

# Les quasars

Daniel Kunth, I.A.P.

Lointains, compacts et pleins d'énergie, les quasars ont révolutionné notre vision de l'Univers, engageant une vraie course à ces quasi-étoiles qui reste une magnifique page de l'astrophysique.

La découverte d'objets célestes ayant l'aspect d'une étoile mais libérant plus d'énergie que des millions de milliards d'entre elles a interrogé les astronomes. Quelle est la source d'énergie qui fait briller ces astres ? Les quasars posent aux astronomes de nouvelles questions sur la structure de l'Univers ou la naissance des galaxies.

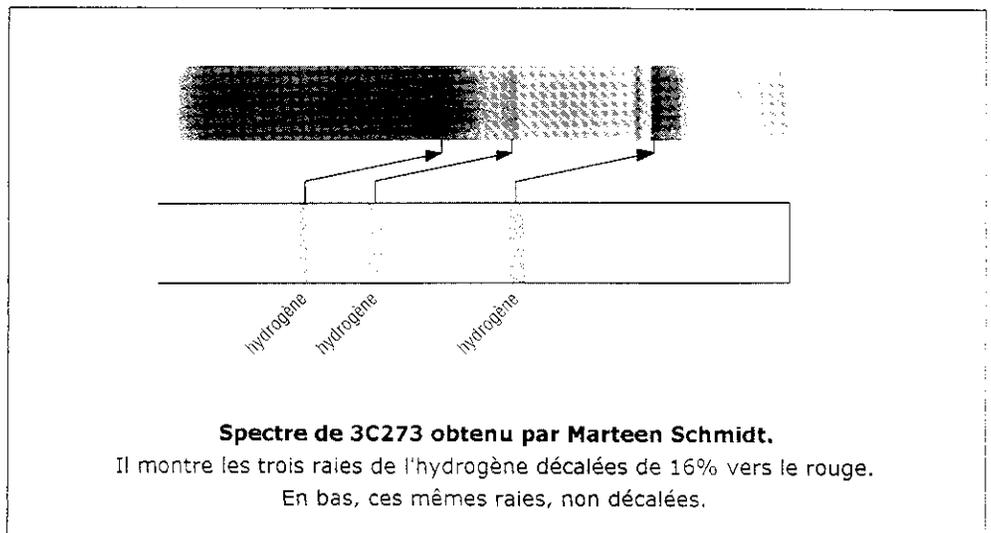
## 1 - Le contexte de la découverte.

Au début de l'année 1963 dans la revue *Nature*, on signale des astres mystérieux qui vont agiter la communauté des astronomes. Ces astres dénommés au départ "quasi stellar radio sources" seront immédiatement populaires sous le nom de "quasars".

Ils furent découverts par Marteen Schmidt, astronome hollandais, qui à l'observatoire du Mont Palomar fut surpris par l'étrangeté du spectre de 3C273, enregistré comme 273<sup>e</sup> source radio dans le troisième catalogue de l'observatoire de Cambridge en Angleterre.

Schmidt remarqua de nombreuses raies brillantes le long de la plaque photographique qu'il venait d'obtenir, sans parvenir à les identifier. D'ordinaire dans le spectre d'une étoile, on trouve des raies sombres mais rarement de brillantes.

Marteen Schmidt finit par identifier trois raies brillantes comme celles de l'atome d'hydrogène, mais décalées, très loin de leurs positions attendues vers la partie rouge du rayonnement visible. Schmidt songea aux galaxies, vastes ensembles composés de milliards d'étoiles, de poussière et de gaz, très semblables à notre Voie lactée, et dont les spectres souffrent d'un décalage analogue mais bien moindre.



Or, plus ce décalage vers le rouge est élevé et plus une galaxie est éloignée. Ce point fondamental provient d'une correspondance décalage-distance qui traduit que l'Univers tout entier est en expansion.

Le décalage observé dans 3C273 est de 16%, c'est à dire que la position nominale des raies de l'hydrogène (c'est à dire la longueur d'onde) se trouve décalée de 16% vers le rouge. Les astronomes parlent aussi de "redshift" de 0,16.

En interprétant ce redshift comme une "vitesse de fuite" due à l'expansion, Schmidt parvient à une distance de 1800 millions d'années de lumière ! L'astre le plus éloigné connu jusqu'alors ! A cette distance une étoile de notre Voie Lactée serait invisible.

3C273 renvoie donc à une époque lointaine à près de 2 milliards d'années. L'éclat apparent de 3C273 combiné à sa distance conduit à une luminosité intrinsèque époustouflante. Cette luminosité dépasse 5 millions de millions de fois celle du Soleil ou plus sobrement 1000 fois celle de la Voie lactée ! L'événement fait grand bruit. Les débats les plus vifs opposeront la communauté scientifique pendant des mois, des années, pour déchiffrer la nature des quasars.

## 2 - Sujets de polémique.

### 2.1 - La distance.

Pour comprendre les termes du débat, il est nécessaire de faire un retour sur la notion de distance.

Les distances de l'Univers nous font complètement changer d'échelle par rapport à notre expérience quotidienne : dans notre Galaxie, le Soleil est à 8 minutes-lumière, Pluton à 5 heures, l'étoile polaire à 600 ans... La lumière de l'étoile polaire est contemporaine des Grandes Découvertes et de celle de l'imprimerie par Gutenberg. Pour venir du centre de la Voie lactée, la lumière met 30 000 ans et ce ne serait qu'un saut de puce dans l'Univers. Au-delà de notre Galaxie, il lui faudrait 200 000 ans pour atteindre les Nuages de Magellan, et deux millions d'années pour rejoindre la Galaxie d'Andromède, nos plus proches voisi-

nes. Nous devons parcourir quatre millions d'années-lumière pour atteindre l'amas de la Vierge qui est un grand rassemblement de quelques milliers de galaxies. Au delà de 15 milliards d'années-lumière, l'Univers est invisible car sa lumière ne nous a pas encore atteints. Ce sont les limites de l'Univers observable.

