Les quasars aujourd'hui

par Suzy COLLIN
Institut d'Astrophysique de Paris, 75014 Paris

et Gilbert WALUSINSKI

Une étoile bleutée de faible éclat avait été observée en 1887 et reconnue comme variable ; elle ne s'apparentait cependant à aucune catégorie connue de variable et on l'oublia. Les progrès de la radioastronomie permirent, à partir de 1954, de préciser la position d'un certain nombre de radiosources puissantes. La radiosource nº 273 du troisième catalogue de Cambridge appelée 3C273 correspondait à la curieuse étoile bleue et l'astronome américain Marteen Schmidt en prit un spectre en 1963. Ce qu'il obtint lui parut incompréhensible au premier examen. Comme l'était apparu à l'astronome américain Allan Sandage et à ses collaborateurs, trois ans plus tôt, le spectre d'une autre étoile bleue, identifiée, elle, à la radiosource 3C48. Ainsi commence l'extraordinaire histoire des quasars, les objets les plus lumineux et les plus lointains de l'Univers, posant de multiples et complexes problèmes d'interprétation. Des objets dont la connaissance permet les plus profondes plongées dans l'Univers.

PRÉLIMINAIRES DE LA DÉCOUVERTE

L'histoire de la découverte des quasars est riche en rebondissements, en avancées et en reculs suivis de nouvelles avancées qui sont une démarche normale de la recherche lorsque l'observation met les astronomes en présence d'aspects ou de phénomènes tout à fait nouveaux ou imprévus. Et dans le cas des quasars, les surprises n'ont pas manqué, non plus que les problèmes posés aux théoriciens pour interpréter les résultats surprenants de l'observation.

Les quasars auraient pu être découverts il y a 45 ans, lorsque le jeune astronome allemand Karl Seyfert préparait sa thèse aux États-Unis sous la direction de Minkowski, spécialiste des galaxies. Il publia un article rapportant son étude de six galaxies spirales peu ordinaires : elles présentaient des noyaux très lumineux - presque aussi lumineux à

eux seuls que la galaxie toute entière - et émettant un spectre continu très bleu avec des raies en émission très larges.

Seyfert, qui devait disparaître prématurément peu après, venait de mettre en évidence une nouvelle classe d'objets, les galaxies à noyau actif. Ce qualificatif exprime le fait que ces noyaux se trouvent dans une phase de production d'énergie telle qu'elle ne peut se maintenir à ce niveau que pendant une petite période de la vie de la galaxie. Le spectre visible de ces objets montre un continu très plat (explicant leur apparence bleue) sur lequel se superposent de larges émissions correspondant à des raies spectrales. Les spectres du même objet NGC 4151 pris en 1974 et en 1984 mettent en évidence des variation du continu et des raies qui sont celles d'éléments fortement ionisés, révélant donc des phénomènes énergétiques.

Deux sortes de phénomènes sont ici à distinguer dans l'émission des raies spectrales. L'un est un phénomène de fluorescence : un électron est arraché à un atome de gaz par un photon ultra-violet, il est ensuite recapturé par un atome qui se désexcite en émettant de la lumière visible. L'autre phénomène conduit à la formation de raies interdites qui sont produites par des atomes excités par des collisions avec les électrons du gaz et qui se désexcitent spontanément au bout d'un temps qui peut être très long, avant de subir une autre collision. Dans les deux cas, il y a à la base un rayonnement ultra-violet ou X qui, par ces deux processus, finit par produire de la lumière visible (Figure 1).

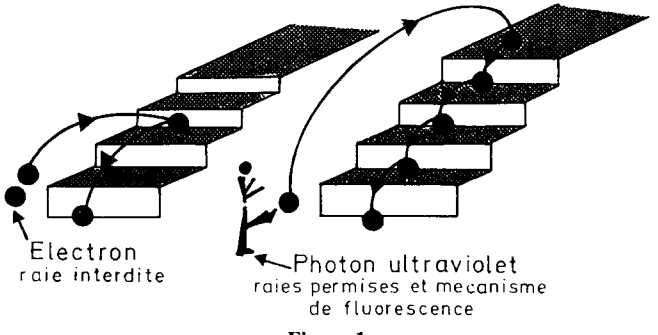


Figure 1

Deuxième étape, la découverte des radiogalaxies . En 1954, les astronomes américains Baade et Minkowski purent indentifier l'une des plus brillantes radiosources située dans la constellation du Cygne et qui fut

