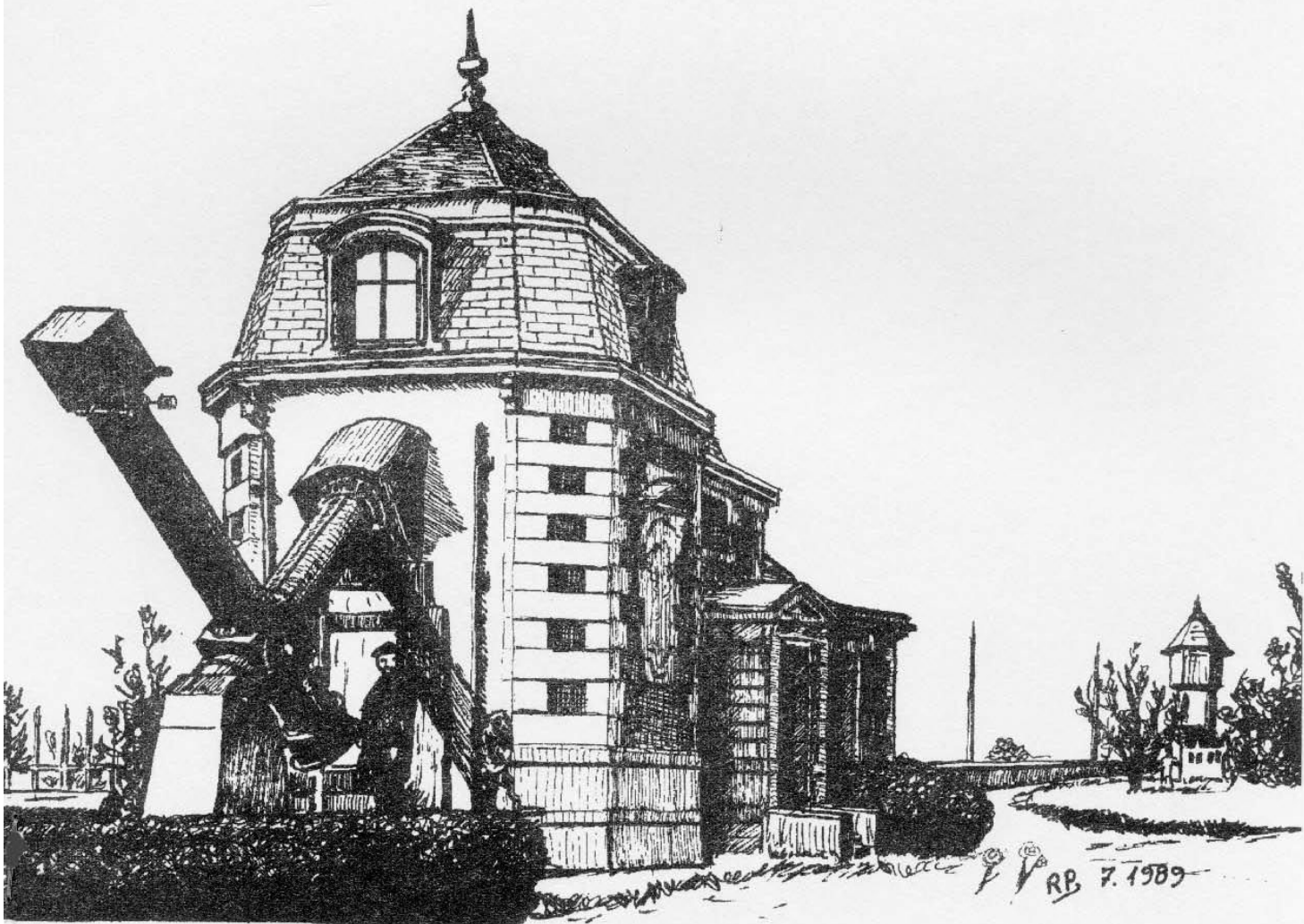


Société Astronomique de Lyon



BULLETIN N°39 – Octobre 1995

SOCIETE ASTRONOMIQUE DE LYON

Observatoire de Lyon 69230
Saint-Genis-Laval

BULLETIN N°39 - OCTOBRE 1995

ISSN 1258-5378

SOMMAIRE

PAGES

- 2 Réunion de la 'Commission des étoiles Doubles' de la
S.A.F.
Par Paul SOGNO.
- 2 Poésie : A. CHENIER.
- 4 Les quasars
Par Daniel SONDAZ.
- 19 Notes de lecture.
Par Daniel SONDAZ.
- 20 Bibliothèque de la S.A.L.

SOCIETE ASTRONOMIQUE DE LYON

A succédé en 1931 à la Société Astronomique du Rhône, fondée en 1906.

Siège Social : U.E.R. Observatoire de Lyon, avenue Charles André, F 69230 Saint
Genis Laval.

Tel. 78 59 58 39

Trésorerie : C.C.P. Lyon 1822-69 S

Tarifs 1995: Cotisation + bulletin : 170 F,
scolaires : 120 F

Conférences : 30 F , gratuites pour les
cotisants.

Réunions : Le vendredi, Accueil de 21H à 21H30.

Observations. Bibliothèque; prêt de livres. Discussions et activités.
Bulletin : Les articles que vous désirez faire paraître dans le bulletin sont à envoyer au siège de la Société sous forme manuscrite ou sur disquette format IBM.

S.A.F. Commission des étoiles Doubles

Réunion à La Neylière, près de St Symphorien sur Coise

Le 2 Septembre 1995

PRESENTATION DE LA SOCIETE ASTRONOMIQUE DE LYON :

Monsieur SOGNO, président de la S.A.L, rappelle brièvement l'historique du groupe Lyonnais: La SAL, qui succéda en 1931 à la Société Astronomique du Rhône, compte en moyenne, depuis plus de quarante ans, environ 150 membres dont la majorité est intéressée essentiellement par nos conférences (de 6 à 8 par ans suivant la disponibilité des éventuels conférenciers, astronomes professionnels ou amateurs), et par le voyage organisé chaque année vers un site assez attractif : Observatoire ou Centre de Recherches. Jusque vers 1950 ce furent les principales activités de la SAL.

Après la parution dans l'Astronomie, au cours des années 1950, de « La Construction du Télescope d'Amateur » de Mr TEXEREAU, un certain nombre de nos anciens se lancèrent dans cette nouvelle aventure et, pour faire le point sur les progrès ou les déboires de chacun ils constituèrent un « Groupe Pratique d'Astronomie » qui se réunissait tous les Vendredi soir dans un café autour d'une tisane, d'une bière ou d'un café pour échanger leurs idées.

Dans les années 1960 la bienveillance d'un directeur de l'observatoire permis aux membres du conseil et aux quelques mordus du « Groupe Pratique », de tenir leurs réunions hebdomadaires non plus dans un café mais dans une salle de l'Observatoire de Lyon situé à St Genis Laval.

==== * * * ====

André Chénier

Poète français est né à Constantinople en 1762. Il est mort à Paris en 1794. Arrêté le 18 ventôse de l'an II, il est écroué à Saint-Lazare où il passe plus de quatre mois. Il est conduit à l'échafaud le 7 thermidor sans jugement. Sainte-Beuve saluait en lui 'notre plus grand classique après Racine'. Et nombreux furent les romantiques qui, un jour ou l'autre, s'inspirèrent de l'esprit, du décor, des images et des rythmes d'André Chénier.

A lire les poésies : L'Aveugle, *Hylas*, *La Jeune Tarentine*. Et des pièces : *Elégies* et *les Bucoliques*.