3C273 avait de quoi faire rêver le plus traditionnel des astronomes. Dans le cas des quasars, l'évaluation des distances reposait uniquement sur le "décalage" vers le rouge, pierre angulaire de la théorie du Big Bang, qui en 1962 compte déjà de nombreux partisans.

A l'opposé, une minorité significative refuse l'expansion au profit d'un univers atemporel dit "stationnaire". L'astronome anglais Fred Hoyle sera l'un des défenseurs de l'Univers "non créé", affirmant qu'une origine de l'Univers n'a pas de sens.

Pour les premiers, il ne fait aucun doute que les quasars sont des objets lointains, témoins d'un Univers encore jeune. Le deuxième clan juge cette position inacceptable et tentera par tous les moyens de démontrer que les quasars entretiennent des relations fortes, non avec l'Univers lointain, mais avec les galaxies les plus proches.

Chip Arp, observateur hors pair, obtient des clichés photographiques d'une étonnante qualité, et passe maître dans l'art de découvrir des galaxies particulières et des arrangements célestes inattendus. Il découvre ainsi quelques couples quasars-galaxies semblant très rapprochés, comme s'ils étaient physiquement associés dans le ciel alors que leurs décalages spectraux (donc leurs distances selon la théorie de l'expansion !) sont tout à fait discordants.

Les experts s'affronteront précisément sur la valeur à accorder à ces "effets de perspective" et invoqueront les lois du hasard.

Aujourd'hui, les progrès de l'observation aidant, nous observons des galaxies avec des décalages analogues à ceux des quasars. Les grands décalages des quasars ne sont plus "anormaux". Du coup, chacun admet la portée cosmologique des quasars : en raison même de leur luminosité, ils sont visi-

bles à de très grandes distances et permettent de remonter dans le temps.

### 2.2 - L'énergie.

Nous savons que ces objets ne sont pas des étoiles, tant ils sont lointains et lumineux. Car si les quasars ont un éclat apparent très faible (il s'agit de la lumière reçue) et sont invisibles à l'oeil nu, ils sont à la source plus lumineux que la plus brillante des étoiles du firmament. Leur image toute ronde collectée sur un cliché photographique nous renseigne très peu sur leur véritable taille, car la turbulence de l'atmosphère terrestre a la mauvaise habitude d'étaler la lumière de tous les astres que l'on observe.

Par bonheur, l'éclat des quasars varie au cours du temps. Ils manifestent des variations d'éclat avec une rapidité parfois déconcertante ! Le plus souvent elles se manifestent le long de quelques mois ou plus, mais parfois peuvent être beaucoup plus rapides. L'éclat d'un quasar peut doubler voire quintupler en l'espace de quelques jours voire de quelques heures ! Des variabilités, venant d'objets dont on ne perçoit pas les dimensions, recèlent une information décisive sur leur taille. La dimension de la région émettrice est inférieure ou égale au produit de la durée de la variation observée par la vitesse de la lumière. Autrement dit, un quasar changeant d'éclat en un jour a une dimension de l'ordre d'un jour-lumière soit :  $300\,000 \text{ kms}^{-1} \times 3600 \times 24 \text{ s}$  i.e. 26 milliards de kilomètres. Le gros de son rayonnement jaillit d'une minuscule région (à l'échelle astronomique) comparable à celle de notre système solaire. Comment d'un si petit volume se dégage-t-il une énergie mille fois supérieure à celle de notre Galaxie ? Avant de le comprendre, avançons davantage dans les propriétés des quasars.

## 3 - A la recherche d'autres quasars.

Très vite les astronomes se sont employés à rechercher d'autres quasars, fortement émetteurs d'ondes radio, à l'instar de 3C273.

A Jodrell Bank en Angleterre et à Parkes en Australie les grands radiotélescopes s'activeront sans relâche.

Succéderont alors à 3C273 des quasars beaucoup plus décalés. Le décalage est de 1 si la longueur d'onde est doublée (décalage de 100 %) le décalage est de 2 si la longueur d'onde est triplée, etc.... A des décalages croissants correspondent bien entendu des "vitesses de fuite" et des distances plus grandes.

En fait, il s'avère que 90% d'entre eux n'émettent pas d'ondes radio, qui du coup, deviennent une caractéristique presque mineure du phénomène quasar. La spectaculaire découverte des premiers quasars révéla au monde une propriété exceptionnelle et non générale de ces astres nouveaux.

Des premiers catalogues jusqu'à aujourd'hui nous pouvons recenser plus de 10 000 quasars, la plupart d'entre eux sont beaucoup plus lointains que 3C273, et si l'ensemble du ciel était exploré, au moins un million seraient accessibles à l'observation.

Jusqu'où peut-on remonter le temps ? Rappelons-nous qu'un décalage spectral vers les grandes longueurs d'onde est une indication de plus grand éloignement de la source tant dans l'espace que dans le temps.

Au delà de 13 milliards d'années, soit un décalage spectral de 3, leur nombre commence à diminuer, passé 4 soit vers 13,5 milliards d'années quelques dizaines de quasars s'ajoutent aux autres, il n'y a pas de quoi pavoiser. Le décalage spectral le plus élevé atteint presque 5 et c'est encore Marteen Schmidt et ses collègues qui s'honorent de ce record avec un quasar de redshift 4,92 nommé PC 1247+3406.