appelée Cygnus A. Ils découvrirent alors que sur une photographie du ciel, il existait à l'emplacement de la source radio une galaxie lointaine et de forme inhabituelle faisant penser à deux galaxies en collision. En fait, cette galaxie est située à 650 millions d'années lumière et la puissance de son émission est égale à 10^{12} fois la puissance du Soleil. D'autres radiosources ont été à la suite indentifiées à des galaxies dont le rayonnement radio est environ cent ou mille fois celui de notre Voie Lactée. Pour expliquer une telle puissance, il faut faire intervenir le rayonnement synchrotron émis par des particules chargées - principalement des électrons - se déplaçant dans un champ magnétique à des vitesses relativistes. Contrairement au rayonnement thermique, constitué de la superposition de vibrations sinusoïdales prenant toutes les directions perpendiculairement à la direction de propagation, le rayonnement synchroton n'est constitué que de vibrations situées dans le plan contenant la direction de propagation de l'électron et celle du rayonnement. On dit qu'il est polarisé. Cependant cette polarisation est diminuée par le fait que les électrons se propagent en général dans différentes directions.

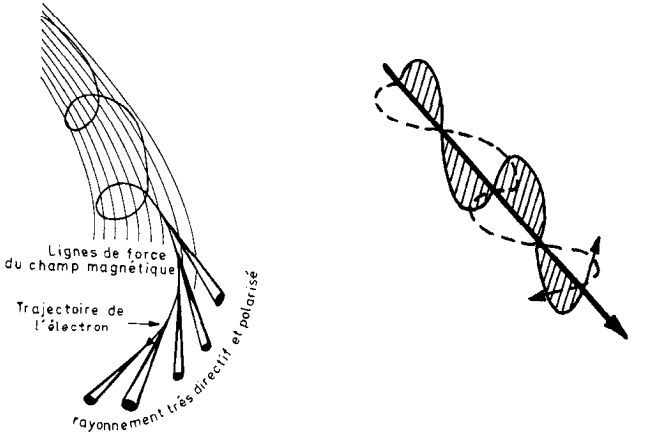


Figure 2

On estime que le champ magnétique est très faible, de l'ordre du millionième de gauss (alors que le magnétisme terrestre est de l'ordre du dixième de gauss), mais il s'agit d'un volume 10^{45} fois plus grand que celui de la Terre. Ce qui explique que l'énergie contenue dans une telle source soit si considérable, supérieure à 10^{55} joules, une valeur gigantesque, équivalente à celle que rayonneraient cent ou mille milliards d'étoiles comme le Soleil ou encore une très grande galaxie pendant toute la durée de vie de l'Univers. C'est l'énergie qui serait libérée par la conversion totale de cent millions de masses solaires.

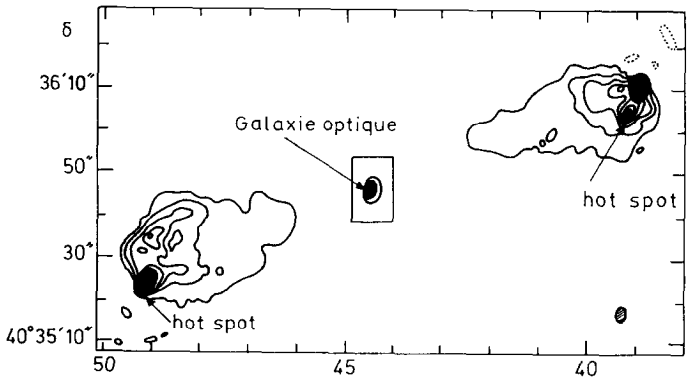


Figure 3

On devait alors se demander d'où provenait cette énergie colossale : de toute une galaxie ou du noyau des radiogalaxies ?

Des schémas d'isophotes à diverses échelles font penser à une localisation très restreinte de la zone la plus énergétique (Figure 4).