« ABIMES DE CLARTÉ... »

Poème de A.CHÉNIER

Muse, Muse nocturne, apporte-moi ma lyre.
Comme un fier météore, en ton brûlant délire,
Lance-toi dans l'espace ; et pour franchir les airs,
Prends les ailes des vents, les ailes des éclairs,
Les bonds de la comète aux longs cheveux de flamme.
Mes vers impatients élançés de mon âme
Veulent parler aux Dieux, et volent où reluit
L'enthousiasme errant, fils de la belle nuit.
Accours, grande nature, ô mère du génie.
Accours, reine du monde, éternelle Uranie,
Soit que tes pas divins sur l'astre du Lion
Ou sur les triples feux du superbe Orion
Marchent, ou soit qu'au loin, fugitive emportée,
Tu suives les détours de la voie argentée,
Soleils amoncelés dans le céleste azur
Où le peuple a cru voir les traces d'un lait pur ;
Descends ; non, porte moi sur la route brûlante,
Que je m'élève au ciel comme une flamme ardente.
Déjà ce corps pesant se détache de moi.
Adieu, tombeau de chair, je ne suis plus à toi.
Terre, fuis sous mes pas. L'éther où le ciel nage
M'aspire. Je parcours l'océan sans rivage.
Plus de nuit. Je n'ai plus d'un globe opaque et dur
Entre le jour et moi l'impénétrable mur.
Plus de nuit, et mon œil et se perd et se mêle
Dans les torrents profonds de lumière éternelle.
Me voici sur les feux que le langage humain
Nomme Cassiopée et l'Ourse et le Dauphin.
Maintenant la Couronne autour de moi s'embrase.
Ici l'Aigle et le Cygne et la Lyre et Pégase.
Et voici que plus loin le Serpent tortueux
Noie autour de mes pas ses anneaux lumineux.
Féconde immensité, les esprits magnanimes
Aiment à se plonger dans tes vivants abîmes ;
Abîmes de clartés, où, libre de ses fers,
L'homme siège au conseil qui créa l'univers ;
Où l'âme remontant à sa grande origine
Sent qu'elle est une part de l'essence divine.

LES QUASARS

(Conférence donnée le 18 mars 1995 par Daniel Sondaz)

Les quasars passionnent les astronomes pour beaucoup de raisons. Ils sont les objets les plus lointains que l'on puisse observer: si l'on admet que l'âge de l'Univers est 20 milliards d'années, la lumière du plus lointain quasar actuellement connu, PKS 2000-330, a mis 16 milliards d'années pour nous parvenir, donc nous le voyons tel qu'il était lorsque l'âge de l'Univers était le cinquième de son âge actuel. Si on peut les voir alors qu'ils sont si lointains, c'est qu'ils émettent une quantité énorme de rayonnement, donc d'énergie. Certains rayonnent autant que cent galaxies elliptiques géantes. Enfin, nous verrons que ce rayonnement a sa source dans une région très exiguë, de l'ordre de quelques jours-lumière, quelques mois-lumière ou un peu plus.

On peut définir un quasar comme un astre ayant, dans le domaine visible, la même apparence ponctuelle qu'une étoile, dont le spectre présente des raies d'émission très décalées vers le rouge et dont la magnitude absolue est inférieure à -23 (donc plus lumineux qu'une galaxie elliptique géante).

Le lecteur peu familier avec un certain nombre de notions (raies spectrales, rayonnement thermique, rayonnement synchrotron, etc.) pourra se reporter à l'appendice où elles sont succinctement définies.

A) Historique - Après la Seconde Guerre Mondiale on construisit des radiotélescopes destinés à recueillir le rayonnement radio des astres de la même façon que les télescopes optiques collectent la lumière visible. C'est ainsi que l'on mit en évidence le rayonnement radio du Soleil, des restes de supernovae et des nuages d'hydrogène ionisé (nuages HII) présents dans notre Galaxie. On répertoria les sources radio dans des catalogues comme le célèbre troisième catalogue de l'observatoire radio de Cambridge: une source radio inscrite dans ce catalogue est désignée par un numéro comme, par exemple, 3C48, ce qui signifie quelle y porte le numéro 48.

Au début, le pouvoir séparateur des radiotélescopes était très mauvais. Le pouvoir séparateur d'un instrument est la distance angulaire que doivent avoir au moins deux points situés sur la voûte céleste pour que l'instrument les distingue. Le pouvoir séparateur augmente avec le diamètre de l'instrument et diminue avec la longueur d'onde à laquelle on observe. Ainsi pour distinguer deux points distants de 20 secondes d'arc, quand on observe à la longueur d'onde 21 cm (une raie de l'hydrogène), il faudrait un télescope de plus de 2Km de diamètre! La réalisation d'un tel instrument est très difficile, voire impossible, mais on dispose à l'heure actuelle de techniques interférométriques mettant en jeu des radiotélescopes très éloignés les uns des autres et donnant le même pouvoir séparateur qu'un radiotélescope dont le diamètre serait égal à la distance entre les radiotélescopes utilisés. Ainsi, par exemple, l'interférométrie à très longue base (V.L.B.I. very large base interferometry) utilise des instruments situés aux Etats-Unis et en Australie, donc distants d'une dizaine de milliers de Km.

L'amélioration des techniques permit de montrer que certaines sources radio coïncidaient avec des galaxies elliptiques que l'on pouvait observer dans le domaine optique. C'est ainsi que l'on découvrit les premières radiogalaxies. Dans les années 1960 certaines sources radio résistaient toujours: on était incapable de les faire coïncider avec un astre visible optiquement ou bien la coïncidence était incertaine. Parmi elles, il y avait 3C48 et 3C273. 3C48 semblait coïncider avec une étoile bleue. A cette époque, on n'avait jamais détecté de rayonnement radio provenant d'une étoile. En 1960, l'astronome américain Sandage montra le spectre de 3C48 qu'il avait obtenu. Il présentait des raies d'émission (c'est-à-dire des raies plus brillantes que le fond), ce qui étonna car les spectres d'étoiles n'en ont en général pas (sauf quelques-unes, les étoiles W ou les étoiles Be par exemple). De plus ces raies ne correspondaient à aucun élément chimique connu. En 1962, l'astronome anglais Hazard profita d'une occultation de 3C273 par la Lune (autrement dit la Lune est passée devant la source radio) pour mesurer avec une bonne précision la position de 3C273: la mesure de l'instant où disparaît l'émission radio permet une détermination précise de la position de la source émettrice. La source radio fut identifiée à une étoile bleue qui, de plus, présentait une sorte de jet lumineux. M.Schmidt, de l'observatoire du mont Palomar, en prit un spectre: celui-ci présentait des raies d'émission inhabituelles. Y.Greenstein et T.Mattews le rapprochèrent du spectre de 3C48. Ces trois astronomes étudièrent de près ces spectres et cherchèrent à identifier les raies d'émission qui y étaient. Ils découvrirent qu'il s'agissait de raies connues (entre autres, une raie de l'hydrogène et deux raies de l'oxygène) mais très fortement décalées vers les grandes longueurs d'onde: 16% pour 3C273, 37% pour 3C48. Pour employer le langage de l'astronomie nous dirons que le décalage de 3C273 est $Z=0,16$ et celui de 3C48 est $z=0,37$. Ces raies ne se forment pas dans les atmosphères stellaires. Aussi, les astronomes nommèrent-ils ces nouveaux astres « quasi stellar objects » ou, en abrégé, quasars.

