

## LES QUASARS

Depuis leur découverte, les quasars alimentent une abondante littérature, aussi bien dans les colonnes des journaux de "vulgarisation", que dans les revues spécialisées les plus abstraites. C'est que ces objets, qui semblent défier l'imagination et être plus proches de la science fiction que de la science véritable, fournissent presque chaque année une moisson d'observations plus inattendues que les précédentes.

Leur découverte se situait en 1963, lorsque deux astronomes du "Caltech" (le "California Institute of Technology", qui possédait à cette époque le plus grand télescope du monde, le " 5 mètres du Mont Palomar ", maintenant dépassé par un " 6 mètres " soviétique), réussirent à identifier dans le domaine visible deux sources relativement puissantes observées par les astronomes de Cambridge (Angleterre) dans le domaine radio. A l'emplacement de ces sources, on distingue deux objets faibles, très bleus, d'aspect stellaire. Les spectres de ces objets, immédiatement obtenus à Palomar, semblèrent tout à fait incompréhensibles de prime abord : ils présentent de larges "raies" qui ne sont pas en absorption comme dans la plupart des étoiles, mais en émission (c'est à dire que les raies sont plus brillantes que le continu environnant, au lieu d'être plus sombres); et surtout les longueurs d'onde de ces raies ne correspondent à aucun élément connu au laboratoire. Les deux astronomes américains réalisèrent alors qu'il s'agissait de raies souvent observées dans les spectres des nébuleuses planétaires, mais décalées vers les grandes longueurs d'onde, de 16% en ce qui concerne l'objet le plus brillant, 3C273, de 37% pour l'autre, 3C48.

Que signifie un tel décalage ? Dans le cadre des théories physiques connues, trois explications possibles se présentent.

La première est celle d'un "décalage gravitationnel", due à la présence d'une masse extrêmement compacte. Elle peut être éliminée d'emblée, car ce décalage donnerait lieu à un élargissement considérable des raies, qui n'est pas observé. <sup>(1)</sup>

Une deuxième explication invoque tout simplement l'effet Doppler-Fizeau : lorsqu'une source de rayonnement est animée d'une vitesse importante par rapport à un observateur, celui-ci voit une lumière de longueur d'onde plus grande que celle qui est émise ("décalage vers le rouge") si la source s'éloigne de lui, et plus faible si elle s'en rapproche. Cette hypothèse était plausible à l'époque, mais il fut immédiatement évident - par exemple sur la base d'absence de mouvements propres - que les deux sources étaient fort éloignées et par conséquent devaient avoir un éclat intrinsèque considérable. Or une grande luminosité implique une grande masse, et par conséquent une gigantesque source d'énergie est nécessaire pour expulser des corps, dont la masse est largement supérieure à celle d'une étoile, avec des vitesses qui avoisinent celles de la lumière : en effet le décalage observé correspond pour 3C273, à une vitesse de 50000 km/s et pour 3C48, à près de 100000 km/s ! Malgré cela, cette hypothèse fut envisagée sérieusement par quelques astronomes pendant 2 ou 3 ans, mais elle dut finalement

---

Note(1) : Bien qu'en fait il existe une masse compacte dans les quasars, comme on le verra plus loin, mais elle n'affecte pas le gaz qui émet les "raies", car il en est trop éloigné.

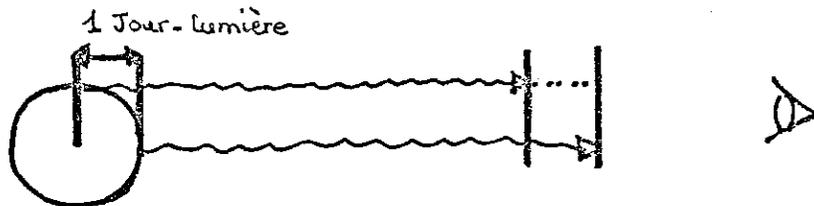
être écartée, lorsqu'un grand nombre d'autres "quasars" - puisque c'est le nom qu'on leur a donné par abréviation de "quasi-stellar sources" - furent découverts. Or aucun ne montre un décalage vers le bleu, ce qui signifie que tous les quasars s'éloignent de nous. Dès lors, comment admettre ce fait, sans supposer que nous occupions une position tout à fait privilégiée dans l'Univers, et que seul dans son genre, notre environnement immédiat a été l'objet d'une explosion donnant naissance à ces "super étoiles" ?

