

LES NOYAUX ACTIFS DE GALAXIES: 25 ANNEES DE RECHERCHES, UN FUTUR PROMETTEUR

I. Le Passé

I-1 Introduction.

Lorsque parut le 1er Juillet 1964 dans l'Astrophysical Journal un court article de Greenstein et Schmidt intitulé "The quasi-stellar sources 3C273 and 3C48", bien peu encore se doutaient que l'astronomie des Quasars et des Noyaux Actifs de Galaxies aurait un essor aussi fulgurant, et que 25 ans après ils seraient l'objet chaque année de plusieurs congrès, de centaines d'articles, et de multitudes de nuits - ou de jours - d'observation.

L'engouement suscité par les quasars tient à plusieurs causes. Découverts grâce aux perfectionnements d'une technologie nouvelle - la radioastronomie -, et restés jusqu'à ces derniers temps les objets les plus lointains observables dans l'Univers, ils suscitèrent d'abord l'espoir de livrer les secrets de sa géométrie et de sa dynamique. On sait que cet espoir fut rapidement déçu, par leur refus de se conduire comme de bonnes "chandelles standard" et de se laisser facilement classer, et par leur forte tendance à être beaucoup plus nombreux et surtout plus lumineux dans le passé qu'actuellement. Ils n'en demeurent pas moins les objets les plus lumineux de l'Univers, et la recherche de la cause de cette luminosité est à l'origine d'une sorte "ère non nucléaire" car il est clair maintenant que la gravitation constitue leur principale ressource énergétique.

Il est curieux de constater que l'étude de ces "monstres" que sont les quasars amena les astronomes à s'intéresser à des objets moins spectaculaires, les noyaux de galaxies en général et les radio galaxies, et à y mettre en évidence exactement les mêmes mécanismes, alors que certains précurseurs comme Zwicky, Seyfert, Ambartsumian, puis plus tard Burbidge et Hoyle, n'avaient pas été entendus lorsqu'ils prêchaient que des phénomènes hautement énergétiques se produisaient dans ces objets.

Car si les quasars sont intéressants, ils le sont au même titre que les noyaux de galaxies ou les radio galaxies, par une remarquable unicité sous-jacente dont l'évidence s'imposa à mesure que les observations s'affinèrent, et que recouvre une extraordinaire diversité d'apparences et de phénomènes. Il est maintenant clair que si un "diagramme de Hertzsprung-Russell" des Noyaux Actifs de Galaxies (que nous appellerons NAG pour simplifier, incluant les quasars sous ce sigle) n'a pas été encore mis en évidence, on tend vers une conception où trois paramètres essentiels jouent un rôle, et trois seulement: la masse centrale, - que l'on admet généralement être sous la forme d'un trou noir supermassif - le taux d'accrétion de gaz, et l'orientation de l'axe de rotation du système par rapport à la ligne de visée.

De par leur diversité phénoménologique, les NAGs constituent un lieu privilégié d'étude pour l'astrophysicien. On y trouve pratiquement tous les processus connus de rayonnement: rayonnements non thermiques, synchrotron dans les domaines radio et optique, cyclotron ou de bremsstrahlung comptonisé et Compton inverse dans le domaine X, rayonnement gamma impliquant des créations de paires ou des processus encore plus énergétiques; de même toutes sortes de rayonnements thermiques y sont observés, corps noir semblable à un rayonnement d'étoile très chaude dans l'ultraviolet, rayonnement continu et de raies atomiques provenant de gaz dilués relativement froids dans le visible, raies dans le domaine X émises par des gaz plus chauds, enfin rayonnements infrarouge et millimétrique de poussières et de molécules. On a invoqué également l'effet Cherenkov et l'effet Raman, sans oublier des processus plus exotiques comme les sources tachioniques et la "fatigue" de la lumière. Outre les mécanismes de rayonnement et son transfert, les théories physiques mises en oeuvre pour expliquer les conditions des milieux émissifs incluent la Relativité Générale, l'hydrodynamique et la magnétohydrodynamique, la physique nucléaire, l'évolution stellaire, la théorie des atmosphères, etc...

I. 2. Historique

Un bref rappel historique est intéressant, car il montre, dans ce domaine peut-être plus que dans d'autres, la démarche cahotique de la science, l'influence des querelles d'école, l'apport des technologies nouvelles, la difficulté de séparer l'important du contingent, la nécessité des collaborations entre disciplines.