Un très célèbre article de Greenstein et Schmidt, paru en 1964 dans le non moins célèbre *Astrophysical Journal*, a discuté les raisons possibles de ce décalage vers le rouge. Une hypothèse était que ce décalage fût d'origine gravitationnelle. D'après la théorie de la relativité lorsqu'un photon est émis dans une région où règne un fort champ de gravitation, il perd en s'échappant une partie de son énergie. Donc sa longueur d'onde, inversement proportionnelle à son énergie, augmente. Cet effet est tout à fait négligeable dans la plupart des astres. Il ne peut être sensible que près d'un corps extrêmement massif ou extrêmement dense. Cette hypothèse a été éliminée. En effet, parmi les raies d'émission des quasars, figurent des raies dites « interdites » qui ne prennent naissance que dans des milieux très raréfiés et donc pas au même endroit que les autres raies. Par conséquent le Z de ces différentes raies auraient dû être différents puisque le décalage gravitationnel varie avec la distance entre le point où le photon est émis et le centre du corps responsable de la gravité. Or l'observation montrait qu'il n'en était rien: toutes les raies avaient le même décalage. Il ne restait que l'explication du décalage par effet Doppler: les décalages des raies de 3C273 et de 3C48 nous montraient que ces astres s'éloignaient de nous avec des vitesses respectivement à 48000Km/s et 110000Km/s.

Mais alors était-il possible que ces astres eussent été éjectés de notre Galaxie? Même s'il s'était agi d'astres ayant la masse d'une étoile, cela aurait impliqué de la part de notre Galaxie une dépense énorme d'énergie pour les propulser à une telle vitesse. Rien n'indique que notre Galaxie ait pu produire à un moment donné une telle énergie. Mais il y a bien plus. On a rapidement découvert beaucoup d'autres quasars: quelques dizaines presque tout de suite, 6000 à l'heure actuelle. Tous ces quasars présentent des décalages vers les grandes longueurs d'onde et l'hypothèse des quasars éjectés par notre galaxie devenait totalement irréaliste sauf à imaginer un Univers dont nous serions le Centre et d'où auraient été éjectés des milliers de quasars avec l'énorme énergie que cela demande pour chacun d'eux. Cette hypothèse est, de toute évidence, plus qu'extrêmement improbable !

Il ne restait donc que l'explication cosmologique. En 1929, Hubble a découvert la loi qui porte son nom et qui est l'une des plus grandes découvertes astronomiques du XX^{ème} siècle: toutes les galaxies s'éloignent de nous et la vitesse avec laquelle elles s'éloignent de nous, dite vitesse de récession, est proportionnelle à leur distance. Cette loi, déduite de l'observation, ne fait évidemment pas jouer à la Terre un rôle de centre! La théorie de l'expansion de l'Univers montre qu'elle serait la même en n'importe quel autre point de l'Univers. Si V est la vitesse de récession en km/s, r la distance en mégaparsecs (1 Mpc=1 million de parsecs=3.26 millions d'années de lumière) on a une relation de la forme $V=Hr$ où H est la constante de Hubble (en km/Mpc). H est difficile à déterminer avec précision; on sait que H est comprise entre 50 et 100. Donc la seule hypothèse restant en course est celle suivant laquelle le décalage des quasars est une conséquence de la loi de Hubble, c'est à dire de l'expansion de l'Univers, et qu'ils se trouvent à des distances calculables à l'aide de la loi de Hubble.

B) Comment on recherche les quasars. - Sandage, partant du fait que 3C48 et 3C273 étaient des objets beaucoup plus violets que les étoiles, eut l'idée de rechercher les quasars à l'emplacement des sources radio connues en prenant deux clichés du même champs stellaire, l'un à travers un filtre bleu, l'autre à travers un filtre ultraviolet. Cela lui permettait de détecter les objets à fort excès d'ultraviolet susceptibles d'être des quasars. Il découvrit ainsi un certain nombre de quasars associés à des sources radio et, surtout, il trouva beaucoup d'autres astres dont les spectres étaient en tout point comparables à celui des quasars mais qui n'étaient associés à aucune source radio. Ainsi, bien que les quasars aient été découverts grâce à leur rayonnement radio, beaucoup d'entre eux n'émettent pas de rayonnement radio. Les quasars trouvés par la suite montrèrent que 90% d'entre eux ne rayonnent pas dans le domaine radio. On les dit radio-silencieux tandis que les autres sont dits radio-émetteurs.

Luyten et Sandage recherchèrent aussi des quasars parmi les objets répertoriés dans un catalogue établi par Haro et Luyten, contenant des astres bleus de faible luminosité situés à de hautes latitudes galactiques et donc peut susceptibles d'être des étoiles de notre Galaxie. Ils découvrirent ainsi beaucoup de quasars, pour la plupart radio-silencieux.

A l'aide de catalogues récents de sources radio on trouva un certain nombre de quasars radio-émetteurs.

L'astronome américain Smith eut l'idée d'utiliser des photos prises avec un télescope muni d'un prisme-objectif pour découvrir de nouveaux quasars. Sur un cliché pris avec ce type d'instrument, on obtient à la place de chaque astre un tout petit spectre. On repère, parmi tous ces spectres, ceux qui présentent des raies d'émission intenses. On prend alors un spectre plus détaillé de ces astres et on mesure leur décalage vers le rouge. Cette méthode, utilisée pour la première fois en 1975 par Osmer et Smith, a permis de trouver plusieurs milliers de quasars.

Le satellite IRAS destiné à l'observation en infrarouge et le satellite Einstein destiné à l'observation en rayons X ont aussi découvert des quasars.

Les spécialistes ont vite pensé que les quasars étaient des noyaux de galaxies actifs (un noyau de galaxie est dit actif s'il est le siège de phénomènes violents produisant beaucoup d'énergie), mais détecter une galaxie autour d'un quasar n'est pas chose aisée: les quasars sont tous très lointains et le contraste est énorme entre la très forte luminosité du quasar et la luminosité beaucoup plus faible de la galaxie. Néanmoins en 1990, à l'ESO, M.P.Véron-Cetty et L.Woltjer sont parvenus, en étudiant les quasars les plus proches, à détecter autour de l'image ponctuelle du quasar une lumière diffuse traduisant la présence d'une galaxie géante. L'amélioration des techniques d'observation a permis de déterminer la morphologie et le spectre de quelques galaxies logeant des quasars. Une galaxie dont le noyau contient un quasar est dite « galaxie-hôte » du quasar.

C) Ce que montre l'observation des quasars - On observe les quasars à à peu près toutes les longueurs d'ondes.

1) Domaine visible - Les quasars sont d'aspect stellaire, c'est-à-dire que leur image est quasi-ponctuelle. Leur spectre présente des raies d'émission très larges. Ces raies sont des raies de l'hydrogène, de l'hélium, du carbone, de l'oxygène, du silicium, etc. Elles traduisent que ces gaz sont excités par une source d'énergie. Leur largeur révèle l'existence de mouvements avec des vitesses de plusieurs milliers de Km/s dans la région émissive. Ces raies sont toujours très décalées vers les grandes longueurs d'onde. Toutes les raies d'émission d'un même quasar ont le même décalage. Beaucoup de quasars ont un décalage de l'ordre de 2. Le plus grand décalage connu, mesuré en 1990 au mont Palomar, est celui du quasar PKS 2000-330: il vaut 4,9.

