



# Les quasars

### DE NOUVEAUX VENUS DANS LES CATALOGUES CÉLESTES



Alors que les premiers radiotélescopes se tournent vers le ciel dans les années 1950, ils mettent à jour des sources très puissantes distribuées de façon isotrope sur l'ensemble de la voûte céleste.

Une distribution qui laisse immédiatement penser que ces sources sont situées bien au-delà des limites de notre galaxie. Avec l'amélioration des instruments, les astronomes s'aperçoivent très vite que, même si ce n'est pas toujours le cas, la localisation des plus intenses de ces radiosources se confond avec celle de galaxies.

En 1962, ils constatent même que deux radiosources, 3C 48 et 3C 273, coïncident avec des objets qui ressemblent comme deux gouttes d'eau à des étoiles. À cette époque, les scientifiques savent déjà que les étoiles émettent des ondes radio. De relativement faible intensité toutefois puisque même les plus proches d'entre elles restent invisibles aux plus sensibles des radiotélescopes.



Les rayonnements radio émis par 3C 48 et 3C 273 sont donc considérablement plus élevés que ceux des étoiles classiques connues jusqu'alors. La question de la nature de ces objets mystérieux reste donc entière. D'autant plus que l'astronome américain Allan Sandage s'aperçoit qu'ils rayonnent également de manière étonnamment importante dans le domaine de l'ultraviolet. Une observation qui lui permet même d'identifier de nouveaux spécimens ne coïncidant avec aucune source radio.

### DE SURPRISES EN SURPRISES

Pour résoudre le problème, les astronomes décident alors d'étudier les spectres optiques de ces étranges corps célestes. Ils espèrent y

retrouver quelques caractéristiques connues. Un espoir rapidement déçu. Les spectres de 3C 48 et 3C 273 présentent des raies totalement différentes de celles produites par les atomes les plus courants (hydrogène, azote, oxygène, etc.) et que l'on trouve habituellement dans les spectres des étoiles. Car il faut savoir que la lumière émise par un corps céleste est révélatrice de sa composition chimique. Ainsi, les spectres des étoiles présentent des raies caractéristiques des éléments qui les composent. Et, c'est en 1963 que l'astronome hollandais Maarten Schmidt qui travaille alors aux États-Unis réalise que les raies observées sur les spectres de ces curieux objets sont en réalité des raies d'atomes connus ayant subi un décalage considérable vers le rouge.

Lorsque deux corps se déplacent l'un par rapport à l'autre, le rayonnement reçu n'est pas identique au rayonnement émis. C'est ce que les scientifiques appellent l'effet Doppler-Fizeau, du nom des deux chercheurs qui l'ont mis à jour. En particulier, lorsque deux corps s'éloignent l'un de l'autre, on observe un décalage vers le rouge. Un décalage d'autant plus important que la vitesse de récession est grande. L'observation d'un tel décalage sur les spectres de ces nouveaux objets célestes est alors mise en relation avec la théorie de l'expansion de l'Univers selon laquelle plus des galaxies sont distantes les unes des autres, plus elles s'éloignent vite.

Les scientifiques déduisent alors que 3C 273 s'éloigne de la Terre à une vitesse de 43 600 kilomètres par seconde, le plaçant à une distance d'environ 1,5 milliard d'années-lumière. Un calcul qui les conduit aussitôt à une conclusion très troublante. Pour que cet objet soit observé, sa luminosité intrinsèque doit être plusieurs centaines de fois supérieure à celle des galaxies les plus brillantes de notre ciel. Et les scientifiques ne sont pas encore au bout de leurs surprises. En 1964, ils découvrent que l'éclat de 3C 48 et de 3C 273 varie de façon irrégulière sur un intervalle de temps très court. Cela implique que les dimensions de ces objets soient extrêmement petites, inférieures à la distance que la lumière peut franchir pendant ce petit intervalle de temps. Il ne peut donc définitivement pas s'agir d'étoiles. À bout d'explications, certains chercheurs imaginent alors que le décalage vers le rouge observé dans les spectres de 3C 48 et 3C 273 n'est pas dû à l'expansion de l'Univers mais à un autre phénomène encore inconnu. De quoi ramener ces objets à des

distances et des luminosités plus faibles. Cette hypothèse est aujourd'hui abandonnée.

