



# Les Quasars

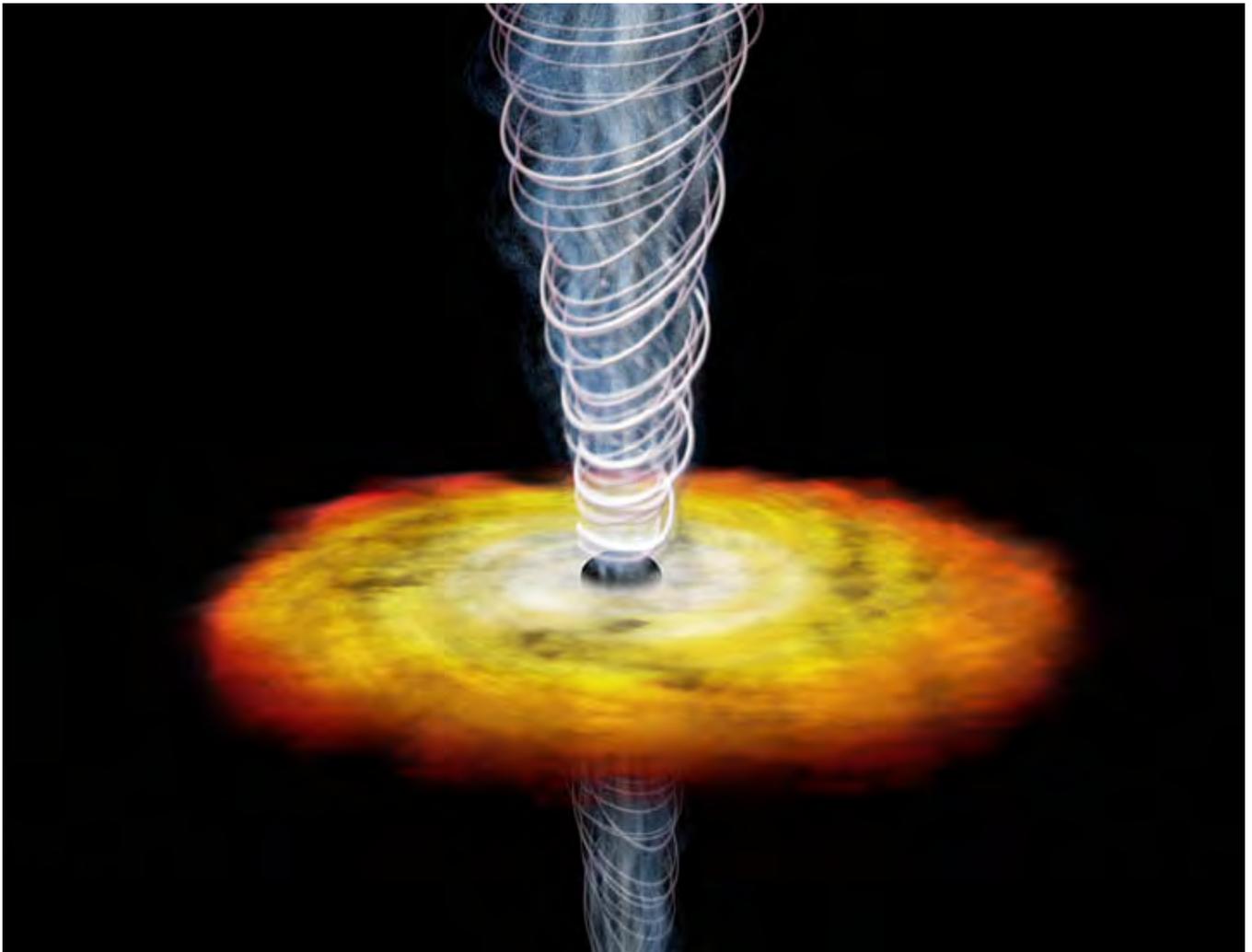


GAP 47 • Olivier Sabbagh • Novembre 2017 - Révision Mars 2023

# Les Quasars

Un **quasar** (**source de rayonnement quasi-stellaire**, *quasi-stellar radio source* en anglais, ou plus récemment « **source de rayonnement astronomique quasi-stellaire** », *quasi-stellar astronomical radio source*), est une galaxie très énergétique avec un noyau galactique actif. Les quasars sont les entités les plus lumineuses de l'univers. Bien qu'il y ait d'abord eu une certaine controverse sur la nature de ces objets jusqu'au début des années 1980, il existe maintenant un consensus scientifique selon lequel un quasar est la région compacte entourant un trou noir supermassif au centre d'une galaxie massive. Leur taille est de 10 à 10.000 fois le rayon de Schwarzschild du trou noir. Leur source d'énergie provient du disque d'accrétion entourant le trou noir.