Reste alors la troisième explication : les quasars sont des objets très éloignés, participant comme les galaxies à l'expansion de l'Univers, ce qui entraîne un décalage spectral vers les grandes longueurs d'onde. Conformément à la loi de Hubble, leur distance, calculée d'après leur décalage, est alors reportée à plusieurs milliards d'années-lumière.

Mais cette hypothèse n'est pas sans quelques conséquences assez surprenantes. La première est que leur éclat intrinsèque est alors gigantesque : 1000 fois celui de notre Galaxie toute entière pour 3C273, 100000 fois pour certains autres quasars. La seconde, plus étrange encore, est que ce rayonnement est émis par un objet relativement petit puisque leur apparence d'étoiles sur les plaques photographiques leur confère des diamètres inférieurs à une seconde d'arc environ, soit quelques milliers d'années-lumière (rappelons le diamètre de notre Galaxie : 60000 années-lumière).

En fait, le diamètre de ces objets est bien plus faible. Actuellement, on n'en connaît qu'une limite supérieure, et cette limite est d'une année-lumière pour la plupart des quasars; dans le cas des "Lacertides", découverts un peu plus tard, qui se distinguent des quasars seulement par quelques points de détail (leurs spectres ne montrent pas de raies brillantes, entre autre), mais qui sont aussi lumineux, les dimensions sont inférieures au diamètre du système solaire ( $10^{15}$  cm).

Comment peut-on avoir une telle certitude ? Simplement d'après l'observation des variations d'éclat de ces objets. En effet, lorsque des variations importantes (augmentation ou diminution par un facteur 2 au moins) sont observées dans un temps T - une journée, une année - cela signifie que le diamètre de la source émettant le rayonnement est inférieur à  $c \times T$  - un jour-lumière, une année-lumière - c étant la vitesse de la lumière. Le petit schéma suivant permet d'en comprendre la raison.



Si un objet sphérique - la forme importe peu - de rayon un jour-lumière - subit une augmentation de brillance de surface en tous ses points au même moment (cas le plus favorable), un observateur verra cette augmentation "diluée" sur une journée, par suite des différences de trajets des photons émis par le bord et par le centre de l'objet. A moins donc d'imaginer une structure tout à fait improbable, où tous les points de l'objet seraient exactement à la même distance de l'observateur (donc située sur une sphère centrée sur l'observateur), l'échelle de temps des variations donne une limite supérieure de sa dimension. A cet argument, on objecte parfois qu'on peut imaginer des objets qui "s'allumeraient" ou "s'éteindraient", à la surface d'un objet bien plus grand - le quasar lui-même. Certes oui, mais le problème énergétique posé n'en n'est pas modifié : un corps de dimension inférieure à celle du système solaire ( $10^{15}$  cm), émet une énergie

lumineuse de  $10^{46}$  ergs/s ( $10^{39}$  W), soit la puissance de 10000 milliards de soleil ! Et ceci, sans préjuger des autres formes d'énergie qui échappent pour le moment à la détection : particules rapides, neutrinos, et même simplement rayonnement X ou gamma. On vient de découvrir qu'une galaxie de Seyfert (les galaxies de Seyfert sont des objets très semblables aux quasars, mais moins lumineux en moyenne), NGC4151, émet environ 100 fois plus d'énergie dans le domaine gamma que dans le visible.

Alors, comment expliquer les quasars ? Quels sont leurs liens avec les objets astrophysiques connus ? Quel est le moteur qui alimente cette source d'énergie gigantesque dans un volume si petit ?

Pour répondre à la première question, il faut connaître un certain nombre de faits dont on prit conscience entre 1965 et 1975 environ.

1/ Il existe, parmi les galaxies, quelques galaxies dont le noyau est dit "actif", (environ 2%). Ce sont les galaxies de Seyfert déjà mentionnées. Elles ont été découvertes en 1943 par un étudiant allemand, K. Seyfert, travaillant au Mont Palomar. Mais ce n'est que dans les années 70 qu'on a réalisé leur importance, liée à leur ressemblance surprenante avec les quasars.

Les galaxies de Seyfert présentent un noyau brillant dont l'éclat est égal, ou même supérieur, à celui de la galaxie toute entière. Ce noyau a des propriétés identiques à celles des quasars : dans le domaine visible, le spectre continu a la même forme (en loi de puissance, caractéristique du rayonnement synchrotron), il présente d'intenses raies, larges, en émission; les mêmes types de rayonnements infrarouge, ultraviolet, X, que dans les quasars sont observés, avec la même variabilité, etc... Seule leur luminosité diffère : elle est généralement inférieure par un facteur 100 à la moyenne des quasars. Cependant, quelques galaxies de Seyfert ont des luminosités très grandes, et rien ne permet alors de les distinguer d'un quasar, si ce n'est leur proximité, qui permet d'observer la galaxie entourant le noyau.