### DES OBJETS QUASI STELLAIRES

De nombreuses radiosources ont été identifiées depuis les années 1960. Plusieurs milliers d'entre elles ont des apparences stellaires et présentent un important décalage vers le rouge. Leur luminosité, mise en rapport avec leur relative petite taille, est colossale. Ces nouveaux objets, les astronomes ont choisi de les baptiser **quasars** en référence à



leur aspect quasi stellaire. Ce sont les objets célestes les plus brillants et les plus lointains jamais observés. Ils sont hébergés par des galaxies se trouvant à la limite de l'Univers visible. Un éloignement qui les rend particulièrement délicats à étudier et qui explique que les quasars restent encore mal connus de nos jours. Les scientifiques les soupçonnent toutefois d'être les noyaux de galaxies actives.

### UNE LUMINOSITÉ HORS DU COMMUN

Malgré leur éloignement de plusieurs milliards d'années-lumière, les quasars apparaissent comme extrêmement brillants. C'est donc que leur luminosité intrinsèque doit être prodigieuse. Ainsi, certains

quasars brillent plus qu'un millier de galaxies réunies. La seconde caractéristique remarquable des quasars est leur extraordinaire variabilité. Les astronomes ont constaté que l'intensité des ondes électromagnétiques émises par ces objets encore très énigmatiques pouvait varier considérablement en l'espace de quelques jours, voir quelques heures. Une remarque qui les renseigne sur les dimensions des régions centrales des quasars. Elles seraient bien inférieures à celles d'une galaxie typique. Leur diamètre n'excéderait pas quelques dizaines de fois la taille du système solaire.

### UN SPECTRE ÉLECTROMAGNÉTIQUE SINGULIER

Si les émissions radio ont attiré l'attention des scientifiques sur les quasars, il est aujourd'hui établi que l'énergie émise par ces derniers dans le domaine radio n'excède pas 1 % de leur énergie totale. En définitive, seul un quasar sur dix est une source intense de rayonnement radio. Les quasars rayonnent principalement dans les domaines des rayons X et de l'ultraviolet. Ils sont notamment responsables du rayonnement ultraviolet intense dans lequel baigne notre Univers. La distribution d'énergie dans les spectres des quasars est donc très différente de celle des étoiles. Elle décroît régulièrement vers les courtes longueurs d'ondes et ne suit pas la loi de Planck pour les corps noirs. Il faudra donc chercher ailleurs que dans le rayonnement thermique la source d'énergie des quasars. Le spectre visible des quasars est caractérisé par un grand décalage

vers le rouge dû à un effet Doppler sans précédent. Un décalage bienvenu puisque sans lui certaines raies observées seraient restées invisibles du fait de l'opacité de l'atmosphère à certaines longueurs d'ondes. Dans les spectres des quasars, les raies d'éléments connus sont déplacées vers les grandes longueurs d'onde car ces objets fuient la Terre à des vitesses de 50 à 100 000 kilomètres par seconde. Du fait de l'expansion de l'Univers, les vitesses d'éloignement croissent avec la distance. De telles vitesses indiquent donc que les quasars sont des objets très lointains. À ce jour, plusieurs milliers de quasars ont été répertoriés. Pour certains d'entre eux, le décalage vers le rouge observé serait tellement important que leur vitesse de récession avoisinerait les 93 % de la vitesse de la lumière, ce qui les placerait à des distances supérieures à 10 milliards d'années-lumière. Et les raies spectrales des quasars ne sont pas seulement fortement décalées vers le rouge mais aussi étonnamment larges. Un phénomène qui n'a pas encore trouvé d'explication.

### AU CŒUR DES QUASARS

Les quasars se présentent aux astronomes comme des objets composés d'un noyau central assorti de lobes s'étendant sur plusieurs millions d'années-lumière et accompagnés d'un nuage de gaz chaud. Ce dernier est révélé aux scientifiques par les raies découvertes dans le spectre du quasar. Les lobes correspondent quant à eux à des jets de particules extrêmement rapides et émetteurs de rayonnements radio. Ces jets semblent supertuniques, c'est-à-

### Phénomènes célestes

#### 13 milliards d'années-lumière

Le quasar connu le plus éloigné de la Terre se situe à près de 13 milliards d'années-lumière.