Ces raies sont souvent accompagnées du côté des courtes longueurs d'onde par des raies d'absorption plus étroites. Par exemple, le spectre du quasar OQ172 montre 175 raies d'absorption. Il peut y avoir plusieurs systèmes de raies d'absorption avec des décalages différents. Ainsi, dans le spectre du quasar O237-233 ($z=2,224$), on distingue trois systèmes de raies d'absorption à $z=1,365$, $z=1,657$, $z=1,672$.

- 2) **Domaine radio** - Un quasar sur dix environ rayonne dans le domaine radio. Lorsqu'on étudie un quasar radio-émetteur on établit sa « carte radio », c'est-à-dire une image du quasar sur laquelle les points où l'émission radio a la même intensité sont reliés par des courbes, les isophotes radio (analogues aux courbes de niveau sur les cartes géographiques). Ces cartes radio montrent que le rayonnement radio provient principalement de deux vastes régions, les lobes, s'étendant de part et d'autre du quasar, à peu près symétriquement par rapport à lui, jusqu'à des distances de plusieurs centaines de milliers ou plusieurs millions d'a.l. . Sur le bord externe de chacun de ces lobes se trouve une petite région d'émission radio intense appelée point chaud. De plus, on peut parfois voir, comme par exemple dans le quasar 4C74.26, un jet dirigé du quasar vers l'un des lobes (il y a sans doute un jet dirigé vers l'autre lobe mais nous ne le voyons pas).

Ce rayonnement radio a une intensité qui varie en fonction de la longueur d'onde suivant une loi de puissance. De plus il est polarisé. Ces deux caractéristiques font qu'il est normal de le supposer d'origine synchrotron.

- 3) **Le spectre continu** - Dans les divers domaines de longueur d'onde (radio, optique,...), les quasars montrent aussi un spectre continu. Ce spectre continu est celui d'un rayonnement dont l'intensité varie en fonction de la longueur d'onde suivant une loi de puissance. Cette distribution est caractéristique du rayonnement synchrotron.
- 4) **Domaine infrarouge, X, gamma** - En infrarouge, on possède quelques données obtenues par le satellite IRAS lancé en 1983. Ces mesures montrent que les quasars ont un rayonnement très intense en infrarouge. Par exemple 3C48 rayonne plus d'énergie dans le domaine infrarouge que dans le domaine visible, mais peut-être cette énergie provient-elle de la galaxie-hôte car, malheureusement, le pouvoir séparateur des télescopes infrarouges est encore très faible.

Les quasars rayonnent beaucoup dans le domaine X. Le satellite allemand Rossat lancé en 1990 a répertorié presque 100000 sources X dans le ciel et on en a conclu qu'au moins 35% du fond diffus X provenait de sources individuelles, quasars, galaxies de Seyfert ou radiogalaxies. Pour le moment, peu de quasars ont été observés dans le domaine des rayons X durs et des rayons gamma.

Le rayonnement X des quasars ne peut pas être d'origine synchrotron car il exigerait des particules extrêmement énergétiques produites en grandes quantités. Il n'y a par contre pas d'obstacles à supposer que son origine est l'effet Compton inverse. Lorsqu'un photon très énergétique interagit avec une particule matérielle, il peut lui communiquer de son énergie : c'est l'effet Compton. Inversement, il se peut qu'un photon de faible énergie interagissant avec une particule matérielle animée d'une grande vitesse acquiert de l'énergie aux dépens de celle-ci: c'est l'effet Compton inverse. Il peut être efficace dans les quasars puisque chez eux cohabitent des électrons relativistes responsables du rayonnement synchrotron (optique, infrarouge, radio) et des photons

infrarouges ou radio de ce même rayonnement. L'effet Compton inverse les transforme en photons X ou gamma.

- 5) **Distances** - Les distances des quasars se déduisent du décalage vers le rouge de leurs raies d'émission en appliquant la formule relativiste de l'effet Doppler et en utilisant la loi de Hubble. Comme la constante de Hubble n'est connue qu'à un facteur 2 près, cela entraîne une imprécision de même ordre dans le calcul de la distance. Les quasars connus sont tous très lointains, avec des distances de plusieurs milliards d'années de lumière. Exemples: avec une constante de Hubble prise à 75 km/Mpc, 3C273 est à 700 Mpc (plus de 2 milliards d'a.l.), 3C48 est à 1500 Mpc (4.5 milliards d'a.l.), 0Q172 dont le décalage vaut $z=3.53$ est à 12 milliards d'a.l.
- 6) **L'énergie produite par les quasars.** - Elle est colossale. Reprenons l'exemple de 3C273. Sa magnitude absolue montre que ce quasar débite, dans le domaine visible, 1039 joules par seconde. Par ailleurs, il montre un jet distant de 100000 al de la source. Comme rien ne peut se propager à une vitesse supérieure à celle de la lumière, l'activité du quasar dure donc au moins depuis 100000 ans. Par conséquent 3C273 a au moins fourni une énergie de 1051 joules, l'équivalent de la transformation en énergie, suivant la formule $E=mc^2$, de la masse de dix mille étoiles semblables au Soleil ! La puissance rayonnée par 3C273 dans le domaine visible, soit 1039 watts, est égale à mille fois la puissance rayonnée par notre Galaxie. Parmi les plus lumineux des quasars, PKS 1510-089 a une magnitude absolue égale à -30 (Rappelons que celle des galaxies les plus lumineuses est comprise entre -20 et -22) et 3C279, qui a présenté de fortes variations de luminosité, a atteint à son maximum la magnitude -31,4 autrement dit il a été aussi lumineux que 10000 galaxies elliptiques géantes.
- 7) **Variabilité** - Les quasars sont pratiquement tous variables dans le domaine optique. Une variabilité modérée, de l'ordre de 10%, est fréquente sur des échelles de temps d'un an ou plus. Beaucoup présentent des variations rapides. Notons qu'elles ne sont pas périodiques.

Par exemple 3C48 et 3C273 varient de façon erratique avec une constante de temps caractéristique de l'ordre de quelques mois. Il y a des cas extrêmes : 3C279 a vu son éclat augmenter d'un facteur 100 en quelques jours et 3C454.3 a présenté des variations de 0,3 magnitude par heure.

Ces variations sont très intéressantes car elles sont le seul moyen dont on dispose pour avoir une idée de la taille de la région émissive. En effet si une source lumineuse présente une variation de luminosité décelable sur un intervalle de temps égal à un mois par exemple, cela entraîne obligatoirement que son rayon est inférieur à un mois de lumière. Expliquons-nous à l'aide d'un dessin. Imaginons que notre source ait un rayon égal à un mois de lumière et que sa luminosité augmente du 1 au 31 mars pour fixer les idées. Au 1 mars toute sa surface est au minimum de luminosité et des rayons lumineux partent de régions telles que A et B en direction de l'observateur. Le 31 mars ces rayons sont en A' et B'. C'est le moment où la source est à son maximum de luminosité et les rayons lumineux qui partent de la région de C le 31 mars parviendront à l'observateur en même temps que ceux partis de A et B le 1 mars de sorte que l'observateur ne se rendra pas compte de la variation. Cette explication est bien sûr un peu schématique !

On en conclut donc que la région émissive des quasars a des dimensions inférieures à quelques années ou à quelques mois de lumière, voire à quelques jours ou même à quelques heures de lumière.

D) Comment les théoriciens voient-ils un quasar ? - Nous allons dresser le portrait d'un quasar tel que l'imaginent les astronomes pour tenter d'expliquer ce qu'ils observent. Il va de soi qu'un tel portrait ne saurait être définitif et qu'il pourra être modifié dans l'avenir.

Comme nous venons de le dire les quasars fournissent une quantité colossale d'énergie, pendant un temps assez long tout en ayant, astronomiquement parlant, des dimensions très petites.