Pour aller plus loin encore, il faudra considérer des décalages si grands que c'est dans l'infrarouge que les astronomes aujourd'hui sondent l'Univers. Le mur des décalages 5 ou 6 n'a pas été franchi mais il s'agit probablement d'une limite de nos propres instruments.

On trouve beaucoup plus de quasars il y a dix milliards d'années qu'aujourd'hui et plus loin encore ils semblent redevenir très rares. Le sort de l'Univers sans évolution est définitivement scellé car l'Univers n'apparaît pas identique à tout moment. Il y a des époques privilégiées où les galaxies

semblent se former et où les quasars dominent. Immobilisme et stabilité ne sont pas de ce monde.

## 4 - Des quasars aux "galaxies actives".

### 4.1 - Les galaxies de Seyfert.

La complexité de l'Univers commença à se révéler dès 1924 grâce à Edwin Hubble. Nous savons aujourd'hui que les galaxies forment une immense tapisserie, constituée d'amas, regroupés en superamas, le tout festonnant de véritables filaments qui délimitent vides et coquilles. Aux très grandes distances, les galaxies sont plus nombreuses et leurs formes diffèrent de celles qui sont plus proches de nous. Cette nouvelle image du cosmos est aussi le résultat des observations du télescope spatial Hubble. Cependant, dans les années 40, les galaxies les plus proches sont mal connues. En 1943, l'astronome allemand Carl Seyfert découvre des galaxies spirales, soeurs de notre Galaxie, mais qui s'en distinguent par un noyau central très lumineux et très bleu. Les spectres de ce noyau central sont si étranges que Seyfert ne trouve pas d'explications. Il venait pourtant d'observer les mêmes raies, mais beaucoup moins décalées que celles observées par M. Schmidt des années plus tard.

Ces galaxies sont appelées "galaxies actives" car les énergies mises en jeu par la lumière émise des régions centrales sont si grandes qu'il ne peut s'agir que d'une phase courte de leur évolution.

Elles ont des propriétés qui les apparentent aux quasars dont elles ne se différencient que par leur plus faible degré d'activité.

### 4.2 - Les radiogalaxies.

Parmi les galaxies actives, celles qui, après la seconde guerre mondiale, furent révélées par les radiotélescopes furent nommées radiogalaxies. La radiogalaxie Cygnus A est une galaxie elliptique 100 millions de fois plus puissante que le centre de la Voie lactée, une petite galaxie elliptique pourtant assez banale en lumière visible et située à 750 millions d'années-lumière.

Curieusement, l'émission radio

provient, non pas de la galaxie elle-même, mais de deux gigantesques lobes situés de part et d'autre. Les lobes radio ont toujours des tailles supérieures à celles des galaxies qu'ils entourent. La plupart sont plus brillants vers l'extrémité opposée à la galaxie émettrice, ce sont des points chauds. Très fréquemment, on observe un long filament de matière issu du noyau, plus ou moins rectiligne, parfois tortillonné qui vient rejoindre un des lobes, voire les deux, tel un cordon ombilical.

Ces lobes sont constamment réactivés par des particules très énergétiques contenues dans les jets issus du centre des radiogalaxies.

Il existe un lien de parenté entre les quasars et certaines radiogalaxies ou galaxies de Seyfert proches, bien que celles-ci soient moins puissantes. Au musée des galaxies actives, il faudrait ajouter les blazars aussi nommés "BL Lacertae", du nom du premier d'entre eux découvert dans la constellation Lacerta en 1941. Ces objets sont encore plus difficiles à déchiffrer que les autres car leurs spectres ne présentent pas la moindre trace de raies permettant d'estimer un décalage donc une distance. On trouve aussi les OVV (objets violemment variables) capables de varier d'éclat en moins d'une heure. Enfin, les galaxies de "Seyfert" se subdivisent en deux catégories : les "Seyfert 1", aux spectres riches en raies "larges" et dont les images montrent un noyau central très lumineux bien contrasté, et les "Seyfert 2" dont les spectres ne comprennent que des raies plus étroites.

Les astronomes ont d'abord pensé que ces objets étaient de nature différente, jusqu'à ce que certains parviennent comme nous le verrons à les rassembler sous un même concept unitaire.

### 4.3 - Les galaxies hôtes.

Depuis des années déjà les grands télescopes dévoilent les galaxies qui abritent les quasars en leur centre

Autour de 3C273 ont pu reconnaître les attributs d'une galaxie elliptique géante. Les galaxies de Seyfert ont été les premières explorées par le télescope spatial Hubble car elles sont plus proches. Ces galaxies spirales ou elliptiques ne sont pas nécessairement atypiques. En revanche la moitié des qua-

sars sont présents dans des galaxies en interaction rapprochée, voire dans des galaxies qui fusionnent avec d'autres. L'ensemble de ces résultats est difficile à interpréter. Leur seul point commun est que les quasars se réfugient au centre des galaxies, ordinaires ou non, lieu privilégié où l'apport de matière est maximum.

## 5 - Spectres et quasars

Une lumière contient un ensemble de rayonnements différents que l'on peut séparer et analyser. Ces rayonnements sont composés de photons dont l'énergie est directement proportionnelle à la fréquence. Un photon gamma transporte un million de fois plus d'énergie qu'un photon rouge, et celui-ci un million de fois plus qu'une onde radio centimétrique. D'où la nécessité pour les astronomes d'explorer toutes ces gammes, chacune exprimant des phénomènes physiques différents.