2/ Précisément, dans le cas des quasars les plus proches, on a recherché avec succès un halo entourant le noyau brillant. Bien que dans ce cas, l'éloignement empêche d'en étudier la structure, les propriétés de ce halo (dimension, spectre continu et raies en absorption provenant d'étoiles relativement froides) laissent à penser qu'il s'agit bien de galaxies.

3/ Les propriétés radio d'un certain nombre de quasars, les apparentent aux "radio galaxies", c'est à dire aux galaxies qui émettent un puissant rayonnement radio. En effet, comme pour les radio galaxies, la structure des radio sources associées est double, s'étendant symétriquement de part et d'autre de l'objet central - quasar ou radio galaxie - jusqu'à des centaines de milliers d'années-lumière.

Il est donc clair que les quasars sont simplement des galaxies dont le noyau traverse une phase d'activité intense, qui se manifeste par des éjections de gaz (d'où les raies élargies par effet Doppler), par l'émission d'un rayonnement synchrotron intense jusque dans le domaine optique, provenant d'électrons ultrarelativistes accélérés dans un champ magnétique, par la présence également d'un gaz très chaud (10 milliards de degrés) plongé dans un champ magnétique, produisant l'émission X, etc, etc... Il est impossible malheureusement de détailler ici les propriétés des quasars et des noyaux de galaxies de Seyfert.

Pour autant, cependant, la seconde question n'est pas résolue, car il reste à comprendre pourquoi et comment les noyaux de galaxies peuvent, dans certains cas, émettre une telle quantité d'énergie, provenant d'un volume très petit.

Une première estimation, fondamentale, est celle de la durée de vie des quasars. Pour ceux qui sont associés à des sources radio, le

calcul est simple. Le rayonnement radio est émis par des électrons relativistes spiralant dans un champ magnétique. La vitesse avec laquelle les électrons "diffusent" dans le milieu intergalactique est probablement voisine de  $c/10$  (les vitesses "réelles" de ces électrons sont, elles, pratiquement égales à  $c$ ). Or, ces électrons proviennent du quasar lui-même : on en a de multiples preuves, qu'il serait trop long d'énumérer. Comme ils ont eu le temps de s'éloigner de leur source d'environ un million d'années-lumière, c'est que le quasar les a produit il y a environ 10 millions d'années. C'est donc sa durée de vie minimale.

Pendant ce temps, le quasar a rayonné, en moyenne,  $10^{47}$  ergs/s, donc au total  $3 \cdot 10^{66}$  ergs. Ce rayonnement provient de la transformation d'une certaine masse en énergie. Le rendement du processus le plus efficace pour convertir la masse en énergie<sup>(2)</sup>, dont on parlera plus loin, est d'environ 10%. Donc  $Mc^2/10 = 10^{66}$ , ce qui donne  $M = 10^{40}$  grammes, ou  $10 M_{\odot}$  environ. Voici donc la masse minimum d'un quasar moyen.

Dans les noyaux des galaxies de Seyfert les plus proches, on détecte - par son effet dynamique - la présence d'un amas de plusieurs milliards d'étoiles à l'intérieur d'un rayon de quelques centaines d'années-lumière (comparons cette densité à celle du voisinage solaire, où l'on rencontre environ une étoile toutes les 10 années-lumière!). Et dans notre propre Galaxie, dont le noyau est pourtant loin d'être "actif", il existe environ un million d'étoiles dans un rayon de 3 années-lumière.

Quelles est la concentration atteinte au centre du noyau ? On l'ignore, et on l'ignorera longtemps car la résolution spatiale des observations est très limitée. Mais il est certain qu'elle croit bien au-delà de cette limite observationnelle de  $10^6$  étoiles par années-lumière cube.