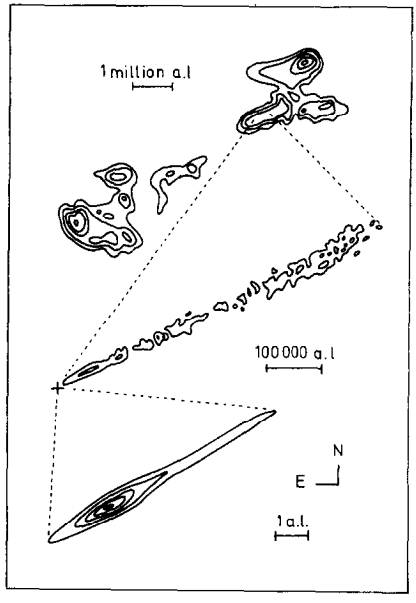


Figure 4

LA DÉCOUVERTE DES QUASARS

Le catalogue des radiosources allant s'enrichissant, on cherchait à les identifier, quand c'était possible, avec des sources visuelles connues. Ainsi dès 1960, l'astronome américain Allan Sandage obtint le spectre d'une étoile bleue très faible (magnitude 16) à la place de la radiosource 3C48 : c'était un spectre étrange avec raies brillantes sur fond continu (au lieu des raies sombres d'un spectre stellaire ordinaire), les dites raies ne correspondant à rien de connu.

La position d'une autre radiosource, 3C273, fut obtenue avec précision par l'astronome anglais Cyril Hazard qui put observer son occultation par la Lune. La radiosource fut ainsi identifiée avec une étoile bleue qui avait la particularité de présenter une petite trainée faiblement lumineuse, une sorte de jet. C'était l'étoile bleue variable mentionnée au début de cet article et Marteen Schmidt découvrit que son spectre présentait des raies intenses en émission comme le spectre de l'étoile de Sandage.

Avec ses collègues de Palomar, Thomas Matthews et Jesse Greenstein, il identifia ces raies, celles de l'hydrogène et de l'oxygène 0 III décalées vers les grands longueurs d'onde (redshift) de 16% pour 3C273, de 37% pour 3C48.

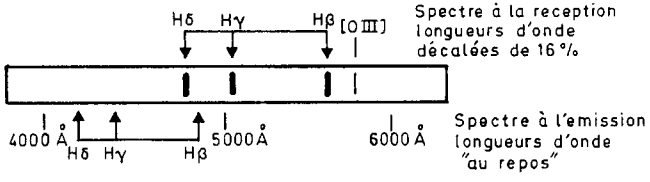


Figure 5

Cela démontrait que ces astres qui ont l'aspect d'étoiles n'en sont pas : le rayonnement qu'ils émettent présente un spectre à raies brillantes qui ne peuvent se former dans les atmosphères d'étoiles. Comme ces astres ressemblent cependant à des étoiles sur les plaques photographiques, les astronomes les baptisèrent «quasi stellar objects» ou en abrégé quasars. Mais comment expliquer un décalage des raies aussi important ?

Une première explication possible était un décalage par effet Doppler-Fizeau. Dans les cas de 3C273 et 3C48 cela correspondait à des vitesses de 48 000 et 110 000 km/s respectivement. C'est-à-dire d'énormes énergies de mouvement pour des corps célestes de la dimen-

sion d'une étoile. Rien dans l'histoire de notre Galaxie ne permet de supposer qu'une étoile puisse y atteindre de telles vitesses. De plus, pour tous les quasars observés, on obtient systématiquement une vitesse d'éloignement.

Autre explication du décalage pouvant être invoquée, l'effet gravitationnel ou effet Einstein. Si un photon est émis à une longueur d'onde λ_0 en l'absence de gravité, le même photon émis à la distance R d'une masse M a une longueur d'onde $\lambda = \lambda_0 (1 + z)$ avec $z = GM/Rc^2$ où G est la constante de la gravitation $G = 6{,}67 \times 10^{-8}$ dyn cm^2g^{-2} et c la vitesse de la lumière.

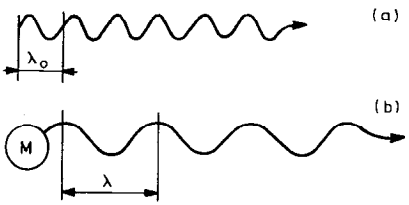


Figure 6

Mais Greenstein et Schmidt montrèrent que cet effet doit produire des raies dilatées selon qu'il opère au sommet ou à la base de l'atmosphère raréfiées autour de ces objets. Or tel n'est pas le cas et l'argument du décalage gravitationnel doit être définitivement abandonné.