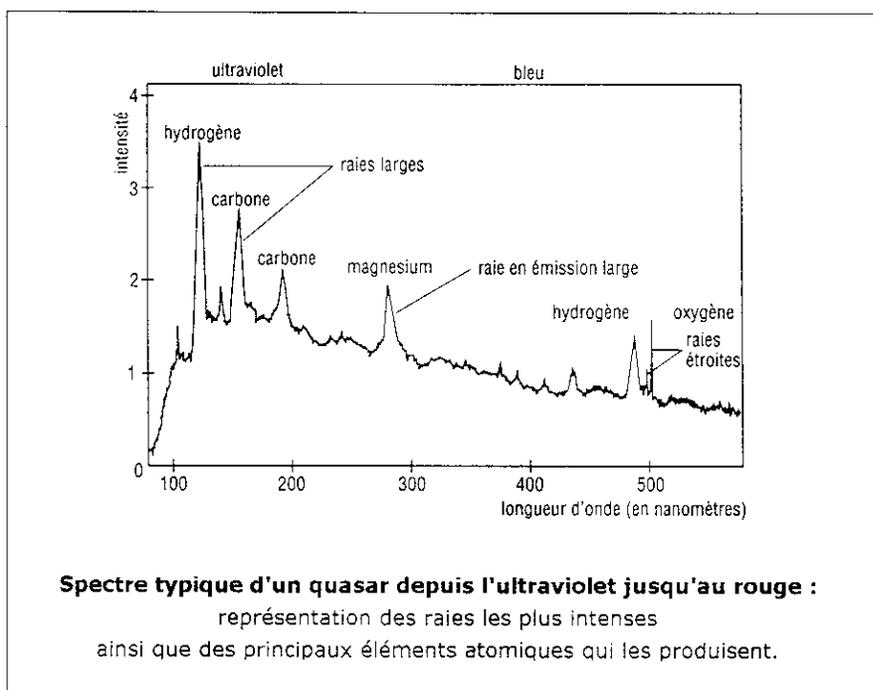
### 5-1 Un spectre complexe.

La couleur dominante d'une étoile exprime la température qui règne à sa surface. Une étoile chaude a une température de surface de plusieurs dizaines de milliers de degrés. Le rayonnement qui émerge domine dans l'ultraviolet. La surface du Soleil est à 5400° C et c'est pourquoi toute son énergie rayonne dans le spectre visible.

Le spectre d'un quasar, ne présente aucune des caractéristiques des étoiles. Contrairement à celles-ci, il rayonne copieusement dans toutes les longueurs d'onde, y compris dans des gammes que notre œil ne perçoit pas, c'est à dire depuis l'infrarouge jusqu'aux rayonnements les plus extrêmes, les X ou les gamma. Contrairement aux étoiles, son spectre présente également de nombreuses raies en émission (voir figure ci contre).

Le quasar est partout : là où le peintre a besoin d'une touche de couleur pour l'étoile il lui faut une palette complète pour le quasar.

La raison profonde tient à ce que les quasars offrent un monde complexe, siège de nombreux phénomènes distincts.



Leurs ondes radios proviennent de grandes quantités d'électrons qui spiralent dans un champ magnétique cosmique. Les quasars sont de véritables phares infrarouges. La présence de poussière est donc incontestable, et en plus grande abondance que dans la Voie lactée. Voilà qui reste mystérieux et sans explication définitive.

Le domaine visible est caractérisé par les raies en émission intenses et très étalées qui furent à l'origine de leur découverte. Cette largeur provient de l'altération de la fréquence des photons (effet Doppler) et permet de préciser les états dynamiques de la matière dans le quasar. Or les largeurs mesurées présument de vitesses tout à fait hors du commun atteignant fréquemment 5000 voire jusqu'à 30 000 kilomètres par seconde.

Parfois, des raies étroites cohabitent avec des raies larges. Elles proviennent de gaz extrêmement dilués dont les vitesses n'excèdent pas quelques centaines de kilomètres par seconde, de la promenade en somme !

Le rayonnement ultraviolet trahit un gaz d'au moins 100 000 degrés ou la présence d'étoiles très chaudes de grandes masses. Le rayonnement X et gamma représente à peu près 10% de l'énergie totale émise par ces objets. Aucun astre dans l'Univers n'évacue autant de rayons X. L'intensité de cette émission varie extrêmement vite (parfois en quelques minutes !), ce qui

permet d'ausculter les régions très centrales des noyaux actifs.

Les rayons X ne sont pas les plus énergétiques, ils sont concurrencés par les rayons gamma. Les quasars les émettent par de minces faisceaux collimatés qui s'échappent dans l'espace. Nous ne sommes à même de les capter que si nous nous trouvons sur la trajectoire de ces faisceaux. Cela explique que seuls quelques quasars sont détectés : les autres envoient leurs rayons gamma dans une autre direction.

### 5.2 - Un spectre variable.

Lorsque les chercheurs français de l'observatoire de Meudon ont annoncé des variations dans les détails spectraux d'une galaxie de Seyfert, leurs collègues américains ont tout bonnement haussé les épaules. Suzy Collin et ses collègues croyaient en leurs résultats dur comme fer. Toujours est-il que nul ne songe aujourd'hui à nier ces variations. Mieux encore, il y eut des campagnes coordonnées afin d'observer le même astre au même moment et sur de longues périodes.

Tout ne varie pas de la même manière. Ni de façon synchronisée, ni avec la même durée. Lorsque les rayons X varient en quelques minutes, la lumière ultraviolette le fait plus tardivement et un peu plus longuement, puis viennent les raies larges, le rayonnement infrarouge et enfin les raies "interdites" qui ne varient pas.