#### 3C 273

3C 273 est le plus proche des quasars connus. Il se situe à peine plus d'un milliard d'années-lumière, dans la constellation de la Vierge.

#### 20 000

Nombre de quasars identifiés par les astronomes.

#### 3C 454.3

Le quasar 3C 454.3 observé dans la constellation de Pégase est le plus lumineux connu à ce jour. Sa luminosité correspond à celle produite par environ 550 milliards de Soleil.

#### HE0450-2958

La majorité des quasars se trouvent au centre de galaxies massives. HE0450-2958 semble faire exception à la règle et défie toutes les théories.

#### Quasar

Le mot quasar vient de la contraction de quasi stellaire astronomical radio source.

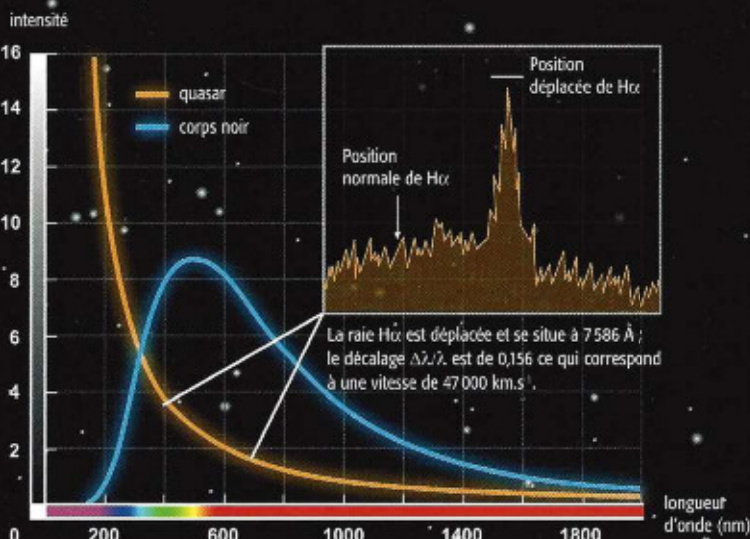
#### Au début des années



1960

Les premiers quasars identifiés

### Rayonnement en provenance d'un quasar





dire plus rapides que la lumière ! Mais, ce n'est qu'une illusion due au fait que la Terre reçoit, à des intervalles de temps très rapprochés, ce rayonnement de jets émis à des époques différentes, à une vitesse très proche de celle de la lumière et dans une direction voisine de la ligne de visée.

### LE MYSTÈRE D'ÉNERGIE

Depuis la découverte des premiers quasars, il y a plus de 40 ans, de nombreux travaux théoriques et d'observation leur ont été consacrés. Pourtant, leur nature reste encore mystérieuse. La principale question que se posent les chercheurs est celle des mécanismes physiques à l'œuvre au cœur de ces fabuleuses sources d'énergie. Les observations leur ont appris qu'une grande partie de l'émission électromagnétique des quasars provient de leurs noyaux s'étendant sur quelques années-lumière au maximum. La théorie la plus largement admise propose que les quasars seraient en réalité des trous noirs (c'est-à-dire des corps incroyablement compacts). Si compacts d'ailleurs que, sous l'effet de l'énorme gravité qu'ils exercent sur leur environnement, tous les objets passant à leur proximité sont inexorablement attirés vers leur centre. Les objets et la lumière elle-même ne parviennent plus à s'en échapper pour arriver jusqu'à nous : d'où le nom de **trou noir**.



Les quasars ne seraient donc que des trous noirs supermassifs (jusqu'à 10 milliards de fois la masse du Soleil), entourés de gigantesques disques de

gaz et de poussières. Ceux-ci ne tombent pas directement dans le trou noir mais tourbillonnent autour à grande vitesse avant d'être progressivement engloutis par les mystérieux ogres. Un tourbillon qui s'échauffe par frottement et perd une grande partie de son énergie sous la forme de rayonnements divers.