I. 2. 1. la préhistoire: les quasars sont là, mais on ne le sait pas!

On peut situer les débuts de l'histoire des NAGs en 1943, lors de la publication de la thèse de K. Seyfert, intitulée modestement "nuclear emission in spiral nebulae". Les 6 galaxies qu'il y décrivait se distinguent par un noyau brillant d'aspect stellaire, produisant un continu très bleu, sur lequel se superposent des raies en émission identiques à celles observées dans les nébuleuses planétaires, mais beaucoup plus larges. Seyfert suggérait déjà que des phénomènes énergétiques se produisent dans ces noyaux. Ces galaxies suscitèrent peu d'intérêt et ne furent guère étudiées au cours des 20 années suivantes. Mentionnons le travail de Woltjer qui suggéra en 1959 que l'élargissement des raies pouvait provenir de mouvements de rotation rapide. Dans le même temps Zwicky commençait une étude de galaxies compactes, dont un bon nombre s'avèrèrent par la suite être des "galaxies de Seyfert" et quelques unes de véritables quasars, et clamait que la compacité d'un objet est fondamentale dans son évolution. Ambartsumian, lui, prônait que la couleur ultraviolette est la marque de phénomènes énergétiques, et plaçait l'origine des galaxies au sein d'un noyau d'où la matière est violemment éjectée. Ces idées le conduisirent au début des années soixante à lancer Markarian dans la confection d'un catalogue contenant actuellement plus d'un millier de galaxies dont, comme celui de Zwicky, un bon nombre sont des galaxies de Seyfert. Notons que les catalogues de Zwicky et de Markarian s'avèrent

être des mines d'objets intéressants, tant sur le plan de l'"activité des noyaux", sujet de cet article, que sur celui des galaxies à "flambées d'étoiles".

Entre temps le développement de la radio astronomie amena à la découverte en 1954 de la première radio-galaxie, Cygnus A, source radio la plus brillante du ciel après le Soleil et Jupiter, dont le rayonnement est supérieur à 10^{45} ergs/s (100 fois notre Galaxie dans le domaine optique), ce qui en faisait la source la plus puissante du ciel connue à cette époque. Ce rayonnement radio est dû au processus synchrotron dont la théorie fut mise au point à la fin des années cinquante. Sa production implique la présence d'électrons ultra-relativistes et d'un champ magnétique. Cette découverte, suivie de celle de nombreuses autres galaxies qui, relativement raisonnables dans le domaine optique, ont une grande luminosité synchrotron radio, conduisit certains (Hoyle et Burbidge principalement) à se poser la question de l'origine des particules relativistes. Ils déduisirent que, dans l'hypothèse minimum d'une équipartition entre l'énergie magnétique et l'énergie des particules relativistes (dont un certain nombre doivent être des protons), l'énergie mise en jeu est de l'ordre de 10^{61} ergs ou 10^{62} ergs, égale à celle qu'une galaxie normale produirait en 10^{11} ou 10^{12} ans! Ils suggérèrent donc que ces galaxies ont été à un moment dans leur existence le siège d'une explosion au cours de laquelle une gigantesque quantité d'énergie a été émise.

1. 2. 2. Les années soixante: le problème est posé

En 1961 Sandage et ses collaborateurs annoncèrent à l'Assemblée Générale de l'UAI avoir pris le spectre de l'une des radio sources du catalogue de Cambridge, identifiée (mais non sans ambiguïté à cause de la taille des "boîtes d'erreurs" des radio sources à cette époque) à une étoile bleue de 16^{ème} magnitude, 3C48, et avoir trouvé des raies très larges mais complètement inconnues. Deux ans plus tard, Hazard, profitant de plusieurs occultations par la Lune d'une autre radio source, 3C273, en détermina les coordonnées avec précision, ce qui permit à Greenstein et Schmidt d'en prendre le spectre à Palomar. Ils le trouvèrent semblable à celui de 3C48, avec de larges raies en émission à des longueurs d'onde inhabituelles, mais cette fois ils comprirent qu'il s'agissait de raies identiques à celles des nébuleuses planétaires, en particulier H β et la raie interdite de [OIII] à 5007Å, mais décalées vers le rouge ("redshiftées", on ne peut guère éviter l'anglicisme!) de 16% pour 3C273 et de 37% pour 3C48. Dans leur article de l'Ap.J., Greenstein et Schmidt démontraient déjà que la seule hypothèse plausible est un redshift cosmologique, qui reporte ces objets à une distance de l'ordre de 10^9 pc, et leur confère une luminosité de plus de 10^{46} ergs/s. On les appela "Quasi Stellar Objects", à cause de leur aspect stellaire sur les plaques photographiques, et cette appellation se trouva bientôt contractée en "Quasars".

Il est assez intéressant (ou plutôt triste!) de constater que, plusieurs mois avant la publication de l'article de Greenstein et Schmidt, Zwicky s'était vu refuser par l'Ap.J. un article sur les galaxies compactes dans lequel il décrivait un catalogue de sources dont plusieurs sont de véritables quasars. Cet article fut en définitive publié ... dans les Comptes Rendus de l'Académie des Sciences.