Avec les télescopes optiques, la plupart des quasars ressemblent à de petits points lumineux, bien que certains soient vus comme étant les centres de galaxies actives (couramment connus sous l'abréviation AGN, pour Active Galaxy Nucleus). La majorité des quasars sont beaucoup trop éloignés pour être vus avec de petits télescopes, mais 3C 273, avec une magnitude apparente (ou relative) de 12,9, est une exception. À 2,44 milliards d'années-lumière, c'est un des objets lointains observables avec un équipement d'amateur. Certains quasars montrent de rapides changements de luminosité, ce qui implique qu'ils sont assez petits (un objet ne peut pas changer plus vite que le temps qu'il faut à la lumière pour voyager d'un bout à l'autre). Actuellement, le quasar ULAS J1120+0641 est le plus lointain jamais observé, et se situe à 12,9 milliards d'années-lumière de la Terre. On pense que les quasars gagnent en puissance par l'accrétion de matière autour des trous noirs supermassifs qui se trouvent dans le noyau de ces galaxies, faisant des « versions lumineuses » de ces objets connus comme étant des galaxies actives. Aucun autre mécanisme ne paraît capable d'expliquer l'immense énergie libérée et leur rapide variabilité.



*Vue d'artiste du quasar GB1508, entre le blazar (en blanc) et le disque (en jaune)*

## Structure

Un quasar est composé de trois grandes parties principales :

- Le trou noir supermassif comportant la quasi-totalité de la masse du quasar (de quelques millions à quelques dizaines de milliards de fois la masse du Soleil). Il est également le centre du quasar.
- Le disque d'accrétion est le disque formé par la matière qui tombe dans le trou noir. La force de friction engendrée par le frottement des gaz dans le disque génère une forte chaleur.
- Les jets de gaz qui sont expulsés du disque d'accrétion par les lignes de champs magnétique du trou noir atteignent une vitesse proche de celle de la lumière.

## Propriétés

On recense plus de 100.000 quasars (113.666 d'après le plus grand catalogue en 2006). Tous les spectres observés montrent des décalages vers le rouge allant de 0,06 à 6,4. Par conséquent, tous les quasars connus se situent à de très grandes distances de nous, le plus proche de nous étant à environ 240 Mpc (~783 millions d'a.l.) et le plus éloigné étant à environ 4 Gpc (~13 milliards d'a.l.), aux limites de l'univers observable. Comme la lumière prend beaucoup de temps pour couvrir ces grandes distances, la plupart des quasars qui se trouvent au-delà de 1 gigaparsec de distance sont vus tels qu'ils existaient dans un passé très lointain de l'Univers, leur lumière ne nous parvenant qu'aujourd'hui.

Quoique faibles quand ils sont observés optiquement (leur décalage vers le rouge élevé implique que ces objets s'éloignent de nous) les quasars sont les objets les plus brillants connus dans l'Univers<sup>6</sup>. Le quasar qui apparaît le plus brillant dans notre ciel est l'hyper-lumineux 3C 273, dans la constellation de la Vierge. Il a une magnitude apparente d'environ 12,9 (assez brillant pour être vu avec un petit télescope) mais sa magnitude absolue est de -26,7. Cela veut dire qu'à une distance de 10 pc (~ 33 années-lumière), cet objet lui-même dans le ciel aussi fortement que le Soleil. La luminosité de ce quasar est donc  $2 \times 10^{12}$  fois plus forte que celle du Soleil, ou environ 100 fois plus forte que la lumière totale d'une galaxie géante, telle que notre Voie lactée.