Des ondes radio aux rayons X en passant par l'infrarouge, la lumière visible et les ultraviolets, l'émission d'énergie dépasse celle des centaines de milliards d'étoiles de la galaxie hôte. Ce modèle permet donc de décrire avec fidélité les spectres observés dans le cas des quasars et d'expliquer la quantité énorme d'énergie lumineuse qu'ils émettent. Si la plupart des astronomes sont aujourd'hui convaincus que les **quasars** sont la manifestation de trous



noirs supermassifs au centre des galaxies, certains suggèrent d'autres explications. Ainsi, suite à une observation systématique d'un quasar pendant 20 ans à l'aide de 14 télescopes, une équipe de chercheurs américains a proposé une vision révolutionnaire qui suggère la présence d'un champ magnétique au cœur même des quasars. Une théorie pour l'heure encore très controversée et marginale.

### UNE PERSPECTIVE DIFFÉRENTE

En réalité, certains indices parmi lesquels les intenses émissions en ondes radio des quasars laissent penser que ces derniers et les radiogalaxies, objets connus pour abriter en leur cœur des trous noirs supermassifs, sont un seul et même type d'objets.

L'un et l'autre seraient simplement observés sous des angles différents. Les radiogalaxies ne se distingueraient des radiogalaxies (les quasars qui émettent d'intenses ondes radio) que par la faiblesse du rayonnement optique de leurs noyaux.

### DE LA VARIÉTÉ DANS LES QUASARS

Il existe en fait deux grands types de quasars qui se distinguent par leur comportement dans le domaine radio. Ainsi, 90% d'entre eux n'émettent aucun rayonnement dans ce domaine, comme les galaxies dites de Seyfert, alors que les 10% restant sont de puissants émetteurs radio, comme les radiogalaxies. En 1943, l'astronome américain Carl Seyfert isole une classe de galaxies caractérisées par un noyau compact et brillant dont le spectre présente des raies intenses et larges. Des galaxies qui semblent être rares. Sa liste n'en contient que douze. Pendant près de vingt ans, cette découverte passe inaperçue.

À la découverte des quasars, les astronomes notent de saisissantes similitudes entre les spectres de ces derniers et ceux des galaxies de Seyfert. Les noyaux de certaines d'entre elles, appelée maintenant galaxies de Seyfert 1, présentent toutes les propriétés des quasars (raies larges, composante optique compacte et variable et émissions X) mais sont beaucoup moins brillantes. Avec la découverte d'une faible nébulosité autour des moins lumineux des quasars, l'idée émerge que ces derniers ne sont rien d'autre que des noyaux de Seyfert 1 si brillants qu'ils aveuglent les instruments des astronomes qui ne parviennent pas à détecter les galaxies hôtes. À l'inverse, les noyaux des galaxies de Seyfert 1 seraient des quasars de luminosité si faible que les galaxies qui les entourent apparaissent presque normales. Près de 2% des galaxies proches ont un noyau de type Seyfert 1. Le phénomène quasar est donc extrêmement fréquent. Il est même envisageable qu'une

majeure partie des galaxies contienne un miniquasar, que les techniques actuelles ne permettent pas de détecter. Cette hypothèse est confirmée par deux découvertes. D'abord, celle d'un miniquasar de luminosité dix fois inférieure à celle du noyau de Seyfert 1 le plus faible connu dans l'une des galaxies les plus proches de la nôtre, M81. Puis, celle de la détection d'une source de rayonnement X compacte dans le noyau d'un certain nombre de galaxies jusqu'alors considérées comme normales. Une étude optique plus complète de ces galaxies a permis de montrer que, dans presque tous les cas, elles présentaient effectivement les caractéristiques des miniquasars. Les noyaux des galaxies dites de Seyfert 2 présentent quant à eux des spectres identiques à ceux des quasars sans pour autant posséder de noyau optique compact et variable. Mais là encore, tout laisse penser qu'un miniquasar peut être présent. Il pourrait être si faible que nos instruments seraient encore incapables de le détecter ou il pourrait nous être caché par un nuage de poussières opaques. Ainsi, les astronomes pensent aujourd'hui que la majorité des quasars se confondent avec les centres de galaxies massives.