Tandis que s'effectuait par des moyens variés la découverte de nombreux autres quasars (par l'identification des radio sources et par l'excès d'ultraviolet, puis dans les années soixante dix par les photographies avec prisme objectif), les études allèrent bon train. Le premier des "Texas meetings" qui se renouvèleront à partir de ce moment tous les deux ans se tint dès Décembre 1964, pour faire le point sur la question. Très rapidement (1965) on découvrit la variabilité du continu radio à courte longueur d'onde et du continu optique (il suffit de se reporter aux plaques de Harvard où 3C273 est recensée depuis un siècle comme une étoile variable de type inconnu, et montre des variations stochastiques d'une magnitude en quelques mois), qui impliquent des dimensions plus petites que le mois lumière. Ces dimensions très petites (qui diminueront jusqu'à atteindre quelques heures lumière lorsqu'on observera dans le domaine X) jointes à la luminosité très élevée firent douter certains de l'"hypothèse cosmologique" et la "controverse du redshift" commença: pour les tenants du redshift non cosmologique, les quasars sont des objets proches dont le redshift est dû à une cause physique encore inconnue. Cependant les images profondes (en particulier obtenues avec la Caméra Electronique) permirent de découvrir des galaxies voisines des quasars et ayant le même redshift, et surtout une galaxie autour de chaque quasar, du moins pour les plus proches pour lesquels cette observation est possible. Il s'imposa alors l'idée que les quasars sont hébergés par des "galaxies hôtes" dont ils constituent simplement le noyau dans une phase particulièrement lumineuse. Récemment la détection dans plusieurs quasars de la molécule CO, avec les deux pics caractéristiques de la rotation d'une galaxie spirale, a permis de confirmer définitivement cette hypothèse.

Après la découverte des quasars, l'intérêt pour les galaxies de Seyfert s'était trouvé vigoureusement relancé, et les observations ultérieures, en particulier dans les domaines spatiaux, ne firent que confirmer la similitude des deux types d'objets, avec une différence de luminosité d'un facteur 100 ou 1000. Toutefois la découverte de quasars intrinsèquement faibles et de noyaux de galaxies de Seyfert très lumineux permit d'établir l'existence d'une complète continuité, la différence étant seulement le résultat d'une sélection observationnelle. En effet, la fonction de luminosité des quasars en fonction du redshift montre une très forte évolution cosmologique, que l'on imputa d'abord à une diminution de leur densité par unité de covolume au cours du temps (maintenant on pense plutôt qu'il s'agit d'une diminution de la luminosité). Les quasars étant plus nombreux et plus lumineux dans le passé sont découverts surtout aux grands redshifts, tandis que les galaxies de Seyfert, moins lumineuses, sont inobservables à de grandes distances (ce n'est plus le cas maintenant) et sont découvertes seulement dans notre environnement proche. Notons que la fonction de luminosité des galaxies de Seyfert est bien celle que l'on attendrait en extrapolant la fonction de luminosité des quasars à un redshift nul, ce qui est une confirmation de supplémentaire de l'hypothèse cosmologique.

1. 2. 3. Les années soixante dix: les idées se mettent en place

Au début des années soixante dix, on découvrit par interférométrie VLBI, à l'intérieur des quasars et des noyaux des radio galaxies (car elles ont un noyau, comme pratiquement toutes les galaxies) des sources radio compactes d'un rayon de quelques années lumière dont la structure et le flux varient au cours du temps, et qui semblent se déplacer dans certains cas avec

des vitesses supérieures à celle de la lumière, du moins si l'on suppose ces objets à leur distance cosmologique. Bien que ces sources se trouvent aussi bien dans de simples radio galaxies que dans des quasars, cette découverte relança la controverse du redshift, alors qu'elle résoud en fait le problème de la "catastrophe Compton" soulevé par la courte échelle de temps de la variabilité et l'observation d'un spectre synchrotron self absorbé. (Explication: le petit diamètre déduit de la variabilité dans la région self absorbée du spectre implique un champ magnétique faible; le fait que le rayonnement synchrotron soit self absorbé implique une forte densité d'énergie radiative synchrotron; la densité d'énergie magnétique est donc inférieure à la densité d'énergie radiative et l'émission Compton doit dominer, ce qui signifie que les photons radio sont diffusés par les électrons ultra-relativistes dans les domaines UV puis Gamma et ne devraient pas être observés. En supposant une expansion des sources à une vitesse très proche de celle de la lumière - un facteur de Lorentz Γ supérieur à l'unité - on résoud le problème car l'échelle de temps de la variabilité est alors sous-estimée par un facteur Γ . L'expansion relativiste est compatible avec l'idée de sources éjectées avec une vitesse très voisine de celle de la lumière qui, à leur tour, permettent d'expliquer - par un simple effet de projection et à cause de la vitesse finie de la lumière - l'observation de vitesses apparentes superlumineuses.) Par la suite on observa qu'à différentes échelles - depuis une année lumière jusqu'à plusieurs millions d'années lumière - les cartes radio ressemblent à des poupées gigognes emboîtées, ce qui indique l'existence d'une direction privilégiée d'éjection des particules relativistes se maintenant pendant toute la durée de la vie des radio sources, c'est à dire au moins pendant 10^7 ans. Dans la plupart des cas un "jet" radio reliant les sources compactes à celles de très grande échelle porte témoignage de cette direction privilégiée et de la relation entre les régions les plus centrales du noyau et les régions les plus lointaines de la radio galaxie ou du quasar.