On peut penser à un amas dense d'étoiles, disons un milliard d'étoiles dans un volume de quelques années de lumière de diamètre. D'une part, ce modèle ne rend pas compte de la variabilité des quasars car il faudrait qu'une grande partie des étoiles de l'amas eussent simultanément un changement de luminosité ce qui est très improbable. D'autre part, un tel amas, du fait de la grande intensité du champ de gravitation qu'il engendre, serait très instable et conduirait assez rapidement à un agrégat central, à une sorte d'étoile super massive.

Une étoile super massive peut-elle être le modèle d'un quasar ? Non, parce qu'une telle étoile (d'un milliard de masses solaires par exemple) serait très instable et s'écroulerait sur elle-même sous l'effet de la force de gravitation. La seule façon d'empêcher cet écroulement serait que l'étoile fût en rotation très rapide sur elle-même, ce qui se heurte à deux obstacles majeurs: on devrait observer des phénomènes périodiques (du fait d'irrégularités qui existeraient inévitablement à sa surface) et l'on n'a jamais détectés de tels phénomènes; de plus, on ne voit pas du tout comment pourrait se former une étoile super massive en rotation très rapide.

Il reste la solution du trou noir entouré d'un disque de matière en accréation. ce modèle, proposé d'abord par le Soviétique Zeldovitch et l'Américain Salpeter, a été mis au point par les Anglais Lynden-Bell et Rees. Rappelons qu'un trou noir est un objet dont le champ de gravitation est tel que les rayonnements électromagnétiques, donc en particulier la lumière, ne peuvent s'en échapper. D'un point de vue non relativiste, à la surface de tout corps il existe une vitesse de libération qui est la vitesse que doit avoir au moins un projectile quittant le corps pour se libérer de l'attraction de celui-ci. Par exemple, elle est de 11,2Km/s pour la Terre.

On peut donc imaginer (ce qu'avait fait Laplace) que si la vitesse de libération vaut 300000Km/s on a un trou noir. D'un point de vue relativiste, Schwarzschild a montré qu'il existe pour une masse donnée un rayon critique tel que si cette masse se trouve à l'intérieur d'une sphère ayant pour rayon ce rayon critique, plus aucun rayonnement ne peut s'en échapper: on a un trou noir. Par exemple, pour la Terre, le rayon de Schwarzschild vaut un mètre. Il convient néanmoins, comme toujours en science, d'être prudent. Jusqu'à maintenant, on n'a jamais observé de façon certaine un trou noir (observé de façon indirecte, cela s'entend, par l'action qu'il exercerait sur son environnement puisque, par définition, il est invisible). De plus, certains théoriciens vont jusqu'à nier leur existence. Pour ce qui nous occupe, on peut toujours remplacer le terme « trou noir » par le terme « objet hyper dense », cela ne changera pas le modèle que nous allons décrire. Rappelons au passage que l'on sait que la matière existe dans la nature à l'état hyper dense (il n'y a alors que très peu de vide entre les particules constituant la matière en question): par exemple, la matière dont sont formées les étoiles à neutrons a une masse volumique égale à 1014Kg/dm^3 .

Revenons à notre portrait de quasar. Il y a d'abord la galaxie-hôte. Au centre du noyau de celle-ci se trouve un trou noir super massif, autrement dit de plusieurs centaines de millions de masses solaires (plus précisément, de 10 millions à 10 milliards pour le plus brillant quasar connu, Q0420-288). Le gaz de la galaxie-hôte tombe en spiralant sur le trou noir dont le champ de gravitation est très intense. ce gaz peut être du gaz interstellaire ou bien des étoiles complètement disloquées par les forces de marée très fortes exercées par le trou noir (la force exercée par le trou noir sur le bord de l'étoile le plus proche du trou noir est plus grande que celle exercée sur le bord opposé). Ce gaz qui tombe en spiralant forme un disque autour du trou noir appelé « disque d'accrétion ».

Suivant le modèle proposé par Rees et ses collaborateurs de l'université de Cambridge, d'une part, les vitesses des particules de gaz tombant sur le trou noir en rotation sont extrêmement élevées, d'autre part, les lignes de force du champ magnétique de la galaxie-hôte s'enroulent aussi autour du trou noir non sans glisser par rapport au gaz car l'entraînement n'est pas total. Ce décalage entre la vitesse de rotation de la matière et la vitesse de rotation du champ magnétique (moins élevée que la précédente) permet de produire de l'énergie extraite de l'énergie gravitationnelle cédée par le gaz tombant sur le trou noir: on a une sorte de dynamo et des bouffées de particules relativistes sont éjectées dans les directions des pôles du disque d'accrétion, donc suivant l'axe de rotation de celui-ci.

Le modèle élaboré en 1983 par M.Calvani, L.Nobili et R.Turolla de l'université de Padoue est un peu différent. Selon ce modèle, les parties internes du disque d'accrétion tournent plus vite que les parties externes. Le gaz est alors fortement chauffé par les frictions entre les parties internes et les parties externes, ce qui le fait rayonner. Cette transformation d'énergie gravitationnelle en énergie rayonnante a un rendement pouvant atteindre 30 à 40%. Le gaz est porté à une température très élevée, aussi rayonne-t-il surtout dans le domaine X. La pression de radiation exercée par le rayonnement de la région centrale du disque est très importante. Elle a pour effet de déformer le disque en un tore plus épais vers l'intérieur. Finalement, ce disque déformé laisse libres deux « entonnoirs » ou « tunnels » étroits dont l'axe est perpendiculaire au disque et se confond avec l'axe de rotation du système.

Alors l'énorme pression de radiation du rayonnement émis par le gaz au moment où il tombe sur le trou noir a pour effet d'expulser des bouffées de particules relativistes dans les « tunnels » précédents, donc le long de l'axe du disque. En résumé, dans ces modèles à trou noir, l'énorme énergie des quasars est fournie par l'énergie gravitationnelle des particules de gaz tombant sur le trou noir.

Ce trou noir a un rayon d'une centaine de millions de Km. Les bouffées de particules relativistes sont responsables du rayonnement synchrotron. La matière éjectée de part et d'autre du disque d'accrétion le long de l'axe de celui-ci rend compte des jets que l'on observe chez certains quasars. La création sporadique d'électrons relativistes dans les régions où le champ magnétique est intense pourrait expliquer les variations rapides de luminosité observées chez certains quasars.

A quelques années de lumière du trou noir se trouvent des nuages de gaz animés de mouvements violents qui sont responsables des raies d'émission très larges. L'origine de ces nuages est encore controversée, de même que les raisons qui font que ce gaz a des vitesses de quelques milliers de Km/s, jusqu'à 10000 ou 20000 Km/s (vitesses que l'on peut calculer à l'aide de la largeur des raies d'émission). A une distance du centre de même ordre que celle des nuages précédents se trouvent les sources radio compactes. Plus loin, jusqu'à plusieurs milliers d'années de lumière du centre, on trouve de grands nuages gazeux moins denses, animés de mouvements moins rapides, avec des vitesses de quelques centaines de Km/s à 1000 Km/s. Chauffés par les rayonnements ultraviolet et X du centre, ils sont responsables des raies interdites.