Il ne reste alors plus qu'une seule explication possible au décalage des raies, l'effet cosmologique qui traduit l'expansion de l'Univers dans son ensemble : les ondes lumineuses sont étirées lorsqu'elles se propagent dans un espace en expansion ; leur longueur d'onde augmente dans la proportion $z = (\lambda - \lambda_0)/\lambda_0$ et z est appelé le «redshift». La vitesse de récession d'une galaxie en kilomètres par seconde est égale à la distance de cette galaxie (en mégaparsecs) multipliée par la constante de Hubble. Il faut ici prendre garde que la proportionnalité de la vitesse de récession au redshift n'est qu'une première approximation pour de faibles redshifts.

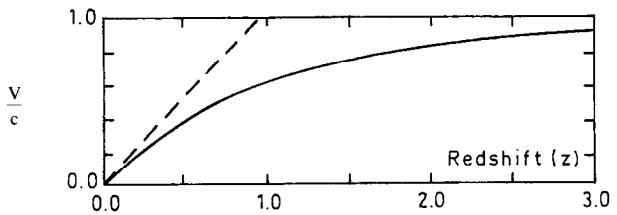


Figure 7

En prenant H = 75 km s^{-1} Mpc^{-1}, 3C273 se trouve à 640 mégaparsecs soit environ 2 milliards d'années lumière et 3C48 à 1500 mégaparsecs soit 4,5 milliards d'années lumière.

L'éclat observé de ces objets placés à de telles distances correspond à une puissance extraordinaire, de l'ordre de 10^{40} watts soit la puissance de dix mille galaxies comme la nôtre, rayonnée par un objet dont la dimension est certainement inférieure à l'année lumière puisque de sensibles variations d'éclat sur des échelles de temps de moins d'un an sont mesurables. En effet, des variations importantes ne peuvent être observées dans un laps de temps inférieur à R/c où R est le rayon du corps émetteur : si le flux émis augmente au temps t = 0, les photons étant émis simultanément en A et B (voie Figure 8), l'instant d'arrivée des photons émis par B à la distance D est t = D/c tandis qu'il est t = D/c + R/c pour ceux émis en A et la variation est «diluée» sur le temps R/c.

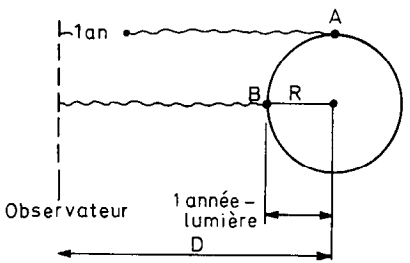


Figure 8

Les courbes de lumière de 3C273 et 3C279 s'étalent sur plusieurs dizaines d'années. En 1937, l'éclat de 3C279 a augmenté d'un facteur 100 en quelques jours.

Des observations en rayons X ont montré des variations de l'ordre de l'heure, ce qui réduit la dimension d'un quasar à celle du système solaire.

S'il y a eu, dans les débuts, maintes controverses pour ou contre le redshift cosmologique, nous pouvons maintenant le considérer comme prouvé ne serait-ce par le fait que si un quasar est situé dans un amas de galaxies, son décalage est identique à celui de l'amas. Dans la suite de cet exposé, nous raisonnerons donc dans le cadre de l'hypothèse cosmologique.

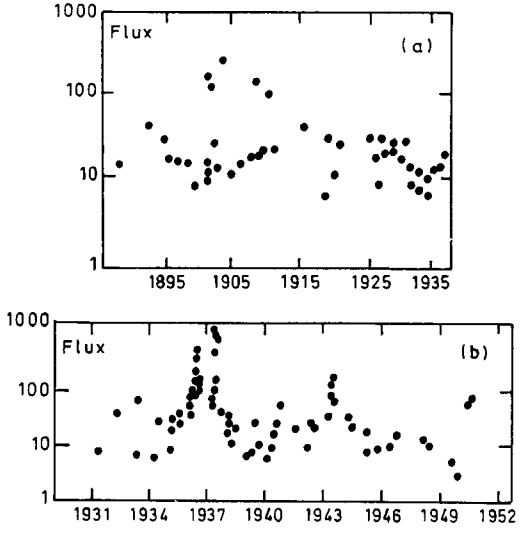


Figure 9

LE RAYONNEMENT DES QUASARS

Les années 70 ont été marquées par l'étude du rayonnement des quasars sur toute l'étendue du spectre électromagnétique.

