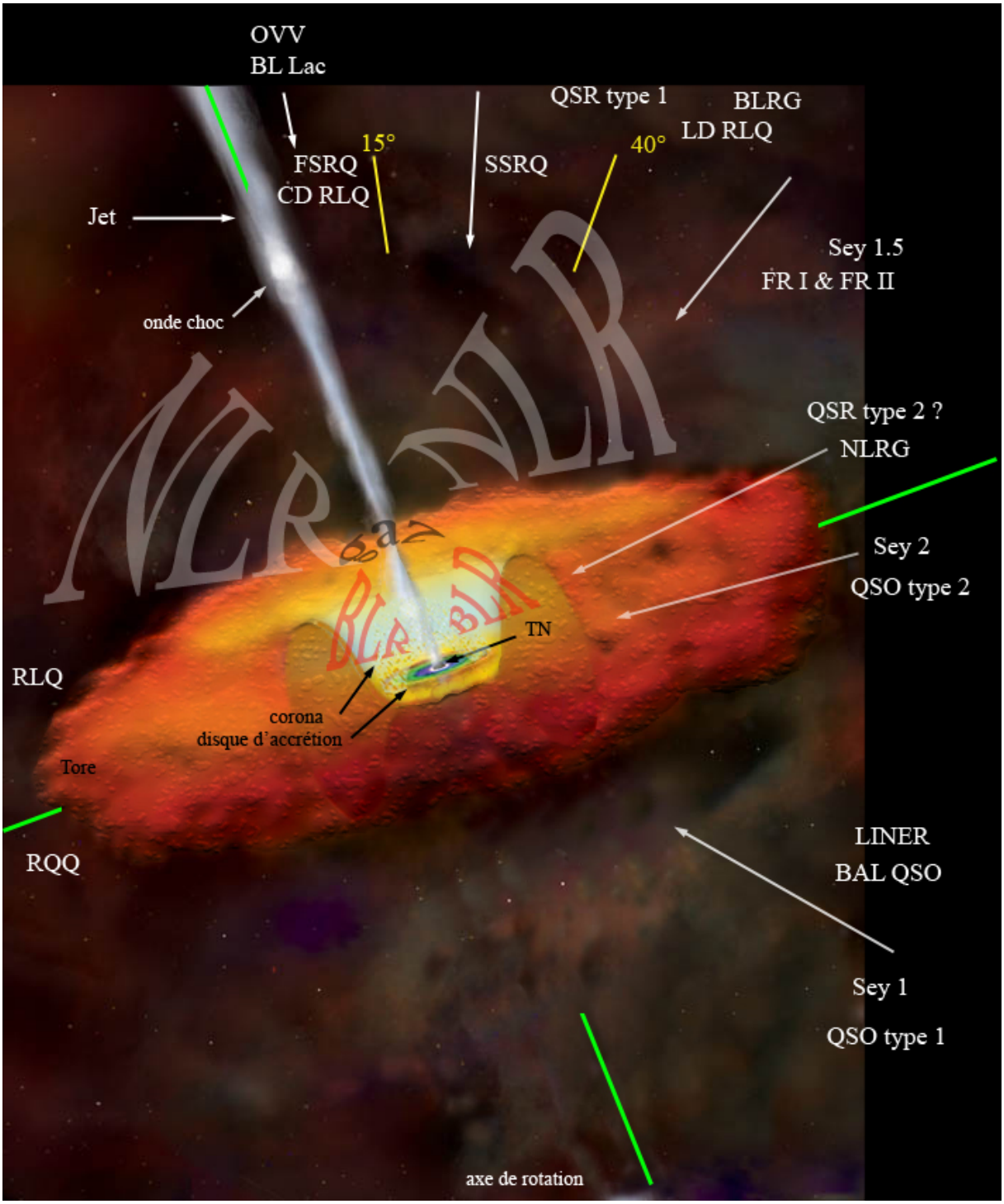
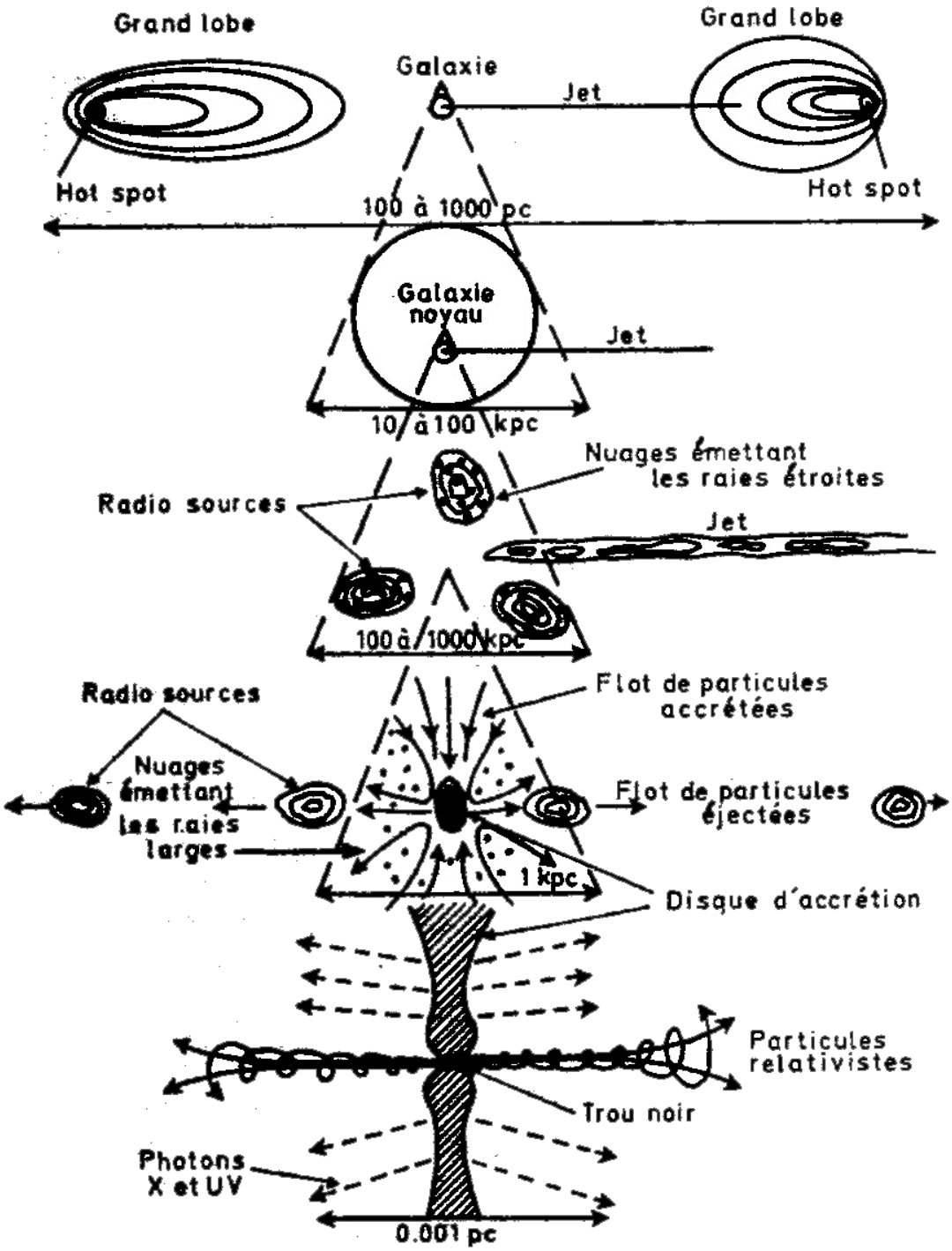


Schéma unifié modifié, sur une illustration de M. Weiss.

Source: http://chandra.harvard.edu/resources/illustrations/blackholes.html.

- La géométrie à grande échelle (exemple d'un quasar)



Source : Astrophysique - Galaxies et Cosmologie. F. Combes, 1991.

Récapitulatif des propriétés

Nous constatons qu'il n'y a pas de signature observationnelle unique pour les AGN. La liste ci-dessous regroupe certains éléments importants qui ont permis l'identification de systèmes comme étant des AGN.

- Le continu du noyau, dans le visible, est présent chaque fois que nous avons une vue directe sur le disque d'accrétion. Les jets peuvent aussi contribuer aux émissions d'un AGN.
- Les émissions nucléaires en IR sont visibles chaque fois que le disque d'accrétion et la matière environnante sont obscurcis par du gaz et des poussières qui reémettent le rayonnement énergétique reçu. Ce sont des émissions thermiques qu'on peut distinguer de celles des jets (qui ne le sont pas).
- Les raies d'émission larges aux longueurs d'ondes visibles proviennent de matériaux proches du trou noir central. Les raies sont élargies en raison de la densité de la zone émettrice et de la vitesse de déplacement des matériaux émetteurs.
- Les raies d'émission étroites dans le visible proviennent de matériaux "froids", dont la vitesse de déplacement est moindre. Ceux-ci étant en outre plus éloignés du noyau, la zone émissive est moins dense et les raies sont plus fines.
- Le continu radio est toujours dû à un jet. Il montre un spectre caractéristique d'un rayonnement synchrotron.
- Le continu en rayons X peut provenir à la fois d'un jet et de la couronne chaude du disque d'accrétion (corona) via des processus de séparation. Quel que soit l'émetteur, on peut observer un spectre de faible puissance. Pour certains AGN RQ , il existe de petits sursauts X, mais plus ce faible continu. L'origine de ces sursauts n'a pas encore été élucidée.
- Les raies d'émission X sont la résultante de l'illumination de matériaux lourds et froids par un flux continu de rayons X. La fluorescence donne lieu à des raies d'émission variées, la plus connue étant celle du fer à ~ 6,4 keV. Ces raies peuvent être larges ou étroites.

Perspectives [95]

Avertissement

"...commander aux professeurs d'astronomie de confondre leurs propres observations et démonstrations, c'est demander l'impossible, parce que ce n'est pas seulement leur demander de ne pas voir ce qu'ils voient, et de ne pas comprendre ce qu'ils comprennent ; c'est de chercher et de découvrir le contraire."

Galileo Galilei, d'une lettre à la Grande-Duchesse Cristina, juin 1615

[95] selon S. Jogee: The Fueling and Evolution of AGN: Internal and External Triggers, Lect. Notes Phys. 693, 143–183 (2006) Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2006

1. Évolution symbiotique des trous noirs et des Bulbes : La masse du trou noir central semble être étroitement corrélée avec la dispersion de vitesse stellaire du bulbe de la galaxie hôte. Avec un éventail des masses de 10^6 à 10^{10} $M_{\odot}$, les trous noirs supermassifs suivent la même relation M_{TN}-σ [96], bien que le type de galaxies hôtes puisse comprendre des galaxies Sb-Sc (E/So) de type précoce ou des galaxies de Seyfert locales ou encore des QSO lumineux à z ~ 3. De nombreuses variantes de la relation M_{TN}-σ ont été proposées, y compris des corrélations serrées entre M_{TN} et L_{bul}, une concentration de galaxies, l'indice de Sérsic [97], ou la masse du halo de matière sombre.

2. Epoque de recensement et de croissance des trous noirs : Un recensement de la densité de masse des trous noirs à différentes époques suggère que l'accrétion, pour une efficacité radiative standard pendant l'ère des quasars (z = 0.2 à 5), puisse aisément expliquer la densité de masse des trous noirs (quelques 10^5 $M_{\odot}.Mpc^{-3}$) trouvée dans les galaxies locales de type précoce (z < 0.1). En outre, seule une petite fraction de cette densité de masse locale des trous noirs se présente sous forme de galaxies de Seyfert, et dans ces derniers systèmes, les taux d'accrétion impliqués sont en général 10^3 fois plus faibles que dans les QSO. Prises ensemble, les preuves suggèrent qu'il n'y a eu aucune augmentation significative du nombre de trous noirs, comparée à l'ère des quasars. Par conséquent, dans le cadre d'AGN s'alimentant, il faut considérer que les mécanismes de remplissage dominants pour les QSO lumineux à z ~ 2.5 peuvent être nettement différents de ceux alimentant les Seyfert locales. Par exemple, les forces de marée et les fusions sont susceptibles d'avoir été plus importantes et d'avoir accru l'activité des AGN aux époques reculées.

3. Problème de moment angulaire : Un des plus importants défis concernant l'alimentation des AGN est le problème du moment angulaire. Le moment angulaire spécifique de la matière située dans un rayon de quelques kpc doit être réduit d'un facteur supérieur à 10^5, avant de pouvoir être consommé par le trou noir. La barrière du moment angulaire est un défi plus complexe que la quantité de gaz concernée. Alors qu'il peut y avoir suffisamment de matière (comme un nuages de 10^6 $M_{\odot}$) dans un rayon de 200 pc, pour alimenter une galaxie de Seyfert typique sur une durée normale (10^8 ans), par quels mécanismes peuvent être éliminés 99.99% du moment angulaire, et permettre au trou noir d'accréter et d'engloutir la matière.

4. Mécanismes d'alimentation à différentes échelles : Il n'existe aucun mécanisme d'alimentation qui soit universel et qui fonctionne à toutes les échelles, de quelques kpc jusqu'à la dernière orbite stable autour du trou noir. Au lieu de cela, les mécanismes d'alimentation sont différents, tels que des couples de gravité (par exemple, des barres à grande échelle et des barres centrales), le frottement dynamique (sur les bulles massives de gaz autour du noyau), des couples hydrodynamiques (chocs) ou les couples visqueux, peuvent se relayer à différentes distances en fonction de leur efficacité à évacuer le moment angulaire. Selon des simulations, les barres à grande échelle (spontanées ou induites par les forces de marée) sont les mécanismes les plus efficaces pour amener les grandes quantités de gaz depuis plusieurs kpc jusqu'à quelques centaines de pc du trou noir. Ce n'est pas seulement le cas pour une galaxie barrée isolée, mais également lors de fusions. Pendant les dernières étapes d'une fusion, des couples de gravité variable et des chocs peuvent amener le gaz, plus près du noyau, avec de plus grands taux d'accrétion (≫1 $M_{\odot}.an^{-1}$).

5. Corrélations entre AGN et les interactions : Il existe des corrélations significatives entre des signes d'interactions et des AGN à taux d'accrétion élevés (≥ à 10 $M_{\odot}.yr^{-1}$) comme pour les QSO de forte luminosité ou les QSR. L'existence d'une corrélation uniquement pour les AGN à taux d'accrétion très élevé s'explique car de tels taux d'accrétion ne se rencontrent que lors de processus violents, comme les interactions à fort rapport de masse. Mais, il faut noter que l'inverse n'est pas vrai : toutes les interactions majeures ne mènent pas à une activité extrême car leur efficacité à induire de grands apports de gaz dépend de beaucoup de paramètres (vitesses, énergies, alignements des moments angulaires des spins orbitaux). Pour des QSO de luminosité modérée et pour des Seyfert typiques, aucune corrélation entre l'activité et les interactions n'est mise en évidence. Cette absence de corrélation peut être due au fait que le taux d'accrétion exigé dans les Seyfert et les QSO de faible luminosité peut être apporté à la fois par des mécanismes puissants comme les interactions, mais aussi par des processus localisés de basse énergie qui n'affectent que 0,1 à 1 % de la masse du gaz circumnucléaire.

---

[96] σ correspond à la dispersion de vitesse stellaire du bulbe dans la relation M_{TN}-σ (M_{BH}-σ en anglais)

[97] Selon les travaux de José Luis Sérsic, astronome Argentin, né en 1933. L'indice de Sérsic caractérise le bombements des bulbes de galaxies, noté n, selon une loi en $R^{1/n}$. "Atlas de galaxias australes", Sérsic, Jose Luis, Cordoba, Argentina: Observatorio Astronomico, 1968

6. Corrélations des propriétés entre AGN et galaxie hôte :

• Les AGN locaux (Sy 1 et Sy 2) et ceux de luminosité modérée ($M_B \approx -23$), pour des redshifts $0.4 \leq z \leq 1.1$, tendent à résider principalement dans des galaxies de type précoce (bulbe-dominant).

• Les galaxies hôtes d'AGN, lorsqu'elles sont de type précoce, montrent un accroissement du blueshift dans les longueurs d'ondes visibles, comparé aux galaxies inactives de même type. Tant, pour de faibles redshifts ($z < 0.2$) basé sur une étude SDSS, que dans des échantillons à décalages vers le rouge intermédiaires ($0.5 \leq z \leq 1.1$). Ces résultats sont compatibles avec la présence de populations stellaires jeunes, suggérant que le début de l'activité d'AGN soit lié au démarrage d'une activité de type Starburst dans la galaxie hôte.

• La fréquence de barres stellaires à grande échelle est significativement plus élevée dans les galaxies de type Starburst que dans les galaxies normales. La corrélation Barre-Flambée d'étoiles est compatible avec l'idée qu'une barre évacue efficacement le moment angulaire du gaz aux échelles appropriées (de plusieurs kpc à quelques centaines de pc) pour créer les grandes concentrations en gaz nécessaires aux flambées d'étoiles autour des noyaux. Actuellement, la question de savoir si les galaxies de Seyfert présentent un excès de barres à grande échelle, comparées aux galaxies inactives, reste ouverte. Les études basées sur des images à haute résolution dans le proche IR, différents échantillons, et différentes méthodes d'identification des barres (ajustements d'ellipses, méthodes de Fourier) donnent des résultats incohérents et contradictoires.

• Les Seyfert semblent avoir des forces de cohésion des barres moins fortes que celles des galaxies barrées inactives. Ces résultats peuvent apporter un appui observationnel (mais sur un trop petit échantillon) à l'idée, longtemps avancée, qu'une grande concentration de masse due à l'apport de gaz dans les 100 pc centraux, peut affaiblir voire même détruire la barre à grande échelle. Savoir si les barres ont une grande longévité ou si elles se dissolvent et se réforment de manière récurrente en un temps de Hubble est également fortement controversé à l'heure actuelle.

• La fréquence des anneaux externes et/ou d'anneaux internes et externes semble être supérieure d'un facteur 3 à 4 dans les Seyfert comparées aux galaxies normales. Diverses interprétations de cette corrélation ont été proposées. Les anneaux peuvent être de faibles déformations ovoïdales non-axisymétriques ou encore des restes de barres dissoutes. A contrario, cette corrélation peut être le résultat d'une prédisposition des Seyfert et des anneaux à exister préférentiellement dans les systèmes de type précoce.

• La fréquence des barres stellaires et des spirales de poussière centrales s'avère semblable dans les Seyfert et les galaxies normales. Ce manque de corrélation suggère que ces dispositifs ne soient pas des mécanismes universels pour alimenter en combustible un AGN ou/et que la durée de vie de ces structures est courte ($\leq$ à quelques 10^8 années).

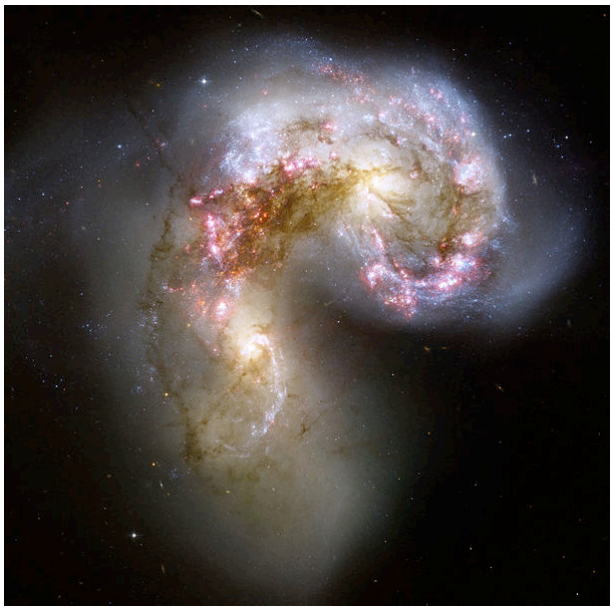
IV. Taxonomie, bestiaire des Galaxies Actives et des AGN

Les galaxies normales, telles la Voie Lactée ou M31 émettent un rayonnement combiné de quelques centaines de millions d'étoiles, comme la somme de leurs émissions. L'évolution des ces galaxies 'normales' est graduelle, gouvernée par l'évolution de leurs très nombreuses étoiles. Ce sont elles qui sont nées, sont passées par les différentes phases de la vie stellaire et finalement sont mortes. A moins de grands bouleversements extérieurs, la structure et le rayonnement d'un galaxie 'normale' ne changera pas sur une échelle de temps de centaine de millions d'années.

A. Les Galaxies à forte Activé Stellaire

Ces galaxies ne sont pas des AGN, leur émission provenant principalement des étoiles et pas du noyau de la galaxie. Nous n'évoquons ici que les galaxies qui présentent une activité notoirement plus importante que celle recensée dans le Voie Lactée ou dans des galaxies 'classiques' comme M 31. C'est galaxies pourraient être une filiation ou un éventuel héritage des galaxies à noyau actif.

1. Galaxies à Flambées d'Etoiles (Starburst Galaxies) ou Galaxies à régions HII



NGC 4038/NGC 4039 - les antennes (Crv), galaxies en intéraction.

Source : NASA, ESA, and the Hubble Heritage Team (STScI/AURA)-ESA/Hubble Collaboration.

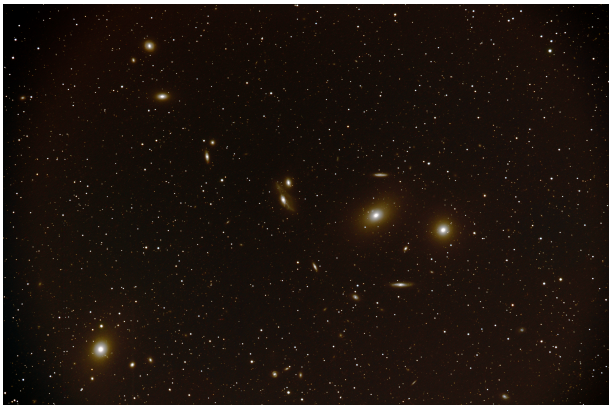
Une partie significative des galaxies présente des traces de formation récente d'étoiles. De telles galaxies sont communément appelées 'galaxies à flambées d'étoiles'. Elles sont généralement caractérisées par une couleur 'bleutée', leurs spectres présentant de fortes raies d'émission de régions HII (en raison d'un grand nombre d'étoiles de types O et B qui vont chauffer le gaz qui les entoure ce qui rend ces galaxies très lumineuses) et une émission radio assez importante (en raison des restes de supernovae récents). Ce type d'événement peut affecter la galaxie entière ou seulement certaines régions.

Les galaxies "Starburst" peuvent être classées dans la famille des LLAGN (Low Luminosity AGN) dont $M_{abs} > -23$.

Dans certains cas, ces flambées d'étoiles semblent circonscrites au sein d'une zone non résolue du centre des galaxies, ce qui les fait ressembler à des noyaux actifs. Ces flambées centrales sont typiquement 10 fois plus brillantes que les régions HII géantes vues dans les galaxies spirales communes, ce qui les distingue des galaxies spirales inactives de type tardif. Le taux de formation d'étoiles peut atteindre 10^2 voire 10^3 fois celui d'une galaxie comme la Voie Lactée et ces flambées peuvent durer des millions d'années. Ces galaxies présentent souvent des traces de collisions ou de fusions récentes, qui ont initié l'augmentation du taux de formation d'étoiles.

Le lien entre les Galaxies à Noyau Actif et celles à flambées d'étoiles n'est pas établi ; il existe cependant quelques hypothèses selon lesquelles, il s'agirait d'une évolution entre les deux types de phénomènes. Un point de vue plus extrême serait qu'il s'agit de manifestations différentes d'un même phénomène. En effet, les régions de formation d'étoiles peuvent être proches du cœur et l'énergie produite par les étoiles est absorbée et reémise par les poussières. La région de formation n'est donc pas vue directement, mais leur présence est révélée par la forte émission de la galaxie dans l'IR (cf. Galaxies FIRGs, ULIRGs, IRAS).

2. Galaxies de Markarian



Arc de Markarian (Vir), dont les M 87, M 86 et M 84, image centrée sur le couple NGC 4435 / NGC 4438.

Didier GILBERT, ©2006 - GRAS telescopes

Découvertes par Benjamin Markarian à l'aide d'un relevé avec la chambre de Schmidt du télescope de 1m30 de l'observatoire Byurakan en Arménie, avec un prisme objectif pour découvrir les galaxies présentant une forte émission dans la région bleue du spectre (excès d'UV).

Sur les 1500 galaxies découvertes, presque 10 % étaient des galaxies de Seyfert et la plupart des autres, des galaxies à flambées d'étoiles.

3. FIRG (Far InfraRed Galaxies)

Galaxie spirale proche, NGC 4945. Credit : 2P2 Team, WFI, MPG/ESO 2.2-m Telescope, La Silla, ESO

Galaxies avec une forte émission en IR lointain. Beaucoup de ces galaxies semblent être des Seyfert 2, les autres n'étant probablement pas de vrais AGN. La source de l'émission IR n'est pas clairement identifiée. Ce pourrait être la poussière chauffée par des étoiles chaudes, voire des quasars muets. Les plus brillants et les exemples les plus extrêmes sont les ULIRGs (Ultra Luminous InfraRed Galaxies).

○Galaxies Sub-Millimétrique ou Galaxies SCUBA

Galaxie extrêmement distante, initialement détectée aux longueurs d'ondes sub-millimétriques par SCUBA (Sub Millimeter Common User Bolometer Array). Ces galaxies sont lumineuses en IR et peuvent être classées parmi les FIRGs.

4. Galaxies IRAS, LIRG et ULIRG

La galaxie IRAS 19115-2124 (galaxie "Oiseau"), apparaît être le résultante d'une collision entre 2 galaxies spirales et d'une 3ème galaxie irrégulière.

Image composite couleur de la galaxie infrarouge ultra lumineuse IRAS 19297-0406 prise par le HST.

Les galaxies IRAS ont été découvertes par le satellite IRAS, avec une très forte émission dans l'IR lointain (60 et 100 µm). Egalement identifiées parmi les FIRGs ou les ULIRGs (Ultra Luminous InfraRed Galaxy).

Les LIRGs (Luminous InfraRed Galaxies) - Découvertes dans les années 1980 grâce au satellite IRAS, ces galaxies, très lointaines, se caractérisent comme leur nom l'indique par une émission extrêmement puissante dans le domaine infrarouge du spectre. Une émission engendrée, selon les astronomes, par l'échauffement des poussières situées dans des sites de formation massive d'étoiles. De ce point de vue, les galaxies infrarouges pourraient être considérées comme les prototypes des galaxies à flambées d'étoiles. Mais selon une explication alternative, l'émission pourrait aussi provenir de poussières chauffées par le noyau actif et donc faire partie des AGN. Deux pistes qui ne s'excluent d'ailleurs pas.

Une LIRG a pour caractéristique d'émettre plus de 10^{11} $L_\odot$ dans le domaine infrarouge lointain du spectre électromagnétique. Un système plus lumineux, émettant plus de 10^{12} $L_\odot$ dans l'infrarouge lointain, est appelé galaxie ULIRG. Un système encore plus lumineux, émettant plus de 10^{13} $L_\odot$ dans l'infrarouge lointain, est appelé galaxie HLIRG (Hyper Luminous InfraRed Galaxy). La majorité des LIRGs et des ULIRGs émettent au moins 90 % de leur énergie dans l'infrarouge. La plupart des LIRGs et toutes les ULIRGs montrent des signes récents ou continus d'interactions et de ruptures. Beaucoup sont des galaxies à flambée d'étoiles (Starburst), et certaines contiennent également un noyau galactique actif. Les ULIRGs sont impliquées dans une série de phénomènes astrophysiques intéressants comprenant la formation des quasars et des galaxies elliptiques. Les exemples locaux d'ULIRGs sont souvent employés comme analogues à la formation des galaxies à haut redshift. Les ULIRGs semblent être entourées d'un halo de matière sombre avec des masses d'environ 10^{13} $M_\odot$. Il n'est pas impossible que les ULIRGs soient des QSO qui échauffent les poussières environnantes. Elles ont été éventuellement proposées comme exemples de quasar/QSO de type 2. Les ULIRGs font partie de la classe des LLAGN (cf. définition dans les galaxies "Starburst").

B. Les Galaxies à Noyau Actif

D'importantes avancées ont été réalisées dans les dix dernières années pour expliquer la diversité des AGN, comme le résultat des effets combinés du transport, de la projection, du rayonnement anisotrope, de l'obscurcissement d'un petit nombre d'objets à divers stades de leur évolution et intrinsèquement différents. Les effets de l'orientation et de l'obscurcissement par la poussière semblent moins importants que les points précédents. Le puzzle n'est pas encore résolu, mais plusieurs pièces ont trouvé leur place.

A l'origine, Kellerman et al., en 1989, ont distingué les galaxies Radio-Loud des galaxies Radio-Quiet sur la base du rapport (R_{r-o}) du flux radio (r) à 6 cm (5GHz) et du flux optique (o) à 4400 Å (680 THz), critères tels que :

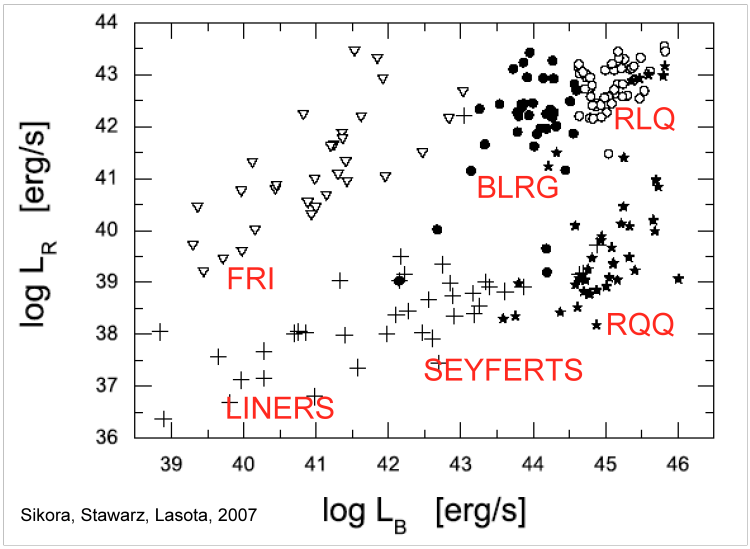
- Pour les Radio-Loud, $R_{r-o} \geq 10$ (généralement compris entre 10 et 1000, et ≥ pour lever toute ambiguïté)
- Pour les Radio-Quiet, $R_{r-o} < 10$ (généralement compris entre 1 et 10)

Ensuite pour chacune de ces classes, une distinction peut se faire sur le type de raies d'émission visibles et la largeurs des raies concernées.

Puissance de l'émission radio	**Propriétés de raies d'émission en optique**		
	Type 2, raies étroites	*Type 1, raies larges*	*Type 0, inhabituel ou absence de raies*
objets Radio-Quiet $R_{r-o} < 10$	• Seyfert 2 • QSO type 2	• LINER • Seyfert 1 • QSO type 1 • BALQSO	

objets Radio-Loud
$R_{r-o} \geq 10$
	• NLRG :
	  • FR I (L faible)
	  • FR II (L grand)
		• BLRG
		• Quasars (à spectre de raies), SSRQ (Lobe dominant)
			• Blazars
			  • BL Lac
			  • OVV, HPQ
			  • Quasars à spectre plat, FSRQ (Core dominant) ?

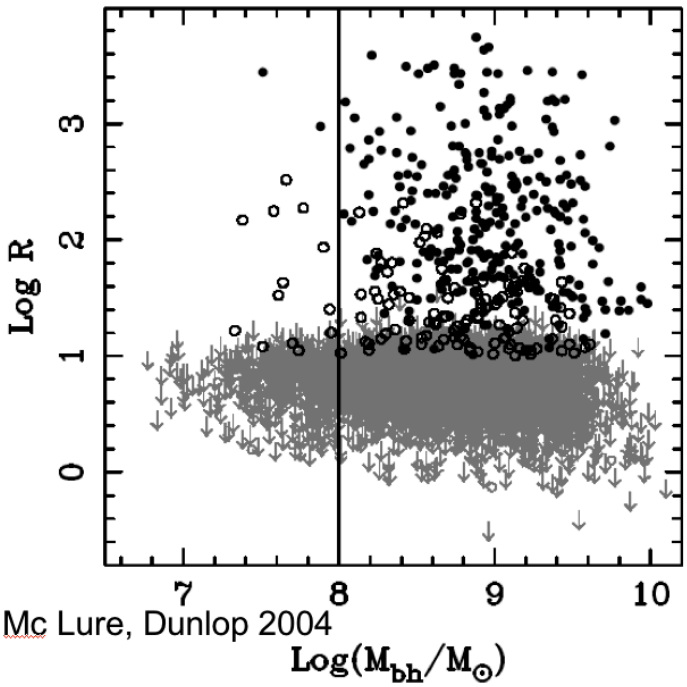
- Cette distinction se confirme suite à une étude récente sur un échantillon d'AGN [98]



L_B est la luminosité du noyau, telle que log L_B = 0,4 $|M_B|$ + 35,6 et L_R est la luminosité radio totale à 5 GHz.

Présentation Suzy Collin-Zahn, IN2P3,Blois 2008.

- Et par cette autre étude sur l'échantillon complet des AGN du SDSS [99]



avec $R=L_{R(5\ GHz)}/L_{opt}$.

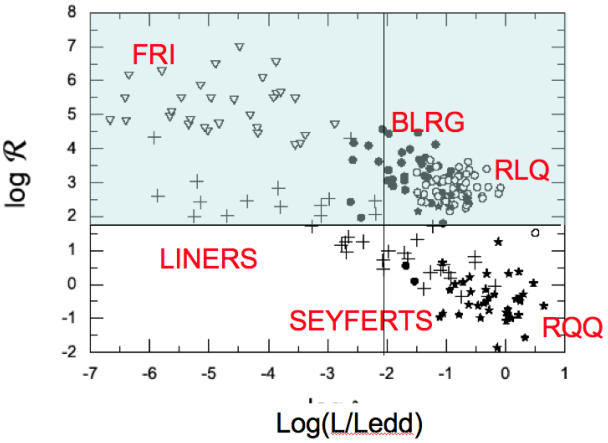
Les RLQ représentent moins de 10% des RQQ.

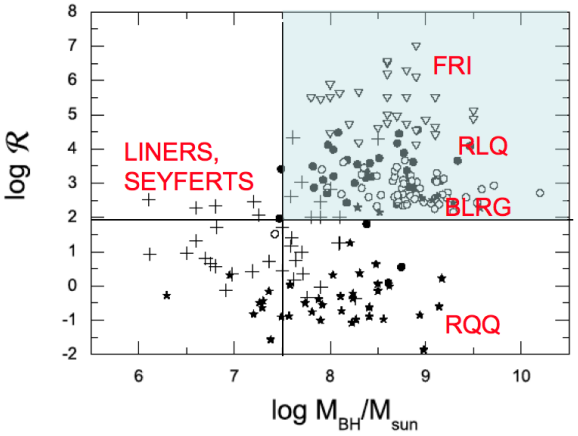
Présentation Suzy Collin-Zahn, IN2P3, Blois 2008.

[98] Sikora, Stawarz & Lasota, "Radio Loudness of Active Galactic Nuclei: Observational Facts and Theoretical Implications", ApJ, Vol. 658, Issue 2, pp. 815-828, 2007

[99] McLure, Ross J. & Dunlop, James S., "The cosmological evolution of quasar black hole masses", MNRAS, Vol. 352, Issue 4, pp. 1390-1404., 2004

- Autres critères de différenciation RL - RQ





R dépend du facteur d'Eddington ...	... et de la masse du trou noir.
Présentation Suzy Collin-Zahn, IN2P3, Blois 2008.	

D'autres types de données observationnelles peuvent également être prises en compte

- Type 2 vs Type 1

  basé sur l'angle de vue par rapport au tore de poussière

- "Blazarisation"

  Angle de vue par rapport au jet relativiste

- Noyau vs galaxie hôte

  $L_{AGN} \propto M_{TN} \propto M_{bulbe}$

En fait, et c'est ce qui fait toute la puissance du modèle unifié, l'énergie ne s'extrait pas toujours directement de sa zone de production en direction de l'espace intergalactique. Il faut tenir compte de la géométrie de la galaxie hôte, et plus spécialement de la distribution de la matière environnante, comme par le tore de poussières qui peut bloquer l'énergie émise dans sa direction.

