

INSTITUT DE FRANCE

ACADÉMIE DES SCIENCES

EXPOSÉ SUR L'ASTRONOMIE

GALAXIES ACTIVES ET QUASARS

PAR

M. GÉRARD WLÉRICK

Membre de l'Académie des Sciences

en la séance du 16 mai 1977

Ch. Fehrenbach vous a fait pénétrer dans le « Royaume des Galaxies », « The Realm of Nebulae » comme l'a nommé il y a quarante ans Hubble. Il vous a montré l'architecture de ces grands ensembles, a indiqué leur dimension, leur masse, leur distance, leurs éclats apparent et intrinsèque. Et il vous a parlé aussi de l'expansion de l'Univers. Traitant des galaxies normales, il a volontairement restreint son exposé aux observations faites dans le domaine visible.

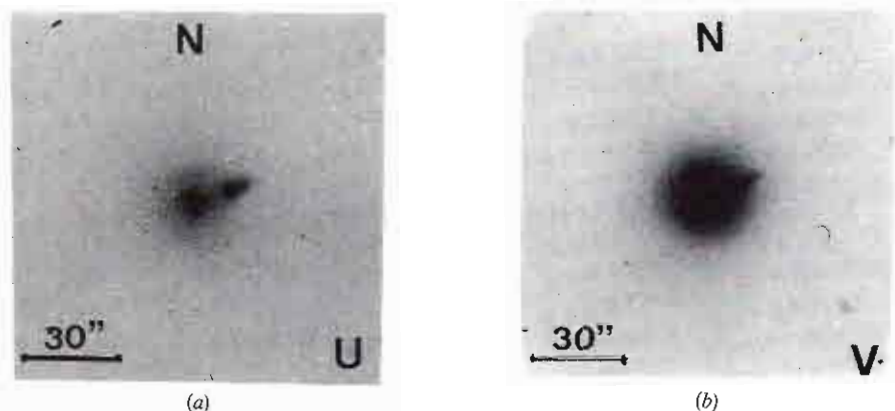
Depuis une trentaine d'années, les observations ont été étendues progressivement aux divers domaines du rayonnement électromagnétique : ondes radio, radiations infrarouges, radiations ultraviolettes, rayons X. Les galaxies normales émettent peu aux longueurs d'onde correspondantes; composées principalement d'étoiles, leur spectre ressemble à un spectre stellaire. Or, le rayonnement d'une étoile est essentiellement thermique, analogue au rayonnement du Corps Noir de Plank. Cette émission présente un maximum dans le domaine visible et la décroissance est rapide du côté de l'ultraviolet et du côté de l'infrarouge. Cependant, quand les nouveaux domaines spectraux sont devenus accessibles à l'observation, grâce notamment aux radiotélescopes et aux satellites, il est apparu que certaines galaxies et des astres apparentés présentaient dans ces domaines des émissions très importantes, à tel point que, d'une part leur bilan d'énergie s'en est trouvé profondément modifié et que, d'autre part il a fallu faire appel à des mécanismes nouveaux, en particulier à des mécanismes dits non thermiques. De plus, ces émissions se sont trouvées être variables dans le temps, d'où le terme galaxies actives.

Naturellement le domaine visible n'échappe pas à cette activité; elle est seulement relativement moins importante car elle se superpose à l'émission thermique qui est stable.

Je vais vous présenter les différents types d'objets extragalactiques qui ont attiré l'attention depuis 1945, puis j'essayerai de montrer le lien entre ces astres et je signalerai le peu que nous savons sur les mécanismes responsables de l'activité.

Je voudrais commencer en signalant deux observations optiques anciennes.

En 1918, Curtis qui étudiait ce qu'on appelait alors les nébuleuses, prit un cliché d'un objet relativement brillant, Messier 87, et trouva qu'il possédait un noyau apparemment normal mais aussi un « jet ». La nature de ce jet resta inexpiquée pendant 40 ans (photographie n° 1).



Photographie 1. — Noyau et jet de la radiogalaxie Virgo A. Clichés obtenus avec la « caméra électronique grand champ », à l'O.H.-P., en avril 1977 (A. Lallemant, G. Lelièvre, L. Renard, B. Servan, G. Wlérick). En comparant le noyau et le jet sur les clichés en ultraviolet (couleur U) et en jaune (couleur V), on voit que le jet présente un excès d'ultraviolet typique d'un rayonnement synchrotron.

En 1943, Karl Seyfert réussit à constituer un échantillon de 12 galaxies présentant les propriétés suivantes :

- leur noyau est brillant et même, pour certaines, très brillant (photographie n° 2);
- ce noyau présente des raies d'émission intenses et larges.

Dans les galaxies normales, le noyau est essentiellement composé d'étoiles et son spectre présente un continu et des raies d'absorption. Les raies d'émission indiquent que le noyau des *Galaxies de Seyfert* comprend une zone analogue à une nébuleuse gazeuse ($n_e \sim 10^5$ à 10^8 cm^{-3} , $t_e \sim 1$ à $2 \cdot 10^4 \text{ K}$). Le fait que ces raies soient larges est interprété comme un effet Doppler, c'est-à-dire que des gaz quittent le noyau avec une vitesse importante $\sim 1000 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$.

Ce travail de Seyfert est resté presque sans écho jusque vers 1960.