Les observations X et Gamma effectuées dans les années soixante dix et quatre vingt (principalement avec Uhuru, Cos B, HEAO1 et 2, puis Exosat), dans le domaine infrarouge avec IRAS pour les plus récentes, et récemment dans le domaine millimétrique, permirent d'établir que la distribution spectrale d'un AGN prototype - qu'il soit radio émetteur ou non - s'étend depuis le millimétrique jusqu'aux X durs avec une loi de puissance d'indice voisin de l'unité, et présente des "bosses" dans l'infrarouge proche et surtout dans l'ultraviolet lointain. L'énergie est donc rayonnée avec une efficacité pratiquement comparable dans 10 décades de longueur d'onde, et la majeure partie de la puissance se trouve probablement dans le domaine UV- X mous d'une part, et dans celui des X durs et des Gamma d'autre part.

Enfin une dernière observation est à ajouter à cette panoplie, et c'est peut-être la plus importante. Les photographies profondes obtenues au cours de ces dernières années ont montré que la structure des quasars et des galaxies de Seyfert est très souvent perturbée par l'interaction avec une galaxie proche. L'activité semble donc non seulement liée à l'existence d'une concentration de masse au centre d'une galaxie, mais également à l'existence d'une masse à proximité et à celle d'une perturbation dynamique.

Concernant la nature du moteur des NAGs, diverses hypothèses ont été envisagées successivement.

Il faut d'abord se rappeler dans quel contexte ont été découverts les quasars. A la fin des années cinquante, la structure interne et l'évolution stellaire s'étaient imposées comme la plus remarquable des constructions théoriques, avec pour apogée l'explication de la genèse des éléments dans les coeurs des étoiles. Ce succès incita certains de ceux qui avaient contribué à son élaboration (B2FH en particulier) à élargir le champ d'application de cette théorie aux quasars, mais en remplaçant les simples étoiles par des "étoiles supermassives" de 10^6 masses solaires. La source d'énergie était donc les réactions nucléaires, mais rapidement il s'avéra que leur rendement n'était pas suffisant pour expliquer les objets plus lumineux, à moins d'invoquer des masses beaucoup plus grandes. Par ailleurs, comme ces étoiles sont hautement instables, il fallut les stabiliser en leur donnant une forte rotation ou un champ magnétique intense: ce furent les "pulsars géants" ou les "rotateurs géants", très à la mode après la découverte des vrais pulsars. Cependant l'absence de toute périodicité dans les variations conduisit, avec d'autres arguments, à les rejeter également.

Il y eut aussi les explosions de supernovae, au sein d'un amas dense d'étoiles, toujours dans la lignée d'une source nucléaire. Un des arguments utilisé pour les écarter est que la variabilité des objets les plus lumineux (et surtout la variabilité ultrarapide en X) implique l'explosion de milliers de supernovae en même temps. Les supernovae ne sont toutefois pas complètement abandonnées, surtout pour expliquer les galaxies de Seyfert, et encore maintenant quelques astronomes sont de chauds défenseurs de ce type de modèle.

Dès 64 toutefois Zeldovich et Salpeter, séparément, avaient suggéré que la source d'énergie pourrait être un Trou Noir supermassif. L'idée sera reprise en 1969 par Linden Bell et Rees, et ne cessera de s'imposer depuis comme la meilleure solution. Il est évident toutefois que rien ne prouve définitivement (et peut-être ne prouvera jamais) la validité de ce modèle, qui se limite pour le moment à être purement explicatif, mais non encore prédictif.

