Deuxième partie

Dynamique du gaz moléculaire dans les noyaux actifs de galaxies

Chapitre 5

Les Noyaux Actifs de Galaxies

L'étude des Noyaux Actifs de Galaxies (AGN) représente une part importante de la recherche contemporaine en astrophysique. Ce domaine de recherche fait appel à toutes les techniques de l'instrumentation et de l'observation (du domaine radio aux rayons X), à une grande partie des connaissances astrophysiques (physique stellaire et du milieu interstellaire, dynamique des galaxies, cosmologie) et à la physique fondamentale (accretion, MHD, rayonnement et matière au voisinage d'un trou noir). Dans ce chapitre, une description très générale de ces objets est faite. Le but n'est pas de rassembler toutes les connaissances actuelles sur le sujet mais plus de donner une description générale (phénoménologie et classification) ainsi qu'un aperçu de la compréhension que l'on a de ces objets (modèles). Le problème de l'approvisionnement en combustible est également posé. De nombreux ouvrages de référence décrivent les AGNs et la physique sous-jacente, par exemple, Robson (1996); Peterson (1997); Krolik (1999); Combes et al. (1995).

5.1 Phénoménologie

Un Noyau Actif de Galaxie se distingue de la région centrale d'une galaxie ordinaire essentiellement par le caractère non stellaire de son émission. Cette propriété se manifeste par les quatre principales caractéristiques suivantes :

Une très grande énergie

Les objets les plus lumineux du ciel identifiés à ce jour sont des AGNs. Leur luminosité bolométrique est comprise entre 10^{42} et 10^{48} erg s^{-1} alors qu'une galaxie ordinaire émet typiquement 10^{44} erg s^{-1}. Pour produire de telles quantités d'énergie par le seul rayonnement d'une population normale d'étoiles, il faudrait qu'un AGN contienne jusqu'à plusieurs milliers de milliard d'étoiles. Compte tenu de la taille des AGNs estimée de l'ordre du jour lumière ou 10^{-3} parsec (une galaxie ordinaire mesure plusieurs dizaines de milliers de parsecs et contient de l'ordre de cent milliards d'étoiles) cela semble impossible.

Une émission large bande

Le spectre intégré d'une galaxie normale est proche de la somme des spectres des étoiles qui la composent. Son aspect global ressemble à celui d'un corps noir dont une grande partie de l'energie est émise dans une bande assez étroite. Celui d'un AGN est beaucoup plus plat et ne peut être expliqué en termes d'émission de corps noir à une température unique ou composé de plusieurs températures dans un petit intervalle. Des processus d'émission non-thermiques tels que l'emission synchrotron doivent être invoqués pour expliquer la forme générale (ou continuum) du spectre. On peut modéliser très approximativement la distribution spectrale d'énergie d'un AGN sur une bande de fréquence par une loi de puissance $F_\nu = \nu^{-\alpha}$ avec un indice spectral α proche de 1.

Des raies en émission

Alors que le spectre d'une galaxie ordinaire ne présente en général que des raies en absorption d'origine stellaire, celui des AGNs montre de fortes raies en émission. Ces raies proviennent d'un gaz ionisé par un continu énergétique (UV, X). Les raies les plus intenses sont celles de la série de Balmer de l'hydrogène, la raie Lyman α de l'hydrogène, et des raies d'ions abondants (par exemple MgII, CIII et CIV).
On distingue en général deux types de raies en émission : des raies larges dont la largeur à mi-hauteur (FWHM) peut atteindre 10 000 km s^{-1} et des raies plus étroites de FWHM de l'ordre de 1 000 km s^{-1}. Les raies interdites n'apparaissent que dans la catégorie des raies étroites. On en déduit que les raies étroites proviennent d'une région (appelée NLR pour Narrow Line Region) à faible densité ($n_e \approx 10^5$ cm^{-3}). De l'absence de certaines raies semi-interdites dans la catégorie des raies larges on estime la densité de la région d'émission des raies larges (BLR pour Broad Line Region) à $n_e \approx 10^9$ cm^{-3}.