Le rayonnement d'une galaxie se trouve réparti sur un intervalle où la longueur d'onde varie d'un facteur 1000 ou 10^3 (on dit pour cette raison qu'il est réparti sur trois «décades») et bien que le spectre d'une galaxie soit très différent de celui d'un corps noir, on peut encore le qualifier de thermique car il est essentiellement dû à un ensemble de corps chauds pratiquement en équilibre thermique. Pour les quasars, au lieu de s'effondrer dans l'ultra-violet et dans l'infra-rouge lointain, le spectre se prolonge vers les grandes longueurs d'onde, jusque dans le domaine radio, aux ondes centimétriques et métriques s'il s'agit d'un quasar radio, s'arrêtant aux ondes millimétriques si le quasar n'est pas émetteur radio. De l'autre côté, il s'étend vers l'ultra-violet lointain, jusqu'au rayonnement X et même au rayonnement gamma.

On peut résumer les découvertes des années 70 par les trois conclusions suivantes :

– extension du domaine d'énergie rayonnée par un quasar sur dix décades de fréquence, de 10^{10} à 10^{20} hertz ;

– prééminence du rayonnement de grande énergie (ultra-violet, X et même gamma) ;

– découverte de sources «superluminiques».

Un bond prodigieux dans la localisation des sources radio fut obtenu par l'interférométrie à longue base (VLBI ou Very Long Base Interferometry). Grâce à quoi on peut reconstituer la structure de l'objet émetteur avec un pouvoir séparateur bien supérieur à celui de l'observation optique pour lequel la turbulence atmosphérique limite la distance des télescopes interférant. Ces observations révélèrent que les sources radio des quasars sont très petites. Ce sont des sources compactes qui sont à l'origine des grands lobes radio observés et qui les alimentent en particules relativistes et en gaz.

A partir de 1972, les observations en VLBI montrèrent que l'écartement des sources doubles semblait augmenter à une vitesse qui paraissait dépasser celle de la lumière. D'où le nom «superluminiques» donné à ces sources. En fait il pourrait s'agir de bouffées successives de rayonnement gamma qui créent des électrons relativistes produisant un rayonnement synchrotron. Nous percevons ces rayonnements avec un retard plus grand pour la première bouffée que pour la suivante et les deux sources paraissent plus distantes l'une de l'autre qu'elles ne le sont en réalité.

UN MODÈLE DES QUASARS

Nous pouvons désormais construire un modèle cohérent rendant compte de tous les faits observés sur les quasars. Mais il ne faut pas oublier que la famille des quasars est très hétérogène ; leur luminosité optique est très variable d'un quasar à l'autre, de 10^{37} à 10^{41} watts ; certains quasars émettent en radio, d'autres non ; certains sont puissants en infrarouge ou dans le domaine X, etc... Les faits essentiels à retenir sont les suivants :

– la puissance émise, les plus puissants produisant 10^{41} watts dans le visible soit l'équivalent de quinze masses solaires par an transformées entièrement en énergie lumineuse ;

– la variabilité, qui prouve que l'émission se produit dans une région très petite, inférieure à quelques jours de lumière ;

– une durée de vie supérieure à dix millions d'années, certaine pour les quasars radio, probable pour les autres également, ce qui implique une énergie supérieure à 3×10^{55} joules soit l'équivalent de cent millions de masses solaires.

Quel est le mécanisme qui pourrait fournir une telle puissance radiative ? A partir de réactions chimiques, il y faudrait 10^{22} masses solaires, soit plus que la masse totale de l'Univers observable. Les réactions nucléaires ne permettent de récupérer en énergie que 1% de la masse, ce serait encore insuffisant ici. Seule la libération d'énergie gravitationnelle obtenue lors de la chute sur un corps massif compact peut atteindre un rendement de 40% de Mc^2.