II. Le Présent

II.1. Le rappel des faits

Au début des années quatre vingt, on disposait donc concernant les NAGs d'un ensemble de faits ayant lentement émergé d'un écheveau embrouillé d'observations, et qui allaient permettre de bâtir un modèle:

- ces objets sont tous des noyaux de galaxies; or l'étude dynamique et celle du profil de luminosité des régions centrales des galaxies prouve l'existence d'une concentration d'étoiles dans le noyau, dépassant parfois $10^9 M_{\odot}$; le phénomène NAG est donc lié à l'existence d'une grande concentration de masse au sein d'un fort potentiel gravitationnel,
- ils émettent une puissance considérable, depuis 10^{43} ergs/s pour les Seyfert les plus faibles, jusqu'à 10^{48} ergs/s pour les quasars les plus lumineux,

- leurs dimensions sont très petites, atteignant quelques heures lumière pour la source de rayonnement X,
- leur spectre s'étend sur 10 décades, et une grande proportion de la puissance est concentrée dans l'infrarouge, l'UV et l'X dur,
- ils contiennent du gaz à grande vitesse,
- ils émettent des particules relativistes dans une direction privilégiée dont la cohérence subsiste pendant au moins 10^7 ans.

II. 2. Le modèle du Trou Noir supermassif: ses forces et ses faiblesses

Le modèle de l'accrétion par un objet compact, ou plus précisément par un Trou Noir supermassif, permet de rendre compte de l'ensemble de ces faits, et pour le moment aucun autre modèle ne le peut.

- l'accrétion sur un objet très compact est le mécanisme le plus efficace de conversion de la masse en énergie. Un taux de 5% est attendu autour d'un Trou Noir sans rotation et jusqu'à 40% autour d'un Trou Noir avec rotation. On peut le comparer aux quelques fractions de % des réactions nucléaires.
- Si l'énergie est produite par accrétion, la luminosité est limitée, du moins pour un processus stationnaire et si le gaz complètement ionisé, à une valeur appelée "luminosité d'Eddington", obtenue en égalant la force radiative à la force gravitationnelle:

$$\sigma_T L_{\text{Edd}} / (4\pi R^2 c) = M_{\text{TN}} m_p / (4\pi R^2), \text{ ou } L_{\text{Edd}} = 1.3 \cdot 10^{47} (M/10^9 M_\odot) \text{ ergs/s}$$

ce qui signifie que le rayon caractéristique de production de l'énergie, voisin de 10 rayons gravitationnels ($R_G = 2GM_{\text{TN}}/c^2 = 1.3 \cdot 10^5 M_{\text{TN}}/M_\odot$), est de l'ordre de 10^{15} cm, soit quelques heures lumière pour $M_{\text{TN}} = 10^9 M_\odot$. Une telle masse est nécessaire pour obtenir une luminosité d'Eddington de 10^{47} ergs/s, puissance d'un quasar moyen. Donc dimension et puissance rayonnée correspondent à ce qui est cherché.

- Dans un processus d'accrétion, l'énergie sera produite principalement dans 2 domaines:

- celui qui correspond à l'émission d'un gaz optiquement épais, donc dont la température satisfait à la relation $\sigma T^4 = 3GM_{\text{TN}}M / (8\pi R^3)$, correspondant à $T \approx 10^5$ K pour une masse de $10^9 M_\odot$ et une luminosité voisine d'Eddington. L'émission se situera donc dans l'UV lointain et aura un spectre voisin de celui d'un corps noir.

- celui qui correspond à l'émission d'un gaz optiquement mince virialisé, dont la température satisfait donc à la relation: $kT/m_p = GM_{\text{TN}}/R$, correspondant à $T \approx 10^{11}$ ou 10^{12} K. L'émission sera donc dans les X durs et les Gamma.

En définitive le spectre attendu est celui qui est observé.

- une direction privilégiée est créée, celle de l'axe de rotation du Trou Noir, qui est en fait celle de l'axe de rotation de la matière accrétée. Dans les premiers temps, l'accrétion sphérique était privilégiée. Depuis la mise en évidence de la bosse dans les UV et les X mous, c'est plutôt l'accrétion avec un moment angulaire qui est préférée, car cette bosse est identifiée avec le rayonnement d'un disque d'accrétion. La viscosité à l'intérieur du disque freine les particules qui perdent une partie de leur moment angulaire en rayonnant et finissent par pénétrer dans le Trou Noir. Par ailleurs, on montre qu'au voisinage immédiat du Trou Noir le disque s'épaissit et qu'une sorte de "tunnel" se forme le long de l'axe de rotation, dans lequel des particules relativistes peuvent facilement être accélérées et collimatées. Ce qui permet d'expliquer le jet et les sources radio compactes. Enfin il se produit au voisinage du Trou Noir et à la surface du disque des éjections de gaz à grande vitesse (vents).

- Enfin, "last but not least", on montre (en particulier par des simulations numériques faisant intervenir l'évolution stellaire) que le destin inéluctable d'un amas dense d'étoiles est d'évoluer - par collisions et coalescence - en un temps relativement court vers un Trou Noir supermassif. Celui-ci continuera à accréter étoiles et gaz tant qu'il s'en trouvera dans son champ gravitationnel.