Variabilité

La plupart des AGNs montre une variabilité en luminosité à toutes les longueurs d'ondes et echelles de temps auxquelles ils ont pu être étudiés. L'amplitude des variations change selon la longueur d'onde, l'échelle de temps considérée et d'un AGN à l'autre. On observe une corrélation entre les variations des raies en émission et celles du continu. Cela confirme l'hypothèse selon laquelle les raies sont émises par un gaz photoionisé par un continu énergétique variable. L'étude du décalage temporel des variations des raies par rapport à celles du continu permet d'estimer la distribution du gaz dans le noyau.
Les raies étroites ne varient pas. Cela implique que la NLR est plus étendue que la distance parcourue par l'émission continue durant le temps caractéristique des variations. Les raies larges peuvent varier en intensité sur une journée. L'étendue de la BLR doit par conséquent être de l'ordre du jour lumière c.à.d. 2.54×10^{15} cm.

5.2 Classification

Les caractéristiques du rayonnement décrites précédemment apparaissent de façon plus ou moins accentuées selon les AGNs. De plus, les AGNs étant parmi les objets les plus brillants du ciel quelle que soit la longueur d'onde considérée, ils ont pu être étudiés indépendamment dans les différents domaines spectraux. Il n'a parfois été découvert que tardivement qu'il s'agissait d'une même classe d'objets. Tout ceci a conduit à une classification dont les séparations ne sont pas toutes justifiées par des propriétés physiques intrinsèques. Cette classification reste cependant utilisée pour distinguer les AGNs selon leurs propriétés spectrales ou simplement leur apparence. Les grandes classes d'AGN sont les suivantes :

Les quasars
: Ce sont des AGNs qui ont d'abord été observés en radio lors de relevés dans les années 50. Il a ensuite été découvert que pour beaucoup d'entre eux l'émission optique était encore plus importante. Ils ont alors été séparés en deux catégories : les RQQs (Radio Quiet Quasars) aussi appelés QSOs (Quasi Stellar Objects pour leur aspect de source ponctuelle sur les images optiques) qui émettent relativement peu en radio, et les RLQs (Radio Loud Quasars) qui émettent plus fortement en radio.

Les Seyferts
: Les Seyferts sont des galaxies à noyau actif qui ont été étudiées dès 1943 par Carl Seyfert. La dénomination de Seyfert ne s'applique donc pas à des noyaux de galaxies mais à des galaxies entières. La distinction entre un noyau de Seyfert et un quasar repose essentiellement sur un critère d'apparence : les noyaux de Seyferts sont les AGNs dont on distingue clairement la galaxie hôte (plus précisemment pour lesquelles la galaxie est résolue sur les clichés du Palomar Sky Survey) ou encore les AGNs dont la luminosité est comparable à celle de la galaxie hôte. Par opposition un quasar typique est environ 100 fois plus lumineux que la galaxie hôte. Des études morphologiques ont suggéré que la plupart sinon toutes les Seyferts sont des galaxies spirales.
: Selon qu'il y a présence ou non des raies en émission larges on classe les Seyferts en 2 catégories : Seyfert de type 1 lorsque ces raies sont présentes, Seyfert de type 2 sinon.

Les Radio Galaxies
: Certains AGNs sont associés à des galaxies émettant fortement en radio, les Radio Galaxies. Ce sont en général des galaxies elliptiques géantes. L'AGN est alors mis en évidence par les systèmes de raies en émission. Comme pour les Seyferts on distingue deux types de radio galaxies : les radio galaxies à raies larges et étroites (BLRGs) et les radio galaxies à raies étroites (NLRGs).

Les LINERs
: Une classe de galaxies dont la région du noyau émet dans des raies correspondant à une faible ionisation (LINERs pour Low Inoization Nuclear Emission-line Region galaxies) a été mise en évidence par Heckman (1980). Les LINERs sont assez répandus et pourraient réprésenter jusqu'a 50% des galaxies spirales (Ho et al. 1994).
: La distinction entre LINERs, Seyferts et régions HII n'est pas toujours évidente. Baldwin et al. (1981) ont cependant montré qu'il était possible de les différencier en comparant les rapports d'intensité de deux paires de raies.