De plus, le disque d'accrétion en rotation rapide fonctionne à la manière d'une dynamo, et engendre un champ magnétique dont une composante dipolaire, favorisée par la présence du tore qui encercle le noyau, va être à l'origine de l'accélération à de très haute vitesse de diverses particules chargées (électrons, positrons, protons) qui seront ainsi évacuées le long de jets s'échappant de part et d'autre du disque. Alors que le tore provoque un obscurcissement anisotrope du centre, les sources vues de face sont identifiées comme de "type 1" et celles vues par la tranche, comme des sources de "type 2" [100].

Dans les galaxies Radio-Loud (RL), les jets et les lobes qu'ils génèrent, contribuent en grande partie à la luminosité de l'AGN, du moins dans le domaine radio. Les galaxies RQ sont plus simples puisque les jets et les émissions sous-jacentes, bien que présents, peuvent être négligés.

L'astrophysique des quasars, comme toute les disciplines, utilise un jargon technique fait d'acronymes et de néologismes qui ne facilitent en rien la compréhension des textes et des débats par les néophytes (encore moins en anglais et pour un non spécialiste !).

[100] Urry, C. Megan; Padovani, Paolo, "Unified Schemes for Radio-Loud Active Galactic Nuclei",ASP, v.107, p.803, 1995

Avant de détailler différents types AGN, voici regroupées dans un tableau récapitulatif, quelques-unes des dénominations ou des différents noms attribués (ou qui ont été attribués) aux quasars et objets assimilés.

Dénomination	Acronyme	Représentant	Type d'Objet
Object Stellaire Bleu	BSO	-	Nom historique des QSO présentant une coloration visuelle bleue due à un excès d'UV. Divisé depuis en de nombreuses catégories.
Quasar ou Objet Quasi Stellaire	QSO	3C 274, 3C 279	Source extragalactique non résolue ou Objet Quasi Stellaire présentant des raies spectrales larges avec ou sans émissions radios. Leur magnitude absolue est inférieure à -23
Galaxie à noyau actif	AGN	3C 274, CTA 102	Source extragalactique dont le noyau brille de façon variable et dont le spectre présente un continu non stellaire avec des raies en émission. Les AGN comprennent les QSO, Seyfert, BL Lac et certaines radiogalaxies (DRAGN).
Radiogalaxie	DRAGN	3C 274, Cygnus A	Nom générique de galaxies présentant une forte émission dans le domaine radio. Cette catégorie inclus quelques galaxies de Seyfert. Les DRAGN sont constitués de nuages de plasma radio-émetteurs issus d'AGN, sous forme de jets très étroits émis à des vitesses relativistes.
Seyfert FR1	FR I	3C 296(63)	Radiogalaxie peu lumineuse en ondes radio. La plus forte émission se situe près du noyau de la source.
Seyfert FR2	FR II	Cygnus A, M77	Radiogalaxie très lumineuse en ondes radio. L'émission est la plus lumineuse dans les lobes, principalement dans les points chauds situés loin de la source centrale. L'indice spectral radio est $\alpha \sim 0.5$, sur un spectre d'énergie limité.
Objet BL Lacertae	BL Lac	BL Lac, Mkr 421	AGN ayant peu de composantes optiques et de faibles raies d'émissions
Blazar	-	3C 279, Cent A	AGN fortement polarisé optiquement, rapidement variable et dont le spectre radio est plat. Cette catégorie inclut les BL Lac.
A raies d'absorption larges	BAL	1556+3517	QSO présentant des raies d'absorption très larges d'éléments métalliques faiblement ionisés. Ils sont dénommés low-BAL QSO.
Radioquasar	QSS	3C 274, CT A 102	Terme générique décrivant une radio source extragalactique d'apparence stellaire.
Radioquasar	FSRQ	3C 274, 3C 279	Radioquasar à spectre plat ou inversé sur un spectre d'énergie limité.
Radioquasar	SSRQ	-	Radioquasar à spectre pentu sur un spectre d'énergie limité.
Optiquement violemment variable	OVV	3C 279	AGN dont la luminosité fluctue très rapidement et dont le continu visible est fortement polarisé.
Superluminique	SL	3C 274, 3C 454.3	Source dont certaines composantes semblent se déplacer plus rapidement que la vitesse de la lumière.

1. Galaxies à Noyau Actif Radio-Quiet (RQ)

En complément des éléments énumérés précédemment, les AGN RQ possèdent un fort taux d'accrétion ($0{,}1 < \dot{m}$) autour de trous noirs de relativement "faible masse" (10^7 à 10^8 $M_\odot$). Localement, les AGN RQ sont hébergés par des galaxies spirales. Les AGN RQ semblent associés à des phénomènes de vents thermiques non collimatés bien que des jets existent, mais moins puissants que dans les AGN RL.

a. LINER

La galaxie du sombrero (M104) observée par le télescope spatial de Hubble. La galaxie du sombrero est un exemple de LINER [102]. Crédit : HST/NASA/ESA.

Un LINER [101] (Low-Ionization Nuclear Emission-line Region) est un type d'AGN défini par ses raies spectrales d'émission.

Elles ont été identifiées pour la première fois par T. Heckman, dans une série d'articles sur les spectres des AGN, publiés en 1980 [102].

Ce sont les plus faibles des AGN. On pense qu'elles possèdent un trou noir endormi, car $L \ll L_{Edd}$. La luminosité typique des LINERs est de l'ordre de 10^{40} à 10^{43} $erg.s^{-1}$ [103].

Les LINERs sont très communs, près d'un tiers de toutes les galaxies voisines (dans les 20 à 40 Mpc) peuvent être classées comme LINERs [101][104].

Approximativement 75 % des LINERs sont des galaxies elliptiques, des galaxies lenticulaires, ou les galaxies de type S0/a-Sab (galaxies en spirale avec de grands bulbes et bras en spirale fortement serrée).

Les LINERs sont moins fréquents dans des galaxies de type Sb-Scd (galaxies en spirale avec de petits bulbes et bras en spirale de plus lâche), et ils sont très rares dans les galaxies irrégulières voisines [103].

Les LINERs peuvent également se retrouver dans les galaxies infrarouges lumineuses (LIRG), fréquemment formées quand deux galaxies entrent en collision. Approximativement un quart de LIRG peut contenir des LINERs [105].

Les spectres incluent typiquement les raies d'émission d'atomes faiblement ionisés ou neutres, tels qu'O+, N+, et S+. Réciproquement, les raies spectrales d'émission des atomes fortement ionisés, tels qu'O++, Ne++, et He+, sont relativement faibles [101].

---

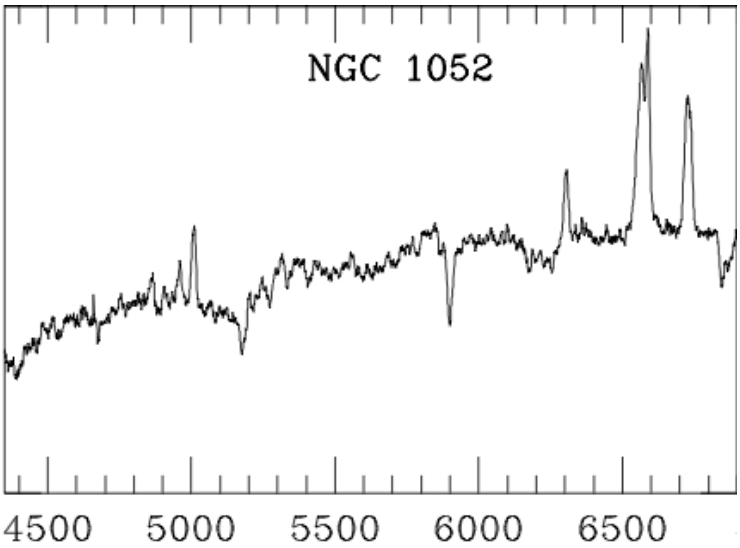
[101] L. C. Ho, A. V. Filippenko, W. L. W. Sargent (1997). "A Search for "Dwarf" Seyfert Nuclei. III. Spectroscopic Parameters and Properties of the Host Galaxies". Astrophysical Journal Supplement 112: 315–390. doi:10.1086/313041.

[102] T. M. Heckman (1980). "An optical and radio survey of the nuclei of bright galaxies - Activity in normal galactic nuclei". Astronomy and Astrophysics 87: 152–164.

[103] Suzy Colin-Zahn, présentation PowerPoint, IN2P3, Blois 2008.

[104] L. C. Ho, A. V. Filippenko, W. L. W. Sargent (1997). "A Search for "Dwarf" Seyfert Nuclei. V. Demographics of Nuclear Activity in Nearby Galaxies". Astrophysical Journal 487: 568–578. doi:10.1086/304638.

[105] S. Veilleux, D.-C. Kim, D. B. Sanders, J. M. Mazzarella, B. T. Soifer (1995). "Optical Spectroscopy of Luminous Infrared Galaxies. II. Analysis of the Nuclear and Long-Slit Data". ApJ Supplement Series 98: 171–217.



Spectre du LINER, NGC 1052. Basé sur des images de la présentation de Bill Keel.

http://www.astr.ua.edu/keel/agn/

Autres terminologies rencontrées

- LINER 1

  LINER dont le spectre présente de faibles raies larges dans le spectre (LINER).

- LINER 2

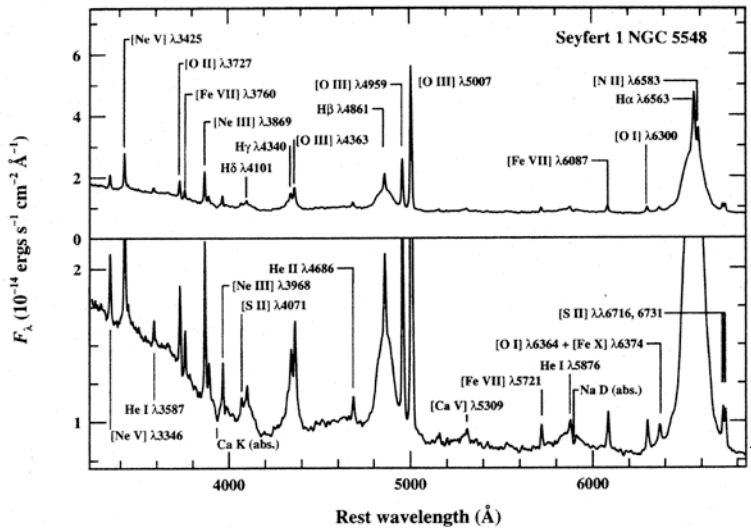
  LINER dont le spectre ne présente que des raies étroites sans signe d'élargissement.

- LLAGN (Low-Luminosity Active Galactic Nucleus) synonyme de LINER.

B. Galaxies de Seyfert

Selon les critères de sélection de Carl Seyfert, les galaxies de Seyfert sont caractérisées par un petit noyau brillant (aux longueurs d'ondes du visible) et de fortes raies d'émission dans le spectre. De telles raies d'émission sont émises par des nuages chauds de gaz ionisé, qui nécessitent la présence d'un intense flux de photons UV, ionisants, issus du noyau central.

Les raies d'émission larges proviennent d'une région comprenant des gaz chauds et denses fortement perturbés [106], la BLR située à quelques a-l du noyau de la galaxie et les raies d'émissions étroites sont produites par un gaz chaud plus ténu situé au-delà. C'est la NLR qui s'étend sur quelques milliers d'a-l. Dans les galaxies de Seyfert qui ne sont pas trop éloignées, la NLR peut même être résolue optiquement.



Spectre optique de la galaxie Seyfert de type 1, NGC 1275. Les principales raies d'émission sont notées, de même que les fortes raies d'absorption de la galaxie hôte. Dans la fenêtre inférieure, l'échelle verticale est agrandie pour mettre en évidence les plus faibles raies. La FWHM des raies larges est de l'ordre de 5900 km.s^{-1} et la largeur des raies fines est de l'ordre de 400 km.s^{-1}. La forte pente en dessous de 4000 Å correspond à la fin de la 'petite bosse bleue', mélange du continu de Balmer et des raies d'émission du FeII. Ce spectre est une moyenne de plusieurs observations réalisées en 1993 à l'observatoire Lick avec le télescope Shane de 3m et le spectrographe Kast (données A. V. Filippenko).

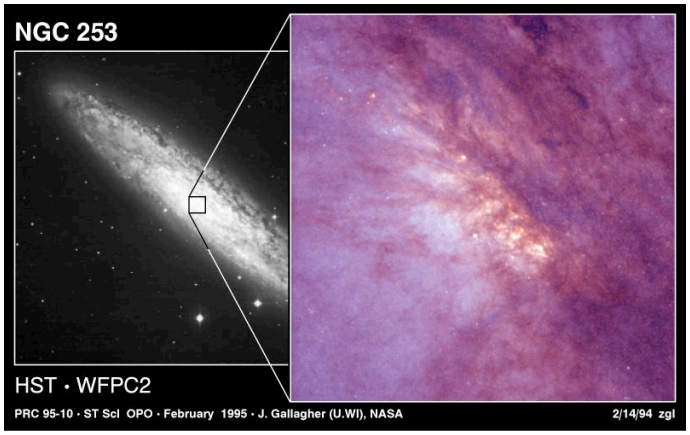
Dès le début de l'étude des galaxies de Seyfert, sont apparues deux sous-classes, séparées sur la base de la largeur relative et de l'intensité des raies d'émission étroites par rapport aux raies d'émission larges. Ces raies sont d'intensité comparable dans les galaxies de type Seyfert 1 alors que les raies larges sont nettement moins lumineuses que les raies étroites dans les galaxies de type 2. La plupart des galaxies de Seyfert produisent de plus fortes émissions radio que les galaxies normales ; cependant la luminosité radio d'une galaxie typique des Seyfert de type 1 n'est que de 0,1 à 1% celle des radiogalaxies ou des QSR moyens.

Ces raies d'émission présentent un fort élargissement Doppler correspondant à des vitesses de l'ordre de 500 à 4000 km/s [107]. Le modèle unifié est confirmé par le fait que les raies fines ne varient pas de façon détectable, ce qui implique que la région d'émission est grande, contrairement aux raies larges qui peuvent varier en largeur et en intensité pendant des laps de temps relativement courts. Les galaxies de Seyfert montrent également une forte émission dans les domaines radio, infrarouge, ultraviolet et X du spectre électromagnétique. La luminosité typique des Seyfert est de l'ordre de $10^{43 \text{ à } 46}$ erg.s^{-1}.

La technique de "Reverberation mapping" est une technique qui emploie cette variabilité pour essayer de déterminer la source et la morphologie de la région d'émission.

[106] L. S. Sparke, J. S. Gallagher III (2007). Galaxies in the Universe: An Introduction. Cambridge University Press.

[107] Donald E. Osterbrock, Gary J. Ferland (2006). Astrophysics of Gaseous Nebulae and Active Galactic Nuclei. Sausalito, CA: University Science Books. ISBN 1-891389-34-3.

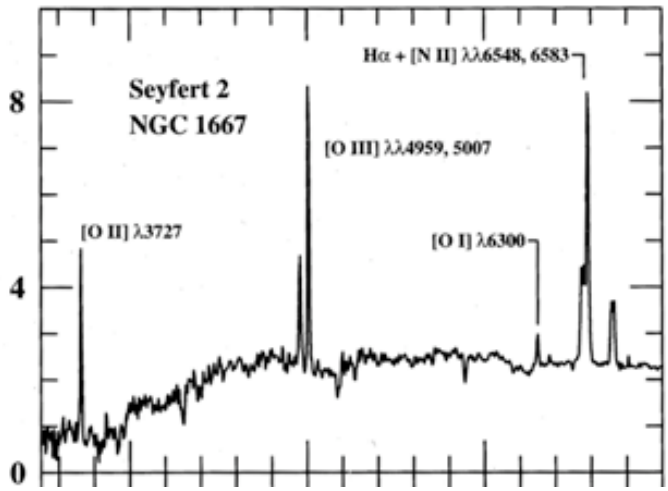


La galaxie spirale NGC 253, située à 8 M d'a.l.

A gauche, prise de vue depuis un observatoire au sol. A droite, zoom sur la région centrale avec la caméra WFPC2 du HST. Source NASA.

Des progrès considérables dans la compréhension dans relations entre les différentes classes de galaxies de Seyfert ont été réalisés grâce à la spectro-polarimétrie. Cette technique a permis de détecter des galaxies de Seyfert de type 2 possédant des régions de type 1 obscurcies. Le spectre de la lumière polarisée présente un fort continu en optique et des raies d'émission larges, qui sont typiques des Seyfert de type 1. En général, et plus particulièrement pour le prototype de galaxie de Seyfert de type 2 - NGC 1068 - l'angle de polarisation de la lumière émise par le noyau, réfléchie par un nuage de poussières, a été mesurée, plaidant pour la présence d'un tore de poussière qui obscurcit le continu lumineux et les raies d'émission larges.

Vu de dessus ou par-dessous, le noyau est directement visible, mais vu de côté, le noyau n'est visible qu'indirectement par réflexion sur le gaz et les poussières au dessus ou en dessous du tore. La preuve de l'obscurcissement par les poussières via des rapprochements avec les émissions en rayons X a été rapportée, mais il n'est pas évident de comprendre comment se manifestent ces événements dans les galaxies de Seyfert. Cependant, il n'y a pas de doute que le rayonnement anisotrope existe, car une image optique de cette radiation s'échappant du tore présumé a déjà été obtenue pour une galaxie de seyfert de type 2.



Spectre optique de la galaxie de Seyfert de type 2, NGC 1667. Les plus importantes raies d'émission sont indiquées (Ho, Filippenko, and Sargent 1993). Quelques fortes raies d'abosorption issue de la galaxie hôte sont également notées. Ce spectre peut être comparé avec celui des Seyfert de type 1.

Légende : λ en Å pour l' axe des x et Fλ en ergs.s^{-1}.cm^{-2}.Å^{-1} pour l'axe des y (données A. V. Filippenko).

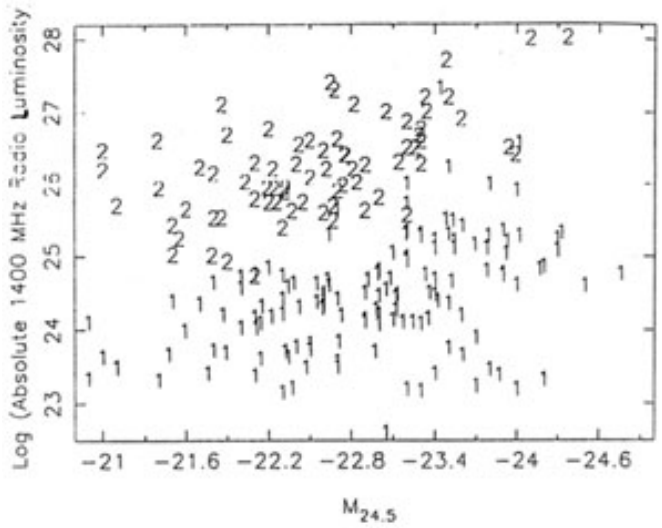
Les variations de luminosité du noyau central peuvent s'effectuer en moins d'un an ; ceci implique que la région émettant cette lumière doit être plus petite qu'une année-lumière, un objet ne pouvant changer plus rapidement que le temps mis par la lumière pour le parcourir.

On pense que l'émission radio est due au rayonnement synchrotron du jet. L'émission infrarouge est due au rayonnement dans d'autres bandes décalées par les poussières, près du noyau. Les photons de plus hautes énergies sont censés être créés par diffusion Compton inverse, par la couronne à haute température, près du trou noir.

Selon T. Heckman, les Seyfert de type 1 sont caractéristiques d'AGN de "faible" luminosité telle que $L_{AGN}<L_{GAL}$, alors que les QSO, alimentés par des AGN de forte puissance, présentent une luminosité $L_{AGN}>L_{GAL}$. Il n'existe pas d'autres vraies différences si ce n'est celle de leur luminosité !

Classification des galaxies de Seyfert

Les Seyfert ont d'abord été classées en type 1 ou 2, selon que les spectres montrent à la fois des raies d'émission larges et étroites (type 1), ou seulement des raies étroites (type 2). Osterbrock a introduit une classification "décimale" selon les intensités relatives des composantes étroites et larges des spectres et la forme des raies d'hydrogène (types 1.5, 1.8 ou 1.9) [108]. Dans les Seyfert 1.9, la composante large n'est détectée qu'en Hα et pas dans les ordres supérieurs de la série de Balmer. Pour les seyfert 1.8, les raies larges sont très faibles, mais détectées tant en Hα qu'en Hβ. Dans les Seyfert 1.5, les intensités des raies larges et fines en Hβ sont comparables. On pense que les composantes étroites et larges proviennent toutes deux du disque d'accrétion, mais dans le cas du type 2, la composante large est obscurcie par la poussière et/ou par l'angle de vision sur la galaxie.



Répartition des Sy1 et Sy2 selon leur luminosité radio à 1400 MHz.

Dans certaines Seyfert de type 2, on peut observer la composante large en lumière polarisée ; on pense que la lumière issue de la BLR est dispersée par le halo chaud et gazeux entourant le noyau, nous permettant de le voir indirectement. Cet effet a été découvert la première fois par Antonucci et Miller dans la galaxie de Seyfert NGC 1068 [108]. Il existe aussi des Seyfert 1h et Seyfert 1i, les Seyfert 1h sont des Seyfert 1 avec une BLR masquée et les Seyfert 1i, des Seyfert 1 avec une BLR "absorbée", visible en IR.

Autres terminologies ou sous catégories rencontrées

- BLS1 (Broad Line Seyfert 1 Galaxy) = Seyfert 1
- NLS1 (Narrow Line Seyfert 1 Galaxy)

  Ce sont des Seyfert 1, à variation rapide et de forte amplitude. Elles sont très brillantes en rayons X mous lors de leur pic d'émission. Le taux d'accrétion moyen des NLS1 est $3 < \dot{m} < 10$, avec un disque d'accrétion aminci optiquement épais. Certains NLS1 de faibles masses (10^6 à 10^8 $M_\odot$) pourraient présenter un taux d'accrétion $10 < \dot{m}$, avec $L/L_{Edd} \sim 1$, $<< \dot{m}$.

- NELG (Narrow Emission Line x-ray Galaxy) et NLXG (Narrow emission Line X-ray Galaxy)

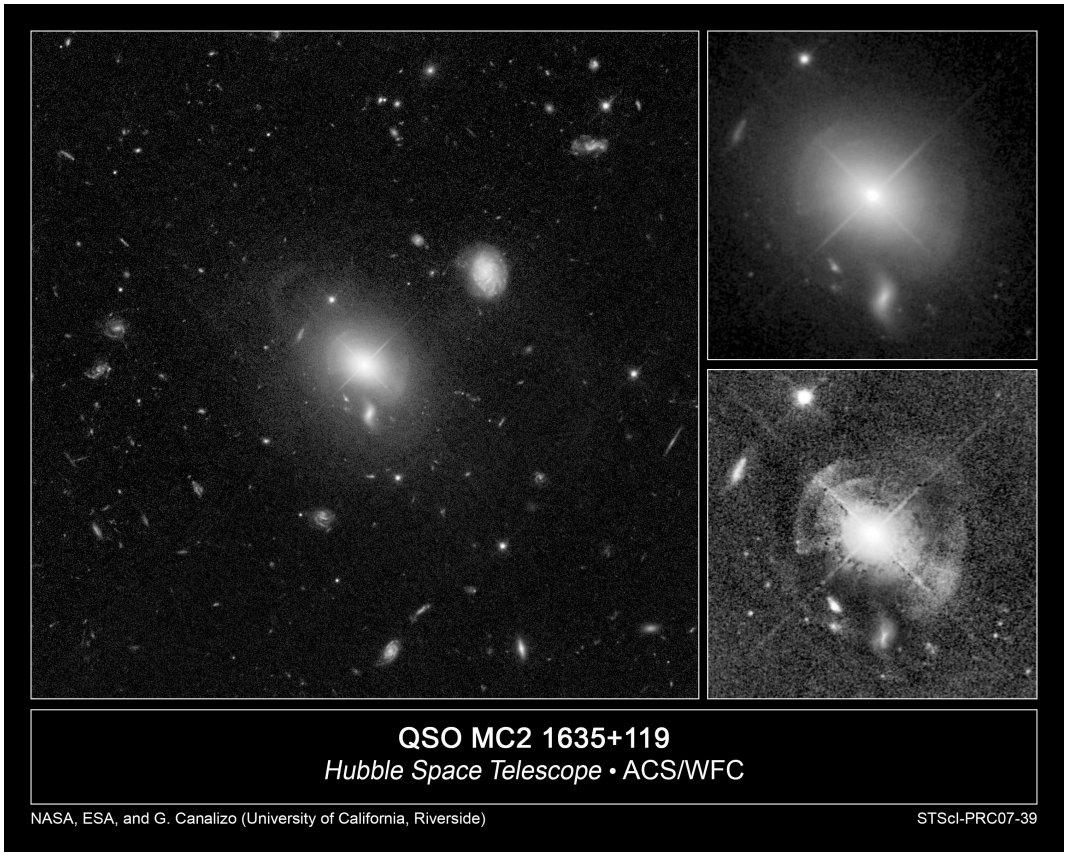
  Seyfert 2 à raies d'émission étroites dont le rayonnement X est aussi intense que celui des galaxies de Seyfert 1, mais dont la luminosité est inférieure. Ce sont des Seyfert fortement rougies et atténuées par les poussières de la galaxie hôte.

- N-Type Galaxy

  Un type de galaxies récemment découvert dans la recherche des AGN. Identifiées comme des galaxies de Seyfert distantes. Cette classification n'est plus usitée.

[108] Antonucci, Robert, "Unified models for active galactic nuclei and quasars", ARAA. 31: 473-521, 19930

c. QSO



MC2 1635+119, R.A. 16h 37m 46s.51, Dec. +11° 49' 49".34, L'image fait 1'12" d'arc (600.000 a.l. ou 180 kpc) de large. le redshift est de z = 0.146. Source NASA/STSci.

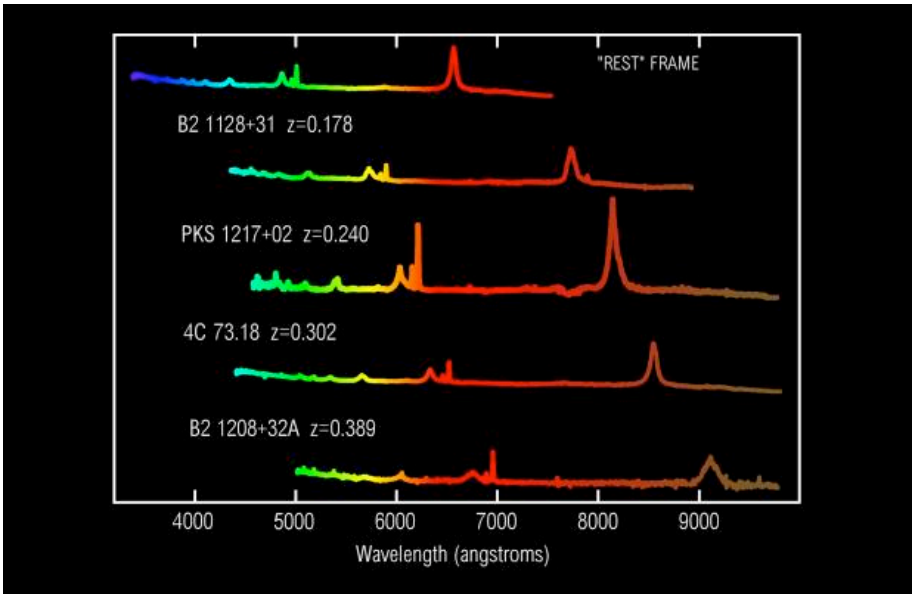
A l'origine, les quasars (et donc les QSO) ont l'aspect d'étoiles sur les images en optique et possèdent une luminosité supérieure à celle de leur galaxie hôte. Les QSO sont l'équivalent radio silencieux des quasars et certains astronomes emploient le terme de Radio Quiet Quasar (RQQ). Généralement les quasars et les QSO sont considérés comme des synonymes mais les QSO sont 10 fois plus nombreux que les quasars et s'en distinguent du fait de la relative faiblesse de leur émission radio. Ce sont essentiellement des versions plus lumineuses des Seyfert 1.

Même si les effets annexes de l'orientation ne sont pas éliminés, la classe des QSO (RQQ) est mieux corrélée à la classe des galaxies infrarouges lumineuses (ULIRG). Ces objets, découverts par le satellite IRAS, produisent plus de 10^{12} $L_\odot$ dans la partie IR du spectre électromagnétique.

Ce sont des luminosités comparables à celles des QSO. Comme les ULIRG montrent également des caractéristiques des spectres des QSO, on a proposé de les identifier à des QSO entourés de poussières et une fois ces poussières évacuées, un QSO apparaîtrait.

Il faut également noter le fait que les images de ces QSO, en croissance, semblent parfois suggérer l'interaction de galaxies comme origine de l'activité centrale.

Les QSO sont des objets distants et très compacts dont le spectre optique présente de fortes raies d'émission superposées à un continu non thermique (non stellaire). Les QSO sont typiquement 10^2 fois plus brillants que les galaxies normales les plus brillantes, avec $M_{abs} < -23$.



Comparaison de spectres de quasars, effet du décalage spectral. C. Pilachowski, M. Corbin/NOAO/ AURA/NSF

Les QSO ne sont pas silencieux pour autant en radio. Leur luminosité radio est comparable ou juste un peu supérieure à celle des galaxies classiques. Les grands télescopes radio, détectent de faibles émissions dans une large population de QSO. La luminosité radio des QSO est de 2 à 4 fois plus faible en magnitude que celle des quasars de même type.

Les QSO ont été localisés à des distances allant de 800.10^6 a.l. (250 Mpc) à 13.10^9 a.l. (4 Gpc), la plupart étant autour de 12.10^9 a.l. (3,5 Gpc). Leur luminosité peut varier sur des périodes d'une dizaine de jours, mais la plupart varient entre quelques mois et quelques années.

A la différence des Seyfert hébergées préférentiellement dans des galaxies spirales, il existe une relation entre la luminosité des QSO et la masse de la galaxie hôte et les plus lumineux peuvent être hébergés dans des galaxies elliptiques. La luminosité typique des QSO et des quasars est de l'ordre de 10^{46} à 10^{48} erg.s^{-1}.

Autres terminologies rencontrées

- RQAGN (Radio-Quiet AGN)

  AGN émettant à un niveau de galaxie normale en radio, comme les QSO ou les galaxies de Seyfert.

- RQQ (Radio-Quiet Quasar)

  Synonyme de QSO de Type-1, type classique des QSO, avec un spectre optique de type Seyfert 1.

- QSO Type-2

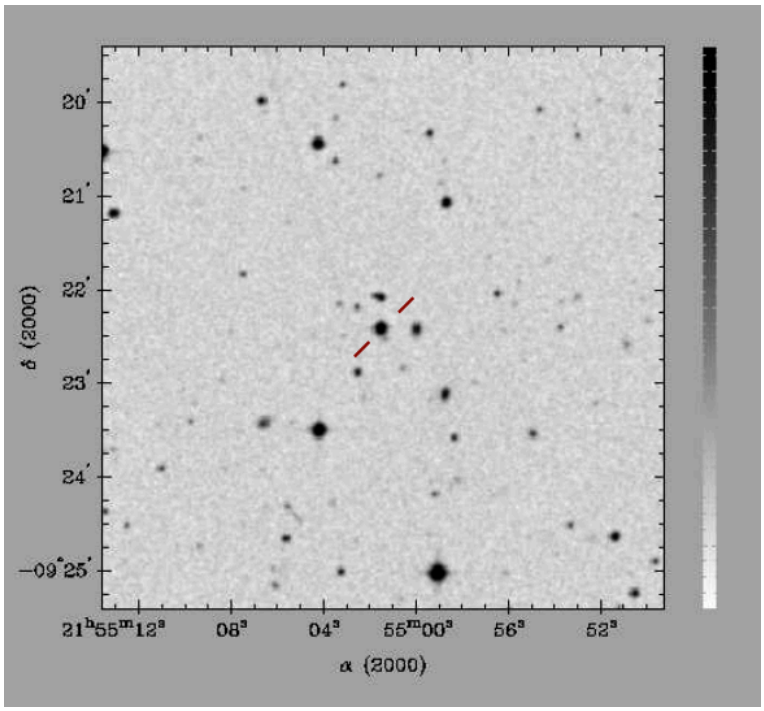
  Analogues aux Seyfert 2 ou NLRG à haute luminosité. Récemment découverts grâce au SDSS, Chandra et XMM Newton. Une forte émission de rayons X durs depuis le cœur pourrait être une caractéristique de ces QSO de type 2. Leur luminosité est comparable à celle des quasars, mais sans le fort continu optique, ni les raies d'émission larges

- Quasars muets et QSO cachés (Buried QSO)

  Voir QSO de type 2

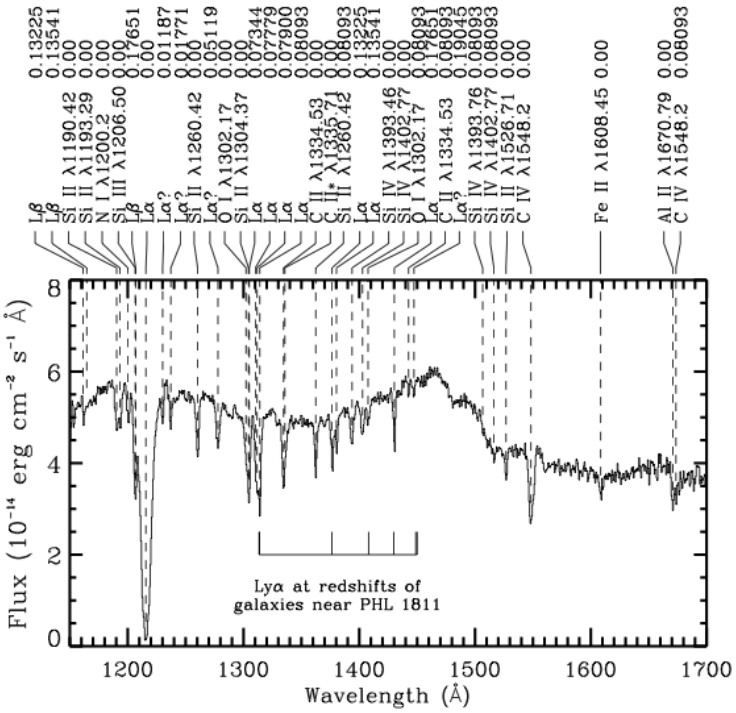
- **Cas particulier :** BALQSO (Broad Absorption Line QSO)

Un BALQSO est un AGN, dont le spectre contient à la fois des raies d'émission et des raies intrinsèques d'absorption larges. Ils sont caractérisés par de fortes raies d'absorption dans la partie UV du spectre. Les BALQSO sont, soit de faibles émetteurs X, soit non détectés en X, un peu à la manière des NLS1.