Décrit très schématiquement, c'est le modèle développé actuellement par de nombreux groupes, et qui semble pouvoir expliquer les caractéristiques les plus importantes des NAGs. Ses points faibles sont de deux sortes:

- il faut, pour obtenir un Trou Noir de $10^9 M_\odot$ en un temps de l'ordre de 10^9 ans - celui correspondant à l'époque après le Big-Bang où ont commencé à rayonner les quasars de plus grand z découverts jusqu'à maintenant (4.5) - supposer qu'à une époque encore plus reculée il existait un amas d'étoiles de $10^9 M_\odot$ occupant environ 1 pc^3 . Comment se serait formé un tel amas d'étoiles alors que les galaxies n'existaient vraisemblablement pas encore? Nul n'a encore la moindre solution à proposer.

- le problème de "l'alimentation" du Trou Noir est également un challenge. Là encore il faut postuler l'existence d'un amas dense d'étoiles autour du Trou Noir, à l'intérieur de son "rayon d'accrétion", c'est à dire du rayon au dessous duquel la gravitation est déterminée par le Trou Noir. Dans sa période de croissance, le Trou Noir absorbe ces étoiles qui sont brisées par effet de marée et transformées en gaz très chaud capable de rayonner efficacement avant de disparaître dans l'horizon du Trou Noir. Lorsque le Trou Noir dépasse quelques $10^8 M_\odot$, les étoiles ne sont plus brisées (car le "rayon de marée" à l'intérieur duquel les étoiles sont brisées croît comme $M_{\text{TN}}^{1/3}$ tandis que celui du Trou Noir est proportionnel à M_{TN}) et à moins que la densité de l'amas soit encore suffisante pour que les collisions entre étoiles assurent le relai de l'effet de marée, le Trou Noir n'accrètera plus de gaz, mais des étoiles entières, et cessera par conséquent de "rayonner".

En tout état de cause ce modèle est basé uniquement sur l'hypothèse d'une densité "locale" d'étoiles très importante, alors que nous avons vu que le phénomène NAG est lié également à l'environnement, et en particulier à l'interaction avec une galaxie perturbatrice. L'idée s'est donc imposée qu'une fois construit, c'est à dire ayant atteint une masse de $10^9 M_\odot$, ayant lancé ses premiers feux de quasar, et étant devenu éventuellement "invisible" par épuisement de son environnement immédiat, le Trou Noir étant potentiellement présent est capable d'être "réactivé" par un apport de gaz venant de l'extérieur. Ce gaz est effectivement disponible lorsque la galaxie hébergeant le Trou Noir passe à proximité d'une autre galaxie riche en gaz. Certains proposent que des instabilités dynamiques, liées à l'interaction, pourraient drainer le gaz vers le centre. Mais si l'on peut ainsi amener le gaz depuis quelques dizaines de kpc à environ un kpc du centre, on est loin de savoir le faire pénétrer jusqu'au cœur du noyau, jusqu'au rayon du Trou Noir. Comme le faisaient remarquer les auteurs d'un article récent, après tout il s'agit de rien

moins que de faire franchir 8 ordres de grandeur au rayon de ce gaz! En fait le problème est moins dramatique, car lorsque le gaz atteint un rayon d'environ un parsec ($10^4 R_G$), il pénètre dans la sphère d'influence du Trou Noir, et là, par l'intermédiaire du disque d'accrétion par exemple, se trouve inéluctablement entraîné vers le Trou Noir.

II. 3. Comment les différentes classes d'objets s'insèrent-elles dans le modèle?

Ce modèle est-il capable de rendre compte de diverses classes d'objets, dont le lien avec les quasars ne paraît pas toujours évident a priori? Car, comme il a été rappelé au début de cet article, les NAGs, s'ils ont effectivement à l'origine un phénomène commun, le cachent volontiers sous des apparences très diverses.

Les radio galaxies s'insèrent bien dans ce schéma. Elles ont une faible luminosité, mais manifestent une intense activité non thermique. Par ailleurs ce sont toujours des galaxies elliptiques géantes, caractérisées par conséquent par un potentiel gravitationnel central très grand. Dans certaines, la masse du noyau - qui n'est pas forcément celle du Trou Noir - est connue et supérieure à $10^9 M_\odot$. L'idée est donc que les radio galaxies contiennent dans leur noyau des Trous Noirs presque "morts" de grande masse qui auraient connu une période quasar, et que leur activité faible provient principalement de l'extraction de l'énergie de rotation du Trou Noir.