Le rapport entre LINER et AGN n'est pas encore très clair. Dans certains cas les LINERs pourraient simplement être des Seyferts de très faible luminosité mais le même type de spectre pourrait aussi être produit par des courants de refroidissement, des vents provenant de flambées d'étoiles ou un gaz chauffé par chocs (Heckman 1987; Filippenko 1992).

Les BL Lac et les OVVs

Une petite proportion d'AGNs varie en intensité de façon importante (de l'ordre de 0.1 mag) sur des échelles de temps de l'ordre du jour. En plus des variations en flux, le rayonnement de ces AGNs présente une polarisation plus importante que la normale (quelques pourcents) qui varie en amplitude et orientation. Ces AGNs constituent la classe des OVVs (pour Optically Violent Variables).
Certains AGNs de variabilité similaire ne présentent pas de fortes raies en émission. Il sont nommés "BL lac" d'après l'étoile variable BL Lacertae qui a finalement été identifiée comme étant un AGN.
Les BL Lac et les OVVs émettent fortement en radio, ils sont aussi appelés blazars.

5.3 Les modèles

En raison de leur confinement (< 1 pc) les AGNs ne sont en général pas résolus par les instruments d'observation. Il est donc difficile d'obtenir des informations directes sur la nature de ces objets et sur les processus physiques qui y sont mis en œuvre. La connaissance que l'on a de ces objets passe donc par une modélisation. Un modèle doit rendre compte des différentes propriétés du rayonnement intégré sur toute la région englobant l'AGN et expliquer la variété des AGNs observée.

5.3.1 Un "moteur central"

Malgré la persistance de nombreuses interrogations, il semble que l'on s'achemine vers un consensus général pour le modèle dit "standard". Dans ce modèle la grande quantité d'énergie rayonnée serait attribuée à un "moteur central" constitué d'un trou noir accrétant de la matière chauffée à haute température dans un disque d'accrétion dissipatif. La présence d'un trou noir au centre est fortement suggérée par la masse de l'objet central et par le fait que la conversion de la masse en énergie par perte d'énergie gravitationnelle au voisinage d'un trou noir est la plus efficace que l'on connaisse (voir Section 5.4).
La masse centrale peut-être évaluée en suivant l'argument dit de la "luminosité d'Eddington". Pour simplifier l'on suppose que la source émet de façon isotrope et qu'elle est stable. Considérons le cas d'un gaz d'hydrogène complètement ionisé. Pour qu'il y ait accrétion de matière il faut que la force de gravitation soit supérieure à la pression de radiation. La luminosité mesurée donne la valeur de la pression de radiation et permet donc de calculer une limite inférieure pour la masse centrale.

Le flux d'énergie à une distance r du centre est donnée par $F = L/4\pi r^2$, où L est la luminosité (en ergs s^{-1}) de la source. La quantité de mouvement transportée par un photon étant E/c, la pression (qui est un flux de quantité de mouvement) est donnée par :

$$P_{\rm rad} = \frac{E}{c} = \frac{L}{4\pi r^2 c} \tag{5.1}$$

La force exercée par cette pression sur un électron est obtenu en multipliant par la section efficace d'interaction avec un photon, c.à.d. la section efficace de Thomson, σ_e :

$$\boldsymbol{F}_{\rm rad} = \sigma_e \frac{L}{4\pi r^2 c} \hat{\boldsymbol{r}} \tag{5.2}$$

La force sur les protons est négligeable et les deux sont liés électromagnétiquement. Pour contrebalancer cette force, la force de gravitation $\boldsymbol{F}_{\rm grav} = -GMm_p\hat{\boldsymbol{r}}/r^2$, qui s'exerce sur une paire électron-proton (la masse de l'électron est négligeable) doit être supérieure ou égale :

$$\begin{aligned} |\boldsymbol{F}_{\rm rad}| &\leq |\boldsymbol{F}_{\rm grav}| \\ L &\leq \frac{4\pi G c m_p}{\sigma_e} M \\ &\approx 1.26 \times 10^{38} (M/M_\odot) \text{ erg s}^{-1} \end{aligned} \tag{5.3}$$

Cette équation est connue sous le nom de limite d'Eddington. Ainsi pour un quasar de luminosité typique $L_{\rm QSO} = 10^{46}$ ergs s^{-1} la masse centrale doit être supérieure à $M_E \sim 10^8 M_\odot$.