Quel est le corps massif et compact qui peut provoquer un phénomène de cette ampleur ? On devait évidemment penser au corps le plus compact qui soit, le trou noir. La masse minimum que devrait contenir un quasar dont l'énergie serait d'origine gavitationnelle serait d'un milliard de masses solaires. Si elle était rassemblée dans un trou noir, son rayon de Schwarzschlid serait de trois milliards de kilomètres soit trois heures de lumière (rappelons que le rayon de Schwarzschild est le rayon minimum qu'un corps sphérique doit avoir pour que des photons puissent s'en échapper en s'opposant aux forces de gravitation). Mais ce trou noir exerce une attraction gravitationnelle sur la matière qui l'entoure et qui a donc tendance à y «tomber» ; alors l'accumulation de matière freine la chute et provoque un rayonnement. A six rayons de Schwarzschild, les particules sont avalées par le trou noir sans avoir le temps de rayonner. Par conséquent, toute la masse n'est pas transformée en rayonnement. Les photons sont essentiellement émis entre six et dix rayons de Schwarzschild. Ceci sans parler des complications du modèle si le trou noir est en rotation rapide.

Avec un trou noir d'un milliard de masses solaires qui correspond à une étendue de variabilité d'une dizaine d'heures lumière, nous avons un modèle cohérent avec les données de l'observation. Il reste à concevoir comment un trou noir supermassif a pu se constituer.

On peut imaginer qu'au centre du noyau d'une galaxie, un trou noir supermassif se soit formé par effondrement d'une étoile supermassive ou d'un amas d'étoiles. Dès que le trou noir atteint quelques milliers de masses solaires, il grossit rapidement en avalant la matière qui l'entoure. Pour qu'un rayonnement soit émis, il faut que cette matière soit sous forme gazeuse ou dispersée ; l'engloutissement d'une étoile

entière ne donnerait aucun rayonnement mais l'étoile est préalablement disloquée par effet de marée et les particules produites, pour peu qu'elles aient un moment angulaire, forment un disque d'accrétion, le gaz et les particules tombant en spirale sur le trou noir. Si la matière n'a pas de moment angulaire, le gaz et les particules tombent de toutes parts en accrétion sphérique. Dans le premier cas les particules ont le temps de rayonner donc de se refroidir jusqu'à quelques dizaines de milliers de degrés (ce qui explique la «bosse» observée dans le spectre continu dans les domaines optique et ultra-violet). Dans le second cas, les particules n'ont pas le temps de se refroidir, la température du gaz reste très élevée, quelques milliards de degrés, le rayonnement est alors émis dans le domaine X. Les deux formes de rayonnement cœxistent dans les quasars avec des importances relatives différentes selon les objets.