Pour ce qui est des noyaux des galaxies de Seyfert, on a vu qu'ils semblent être simplement des quasars de faible luminosité. Mais cette faible luminosité est-elle liée à un faible taux d'accrétion ou à une masse petite du Trou Noir? La question est d'importance car elle concerne toute l'évolution cosmologique des quasars, et le fait qu'ils aient été beaucoup plus lumineux dans le passé qu'actuellement. Malheureusement les observations ne permettent pas encore de savoir si les noyaux des galaxies de Seyfert rayonnent près de leur luminosité d'Eddington, comme c'est certainement le cas des quasars lumineux, ou avec une puissance 100 fois plus faible: la forme de la "bosse" du continu dans l'UV plaide pour la première hypothèse, et les largeurs des raies pour la seconde. Dans le premier cas la masse du Trou Noir dans les galaxies de Seyfert serait 1000 fois plus faible que dans les quasars (dans le rapport des luminosités), dans le deuxième elle serait presque du même ordre. Dans tous les cas, on penche plutôt pour des objets qui n'auraient *pas encore* connu leur maximum d'activité, mais les raisons de cette préférence sont assez obscures.

Voici encore deux exemples d'objets dont les propriétés sont à première vue fort différentes de celles des quasars standards, et qu'il est possible d'expliquer par de simples effets d'orientation:

1. les lacertides, découvertes en 1972, du nom de leur prototype B Lacertae, qui, seuls de tous les AGNs, ne montrent pas de raies en émission, ou seulement de très faibles raies. Ce sont des objets très lumineux, hautement variables et souvent fortement polarisés, présentant systématiquement des sources radio compactes intenses. Or si l'on admet - comme cela a été montré précédemment - que les électrons relativistes sont éjectés dans une direction donnée, il s'ensuit automatiquement un effet d'"aberration relativiste", c'est à dire une amplification du rayonnement dans la direction de l'axe du jet. Tout le rayonnement synchrotron - et nous avons dit qu'il s'étend jusqu'au domaine visible - sera donc amplifié lorsque l'observation est effectuée dans une direction proche de celle de l'éjection., contrairement aux rayonnements thermiques isotropes, comme les raies d'émission, qui disparaîtront alors sur le fond continu intense. La variabilité est accrue. D'autre part, comme l'amplification dépend également du facteur de Lorentz de la source, qui est grand lorsque la source est encore petite et n'a pas subi de ralentissement, les sources compactes seront intensifiées par rapport aux sources de plus grande échelle. Tout concorde donc pour conclure que les lacertides sont des quasars ou de simples radio sources, vues dans une direction proches de celle de l'éjection.

2. parmi les galaxies de Seyfert, il s'en trouve (qu'on appelle Seyfert de type 1) qui ont des propriétés semblables en tout point à celles des quasars, et d'autres, plus mystérieuses jusqu'à ces derniers temps, qui en diffèrent profondément. On les appelle des Seyfert de type 2, et elles se caractérisent par l'absence de raies très larges (elles présentent des raies de quelques centaines de km/s, tandis que dans les Seyfert 1 et les quasars la largeur des raies est de plusieurs milliers de km/s). Contrairement aux quasars et aux Seyfert 1, leur rayonnement visible est essentiellement d'origine stellaire, et leur rayonnement X est très faible. Depuis 1985 la nature de ces objets a été en partie comprise, car on a découvert en lumière polarisée dans plusieurs Seyfert 2 un spectre de raies identique à celui des Seyfert 1. On pense donc que les Seyfert 2 sont des Seyfert 1 dont les régions centrales (produisant le rayonnement X et les raies très larges) nous sont cachées par un disque épais de poussière et que nous les voyons, cette fois, dans la direction perpendiculaire à l'axe du disque. Le gaz chaud baignant l'ensemble diffuse la lumière centrale en la polarisant et nous en permet l'observation même dans la direction du disque. Il est probable toutefois que cette explication n'est pas suffisante pour rendre complètement compte du phénomène Seyfert 2, car certaines d'entre elles semblent être plus riches en poussières que les Seyfert 1, et le gaz émettant les raies est associé généralement à une radio source absente dans les Seyfert 1. Il est possible que les Seyfert 2 constituent une étape intermédiaire entre les NAGs et les galaxies à flambées d'étoiles (dont certaines, découvertes grâce au satellite IRAS, ont dans l'infrarouge une puissance comparable à celle des quasars et présentent des raies semblables à celles des Seyfert 2). Mais c'est un autre sujet sur lequel nous ne pouvons nous étendre.