Il est possible d'estimer la masse de l'objet central plus directement par l'application du théorème du viriel. En effet, il est possible de cartographier la BLR par réverbération, c. à d. par l'étude du délais temporel entre en les variations d'intensité des raies larges et celles du continu. Cette méthode permet d'obtenir la distribution du gaz spatialement et en vitesse. En supposant que l'élargissement des raies est dû au décalage Doppler lié au mouvement dans le champ gravitationnel, il est possible d'obtenir la masse de la source centrale. Les valeurs obtenues sont typiquement d'un ordre de grandeur plus grandes que M_E.

Il est également possible d'observer directement le disque d'accrétion en interférométrie à très grande ligne de base (VLBI). Le déplacement de masers de vapeur d'eau dans le disque d'accrétion peut être directement mesuré sur un intervalle de quelques années (Moran et al. 1999).

Dans ce modèle, la grande énergie observée serait donc due à la libération de l'énergie gravitationnelle de la matière accrétée et l'émission thermique serait le résultat du réchauffement du disque d'accrétion par l'énergie libérée. L'existence de régions de différentes densités, températures et épaisseurs réparties radialement dans le disque d'accrétion permettrait d'expliquer les différentes caractéristiques du spectre (Collin-Souffrin & Dumont 1990). Les raies larges en émission seraient produites par photoinonisation de nuages de 10^{16} m^{-3} entourant le trou noir. La variabilité serait due à des taux d'accrétion variables ou à des instabilités à l'intérieur du disque d'accrétion. L'éjection de matière le long de l'axe de rotation expliquerait les jets relativistes observés de part et d'autre de nombreux quasars.

5.3.2 Les flambées d'étoiles

Des flambées d'étoiles (ou starbursts) pourraient également être à l'origine des grandes quantités d'énergie observées et expliquer certaines propriétés du rayonnement des AGNs. Dans le modèle dit "à flambée d'étoiles" proposé par Terlevich & Melnick (1985) ce serait même la principale source d'énergie et ce modèle constituerait une alternative au modèle standard.

D'après ce modèle, un AGN serait le résultat de l'évolution d'un amas massif d'étoiles dans un milieu de haute metallicité et très dense. L'évolution de l'amas se ferait en quatre grandes phases. Les supernovae (SN) produites après 10^7 ans et leurs restes seraient à l'origine d'une grande émission non thermique radio ainsi que d'une émission dans le domaine X. La variabilité serait due aux flashs de SN et aux instabilités de refroidissement dans les enveloppes des restes de SN en expansion.

Ce modèle a été appuyé par les observations de Filippenko (1989) de SNs dont les spectres montrent de grandes ressemblances avec les spectres de Seyfert 1 et de QSOs. L'observation d'autres SNs ont également confirmé ce résultat. Cependant certaines caractéristiques telles que la forte émission radio de certains quasars et les jets ne peuvent être expliqués par ce modèle. D'autre part l'amas central devrait être anormalement compact. Les observations avec le téléscope spatial Hubble (HST) montrent, en effet, que les AGNs ne sont pas résolus à la résolution la plus haute c.à.d. 0.05 arcsecondes. Pour l'AGN le plus proche NGC 4395 cela donne une limite supérieure de 0.7 pc (Filippenko et al. 1993).
L'étude des populations stellaires devrait permettre de mettre en évidence les starbursts décrits par ce modèle. Or l'application de méthodes inverses de synthèse de population stellaire sur un échantillon d'AGNs n'a pas révélé de différence notable entre les populations des AGNs et celles de galaxies normales (cf Moultaka 2001; Boisson et al. 2000)

Finalement il est probable que les deux sources d'énergie (starburst et accrétion) participent à l'émission des AGNs. La présence d'un trou noir au centre n'exclut pas l'existence de flambées d'étoiles dans les régions avoisinantes qui pourraient même être favorisées par l'afflux de gaz alimentant l'AGN.