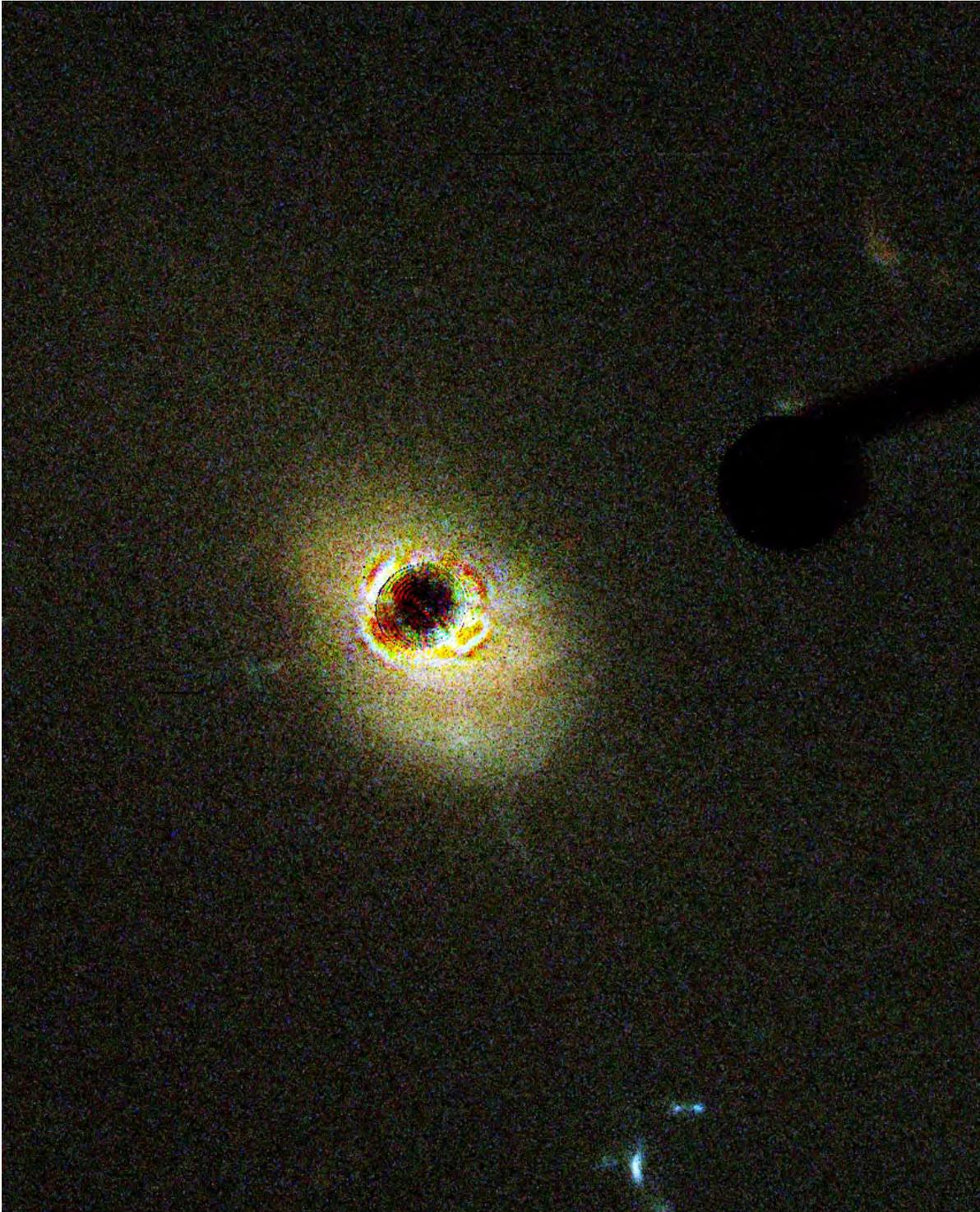
Le quasar super-lumineux APM 08279+5255 avait, lorsqu'on l'a découvert en 1998, une magnitude absolue de -32,2, quoique les images à haute résolution des télescopes Hubble et Keck révèlent que ce système est gravitationnellement grossi. Une étude du grossissement gravitationnel dans ce système suggère qu'il a été amplifié par un facteur d'environ 10. Cela est encore beaucoup plus lumineux que les quasars tout proches tels que 3C 273. On pensait que HS 1946+7658 avait une magnitude absolue de -30,3, mais lui aussi était mis en valeur par l'effet de grossissement gravitationnel.