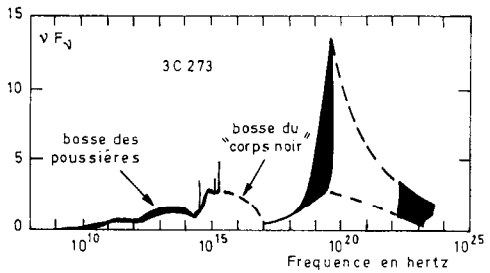
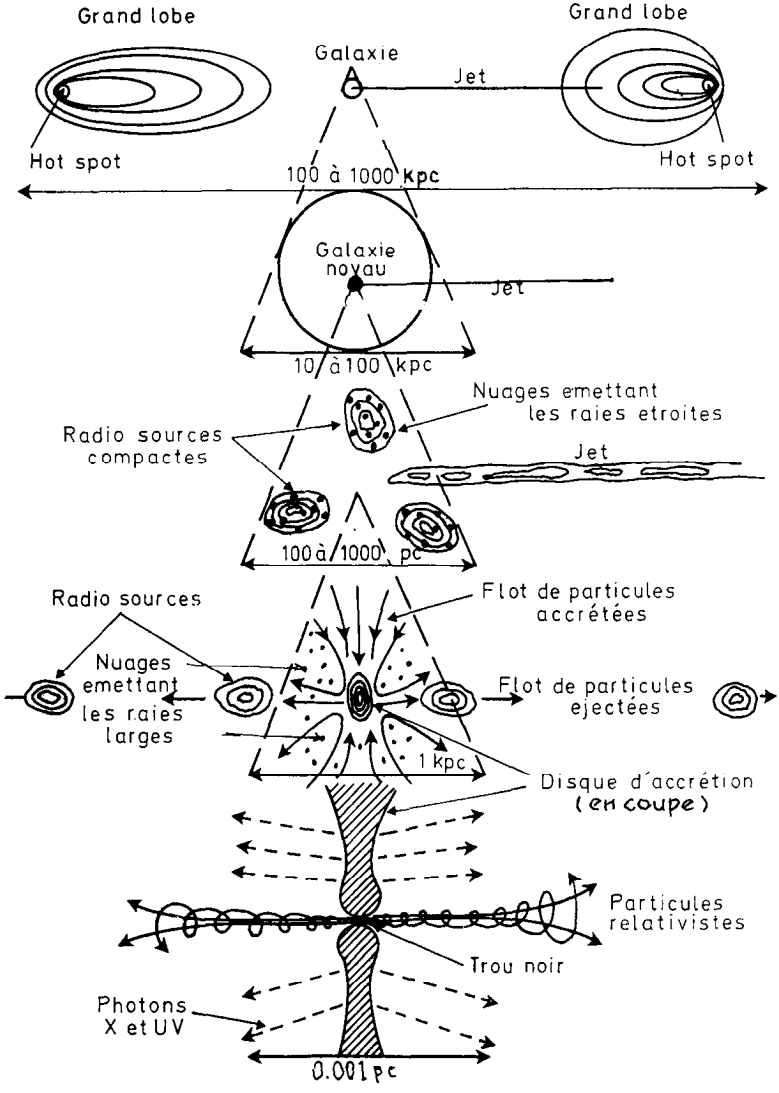


Figure 10

Enfin, en plus de ce rayonnement de gaz chaud, un quasar a un rayonnement synchrotron dû à des particules relativistes émises dans un milieu magnétisé et ayant probablement une direction privilégiée. On associe l'existence de ces particules à celles des radiosources compactes et aux jets, même lorsque ceux-ci ne sont pas observés, soit que leur rayonnement trop faible ait été réasorbé soit même qu'il n'ait pu être détecté. Mais on pense qu'il existe toujours une direction privilégiée que les électrons relativistes sont obligés de suivre. Cette direction est probablement celle de l'axe de rotation du trou noir.

La luminosité maximale d'un quasar est déterminée par ce qu'on appelle la «luminosité d'Eddington» : la luminosité est limitée lorsque l'accrétion autour du trou noir est stoppée et ceci se produit lorsque la gravitation est compensée par la pression de radiation. Pour un trou noir d'un milliard de masses solaires, la luminosité d'Eddington est $1{,}3 \times 10^{40}$ watts. Elle correspond à un taux d'accrétion maximum

donné par $dM/dt = L_{Edd}/(c^2)$ où L_{Edd} est le rendement de la conversion de la masse en énergie soit environ 10%. Ce taux maximum correspond à une durée d'un milliard d'années pour obtenir un trou noir d'un milliard de masses solaires.



CONCLUSION

On a pu se demander pourquoi les quasars se trouvent dans les noyaux de galaxies.

On peut répondre à cette question par le schéma suivant : l'effondrement d'un nuage protogalactique entraîne la formation d'un «noyau» ou amas dense d'étoiles. Alors deux éventualités : une évolution normale d'étoiles avec formation de «petits» trous noirs de dix masses solaires puis des collisions d'étoiles entraînant la formation d'une étoile instable de dix mille masses solaires et la formation d'un trou noir massif qui grossit - ou bien la formation d'un trou noir masif par effondrement du centre du nuage protogalactique.

Dans un cas comme dans l'autre, le trou noir grossit par accrétion et nous avons une galaxie à noyau actif, une galaxie de Seyfert. Lorsque le trou noir atteint la masse de un à dix milliards de masses solaires, l'objet est devenu un quasar.

Son intense rayonnement limite sa durée d'activité. Il devient une radiogalaxie. Mais une réactivation est possible par une galaxie voisine, il y a un «cannibalisme des galaxies »...

N.D.L.R. : Les figures reproduites dans cet article sont tirées du livre les Quasars par Suzy COLLIN et Grazyna STASINSKA collection «Science et Découvertes» éd. Le Rocher 1987.