Enfin il convient de terminer ce tour d'horizon avec des objets beaucoup moins spectaculaires qu'on nomme les "Linéers" (Low Ionization Narrow Emission Region), auxquels se rattachent environ 30% des noyaux de galaxies. Comme leur nom l'indique, ces objets présentent un spectre de faible ionisation. Mais il est assez particulier et on pense qu'il est excité par un rayonnement ultraviolet non thermique. De là à imaginer que ces noyaux contiennent également un Trou Noir, il n'y a qu'un pas, qui est franchi par certains. Le pas suivant est alors de supposer que tous les noyaux de galaxies contiennent un Trou Noir, et présentent à des degrés divers une activité de "mini quasars" ou de "micro quasars". Le noyau de notre Galaxie en donne l'exemple: source X variable et rayonnement radio synchrotron proviennent d'une région de dimension inférieure à une

UA. Il reste à déterminer la masse de l'éventuel Trou Noir qui en serait la cause. On sait seulement pour le moment qu'elle est supérieure à $100 M_{\odot}$...

III. Le futur

L'avenir des NAGs se présente bien.

D'abord il reste un certain nombre de problèmes théoriques tout à fait fondamentaux à résoudre. Nous avons mentionné celui de l'origine de l'amas dense nécessaire pour une croissance rapide du Trou Noir, puis celui de l'approvisionnement du Trou Noir dans sa phase quasar. Mais de façon générale c'est toute la question de l'évolution cosmologique des NAGs, avec en filigrane la question de la relation avec la formation des galaxies, qui est encore un mystère et n'a pas encore reçu le commencement d'une réponse.

D'autres sujets relatifs à ce modèle sont en plein essor. Le problème des "jets", de leur accélération, et surtout de leur collimation sur des échelles de $10^6 pc$. L'origine et la dynamique du gaz émettant les raies, qui ne sont pratiquement pas encore comprises. Les mécanismes d'émission dans les domaines infrarouge, X et Gamma, qui nécessitent des observations nouvelles. La physique du disque d'accrétion qui est encore très mal connue, et repose généralement sur des hypothèses "standard" concernant l'origine de la viscosité, qui sont loin d'être bien établies, etc...

Mais c'est probablement à travers les observations qu'on peut espérer les plus grands progrès dans les dix années à venir.

C'est d'abord à une meilleure connaissance de la distribution spectrale qu'on s'attachera. En effet, jusqu'ici seuls les objets les plus proches ont été observés jusqu'à maintenant dans les domaines infrarouge, UV, X et Gamma (dans ce domaine seulement 3 objets ont été détectés). Outre les percées qui seront effectuées par ISO et par les différents satellites X et Gamma, le Télescope Spatial va permettre de franchir un bond remarquable: songeons par exemple qu'il permettra d'observer des quasars de redshift 3 ou 4 (qui sont beaucoup trop faibles pour être observés par IUE) jusqu'à $1200\text{\AA}$, c'est à dire jusqu'à $250\text{\AA}$ dans le système au repos! C'est un domaine quasi inconnu qui sera alors accessible, le domaine de rayonnement du disque d'accrétion, et celui où est peut-être émis l'essentiel de la puissance des NAGs.

L'étude de la variabilité, et surtout de la corrélation des variabilités entre différents domaines de longueur d'onde, et entre les raies et le continu, est un puissant moyen pour connaître la structure des régions émissives. Dans le domaine UV elles sont liées à la nature du disque d'accrétion. Déjà une fraction du temps du satellite IUE est dédié à l'observation régulière d'un objet, NGC 5548, ainsi que celui de divers télescopes optiques, et on peut penser que ce type de programme se généralisera.

Des études morphologiques à petite échelle, en radio grâce à la VLBI, et en infrarouge et visible grâce au Télescope Spatial et surtout dans un avenir plus lointain grâce au VLT, permettront certainement de préciser les liens entre les différentes composantes. A l'autre extrémité l'étude de l'environnement du noyau et de la galaxie hôte, grâce aux grands télescopes et, espérons le, à l'évolution des détecteurs qui ont déjà fait faire à ce sujet un bond spectaculaire au cours de ces dernières années, permettra certainement de préciser le rôle des interactions dans le fonctionnement des NAGs ainsi que leur liens avec la formation des galaxies.

Sur le plan cosmologique, peu abordé dans cet article, il est clair que l'apport du Télescope Spatial et des grands télescopes sera essentiel. La fonction de luminosité des quasars pourra être déterminée à des grands redshifts. On saura en particulier si toutes les galaxies géantes sont passées par un stade de quasar et de radio galaxie.

Tout un pan de l'étude des quasars a été laissé de côté ici: celui dans lequel les quasars servent de "sonde" du milieu intervenant (mirages gravitationnels, raies en absorption intergalactique). Il ne faut toutefois pas oublier que dans ce domaine également il est nécessaire de bien connaître les quasars, en particulier leur luminosité intrinsèque, leur propriétés de variabilité et la nature de leur environnement immédiat, pour éviter des interprétations erronées.

Suzy Collin