5.3.3 L'unification des classes

Des modèles d'unification permettant de rendre compte de la diversité des AGNs ont été proposés. Il s'agit en général d'expliquer les différents types d'AGN par l'orientation de la source par rapport à l'observateur. Cela suppose que l'émission n'est pas isotrope et ces modèles d'unification reposent sur le modèle standard qui prédit l'existence d'un disque d'accrétion.
Le schéma d'unification le plus simple reconnait l'existence de deux classes d'AGNs : les

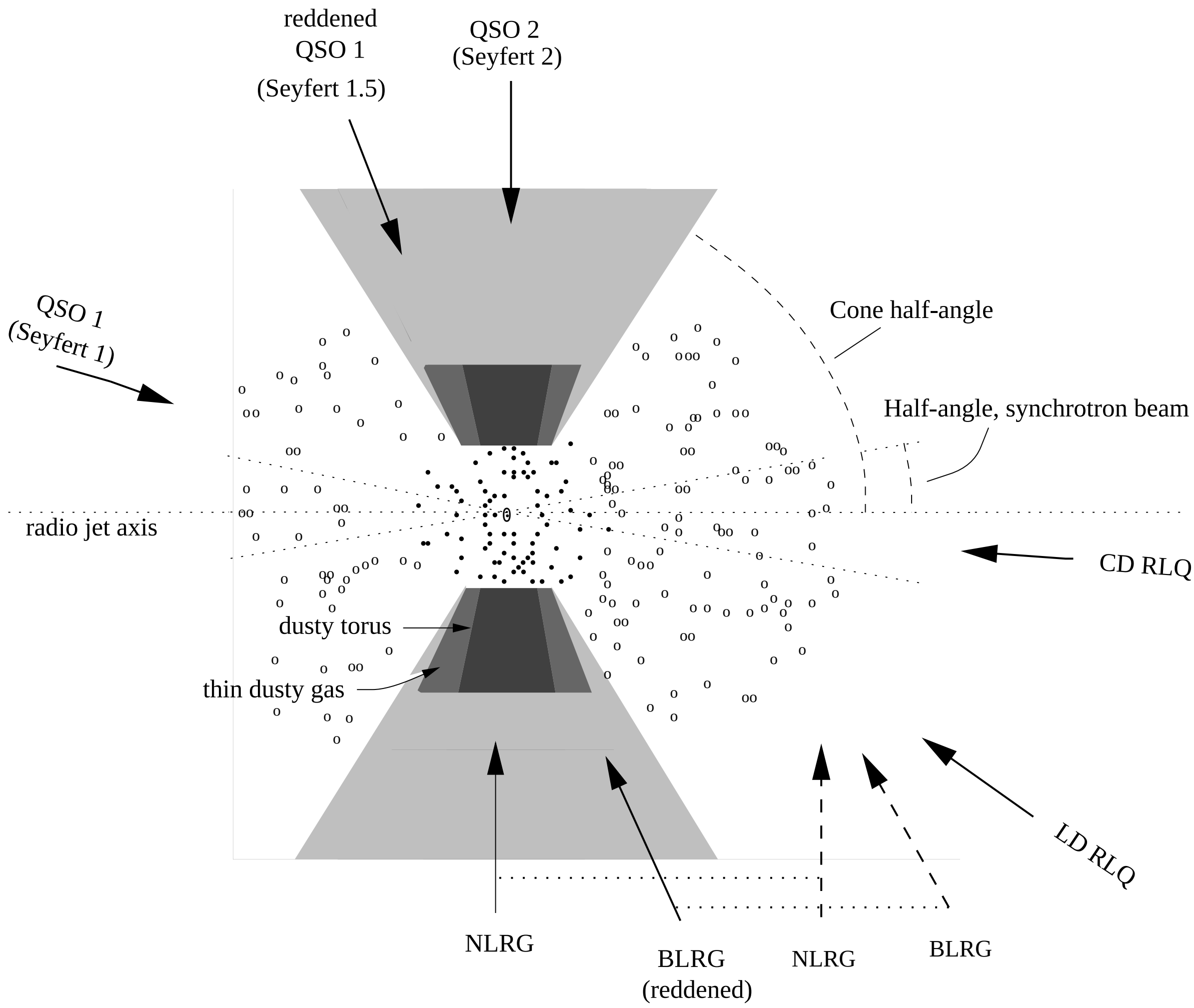

FIG. 5.1 – Modèle d'unification (in Wills 1999). Le même moteur central vu sous différents angles donne lieu à différentes classes d'AGNs. Le gaz dense et à grande vitesse ($\sim 7\,000$ km/s) de la BLR (les points noirs) peuvent être vus, partiellement absorbés ou complètement cachés par le tore de poussière (les différents gris).

quasars intenses en radio (RLQs) et les autres (QSOs et Seyferts). Au sein d'une classe toutes les différences sont attribuées à des effets d'orientation. Une discussion complète du problème d'unification est donnée dans Antonucci (1993). Plus récemment, Wills (1999) (voir Figure 5.1), montre comment les différentes classes d'AGNs pourraient être liées à l'orientation de la source par rapport à la ligne de visée. Les RLQs sont représentés en bas et à droite les autres en haut et à gauche. Les RLQs peuvent apparaître dominés par le cœur (CD) ou par les lobes (LD) selon l'orientation des jets par rapport à l'observateur. La classification des radiosources de Fanaroff et Riley qui distingue les sources dans lequelles les bords externes des jets sont sombres (FRI) ou marqués (FRII) ne correspond pas exactement à la classification CD et LD. Les classes FRI et FRII sont surtout différenciées par la Puissance radio (les FRII sont les plus puissants) et dans chaque classe il y a plusieurs orientations possibles.