Comment rendre compte que, parfois, dans le spectre optique, les raies d'émission, soient accompagnées du côté des courtes longueurs d'ondes par des raies d'absorption plus étroites ? Lorsque ces raies sont assez larges et ont un décalage voisin de celui des raies d'émission on peut expliquer leur existence en supposant que le quasar est entouré d'une coquille de gaz plus froid en expansion. C'est l'hypothèse intrinsèque. Le fait que cette coquille soit plus froide explique ces raies soient d'absorption. Le fait que cette coquille soit en expansion explique que ces raies soient moins décalées vers le rouge que les raies d'émission parce que le mouvement d'expansion en direction de l'observateur diminue l'effet dû à la vitesse de récession.

Cette enveloppe de gaz ténu s'étend jusqu'à plusieurs milliers d'années de lumière du quasar dont elle s'éloigne avec une vitesse de l'ordre de 10000Km/s. L'assez grande

largeur des raies traduit une dispersion des vitesses compatibles avec une éjection de matière par le quasar à 10000Km/s. Lorsque les raies d'absorption sont fines et ont un décalage très inférieur à celui des raies d'émission, l'hypothèse intrinsèque ne tient pas car il faudrait imaginer un processus expulsant de la matière du quasar à des vitesses relativistes (attestées par le décalage très inférieur à celui du quasar) avec la très faible dispersion, de 10 à 100Km/s, que montre la finesse des raies. On explique alors l'existence de ces raies d'absorption par la présence de galaxies sur la ligne de visée (qui relie l'observateur au quasar). C'est l'hypothèse extrinsèque. Ces raies d'absorption du carbone, du silicium, du fer, du magnésium sont présentes dans le milieu interstellaire des galaxies. On a même réussi à détecter l'image d'une galaxie absorbante responsable des raies d'absorption du quasar PKS 2128-12 (Y.Bergeron à l'E.S.O. du Chili) et l'on a vérifié que le décalage de la galaxie était le même que celui des raies d'absorption ($z=0,430$).

Nous avons dit que les quasars radio-émetteurs montraient de grands lobes radio et que ce rayonnement était d'origine synchrotron. Dans certains cas, on distingue dans les « points chaud » de ces lobes, c'est-à-dire à leur extrémité la plus lointaine du quasar, de faibles lueurs dans le domaine visible provenant d'un rayonnement synchrotron. Or, plus la vitesse des électrons responsables du rayonnement synchrotron est grande, plus la longueur d'onde du rayonnement est courte. Cela implique donc que des électrons extrêmement énergétiques (ayant une vitesse proche de celle de la lumière) se trouvent encore à des distances de l'ordre du million d'années de lumière du quasar. Pour que ces électrons aussi éloignés soient encore aussi rapides il faut qu'ils soient continuellement réaccélérés. Sans doute, ces électrons, lorsqu'ils sont éjectés du quasar, sont-ils accompagnés de nuages de gaz assez denses mais ayant des vitesses bien plus faibles que celle des électrons relativistes et, dans ces nuages doivent se former des ondes de choc qui réaccélèrent les électrons.

E) Les proches parents des quasars - En 1943, un jeune Allemand, Karl Seyfert, préparant une thèse aux Etats-Unis sous la direction de Minkowski, étudia six galaxies spirales qui avaient des caractéristiques remarquables : leur noyau avait un aspect stellaire et était très lumineux; le spectre continu de ce noyau était très bleu et était sillonné de raies d'émission intenses et très larges. Seyfert mourut peu après et les galaxies qu'il avait étudiées tombèrent dans l'oubli. La découverte des quasars provoqua un très fort regain d'intérêt pour elles dans les années 1960. On les appelle « galaxies de Seyfert ». Ce sont des galaxies à noyau très actif. On en connaît plusieurs centaines actuellement. On les a classées en galaxies de Seyfert de type 1 et galaxies de Seyfert de type 2. Les propriétés des galaxies de Seyfert de type 1 sont presque identiques à celles des quasars mais elles sont moins lumineuses. L'intensité de leurs raies d'émission est variable contrairement à ce qui se passe chez les quasars où seul le spectre continu est variable mais peut-être cela est-il dû au manque de précision des mesures dont on dispose chez les quasars. Les galaxies de Seyfert de type 2 sont assez différentes: leurs raies d'émission sont moins intenses et moins larges, elles émettent très peu dans le domaine X, beaucoup dans les domaines radio et infrarouge. Diverses hypothèses, dont aucune n'est pleinement satisfaisante, ont été avancées pour les relier aux galaxies de Seyfert de type 1.

Les radiogalaxies sont des galaxies dont le rayonnement radio est dix mille à un million de fois plus intense que celui des galaxies silencieuses en radio. La description de leurs propriétés radio est exactement celle des propriétés radio des quasars que nous avons énumérés précédemment.

On a toutes les raisons de penser que l'énergie des galaxies de Seyfert et des radiogalaxies provient d'un processus semblable à celui qui fournit l'énergie des quasars: le gaz d'un disque d'accrétion autour d'un trou noir voit une partie de son énergie gravitationnelle transformée en énergie rayonnante conformément au modèle qui a été décrit pour les quasars.

En 1967 on découvrit la source radio VRO 42-22-01 dans la constellation du Lézard (Lacerta). Elle devint le type d'une nouvelle catégorie d'objets, les lacertides ou objets BL Lacertæ. On en connaît plusieurs dizaines. Certains sont situés au centre d'une galaxie elliptique. Ils montrent des propriétés très voisines de celles des quasars dont ils se distinguent par l'absence de raies d'émission. Ils sont tous associés à une source radio intense, compacte et rapidement variable. Citons une observation étonnante : des raies d'émission sont apparues dans le spectre d'un objet catalogué comme lacertide, objet qui s'est ainsi vu métamorphosé de lacertide en quasar ! Pour le moment, les lacertides sont loin d'être bien compris.

Les moins bien compris de tous ces astres surprenants sont les OVV (Optically Violently Variable) ou blazars (contraction de BL Lacertæ et de quasars). Ce sont des lacertides ou des quasars présentant d'énormes variations pendant des durées très courtes (quelques jours ou quelques heures).

En se fondant sur le nombre de quasars que l'on a répertoriés en passant au crible certaines portions de la sphère céleste on peut estimer quel est le nombre de quasars accessibles aux observations. Cela nous donne une idée du nombre de quasars existant dans la portion d'Univers s'étendant jusqu'aux plus lointains quasars connus (environ $z=5$). On trouve alors que, s'ils étaient distribués au hasard, il y en aurait très probablement à quelques millions d'années de lumière de nous. Or il n'en est rien. Comment l'expliquer ? Par suite de l'expansion de l'Univers, la densité de l'Univers était bien plus grande, disons 1000 fois plus grande, à l'époque où se formaient les quasars que nous n'observons qu'à l'heure actuelle. Les conditions physiques étaient donc fort différentes de ce qu'elles sont maintenant ou de ce qu'elles ont été à des époques moins lointaines. Donc, les quasars sont nés alors. On pense qu'il faut au moins 500 millions d'années pour qu'un quasar se forme. Le noyau massif (le trou noir) s'est-il formé avant ou après la galaxie-hôte ? Les avis des spécialistes divergent. Ces quasars massifs ont rapidement épuisé leur combustible (le gaz qui tombe sur le trou noir) et se sont éteints. La diminution de la densité de l'Univers a fait que les conditions physiques ont été de moins en moins favorables à la formation de quasars massifs et brillants. Il a continué à se former des quasars bien moins lumineux, les galaxies de Seyfert de type 1. Ces dernières vivent plus longtemps que les « vrais » quasars. Chez certains quasars éteints, une émission radio se maintient : ils sont devenus des radio galaxies.