### MYSTÈRE PARMI LES MYSTÈRES

Découvert par une équipe d'astrophysiciens belges, HE0450-2958 fait exception à la règle. Situé à plusieurs milliers d'années-lumière du centre de la galaxie la plus proche, il trône en solitaire à ses côtés. Si la galaxie présente tous les signes d'une récente et violente collision avec une autre galaxie, il ne subsiste absolument aucune trace de cette éventuelle seconde galaxie ! En y regardant d'un peu plus près, les scientifiques ont découvert, juste à côté du trou noir qui a donné naissance au quasar, un nuage de gaz, de la taille d'une petite galaxie. C'est donc en se nourrissant de gaz arrachés à ce nuage que le trou noir a pu se transformer en quasar. Comment ce duo improbable, trou noir nuage de gaz a-t-il pu se former ? La question reste encore sans réponse. Mais, elle a le grand mérite d'ouvrir de nouvelles perspectives sur la compréhension des objets mystérieux qui peuplent l'Univers et sur les mécanismes qui conduisent à la formation des galaxies, des trous noirs supermassifs et sur le lien qui les unit. C'est toute la question de la naissance des premières structures dans l'Univers, et avec elle de nos très lointaines origines, qui se retrouve ainsi posée.

### LES MÉTHODES D'OBSERVATION

C'est l'extraordinaire luminosité émise par les quasars qui permet aux scientifiques de les observer depuis les confins de l'Univers. L'une des méthodes employées pour observer des quasars est la technique dite des lentilles gravitationnelles. Comme le prédit la théorie d'Einstein, la gravité d'un corps massif tel une galaxie, situé sur la ligne de visée entre la Terre et le quasar, courbe l'espace et forme une image agrandie et amplifiée du quasar. Une technique qui a permis aux astronomes de déterminer qu'il y avait

bien un trou noir au centre de deux quasars, RX1131-1231 et Q2237+0305. Bien sûr, on ne peut pas observer directement un trou noir puisque par définition, il n'émet aucune lumière. Mais, la matière qui tombe dans celui-ci émet, elle, d'intenses rayonnements de toutes sortes. Des rayonnements de plus en plus importants au fur et à mesure que la matière d'accrétion s'approche du centre de l'objet, avant de disparaître dans le trou noir central. Cette chute s'accompagne d'une dernière émission de rayons X détectables à l'aide de télescopes classiques dans le domaine visible et de Chandra, l'observatoire spatial de rayons X de la NASA. C'est justement l'observation des quasars à l'aide de satellites d'astronomie X qui a montré qu'ils étaient tous des sources de rayonnement X intenses. Une grande partie de l'énergie émise par les quasars l'est aussi dans le domaine des rayons gamma, d'où la très grande importance d'observations avec le satellite *Integral*. Si l'extraordinaire luminosité des quasars les rend relativement accessibles à l'observation, elle complique aussi grandement l'étude de leur galaxie hôte. La plupart des instruments actuellement disponibles sont en quelque sorte éblouis par la lumière des quasars.

Le très grand contraste entre le quasar brillant et sa galaxie hôte beaucoup plus sombre rend quasiment impossible l'étude détaillée de cette dernière. Il est donc indispensable d'avoir recours à des instruments ultra-performants permettant d'atteindre une bonne résolution angulaire. Il s'agit de pouvoir séparer la lumière du quasar central de celle de sa galaxie hôte afin d'étudier cette dernière et de la comparer avec d'autres galaxies, plus banales, ne montrant aucun signe d'activité de type quasar. Des instruments aussi imposants que le *Very Large Telescope* de l'*European Southern Observatory* ou le télescope spatial *Hubble* sont nécessaires.



Et encore, ce n'est que pour des quasars proches que les scientifiques ont pu étudier la galaxie hôte en détail. Dès que des distances deviennent plus grandes, la taille apparente de la galaxie devient comparable à la résolution angulaire de l'instrument, même à celle de Hubble. Et tous ces instruments modernes et perfectionnés ne suffisent pas à faire le bonheur des astronomes. Ils doivent aussi développer des méthodes numériques très sophistiquées pour analyser les résultats. Car parfois, les indices les plus importants ne deviennent visibles qu'après un traitement des images. C'est ce qui est arrivé lors de l'étude du quasar HE0450-2958. Le nuage de gaz nourrissant le trou noir à l'origine du quasar n'est apparu à l'image qu'après un traitement numérique nouveau et extrêmement performant.

### La structure hypothétique d'un quasar