## 6 - La source d'énergie des quasars.

### 6.1 - De l'énergie à tout prix.

Quel mécanisme fournit autant d'énergie dans un volume si petit?

L'énergie nucléaire est la source que les étoiles utilisent pour briller leur vie durant. Le Soleil convertit chaque seconde 700 millions de tonnes d'hydrogène en noyaux d'hélium. Pourtant, ce mécanisme est peu efficace pour un quasar. Moins d'un petit pourcent du combustible initial devient lumineux. En un an, un quasar désintègre totalement l'équivalent de 15 fois la masse du Soleil. Si le phénomène dure cent millions d'années, 1 milliard de masses solaires doivent disparaître en lumière. Le quasar requiert cent fois plus de combustible, c'est à dire 100 milliards de Soleils ou l'équivalent de notre Galaxie. Le tout dans un tout petit volume. N'est-ce pas réhibitoire ?

Il existe un mécanisme plus efficace dont les effets nous sont familiers car ils viennent de la gravitation. L'énergie de gravitation est facilement transformée au bénéfice de l'énergie cinétique. Cette méthode de récupération est souveraine d'autant plus que le corps qui attire est massif et que l'on s'approche très près de lui. Le candidat rêvé pour résoudre l'énigme des quasars est le trou noir.

Une étoile 10 fois plus massive que le Soleil peut parfaitement devenir un trou noir. Une fois à court de combustible, l'étoile termine sa vie dans l'explosion fulgurante d'une supernova. La quasi totalité de sa masse est expulsée dans l'espace. Si le résidu stellaire atteint entre 1,4 et 3 masses solaires, il s'agit d'une étoile à neutrons. Un centimètre cube d'une telle étoile a une masse d'un milliard de tonnes. Si le résidu dépasse 3 masses solaires nous avons un trou noir.

Notre Voie lactée recèle très certainement quelques trous noirs stellaires. Cygnus X-1, à plus de 6000 années-lumière de nous, est sans doute le premier trou noir stellaire découvert par le satellite Uhuru. Mais rien ne s'oppose à l'existence de trous noirs de plusieurs millions voire plusieurs milliards de masses solaires. Les former requiert simplement une colossale quantité de

matière. Au centre des galaxies on observe précisément une grande concentration d'étoiles et de grandes quantités de gaz qui migrent vers la région centrale : le noyau.

La variabilité des quasars indique des dimensions ultra compactes, voisines de celles du système solaire. Les vitesses très élevées du gaz donnant naissance aux raies larges suggèrent une masse de l'ordre d'un milliard de fois la masse du Soleil. Le trou noir pourra "aspirer" ce qui passe à sa portée et construire autour de lui un cocon de matière, sous la forme d'un "disque d'accrétion".

La matière de ce disque se rapproche en spiralant et finit par s'agglutiner sur le trou noir. C'est durant cette dernière phase que le disque d'accrétion va copieusement rayonner de l'énergie avec un rendement 10 fois supérieur au moins à celui que l'on obtient de la fusion nucléaire.

### 6.2 - L'éclat en contrepoint de la noirceur.

Plaçons-nous par la pensée au sein du trou noir. En tentant d'en sortir, on atteint le rayon qui ouvre vers la lumière, vers ce que nous appelons quasar.

C'est de la surface du disque d'accrétion qu'émergent toute la lumière ultraviolette et les rayons X. C'est aussi dans cette région que particules et rayons X se liquent pour produire des photons gamma pleins d'énergie. Plus loin, nous trouvons des nuages animés de très grandes vitesses (précisément en raison de l'influence du centre massif) qui sont responsables des raies larges. Cela donne des dimensions de quelques années-lumière, pas davantage.

Il est probable que les jets radio des radiogalaxies et des radio-quasars naissent là, tout près du centre, quand les électrons rebondissent près du trou. Ils le font perpendiculairement à l'axe de rotation du disque, et s'échappent librement à des vitesses voisines de celle de la lumière. La poussière, pour ne pas être sublimée, doit se concentrer en grandes quantités à bonne distance du quasar. Elle produit l'émission infrarouge.

Le gaz très ténu qui émet les raies étroites des galaxies de Seyfert s'étend

lui bien plus loin que les raies larges à plus de 3000 années-lumière du centre.

Les grandes galaxies spirales contiennent de grandes quantités de gaz sous forme atomique ou moléculaire qui fournit le carburant voulu. Les interactions entre galaxies peuvent jouer un rôle pour acheminer du gaz ou des étoiles vers le centre en une immense cheminée céleste. Un jour tout cela s'arrête et le casseur d'étoiles devient inactif. Le trou noir s'assoupit, faute de carburant, il digère les cadavres exquis de ses étoiles galactiques.

Notre Voie lactée renferme un quasar presque endormi. On y trouve une source radio très compacte et deux millions d'étoiles rouges dans un petit volume de cinq années-lumière, de quoi imaginer le jour en pleine nuit. Du gaz tourne avec frénésie comme happé par un objet central. Des flashes lumineux sont enregistrés tandis que des petits jets radio rappellent leurs grands frères lointains. Les théoriciens spéculent sur ces manifestations pyrotechniques tandis que des observateurs invoquent un "modeste" trou noir de quelques millions de masses solaires.