On a découvert que les quasars variaient en luminosité sur différentes échelles de temps. Certains varient en brillance tous les  $x$  mois, semaines, jours, ou heures. Cette découverte a permis aux scientifiques de *théoriser* le fait que les quasars génèrent et émettent leur énergie dans une petite région, puisque chaque partie de quasar doit être en contact avec d'autres parties sur une échelle de temps pour coordonner les variations de luminosité. Ainsi, un quasar dont la luminosité varie sur une échelle de temps de quelques semaines ne peut être plus grand que quelques *semaines-lumière*.

Les quasars montrent beaucoup de propriétés comparables à celles des galaxies actives : le rayonnement est non-thermique, et quelques-uns ont des jets et des lobes comme ceux des radiogalaxies. Les quasars peuvent être observés sur de nombreuses régions du spectre électromagnétique : les ondes radio, les infrarouges, la lumière visible, les ultraviolets, les rayons X et même les rayons gamma.

La plupart des quasars sont les plus brillants dans le domaine du proche ultraviolet (~ 1 216 ångströms, ce qui correspond à la raie d'émission Lyman- $\alpha$  de l'hydrogène) dans leur référentiel propre, mais à cause des décalages vers le rouge considérables de ces sources, le pic de luminosité a été observé aussi loin que 9 000 ångströms.

Les *quasars de fer* montrent des raies d'émission très fortes résultant du fer ionisé, tel que IRAS 18508-7815.



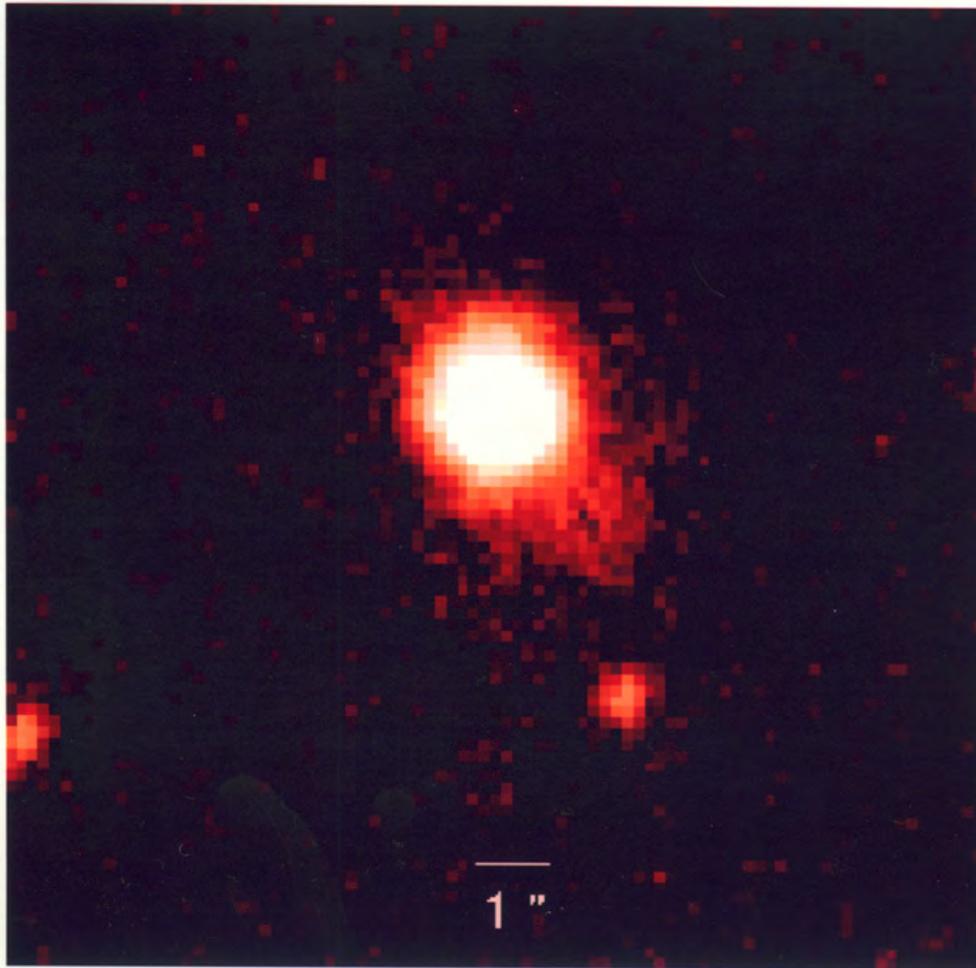
*Le quasar 3C 273, le plus lumineux jamais observé. Photographie prise par le télescope spatial Hubble*