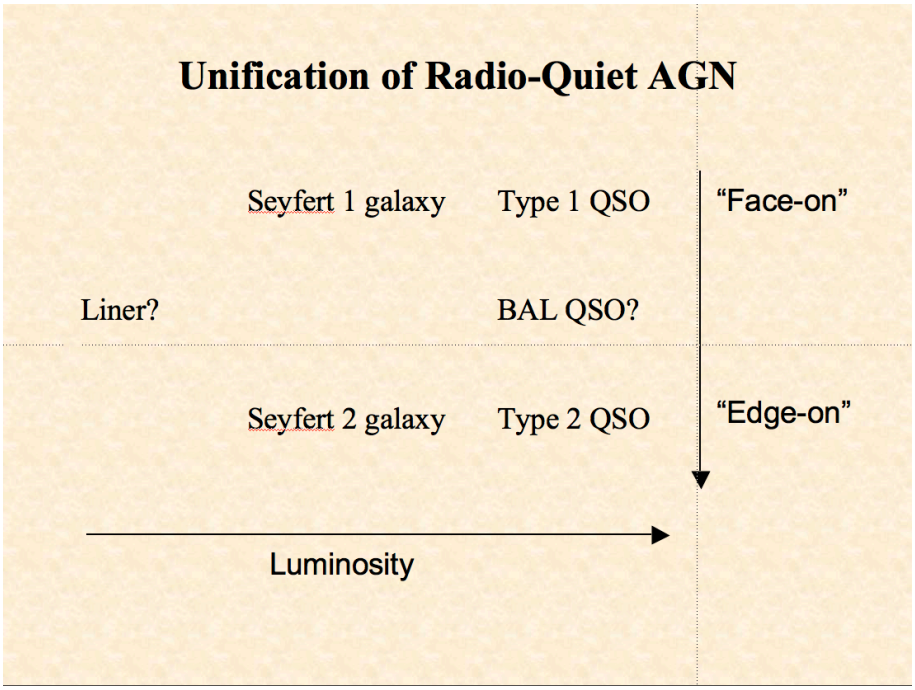
PHL 1811. K.M. Leighly et al., ; "The First Observations of the Second Brightest Quasar", AAS, 197th AAS Meeting, Bulletin of the AAS, Vol. 32, p.1521, 2000. "The Intrinsically X-Ray Weak Quasar PHL 1811. I. X-Ray Observations and Spectral Energy Distribution", ApJ, Vol. 663, Issue 1, pp. 103-117, 2007.

- Portion d'un spectre caractéristique d'un BAL QSO



Spectre de PHL 1811, enregistré par STIS (mode G140L). Le double pic large, en émission, centré sur 1480 Å représente les figures Lyα et N V du QSO. Les raies d'absorption sont indiquées avec les décalages spectraux correspondants. Source Jenkins, Bowen, Tripp et al., 2003.

D. Unification des AGN RQ



Unification des objets Radio-Quiet. Sources : Jim Bechtold, Université d'Arizona

À de faibles luminosités, les premiers objets à avoir été unifiés, ont été les galaxies de Seyfert. Les modèles unifiés proposent que les Seyfert 1 offrent une vue directe sur le noyau actif, alors que nous voyons le noyau des Seyfert 2 à travers les structures obscurcissantes du tore, ce qui modifie les raies d'émission observées. Selon les modèles d'accrétion, la relation à l'orientation est que deux objets, qui appartiennent apparemment à des catégories distinctes, peuvent appartenir à la même, s'ils sont observés selon des lignes de visée différentes. L'image standard consiste en un tore de nuages/matière/gaz encerclant le disque d'accrétion et la BLR. Il doit être suffisamment épais pour masquer les raies larges, mais suffisamment fin pour laisser passer les raies étroites de la NLR et de l'ENLR, qui sont observées dans les deux classes d'objets. Les Seyfert 2 sont vues à travers ce tore. Une zone de diffusion dans le tore dévie une partie des émissions du noyau vers notre ligne de visée, ce qui nous permet d'observer certaines émissions de rayons X et de lumière visible, voire même certaines raies d'émissions larges, celles-ci étant alors fortement polarisées, montrant qu'elles ont été déviées et prouvant que certaines Seyfert 2 sont en fait des Seyfert 1 cachées. Des observations en infrarouge appuient cette théorie. À de plus fortes luminosités, les QSO prennent la place des Seyfert 1. Les "QSO de type 2", longtemps hypothétiques, ont été détectés grâce au SDSS [109], à Chandra [110],[111] et XMM Newton [112].

[109] Zakamska et al., "Type II quasars from the Sloan Digital Sky Survey",Princeton University, Ph.D dissertation, 2005. Section 0181, Part 0606 225 pages.

[110] Norman et al., "A Classic Type 2 QSO", The Astrophysical Journal, Volume 571, Issue 1, pp. 218-225., 2002

[111] Mainieri et al., "Sub-mm detection of a high redshift Type 2 QSO", Mon.Not.Roy.Astron.Soc. 356 (2005) 1571-1575, 2004

[112] Dery et al., "Detection of type 2 quasars in the radio galaxies B3 0731+438 and 3C 257", MNRAS, Volume 342 Issue 4, 2003

2. Galaxies à Noyau Actif Radio-Loud (RL)

Ce sont des AGN ayant de faibles taux d'accrétion (0,1 >> $\dot{m}$) mais autour des trous noirs les plus massifs. Localement, tous les AGN RL semblent être hébergés par des galaxies elliptiques. Les AGN RL sont également associés à des jets relativistes, collimatés, d'origine non thermique.

Alors que les galaxies normales présentent une luminosité radio de l'ordre de 10^{32} W, une radiogalaxie peut être plus de 10^3 fois plus brillante. La classification des radiogalaxies se fait aujourd'hui en Core-Dominated objects (BL Lac ou OVV quasars) et en Double-Lobed object, la plupart du temps des radiogalaxies elliptiques et des quasars.

a. Un cas à part : les Radiogalaxies

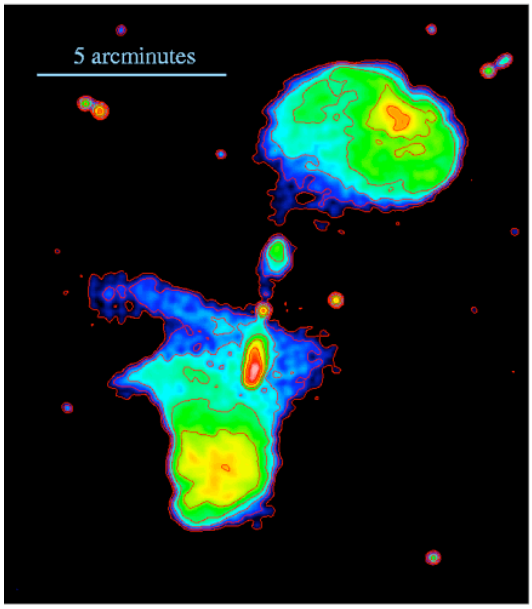


Image ATCA à 20 cm de longueur d'onde. L. Saripalli, R. Subrahmanyan et Udaya Shankar

C'est quand même grâce à elles que furent découverts les "Galaxies Actives" et les AGN !

Il s'agit de galaxies d'apparence ordinaire lorsqu'on les observe dans le domaine visible, mais qui émettent puissamment dans le domaine radio, à partir de ce qui est d'abord apparu comme deux lobes placés de part et d'autre de ces galaxies, et dont il s'est avéré ensuite qu'ils correspondaient aux prolongements de deux jets de gaz expulsés par l'AGN de ces objets.

Ce sont des galaxies émettant beaucoup plus dans les longueurs d'ondes radio que les galaxies normales. Les radiogalaxies peuvent être plus de 10^6 fois plus brillante que les galaxies normales (Cygnus A vs Voie Lactée) et ce jusqu'à 10^{38} W entre 10 MHz et 100 GHz. Cette émission radio est d'origine synchrotron. Ce qui implique que le plasma, neutre, contient, au moins, des électrons avec des vitesses relativistes (facteurs de Lorentz ~ 10^4) et des protons, le tout dans de puissants champs magnétiques. Le rayonnement synchrotron n'est pas confiné aux seules longueurs d'onde radio. Si la source peut accélérer des particules à des niveaux d'énergie suffisants, nous verrons également un rayonnement en infrarouge, optique, ultraviolet voire même rayons X. Cependant dans ce dernier cas, les électrons doivent posséder une énergie supérieure à 1 TeV.

Leurs propriétés en tant qu'AGN sont diverses, voire sujet à controverse. Elles peuvent néanmoins être globalement classées selon leur excitation [113]. Les radiogalaxies faiblement excitées ne présentent pas de raies d'émission fortes et étroites, et ce, d'autant moins que les raies excitées proviennent probablement d'un mécanisme différent [114].

Leurs émissions en lumière visible et en rayons X prennent uniquement leur source dans les jets [115],[116]. En revanche, les raies d'émission des radiogalaxies fortement excitées ressemblent à celle des Seyfert 2.

Historiquement, une première classification a été réalisée par Fanaroff et Riley en 1974

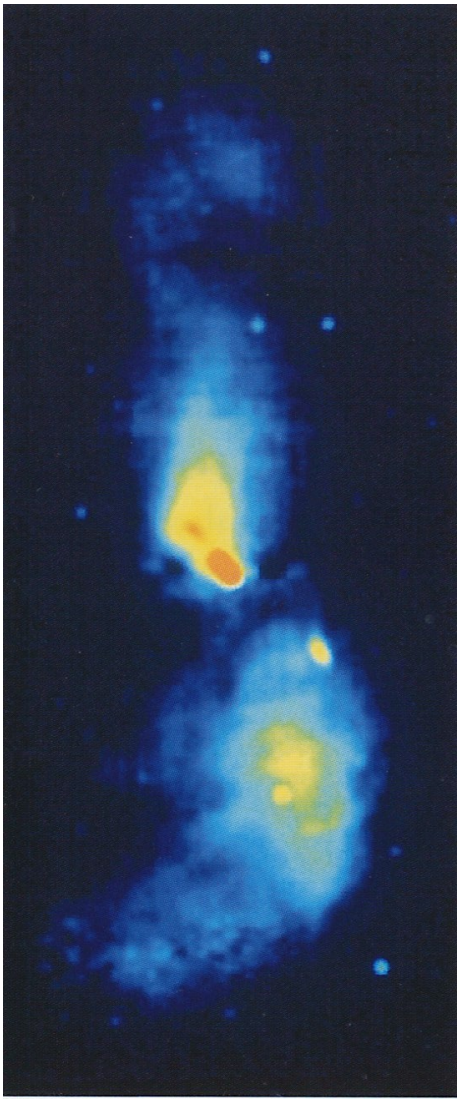
[113] Hine, R.G. & Longair, M.S. (1979). MNRAS 188:111

[114] Baum, S.A., Zirbel, E.L. & O'Dea, C.P. (1995). ApJ.451:88

[115] Chiaberge, M., Capetti, A. & Celotti, A. (2002). A&A.394:791

[116] Hardcastle, M.J., Evans, D.A. & Croston, J.H. (2006). MNRAS.370:1893

Cette classification est basée sur l'étude de 57 radiogalaxies et quasars, à partir du catalogue 3C, résolus à 1.4 GHz ou 5 GHz, en deux composantes distinctes. L'échantillon a été scindé en deux classes, grâce au rapport RFR de la distance entre les régions de plus forte brillance de surface, de part et d'autre de la galaxie ou du quasar, à l'extension totale de la source, jusqu'au contour de plus faible brillance radio. Les sources pour lesquelles le RFR < 0,5 furent classées I et celles dont le RFR > 0,5, furent classées II. De plus presque toutes les sources ayant une luminosité $L_{(1,4\ GHz)} \leq 10^{32}$ erg.s^{-1}.Hz^{-1} [117], étaient de classe I alors que les sources les plus brillantes étaient presque toutes de classe II.



○ FR I (Fanaroff-Riley de type I)

En radio, les FRI ont leur maximum d'éclat plus proche du noyau que de l'extrémité. Le bord externe des lobes est sombre, et globalement ces radiosources sont peu lumineuses.

En optique, le noyau est très brillant, le spectre présente des raies d'émission élargies et des raies interdites étroites, très semblables aux quasars.

Ces galaxies contiennent peu de poussières (NGC 4151).

Une radiogalaxie FR I. Image radio de Centaurus A, à 5 GHz (6 cm). Les deux lobes radio s'étendent sur 11°, plus de 20 fois la pleine Lune. Source Max Planck Institute for Radio Astronomy, Norbert Junkes)

○ FR II (Fanaroff-Riley de type II)

C'est à l'extérieur que les FRII ont leur pic de luminosité, c'est-à-dire, au-delà de la moitié de la distance entre le noyau et l'extrémité des lobes. Le bord externe de chaque lobe est marqué par la présence de zones brillantes, ou de "points chauds". Tous les quasars sont des FR II.

[117] Bridle, Alan H.; Perley, Richard A., "Extragalactic Radio Jets", ARAA, Vol 22., p. 319-358, 1984

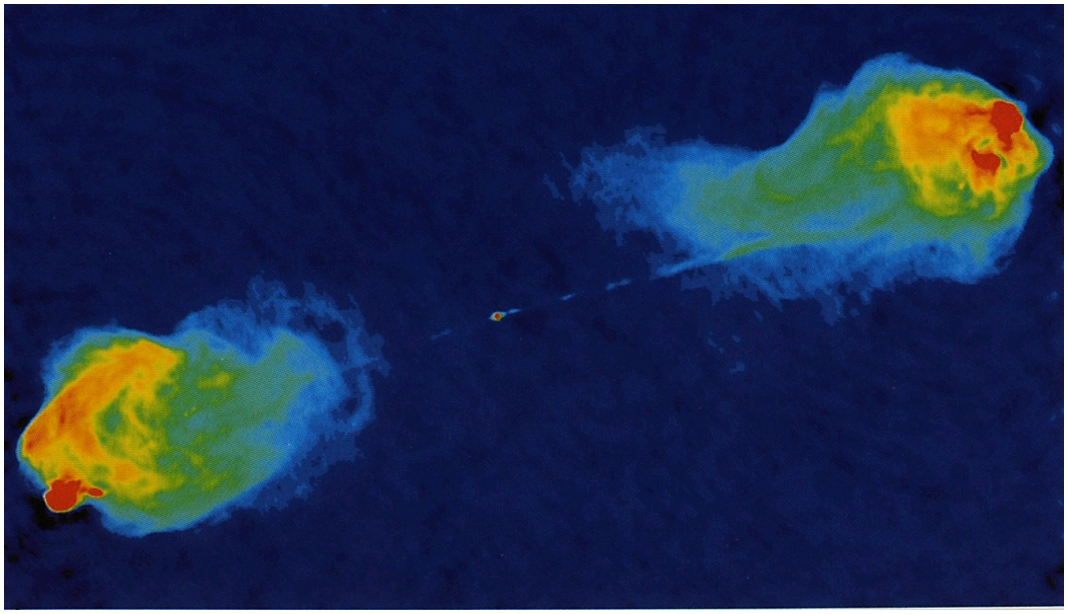


Image radio de Cygnus A, à 5 GHz (6 cm). Les deux lobes radio s'étendent jusqu'à 500000 années-lumière du noyau qui est enveloppé de bandes de poussières. Les zones rouges sont les points chauds. Cygnus A est une radiogalaxie elliptique géante, de type FR II. C'est la plus brillante du ciel à 11 cm de longueur d'onde au point de saturer les détecteurs. Source NRAO, R. Perley, C. Carilli & J. Dreher.

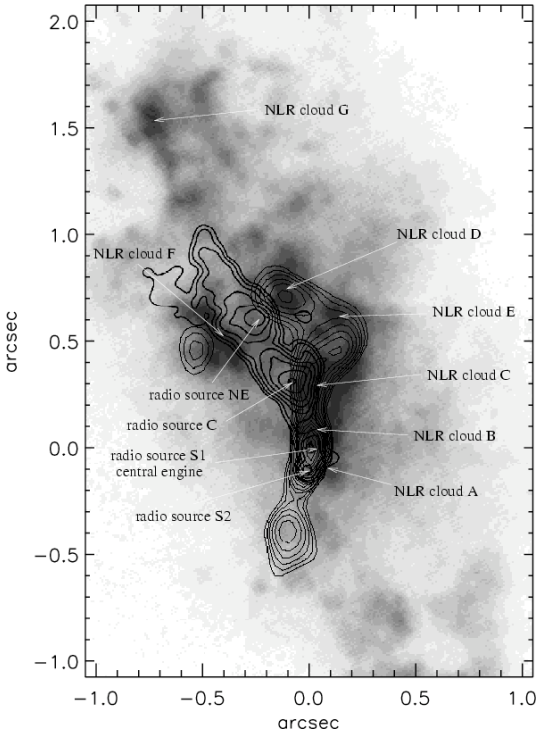
Ces radiogalaxies de type FR II, dont le noyau est peu lumineux, affichent inversement des raies fines, probablement créées par des nuages de poussières ou de gaz, peu agités, en orbite autour du cœur. Le continu présente un indice spectral $\alpha \sim 0.5$, en lumière visible mais ne présente que peu de rayonnement X.

Ces radiogalaxies sont bien sûr, beaucoup plus intenses en radios que les Seyfert 1 (NGC 1068) [118]. Leur puissance est supérieure à 10^{25} W.Hz^{-1}.

Il existe beaucoup d'autres manières de classifier les différents types de radiogalaxies, mais une des plus fréquentes reste la distinction entre Core-Dominated objects/radiogalaxies (BL Lac ou OVV quasars) et Double-Lobed object/radiogalaxies, la plupart du temps des galaxies elliptiques et des quasars. Cette différenciation est liée à leur extension angulaire (supérieure ou inférieure à 1" d'arc). Quoiqu'il en soit les sources sont en réalité toujours soit très étendues (>>10 kpc), soit très compactes (au plus quelques dizaines de pc).

Les sources compactes sont caractérisées par des indices spectraux de l'ordre de $0 \leq \alpha \leq 0{,}3$ et une forte variabilité. Alors que les sources étendues restent constantes dans le temps et présentent un spectre plus pentu ($0{,}7 \leq \alpha \leq 1{,}2$). Les énergies mises en œuvre sont également très différentes avec, pour les sources compactes, une valeur de 10^{52} à 10^{58} erg, contre 10^{58} à 10^{61} erg pour les sources étendues. Il est cependant possible de rencontrer les deux composantes au sein d'une même source. Une tendance voudrait que la composante prédominante vers 1 GHz oriente le type de galaxie hôte de la radiosource. Les sources compactes sont préférentiellement associées à des galaxies spirales ou à des BL Lac, alors qu'une source étendue signifie, presque toujours, une galaxie hôte elliptique. Dans le cas où les contributions des composantes étendues et compactes sont comparables, on a affaire à un quasar (ce n'est vrai que vers 1 GHz, la fréquence compacte dominant toujours à plus haute fréquence).

[118] Antonucci R. et Miller J., "Spectropolarimetry and the nature of NGC 1068", ApJ, 297, p621, 1985



NGC 1068. Superposition de l'image en [OIII] de la NLR par Macchetto et al. (1994) (grise), image MERLIN à 6 cm (contours gras, Muxlow et al. 1996), et image à 12.7 μm par Bock et al. (2000) en traits fins. Les annotations sont d'Evans et al. (1991) pour les nuages de la NLR and par Gallimore et al. (1996c) pour les sources radios. Les coordonnées (0", 0") sont centrées sur S1.

Pour les sources étendues, on peut rencontrer un grand nombre de morphologies différentes, tant par le rapport longueur/largeur des lobes que par la localisation des points chauds et du maximum d'intensité lumineuse (les sources doubles allongées avec L/l ≥ 4, comme Cygnus A ; les sources doubles allongées à bords externes sombres avec des jets très étroits, où la limite des lobes est moins bien définie, comme pour Centaurus A ; les sources doubles larges avec 2 ≤ L/l ≤ 3, comme Virgo A, associée à M87 ; les sources à deux queues avec un angle entre les 2 lobes ≠ 180°, comme 3C 465 et 3C 83.1B ; les sources à queue étroite unique tout à fait dissymétrique, comme IC 310.

La taille des radiosources étendues s'étend sur plus de deux ordres de grandeur, de quelques dizaines de pc à 4 Mpc pour 3C 236, mais la plupart possèdent une extension de l'ordre de 150 à 300 kpc, les valeurs supérieures à 1 Mpc étant rares (moins de 5% des radiosources). L'extension des radiosources est corrélée à la luminosité. Les galaxies associées sont des elliptiques (géantes) pour les radiogalaxies les moins lumineuses, alors que ce sont souvent des galaxies particulières pour les plus lumineuses. Le plus remarquable dans ce dernier cas, ce sont les extensions de gaz chaud dans la direction de l'extension radio et la présence de particularités morphologiques comme de faibles extensions. Les radiogalaxies lumineuses montrent souvent de fortes raies fines d'émission fine.

Pour les sources compactes, lorsque le pouvoir séparateur le permet (VLBI), elles sont toujours associées avec les noyaux actifs lorsque ceux-ci sont identifiés. C'est le cas des quasars et des BL Lac.

Autres terminologies ou sous-catégories rencontrées

- BLRG (Broad-Line Radio Galaxy)

  Galaxies radio émettrices dont le spectre optique est très similaire à celui des Seyfert I (voir Quasar de type 1).

- NLRG (Narrow-Line Radio Galaxy)

  Galaxies radio émettrices avec un spectre optique similaire à celui d'une galaxie de Seyfert 2 (voir Quasar de type 2).

- LERG (Low Excitation Radio Galaxy)

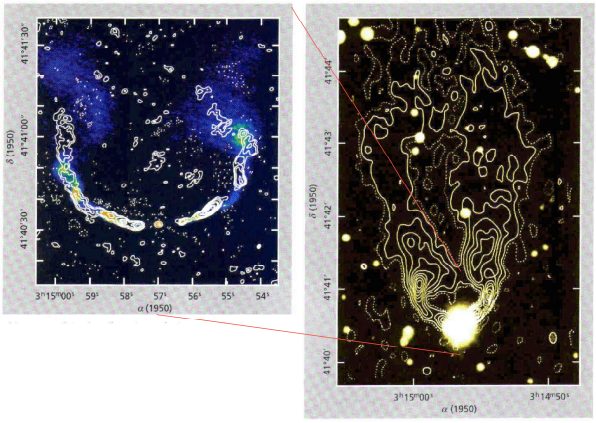
- Core-Dominated Radio Galaxy

  Radiogalaxies dans lesquelles l'émission radio provient principalement d'une source compacte centrale. Le spectre radio est presque plat et beaucoup de ces galaxies sont des blazars (BL Lac ou quasars OVV).

- Lobe-Dominated Radio Galaxy ou Double-Lobed Radio Galaxy

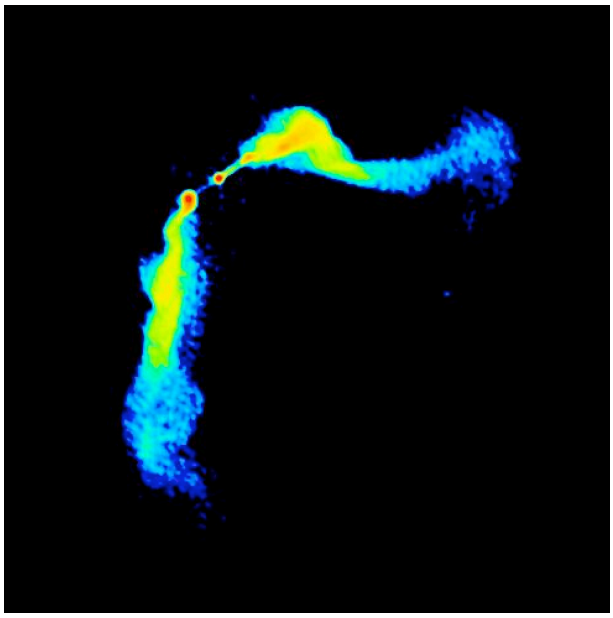
  Radiogalaxies pour lesquelles l'émission radio est issue d'une source étendue. Le spectre radio est pentu. Il s'apparente à celui des quasars.

- NATS (Narrow Angle Tail Sources) et WATS (Wide Angle Tail Sources), classification de galaxies d'amas, selon la morphologie des jets [119].



Ci-dessus, image et carte radio du NATS NGC 1265. Source Uli Klein, Université de Bonn. A gauche, un "zoom" sur le cœur de la radiogalaxie

Ci-dessous, image radio du WATS 3C 465. Source Uli Klein, Université de Bonn.



Les NATS sont les radiogalaxies les moins lumineuses et elles se déplacent à vitesse élevée par rapport à l'ICM (Inter Cluster Medium) des amas. Les jets de ces radiogalaxies sont plus courts, moins lumineux, et plus courbés que dans les WATS. On les rencontre préférentiellement dans les galaxies elliptiques situées à la périphérie des amas (NGC 1265 et IC 310, dans l'amas de Persée).

Les WATS sont généralement des galaxies elliptiques géantes (type cD) situées au centre des amas, parmi les plus lumineuses, si ce ne sont les plus lumineuses de l'amas, et qui présentent des jets très longs et lumineux, parfois légèrement courbés. Ces jets peuvent être en relation avec la structure de l'amas (alignement avec son axe principal), comme dans les amas d'Abell. Leurs points chauds sont proches du noyau.

Il a été proposé que la courbure des jets provienne des vents d'amas causés par le regroupement des galaxies [120]. (NGC 6034, IC 708, 3C 465).

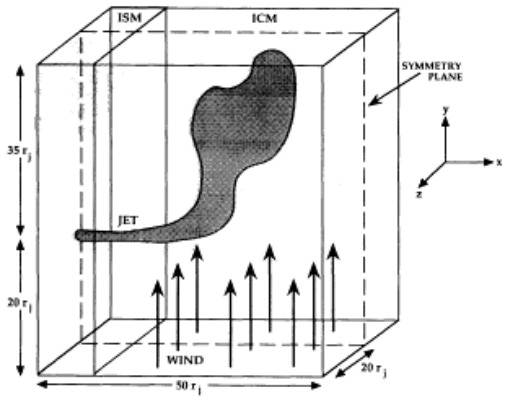


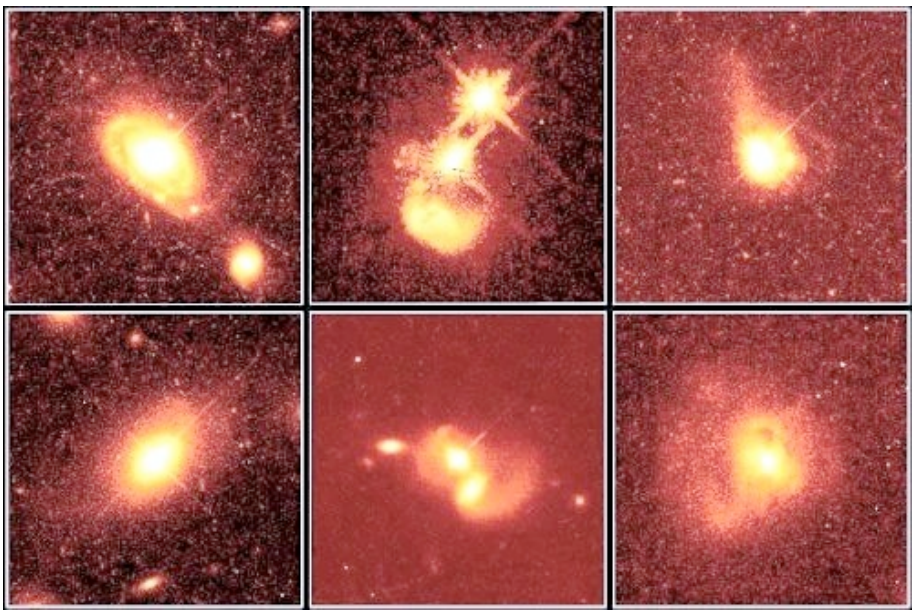
Diagramme schématique montrant la scission ISM/ICM et l'impact des vents d'amas sur les lobes de WATS. Source : Loken et al., 1995.

[119] Owen & Rudnick, 1976 ; O'Dea & Owen, 1985 ; O'Donoghue, Eilek, & Owen, 1993 ; Eilek et al., 1984 ; Ledlow & Owen, 1996

[120] Loken et al., "Radio jet propagation and wide-angle tailed radio sources in merging galaxy cluster environments", ApJ, Part 1, vol. 445, no. 1, p. 80-97, 1995

B. QUASARS

Une importante sous-classe d'objets est formée par les quasars (pour QUASi-stellAR radio source) ou QSR (QSO radio-émetteurs ou RLQ). Ils marquent encore une montée en puissance supplémentaire par rapport aux noyaux des galaxies de Seyfert et plus spécialement à celles du type 1, (auxquelles ils ressemblent le plus), mais qu'ils surpassent couramment de deux ordres de grandeur.



Galaxies-hôtes de quasars, vus par le télescope spatial Hubble.

(Source : John Bahcall (IAS, Princeton), Michael Disney (University of Wales), NASA

Historiquement les quasars ont été caractérisés par leur aspect stellaire et la présence de fortes raies d'émission élargies et décalées vers la rouge. Le spectre optique montre également des raies fines fortement décalées vers le rouge. Ces redshifts, résultant de l'expansion de l'univers (effet Doppler cosmologique), indiquent que ces objets sont parmi les plus distants de l'univers observable. Les quasars montrent tous un décalage vers le rouge très élevé.

Le quasar le plus proche connu est 3C 273, dans la constellation de la Vierge. Il se situe à un peu plus d'un milliard d'années-lumière ($z = 0{,}158$). Mais en général les quasars se situent bien plus loin et sont particulièrement abondants à des distances qui correspondent aux redshifts compris entre $z = 2$ et $z = 2{,}5$.

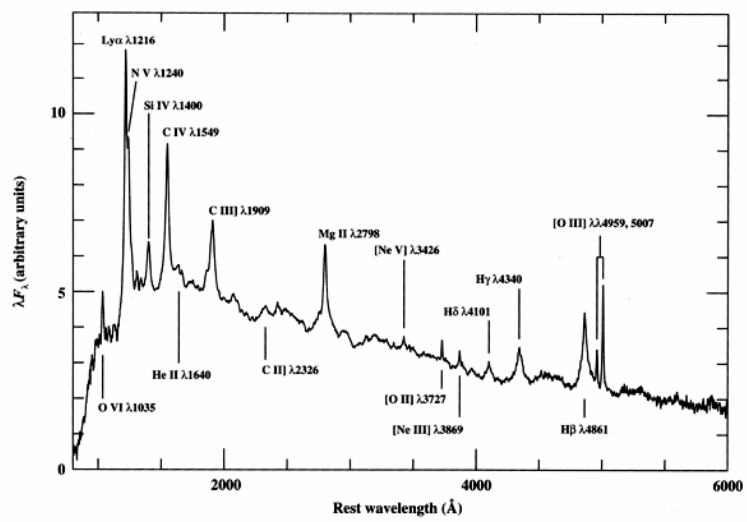
Pour être observables à cette distance, l'énergie que libèrent ces quasars doit se réduire à un phénomène astrophysique connu, principalement les supernovae et les sursauts gamma (qui ont une vie relativement courte). Ils peuvent libérer autant d'énergie que des centaines de galaxies combinées, l'énergie lumineuse libérée est ≥ à 10^{12} $L_\odot$.

En optique, la plupart des quasars ressemblent à de petits points lumineux, bien que certains soient vus comme étant les centres de galaxies actives. Les quasars sont beaucoup trop éloignés pour être détaillés avec de petits télescopes, mais le quasar qui apparaît le plus brillant dans notre ciel est 3C 273 (Vir), avec $m_{app} \sim 12{,}9$ et $M_{abs} \sim -26{,}7$ et il reste une exception. À une distance de 2,44 milliards années-lumière, c'est un des seuls objets lointains observables avec un équipement d'amateur (hors imagerie).

La luminosité de ce quasar est donc 2.10^{12} fois plus forte que celle de notre Soleil, ou environ 10^2 fois plus forte que la lumière totale d'une galaxie géante, telle que notre Voie lactée. Le quasar super-lumineux APM 08279+5255 avait, lorsqu'on l'a découvert en 1998, une magnitude absolue de -32,2, mais était amplifié par un effet de lentille gravitationnelle, d'un facteur d'~ 10, soit 2,5 magnitudes.

Quoique faibles quand ils sont observés aux longueurs d'ondes visibles, les quasars sont les objets les plus brillants connus dans l'Univers. Les quasars peuvent être observés sur de nombreuses régions du spectre électromagnétique : les ondes radio, les infrarouges, la lumière visible, les ultraviolets, les rayons X et même les rayons γ. Leur rayonnement est de type non-thermique.

On a découvert que les quasars variaient en luminosité sur différentes échelles de temps, de mois aux heures, ce qui implique, comme pour les autres AGN, que les quasars génèrent et émettent leur énergie dans une petite région. Actuellement, le quasar le plus lointain observé se situe à 13 milliards d'années-lumière de la terre [121] .



Spectre moyen d'un QSO, résultat de l'observation de plus de 700 QSO du Large Bright Quasar Survey (Francis et al. 1991). Les raies caractéristiques sont indiquées (données P. J. Francis and C. B. Foltz).

En général, la SED élargie du continu des quasars peut être caractérisée pas une loi de puissance :

$F_\nu = C\nu^{-\alpha}$, où α est un index de la loi de puissance, C est une constante et F_ν est le flux spécifique (en $ergs.s^{-1}.cm^{-2}.Hz^{-1}$), la convention étant qu'un indice spectral positif caractérise une source dont la densité de flux décroît lorsque que la fréquence augmente [122].

C'est dans le domaine du proche UV que la plupart des quasars sont le plus brillants (~ 1216 Å, raie Lyα) dans leur référentiel propre, mais en raison des redshifts considérables, le pic de luminosité a été observé aussi loin que 9000 Å. Les flux spécifiques, particulièrement dans l'UV et dans la partie optique du spectre sont souvent mesurés par intervalles de longueurs d'ondes (en $ergs.s^{-1}.cm^{-2}.Å^{-1}$). Le flux total mesuré sur toute la bande passante est bien évidemment le même, que cette bande passante soit mesurée en fréquence ou en longueur d'onde.

Les QSR sont de puissantes radiosources, tous excèdent la limite de luminosité qui divise la classe des radiogalaxies en FR I et II. Globalement, ils présentent soit un halo central radio (avec une émission principale variable), soit une morphologie étendue avec 2 lobes (d'où émane l'émission principale). Les QSR du dernier type ressemblent aux radiogalaxies lumineuses même s'ils sont plus petits.

Une autre différence avec les puissantes radiogalaxies est que plusieurs QSR montrent des jets radio, mais seulement d'un côté du noyau central. Plusieurs de ces QSR varient rapidement en lumière visible, mais ces OVV (Optically Violent Variable) sont généralement associés aux objets de type BL Lac dans la classe des blazars. La proportion du nombre de QSR par rapport aux QSO est de 10%.

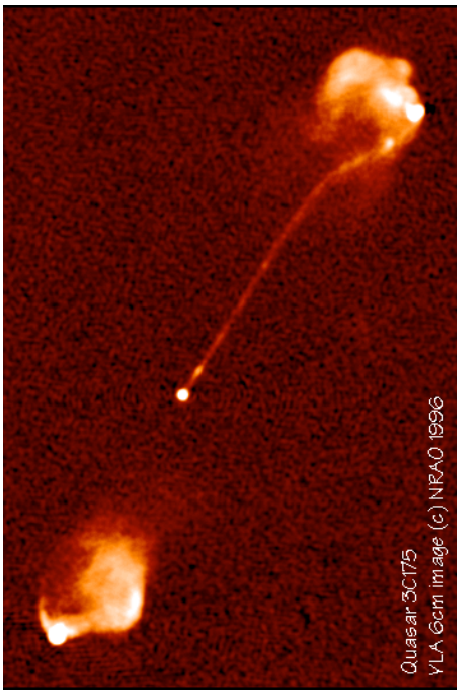
Une proposition d'unification, tendant à regrouper les QSR compacts et ceux ayant des lobes étendus, selon leur orientation, a été bien acceptée. En définissant l'axe de la source comme la ligne joignant les deux lobes radio (et passant par le noyau), le paramètre important de cette hypothèse est l'angle θ de cette source avec la ligne de visée.

---

[121] Observatoire des Sciences de l'Univers de Besançon : "Détection du quasar le plus lointain"

[122] d'autres sources font état de $Fv = C\nu^{\alpha}$

Une des prédictions de ce schéma, que les lobes radio d'un QSR doivent être vus par projection sur le cœur lorsqu'ils sont vus avec un petit angle θ, fut confirmée. De plus, le nombre des QSR à halo central et ceux à 2 lobes radio dans les catalogues de radiosources semble en accord avec ce scénario. Le modèle propose que les axes des QSR sont orientés au hasard. Mais le hasard fait il bien les choses ?



Quasar à z=0.768, taille projetée : 212/h kpc (H=100 km.s^{-1}.Mpc), Double lobes avec prééminence de "points chauds", Jet étroit, sans contre-jet (masqué par effet Doppler ?).

Source : VLA à 4.9 GHz, résolution 0.35" d'arc.

Une alternative à ce modèle unifié des QSR serait que les QSR intrinsèquement petits (jeunes ?) ont des émissions radio centrales plus puissantes et plus variables.