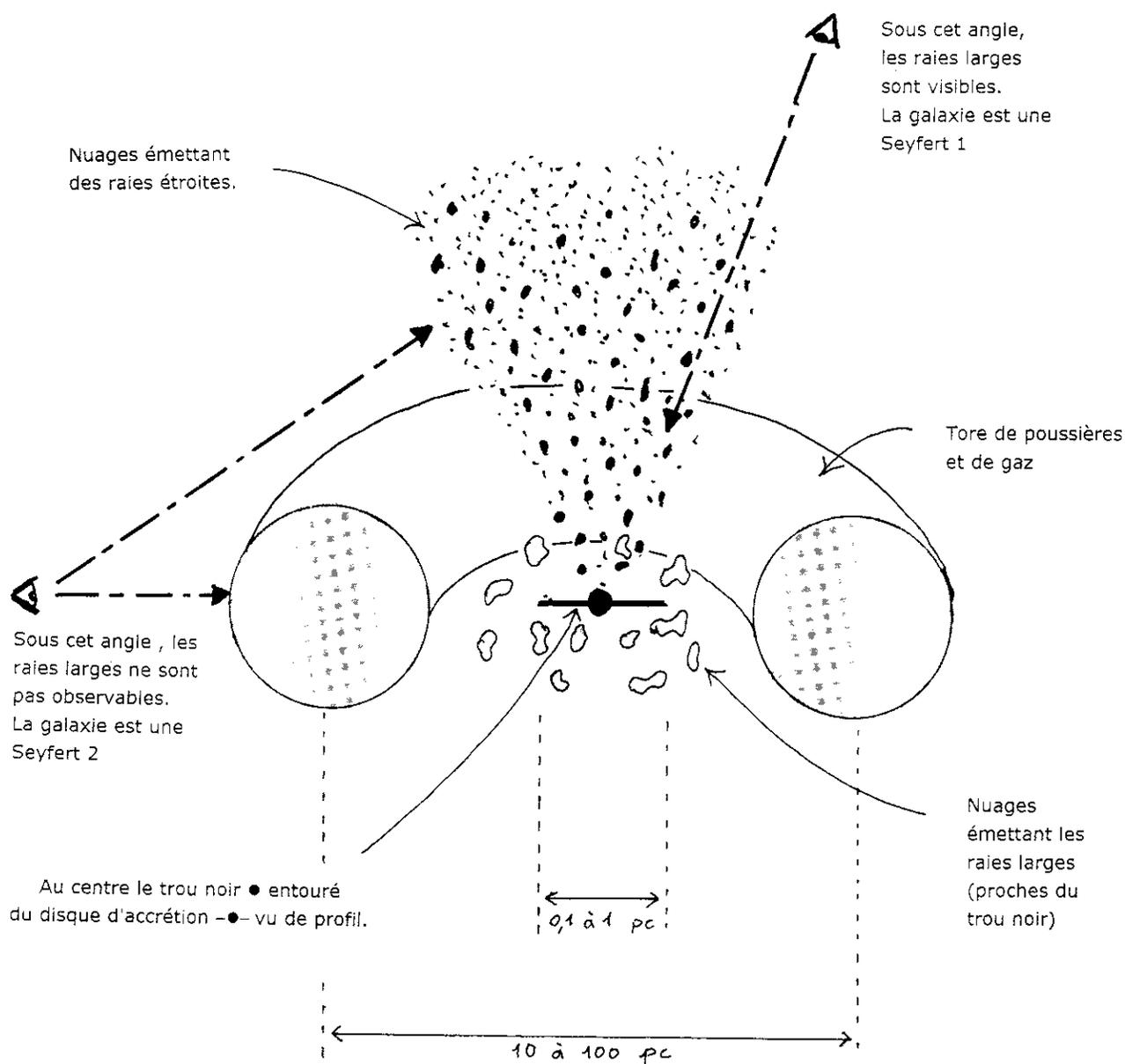
## 7- Des quasars des hommes aux quasars du ciel.

### 7-1 Le modèle unifié.

C'est une tentation de l'esprit humain de vouloir interpréter le monde en réduisant les multiples facettes de ses apparences à un système d'explications simples. Les observateurs ont vite remarqué que sous le terme générique de noyau actif se rassemblait une série de phénomènes qui ne sont pas réunis à chaque fois. Certains quasars émettent en radio, d'autres pas, certains ont des raies larges, d'autres pas, les galaxies de Seyfert ont des raies larges, ou parfois étroites seulement, les blazars émettent des ondes radio comme les quasars mais n'ont presque pas de raies en émission etc...

En 1985 Roberto Antonucci et Joe Miller ont montré que ce qui détermine l'apparence des galaxies actives est notre angle de vision par rapport à un immense anneau obscurcissant venu s'accumuler près du disque d'accrétion.

## Le modèle "unifié".



L'anneau gazeux épais et poussiéreux dérobe des zones entières de la région centrale à notre vision directe, selon notre orientation vis à vis du quasar. Lorsque l'anneau cache tout, seules les raies étroites situées en dehors apparaissent et nous révèlent une Seyfert 2. Si nous regardons au-dessus de l'anneau, nous avons un oeil sur le centre et les raies larges comme dans une Seyfert 1 ou un quasar. Dans un même objet, on a observé des changements au cours du temps, comme si l'anneau était détruit ou animé d'un mouvement de rotation tantôt occultant le centre et tantôt le dévoilant.

Vues par la tranche, les galaxies de Seyfert à raies larges deviennent des galaxies à raies étroites. Les galaxies émettrices d'ondes radio entrent naturellement dans cette séquence : leurs jets sont canalisés par de puissants champs magnétiques et visibles lorsque notre angle de vue permet de regarder par dessus l'anneau. Dans le cas extrême où l'on se place dans l'axe exact de ces jets, certains noyaux pointent leurs "tuyères" dans notre direction et nous avons affaire aux blazars. En étendant ce concept d'unification on recueille l'ensemble des phénomènes.