### **Génération d'émission**

Comme les quasars montrent des propriétés communes à toutes les galaxies actives, beaucoup de scientifiques ont comparé les émissions des quasars et celles des petites galaxies actives due à leur similarité. La meilleure explication pour les quasars est qu'ils deviennent puissants grâce aux trous noirs supermassifs. Pour créer une luminosité de  $10^{40}$  W (la brillance typique d'un quasar), un trou noir supermassif devrait consommer la matière équivalente de 10 étoiles par an. Les quasars les plus brillants sont connus pour dévorer 1.000 masses solaires de matière par an. Les quasars sont connus pour s'allumer ou s'éteindre selon leur environnement. Une des implications est qu'un quasar ne pourrait, par exemple, continuer de se nourrir à ce rythme pendant 10 milliards d'années. Ce qui explique plutôt bien pourquoi il n'y a aucun quasar près de nous. Dans ce cas de figure, lorsqu'un quasar a terminé d'avalier du gaz et de la poussière, il devient une galaxie ordinaire.

Les quasars fournissent également des indices quant à la fin de la réionisation du Big Bang. Les plus vieux quasars ( $z > 4$ ) montrent une onde Gunn-Peterson et des régions d'absorption devant eux, indiquant que le milieu intergalactique était fait de gaz neutre, à ce moment-là. Des quasars plus récents montrent qu'ils n'ont aucune région d'absorption mais plutôt des spectres contenant une zone avec un pic connu sous le nom de forêt Lyman- $\alpha$ . Cela indique que l'espace intergalactique a subi une réionisation dans le plasma, et que le gaz neutre existe seulement sous la forme de petits nuages.

Une autre caractéristique intéressante des quasars est qu'ils montrent des traces d'éléments plus lourds que l'hélium. Cela indique que ces galaxies ont subi une importante phase de formation d'étoiles créant une population III d'étoile, entre l'époque du Big Bang et l'observation des premiers quasars. La lumière de ces étoiles a pu être observée grâce au télescope spatial Spitzer de la NASA (quoique fin 2005, cette interprétation demande encore à être confirmée).



*Cette photo, prise en lumière infrarouge, est une image en fausses couleurs d'un « tandem quasar-supernova », avec la plus lumineuse des explosions jamais observées dans ce type de combinaison. Ce couple fut découvert par une équipe de chercheurs venant de six institutions différentes.*

### Historique

Les premiers quasars furent découverts avec des radiotélescopes vers la fin des années 1950. Beaucoup furent enregistrés comme des sources radio sans objet visible associé. En utilisant de petits télescopes et le télescope Lovell comme interféromètre, on a remarqué qu'ils avaient une très petite taille angulaire. Des centaines de ces objets ont été répertoriés dès 1960 et répertoriés dans le Third Cambridge Catalogue. En 1960, la source radio 3C 48 fut finalement reliée à un objet optique. Les astronomes détectèrent ce qui paraissait être une pâle étoile bleue à l'endroit des sources radios et obtinrent son spectre. Contenant énormément de raies d'émission inconnues — le spectre irrégulier défiait toute interprétation — la revendication de John Bolton parlant d'un grand redshift ne fut pas acceptée.