Le fait que les raies larges apparaissent ou non dans le spectre serait dû à l'existence d'un tore de poussière qui cacherait plus ou moins la BLR.

5.4 Le problème de l'approvisionnement en matière

Le processus fondamental à l'œuvre dans les AGNs est la conversion de la masse en énergie. Cette conversion se fait avec une certaine efficacité η, telle que l'énergie obtenue à partir d'une masse M est $E = \eta M c^2$. La luminosité de la source ($L = dE/dt$) fixe le taux minimum d'accrétion :

$$L = \eta \dot{M} c^2, \tag{5.4}$$

où $\dot{M} = dM/dt$ est le taux d'accrétion. Donc, un AGN typique requiert un taux d'accrétion :

$$\dot{M} = \frac{L}{\eta c^2} \approx 1.8 \times 10^{-3} \left(\frac{L_{44}}{\eta}\right) M_\odot \ \mathrm{yr}^{-1} \tag{5.5}$$

où L_{44} est la luminosité exprimée en 10^{44} ergs s^{-1} (luminosité d'une galaxie Seyfert lumineuse). L'énergie potentielle d'une masse m à une distance r de la source centrale de masse M est $U = GMm/r$. Le taux auquel l'énergie potentielle de la matière tombante peut être convertie en radiation (donc la luminosité) est donnée par :

$$L \approx \frac{dU}{dt} = \frac{GM}{r}\frac{dm}{dt} = \frac{GM\dot{M}}{r} \tag{5.6}$$

où $\dot{M}$ est la masse franchissant le rayon r par unité de temps, c.à.d. le taux d'accrétion. D'après les équations 5.4 et 5.6 on a $\eta \propto M/r$. L'efficacité de la conversion masse-énergie dépend donc de la compacité de l'objet. La compacité est maximisée pour un trou noir, dont la taille peut être assimilée au rayon de Schwarzschild R_S qui est l'horizon d'un trou noir sans rotation. Ce rayon donne une échelle caractéristique :