Partant alors du fait que le volume de l'objet est au plus  $(10^{15})^3$  cm<sup>3</sup>, on suppose que les  $10^8 M_{\odot}$  sont entièrement contenues dans ce volume, ce qui n'est pas prouvé mais est d'autant plus probable que le modèle qui en découle est entièrement consistant et fournit la meilleure explication aux phénomènes observés. Or, une masse de  $10^8 M_{\odot}$  possède un "rayon de Schwarzschild" de  $3 \cdot 10^{13}$  cm. C'est la valeur du rayon au-dessous de laquelle le champ gravitationnel de l'objet est si intense que les rayons lumineux ne peuvent s'en échapper, ou encore c'est le rayon correspondant à une vitesse de libération de 300000 km/s. En d'autres termes, l'objet est alors un "trou noir", concept certainement familier à la plupart des lecteurs de cet article. Mais c'est un "trou noir supermassif", par comparaison avec les trous noirs de quelques masses solaires qui représentent vraisemblablement le terme ultime de la vie des étoiles massives. On constate donc que le rayon d'un trou noir de  $10^8 M_{\odot}$  est voisin de la limite de  $10^{15}$  cm déduite de la variabilité des sources. Notons aussi qu'un trou noir de  $10^9 M_{\odot}$  aurait un rayon de  $3 \cdot 10^{14}$  cm, car le rayon est proportionnel à la masse.

Or les propriétés d'un trou noir supermassif, situé au centre d'un amas très dense d'étoiles, sont tout à fait particulières. D'abord, les étoiles ne peuvent survivre car elles sont disloquées par un effet de marée dû à l'énorme gradient du potentiel gravitationnel du trou noir. Elles donnent naissance à un gaz très chaud qui sera "avalé" par le trou noir, après avoir rayonné 10% ou 20% de son énergie de masse sous forme de rayons X, par effet synchro-cyclotron. C'est le rayonnement X observé, qui représente parfois jusqu'à 99% de l'énergie électromagnétique rayonnée par le noyau de galaxie.

---

(2) : plus efficace que les réactions nucléaires dont le rendement n'est que de 0,1 à 1%.

Ce rayonnement est la source d'une énorme pression de radiation qui entraîne l'expulsion de bouffées de gaz chaud : c'est le gaz qui produit les raies en émission larges.

Dans la direction de l'axe de rotation du système sont éjectées des particules relativistes qui sont à l'origine des radio sources doubles.

Ainsi peut-on rendre compte de la plupart des phénomènes observés.

Par ailleurs, la masse du trou noir augmente au cours du temps par absorption de gaz. On peut imaginer qu'une seule étoile, de  $10 M_{\odot}$ , est à l'origine du trou noir supermassif. Le calcul montre que dans un amas dense d'étoiles, ce trou noir mettra  $10^9$  ans à atteindre la masse de  $3 \cdot 10^8 M_{\odot}$ . Sa luminosité augmente aussi au cours du temps, jusqu'à atteindre  $3 \cdot 10^{46}$  ergs/s pour cette masse.

Au-delà de cette masse, l'évolution du trou noir dépend essentiellement de la densité d'étoiles qui l'environnent. Généralement, sa croissance va se ralentir, par suite de la diminution du nombre d'étoiles dont un bon nombre ont déjà été "avalées". Mais d'autre part, le rendement du processus, qui était voisin de 10%, diminue considérablement. En effet, lorsque la masse du trou noir dépasse  $3 \cdot 10^8 M_{\odot}$ , les étoiles sont "avalées" sans être préalablement disloquées, car le rayon du trou noir est supérieur à celui qui est nécessaire pour produire l'effet de marée. En étant ainsi avalées en bloc, elles ne rayonnent plus car seul un gaz est capable de perdre une partie appréciable de son énergie sous forme de rayonnement. Les seules sources de gaz sont les collisions entre les étoiles, dont le taux dépend fortement de la densité en étoiles.

Bref, on prévoit généralement, qu'au-dessus de  $10^9 M_{\odot}$ , le trou noir deviendra une sorte de masse "morte", perceptible seulement par l'énorme champ de gravité qu'il creuse au centre du noyau. C'est bien ce qu'il semble avoir été observé récemment au centre de la galaxie Virgo A, la galaxie la plus lumineuse de l'amas de la Vierge, dont le noyau a des propriétés très proches de celles des quasars.

Cette théorie, très attrayante, semble donc confirmée par un faisceau d'observations. Cependant, c'est loin d'être la seule théorie proposée pour les quasars. Avant tout, elle fait appel à un concept dont aucune preuve directe n'a encore définitivement confirmé l'existence, le "trou noir". Ensuite, elle ne rend pas compte, au moins dans l'état actuel de son développement, d'un certain nombre de faits observationnels. Cependant, c'est, parmi les différentes théories proposées, de loin la plus consistante et la plus "naturelle" dans le contexte des galaxies.

S. COLLIN-SOUFFRIN

\* \* \* \* \*