F) Les mirages gravitationnels. - La théorie de la relativité générale prévoit que les rayons lumineux sont déviés par les masses. Cette conséquence de la relativité a d'ailleurs été vérifiée dès 1919 lors d'une éclipse où l'on mesura la déviation des rayons lumineux au voisinage du Soleil et l'on constata son accord avec la valeur théorique donnée par Einstein.

Supposons qu'entre un astre A et un observateur O se trouve un astre très massif G : les rayons lumineux issus de A sont déviés par l'astre déflecteur G et l'observateur O voit plusieurs images ...de l'astre A.

Le cas idéal serait celui où A, G et O seraient parfaitement alignés: l'image de A vue par O serait un anneau. Si ce n'est pas le cas, on peut avoir plusieurs images ponctuelles ou des images plus complexes. C'est ce que nous venons de décrire que l'on appelle un mirage gravitationnel. L'existence possible de tels mirages a été prévue depuis 1923 mais il fallut attendre 1979 pour qu'on en observe un. Pour avoir un mirage il faut que l'astre G soit très massif (galaxie géante, amas de galaxies) pour dévier de façon sensible les rayons lumineux. Il faut aussi que A soit très lointain (plus lointain que G), très brillant et d'allure ponctuelle; ce sont précisément les qualités des quasars.

En 1979, on trouva à l'emplacement de la source radio 0957+561 deux quasars distants de six secondes d'arc, dont les décalages vers le rouge étaient les mêmes, dont les spectres présentaient les mêmes raies avec la même intensité : on avait observé le premier mirage gravitationnel. Le quasar en question a un décalage $z=1,407$. La galaxie déflectrice détectée aux observatoires du Mont Palomar et du Mauna Kea est une galaxie elliptique géante de décalage $z=0,36$.

Depuis on a découvert d'autres mirages gravitationnels. Par exemple, le deuxième à avoir été découvert se montre sous l'aspect d'un « quasar triple » dont l'image la plus brillante s'est elle-même montrée double tandis qu'on a trouvé une cinquième image très faible. Un autre mirage à peut-être pour source non pas un quasar mais une galaxie de Seyfert de type 2. Un autre a pour caractéristique remarquable que la galaxie déflectrice est très proche et très brillante.

G) Les quasars comme « outils » de l'Astronomie. - Pour mesurer les distances lointaines et donc pour améliorer notre connaissance de la constante de Hubble on utilise des indicateurs de distance: ce sont des astres qui ont toujours la même luminosité; par conséquent si l'on en trouve un dans une galaxie de distance inconnue on peut estimer qu'il a, dans celle-ci, sa luminosité habituelle et, par conséquent, on peut en déduire la distance de la galaxie en employant la formule très simple qui relie la magnitude absolue, la magnitude apparente et la distance d'un même astre. Au début, on a espéré utiliser les quasars comme indicateurs de distances pour les très grandes distances. Hélas il aurait fallu pour cela qu'ils eussent tous la même luminosité, ce qui n'est absolument pas le cas.

Par contre les quasars nous ont permis d'avoir des renseignements sur la matière se trouvant sur la ligne de visée. Les mirages gravitationnels peuvent contribuer à améliorer notre connaissance de la répartition de la masse dans l'Univers et s'avérer utiles dans l'étude du fameux problème de la « masse manquante » ou « masse cachée » ou « matière noire » de l'Univers. Le mirage gravitationnel dont la galaxie déflectrice est relativement proche pourra permettre d'explorer le champ de gravitation dans les régions les plus centrales de la galaxie en question.

Les quasars ont aussi montrés que les lois de la physique n'ont pas variées dans le temps; elles sont actuellement les mêmes que dans les temps très reculés où brillaient les quasars que nous observons maintenant: en effet, nous voyons les quasars tels qu'ils étaient il y a quelques milliards d'années et ce que l'on déduit de ces observations (sur les raies spectrales, sur les effets d'un champ magnétique, etc) est en concordance avec nos lois de la physique.

H) Conclusion. - Il y a un peu plus de trente ans, les quasars étaient complètement inconnus. Le mot même de « quasar » n'existait pas. De nos jours l'étude des quasars est une partie très active de la recherche astronomique. Il est hors de doute que les très grands télescopes actuellement en projet ou en construction et le télescope spatial permettront d'améliorer la connaissance que nous avons de ces astres...et feront surgir des questions insoupçonnées auxquelles l'imagination des théoriciens s'efforcera de répondre. On a déjà beaucoup appris sur eux mais au fur et à mesure des progrès de nos connaissances, de nouveaux problèmes se sont posés montrant ainsi la justesse de la belle métaphore de Pascal qui disait que le savoir ressemble à une sphère qui, en accroissant son volume, ne fait que multiplier ses points de contact avec l'inconnu.

Bibliographie

- A.Blanchard, F.Hammer, C.Vanderriest, Les mirages gravitationnels. La Recherche N° 192, Octobre 1987.
- P.Boissé, Les systèmes de raies d'absorption des quasars, L'Astronomie Juillet-Aout 1988.
- F.Combes, P.Boissé, A.Mazure, A.Blanchard, Galaxies et cosmologie. Coll, Savoirs actuels, Inter Editions/Editions du C.N.R.S., 1991.
- S.Collin, Les galaxies « actives » et les quasars in Histoire de l'Univers sous la direction de A.Hayli. Ed.Hachette, 1980.
- S.Collin, G.Stasinska, Les quasars. Collection Sciences et Découvertes, Ed. Le Rocher, 1987.
- J.L.Niets, L'enigme des quasars, La Recherche N° 190, Juillet-Août 1987.
- P.Véron, Les quasars in L'Astronomie Flammarion sous la direction de J.C.Pecker, Ed.Flammarion, 1985.
- P.Véron, M.P.Véron-Cetty, L.Woltjer, Les quasars. La Recherche N° 247, Octobre 1992.

Appendice

La température d'un corps est une mesure de l'agitation des particules (atomes, électrons libres, etc.) qui le constituent. Par suite de cette agitation, il se produit des collisions entre les particules, collisions qui font perdre de l'énergie à celles-ci. Cette énergie peut-être émise sous forme de photons; autrement dit sous la forme d'un rayonnement électromagnétique. Plus la température est élevée, c'est-à-dire plus l'agitation est grande, plus les collisions sont violentes, donc plus les photons sont énergétiques, par conséquent, plus leur longueur d'onde est courte. La lumière visible a une longueur d'onde comprise entre, grosso modo 4000 et 8000 Å (0.4 à 0.8 micron, de 3900 Å pour le violet à 7700 Å pour le rouge). En deçà il y a l'infrarouge, de 8000 Å à 1 mm, puis le rayonnement radio dont les longueurs d'ondes sont supérieures à 1 mm. Au-delà il y a l'ultraviolet, de 4000 Å à 100 Å; le rayonnement X de 100 Å à 0.001 Å; le rayonnement gamma dont les longueurs d'ondes sont inférieures à 0.001 Å. Dans la nature, tout corps rayonne ainsi et l'on peut, pour un corps supposé en équilibre thermique (c'est-à-dire quand les échanges entre particules matérielles et photons s'équilibrent), étudier la répartition de l'énergie rayonnée en fonction de la longueur d'onde à laquelle elle est rayonnée. On trouve une courbe qui présente un maximum et qui décroît du côté des courtes et des grandes longueurs d'onde. La longueur d'onde où l'énergie rayonnée est maximale est inversement proportionnelle à la température absolue du corps qui rayonne. Par exemple, elle se situe dans le rouge pour un morceau de fer chauffé au rouge; elle se situe dans l'infrarouge pour un être humain.