### 7-2 Avec quelques étoiles de plus...

Toutes les théories sont inventées. Elles s'imposent par adéquation avec le réel qui joue le rôle d'arbitre. N'aurait-on pas renoncé trop vite aux étoiles ? L'émission ultraviolette des quasars est également l'apanage d'étoiles très chaudes et très massives.

En 1983, le satellite européen IRAS (Infra-Red Astronomical Satellite) découvre des galaxies "infrarouge" qui rivalisent en luminosité avec les quasars ! Certains pensèrent avoir affaire à des quasars entourés de poussière, d'autres à des galaxies capables d'en-

gendrer un nombre fabuleux de nouvelles étoiles. Ces galaxies aux luminosités comparables à celles des quasars ont amené Roberto Terlevich, astronome à l'Institut d'astronomie de Cambridge (UK) à questionner la légitimité du trou noir. En 1985, il postule l'existence d'étoiles, au sein des noyaux actifs, dont la surface atteint des températures de plus de 100 000 K.

Si des millions d'étoiles naissent au centre des galaxies actives, les plus grosses terminent leur brève existence (quelques dizaines de millions d'années) en supernovae. Il s'ensuit un véritable feu d'artifice. La luminosité des supernovae peut rivaliser avec celle d'une galaxie tout entière et elles pourraient être observables jusqu'aux distances où nichent les quasars. Dans ces gigantesques amas d'étoiles, les variations d'éclat des quasars représentent les supernovae successives qui explosent les unes après les autres, parfois en même temps.

Cette tentative de remplacer le trou noir par des étoiles de grande masse reçut un clin d'oeil céleste de manière complètement surprenante.

Un matin de 1987 Alec Filippenko repère une tache lumineuse nouvelle dans la galaxie spirale NGC4615. L'image révèle une supernova étrange avec un spectre ressemblant à s'y méprendre à celui d'un noyau de "Seyfert". La mystification aurait été totale si la supernova avait été placée en plein centre de NGC4615 et pourtant ce n'est pas un quasar ! C'est une supernova c'est à dire la mort violente d'une étoile dans la banlieue d'une galaxie... mais elle a le même spectre ! L'analogie semble donner raison à Terlevich.

Que trouve-t-on au centre des quasars ? Un trou noir ou une flambée stellaire ? Les quasars demandent pour affiner notre savoir de prendre en compte plusieurs scénarios possibles plutôt que de les opposer. Certes le trou noir habillé d'un disque d'accrétion rend compte d'événements très violents. Ils n'ont aucun mal, par exemple, à produire les photons gamma les plus énergétiques en bordure du trou.

En revanche, le modèle de Roberto Terlevich n'a aucune peine à expliquer les propriétés des raies larges qui résultent des immenses quantités de gaz ex-

pulsé par les supernovae. Il décrit très facilement que les variations de lumière sont plus rapides dans l'ultraviolet que dans les raies émises par le gaz éjecté. Son impossibilité à expliquer la production de jets radio très dirigés et étroits est son plus sérieux handicap. Le disque d'accrétion a l'avantage d'agir comme un aimant en rotation et son champ magnétique permet de canaliser les particules en les expulsant vers l'extérieur le long de jets étroits. C'est pourquoi ces jets de plusieurs millions d'années-lumière sont sans doute les meilleurs indices trahissant la présence d'un trou noir.

De même, les superbes images du coeur de la galaxie spirale NGC4261 par le télescope Hubble dévoilent un tore de poussière de 800 années-lumière de diamètre. Ce tore nourrirait un trou noir supermassif entouré d'un cocon de gaz chaud et lumineux.

L'observation la plus décisive en faveur du trou noir est sans doute venue du satellite ASCA mis en service par les astronomes japonais. Il a observé des rayons X émis par du fer porté à quelques millions de degrés et qui trahissent des mouvements de rotation d'environ 100 000 kilomètres à la seconde. Aucune supernova ne peut éjecter de gaz à cette vitesse. Ce gaz extrêmement chaud ne peut qu'orbiter au bord d'un trou noir.

L'histoire du progrès scientifique est l'histoire dramatique des victoires remportées sur la contradiction : en réalité un consensus semble réunir les deux approches. Au fur et à mesure que les observations s'affinent, la source d'énergie des quasars est difficilement identifiable car parfois une quantité colossale de nouvelles étoiles semble coexister avec un trou noir. S'achemine-t-on vers une symbiose où un trou noir central serait entouré d'un disque, de nuages denses, d'un tore poussiéreux, de nuages ténus avec un amas dense de jeunes étoiles en formation ? De nombreux détails restent incompris : quels mécanismes amorcent la flambée d'étoiles ou forment le trou noir central ? quel est l'ordre d'apparition des mécanismes et comment agissent-ils l'un sur l'autre ?

### 7-3 Les quasars et la naissance des galaxies.

Des théoriciens comme Suzy Collin et Jean-Paul Zahn de l'observatoire de Meudon en appellent à la formation d'étoiles de grandes masses au sein même du disque d'accrétion. Ce modèle surprenant, a l'avantage d'assurer la stabilité dynamique du disque, de produire des éléments lourds très tôt dans l'Univers, et permet de poser élégamment la question de l'oeuf et de la poule à propos de l'origine des galaxies et des quasars.