Pour de nombreux astronomes, cette hypothèse est fabriquée de toutes pièces. Une combinaison des effets de l'orientation de la source et ses effets intrinsèques, comme son évolution, en est une autre. L'importance relative de ces 2 effets sera sans doute déterminée dans les prochaines années.

L'unification des QSR compacts et des QSR à deux lobes, par la description des vitesses relativistes des jets et de l'angle sous lequel sont vus ces jets, décrit bien les propriétés observées. Des observations au VLBI montrent pourtant que des mouvements superluminiques existent également dans les QSR à 2 lobes radio. Avec des techniques sophistiquées de radio imagerie, on a découvert que les jets radio des QSR sont généralement présents d'un seul côté du noyau. Dans le cadre de faisceaux relativistes, cela voudrait dire que presque tous les jets des QSR sont plus ou moins orientés vers nous.

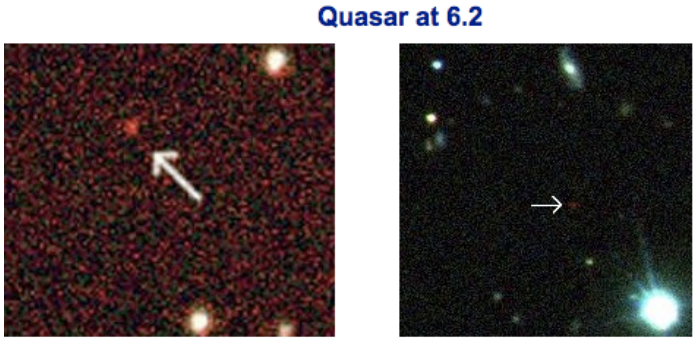
Autrement dit, les QSR dont les jets relativistes sont orientés perpendiculairement à la ligne de visée, seraient cachés ou seraient vus comme d'autres types d'objets.

Selon le fait que les radiogalaxies puissantes existent partout dans l'univers où existent des QSR, que les premières sont en moyenne 2 fois plus étendues (taille projetée) et possèdent les mêmes luminosités en raies étroites (activité comparable des NLR), une unification de ces objets a également été proposée.

Le fort excès d'infrarouges dans ces radiogalaxies pourrait être du à une reémission par les poussières. Plusieurs faits observationnels sont en accord avec ce modèle unifié mais cela restent encore à démontrer. L'alternative serait d'identifier une radiogalaxie avec un QSR éteint, QSR pour lequel la forte activité centrale serait temporairement arrêtée. Cette radiogalaxie serait vue comme une très puissante radiogalaxie, mais la question de l'orientation aléatoire des QSR demeure. Il en va de même pour l'origine de la dissymétrie morphologique des jets radio. L'importance de cette orientation et de l'évolution des jets doit encore faire l'objet d'études détaillées dans les prochaines années.

On recense aujourd'hui, plus de 100 000 AGN. Tous les spectres observés montrent des décalages vers le rouge allant de 0,06 à 6,4. Et parmi eux, tous les quasars connus se situent à de très grandes distances de nous, le plus proche de nous étant à 240 Mpc (~ 780 millions d'a-l) et le plus éloigné étant à quatre Gpc (~ 13 milliards d'al), aux limites de l'univers observable.

Comme les quasars montrent des propriétés communes à toutes les galaxies actives, beaucoup de scientifiques ont comparé les émissions des quasars et celles des petites galaxies actives. Pour créer une luminosité de 10^{40} W (la brillance typique d'un quasar), un trou noir supermassif devrait consommer l'équivalente de 10 étoiles de 1 $M_\odot$/an. Les quasars les plus brillants sont connus pour dévorer 10^3 $M_\odot$/an. A ce rythme, il est impossible qu'un quasar puisse s'alimenter durant 10 milliards d'années. Ce qui explique plutôt bien pourquoi il n'y a aucun quasar près de nous. On pense alors que lorsqu'ils ont terminé d'avaler du gaz et de la poussière, ils deviennent des galaxies ordinaires. Peut-être notre propre Voie Lactée fut elle un AGN il y a quelques milliards d'années - auquel cas elle fut au maximum une Seyfert en raison de la faible masse du trou noir central !



A gauche le quasar SDSS 1044-0125 dont le redshift z=5.82 découvert en mars 2000. A droite un quasar découvert à z=6.2. Il apparaît comme une petite tache floue et rouge en raison du décalage spectral de sa lumière sur ce document du SDSS. Ces deux objets se situent à environ 13 milliards d'années-lumière !

Autres terminologies ou sous catégories rencontrées

- Quasar Type-1

  Type classique des quasars avec un spectre optique similaire aux Seyfert de type 1. Les Quasars Type-1 sont censés être le pendant à haute luminosité des Seyfert de type 1. Ces Quasars sont les équivalents des BLRG.

- Quasar Type-2

  Encore hypothétiques. Analogues aux Seyfert 2 ou NLRG à haute luminosité. Aucun exemple de ces objets n'a encore été découvert avec certitude, cependant, quelques galaxies à l'aspect normal mais présentant une forte émission de rayons X durs pourraient être des Quasar de type 2.

- LPQ (Low-Polarization Quasar)

  Quasar dont la polarisation optique est inférieure à 3 % (quasar normal)

- RLAGN (Radio-Loud AGN)

  AGN émettant fortement dans les ondes radio comme les quasars ou les BL Lac.

- RLQ (Radio-Loud Quasar)

  Synonyme de quasar

- FSRQ (Flat Spectrum Radio Quasar)

  Sont des FRII orientés avec un angle < 15° . Assimilés aux Core-Dominated Radio Galaxies.

- SSRQ (Steep Spectrum radio Quasar)

  Présentent des angles entre ceux des FSRQ et des FRII (15°< θ <40°). Assimilés aux Lobe-Dominated Radio Galaxies.

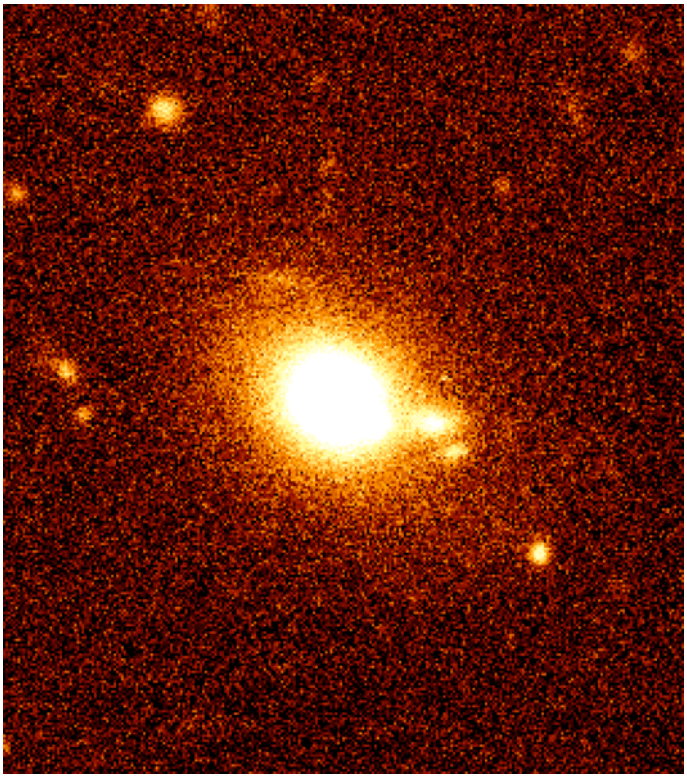
- BALQSR (Broad Absorption Line Quasar)

  C'est le 7 avril 2008 que XMM-Newton a découvert une galaxie très fortement émettrice rn rayons X. selon les chercheurs, 10 à 20 % des quasars sont d'un type spécifique, nommé BALQSR, qui semble révéler la présence d'un épais cocon de gaz, englobant ces quasars. Les chercheurs pensent que le gaz est repoussé d'un BALQSR dans le plan équatorial du disque d'accrétion. Ce gaz absorbe la majeure partie des rayons X émis dans la zone proche du trou noir. Cependant, selon Wang [123], certains BALQSR paraissent écouler de la matière le long des axes polaires, à 90° du plan du disque d'accrétion.

[123] "XMM Observations of BAL Quasars with Polar Outflows" J.Wang et al., ApJ, Vol. 676, Issue 2, pp. L97-L100, 2008

C. Blazars

L'origine du mot blazar est incertaine, il peut être dérivé de "to blaze" = flamboyer, mais peut aussi se comprendre comme une contraction de BL Lacertae et de quasar. Ce sont des galaxies très actives et compactes, ressemblant aux quasars. Leur principale caractéristique est que leur luminosité peut varier d'un facteur 10^2 en quelques jours. A ce jour 3 types de blazars peuvent être énumérés : les BL Lac, les OVV et les HPQ.



L'image de l'objet BL Lac, H 0323+022 (z=0.147)faite au NTT de l'ESO (filtre R). La galaxie hôte et de proches compagnons sont visibles.

Les BL Lac sont des galaxies elliptiques avec un noyau, très brillant, dont le rayonnement est variable et qui émettent une forte émission radio. Leur morphologie est dominée par le cœur radio compact.

On ne voit pas de raies d'émission. Le redshift, et de ce fait la distance des BL Lac, ne peut être que déduite des raies d'absorption de la faible émission optique de la galaxie hôte.

Dans un sens, l'association des BL Lac avec des radiogalaxies faibles ou moyennement lumineuses, dont l'orientation est favorable, est le complément à l'unification des QSR avec les radiogalaxies puissantes.

Les BL Lac sont souvent proches et les réunifier avec les puissantes radiogalaxies, rares dans notre univers local, n'est pas possible. Il semble plus simple d'unifier les radiogalaxies plus faibles dont la luminosité des lobes radio est comparable à celle de l'émission du halo des BL Lac.

L'absence de raies d'émission des BL Lac n'est donc pas une surprise, car les plus faibles radiogalaxies n'en montrent pas non plus. De plus, l'émission optique des BL Lac est fortement dominée par les composantes des jets polarisés, d'origine non-thermique. Par contre, les OVV qui font partie de la classe des blazars comme les BL Lac présentent des raies d'émission. Comparés aux autres QSR, les effets du rayonnement sont plus prononcés dans les OVV, qui seraient plutôt des QSR dont les jets sont proches de la ligne de visée. Les OVV sont plus puissants que les BL Lac.

De ces AGN s'échappent de puissants jets extrêmement lumineux, et souvent très actifs en radio. Ce sont parmi les plus puissantes sources extragalactiques. mais leur puissance peut aussi être exagérément augmentée par effet relativiste. Les jets quittent le cœur de l'AGN à une vitesse proche de celle de la lumière et leur orientation est proche de la ligne de visée. Ils peuvent même nous sembler se déplacer plus vite que la vitesse de la lumière. On parle alors de jets superluminiques [124]. Ils sont composés de particules électriquement chargées ayant échappé au trou noir, tels que des électrons, positrons, H^+, d'où leur champ magnétique intense. Ces jets peuvent s'étendre jusqu'à des centaines de milliers d'années-lumière de la galaxie, et former les vastes étendues de gaz radio-émetteurs, que sont les lobes radio.

Les mesures montrent qu'ils sont animés de vitesses comprises entre 15000 km/s (AP Librae) et plus de 254000 km/s pour AO 0235+164, tous étant situés au-delà du milliard d'années-lumière.

[124] Biretta, John. "Hubble Detects Faster-Than-Light Motion in Galaxy M 87". STScI.1999

Radiogalaxies, quasars et blazars seraient en fait le même type de galaxies, mais vues sous un angle différent. Les jets nous parvenant de biais, nous voyons des quasars, de face, nous voyons des blazars et complètement de profil, le cœur caché par les anneaux de poussières, nous verrions une radiogalaxie. Mais dans tous les cas, les galaxies hôtes semblent être des galaxies géantes elliptiques.

- Exemples de Blazars

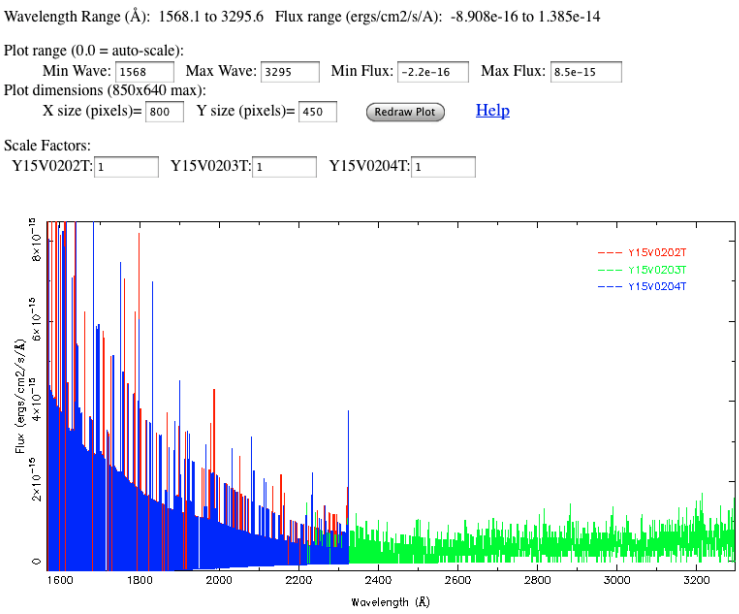
  BL Lacertae, constellation du Lézard, distance 90 millions d'années-lumière

  OJ 287, constellation du Cancer, distance 3,80 milliards d'années-lumière

  et aussi 3C 273, BL Lacertae, PKS 2155-304, Markarian 421, ou Markarian 501. Les deux derniers s'appellent également « TeV Blazars » pour leur émission de rayons γ de haute énergie.

C'est en 1968 que BL Lacertae fut identifiée comme la radiosource VRO 42.22.01 [125]. BL Lacertae montra plusieurs des caractéristiques des quasars, mais le spectre optique était exempt des raies spectrales employées pour déterminer le déplacement vers le rouge.

Une comparaison des spectres des blazars montre des spectres sans figures particulières, ni raies d'émission. Le spectre est dominé par un continu non thermique, sans particularités. Leur redshift ne peut donc être déterminé qu'à partir des caractéristiques de la galaxie hôte. Les raies d'émission peuvent être intrinsèquement absentes ou simplement masquées par la variabilité ; dans ce dernier cas, elles peuvent se dévoiler lorsque cette variabilité est faible [126]. Les blazars ont un comportement assez proche des quasars radio-émetteurs si ce n'est qu'ils varient très rapidement.



Spectre de BL Lac, issu de http://archive.stsci.edu/cgi-bin/stdads_retrieval_options

Data set: Y15V0202T Target: 'BL-LAC ' wavelength range (Å): 1568 - 2325

Data set: Y15V0203T Target: 'BL-LAC ' wavelength range (Å): 2215 - 3295

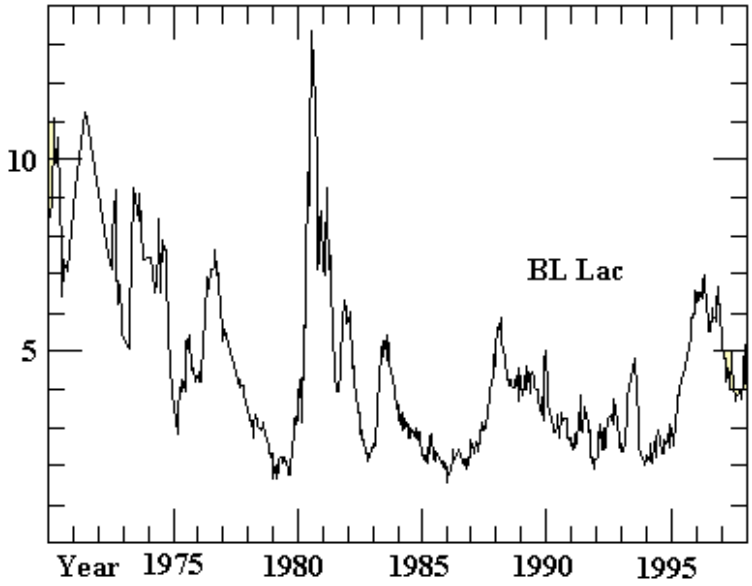
Data set: Y15V0204T Target: 'BL-LAC ' wavelength range (Å): 1568 - 2325

---

[125] Schmitt J. L. (1968): "BL Lac identified as radio source", Nature 218, 663

[126] Vermeulen, R.C., Ogle, P.M. & Tran, H.D., et al. (1995). Astrophysical Journal.452:L5

Ces objets présentent aussi de grandes variations de luminosité, parfois en quelques heures seulement.



La variation de brillance de BL Lac au cours des années. Le graphe montre le changement de l'intensité radio de la galaxie. Basé sur des images de la présentation de Bill Keel. http://www.astr.ua.edu/keel/agn/

Autres terminologies ou sous catégories rencontrées

- BLL (objets BL Lac)

  Un des rares groupes d'AGN nommé après ce qui avait été d'abord pris pour une étoile variable. Les objets BL Lac présentent un spectre 'plat', mais fortement polarisé. Leur luminosité est équivalente à ~ 10^2 fois celle de la Voie Lactée. Mais en raison de l'orientation, il est admis que la luminosité des BL Lac est surestimée, si leur émission est considérée isotrope. Auquel cas, leur rapport aux quasars serait comparable à celui des Seyfert par rapport aux QSO. Ce sont également de forts émetteurs radio. On estime que les BL Lac seraient hébergés au sein de radiogalaxies de type FR I.

- RBL (Radio-loud ou Radio selected BL Lac)

  Une BL Lac avec une forte émission radio, mais une faible émission en rayons X. C'est le premier type de BL Lac qui a été trouvé.

- LBL (Low Energy Peaked BLL)

  Synonyme des BL Lac émetteur radio (RBL)

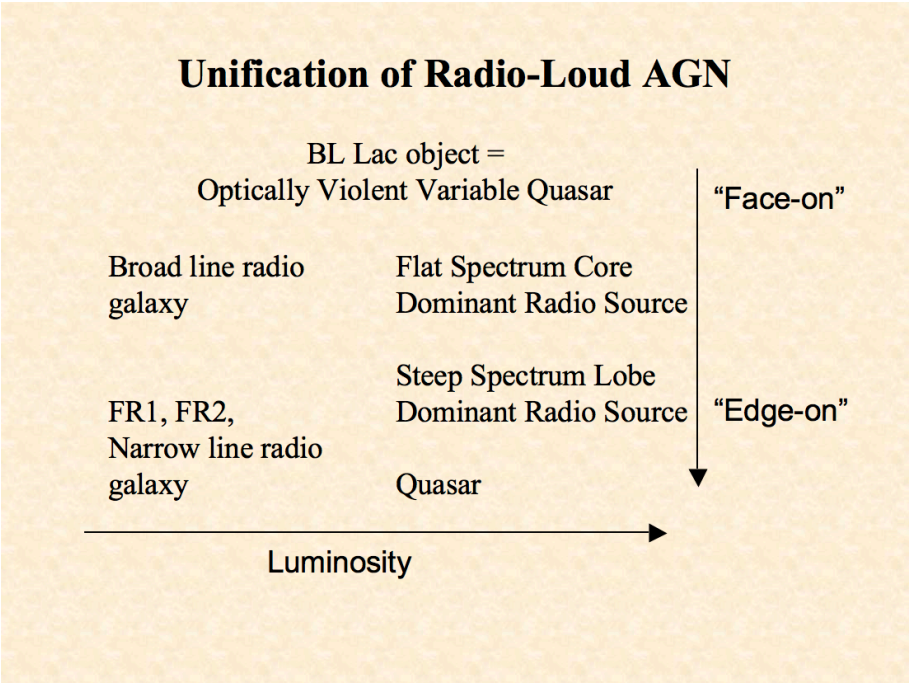
- HPQ (High Polarization Quasar) et OVV Quasar (Optically Violently Variable Quasar)

  Groupes de quasars qui émettent fortement en ondes radio et qui ont un spectre plat, fortement polarisé. La polarisation, dans le visible, est de plus de 3 % et peut atteindre 20 %. Ils ressemblent aux BL Lac sauf que leur spectre contient de larges et intenses raies d'émission. Ce sont des variables irrégulières avec des changements intenses de luminosité à l'échelle du jour ou de la semaine, entrecoupés de longues périodes de calme. Les galaxies hébergeant les HPQ seraient de type FR II.

- X-ray Loud BL Lac object (XBL, X-ray selected BLL) et HBL (High Energy Peaked BLL)

  BL Lac qui présente de fortes émissions en RX et de plus faibles en radio que les autres BL Lac. Le terme HBL est synonyme de XBL.

D. Unification des AGN RL



Unification et objets Radio-Loud. Source : Jim Bechtold, Université d'Arizona

Le travail sur l'unification des objets RL s'est concentré sur les quasars RL très lumineux. Ceux-ci ont en commun leurs raies d'émission étroites comme les Seyfert 1 et 2 (mais sans la complexité de la composante réfléchie). Les radiogalaxies émettant des raies étroites ne montrent pas de continu ou un quelconque flux de RX réfléchis, bien qu'elles émettent parfois des raies larges polarisées. Les structures radio à grande échelle de ces objets ont apporté la preuve que les modèles d'unification, basés sur l'orientation, sont valables [127]. Les preuves apportées par les observations en RX soutiennent la thèse de l'unification pour les quasars et les blazars. Les radiogalaxies sont obscurcies par un tore de matière, pas les quasars. Mais les objets RL ont également une composante relative aux jets et il est nécessaire de recourir à la haute résolution pour séparer les émissions thermiques des gaz chauds à grande échelle [128]. Pour des angles proches de la ligne de visée, les jets dominent et nous voyons des blazars [129]. Mais la majorité des radiogalaxies sont des objets peu lumineux et peu excités. Celles-ci ne présentent pas de fortes raies d'émission, en optique, d'origine nucléaire - qu'elles soient étroites ou larges- et ces radiogalaxies présentent un continu optique, provenant du jet, comme leurs émissions en RX. Il semble donc que les radiogalaxies ne puissent être unifiées avec les quasars, malgré la présence d'objets très lumineux en radio. Il est acquis que le tore ne peut masquer ni la NLR ni l'ENLR et les études en IR montrent qu'il n'y a pas de composante nucléaire cachée [130]. Il n'y a même aucune preuve d'existence d'un tore dans les radiogalaxies. Elles forment donc probablement une classe à part, dans laquelle, seules les émissions relatives aux jets comptent.

Cela implique-t-il de repenser le modèle ?

[127] Laing, R.A. (1988). Nature 331:149 ; Garrington, S., Leahy, J.P. & Conway, R.G., et al. (1988). Nature.331:147 ; Barthel, P.D. (1989). Astrophysical Journal.336:606

[128] Belsole, E., Worrall, D.M. & Hardcastle, M.J. (2006). MNRAS.336:339

[129] Browne, I.W.A. (1983). MNRAS.,vol. 204, July 1983, p. 23P-27P

[130] Ogle, P., Whysong, D. & Antonucci, R. (2006). ApJ.647:161

C. Synthèse des Acquis

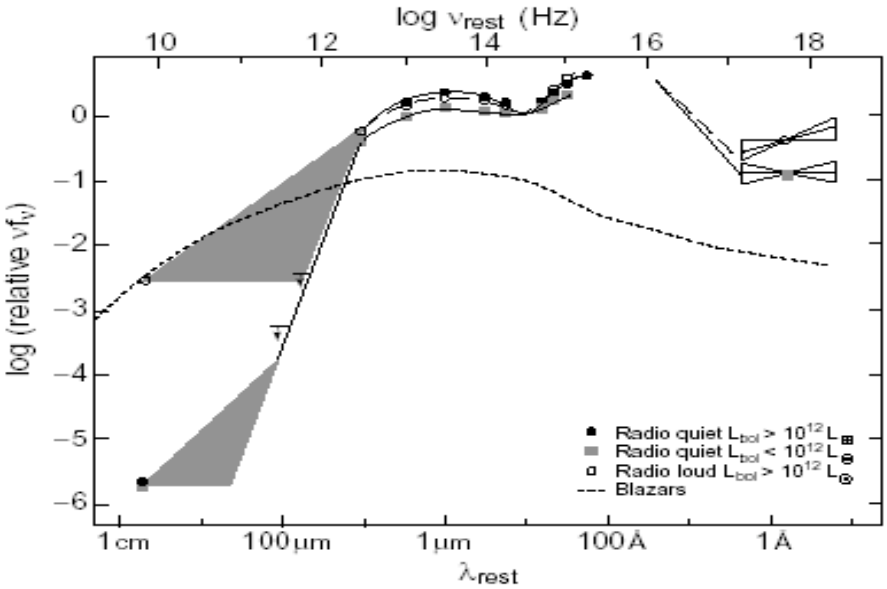
[131]

- Les AGN (Active Galactic Nuclei) se situent majoritairement à de grandes distances ($0.8 < z < 6.3$)
- Ils présentent des densités d'énergie intenses (3.10^3 $M_\odot c^2$ vers $z \sim 2$). Ils émettent une énergie phénoménale, jusqu'à 10^{61} ergs, soit plus de 10^{25} W/Hz vers 1420 MHz. Les AGN sont extrêmement lumineux, jusqu'à 10^{15} $L_\odot$.
- Toutes les galaxies de Seyfert peuvent être décrites à l'aide d'un unique paramètre, la "X-ray column density", qui croit régulièrement des Seyfert 1 aux Seyfert 1.8 puis 1.9 jusqu'aux Seyfert 2 (Seyfert - les galaxies de Seyfert sont caractérisées par un petit noyau brillant aux longueurs d'ondes du visible et de fortes raies d'émission dans le spectre).
- Les AGN se répartissent en classes principales, les AGN à forte ionisation comme les Seyfert et ceux à faible ionisation comme les LINERs (Low-Ionization Nuclear Emission-line Region, type d'AGN défini par ses raies spectrales d'émission. Ce sont les plus faibles des AGN). On considère que les LINER ont de faibles taux d'accrétion et sont, par conséquent, alimentés par un flux d'accrétion, dominé par l'advection (ADAF, Advection Dominated Accretion Flow).
- Les HPQ (High Polarization Quasar) sont des AGN à forte ionisation, fortement émetteurs en radio et présentant un jet relativiste pointant dans la direction de l'observateur, alors que les BL Lac (du nom ce qui fut d'abord pris pour une étoile, BL Lacertae) sont des AGN à faible ionisation. Plusieurs blazars (galaxies très actives et compactes, ressemblant aux quasars. Leur principale caractéristique est que leur luminosité peut varier d'un facteur 10^2 en quelques jours) ont été classés BL Lac sur la base de données insuffisantes ; la plupart de ces objets avec de faibles raies d'émission larges sont des HPQ.
- Les AGN fortement RL (Radio-Loud, fortement émetteurs radio, comme les radiogalaxies) doivent héberger un trou noir en rotation rapide, alors que les AGN RQ (Radio-Quiet, faiblement émetteurs radio) doivent avoir un trou noir central tournant lentement. Les trous noirs à rotation rapide pourraient être le résultat de la fusion de deux trous noirs de masses semblables.
- Des galaxies spirales de type précoce ont un spectre de raies d'émission intermédiaire entre celui des LINERs et celui des galaxies à flambées d'étoiles (encore appelés faibles [O I] LINERs) ; ce sont probablement de vielles galaxies à flambées d'étoiles dominées par des résidus de supernovae.
- Les "amas à courant de refroidissement" ("Cooling flow clusters") montrent souvent, près de leur centre, une structure filamenteuse qui présente un spectre similaire à celui des LINERs, probablement ionisée par des processus stellaires plutôt que par un AGN ; d'un autre côté, la galaxie centrale de ces amas est souvent une radiogalaxie de type FR I (classification établie par Fanaroff et Riley, selon la luminosité des lobes radio, les FR I présentent des lobes plus brillants vers le centre), c'est-à-dire un véritable AGN. La vraie nature des raies d'émission observées dans une galaxie de type FR I située dans un "amas à courant de refroidissement" est cependant quelque chose d'ambigu.
- Les ULIRGs (Ultra Luminous InfraRed Galaxy) sont alimentées par des flambées d'étoiles, induites par des processus de fusions. Plusieurs ULIRGs sont de faibles [O I] LINERs. Une part significative de l'ensemble des ULIRGs contiennent un AGN, certainement la conséquence d'une fusion ; l'AGN doit être, dans certains cas, la source principale d'énergie.
- Les QSO (Quasi Stellar Object, se distingue des quasars RL car ce sont des objets RQ) de type 2 existent ; ils sont, en général, presque indiscernables, parce qu'à la fois les raies larges et le continu du cœur sont masqués. Les radiogalaxies de type FR II (classification établie par Fanaroff et Riley, selon la luminosité des lobes radio, les FR II présentent des lobes plus brillants aux extrémités) présentant une forte luminosité radio sont des QSO de type 2.

---

[131] The emission line spectrum of active galactic nuclei and the unifying scheme, M.P. Véron-Cetty and P. Véron - The Astron Astrophys Rev (2000) 10: 81–133

- SED comparées des différents types d'AGN [132]



- Classification selon les rapports de luminosités, du taux d'accrétion et de la masse du trou noir

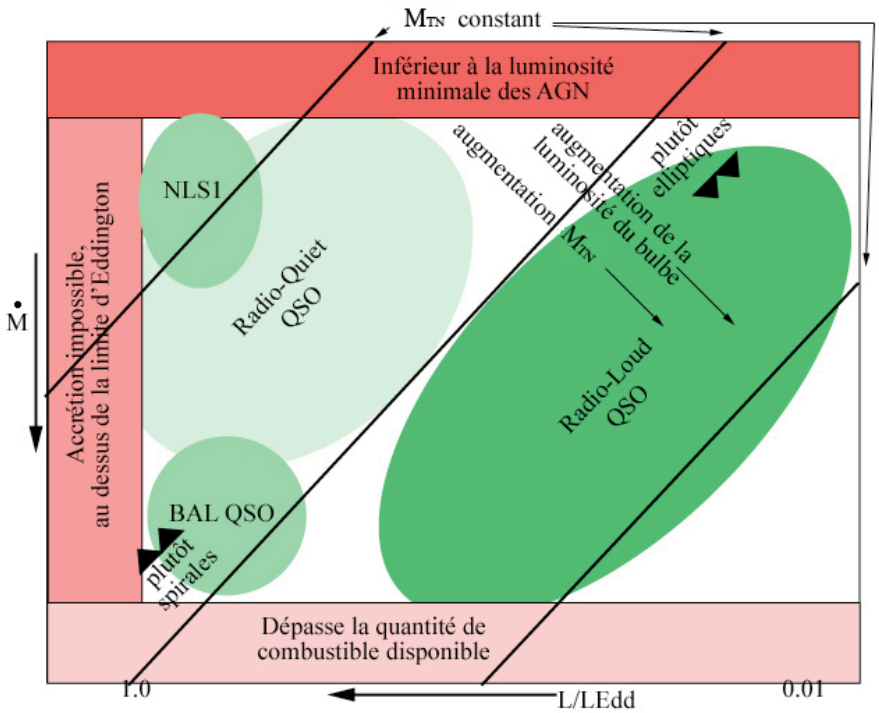
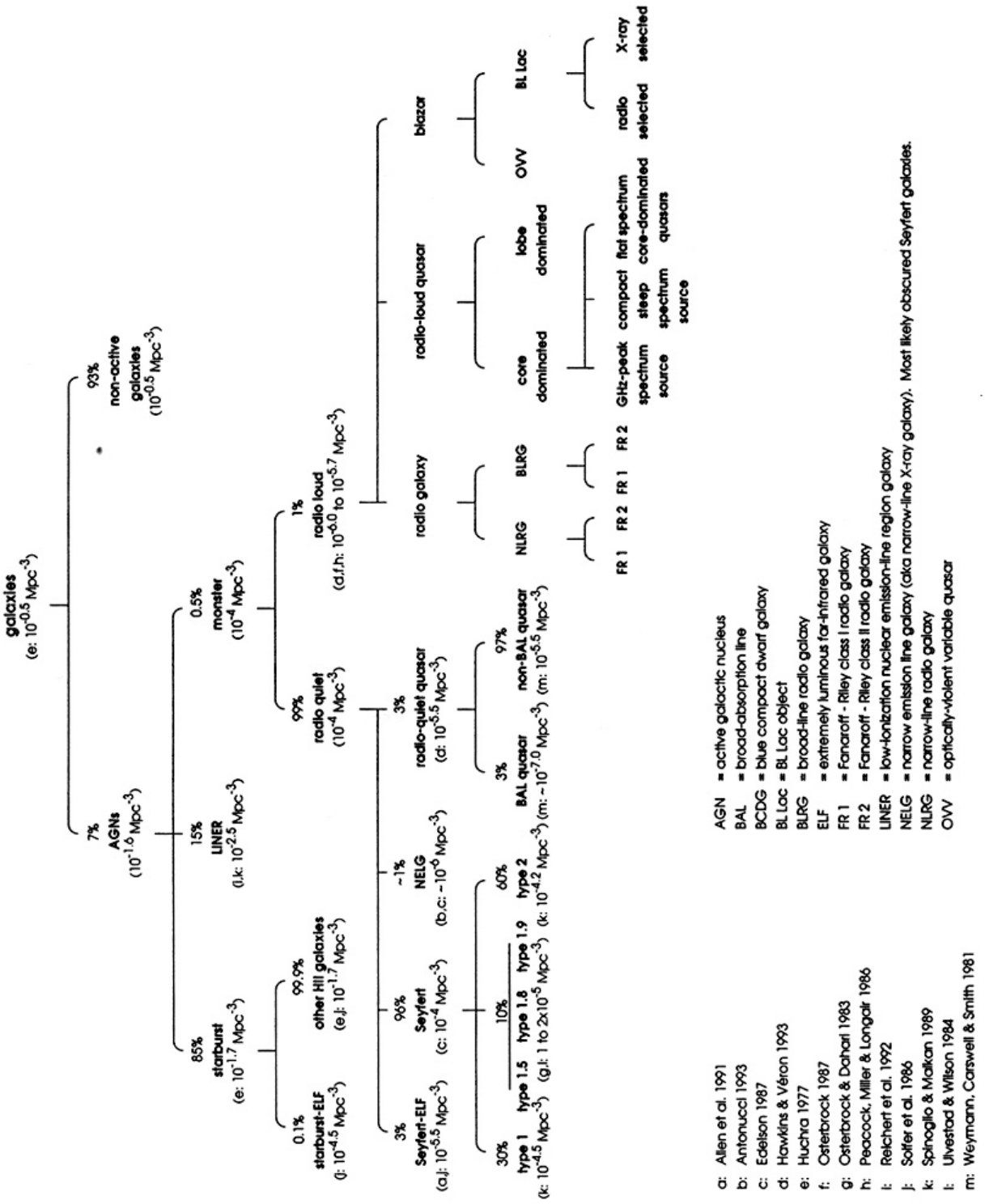


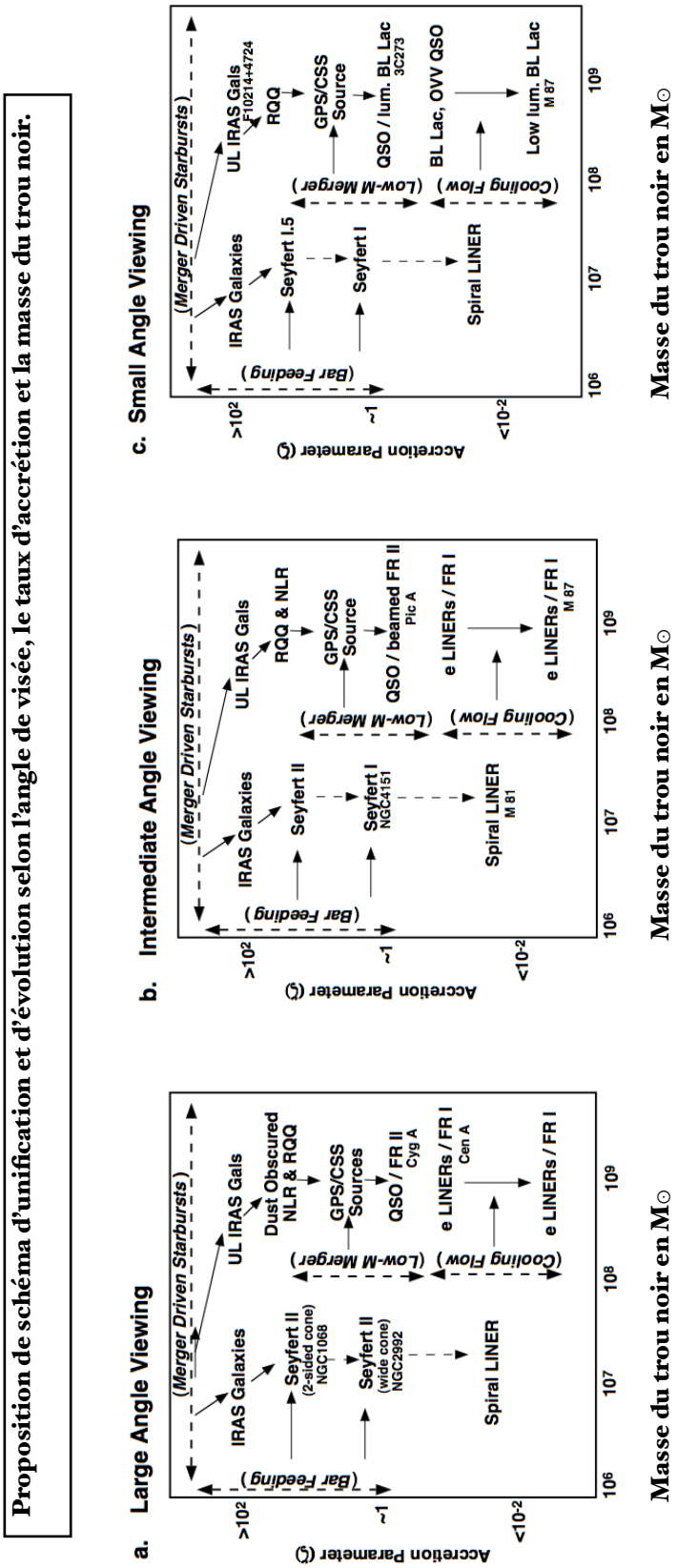
Schéma repris de Boroson, 2002, "Black Hole Mass and Eddington Ratio as Drivers for the Observable Properties of Radio-loud and Radio-quiet QSOs".ApJ, Volume 565, Issue 1, pp. 78-85

[132] Sanders and al., "Continuum energy distribution of quasars - Shapes and origins", ApJ, Part 1, vol. 347, 1989



Active Galaxy Unification : Radio and Far-Infrared Studies - AlanRoy http://nedwww.ipac.caltech.edu/level5/index.html

Les principaux types de galaxies "actives" et d'AGN connus. Les densités spatiales, compilations issues de la littérature par ALR, ne sont que des approximations et dépendent de la complétude et de la profondeur des relevés. peuvent tout de même servir de base à des données statistiques.