Le rayonnement dont il vient d'être question s'appelle « rayonnement thermique ». Il existe d'autres types de rayonnement qui seront dits « non thermiques ». C'est le cas du rayonnement synchrotron. Lorsque des électrons relativistes, c'est-à-dire ayant des vitesses proches de celle de la lumière, se trouvent soumis à un champ magnétique, ils décrivent des trajectoires hélicoïdales autour des lignes de force du champ magnétique et ils émettent un rayonnement dit « synchrotron ». Il est très directif (il est concentré dans un cône de faible ouverture axé sur le vecteur vitesse de l'électron). La répartition de l'énergie rayonnée en fonction de la longueur d'onde est très différente de celle d'un rayonnement thermique: elle est une fonction puissance de la longueur d'onde (autrement dit elle est proportionnelle à la longueur d'onde élevée à une certaine puissance). Ce rayonnement est aussi fortement polarisé.

Lorsqu'on prend le spectre d'un astre qui rayonne, les rayonnements précédents, s'ils sont présents, se traduisent par le spectre continu, c'est-à-dire, dans le domaine visible, par une tache colorée comme un arc-en-ciel. Le spectre des étoiles est sillonné de nombreuses raies sombres appelées raies d'absorption. Les photons venant des couches profondes et très chaudes de l'étoile sont absorbés par les couches externes moins chaudes. La physique quantique explique que seuls les photons de certaines longueurs d'ondes soient absorbés par les atomes d'une espèce donnée. C'est ce qui provoque ces raies sombres. Leur place dans le spectre continu caractérise l'élément (hydrogène, hélium, oxygène, sodium, fer, etc.) qui les a provoquées. Le spectre de certains astres (comme par exemple les nébuleuses gazeuses) montre des raies plus brillantes que le fond, appelées raies d'émission. Cela arrive par exemple lorsqu'un nuage d'hydrogène reçoit le rayonnement ultraviolet d'une étoile très chaude. Les photons ultraviolets ionisent l'hydrogène; très rapidement les atomes ionisés captent un électron et, ce faisant, redescendent à un niveau d'énergie inférieur en émettant des photons du domaine visible qui provoquent les raies d'émission.

Les raies d'émission dites « interdites » sont des raies qui ne peuvent être émises que par un milieu très peu dense. Un atome passe, par suite d'une collision avec une autre particule, d'un niveau d'énergie à un niveau supérieur, ce niveau étant tel que l'atome puisse y rester un certain temps avant de se désexciter en émettant un photon. Dès que le milieu est dense, l'atome sera désexcité par une nouvelle collision avant que le photon ne soit émis.

Une raie spectrale (d'absorption ou d'émission) est d'autant plus large que le milieu qui en est responsable est turbulent et la mesure de sa largeur permet de connaître la vitesse des mouvements qui agitent le milieu en question.

Si la source de rayonnement dont on prend le spectre s'éloigne ou s'approche de l'observateur, les raies sont décalées dans le spectre par rapport à la place qu'elles occuperaient si la source était au repos. Elles sont décalées vers les grandes ou les courtes longueurs d'ondes suivant que la source s'éloigne ou se rapproche de l'observateur. C'est le célèbre effet Doppler. Une formule très simple (un peu plus compliquée quand il s'agit de grandes vitesses car il faut employer une formule relativiste) permet de calculer la vitesse avec laquelle la source s'éloigne ou s'approche en fonction du décalage spectral.

NOTES DE LECTURES

Matière sombre et gravitation (S.Zylberajch) (L'Astronomie mai 1994)

Zwicky fut le premier à montrer, en 1933, qu'une grande partie de la matière existant dans l'Univers était invisible. Connaître la nature de cette « matière sombre », pour l'instant inaccessible aux observations et qui est au moins dix fois plus importante que la matière visible, est l'un des problèmes les plus fondamentaux de l'astronomie actuelle. Parmi les candidats possibles il y a les naines brunes. Comment les détecter ? Une possibilité consiste à utiliser l'effet de microlentille gravitationnelle que peut produire une naine brune se trouvant près de la ligne de visée d'une étoile. C'est ce qui a été fait dans l'expérience EROS. Ce type de recherche nécessite d'avoir les courbes de lumière d'un très grand nombre d'étoiles puis de détecter parmi celles-ci celles qui pourraient être dues à un effet de microlentille gravitationnelle (il a fallu trier plus de deux milliards de mesures de photométrie!). Il en est sorti deux bons candidats Eros 1 et Eros 2. Une expérience similaire, baptisée MACHO, a fait apparaître trois naines brunes possibles.

Une autre hypothèse pour la matière sombre : l'hydrogène moléculaire (J.Lequeux) (L'Astronomie juin 1994).

Cet article vient à point après le précédent, la revue L'Astronomie ayant ainsi donné deux longs articles sur des solutions possibles au problème fondamental de la matière sombre. Une partie de la matière sombre pourrait être de l'hydrogène moléculaire (ce qui n'exclut pas qu'une autre partie soit constituée de naines brunes!). Contrairement à l'hydrogène atomique, il est très difficile à détecter directement. On utilise la raie à 2,6mm de la molécule CO qui est un « traceur » de l'hydrogène moléculaire. A l'aide du radiotélescope de l'IRAM (en Espagne), J.Lequeux et ses collaborateurs ont ainsi découvert de grands nuages d'hydrogène moléculaire dans M31 qui, jusqu'alors, avaient passé inaperçus. Ils en ont aussi trouvé dans notre Galaxie, ce qui est plus difficile car nous sommes à l'intérieur de la Galaxie et la faible émission de CO est dominée par celle du gaz chaud qui y est présent. Ces très beaux résultats sont encore insuffisants sur le plan quantitatif. De plus, il est, pour le moment, très difficile d'envisager de semblables détections dans des galaxies plus lointaines.

-Flammarion C, Astronomie Populaire
 Edité en : 1880/ Editeur : Gauth,Villar
 -Flammarion C.
 Dieu dans la Nature
 Edité en : 1880/ Editeur : Lib,Flammarion
 -Flammarion C,
 Histoire du Ciel
 Edité en : 1882/ Editeur : Hetzel
 -Flammarion C,
 La création de l' Homme
 Edité en : 1887/ Editeur : Lib,Flammarion
 -Flammarion C,
 Le Monde avant la création de l'Homme Edité en : 1886i Editeur : Lib,Flammarion
 -Flammarion C,
 Les Merveilles Célestes
 Edité en : 1893/ Editeur : Lib.Hachette -Flammarion C,
 Les Terres du Ciel
 Edité en : 1884/ Editeur : Lib,Flammarion -Flammarion C,
 ORANIE, (Roman)
 Edité en : 1889/ Editeur : Lib,Flammarion -Fouché
 Les merveilles du Ciel
 . Edité en : 1921/ Editeur : HaChette
 -Fred Hoyle
 Aug frontières de l'Astronomie
 Edité en : 1956/ Editeur : Lib,B,Chastel -Gauthier J,
 Les Grands Problèmes de l'Astronomie Edité en : 1951/ Editeur : Dunod -Gauthier Junior
 La Vie et la Mort des Étoiles Edité en : 1953/ Editeur ; P,U,F -Godtalan G.
 Guide de l'Astronome Amateur
 Edité en : 1963/ Editeur : Lib,Doin -Gouguenheim
 Méthodes de l'Astrophysique
 Edité en ; 1981/ Editeur : HaChette -Guidon-Saumur
 Les objets de Messier - Repérage, observation, Photographie Edité en : 1991/ Editeur :
 Masson
 21