Pour l'astronome anglais Joseph Silk, les nuages de gaz primordiaux de l'Univers ont d'abord formé des trous noirs massifs, incapables qu'ils étaient de se fragmenter suffisamment pour donner naissance à des étoiles, fussent-elles 100 fois plus massives que le Soleil. Quels processus ont donné naissance à ces trous noirs primitifs ? Nul ne le sait encore. Un quasar est-il intimement lié à la formation des galaxies ? Les galaxies précèdent-elles les quasars ?

La nouveauté de ces dernières années est de voir cohabiter quasars et galaxies, aussi loin que l'on puisse remonter dans le temps, ce qui bien sûr ne simplifie pas la tâche. Des galaxies déjà très bien formées se trouvent non loin de quasars bien installés...

## 8 - Et demain ?

Les quasars ont peu à peu changé de statut épistémologique au fil des années. Ils ont d'abord fasciné. Puis de nombreux astronomes les ont tenus pour de simples curiosités.

Depuis peu, surtout parce qu'ils semblent être intimement liés au trou noir - objet singulier de la physique- et à la formation des étoiles, ils sont redevenus objets d'étude et de recherche systématiques.

Leur distance permet une véritable plongée dans le temps et l'espace. Les galaxies lointaines à des redshifts supérieurs à 3 le permettent aussi, mais leur lumière est plus diffuse, moins concentrée que celle des quasars.

Nous sommes loin d'avoir épuisé les riches heures des quasars. D'abord objets exotiques ils étaient accusés

dans les années 60 de détourner de leurs études les meilleurs astronomes de l'époque. Pour eux, les grands télescopes sont mobilisés. Pour la première fois en 1998 nous connaissons une galaxie plus lointaine que le plus lointain des quasars, et située à un redshift de 5.34. Au delà de cette anecdote, les quasars sont devenus indissociables de notre réflexion sur l'origine des galaxies et l'histoire de l'Univers. Ces prochaines années verront les astronomes conduire leurs observations en tentant d'élucider au mieux ces problèmes. Ils y seront aidés par la mise en service de télescopes encore plus puissants et surtout la possibilité d'augmenter leur pouvoir de résolution au point de "s'approcher" de plus en plus près du centre d'activité des quasars.

#### Bibliographie :

1 - "**Les Trous Noirs**", Jean-Pierre-Luminet, éditions Belfond, 1987.

2 - "**Les quasars : Aux confins de l'univers**", Suzy Collin et Grazyna Stasinska, collection Science et Découverte, éditions Le Rocher, 1987.

3 - "**Les quasars**", Philippe Veron, collection Que Sais-je, n° 1267, Presses Universitaires de France.

#### NDLR :

1 - Daniel Kunth, article "**les Quasars**", dans "la science au présent", 2001, Encyclopedia Universalis. Daniel Kunth a obtenu l'aimable auto-

risation de l'éditeur de reproduire cet article légèrement modifié pour les lecteurs des Cahiers.

2 - On peut relire avec profit deux anciens articles de Suzy Collin sur le même sujet :

"**Les quasars aujourd'hui**",

CC 41, printemps 88.

"**Les noyaux actifs de galaxies**", CC 47, automne 89.

3 - Autres références utiles:

"**Les quasars**", Daniel Kunth, collection Dominos, Flammarion 1998, (ouvrage recensé par G.W. dans le CC 85, printemps 99).

"**Les quasars et les noyaux actifs de galaxies**", Suzy Collin, "L'Univers des galaxies", Hachette, collection "Les fondamentaux".



## Informations diverses.

### L'IAP fête la Science.

La fête de la Science se déroulera cette année du 16 au 22 octobre et l'Institut d'Astrophysique de Paris participe à cet événement. Il sera ouvert au public le samedi 21 et le dimanche 22 octobre de 13h30 à 18h, et quatre conférences sont prévues. **Des membres de l'IAP se déplaceront dans les établissements scolaires.** Ils répondront aux questions concernant l'astronomie et l'astrophysique et parleront des projets nationaux et européens.

Pour tout renseignement complémentaire ou pour organiser une rencontre avec un membre de l'IAP dans un établissement scolaire contacter l'IAP :

98bis, boulevard Arago, 75014 Paris ; tel : 01 44 32 80 00 ; fax : 01 44 32 80 01 ; fetescience@iap.fr

### Les TPE en première scientifique.

Les thèmes finalement retenus pour l'année 2000-2001 en série S sont : croissance ; eau ; images ; risques naturels et technologiques ; sciences et aliments ; **rythmes et périodes** (BO du 22 juin 2000).

Sur ce dernier thème certains lycées ont déjà expérimenté cette année ; voici des exemples de sujets traités dans l'Académie de Versailles :

Les incertitudes liées à la mesure du temps ; temps universel , temps sidéral ; temps solaire.

Les différents types d'horloges : les clepsydres ; temps égyptien, clepsydres ; mécanisme de l'horloge ; horloges atomiques et temps officiel ; la montre à quartz ; cadrans solaires.

Calendriers grecs ; calendrier musulman ; calendriers julien et grégorien.

Orbites célestes et périodes ; éclipses ; périodes nucléaires ; les équinoxes ; rythme des saisons.

Nous pouvons utiliser les Cahiers pour proposer des sujets, relater nos expériences mais aussi pour mettre en commun une documentation adaptée.

Si vous connaissez des documents (livres, revues, CD-roms, sites Internet) utilisables par les élèves, vous seriez gentils de les signaler à la rédaction en les accompagnant si possible d'un commentaire.

**Pour tout courrier concernant les Cahiers écrire à Martine Bobin :**

**18, chemin des Bienfaits 91530 Le Val Saint-Germain. Mél : martine.bobin@wanadoo.fr**