Extrait de [133]

[133] "Towards a Truly Unified Model of AGN: Aspect, Accretion and Evolution", M.A. Dopita, ASA., 1997, 14, 230-45

V. Perspectives et Conclusion

A. Cosmologie et Evolution

Pendant longtemps, les galaxies à noyau actif ont détenu le record du plus grand redshift, du fait de leur forte luminosité (aussi bien en optique qu'en onde radio) et elles ont toujours un rôle à jouer dans l'étude des débuts de l'univers. Néanmoins, on sait à présent que les AGN donnent, par nature, une image très biaisée de la galaxie "typique" à haut redshift.

L'étude de l'évolution des populations d'AGN est intéressante. La plupart des classes d'AGN lumineux (RQ et RL) semblent avoir été beaucoup plus nombreux dans l'univers jeune. Cela suggère que les trous noirs massifs se sont formés relativement tôt et que les conditions pour la formation d'AGN lumineux étaient plus disponibles aux débuts de l'univers - il devait y avoir beaucoup plus de gaz froid au centre des galaxies qu'il n'y en a maintenant. Cela implique aussi qu'un grand nombre d'objets qui ont été des quasars lumineux le soit beaucoup moins aujourd'hui. L'évolution des populations d'AGN peu lumineux est bien moins limitée en raison de la difficulté à détecter et à observer ces objets à de hauts redshifts.

L'évolution des quasars

Les études de Schmidt (à l'époque) ont permis de préciser que 70 % des quasars avaient un redshift compris entre 1.8 et 2.5. La majorité de ces quasars est située à environ 10 milliards d'années-lumière et sont séparés l'un de l'autre d'environ 400 millions d'années-lumière. Ces observations confirment l'homogénéité de l'univers à grande échelle. Mais ceci ne signifie pas que les quasars soient les objets les plus anciens de l'univers ou qu'ils se soient formés en masse il y a environ 10 milliards d'années. Ces découvertes ne sont qu'une étape dans notre compréhension de la cosmologie.

Pour essayer de comprendre l'évolution des quasars, deux méthodes sont à notre disposition:

- Déterminer l'évolution de la relation Taille-Décalage spectral des radiosources
- Déterminer l'évolution de la densité de flux en fonction de la distance des radiosources.

Chacune dépend des constantes cosmologiques et d'effets encore inconnus liés à une remontée dans le temps. Précisons donc bien qu'il est encore difficile d'étalonner ces mesures et de différencier tous les effets.

La relation Taille-Décalage spectral

Dans le modèle standard FLRW [134], la dimension "d" d'une source extragalactique projetée sous un angle Θ dépend de trois facteurs, H_0, q_0 et z [135]:

$$\Theta = \frac{H_0 q_0^2}{c} \frac{(1+z)^2}{q_0 z + (q_0 - 1)\left(\sqrt{(1+2q_0 z)} - 1\right)} d$$

La première idée qui vient à l'esprit est de considérer que la dimension des objets est constante. Cela permettrait de déterminer la constante de Hubble en mesurant l'éloignement des sources, Θ(z). Mais tributaire de paramètres cosmologiques, cette valeur peut parfaitement évoluer dans le temps, à mesure que z augmente.

[134] pour rappel : Friedman, Lemaître, Robertson, Walker

[135] H_0 est le paramètre de Hubble, q_0 est le paramètre de décélération et z, le redshift de l'objet considéré.

Les objets pouvant servir à déterminer H_0 doivent être nombreux et très lumineux. Les candidats tout indiqués sont les radiosources étendues et brillantes, comme Cygnus A (de type FR II), souvent associées à des quasars et il est relativement aisé de calculer leur décalage spectral. Malheureusement on constate qu'à z constant, les valeurs de Θ sont dispersées et on ne peut en déduire qu'une taille maximale. Paradoxalement, elle varie comme l'inverse de z ce qui est en contradiction avec la relation, $\Theta = f(z)$.

Deux arguments peuvent expliquer ce phénomène :

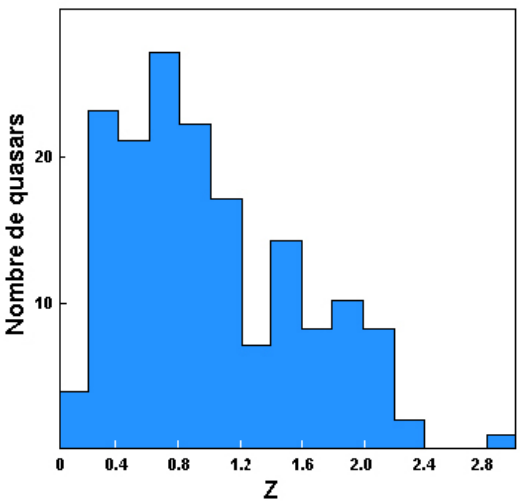
- Plus la dimension des radiosources est petite plus elles sont lumineuses. A mesure que z augmente, seules les radiosources brillantes sont détectables et leur taille apparaît plus faible.
- La taille des radiosources varie dans le temps et cette taille était inférieure dans le passé.

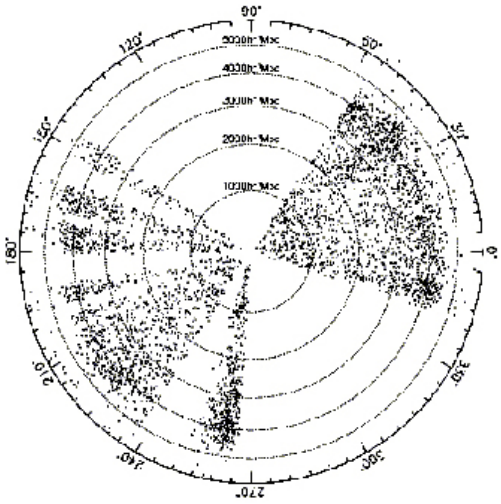
La première explication est insuffisante pour expliquer la relation en $\Theta = f(z^{-1})$. Reste donc la seconde, qui prédit une évolution physique des radiosources au cours du temps. Cette explication est d'autant plus vraisemblable qu'au-delà de z = 2.5 les radiosources étendues deviennent très rares.

Evolution de la densité de flux en fonction de la distance

A la fin des années 1970, M. Longair et ses collègues ont fait le décompte de toutes les radiosources et de leur puissance en fonction de la fréquence. Leurs analyses [136] permettaient d'évaluer la pertinence des théories d'alors, lois établies en l'absence d'évolution des radiosources au cours du temps.

Sachant qu'il existe une correspondance entre le flux radioélectrique et la distance, ils constatèrent que pour les radiosources dont le flux était supérieur à 1 Jy, il y avait, contrairement aux prédictions, une décroissance évidente, à mesure que l'on avançait dans les profondeurs de l'espace. La distribution chutait d'un facteur 5 entre 1 et 100 Jy. Cela signifiait que les radiosources n'étaient pas uniformément réparties dans l'espace. La question était alors de savoir si toutes les radiosources avaient évolué de la même façon et à quelle époque elles étaient apparues [137].





A gauche, distribution du nombre de quasars en fonction du redshift. A droite, distribution des quasars jusqu'à z=0.5. Documents J.Talbot et SDSS.

[136] M.Longair in "Observational Cosmology", Ed.Maeder-Martinet et Tamman, 1978

[137] C.Hazard, Nature, 314, 1985, p238 - P.Véron-Cetty et L.Woltjer, Astrophysical Journal, 236, 1990, p69.

D'une façon générale, la densité des quasars reste importante jusqu'à 12 ou 13 milliards d'années-lumière environ, à un facteur 2 près, lié à l'approximation sur la constante de Hubble. Au-delà, il est difficile de les observer. Ceci renforce la théorie qui veut que la densité des quasars augmente rapidement à mesure que l'on remonte le temps (et que z augmente). Mais on constate qu'au-delà de z = 2.5 les radiosources étendues, à spectre pentu, disparaissent complètement. Et, quelle que soit la source, qu'elle soit compacte ou étendue, il existe une coupure vers z = 4 qui est indépendante des conditions qui règnent dans le milieu ambiant [138].

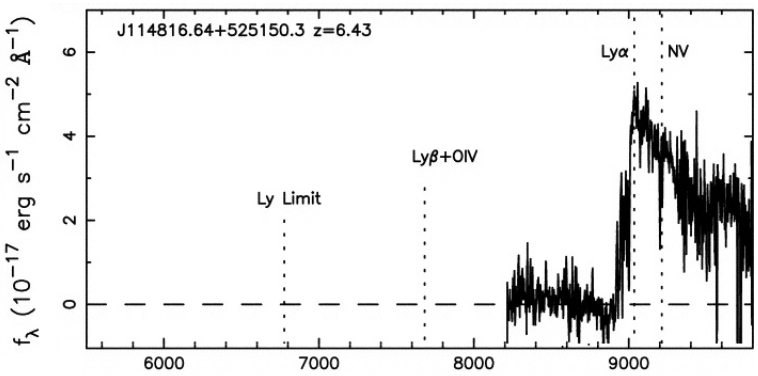
Bien que la densité d'énergie ait été plus élevée dans le passé, les quasars et les radiosources semblent être alimentés par les mêmes processus. Leur rayonnement n'est pas lié au milieu extérieur émissif mais plutôt aux processus qu'ils entretiennent avec leur hôte.

Densité spatiale des différents AGN	
Type d'objet	densité spatiale (Gpc^{-3})
Radio Quiet	
Seyfert de type 2	$8.10^5\ h_0^3$
Seyfert de type 1	$3.10^5\ h_0^3$
QSO	$800\ h_0^3$
Radio Loud	
FR I	$2.10^4\ h_0^3$
BL Lac	$600\ h_0^3$
FR II	$80\ h_0^3$
Quasars	$20\ h_0^3$

Source : "Activ Galactic Nuclei", B.M. Peterson.

AGN, Big-Bang et l'époque de la reionisation.

Les grands décalages spectraux permettent d'avoir les spectres d'objets à z > 6 et de constater l'effet Gunn-Peterson (cf. Annexe D) marqué par des raies d'absorption dans les raies Lyα décalées vers les grandes longueurs d'onde. Les études spectrales permettent de situer la période de reionisation vers z ~ 6.



Spectre visible du quasar le plus lointain connu, on voit la forêt Lyα (qui devrait être à λ = 1216 Å), à plus de 900 nm. Données du Sloan Digital Sky Survey, Donald Schneider et Xiaohui Fan.

[138] M.Rees, Science, 247, 1990, p817.

B. Perspectives

Quelques-uns des nombreux développements évoqués dans l'étude des AGN, souhaités ou prévus dans la prochaine décennie (selon les auteurs).

- Après un recensement de la densité de masse des trous noirs pour z compris entre ~0.1 et 5, il faut effectuer un marquage systématique de la teneur en gaz moléculaire et des propriétés structurales des galaxies hôtes des AGN en fonction de z afin d'étudier pourquoi l'activité des AGN a brusquement diminué à partir de z ~ 2.5. La spectroscopie à intégrale de champ dans le proche IR avec les télescopes de la classe des 8m, avec les données de Spitzer à 24 µm, et avec l'arrivée d'équipements sub-millimétriques comme le LMT et ALMA, devraient fournir les clefs à cette étude.

- Jusqu'ici, toutes les études entre AGN / Starbursts et les barres à grande échelle se sont concentrées sur des galaxies locales. Mais, à la fois le taux de formations d'étoiles au niveau cosmique et l'activité des AGN augmentent jusqu'à z ~ 1. Le travail continuel sur l'impact des barres et les interactions, lors des 9 derniers milliards d'années (jusqu'à z ~ 1.3) [139], sur les flambées centrales d'étoiles et sur les AGN, pourra aider à contraindre la manière dont les barres et les déclenchements externes se rapportent aux activités et à l'évolution structurale des galaxies à ces époques.

- Il y a un grand manque d'observations interférométriques, à haute résolution, du gaz moléculaire, afin d' avoir un échantillon statistiquement significatif des AGN, même localement. Trois relevés en cours doivent corriger ce manque. Le "Molecular gas in Active and Inactive Nuclei" (MAIN ; Jogee, Baker, Sakamoto, et Scoville, 2001) relevé multi-spectral à haute résolution, qui couvre quarante noyaux (Seyfert, LINER, et région HII). MAIN vise à contraindre les causes des niveaux d'activité des noyaux galactiques, et complète les relevés en cours, "NUclei of GAlaxies" (NUGA ; Garcia-Burillo et al. 2003) et le relevé multi-raies des Seyfert (Kohno et al. 2001).

- L'avènement des très grands télescopes (classe des 30 à 100 m) comme le Giant Magellan Telescope ou ELT, aidera à examiner et à étendre la relation M_{TN}-σ aux galaxies spirales de type tardif, aux trous noirs de masse intermédiaire et aux galaxies elliptiques à faible brillance de surface.

C. Questions en suspens

Questions restant sans réponse définitive à ce jour

- Comment les trous noirs peuvent-ils se former si vite après le Big Bang, en moins d'un milliard d'années (selon l'âge estimé des plus vieux quasars et QSO) ? [140]

- Pourquoi l'abondance des éléments lourds semble-t-elle être la même dans les quasars et QSO, quel que soit leur âge ?

- Pourquoi les AGN les plus lumineux sont-ils associés à des galaxies elliptiques alors que les plus faibles le sont avec des spirales ?

- Pourquoi les QSO ont-ils tendance à avoir plutôt pour hôte des spirales ou elliptiques, alors que les quasars sont plutôt hébergés par des elliptiques et des galaxies perturbées ?

- Les AGN d'un certain type évoluent-ils en un autre type au cours du temps ? Les QSO et quasars peuvent-ils initier les ULIRG ?

---

[139] Selon le relevé GEMS du HST et les données du Deep Field South de Chandra

[140] Une hypothèse a été évoquée avec les "Quasistars", des étoiles hypermassives, de quelques millions de masses solaires. "Formation of Supermassive Black Holes by Direct Collapse in Pregalactic Halos" MNRAS, mai 2006, Begelman, Volonteri & Rees ; "Did supermassive black holes form by direct collapse?", septembre 2007, M. Begelman ; "Quasistars: Accreting black holes inside massive envelopes", MNRAS, avril 2008, Begelman, Rossi & Armitage ; article de M. Begelman dans Ciel & Espace septembre 2008.

- Qu'arrive-t-il aux AGN lorsque leur activité s'éteint ?
- Pourquoi, même en tenant compte de l'effet de fronde, y a-t-il si peu de contre-jets détectés ?
- Comment sont collimatés les jets ?
- Comment apparaît la différence entre les jets des galaxies à deux lobes FR I et des FR II ?
- Comment le gaz peut-il être apporté au trou noir en quantité suffisante pour alimenter l'AGN ?
- Pourquoi les raies d'émission sont absentes des spectres des BL Lac ?
- Y a-t-il une BLR cachée dans les Seyfert 2 ou alors sont elles vraiment sans BLR ?
- Quelle est la cause de l'effet Baldwin (cf. Annexe D) ?
- Quelle est l'origine de l'énergie des ULIRGs ?
- Comment est initiée la formation des étoiles dans les galaxies "Starburst" ?

Et selon Meg URRY : Que devrions nous apprendre des AGN lors des 30 prochaines années ? [141]

  - Rétroaction et évolution conjointe Galaxies-Trous noirs
- Comment s'est faite la mise en place et la croissance du trou noir ?
- Comment peuvent se former les étoiles à proximité du trou noir ?
- Quelles sont les échelles de temps relatives à ces évolutions (trous noirs, galaxies, ...).
- Affiner le bilan énergétique des AGN et la part dans ce bilan des différentes composantes.
- Comment évolue la masse des trous noirs ?
- Meilleure estimation de la masse de la galaxie hôte.
- Taux de formation d'étoiles et des population stellaires dans le galaxies hôtes.
- Les effets environnementaux de la présence d'un AGN dans une galaxie.
  - Processus proches du trou noir et Bilan énergétique des trous noirs
- Mode de formation et principe de collimation des jets
- Evolution le long des jets (B, N, Γ)
- Principe de production des rayons cosmiques, phénomènes d'accélération des particules
- Mesures des champs magnétiques, méthode d'excitation de la couronne
- Quel est le contenu matériel des jets ?
- Quelle est la structure et la physique associée du disque d'accrétion ?

[141] "Active Galactic Nuclei; an Historical Review", Meg Urry, 2007, Yale University

D. Conclusion

La recherche des AGN reste très dynamique et prolifique. Le travail sur ces “ogres” galactiques reste un des domaines de prédilection des astronomes professionnels et mobilise de grands moyens, tant au sol que dans l’espace.

Mais si les chercheurs s’accordent globalement sur le principe du modèle unifié, chaque nouvelle découverte apporte son lot de questions et génère de nouvelles hypothèses qui peuvent être contradictoires avec les thèses établies.

C’est tout l’intérêt et la richesse de la science, mais c’est aussi ce qui en fait toute sa complexité.

Peut-être l’étude des AGN apportera-t-elle les explications attendues à l’émission de certains GRB ?

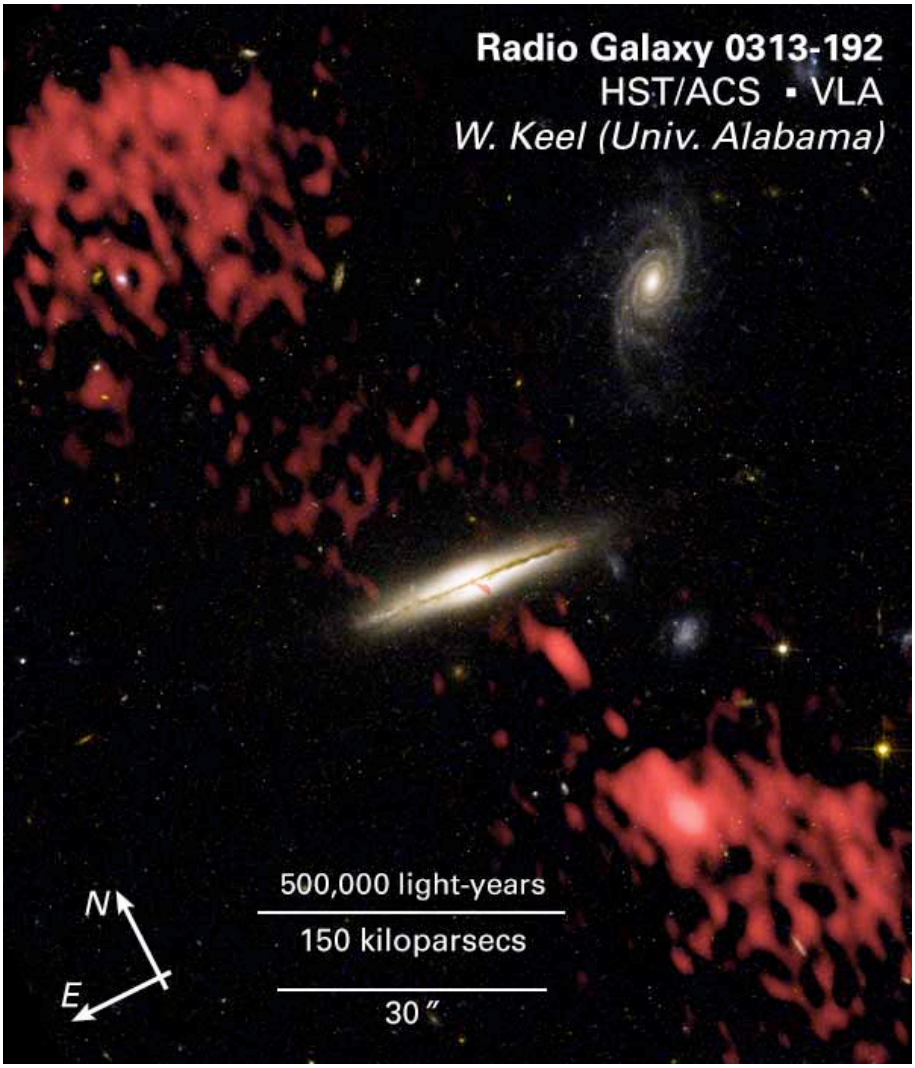
Peut-être les rayons cosmiques dévoileront-ils des phénomènes encore insoupçonnés ?

Les astronomes attendent, certainement avec impatience, l'avènement des très grands télescopes au sol, comme l’E-ELT (OWL), ALMA, SKA ou dans l’espace avec GAIA ou le NGST et pourquoi pas, l’astronomie des neutrinos, afin d’affiner leurs modèles et peut-être acquérir les données manquantes pour conclure dans les domaines de la cosmologie et de l’évolution de l’Univers et des galaxies.

En tout cas je leur souhaite bon courage !

Pour finir, je voulais préciser que j’ai pris énormément de plaisir à ce travail sur les AGN, même si la profusion des sources, la discordance des avis, associées à la complexité des traductions, m’ont embrouillé les méninges plus d’une fois et m’ont fait me demander dans quelle galère je m’étais embarqué !

Que vais-je donc pouvoir faire l’année prochaine … à par redoubler ?



Une radiosource géante, issue d'un "mauvais" type de galaxie.

"Nous avons toujours pensé que les spirales n'étaient pas le bon de type de galaxies pour initier de tels jets, mais dorénavant, nous devons remettre en cause certaines de nos idées sur l'origine des jets" - William Keel

R.A. 03h 15m 52.10s, Dec. -19° 06' 44.00", Eridanus, 300 Mpc

Image composite : HST - ACS/WFC, F555W (V), F775W (i) et VLA (Radio) - "A" Configuration, 1400-MHz (L-band), 8.4-Ghz

Bibliographie

Ouvrages et sources :

- F. Combes et al., "Astrophysique - Galaxies et cosmologie", InterEditions/Editions du CNRS, 1991
- Agnès Acker, "Astronomie, Astrophysique Introduction (4ème édition)", Dunod, 2007
- Florence Durret, Cours DUOP : "Galaxies, Amas de galaxies et Milieu interstellaire", DUECU - OBSPM, 2006-2007
- Florence Durret-Isnard : "Les Nébulosités Ionisées Etendues dans les Galaxies à Raie d'Emission" - Thèse, Université de Paris VII - 1989
- Bradley M. Peterson, "An introduction to Active Galactic Nuclei", Cambridge University Press
- Chris Kitchin, "Galaxies in turmoil, the active and starburst galaxies and the black holes that drive them", Springer, 2007
- Suzy Colin, Grazyna Stasinska, "Les quasars" Aux confins de l'univers, Science et découvertes, Le Rocher, 1987
- Collectif, "The Central Engine of Active Galactic Nuclei", ASP - Conference Series - Vol. 373, 2007
- Collectif, "Active Galactic Nuclei - from Central Engine to Host galaxy", ASP - Conferences Series, Vol. 290, 2003
- Fabrice Lamareille, "Evolution cosmologique des propriétés physiques des galaxies" - Thèse, Laboratoire d'Astrophysique de Toulouse/Tarbes UMR 5572 - Observatoire Midi-Pyrénées, 2006
- Anabela Cardoso-Gonçalves, "Etude spectroscopique des noyaux actifs de galaxies à spectre de transition", soutenance de thèse, CNRS - OHP, 1999
- Alexandre Marcowith, "Jets Relativistes Extragalactiques: Émission Haute Énergie et Théorie Cinétique" - Thèse, Université Paris 7, 1996
- Peter Barthel, "Active Galaxies and Quasistellar Objects, Interrelations of Various Types"
- Melia, Fulvio, The Edge of Infinity. Supermassive Black Holes in the Universe 2003, Cambridge University Press
- S. Jogee: The Fueling and Evolution of AGN: Internal and External Triggers, Lect. Notes Phys. 693, 143–183 (2006) Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2006
- et de nombreux articles tirés d'ArXiv et d'ads (The SAO/NASA Astrophysics Data System)

Références et citations:

- "Colossal Black Hole Shatters the Scales", SPACE.com, 2008
- "Détection du quasar le plus lointain", Observatoire des Sciences de l'Univers de Besançon, 2007
- "Landolt-Börnstein: Numerical Data and Functional Relationships in Science and Technology" - New Series Gruppe/Group 6 A&A, Volume 2, Collectif, 1982
- "Proceedings of the conference on Seyfert galaxies and related objects", University of Arizona, AJ, 73, Collectif, 1968.
- Aller L.H. et al., "Stars and Star Clusters / Sterne und Sternhaufen", A&A / Astronomie und Astrophysik
- Antonucci R. et Miller J., "Spectropolarimetry and the nature of NGC 1068", ApJ, 297, p621, 1985
- Antonucci, Robert, "Unified models for active galactic nuclei and quasars", ARAA. 31: 473-521, 1993
- Baade, W.; Minkowski, R., "Identification of the Radio Sources in Cassiopeia, Cygnus A, and Puppis A", ApJ, 119, 206, 1954
- Bahcall J., et Salpeter E., "On the Interaction of Radiation from Distant Sources with the Intervening Medium."ApJ Letters, 142, p1677, 1965
- Bahcall J. et Spitzer L., "Absorption Lines Produced by Galactic Halos", ApJ Letters, 156, L63, 1969
- Balbus, Steven A. & Hawley J.F., "A powerful local shear instability in weakly magnetized disks. I - Linear analysis", ApJ 376: 214-233, 1991
- Balbus, Steven A., "Enhanced Angular Momentum Transport in Accretion Disks", Annu. Rev. A&A 41: 555-597, 2003
- Baldwin J.A., "Luminosity Indicators in the Spectra of Quasi-Stellar Objects", ApJ, 214, 679, 1977

- Baldwin J.A., Wampler E.J., & Gaskelll C.M., ApJ., 338, 630, 1989
- Barthel, P., “Quasars and Radio Galaxies may BE Two of a Kind”, Scientific American V.260, NO.4/APR, P. 20, 1989
- Barthel P.D., “Is every quasar beamed ?”, ApJ.336:606, 1989
- Baum S.A., Zirbel E.L. & O'Dea C.P., ApJ.451:88, 1995
- Becker R.H. et al., "Evidence For Reionization at z ~ 6: Detection of a Gunn-Peterson Trough In A z=6.28 Quasar", AJ, 122: 2850-2857, 2001
- Begelman, Volonteri & Rees, “Formation of Supermassive Black Holes by Direct Collapse in Pregalactic Halos”, MNRAS, mai 2006
- Begelman M., “Did supermassive black holes form by direct collapse ?”, septembre 2007
- Begelman, Rossi & Armitage, “Quasistars: Accreting black holes inside massive envelopes”, MNRAS, avril 2008
- Belsole E., Worrall D.M. & Hardcastle M.J., MNRAS, 336:339, 2006
- Bennert N., Falcke H., Shchekinov Y., “Comparing AGN broad and narrow line regions”, Proceedings IAU Symposium No. 222, 2004
- Bergeron J., ApJ Letters, 155, L8, 1966
- Bergeron J. et Boissé P., A&A, 243, p344, 1991
- Bicknell G.V., Dopita M.A., and Quinn P.J., The First Stromlo Symposium, “The Physics of Active Galaxies”(p. 201). San Francisco: ASP Conference Series
- Binney J. & Merrifield M., “Galactic Astronomy”, Princeton University Press, 1998
- Biretta J., “HUBBLE DETECTS FASTER-THAN-LIGHT MOTION IN GALAXY M87”, Space Telecsope Science Institute, 1999
- Blades C., Turnshek D. et Norman C., “QSO Absorption Lines”, Proceedings Baltimore Meeting, Cambridge University Press, 1987.
- Blandford R. D., Znajek R. L., MNRAS, 179, 433, 1977
- Bolton, Stanley & Slee, 1949, “Positions of three discrete sources of Galactic radio frequency radiation”, Nature, Vol. 164, pp. 101.
- Bordovitsyn V.A., "Synchrotron Radiation in Astrophysics, Synchrotron Radiation Theory and Its Development”, 1999
- Boroson, 2002, “Black Hole Mass and Eddington Ratio as Drivers for the Observable Properties of Radio-loud and Radio-quiet QSOs”.ApJ, Volume 565, Issue 1, pp. 78-85
- Breus T.K., "Istoriya prioritetov sinkhrotronnoj kontseptsii v astronomii (Historical problems of the priority questions of the synchrotron concept in astrophysics)", Istoriko-Astronomicheskie Issledovaniya, Vyp. 26, p. 88 - 97, 262, 2001
- Bridle, Alan H.; Perley, Richard A., “Extragalactic Radio Jets”, ARAA, Vol 22., p. 319-358, 1984
- Brotherton M.S. & Wills B.J. (U.Texas),“The Intermediate Line Region of QSO”, ApJ, vol. 430, no. 2, pt. 1, p. 495-504, 1994
- Browne I.W.A., MNRAS.204:23b, 1983
- Burbidge E. M., Burbidge G. R. & Prendergast K. H., ApJ, 130, 26, 1959
- Burbidge G. R., ApJ, 129, 849, 1959
- Burbidge, G. R.; Burbidge, E. M.; Sandage, A. R., “Evidence for the Occurrence of Violent Events in the Nuclei of Galaxies”, Reviews of Modern Physics, vol. 35, Issue 4, pp. 947-972, 1963
- Burbidge M. et al., ApJ Letters, 144, L447, 1966
- Campbell, W. W.; Paddock, G. F., “The Spectrum and Radial Velocity of the Spiral Nebula N. G. C. 4151”, ASP, Vol. 30, No. 173, p.68, 1918
- Casse F. et Keppens R., “Magnetized Accretion-Ejection Structures: 2.5-dimensional Magnetohydrodynamic Simulations of Continuous Ideal Jet Launching from Resistive Accretion Disks“, ApJ, 591, p. 988, 2002
- Chiaberge M., Capetti A. & Celotti A., A&A.394:791, 2002
- Chiu H.Y., Physics Today, Mai 1964.