$$R_\mathrm{S} = \frac{2GM}{c^2} \approx 3 \times 10^{13} M_8 \ \mathrm{cm} \approx 10^{-2} M_8 \ \text{jours lumière} \tag{5.7}$$

où M_8 est la masse du trou noir exprimée en $10^8 M_\odot$.
Si l'on ignore les effets relativistes, l'énergie produite par une particule tombant jusqu'à $5R_\mathrm{S}$ (région que l'on pense être à l'origine d'une grande partie du continu optique et UV) est :

$$U = \frac{GMm}{5R_\mathrm{S}} = \frac{GMm}{10GM/c^2} = 0.1mc^2. \tag{5.8}$$

Ce calcul très simplifié donne un ordre de grandeur pour l'efficacité de la conversion : $\eta \approx 0.1$. Pour comparaison, ce processus de conversion est d'un ordre de grandeur plus efficace que la fusion de l'hydrogène en hélium, pour laquelle $\eta = 0.007$.
Alors d'après l'équation 5.5, pour un quasar même assez lumineux tel que $L_\mathrm{QSO} = 10^{46}$ ergs s^{-1} on a un taux d'accrétion de seulement :

$$\dot{M} \approx 2M_\odot \ \mathrm{an}^{-1}. \tag{5.9}$$

On peut, par un argument simple, estimer la durée de vie minimum d'un AGN à 10^8 ans. En effet, on constate que les Seyferts représentent 1% des galaxies spirales. Si l'on suppose que les Seyferts ont toujours été des Seyferts alors elles ont l'âge de l'univers 10^{10} ans et par conséquent leurs masses centrales devraient atteindre $10^{10} M_\odot$, ce qui n'est jamais observé. Au contraire si l'on suppose que toutes les galaxies spirales passent par une (ou plusieurs) phase(s) d'activité, alors la durée de cette phase doit être de l'ordre de $10^{10}/100 = 10^8$ ans. Cela implique que durant sa vie un AGN consomme de l'ordre de 10^8 masses solaires, ceci représente une fraction important du gaz dans une galaxie telle que la Voie Lactée !

Le problème soulevé par la grande luminosité des AGNs n'est donc pas celui de l'origine du combustible puisqu'une consommation de deux masses solaires par an suffirait, mais plutôt celui de l'acheminement de la matière vers le moteur central. Pour que de la matière venant de régions éloignées tombe vers le centre pendant la durée de vie d'un AGN il faut qu'un mécanisme de perte de moment angulaire particulièrement efficace soit à l'œuvre. Considérons par exemple une particule en orbite circulaire dans notre galaxie au niveau du Soleil c.à.d. à 10 kpc du centre. Le moment angulaire par unité de masse est donné par $|\boldsymbol{L}|/m = (GMr)^{1/2}$, où M est la masse à l'intérieur du rayon r, c.à.d. $M = 10^{11} M_\odot$. Si cette particule est déplacée jusqu'à 0.01 pc du trou noir (c'est la région d'émission) et que l'on suppose la masse du trou noir égale à $10^7 M_\odot$, alors son moment angulaire par unité de masse doit diminuer jusqu'à $(10^7 \times 0.01/10^{11} \times 10^4)^{1/2} \approx 10^{-5}$ de sa valeur initiale.

Si l'on assimile la galaxie à un disque fin dans lequel la viscosité subsonique est proportionnelle à la pression par un facteur $\alpha < 1$, alors, en un milliard d'années il ne serait pas possible de faire tomber la matière se trouvant au delà d'un rayon de 4α pc (Shlosman et al. 1989; Phinney 1994). Donc, mis à part pour la région centrale, la friction liée à la viscosité du gaz ne peut suffire à approvisionner le noyau en combustible et d'autres mécanismes doivent être invoqués. Une revue complète des différents mécanismes possibles est donnée dans Combes (2001a).