En 1962, une percée fut accomplie. Une autre source radio, 3C 273, allait subir cinq occultations par la Lune. Les mesures effectuées par Cyril Hazard et John Bolton durant l'une des occultations en utilisant le radiotélescope de Parkes permirent à Maarten Schmidt d'identifier l'objet du point de vue optique. Il obtint un spectre optique en utilisant le télescope Hale (5,08 m) du mont Palomar. Ce spectre révéla les mêmes raies d'émission étranges. Schmidt réalisa que c'étaient les raies de l'hydrogène *redshiftées* (décalées vers le rouge) de 15,8 % ! Cette découverte démontra que 3C 273 s'éloignait à la vitesse de 47 000 km/s. Cette découverte révolutionna l'observation des quasars et permit à d'autres astronomes de trouver des redshifts émanant des raies d'émission et venant d'autres sources radio. Comme Bolton l'avait prédit plus tôt, 3C 48 s'avéra avoir un redshift équivalent à 37 % de la vitesse de la lumière.

Le mot « quasar » fut inventé par l'astrophysicien chinois Hong-Yee Chiu (en) dans la revue *Physics Today*, pour désigner ces intrigants objets qui devenaient populaires peu après leur découverte, mais qui se désignaient alors par leur appellation complète (quasi-stellar radio source) : « Pour l'instant, le mot plutôt maladroit et indéterminable de « quasi-stellar radio source » est utilisé pour décrire ces objets. Comme la nature de ces objets nous est complètement inconnue, il est difficile de leur donner une nomenclature courte et appropriée, même si leurs propriétés essentielles viennent de leur nom. Par esprit pratique, la forme abrégée « quasar » sera utilisée tout au long de cet article. »

— Hong-Yee Chiu, *Physics Today*, Mai 1964

Plus tard, on découvrit que certains quasars (en fait, seulement ~10 %) n'avaient pas de fortes émissions radio. De là le nom de « QSO » (*quasi-stellar object*) utilisé (en plus du mot « quasar ») en référence à ces objets, comprenant la classe des *radio-fort* et des *radio-silencieux*.

Le grand sujet de débat dans les années 1960 était de savoir si les quasars étaient des objets proches ou lointains comme le suppose leur redshift. On suggéra, par exemple, que le redshift des quasars n'était pas dû à l'effet Doppler, mais plutôt à la lumière s'échappant d'un puits gravitationnel profond. Cependant, une étoile avec une masse suffisante pour former un tel puits serait instable. Les quasars montrent également des raies spectrales inhabituelles, auparavant visibles sur une nébuleuse chaude de basse densité, qui serait trop diffuse pour générer l'énergie observée et pour accéder au profond puits gravitationnel. Il y eut également de sérieux soucis en ce qui concerne l'idée de quasars cosmologiques lointains. Un des principaux arguments en leur défaveur était qu'ils impliquaient des énergies qui excédaient les processus de conversion connus, y compris la fusion nucléaire. Ces objections se sont effacées avec la proposition d'un mécanisme de disque d'accrétion, dans les années 1970. Et aujourd'hui, la distance cosmologique des quasars est acceptée par la majorité des chercheurs.

En 1979, l'effet de lentille gravitationnelle prédit par la théorie de la relativité générale d'Einstein fut confirmée lors de l'observation des premières images du double quasar 0957+561.

Dans les années 1980, des modèles unifiés furent développés dans lesquels les quasars étaient vus simplement comme une classe de galaxies actives, et un consensus général a émergé : dans beaucoup de cas, c'est seulement l'angle de vue qui les distingue des autres classes, tels que les blazars et les radiogalaxies. L'immense luminosité des quasars serait le résultat d'une friction causée par le gaz et la poussière tombant dans le disque d'accrétion des trous noirs supermassifs, qui peut transformer de l'ordre de 10 % de la masse d'un objet en une énergie comparable à 0,7 % pour le p-p du processus de fusion nucléaire et qui domine la production d'énergie dans les étoiles comme le Soleil.

Ce mécanisme explique aussi pourquoi les quasars étaient plus communs lorsque l'Univers était plus jeune, comme le fait que cette production d'énergie se termine lorsque le trou noir supermassif consume tous les gaz et toutes les poussières se trouvant près de lui. Cela implique la possibilité que la plupart des galaxies, dont notre Voie Lactée, soient passées par un stade actif (apparaissant comme étant des quasars ou une autre classe de galaxies actives dépendant de la masse du trou noir et de son disque d'accrétion) et soient maintenant paisibles car elles n'ont plus de quoi se nourrir (au centre de leur trou noir) pour générer des radiations.