- Collin S., Huré J-M., “Size-mass-luminosity relations in AGN and the role of the accretion disc”, A&A, v.372, p.50-58, 2001
- Collin-Zahn S., présentation PowerPoint, IN2P3, Blois, 2008
- Combes F., Notice des Travaux Scientifiques, OBSPM
- Corbin M.R., “Relativistic Effects in the QSO Broad-Line Region”, The ApJ, 485:517–522, 1997
- Crenshaw et al., “Intrinsic UV Absorption and Reddening in Seyfert Galaxies”, ASP, Conference Series, Vol. 290, p. 195, 2003
- Czerny et al, “The structure and radiation spectra of illuminated accretion disks in AGN. II. Flare/spot model of X-ray variability”, A&A, v.420, p.1-16, 2004
- Dery et al., “Detection of type 2 quasars in the radio galaxies B3 0731+438 and 3C 257”, MNRAS, Volume 342 Issue 4, 2003,
- Djorgovski S.G., ApJ Letters, 299, L1, 1985
- Dunlop J. et al., Nature, 319, p564, 1986
- Fabian A.C. & Rees M.J., MNRAS.277:L55, 1995
- Fanaroff, B. L.; Riley, J. M., “The morphology of extragalactic radio sources of high and low luminosity”, MNRAS, Vol. 167, p. 31P-36P, 1974
- Fendt C., “Collimation of Astrophysical Jets: The Role of the Accretion Disk Magnetic Field Distribution“, ApJ, 651, p. 272, 2006
- Foster J.M., Wilde,B.H., Rosen P.A. et coll., “High-Energy-Density Laboratory Astrophysics Studies of Jets and Bow Shocks“, ApJ, 634, p. 77, 2005
- Garrington S., Leahy J.P. & Conway R.G., et al., Nature.331:147, 1988
- Georganopoulos M., Kazanas D., Perlman E., Stecker F., “Bulk Comptonization of the Cosmic Microwave Background by Extragalactic Jets as a Probe of their Matter Content”, ApJ , 625, 656, 2005
- Ghez A.M. et al., “High Proper-Motion Stars in the Vicinity of Sagittarius A*: Evidence for a Supermassive Black Hole at the Center of Our Galaxy”, ApJ, 509, 678-686, 1998
- Ghisellini et al., “Aborted jets and the X-ray emission of radio-quiet AGNs”, A&A, v.413, p.535-545, 2004
- Greenstein et Matthews, T., Nature, 197, p1041, 1963
- Guilbert & Rees, “'Cold' material in non-thermal sources”, MNRAS, vol. 233, July 15, 1988, p. 475-484
- Haardt et al., “A model for the X-ray and ultraviolet emission from Seyfert galaxies and galactic black holes”, ApJ, Part 2 - Letters, vol. 432, no. 2, p. L95-L99, 1994
- Hardcastle M.J., Evans D.A. & Croston J.H., MNRAS, 370:1893, 2006
- Hartmann L., “Accretion and Ejection, in Open Issues in Local Star Formation”, Astrophysics and Space Science Library, Springer, vol. 299, p. 205, 2003
- Hazard C., Mackey M. et Shimmins A., Nature, 197, p1037, 1963
- Hazard C., Nature, 314, 1985, p238
- Hazard C. et al., Nature, 322, p38, 1986
- Heckman T.M., "An optical and radio survey of the nuclei of bright galaxies - Activity in normal galactic nuclei". A&A, 87, 152–164, 1980
- Henri & Petrucci, “Anisotropic illumination of AGN's accretion disk by a non thermal source. I. General theory and application to the Newtonian geometry.”, A&A, v.326, p.87-98, 1997
- Hine R.G. & Longair M.S., MNRAS 188:111, 1979
- Ho L.C., Filippenko A.V., Sargent W.L.W., "A Search for "Dwarf" Seyfert Nuclei. III. Spectroscopic Parameters and Properties of the Host Galaxies", ApJ Supplement 112: 315–390, 1997
- Ho L.C., Filippenko A.V., Sargent W.L.W., "A Search for "Dwarf" Seyfert Nuclei. V. Demographics of Nuclear Activity in Nearby Galaxies", ApJ 487, 568–578, 1997
- Ho L.C., "SUPERMASSIVE BLACK HOLES IN GALACTIC NUCLEI: Observational Evidence and Some Astrophysical Consequences", Conference held in Calcutta, January 11-17th, 1998., p. 157

- Hubble E., "A Relation between Distance and Radial Velocity among Extra-Galactic Nebulae", Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 15, 168-173, 1929
- Jogee S., "The Fueling and Evolution of AGN: Internal and External Triggers", Lect. Notes Phys. 693, 143–183, 2006
- Johan H. Knapen, "FUELLING STARBURSTS AND AGN"
- Karas, V., Czerny, B., Abrassart, A., & Abramowicz, M. A., MNRAS, Vol. 318, Issue 2, pp. 547-560, 2000
- Kerr R.P., "Gravitational Field of a Spinning Mass as an Example of Algebraically Special Metrics", Phys. Rev. Let. 11, 237-238, 1963
- Khachikyan E.Ya., and Weedmant D.W., "A Spectroscopic Study of Luminous Galactic Nuclei", Bulletin of the American Astronomical Society, Vol. 3, p.237.
- Kogut A. et al., "First-Year Wilkinson Microwave Anisotropy Probe (WMAP) Observations: Temperature-Polarization Correlation", ApJ Supplement Series 148 (1): 161-173, 2003
- Kormendy J., "Black Hole Candidates in galactic nuclei"
- Krolik J.H., "Active Galaxies and Quasistellar Objects, Central Engine"
- Laing R.A., Jenkins C.R. & Wall J.V., et al., " Spectrophotometry of a Complete Sample of 3CR Radio Sources: Implications for Unified Models ", 1994
- Laing R.A., Nature 331:149, 1988
- Lemaître G., "Un Univers homogène de masse constante et de rayon croissant rendant compte de la vitesse radiale des nébuleuses extragalactiques", Annales de la société scientifique de Bruxelles A47, 49-59, 1927
- Lemaître G., "Expansion of the universe, A homogeneous universe of constant mass and increasing radius accounting for the radial velocity of extra-galactic nebulae", MNRAS, 91 483-490, 1931
- Longair M. in "Observational Cosmology", Ed.Maeder-Martinet et Tamman, 1978
- Lynden-Bell, D., "Galactic Nuclei as Collapsed Old Quasars", Nature, Vol. 223, p. 690, 1969
- Lynden-Bell D. & Pringle J.E., "The evolution of viscous discs and the origin of the nebular variables", MNRAS 168: 603-637, 1974
- Mainieri et al., "Sub-mm detection of a high redshift Type 2 QSO", MNRAS, 356 (2005) 1571-1575, 2004
- Malzac et al, "Anisotropic illumination in AGNs. The reflected component. Comparison to hard X-ray spectra from Seyfert Galaxies", A&A, v.336, p.807-814, 1998
- Marconi A. & Hunt L.K., ApJ.589:L21, 2003
- Marscher, et al., "The inner jet of an active galactic nucleus as revealed by a radio-to-gamma-ray outburst," Nature 452, 966-969 (2008).
- Matthews, Thomas A.; Sandage, Allan R., "Optical Identification of 3c 48, 3c 196, and 3c 286 with Stellar Objects", ApJ, vol. 138, p. 30, 1963
- Meier D,L., "GRAND UNIFICATION OF AGN AND THE ACCRETION AND SPIN PARADIGMS"
- Meier L.M., "The Theory and Simulation of Relativistic Jet Formation: Towards a Unified Model For Micro- and Macroquasars", New Astron. Rev. , 47, 667, 2003
- Monis S. et al., ApJ, 419, p524, 1993
- Morgan, W. W.; Dreiser, R. D., "Morphology of optical forms of N galaxies", ApJ, Part 1, vol. 269, p. 438, 439, 1983
- Narayan R. & Yi I., ApJ.428:L13, 1994
- Netzter H., "AGN EMISSION LINES", Advanced Course of the Swiss Society for Astrophysics and Astronomy: Active galactic nuclei, p. 57 - 160, 1990
- Nicastro, Elvis & Brickhouse, "Time-evolving Photoionization: The Thin and Compact X-ray Wind of NGC 4051", ASP Conference Series, Vol. 373, p301, 2007
- Norman M. et al., Nature, 335, p146, 1988
- Norman et al., "A Classic Type 2 QSO", The ApJ, Volume 571, Issue 1, pp. 218-225., 2002
- Oke, J. B.; Gunn, J. E., "The Distance of BL Lacertae", ApJ, vol. 189, p.L5, 1974

- Ogle P., Whysong D. & Antonucci R., ApJ.647:161, 2006
- Osterbrock D.E., ApJ, 215, 733, 1977
- Osterbrock D.E., ApJ, 249, 462, 1981
- Osterbrock, Donald E., "The nature and structure of active galactic nuclei", ApJ, vol. 404, no. 2, p. 551-562, 1993
- Osterbrock D.E., Ferland G.J., "Astrophysics of Gaseous Nebulae and Active Galactic Nuclei", 2006
- Page L. et al., "Three-Year Wilkinson Microwave Anisotropy Probe (WMAP) Observations: Polarization Analysis", ApJ Supplement Series 170 (2): 335-376, 2007
- Penrose R., "Gravitational collapse: The role of general relativity." Nuovo Cimento Rivista, Numero Speciale 1, 252-276, 1969
- Peterson B.M. et Ferland G., Nature, 324, p345, 1986
- Peterson B.M. & Horne K., "Reverberation Mapping of Active Galactic Nuclei", 2004
- Petitjean P. et Bergeron J., A&A, 231, p309, 1990
- Piconcelli et al., "The XMM-Newton view of PG quasars. I. X-ray continuum and absorption", Vol. 432, Issue 1, pp.15-30, 2005
- Popovic L. C., Mediavilla E., Bon E., Ilic D., "Contribution of the disk emission to the broad emission lines in AGN: Two-component model", A&A, vol. 423, n03, pp. 909-918, 2004
- Rees M. J., "Appearance of Relativistically Expanding Radio Sources", Nature, Vol. 211, pp. 468, 1966
- Rees M., Science, 247, p817, 1990
- Risaliti G. & Elvis, M., "A PANCHROMATIC VIEW OF AGN"
- Roy A., "ACTIVE GALAXY UNIFICATION"
- Rüdiger G. & Hollerbach R., "The Magnetic Universe: Geophysical and Astrophysical Dynamo Theory", Wiley-VCH, 2004
- Sandage A., Sky & Telescope, 21, p148, 1961
- Sandage, A., "The Existence of a Major New Constituent of the Universe: the Quasistellar Galaxies", ApJ, vol. 141, p.1560, 1965
- Sanders D.B. et al., "Continuum energy distribution of quasars - Shapes and origins", ApJ, Part 1, vol. 347, 1989
- Sanders D.B., "THE "GREAT DEBATE"- THE CASE FOR AGNs", Ap&SS, v. 266, Issue 1/2, p. 331-348, 1999
- Sausalito, "Unified models for active galactic nuclei and quasars", ARAA. 31: 473-521, 1993
- Sauty C., Tsinganos K. et Trussoni E., "On a MHD classification of AGN jets", Active Galactic Nuclei, ASP Conferences.
- Schmidt M., "3C 273 : A Star-Like Object with Large Red-Shift", Nature, Volume 197, Issue 4872, pp. 1040 (1963).
- Schmidt M. et al., ApJ, 305, p57, 1986
- Schmitt J. L., "BL Lac identified as radio source", Nature, 218, 663, 1968
- Sersic J-L., "Atlas de galaxias australes", Cordoba, Argentina: Observatorio Astronomico, 1968
- Seyfert, C. K., "Nuclear Emission in Spiral Nebulae", ApJ, 97, 28S, 1943
- Shakura N. I. & Sunyaev R.A., "Black Holes in Binary Systems. Observational Appearance", A&A 24: 337-355, 1973
- Shields A., "A BRIEF HISTORY OF AGN"
- Slipher, V. M., "The spectrum and velocity of the nebula N.G.C. 1068 (M 77)", Lowell Observatory Bulletin, vol. 1, pp.59-62, 1917
- Smette A. et al., ApJ, 389, p39, 1992
- Sparke L.S., Gallagher J.S., "Galaxies in the Universe: An Introduction", Cambridge University Press, 2007
- Ulrich M-H., "VARIABILITY OF ACTIVE GALACTIC NUCLEI"
- Urry, C. Megan; Padovani, Paolo, "Unified Schemes for Radio-Loud Active Galactic Nuclei",ASP, v.107, p.803, 1995

- Urry, C. M.; Padovani, P., “The Unification of Radio-Loud AGN”, 175th Symposium of the IAU, Kluwer Academic Publishers, p. 379, 1996
- Veilleux S., Kim D.-C., Sanders D.B., Mazzarella J.M., Soifer B.T., ""Optical Spectroscopy of Luminous Infrared Galaxies. II. Analysis of the Nuclear and Long-Slit Data"", ApJ Supplement Series 98: 171–217, 1995"
- Veilleux S., "SPECTROSCOPIC DIAGNOSTICS FOR AGNs", arXiv:astro-ph/0201118v1 8 Jan 2002
- Vermeulen R.C., Ogle P.M. & Tran H.D., et al., ApJ, 452:L5, 1995
- Véron-Cetty M-P. et Véron P., ESO Science Report No.4, 1985.
- Véron-Cetty M.P. et Woltjer L., ApJ, 236, p69, 1990
- Véron-Cetty M.P. and Véron P., “The emission line spectrum of active galactic nuclei and the unifying scheme”, A&A, 10: 81–133, 2000
- Volonteri M., Rees M.J., “Rapid Growth of High-Redshift Black Holes”, ApJ, 633, 624, 2005
- Wall J. et Peacock J., MNRAS, 216, p173, 1985
- Wallinder F.H., "TOWARDS UNDERSTANDING ACTIVE GALACTIC NUCLEI"
- Wang J., Jiang P., Zhou H., Wang T., Dong X. and Wang H., “XMM Observations of BAL Quasars with Polar Outflows”, ApJ Letters, 2008
- Weedman D., “Quasar astronomy”, op.cit., p44.
- Weizsäcker C.F., “Die Rotation Kosmischer Gasmassen”, Z. Naturforsch. 3a: 524-539, 1948
- Wilkes B.J., "SPECTRAL ENERGY DISTRIBUTIONS OF QUASARS AND AGN"
- Williams R. K., “Extracting x rays, _ rays, and relativistic e-e+ pairs from supermassive Kerr black holes using the Penrose mechanism”. Physical Review, 51(10), 5387-5427, 1995
- Williams R. K., “Collimated escaping vortical polar e-e+ jets intrinsically produced by rotating black holes and Penrose processes”. ApJ, 611, 952-963, 2004
- Wilson A.S., “The Interplay among Black Holes, Stars and ISM in Galactic Nuclei”, Proceedings IAU Symposium No. 222, 2004
- Wolf C., "EVOLUTION OF AGN - AN OPTICAL VIEW"
- Woltjer L., “Emission Nuclei in Galaxies”, ApJ, 130, 38, 1959
- Wood K.S. et al., ApJ Supplement Series, 56, p507, 1984
- Zakamska et al., “Type II quasars from the Sloan Digital Sky Survey”,Princeton University, Ph.D dissertation, Section 0181, Part 0606 225 pages, 2005
- Zel'Dovich, Ya. B.; Novikov, I. D., “Mass of Quasi-Stellar Objects”, Soviet Physics Doklady, Vol. 9, p.834, 1965

Sites web utiles et utilisés :

- http://arxiv.org/
- http://cds.u-strasbg.fr/
- http://chandra.harvard.edu/index.html
- http://cossc.gsfc.nasa.gov/docs/objects/agn/agn.html
- http://hal.archives-ouvertes.fr/index.php?action_todo=home&halsid=du9btp9sfstmati6jsnj5gkl97
- http://hosting.uaa.alaska.edu/aftar/blazar, A, A Research Newsletter Dedicated to the BL Lac and Blazar Phenomena, Editor: Travis A. Rector
- http://hubblesite.org
- http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbase/astro/astcon.html
- http://imagine.gsfc.nasa.gov/docs/science/know_l2/active_galaxies.html
- http://kurp.hut.fi/quasar/planck/qbl-en.htm
- http://nedwww.ipac.caltech.edu/level5/active_galaxies.html
- http://nedwww.ipac.caltech.edu/level5/Curran/Curran_contents.html
- http://webviz.u-strasbg.fr/viz-bin/VizieR?-source=VII/248, Catalogue du CDS : Quasars and Active Galactic Nuclei (12th Ed.) (Veron + 2006) - VII/248/vv06 avec Quasars (Mv<-23), BL Lac and AGN (Mv>-23) _ 108080 références
- http://www.astr.ua.edu/keel/agn/
- http://www.astro.ulg.ac.be/themes/dataproc/deconv/quasar/quasar_f.html
- http://www.astronomy.ohio-state.edu/-agnwatch/index.html
- http://www.astrosurf.org/luxorion/index.htm
- http://www.atnf.csiro.au/pasa/14_3/dopita/paper/
- http://www.cosmologie.fr/
- http://www.iap.fr/ActivitesScientifiques/RapportActivite/Cosmologie/3.html
- http://www.jb.man.ac.uk/-AGNews, Active Galaxies Newsletter, An electronic publication dedicated to the observations and theory of active galaxies, Edited by Rob Beswick
- http://www.metsahovi.fi/en/quasar/
- http://www.nasa.gov/topics/universe/index.html
- http://www.oato.inaf.it/blazars/
- http://www.obspm.fr/actual
- http://www.universetoday.com/2008/04/23/magnetic-fields-shape-the-jets-pouring-out-of-supermassive-black-holes/

- et tous les autres ...

ANNEXES

A. Quelques Astronomes qui ont contribué à la découverte des AGN

Carl K. SEYFERT

Découvrit les premières galaxies à noyau actif (1943)

Astronome Américain, Carl Keenan SEYFERT (1911 - 1960) publia plusieurs articles dans la littérature astronomique, sur une vaste gamme de sujets, des étoiles aux galaxies, des méthodes d'observations à l'instrumentation. En 1943, il publie un article sur des galaxies possédant un noyau brillant et qui émettent de la lumière dont le spectre présente des raies d'émission notablement élargies [142]. Le prototype est la galaxie Messier 77 (NGC 1068). C'est cette classe de galaxies qui est aujourd'hui appelées galaxies de Seyfert, en son honneur.

Maarten SCHMIDT

Trouva z(3C 273) = 0,158 et les dénomma "quasi-stellar radiosources" (1963)

Maarten SCHMIDT travailla, au départ, sur des théories de distribution de masse et sur la dynamique des galaxies. Il étudia ensuite la contrepartie lumineuse des sources radio. En 1963, avec J.B. OKE, grâce au fameux 5 m du Mont Palomar, Il identifia l'objet correspondant à une de ces radiosources - 3C 273 - et étudia son spectre. Alors que son apparence stellaire suggérait que 3C 273 était relativement proche, le spectre de 3C 273 présentait un très grand redshift de 0,158, démontrant qu'il était bien au-delà de notre propre galaxie et possédait une extraordinaire luminosité. Schmidt appela 3C 273 un objet quasi-stellaire (quasi-stellar object) ou quasar [143] .

Lodewijk WOLTJER

Il fit les premières hypothèses physiques sur les AGN (1959)

Lodewijk WOLTJER est un astronome Néerlandais. Fils de l'astronome Jan Woltjer qui eut pour étudiant Gérard P. Kuiper. Il a été directeur général de l'ESO (European Southern Observatory) de 1975 à 1987.

Allan R. SANDAGE

Contre-partie optique de 3C 48 (1963) et Galaxies quasi-stellaire (1965)

Astronome américain, Allan Rex SANDAGE publia, en 1958, la première estimation précise de la constante de Hubble, soit 75 km.s^{-1}.Mpc^{-1}, proche de la valeur acceptée actuellement. Il réalisa des études spectrales d'amas globulaires, et déduisit qu'ils étaient âgés d'au moins 25 milliards d'années ! Il est très célèbre pour la découverte de jets s'échappant du noyau de M82. Les observations montrent que les éruptions se sont produites durant au moins 1,5 million d'années.

---

[142] Nuclear Emission in Spiral Nebulae., Astrophysical Journal, vol. 97, p.28

[143] il y a controverse à ce sujet et la paternité du terme 'quasar' est attribuée à H.-Y. Chiu cf. note [21]

Iakov ZEL'DOVICH et Igor NOVIKOV

Ils ont proposé l'hypothèse d'un trou noir massif central (1964). Effet Sunyaev-Zel'dovich.

En 1965, Iakov Borissovitch Zel'dovich (1914 - 1987), physicien prolifique et éclectique, travaille sur les théories d'évolution de l'univers, les propriétés du fond diffus cosmologique, la structure de l'univers à grande échelle et les trous noirs. Il prédit avec Rashid Sunyaev que le fond diffus doit être soumis à l'Compton inverse (cf. Annexe D).

Igor Dmitriyevich Novikov est un théoricien en astrophysique et cosmologie et fut un disciple de Yakov B. Zel'dovich. Depuis 1994, il est directeur centre d'astrophysique théorique (TAC) de l'université de Copenhague dont il est également professeur d'astrophysique à l'observatoire.

John Leigh SCHMITT

Les BL Lacertae sont des radiosources (1968)

Citation [144]**:**

"Je voulais attirer votre attention sur le fait que de nouvelles coordonnées (α1950=22h00m38.9s±0.7s, ∂1950=+42°02'09"±9") et une identification optique de la source radio VRO 42.22.01, déterminées à l'aide du télescope de 3m50 de l'observatoire radio Algonquin font coïncider cette source avec l'étoile variable irrégulière BL Lac. BL Lac fluctue de la 13eme à la 16eme magnitude en quelques jours. La position de cette variable sur la carte de Semakin semble être légèrement erronée. L' examen de copies des plaques de la National Geographic Society et du relevé du Mont Palomar (Palomar Observatory Sky Survey) à l'observatoir Dunlap dévoile une nébulosité marginale autour de l'étoile. Les propriétés optiques de cet objet, combinées avec la polarisation radio et un spectre micro-onde inhabituel, le rendent particulièrement intéressant."

Donald LYNDEN-BELL

Les noyaux des AGN seraient des trous noirs supermassifs (1969)

Astronome britannique, Donald LYNDEN-BELL montre, en 1969, comment l'énergie des quasars peut être fournie par un trou noir supermassif accrétant de la matière. En estimant le nombre de quasars inactifs (galaxies non actives) il déduit que la plupart des galaxies massives doivent posséder un trou noir central [145]. Donald Lynden-Bell est membre du groupe d'astronome connu sous le nom des "sept samouraïs" qui ont postulé l'existence du grand attracteur, une anomalie gravitationnelle qui se situe dans la direction de l'Hydre et du Centaure à une distance de 150 à 250 millions d'années-lumière.

[144] Schmitt, J. L., Nature, Vol. 218, pp. 663.

[145] Galactic Nuclei as Collapsed Old Quasars, Nature, Vol. 223, p. 690

Daniel W. WEEDMAN

Sous classification des galaxies de Seyfert (1970)

Daniel Wilson WEEDMAN, par l'étude de nouveaux échantillons spectraux, propose l'établissement des deux sous-classes (type 1 et type 2) des galaxies de Seyfert, liées à la différence de largeur des raies d'émission. Il mit au point avec Ramsey le concept du télescope Hobby-Eberly [146] en 1983 qu'on retrouve aujourd'hui à l'Université du Texas (Mc Donald observatory) et au SALT (Sud-africain).

Bernie L. FANAROFF et Julia M. RILEY

Première classification morphologique des radiogalaxies (1974)

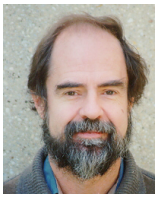
Bernie Lewis FANAROFF, astronome Sud-africain a étudié la physique théorique à l'Université de Witwatersrand et fit un PhD en radioastronomie à Cambridge, au Cavendish Laboratory. Il n'a travaillé comme astronome que durant 2 ans avant de s'engager dans le syndicalisme Sud-africain puis pendant 19 ans il fut secrétaire national de l'industrie métallurgique Sud-africaine. Fortement engagé contre l'apartheid et la répression, il a également côtoyé Nelson Mandela. Depuis 2003, il est directeur de projet pour SKA et travaille à la construction de KAT.

En 1974 avec Bernie L. FANAROFF, Julia Margaret RILEY écrit un article célèbre[147], classant les radiogalaxies en 2 types, basés sur leur morphologie. Elles devinrent connues comme radiogalaxies Fanaroff-Riley de type I et de type II (FRI et FRII). Dans les radiogalaxies FRI, la majeure partie de l'émission radio provient d'une zone proche du centre de la source, alors que pour les FRII, la principale source d'émission est issue de 'points chauds' éloignés du centre de la galaxie, de part et d'autres des lobes radio.

John B. OKE et James E. GUNN

z(BL Lac) = 0,07 (1974) [148]

John Beverly OKE (1928-2004), Canadien, fut professeur d'astronomie. Il obtint son doctorat à l'université de Princeton en 1953 et co-signa l'article de 1963 sur le redshift de 3C 273 et son aspect, avec Maarten Schmidt. Il fut membre du Caltech et de l'observatoire Hale (Mount Wilson and Palomar) dont il fut directeur associé de 1970 à 1978. Il est peut-être plus connu pour avoir développé et construit des instruments uniques pour le télescope Hale de 5m du Mont Palomar et plus tard pour le Keck.



Les premiers travaux théoriques de James Edward GUNN aidèrent à la compréhension actuelle de la manière dont les galaxies se forment, et à déterminer les propriétés de l'espace intergalactique.

Il proposa, également, d'importants tests observationnels pour confirmer la présence de matière noire dans les galaxies et il prédit l'existence d'une lacune dite de Gunn-Peterson (cf. Annexe D) dans le spectre des quasars distants.

---

[146] Le télescope est fixe en hauteur (55°) et mobile en azimut. Il peut observer des objets pendant une durée de 1 à 2 heures à l'aide d'un système de poursuite situé au foyer. Ce système suit l'objet à travers la pupille, compensant la rotation de la Terre.

[147] The morphology of extragalactic radio sources of high and low luminosity, Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, Vol. 167, p. 31P-36P (1974)

[148] The Distance of BL Lacertae, Astrophysical Journal, vol. 189, p.L5

Donald E. OSTERBROCK

Classification et sous classification des Seyfert (1.5, 1.8 et 1.9)[149]

Donald Edward OSTERBROCK (1924-2007) astronome Américain fut professeur d'astronomie et d'astrophysique à l'université Madison puis à celle de Californie (Santa Cruz). Dirigea l'observatoire Lick jusqu'en 1981. Il a écrit en 1989 un livre référence : Gaseous Nebulae and Active Galactic Nuclei, récemment mis à jour avec Gary Ferland.

Timothy M. HECKMAN

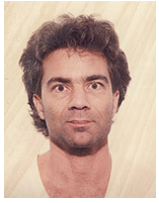
Les LINER (1980) [150]

Timothy HECKMAN est professeur dans le département de Physique et d'astronomie à l'Université John Hopkins. Ses domaines de recherches sont les LINERs, les galaxies à noyaux actifs et les quasars.

Peter D. BARTHEL

Premier modèle unifié, BLR et NLR (1989)

Peter D. BARTHEL est professeur au Kapteyn Astronomical Institute, Groningen, Pays-bas. Il fut le premier à évoquer un modèle unifié d'AGN en proposant que l'angle sous lequel était vu l'AGN déterminait sa classe [151].



Robert R. ANTONUCCI et Joseph S. MILLER

Modèle unifié, Quasars et Radiogalaxies (1993) [152]

Robert R. ANTONUCCI est professeur de physique à l'université de Santa Barbara. Selon l'ISI (Essential Science Indicators) Web Product, en avril 2003, son article de 1993 est classé au 8° rang des publications en astrophysique sur la dernière décennie, cité 727 fois.

Joseph S. MILLER est professeur d'astronomie et d'astrophysique. Il a dirigé pendant 14 ans l'observatoire Lick. Joseph Miller concentre actuellement ses recherches sur les objets extra-galactiques qui déploient une activité à haute luminosité, y compris les QSO, les BL Lacertae et les AGN. Son but est de trouver la nature des sources centrales, elles-mêmes, ainsi que de leur environnement.

---

[149] Osterbrock, D.E. 1977, Ap. J., 215, 733. et Osterbrock, D.E. 1981. Ap. J., 249, 462.

[150] An optical and radio survey of the nuclei of bright galaxies - Activity in normal galactic nuclei, Astronomy and Astrophysics, vol. 87, no. 1-2, July 1980, p. 152-164

[151] Quasars and Radio Galaxies may BE Two of a Kind, Scientific American V.260, NO.4/APR, P. 20, 1989

[152] "Unified models for active galactic nuclei and quasars", Annu. Rev. Astron. Astrophys. 31: 473-521, 1993

C. Megan URRY et Paolo PADOVANI

Modèle unifié, Quasars et Radiogalaxies (circa 1995) [153][154]

Megan URRY est professeur de physique et d'astronomie à Yale. Directrice du Yale Center for Astronomy and Astrophysics. A publié avec P. Padovani de nombreux articles sur le modèle unifié.

Paolo PADOVANI, astronomeItalien, travaille à l'ESO (Garching, Allemagne). Il dirige le Virtual Observatory Systems Department. A publié avec M. Urry de nombreux articles sur le modèle unifié.

Hagai NETZER

Formation and evolution of massive black holes at redshift 1-3

Hagai NETZER est un astronome Israélien. Ces recherches incluent les quasars et les AGN, les galaxies à flambées d'étoiles et les trous noirs massifs. Netzer est un des principaux chercheurs de l'expérience spatiale Iraélienne TAUVEX (Tel Aviv University UltraViolet Explorer) lancée en 2006. Il a publié plus de 150 articles dans des journaux scientifiques et est l'auteur de plusieurs livres dont Active Galactic Nuclei (en 1990 avec Blandford et Woltjer). Un projet de surveillance photométrique et spectroscopique des AGN est en cours, se basant sur 30 années de données d'observations.

Suzy COLLIN

Alternative au modèle de disque d'accrétion standard du modèle unifié (2001) [155]

Suzy COLLIN est astrophysicienne au LUTH à l'Observatoire de Paris-Meudon et Directeur de Recherches au CNRS. Elle s'intéresse aux quasars depuis leur découverte. Sa thèse, soutenue en 1968, a porté sur ce sujet. Auteur de nombreux articles de vulgarisation, elle a publié, en collaboration avec Grazina Stazinka, "Aux Confins de l'Univers, les Quasars."

Bradley M. PETERSON

Technique de "Reverberation mapping"

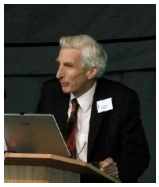
Bradley M. PETERSON est Professeur et tient la chaire d'astronomy à Ohio State University. Très grand vulgarisateur, c'est intéressé à tous les aspects inhérents aux AGN.

---

[153] Unified Schemes for Radio-Loud Active Galactic Nuclei,Astronomical Society of the Pacific, v.107, p.803

[154] The Unification of Radio-Loud AGN, 175th Symposium of the International Astronomical Union, Kluwer Academic Publishers, p. 379

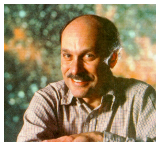
[155] Collin S., Huré J-M., 2001, Astronomy & Astrophysics, astro-ph/0103303.



Martin J. REES

Distribution des quasars

Martin John REES, Baron REES de Ludlow, est un cosmologiste et astrophyscien Anglais. Il est devenu président de la Royal Society en décembre 2005. Il a publié plus de 500 articles et fait d'importantes contributions sur l'origine du fond diffus cosmologique et la distribution et la formation des amas de galaxies. Son étude de la distribution des quasars est un argument fort contre la théorie de la création continue. Il fût aussi un des premiers à proposer les trous noirs supermassifs comme source d'énergie des quasars. Rees a eu Roger Blandford en doctorant.



Mitchell C. BEGELMAN

Mitchell C. BEGELMAN est professeur au département d'astrophysique et de sciences planétaires à l'université de Boulder, Colorado.

Roger D. BLANDFORD

Processus Blandford-Znajek [156]

Roger BLANDFORD est astronome et astrophysicien. Il est professeur à Stanford. Il est connu dans la communauté astrophysique pour sa proposition du processus de Blandford-Znajek, modèle d'extraction de l'énergie d'un trou noir.

Alexei V. FILIPPENKO

Alexei V. FILIPPENKO. travaille sur les supernovae, les AGN, les trous noirs, les GRB, et l'expansion de l'Univers.

Citation : " Je suis impliqué dans la détermination des propriétés physique des quasars et des AGN. Le rayonnement émis par un quasar ionisent des nuages de gaz et les raies d'émission résultantes apportent des preuves sur la structure et la nature du moteur central. je suis féru de galaxies normales, proches dont les noyaux ont une activité similaire (mais plus faible) que celle des AGN ; au moins quelque uns de ces objets ont dû être des quasars lumineux par le passé, mais ils n'accrètent plus aujourd'hui que peu de gaz. Je fais partie d'une équipe cherchant les trous noirs supermassifs dans les noyaux de galaxies proches, certains devant être des résidus de quasars éteints."

Sans oublier tous ceux cités en références ou dans les sources d'information. Lesquels, s'il avait fallu faire un développement équivalent, auraient pu constituer l'unique objet de ce mémoire !

---

[156] Mécanisme de Blandford-Znajek
Mécanisme théorique proposé par Blandford et Znajek pour expliquer les jets radios associés aux noyaux actifs de galaxies et surtout l'énergie prodigieuse rayonnée par les quasars. Un disque d'accrétion couplé à un trou noir en rotation y provoque l'apparition de courants électriques et de champs magnétiques, à cause des frottements du gaz chutant sur le trou noir central en rotation, dit trou noir de Kerr (cf. Annexe D). Par un processus similaire à une dynamo, l'énergie de rotation du trou noir peut donc ainsi en être extraite.

B. Les AGN vus par les Amateurs

Résolution angulaire de quelques objets

Objet	distance	résolution
galaxies proches	3 à 4 Mpc	1" = 15 à 20 pc
Amas de la Vierge, AGN	15 à 20 Mpc	1" = 75 à 100 pc 10^{-3}" = 0,7 pc
Cygnus A	225 Mpc	1" = 1,1 kpc
AGN lointains	0,5 < z < 2	10^{-3}" = 5 à 7 pc
galaxies lointaines	z = 2	1" = 7 kpc

Observations

Bien que situés à plus d'un milliard d'années-lumière, certains des milliers d'AGN connus sont visibles dans de "petits" instruments comme 3C296, 3C228 (Abel 2199), 3C274 Virgo A, Cygnus A, Centaurus A qui ne dépassent pas la 14ème magnitude. Ils peuvent même être plus accessibles que certaines galaxies.

Même s'il ne s'agit pas de découvrir les plus lointains quasars et AGN, le monde des galaxies à noyau actif est accessible aux amateurs à partir de télescopes de 150 à 200 mm de diamètre. Les diamètres de 300 à 400 mm sont même devenus très fréquent. Visuellement, rien ne sera remarquable, dans la mesure où les magnitudes visuelles atteintes restent limités (m_v ~ 14 pour ∅=400 mm), mais une galaxie comme M87 ou un blazar comme BL Lac sont accessibles à de tels instruments et les amateurs ont même contribué à l'étude de la variabilité de BL Lac.

Deux AGN accessibles aux amateurs, évidemment sous un aspect très différent.

A gauche M87 et son jet caractéristique photographié par Hubble. A droite une image de NGC 5128 (Centaurus A) prise par le télescope infrarouge Spitzer (ex SIRTF) en 2004. Elle révéle une galaxie spirale tombant sur la galaxie elliptique au centre de laquelle se trouverait un trou noir supermassif.

Dès qu'on dispose d'un capteur électronique, l'univers s'agrandit d'un coup comme vous pourrez le constater sur les quelques images qui suivent. Certes, ce n'est pas le HST, mais les quasars et AGN, même "lointains" se dévoilent grâce aux capteurs CCD.

- **M87 (m_v = 9.6, dim angulaire : 8.7' x 6.6') et jet de particules**

- Mewlon 300mm/F 9,1, ST8 (1530 x 1020, pixels de 9 µm), binning 1x1, image en fausse couleur ($V_{\lambda 530nm}$, $B_{\lambda 450nm}$, $Blue_{\lambda 430nm}$), jet non discernable dans le R ou l'IR.
- 4 poses de 300s par filtre, traitement, calibration, registration MaximDL et cosmétique Photoshop

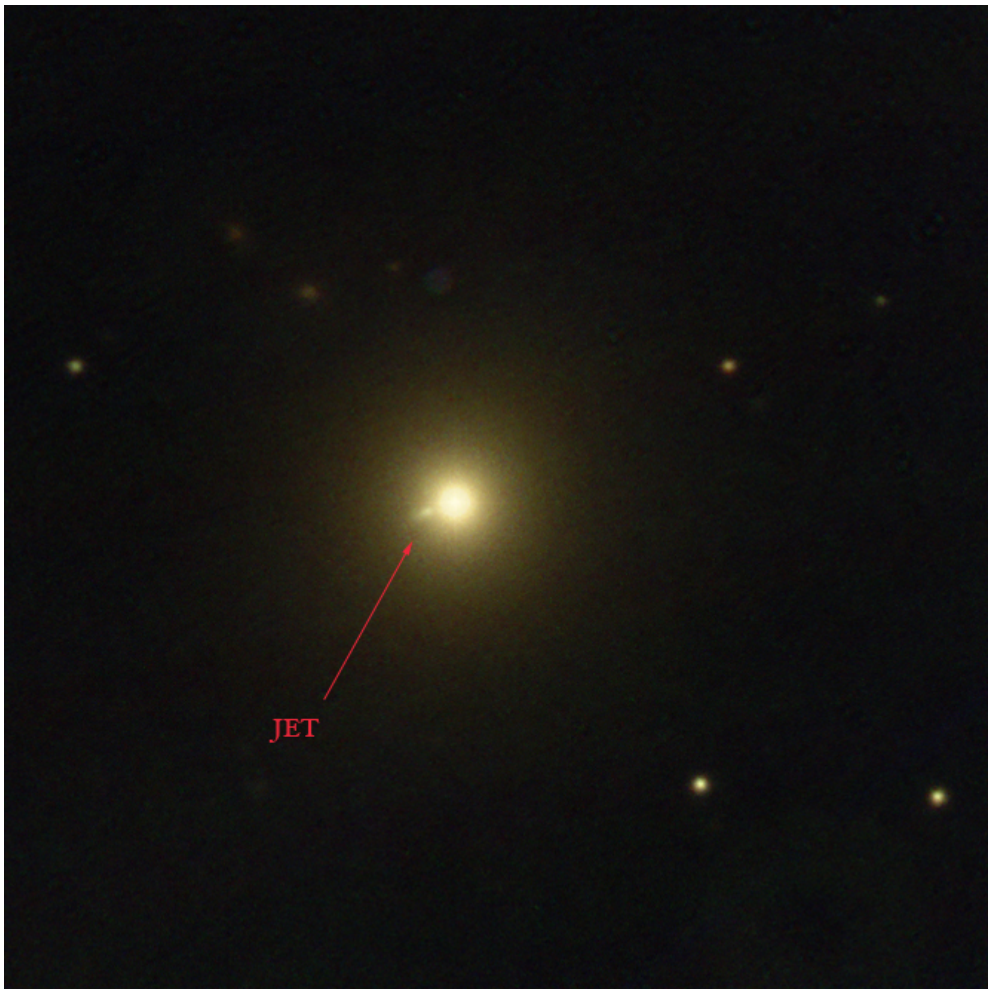


Image Didier GILBERT, mars 2008, NMSkies

L'image du HST reste plus spectaculaire, mais le jet émanant du noyau de M87 est discernable sur cette image.

Selon la résolution théorique du télescope utilisé (0,68"/px), la mesure du jet(du bord visible au centre de M87) nous donne 28 pixels.

*Sachant que M87 est située à 50 millions d'a.l. (soit 15,3 Mpc), sachant qu'à 15 Mpc, 1" = 75 pc, alors le jet mesuré a une extension de 28 px * 0,68 "/px = 19", 19" * 75 pc/" = 1425 pc, soit 4650 a.l. Le site du STScI fournit une valeur du jet de M87 de 5000 a.l., assez proche de la valeur estimée sur mon image.*

- **BL Lac SDSS J11418+0219 (Vir), m_v = 18.98, M_{abs} = -28.8, z = 3.598** [157]

- Mewlon 300mm/F 9,1, ST8 (1530 x 1020, pixels de 9 µm), poses monochromatiques avec filtre $R_{\lambda 658nm}$)
- Détails : 2 poses 600s + 2 poses 300s, binning 1x1, traitement, calibration, registration MaximDL, cosmétique sous Photoshop.

J'ai voulu

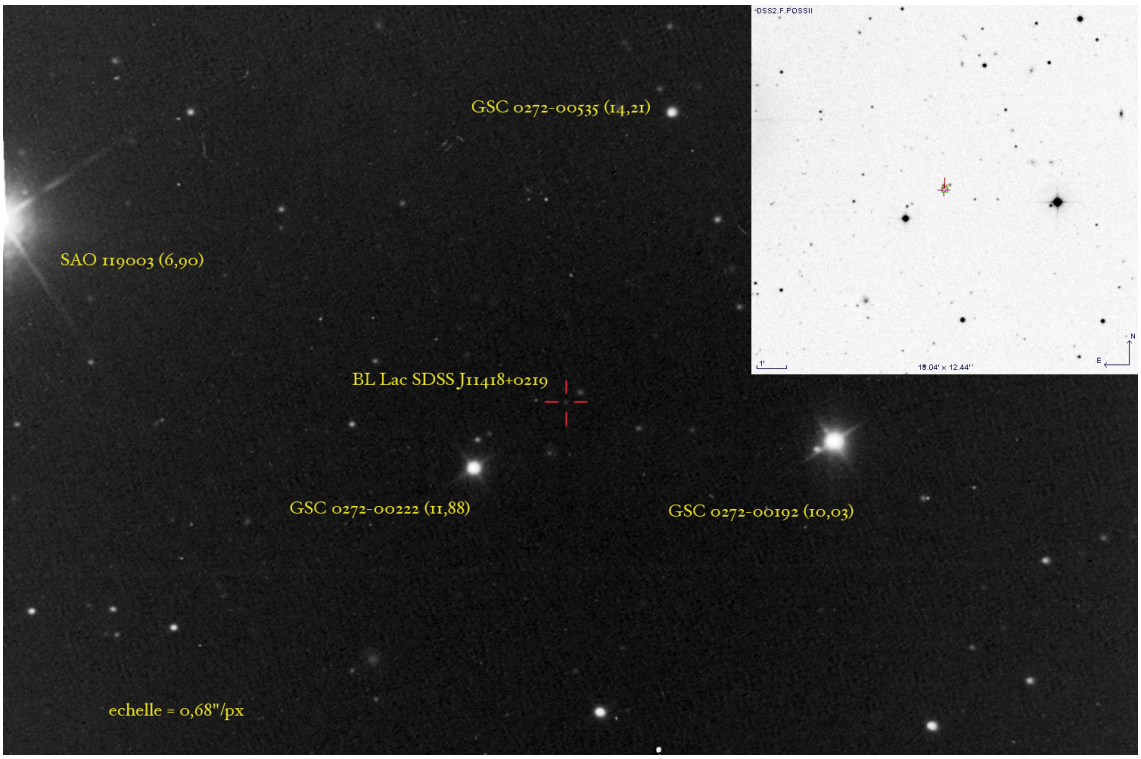


Image Didier GILBERT, mars 2008, NMSkies. Champ d'-20', résolution théorique 0,68"/px. Entre (), les magnitudes de quelques étoiles du champ et champ comparatif de DSS2 (source Aladin, CDS, 2008).*

connaître la distance à laquelle ce trouvait ce blazar, avec la distance de Hubble donnée par :

$$D = \frac{v}{H_0} = \frac{\beta_c}{H_0} = \left[\frac{(z+1)^2 - 1}{(z+1)^2 + 1}\right].\frac{c}{H_0}$$

Si le décalage d'une raie , nous donne z = 3.598, alors v/c ~ 0,91, soit v ~ 272700 km.s^{-1}. La formule donne D = 3787,67 Mpc, soit 12347 M.a.l., soit 12, 3 G.a.l., pour H_0=73 km.s^{-1}.Mpc^{-1}.

Mais en aucun cas il ne faut traduire ce décalage en termes de vitesse car il s'agit d'une vitesse apparente due à l'expansion de l'univers. Les quasars, quel que soit leur décalage, sont en fait, comme notre galaxie et à quelques centaines de km.s^{-1} près, au repos par rapport à un référentiel lié au rayonnement micro-onde fossile à 2.7 K.

Selon le cours de David Valls-Gabaud (Cosmologie DUOP 2007/2008) il faut plutôt parler de distance de luminosité d_L où :

$$d_L = \frac{c}{H_0 \Omega_M^2}.2\left[2 - \Omega_M(1-z) - (2-\Omega_M)\sqrt{1+\Omega_M z}\right]$$ [158]

[157] Selon le catalogue Quasars and Active Galactic Nuclei 12th Ed. (Veron+2006)

[158] Peebles, "Principles of physical cosmology", Princeton Univ. Press, 1993

avec Ω_M = 0,27 et H_0=73 km.s^{-1}.Mpc^{-1}, alors d_L = (c/72*0.27)*2*[2-0,27(1-3,598)-(2-0,27)√1+0,27*3,598],

et d_L = 31115 Mpc, soit 101437 Ma.l., soit 101 Ga.l. ! Alors que la valeur précédente (d_{LT}) obtenue est de 3735 Mpc, soit 12,17 milliards d'a-l.

Devant la difficulté d'appréhension de toutes ces notions de distance, et à l'aide d'un programme informatique [159] permettant de calculer les distances cosmologiques, j'ai obtenu les valeurs suivantes :

Cassiopee: Memoire - Les AGN didier$ cc cosmodis.c -lm -o cosmodis

Cassiopee:Memoire - Les AGN didier$ ./cosmodis

Enter Redshift: 3,598

For Redshift 3.000, (Ho=72.0km/s/Mpc, Omega_M=0.27, Omega_L=0.73):

---

* Age of the universe now = 13.476 Gyr

* Age of the universe then = 2.159269 Gyr

* Comoving horizon of the universe now = 45.947 Gyr

* Comoving horizon of the universe then = 11.487 Gyr

* Comoving distance of the source now = 20.779 Gly

* Comoving distance of the source then = 5.195 Gly

* Angular Diameter distance = 5.195 Gly

* Luminosity distance = 83.118 Gly

* Light Travel Time Distance = 11.317 Gly

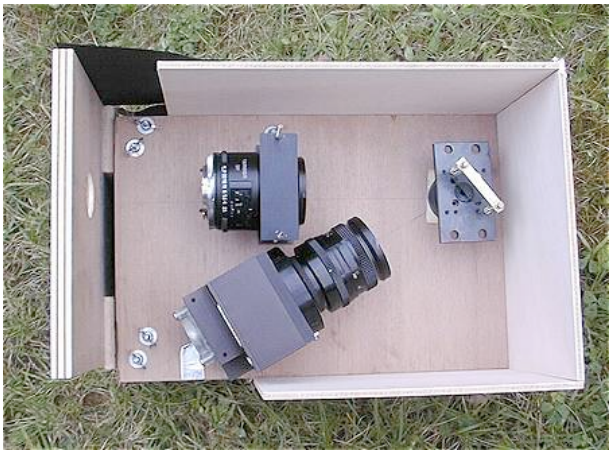
Cassiopee:Memoire - Les AGN didier$

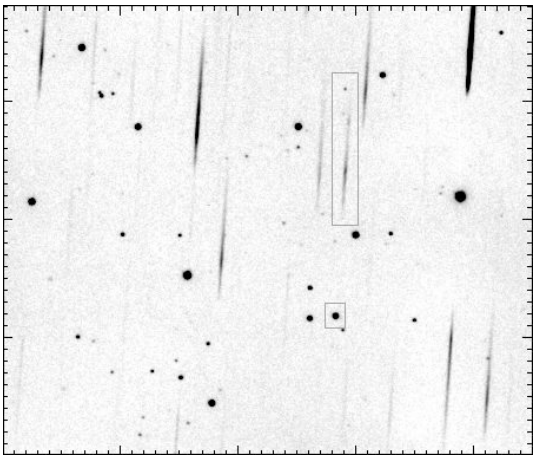
Mais d'autres amateurs sont beaucoup plus prolifiques et rivalisent d'ingéniosité.

Je n'en citerai que quelques-uns :

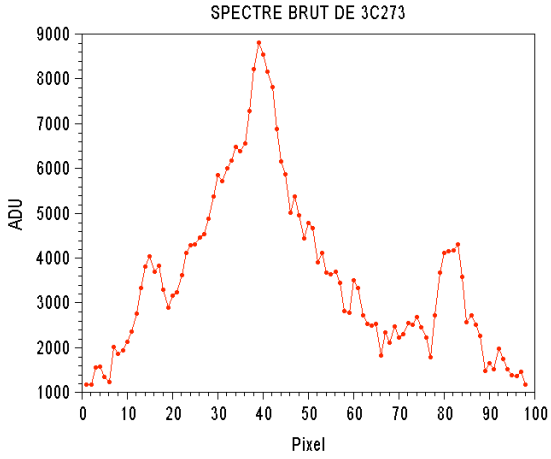
[159] cosmodis - A Cosmological Distances Program - version 1.1 by Richard Powell - http://www.atlasoftheuniverse.com/ ou David Hogg, Distance Measures in Cosmology, (2000).

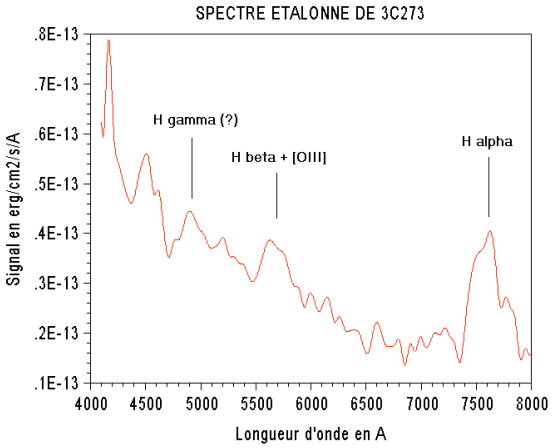
- **Christian Buil** [160]





Spectrographe moyenne résolution (R=3000) réalisation personnelle de l'auteur.	*3C273 a été entouré par un carré. Son spectre est visible en haut, lui-même entouré d'un rectangle. Le nord est en bas.*





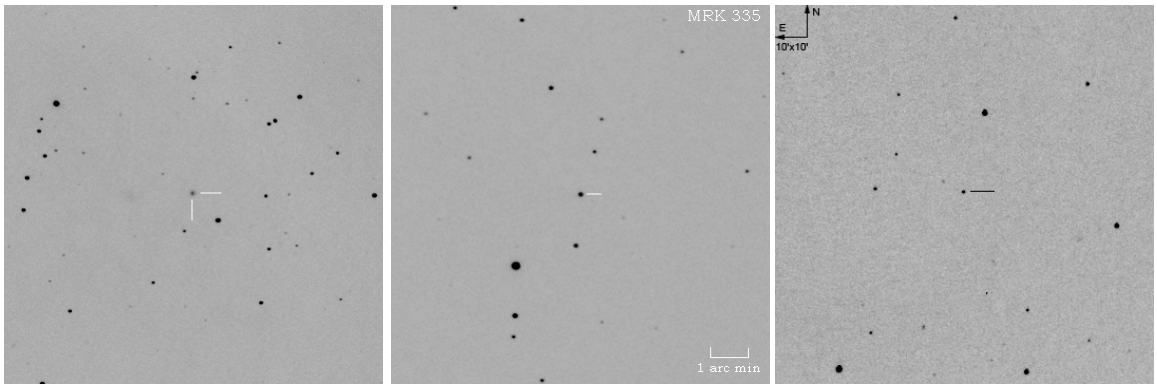
Le profil spectral de 3C273 après intégration de son signal significatif par une opération de binning. Le fond de ciel a été retiré.	*Le spectre étalonné spectralement et photométriquement de 3C273 (référence Vega, α Lyr). 3C273 est 10^5 fois plus faible que l'étoile Véga.*

Bien évidement malgré ses efforts, ses mesures ne pourront jamais concurrencer les spectres obtenus sur les plus gros instruments professionnels, mais son attitude est une incitation à aborder d'autres aspects de l'astronomie que la simple contemplation.

[160] sources : Christian Buil, 1999 - http://www.astrosurf.com/buil/quasar.htm

- **François Teyssier** [161]

Cet amateur a mis en ligne un atlas photographique d'AGN accessibles aux amateurs dès lors qu'il dispose du matériel adéquat et d'une caméra CCD. Son site web présente une multitude de prises de vues commentées avec matériel utilisé et temps de poses.

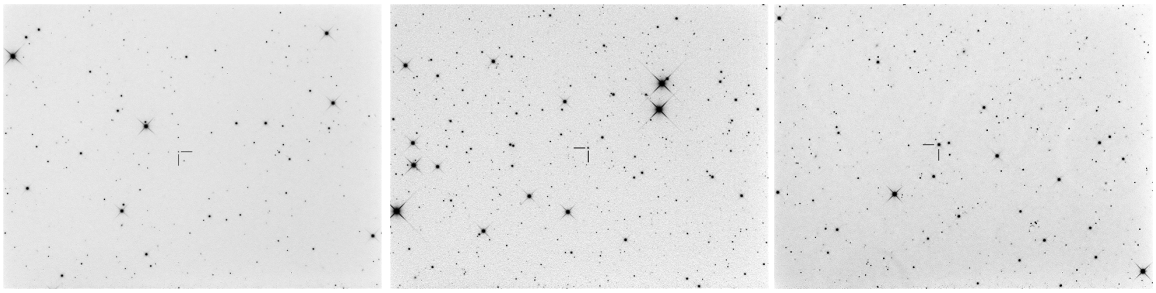


Zwi 0120+34b	*mrk 335b*	*phl 658*
matériel utilisé: télescope Schmidt-Cassegrain LX200 10" à F/D 6,3, CCD Starlight SXV-H9, binning 2x2, filtre V.		

Il a ainsi extrait les quasars et AGN plus brillants que $m_v > 18$, ce qui représente 5096 sources ! Dont 59 pour les seuls AGN accessibles en visuel ($m_v > 14,5$).

- **Anthony Ayiomamitis** [162]

Travail assez considérable réalisé par cet amateur Grec qui a également publié sur le web les résultats de prises de vue avec sa lunette et une CCD.



PKS 1354+19	*PG 1634+706*	*3C 273*
matériel utilisé : lunette AP160 EDFS à F/D 7,5, CCD ST2000 XM, binning 1x1, filtre L		

[161] source : François Teyssier, http://www.astronomie-amateur.fr/index.htm

[162] source : Anthony Ayiomamitis, http://www.perseus.gr/Astro-DSO-Quasars.htm

C. Quelques Rappels

- **Données solaires**

  $M_\odot$: 10^{33} Kg

  $R_\odot$: 6,9599 10^8m

  $L_\odot$: 10^{33} erg.s^{-1}

  D_{moy} Terre-Soleil : 1 UA = 1,495 10^{11}m

  $\vec{B}_{\odot\ polaire}$: 1 Gauss

  $\vec{B}_{\odot\ taches}$: 300 Gauss

  $m_{v\odot}$: - 26,3

  $M_{v\odot}$: + 4,83 et $M_{B\odot}$: + 5,48

  $M_{bol\odot}$: + 4,75

  Type spectral : G2 V

- **Données des galaxies**

  m_{gal} : 1,8 10^{11} $M_\odot$

  D_{gal} : 23 kpc

  M_v : - 20,5

  L_{gal} (selon les longueurs d'ondes) :

  Radio : 3 10^{38} erg.s^{-1}

  Infrarouge : 3 10^{41} erg.s^{-1}

  Optique : 3 10^{43} erg.s^{-1}

  Rayons X : 10^{39} à 10^{40} erg.s^{-1}

  Rayons γ (> 100MeV) : 5 10^{38} erg.s^{-1}

  Type (Hubble, vdB) : Sb(-Sb$^+$)I-II , Type (de Vaucouleur) : SAB(rs)bc II

- **Constante de Hubble (2006)**

  selon les mesures de WMAP en 2003 : 71 ± 4 km.s^{-1}.Mpc^{-1}

  selon les mesures de CHANDRA en 2006 : 77 ± 15% km.s^{-1}.Mpc^{-1}

  on s'accorde aujourd'hui à une valeur moyenne de : 72 ± 10% km.s^{-1}.Mpc^{-1}

- **Vitesse de la lumière**

  c = 299 792 458 $m.s^{-1}$

  Parsec

  Le parsec (pc) est défini comme étant la distance à laquelle une unité astronomique (ua) sous-tend un angle d'une seconde d'arc. On utilise souvent des multiples du parsec, kpc et Mpc. Un parsec vaut $3{,}085\ 677 \times 10^{16}$ m, soit environ 3,261 564 années-lumière (206 264,8062 UA).

- **Magnitude apparente**

  La magnitude apparente mesure la luminosité, depuis la Terre, d'un autre objet céleste, normalisé à la luminosité qu'il aurait en absence d'atmosphère. La magnitude apparente m est le résultat de la différence entre la magnitude observée (m_{obs}) et A, l'absorption interstellaire (rougissement de l'objet observé) $m = m_{obs} - A$

  $m_x = -2{,}5 \log_{10} (F_x) + C = -2{,}5 \log_{10} [L(d/10)^{-2}] + C$

  F_x est le flux reçu dans la bande x, L la luminosité, d la distance en parsec et ramené par convention à 10 pc, C est une constante qui dépend de l'unité de Flux et de la bande observée. C a été définie par Aller et al. 1982 [163].

- **Magnitude absolue**

  La magnitude absolue d'un objet est la magnitude que verrait un observateur situé à une distance de 10 pc.

  $M = -2{,}5 \log L + C$

  La comparaison de la magnitude apparente et de la magnitude absolue permet une estimation de la distance de l'objet selon :

  $m - M = 5 \log D_{pc} - 5 + A$ ($M = m$ pour $D_{pc} = 10$ pc, A=absorption interstellaire, $m - M = \mu$, appelé module de distance)

  Quand on considère la totalité du spectre électromagnétique, des ondes radio aux rayons gamma, on parle de magnitude bolométrique (pour $M_{bol} = 0$, $L = 3.10^{28}$ W) .

- **Brillance de surface**

  la magnitude apparente d'un objet est donnée comme une valeur intégré, mais à la différence des étoiles, ponctuelles, pour des objets étendus comme les galaxies, la magnitude signifie la quantité de lumière reçue de l'ensemble de l'objet. de ce fait une galaxie sera plus difficilement visible qu'une étoile à magnitude égale. Il a alors été défini une notion de brillance de surface, nous renseignant sur la "visibilité" de l'objet.

  Elle est donnée en magnitude par seconde d'arc carrée.

  $S = m + 2{,}5 \log_{10} A$, soit $S(m/arcsec^2) = M_{v\odot} + 21{,}57 - 2{,}5 \log_{10} S(L_\odot/pc^2)$ [164]

---

[163] Landolt-Börnstein: Numerical Data and Functional Relationships in Science and Technology - New Series " Gruppe/Group 6 Astronomy and Astrophysics " Volume 2 Schaifers/Voigt: Astronomy and Astrophysics / Astronomie und Astrophysik " Stars and Star Clusters / Sterne und Sternhaufen L. H. Aller et al.,

[164] Binney, James & Merrifield, Michael (1998), Galactic Astronomy, Princeton University Press

D. Développements et Explications

○ Trou noir de Kerr

Depuis 2006, on distingue quatre grandes classes de trous noirs en fonction de leur masse : les trous noirs stellaires, supermassifs, intermédiaires et primordiaux (ou micro trous noirs). L'existence voire l'abondance de chaque type de trou noir est directement liée à la possibilité de leur formation.

Classe	Masse	Taille
Trou noir supermassif	~10^5 - 10^9 $M_\odot$	~0.001 - 10 u.a.
Trou noir de masse intermédiaire	~10^3 $M_\odot$	~10^3 km = R_{Terre}
Trou noir stellaire	~10 $M_\odot$	~30 km
Trou noir primordial	< ~M_{Lune}	< ~0.1 mm

Quatre types théoriques de trous noirs possibles...

Les quatre types théoriques de trous noirs en fonction du moment cinétique (J) et de la charge électrique (Q). La masse (M) est toujours strictement positive.

pour M > 0	J = 0	J ≠ 0
Q = 0	Schwarzschild	Kerr
Q ≠ 0	Reissner-Nordström	Kerr-Newman

- Un trou noir possède toujours une masse non nulle. En revanche, ses deux autres caractéristiques, à savoir le moment cinétique (rotation) et la charge électrique, peuvent, en principe, prendre des valeurs nulles ou non nulles. La combinaison de ces états permet de définir quatre types de trous noirs.
- Quand la charge électrique et le moment cinétique sont nuls, on parle de trou noir de Schwarzschild, du nom de Karl Schwarzschild qui, le premier, a mis en évidence ces objets comme solutions des équations de la relativité générale, en 1916.
- Quand la charge électrique est non nulle et le moment cinétique nul, on parle de trou noir de Reissner-Nordström. Ces trous noirs ne présentent pas d'intérêt astrophysique notable car aucun processus connu ne permet de fabriquer un objet compact conservant durablement une charge électrique significative, celle-ci se dissipe normalement rapidement par absorption de charges électriques opposées prises à son environnement [165]. Un trou noir de Reissner-Nordström est donc un objet théorique très improbable.

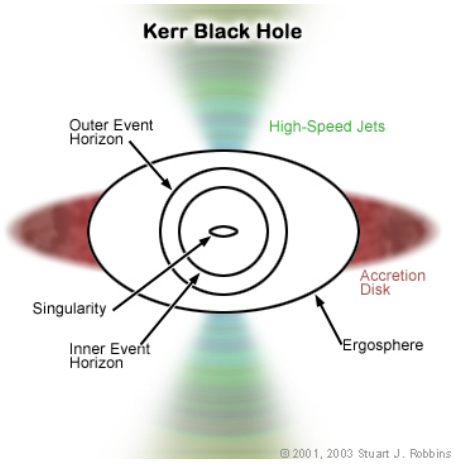
[165] Robert M. Wald, "Black Holes and Relativistic Stars", University of Chicago Press, 1998

- Si le trou noir possède un moment cinétique (c'est-à-dire qu'il est en rotation sur lui-même) mais n'a pas de charge électrique, on parle de trou noir de Kerr, du nom du mathématicien néo-zélandais Roy Kerr qui a trouvé la formule décrivant ces objets en 1963. Contrairement aux trous noirs de Reissner-Nordström et de Schwarzschild, les trous noirs de Kerr présentent un intérêt astrophysique considérable, car les modèles de formation et d'évolution des trous noirs indiquent que ceux-ci ont tendance à absorber la matière environnante par l'intermédiaire d'un disque d'accrétion dans lequel la matière tombe en spiralant, toujours dans le même sens, dans le trou noir. Ainsi, la matière communique du moment cinétique au trou noir qui l'engloutit. Les trous noirs de Kerr sont donc les seuls que l'on s'attend réellement à rencontrer en astronomie. Cependant, il reste possible que des trous noirs à moment cinétique très faible, s'apparentant en pratique à des trous noirs de Schwarzschild, existent.

- La version électriquement chargée du trou noir de Kerr dotée, comme lui, d'une rotation, est connue sous le nom de trou noir de Kerr-Newman et ne présente comme le trou noir de Reissner-Nordström ou celui de Schwarzschild que peu d'intérêt astrophysique en raison à sa très faible probabilité.

Le trou noir de Kerr [166], qui désigne donc un trou noir en rotation et de charge électrique nulle est décrit dans le cadre de la relativité générale par la métrique de Kerr, qui ne dépend que de la masse M et du moment angulaire J.
Malgré le fait que Roy Kerr avait prédit en 1963 que les trous noirs étaient en rotation, jusqu'en 2003, aucun scientifique ne pouvait encore affirmer qu'un trou noir tournait réellement sur lui-même. C'est Todd Strohmayer de la NASA qui a ainsi détecté en 2003 l'existence d'un mouvement de rotation dans le rayonnement X émis par les trous noirs.

Description :



Horizon des événements et ergosphère d'un trou noir en rotation. Les particules passant à l'intérieur de l'ergosphère peuvent, dans certaines conditions, gagner de l'énergie mécanique au détriment du trou noir puis s'en échapper. Ce dernier perd alors du moment angulaire.

Contrairement au cas du trou noir sans rotation et sans charge électrique (appelé trou noir de Schwarzschild), le trou noir de Kerr possède une ergosphère en plus de son horizon des événements. Alors que ce dernier est décrit par une sphère de rayon r_h, l'ergosphère est un ellipsoïde de révolution dont le petit axe est aligné avec l'axe de rotation du trou noir et de même taille que r_h, et le grand axe de taille r_{stat} est situé dans le plan équatorial. Avec, $r_{stat} \geq r_h$.

Horizon des événements

La présence de l'horizon des événements ne dépend pas de la rotation du trou noir, c'est une caractéristique commune à tous les types de trous noirs qui représente finalement l'essence même de ce qu'est un trou noir. Les particules qui franchissent l'horizon des événements tombent définitivement dans le trou noir sans possibilité de s'en échapper.
Dans le cas d'un trou noir de Kerr, le rayon de l'horizon des événements s'écrit :

$$r_h = \frac{r_{Sh}}{2}\left[1+\sqrt{1-\left(\frac{J_c}{GM^2}\right)^2}\right]$$

[166] Roy Patrick Kerr (16 mai 1934 -) est un mathématicien néo-zélandais qui s'est rendu célèbre en 1963 pour avoir trouvé une solution exacte aux équations de la relativité générale décrivant un trou noir en rotation.
Kerr, R. P. Gravitational Field of a Spinning Mass as an Example of Algebraically Special Metrics. Phys. Rev. Let. 11, 237-238, 1963.

où G est la constante gravitationnelle, c est la vitesse de la lumière, r_{Sh} est le rayon de Schwarzschild. La valeur du rayon de l'horizon du trou noir de Kerr est donc comprise entre la moitié du rayon de Schwarzschild (quand le moment angulaire est maximal, J = Mc) et ledit rayon (moment angulaire nul, J = 0, cas du trou noir de Schwarzschild).

Ergosphère

L'ergosphère est dite limite statique en ce sens que les particules qui la franchissent sont obligatoirement entraînées dans le sens de rotation du trou noir, autrement dit, elles y possèdent un moment angulaire de même signe que J. Cet entraînement confère du moment cinétique et de l'énergie mécanique à une particule qui pénètre dans l'ergosphère puis s'en échappe, de sorte que le trou noir voit son moment cinétique diminuer.
C'est l'effet Penrose qui permet de pomper de l'énergie à un trou noir en rotation.

L'ergosphère est décrite par l'équation polaire :

$$r = \frac{r_S}{2}\left[1+\sqrt{1-\left(\frac{J_c}{GM^2}\cos\theta\right)^2}\right]$$

où θ désigne l'angle par rapport à l'axe de rotation. Il s'agit d'un ellipsoïde de révolution de petit axe r_h et de grand axe $r_{stat} \geq r_h$.

Métrique de Kerr

La métrique de Kerr s'écrit dans les coordonnées de Boyer-Lindquist.
Elle est donnée par (en posant G = c = 1):

$$\mathrm{d}s^2 = -\left(1-\frac{2Mr}{\Sigma}\right)\mathrm{d}t^2 - \frac{4aMr\sin^2\theta}{\Sigma}\mathrm{d}t\mathrm{d}\phi + \frac{\Sigma}{\Delta}\mathrm{d}r^2 + \Sigma\mathrm{d}\theta^2 + \left(r^2+a^2+\frac{2a^2Mr\sin^2\theta}{\Sigma}\right)\sin^2\theta\mathrm{d}\phi^2$$

où

$$a = \frac{J}{M}, \Sigma = r^2 + a^2\cos^2\theta$$

et

$$\Delta = r^2 - 2Mr + a^2$$

Notons que l'horizon des événements est donné par la surface Δ = 0, où le coefficient de dr^2 diverge.
L'ergosphère est donnée par la surface où 1 - 2Mr / Σ = 0, où le coefficient de dt^2 s'annule.

D'autre part, en posant J = 0, on obtient la métrique de Schwarzschild.
Dans le cas extrême où J = ±M, la métrique décrit un objet en rotation qui cesse d'être un trou noir, mais n'est pas à la vitesse de rupture.
Finalement, mentionnons que l'on ne connaît pas de métrique à l'intérieur d'un objet à symétrie sphérique en rotation qui prolonge la métrique de Kerr. En revanche, une telle solution est connue dans le cas particulier de la métrique de Schwarzschild.

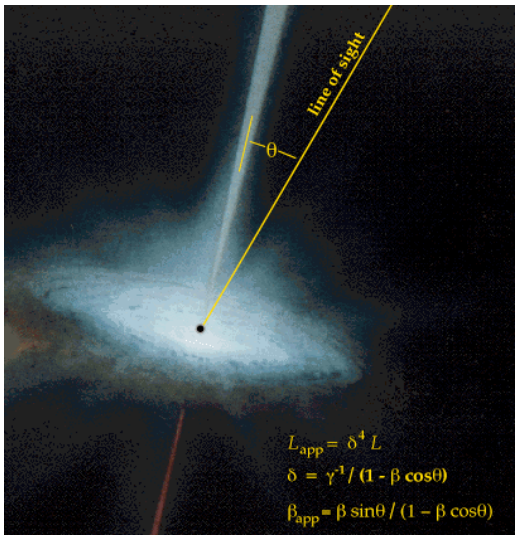
Dans la Voie Lactée, le trou noir GRS 1915+105, ferait un tour sur lui-même toutes les 1,150 secondes [167] proche de la limité théorique.

[167] Black hole spins at the limit | COSMOS magazine

- **Déplacement superluminique**

Un déplacement superluminique est un déplacement apparemment plus rapide que la vitesse de la lumière, tel que ceux vus dans les AGN ou les microquasars. On pense que toutes les sources concernées contiennent un trou noir, responsable de l'éjection de matière à de hautes vitesses.

Formulation



On définit par commodité : $\beta = v/c$. Pour toute particule ayant une masse non nulle, $0 \leq \beta < 1$ et pour la lumière, $\beta = 1$.

Puisqu'il existe un angle θ entre l'axe «y» et la direction de l'objet dans l'espace, la vitesse de l'objet en mouvement, projetée sur les axes «x» et «y», s'écrivent respectivement, par simple trigonométrie :

$$v_x = \beta.c.\sin(\theta) \text{ et } v_y = \beta.c.\cos(\theta)$$

Si l'on définit l'intervalle de temps entre t1 et t2 comme $\Delta t = t2 - t1$, les intervalles de longueur projetés sur les axes «x» (Δl_x) et «y» (Δl_y) du déplacement de l'objet s'obtiennent comme :

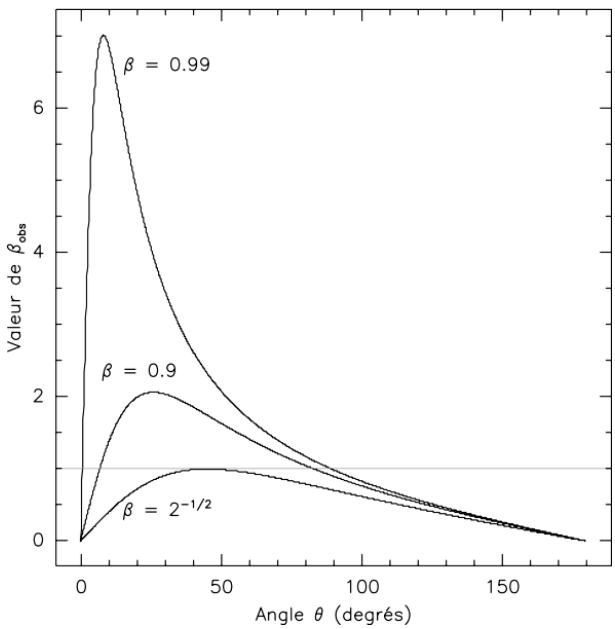
$$\Delta l_x = v_x \Delta t = \beta.c.\sin(\theta)\Delta t \text{ et } \Delta l_y = v_y \Delta t = \beta.c.\cos(\theta)\Delta t$$

Entre le temps t1 et le temps t2, l'objet s'est déplacé selon l'axe «y» d'une longueur Δl_y. Mais l'observateur se trouvant à très grande distance de l'objet, il ne peut pas percevoir le mouvement le long de l'axe «y», et l'objet ne semble s'être déplacé que transversalement. En apparence donc, la lumière émise au temps t1 et celle au temps t2 a été émise à la même distance de l'observateur. Donc en apparence, le temps observé est plus court que le temps réel, puisque le temps mis par la lumière pour parcourir Δl_y n'est pas perçu.

On pourrait dire à l'inverse que l'intervalle de temps effectivement observé est plus court que l'intervalle de temps vrai, puisque la lumière a économisé la distance Δl_y entre les deux observations, distance qui est non négligeable lorsque la vitesse réelle est comparable à celle de la lumière. Pour des vitesses habituelles à l'échelle humaine qui sont très faibles devant la vitesse de la lumière, ce temps est minuscule et parfaitement indétectable. Mais dans le cas où l'objet matériel se déplace avec une vitesse comparable à celle de la lumière ce temps n'est pas négligeable. Ainsi :

$$\Delta t_{obs} = \Delta t - \frac{\Delta l_y}{c} = \Delta t\left(1 - \beta\cos(\theta)\right)$$

Pour des vitesses à l'échelle humaine, β est extrêmement petit, et le terme βcos(θ) vaut donc 0. Dans ce cas, les intervalles de temps observés et réels sont égaux. De même, pour un angle $\theta = 90$, le cosinus est nul, la projection le long de l'axe «y» est nulle, et l'effet aussi. Si $\theta = 0$, on ne voit pas l'objet se déplacer transversalement. Il existe donc un angle intermédiaire, pour lequel cet effet est maximal. Si β est assez grand alors la vitesse apparente maximale est plus grande que celle de la lumière.



Cette fonction de θ est illustrée sur la figure ci-dessus, et peut dépasser 1 ! Donc la vitesse observée peut dépasser la valeur de la vitesse de la lumière, même si la vitesse réelle est plus petite (ou en d'autres termes βobs > 1. même si β < 1).

En effet, la vitesse observée (en fait calculée à partir des observations) transversalement, le long de l'axe «x», ou mieux, en divisant par c :

$$\beta_{obs} = \frac{v_{obs}}{c} = \frac{\Delta l_x}{\Delta t_{obs}} = \frac{\beta \sin(\theta)}{1 - \beta \cos(\theta)}$$

On obtient la position du maximum de la courbe en annulant sa dérivée :

$$\frac{d\beta_{obs}}{d\theta} = \frac{(1 - \beta\cos(\theta))\beta\cos(\theta) - (\beta\sin(\theta))^2}{(1 - \beta\cos(\theta))^2}$$

Donc le terme supérieur doit être nul, ce qui implique que le maximum de la courbe s'obtient lorsque β = cos(θ).

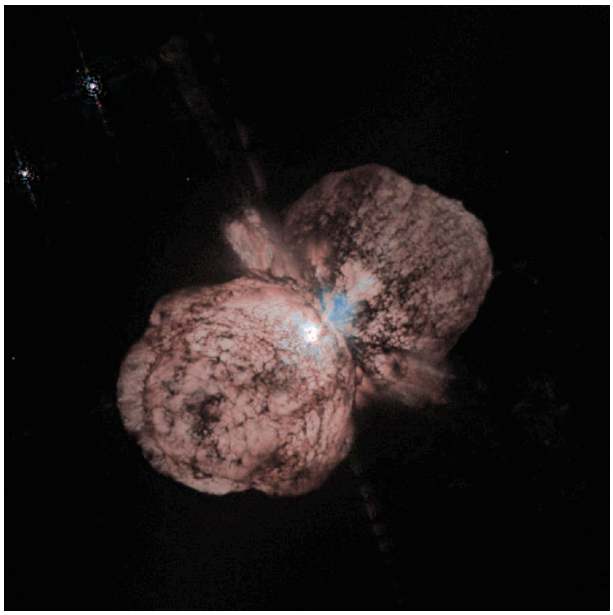
Il existe une valeur minimum de β en-dessous de laquelle la vitesse observée ne peut jamais être supérieure à la vitesse de la lumière. Inversement, si β est plus grand que cette valeur, il existe toujours au moins un angle pour lequel la vitesse observée est plus grande que la vitesse de la lumière (c'est-à-dire $\beta_{obs} > 1$).

En remplaçant β par cos(θ) dans l'expression de β_{obs}, et en égalant à 1 pour obtenir le maximum de la courbe exactement à la vitesse de la lumière, on obtient que dans ce cas particulier : β = cos(θ) = sin(θ), et que :

$$\beta_{\min} = \frac{1}{\sqrt{2}} \approx 0{,}707$$

Ce qui correspond à environ 212 000 km.s^{-1}.

- **Limite d'Eddington**



La nébuleuse engendrée par l'explosion de l'étoile η Carinae est peut-être le résultat d'un dépassement de la limite d'Eddington.

La limite d'Eddington, ou luminosité d'Eddington, est une valeur de luminosité qu'un objet céleste (par exemple une étoile) ne peut dépasser : au-delà, la pression de radiation prend le pas sur la gravité et des constituants de l'objet sont éjectés.

La masse d'une étoile pouvant être reliée à sa luminosité au travers du diagramme de Hertzsprung-Russell, la limite d'Eddington est équivalente à une limite sur la masse d'une étoile. Cette quantité porte le nom de l'astrophysicien britannique Sir Arthur Eddington qui est à l'origine du concept.

En toute rigueur, c'est une limite théorique, basée sur un certain nombre d'approximations : on la calcule pour une étoile en équilibre hydrostatique et à symétrie sphérique. Afin de prendre en compte les cas réels, notamment l'influence de la température, on utilise la limite de Humphreys-Davidson, qui en est une extension.

Expression

On considère que l'étoile est un corps à symétrie sphérique, uniforme et isotrope, maintenu à l'équilibre. Le gradient de pression au sein de l'étoile est supposé suivre l'équilibre hydrostatique. On a ainsi :

$$\frac{dP_h}{dr}(r) = -\rho g = -G\frac{M_\rho}{r^2}$$

avec P_h la pression hydrostatique, r la distance au centre de l'étoile, ρ la masse volumique du gaz constituant l'étoile, supposée uniforme, G la constante de gravitation.

La pression de radiation, qui s'exerce en sens opposé, a pour expression :

$$\frac{dP_r}{dr}(r) = -\frac{\sigma_{\tau p}}{m_p c}\cdot\frac{L}{4\pi r^2}$$

avec P_r la pression de radiation, σT la section efficace de la diffusion Compton pour l'électron, L la luminosité de l'étoile et m_p la masse du proton.

Ces deux pressions se compensent exactement, par définition, lorsque la luminosité de l'étoile atteint la limite d'Eddington :

La valeur exacte de cette limite dépend de la composition chimique de l'étoile, de ses variations et de la distribution de matière. On peut toutefois donner une formule approximative par rapport au Soleil, en notant M la masse de l'étoile considérée.

$$L_{Edd} = 4\pi G M m_p \frac{c}{\sigma T}$$

$$L_{Edd} = 3{,}3.10^4\left(\frac{M}{M_\Theta}\right)L_\Theta$$

La luminosité maximum d'un objet tirant son énergie de l'accrétion est donnée par : $F_{rad} = F_{grav}$

ou $L_{Edd} \sim 1{,}3.10^{46}\ M_\odot\ erg.s^{-1}$

- **Théorème de Viriel**

Dans un système en équilibre dynamique, l'énergie cinétique Ec égale l'opposé de la moitié de l'énergie potentielle Ep :

$2Ec + Ep = 0$.

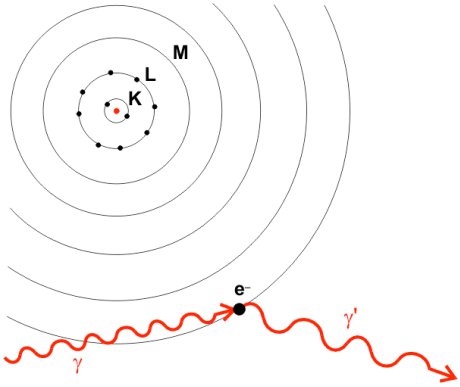
Le théorème du viriel est très utilisé en dynamique galactique. Il permet par exemple d'obtenir rapidement un ordre de grandeur de la masse totale M d'un amas d'étoiles si l'on connaît la vitesse moyenne v des étoiles dans l'amas et la distance moyenne r entre deux étoiles de l'amas, valeurs qui peuvent être estimées à partir des observations :

- $Ec \sim \frac{1}{2}Mv^2$
- $Ep \sim - GM^2/2r$

Alors : $2Ec$ [168] $- Ep \Leftrightarrow M = 2v^2r/G$

[168] Le facteur 2 provient du fait que pour un système de particules il faut éviter de compter deux fois l'énergie potentielle associée à un couple.

- **Diffusion Compton**



Diffusion Compton d'un photon sur un électron lié à un noyau

En physique, la diffusion Compton est la diffusion d'un photon sur une particule de matière, comme un électron. On appelle plus spécifiquement effet Compton, l'augmentation de la longueur d'onde du photon par la diffusion. Ce dernier phénomène a été observé la première fois par Arthur Compton en 1923. L'expérience de Compton devint l'ultime observation qui convainquit tous les physiciens que la lumière peut se comporter comme un faisceau de particules dont l'énergie est proportionnelle à la fréquence (ou inversement à la longueur d'onde). Cet effet est important en physique car il a démontré que la lumière ne peut pas être uniquement décrite comme une onde, ni comme une particule.

La célèbre formule du décalage en longueur d'onde apparaissant lors d'une diffusion de rayons X :

$$\Delta\lambda = \lambda' - \lambda = (\frac{h}{m_e c})(1 - \cos\theta)$$

Selon que le photon incident a une très grande énergie ou pas, on distingue deux régimes de diffusion Compton :

- Le régime «Thomson» (qui donne la diffusion Thomson)
- Le régime de «Klein-Nishina».

Si le photon a une très faible énergie face à l'électron au repos, sa longueur d'onde ne changera quasiment pas. Seule sa direction va changer. C'est ce qu'on appelle le régime Thomson. Dans ce cas, la diffusion Compton retombe sur le cas particulier de la diffusion Thomson.

Cette diffusion a été expliquée par Joseph John Thomson. Dans cette diffusion qui s'effectue pour des énergies faibles, le rayonnement électromagnétique est absorbé puis reémis par la particule. Durant cette interaction l'énergie transmise à la particule chargée par le photon est négligée, tant que l'énergie des photons ne dépasse pas 45 keV, il s'agit alors d'une diffusion élastique. La direction de propagation de l'onde électromagnétique associée au photon change sans diminution de l'énergie.

Cette diffusion est similaire à la diffusion Rayleigh à la différence près que cette dernière s'effectue sur des particules chargées liées à des atomes.

Pour les hautes énergies, ce mode de diffusion devient négligeable par rapport à la diffusion Compton.

Dans ce cas, le photon incident a une très grande énergie, mais après la collision, il n'a essentiellement que l'énergie d'un électron au repos ($m_e c^2$). Il a donc perdu une grande partie de son énergie. On parle alors de perte «catastrophique», et ce régime est appelé régime de Klein-Nishina» et la formule de Klein-Nishina fournit une prédiction précise de la distribution angulaire des rayons X et Gamma issus d'un électron.

La formule de Klein-Nishina a été délivrée en 1929 par Oskar Klein et Yoshio Nishina, et fut un des premiers résultats obtenus par l'étude de l'électrodynamique quantique. La considération des effets relativistes et de ceux de la mécanique quantique permirent le développement d'une équation précise pour la diffusion du rayonnement d'un électron. Auparavant, la section efficace était classiquement dérivée de l'équation de Thomson. Cependant, les expériences de diffusions montraient des déviations significatives par rapport aux résultats attendus par le calcul de la section efficace de Thomson. Les expériences de diffusion s'accordent parfaitement avec les prédictions de la formule de Klein-Nishina.

$$\frac{E_\gamma}{m_e c^2} \to 0$$ *Si $E_\gamma << m_e c^2$, , la formule de Klein-Nishina se résume à l'expression classique de Thomson.*

L'énergie finale du photon diffusé, $E\gamma'$, est entièrement dépendante du l'angle de diffusion et de l'énergie initiale du photon, de fait l'énergie finale peut être calculée sans utiliser la formule de Klein-Nishina :

$$E'_{\gamma}\left(E_{\gamma},\theta\right) = E_{\gamma}.P\left(E_{\gamma},\theta\right)$$

Remarque : l'effet Compton n'est bien sûr pas limité au couple photon-électron. Toute particule chargée électriquement est susceptible d'y être soumise ; cependant, l'effet est plus spectaculaire pour l'électron, la variation de longueur d'onde étant inversement proportionnelle à la masse de la particule (l'électron est la plus légère des particules chargées de l'Univers « ordinaire »).

- **Diffusion Compton inverse**

La diffusion Compton inverse est la diffusion d'électrons sur des photons, leur transférant ainsi une grande partie de leur énergie. C'est un effet très important en astrophysique, et permet d'expliquer l'effet Sunyaev-Zel'dovich [169], en cosmologie.

Au niveau théorique la description de l'effet Compton inverse est semblable à celle décrite ci-dessus. Il s'agit tout simplement d'un changement de repère. En se plaçant dans le référentiel propre de l'électron après la diffusion on s'aperçoit alors que la fréquence du photon est augmentée, au dépend de l'énergie de l'électron incident. Ainsi la différence entre l'effet direct et l'effet inverse se situe plutôt dans les conditions initiales : le premier se manifeste lors de la diffusion de photons sur des électrons pratiquement au repos (dans la matière), le second dans le freinage d'électrons rapides par des photons de plus ou moins basse énergie, présents dans le milieu interstellaire.

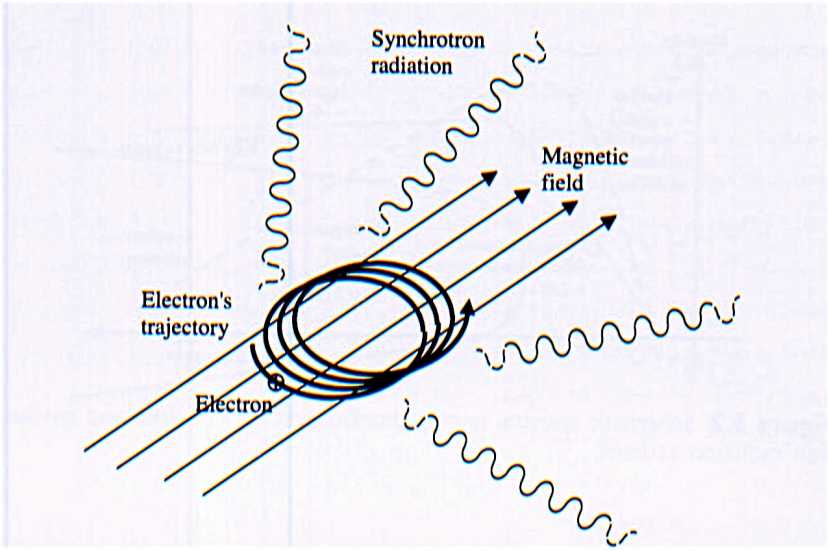
[169] Effet Sunyaev-Zel'dovich
En cosmologie, l'effet Sunyaev-Zel'dovich (abrégé parfois l'effet SZ) est le résultat de la distorsion du Fond diffus cosmologique par des électrons de grande énergie grâce à la Diffusion Compton inverse, qui permet à ces électrons de transférer une grande partie de leur énergie aux photons de faible énergie du fonds diffus. Ces distorsions sont observées dans le spectre du fond diffus cosmologique pour détecter les perturbations de densité dans l'univers primordial. En utilisant cet effet, des amas de galaxies ont pu être détectés.

- **Rayonnement synchrotron**

Principe

D'après les équations de Maxwell, toute particule chargée se déplaçant de façon non uniforme (par exemple sur une trajectoire circulaire) émet un rayonnement électromagnétique.

Dans le cas d'un synchrotron ces particules sont généralement des électrons (plus rarement des positrons) et tournent à des vitesses relativistes. On peut donc dire que le rayonnement synchrotron est un rayonnement électromagnétique émis par des électrons qui tournent dans un anneau de stockage.



Le rayonnement synchrotron se produit lorsqu'un électron relativiste rencontre un champ magnétique qui le force à suivre une trajectoire en spirale. Ce rayonnement aujourd'hui analysé en laboratoire a été découvert grâce à l'étude des quasars.

Propriétés

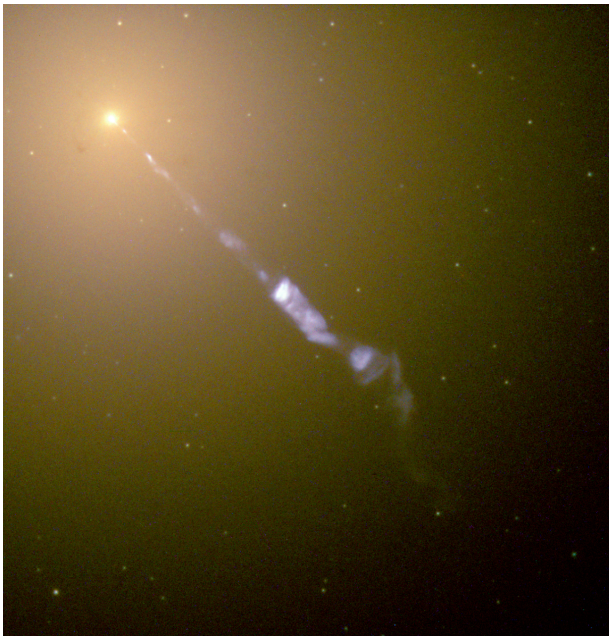
Ce rayonnement dépend de la vitesse des électrons mais couvre une très large partie du spectre électromagnétique : de l'infrarouge aux rayons X durs. Il est alors possible, soit d'utiliser une gamme spectrale étendue (spectroscopie infrarouge à transformée de Fourier, diffraction de Laüe), soit plus habituellement de rendre le faisceau cohérent pour ne travailler qu'avec une bande très étroite de fréquences. Dans le cadre de certaines expériences, absorption de rayons X EXAFS ou XANES par exemple, la possibilité de faire varier finement l'énergie du faisceau est un atout fondamental et permet de sonder précisément certaines transitions énergétiques. Le rayonnement synchrotron est particulièrement brillant (intense et focalisé), il peut l'être 10^4 fois plus que la lumière solaire. Pour les rayons X durs, la faible divergence du faisceau permet la mise en œuvre de méthodes de micro-imagerie, à l'échelle de quelques fractions de micromètre sur les lignes les plus performantes.

En outre, le rayonnement synchrotron est :

- assez facilement calculable
- très stable par rapport aux sources classiques
- polarisé (anisotropie)
- pulsé (observation de cinétiques ultra-rapides)
- et permet de travailler en cohérence de phase (diffraction cohérente, imagerie à contraste de phase)

En astronomie (découvert dans les AGN par Ginzburg en 1951 [170])

Jet de M87.



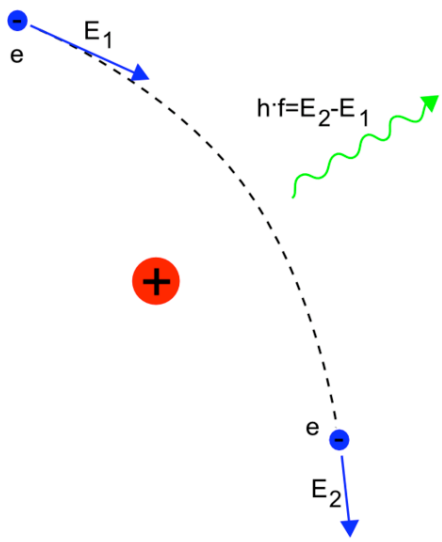
La lueur est provoquée par le rayonnement synchrotron, des électrons de grande énergie se développant en spirales le long du champ magnétique, et a été détectés la première fois en 1956 par Geoffrey R. Burbidge confirmant une prévision faite par Hannes Alfvén et Nicolai Herlofson en 1950, et Iosif S. Shklovskii en 1953 [63].

Le rayonnement synchrotron est également produit par les structures et les mouvements astronomiques. Typiquement, là où les électrons relativistes se déplacent en spirale (et par conséquent changent de vitesse) en raison des champs magnétiques. Deux de ses caractéristiques incluent la polarisation du rayonnement [171]. On a également suggéré que des trous noirs supermassifs pourraient produire un rayonnement de type synchrotron, en accélérant gravitationellement des ions dans les champs magnétiques.

[170] Breus, T. K., "Istoriya prioritetov sinkhrotronnoj kontseptsii v astronomii (Historical problems of the priority questions of the synchrotron concept in astrophysics)" (2001) in Istoriko-Astronomicheskie Issledovaniya, Vyp. 26, p. 88 - 97, 262 (2001)
Il écrivait : « En particulier, le physicien russe V.L. Ginsburg a cessé ses rapports avec I.S. Shklovsky et ne lui a plus parlé pendant 18 ans. A l'ouest, Thomas Gold et Fred Hoyle étaient en conflit avec H. Alfven et N. Herlofson, alors que K.O. Kiepenheuer et G. Hutchinson étaient ignorés par ces derniers. »

[171] Vladimir A. Bordovitsyn, "Synchrotron Radiation in Astrophysics" (1999) Synchrotron Radiation Theory and Its Development

- **Rayonnement continu de freinage (Bremsstrahlung) ou rayonnement free-free**

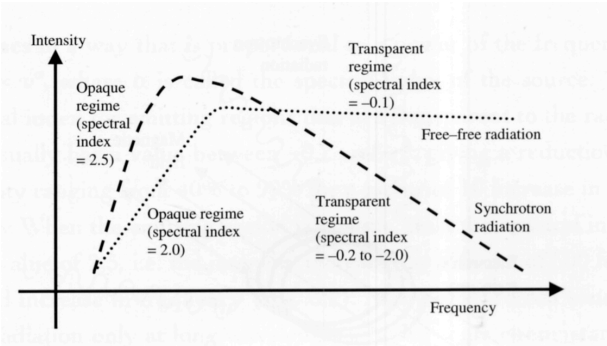


Le rayonnement continu de freinage, ou Bremsstrahlung (aussi appelé free-free emission en anglais), est un rayonnement électromagnétique à spectre large créé par le ralentissement de charges électriques. On parle aussi de rayonnement blanc.

Lorsque l'on bombarde une cible solide avec un faisceau d'électrons, ceux-ci sont freinés et déviés par le champ électrique des noyaux de la cible. Or, selon les équations de Maxwell, toute charge dont la vitesse varie, en valeur absolue ou en direction, rayonne. Comme la décélération des électrons n'est pas quantifiée, cela crée un flux de photons dont le spectre en énergie est continu.

Forme du spectre

L'énergie maximale des photons est l'énergie cinétique initiale E_0 des électrons. Le spectre en énergie s'arrête donc à cette valeur E_0. Si l'on trace le spectre en longueur d'onde (représentation la plus fréquente), on a un spectre qui commence à λ_0 qui vaut



$$\lambda_0 = \frac{hc}{E_0} \quad \text{ou encore} \quad \lambda_0 = \frac{hc}{eU}$$

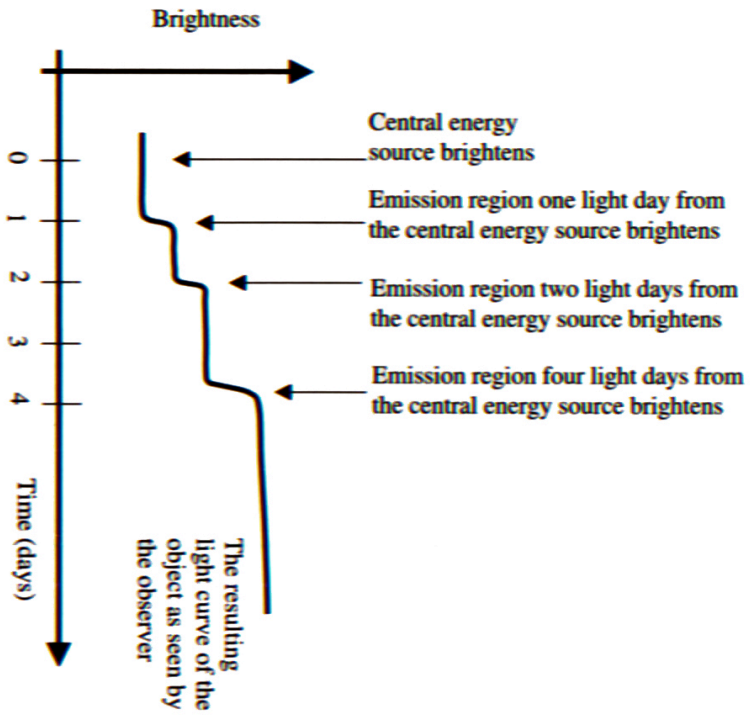
et dont l'énergie est maximale pour λ_{max} qui vaut

$\lambda_{max} = \frac{3}{2}\lambda_C$	où	• h est la constante de Planck,
		• c est la vitesse de la lumière dans le vide,
		• e est la charge électrique élémentaire de l'électron,
		• U est la tension appliquée au tube à rayons X.

- **"Reverberation mapping"**

La "reverberation mapping" est aujourd'hui une méthode statistique de l'astrophysique de préférence utilisée en liaison avec l'analyse de vitesse des disques gazeux autour des objets compacts supermassifs. Cette technique est employée pour mesurer la taille de la BLR et la masse du trou noir central des AGN [172].

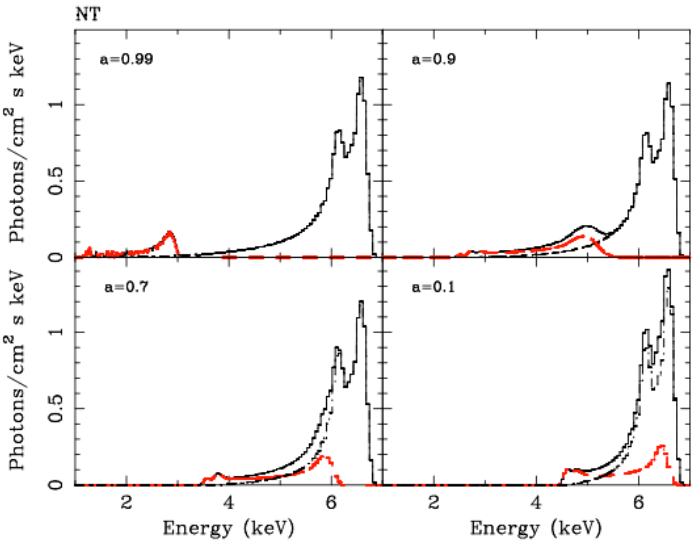
La technique de la "reverberation mapping" utilise la variabilité temporelle de réception du signal pour mesurer la masse, et peut-être le taux de rotation du trou noir supermassif, présumé actionner le "moteur" de la galaxie active.



Les mesures Doppler directes de masers H_2O entourant le noyau de galaxies voisines, ont révélé un mouvement képlerien très rapide, seulement possible pour une concentration élevée de matière en leur centre. Actuellement, les seuls objets connus qui puissent contenir assez de matière dans un si petit espace sont les trous noirs, ou les objets qui se transformeront en trous noirs en des temps astronomiquement courts. Pour les AGN plus éloignés, la largeur des raies spectrales peut être utilisée pour sonder le gaz en orbite proche autour de l'horizon des événements.

[172] B.M. Peterson & K. Horne Reverberation Mapping of Active Galactic Nuclei (2004)

- **"Broad Iron K line" (raie Kα du Fe à 6,4 keV - émission en RX)**



En astronomie, la raie K élargie du fer est une raie spectrale qui est une mesure précise de l'immense force de gravité d'un trou noir. Le nom se rapporte à la forme, sur un spectre, de la lumière émise par les atomes de fer proches de la surface du trou noir. La lumière perd de l'énergie alors qu'elle s'éloigne du champ gravitationnel du trou noir, causant l'allongement de la raie spectrale vers de plus basses fréquences.

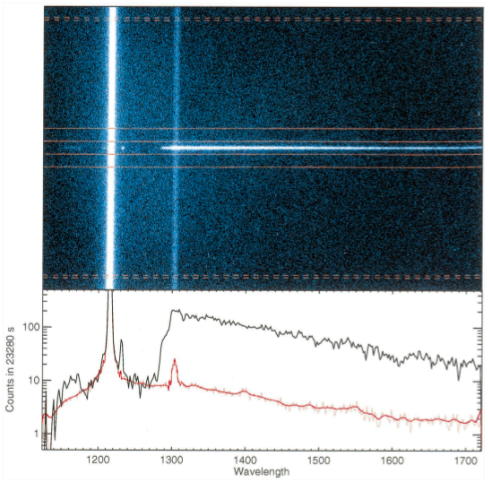
Une série d'observations à l'aide du satellite Japonais Suzaku a amené, en 2005 et 2006, la démonstration que la raie K élargie du fer s'avère venir de presque toutes les galaxies et que le signal est réel, signe d'une forte gravité, et pas d'une faible résolution. Les données récentes suggèrent un raccordement entre les oscillations quasi-périodiques et la ligne générale du fer K. Il semble également que la largeur de la raie K du Fer soit en corrélation avec le spin du trou noir autour duquel se trouve les atomes émetteurs.

Les scientifiques croient qu'ils pourront utiliser la raie K élargie du fer pour visualiser les trous noirs.

- **Effet Gunn-Peterson**

En spectroscopie astronomique, l'effet Gunn-Peterson est une caractéristique du spectre des quasars, ayant des redshifts z > 6, qui est expliquée par l'absorption du rayonnement du quasar par l'hydrogène neutre.

L'effet provient du fait que l'hydrogène neutre intergalactique situé sur la ligne de visée absorbe les photons de la raie Lyα dont l'énergie est décalée vers le rouge, le décalage dépendant de la distance du nuage d'hydrogène.



Les quasars proches et les galaxies ne montrent pas une telle absorption, indiquant que la matière, située entre les galaxies et l'observateur, est ionisée. Les spectres des quasars avec des redshifts z > 6 montrent un creux entre les raies de l'hydrogène, jusqu'à une valeur de redshift z ~ 6. Ceci laisse supposer que la matière du très jeune univers n'était pas totalement ionisée.

Cet effet a été proposé par Gunn et Peterson en 1965 et a été observé pour la première fois par le Sloan Digital Sky Survey en 2001, avec la découverte d'un quasar à un redshift (z) = 6.28 [173]. L'article incluait également des quasars de redshift z = 5.82 et z = 5.99 et, alors que chacun montrait une absorption du côté bleu de la transition de Lyα, il y avait aussi de nombreuses transitions. Le flux du quasar à z = 6.28, était nul au-delà de la limite Lyα, signifiant que le médium intergalactique (IGM) devait encore être neutre lors de l'émission.

La découverte de la lacune pour le quasar à z = 6.28, et l'absence de cette lacune pour des quasars détectés aux redshifts inférieurs (z < 6) ont apporté la preuve irréfutable que l'hydrogène a été ionisé autour de z = 6. Après recombinaison, on s'attendait à ce que l'univers soit neutre, jusqu'à ce que les premiers objets dans l'univers aient commencé à émettre la lumière et l'énergie qui re-ionise l'IGM environnant. Cependant, comme la section efficace de diffusion des photons à des énergies proches de la limite Lyα de l'hydrogène neutre est très haute, même une petite fraction d'hydrogène neutre provoquera une densité optique de l'IGM assez haute pour empêcher l'observation de cette émission.

Suite aux résultats de WMAP I, le temps de ré-ionisation fourni par l'effet Gunn-Peterson paraît être en désaccord avec les estimations de densité de colonne des électrons [174] obtenues par WMAP. Mais, avec la publication des données de WMAP III, les deux méthodes semblent donner des résultats moins contradictoires [175].

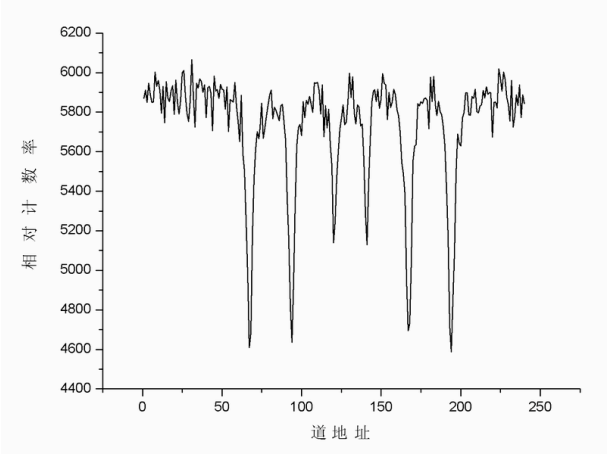
[173] Becker, R. H.; et al. (2001). "Evidence For Reionization at z ~ 6: Detection of a Gunn-Peterson Trough In A z=6.28 Quasar". Astronomical Journal 122: 2850-2857.

[174] Kogut, A.; et al. (2003). "First-Year Wilkinson Microwave Anisotropy Probe (WMAP) Observations: Temperature-Polarization Correlation". Astrophysical Journal Supplement Series 148 (1): 161-173.

[175] Page, L.; et al. (2007). "Three-Year Wilkinson Microwave Anisotropy Probe (WMAP) Observations: Polarization Analysis". Astrophysical Journal Supplement Series 170 (2): 335-376.

- **Effet Möβbauer**

L'effet Mößbauer est lié à l'absorption et la reémission par résonance d'un photon par le noyau d'un atome (transition nucléaire). Les lois de conservation de l'énergie et de l'impulsion imposent une modification de l'énergie (et donc de la fréquence) des photons reémis dans une direction différente de la direction incidente. Ce décalage en énergie traduit un effet de recul de l'atome à l'absorption et à l'émission.



L'émission et l'absorption des rayons X par les gaz avaient déjà été observées et il était attendu que le même phénomène se produise pour les rayons gamma, créés lors de transitions nucléaires (à l'inverse des rayons X produits par des transitions électroniques). Cependant, les tentatives d'observation de la résonance des rayons gamma fut un échec, en raison de l'énergie perdue par effet de recul, qui empêche la résonance (l'effet Doppler élargissant également le spectre de raies gamma). Mößbauer pût observer la résonance gamma dans de l'Iridium solide, ce qui généra la question de l'absence de résonance dans les gaz alors qu'elle existe dans les solides. Mößbauer proposa que dans le cas où les atomes sont liés dans un solide, sous certaines circonstances, une fraction des évenements nucléaires puisse se faire sans effet de recul. Il attribua la résonance observée à cette fraction d'évenements nucléaires sans effet de recul. Cette découverte fut récompensée par le prix Nibel de physique en 1961, conjointement avec Robert Hofstadter pour ses recherches sur la diffusion de l'électron dans les noyaux atomiques.

En général les rayons gamma sont produits par les transitions nucléaires, d'un état instable de haute énergie, vers un état stable de basse énergie. L'énergie des rayons gamma émis correspond à l'énergie de la transition nucléaire, minorée de la quantité d'énergie perdue par le recul de l'atome émetteur. Si l'énergie de recul, perdue, est petite comparée à l'énergie de base de la transition nucléaire, alors l'énergie du rayon gamma correspond encore à celle de la transition nucléaire et le rayon gamma peut être absorbé par un autre atome du même type que le premier. Cette émission et l'absorption conséquente est appelée résonance. Une énergie de recul supplémentaire est également perdue durant l'absorption, et pour que la résonance ait lieu, il est nécessaire que l'énergie de recul soit inférieure à la moitié de la transition nucléaire correspondante.

La quantité d'énergie perdue est décrite par l'équation :

$$E_R = \frac{E_\gamma^2}{2Mc^2}$$

où ER est l'énergie de recul, Eγ est l'énergie des rayons gamma, M est la masse du corps émetteur ou absorbant et c la vitesse de la lumière.

Dans le cas d'un gaz, les corps absorbants ou émettants sont les atomes, aussi la masse reste petite, d'où un énergie de recul important, qui évite les résonances. (la même équation s'applique aux pertes d'énergie de recul des rayons X, mais l'énergie du photon est inférieure et la perte d'énergie également, d'où une résonance de la phase gazeuse qui peut être observée avec les rayons X.)

- **Effet Baldwin**

L'effet Baldwin, qui décrit la relation entre la luminosité des raies et celle du continu.

C'est une observation empirique pour laquelle la largeur équivalente de la raie du $CIV_{\lambda 1549}$ est inversement proportionnelle à l'augmentation de la luminosité des quasars de haute luminosité.

Les études d'échantillons bien définis de quasars prouvent que la largeur équivalente des raies d'émission de $CIV_{\lambda 1549}$ pour les spectres plats de quasars radio, suivent la relation $EW(CIV_{\lambda 1549}) \propto L(optical)^{-0.6}$, mais la corrélation est beaucoup plus faible pour d'autres raies d'émission générales et pour d'autres catégories d'AGN.

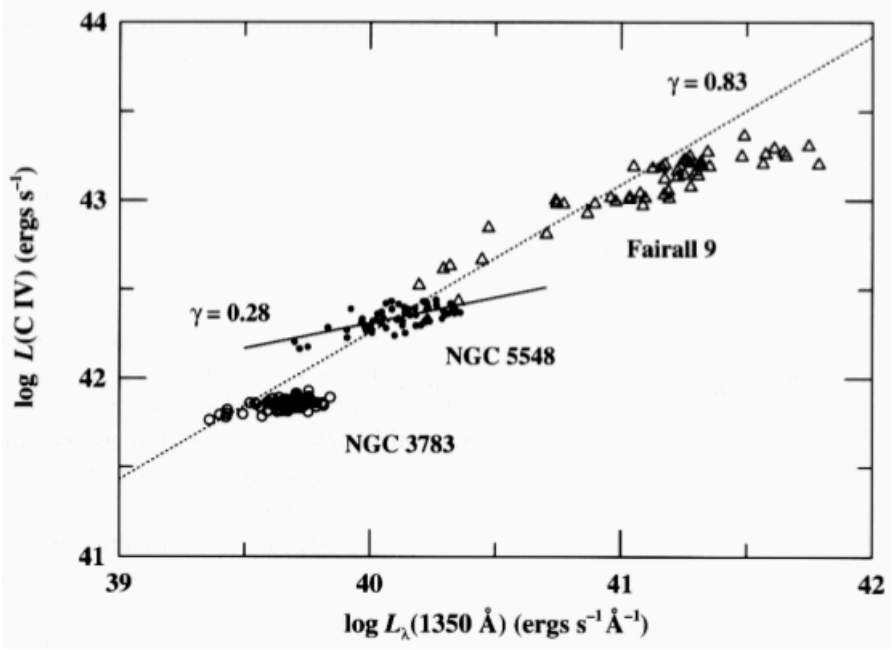


Illustration de l'effet Baldwin pour la raie ultraviolette $CIV_{\lambda 1549}$ de trois galaxies de type Seyfert 1. Le logarithme de la luminosité intégrée de la raie d'émission est représenté en fonction du logarithme de la luminosité du continu mesuré dans un intervalle de longueur d'onde centré sur λ=1350 Å. Les points représentés par un même symbole montrent les variations propres à chaque source. Le fait que la corrélation entre la luminosité de la raie et celle du continu soit non-linéaire (γ < 1) est appelé l'effet Baldwin. L'effet Baldwin intrinsèque, qui concerne les variations temporelles au sein d'un même objet, a une pente γ plus faible que l'effet Baldwin global, qui concerne les variations d'un objet à l'autre. Tiré de : Peterson (1997).

L'origine de cet effet n'est cependant pas comprise.

L'effet Baldwin semble dépendre du potentiel d'ionisation de l'ion émettant la raie, de sorte que les raies $CIV_{\lambda 1549}$, $HeII_{\lambda 1640}$ et tout particulièrement $OVI_{\lambda 1035}$ présentent un effet Baldwin plus prononcé que les raies Lyα, Hα et Hβ de l'hydrogène (Espey & Andreadis, 1999).