Les radiosources

1. VIRGO A

Grâce aux radars laissés sans emploi par la fin de la deuxième guerre mondiale, il a été possible de scruter le ciel et de découvrir que certains objets étaient radioémissifs. La difficulté d'identifier les sources radio à des astres optiques était très grande car les positions radio

étaient, au début au moins, très imprécises. Cependant, en 1949, la source la plus importante de la Constellation de la Vierge, Virgo A, était identifiée à la galaxie Messier 87 (Bolton, Stanley et Slee). En 1956, Baade prend, avec le télescope de 5 m du Mont Palomar, des clichés du noyau et du jet de cette galaxie et trouve que la lumière du jet est polarisée et présente un excès d'ultraviolet.

Par analogie avec le rayonnement de la nébuleuse du Crabe et, suivant la suggestion de l'astronome soviétique Schlovsky, Baade admet que le jet émet un rayonnement *synchrotron*, c'est-à-dire un rayonnement produit par des électrons de haute énergie (électrons relativistes) se déplaçant dans un champ magnétique.

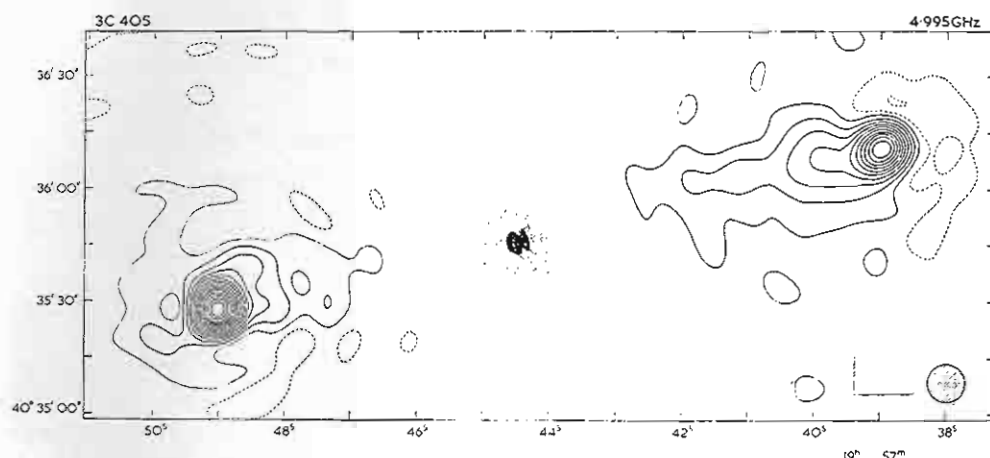


Fig. 1. — Isophotes radio de Cygnus A. D'après S. Mitton et M. Ryle (*M.N.R.A.S.*, 146, 1969, p. 223) et d'après D. W. Sciama, *Modern Cosmology*, Cambridge U.P., 1973.

2. CYGNUS A

En 1954, la source la plus intense de la Constellation du Cygne, Cygnus A, est identifiée par Baade et Minkovsky avec la galaxie la plus brillante d'un amas. Le spectre optique de l'objet permet de mesurer le décalage vers le rouge $z = d\lambda/\lambda = 0,057$, soit $v = 17\,000$ km. Avec la valeur de la constante de Hubble admise à l'époque ($H = 100$ km . Mpc⁻¹ . s⁻¹), les auteurs déduisent une distance ~ 170 Mpc, d'où une énorme émission radio $\sim 10^{45}$ erg . s⁻¹, environ 10 fois plus importante que l'émission dans le domaine optique $\sim 10^{44}$ erg . s⁻¹. Cygnus A est le premier exemple de *radiogalaxie*.

Lorsque la résolution des mesures radio a été suffisante, on a trouvé, pour les observations en ondes métriques et décimétriques, que la plupart des radiogalaxies présentent une structure double, les deux zones d'émission radio étant à peu près symétriques par rapport à l'image optique de la galaxie (*fig. 1*).

La distance entre l'objet central et chacune des composantes radio est ~ 100 Kpc : la radiogalaxie est donc sensiblement plus étendue que la galaxie optique.

En 1960, quelques dizaines de sources seulement étaient identifiées. Mis à part les sources galactiques, les identifications correspondaient à des galaxies elliptiques ou de type SO, présentant un grand éclat optique. Il n'y avait pas de spirales parmi ces radiosources fortes.

3. LES QUASARS

A la fin de l'année 1960, on découvrit que quatre radiosources présentaient un diamètre radio très petit. Trois de ces sources étaient identifiées par Sandage et Matthews avec des objets d'apparence stellaire : 3C 48, 3C 286 et 3C 196. Le spectre optique de 3C 48 apparut étrange avec des raies d'émission larges. En 1963, M. Schmidt étudia le spectre d'un objet analogue, 3C 273 et comprit que le système des raies d'émission pouvait s'interpréter par un grand décalage vers le rouge : $z=0,158$. Les quasars (contraction de « quasistellar radiosources ») étaient nés.

Les radiogalaxies suivent la même loi de Hubble que les galaxies elliptiques géantes. Il apparut immédiatement que, si le quasar 3C 273 obéissait aussi à cette loi, sa distance était très grande et, par suite, que son éclat dans le domaine optique était exceptionnel, environ 1 000 fois celui d'une galaxie géante.

D'autre part *le flux des quasars varie* dans le domaine optique et le changement peut être rapide : pour certains de ces astres, on a observé une variation de l'ordre de $\Delta V \simeq 2$ magnitudes (soit d'un facteur ~ 6) en quelques jours ou quelques semaines.

Ceci a soulevé un problème important : si les quasars sont à distance cosmologique, non seulement ils sont brillants mais le débit d'énergie se produit dans un volume relativement petit, puisque la dimension de la partie active de l'objet est $\sim 10 - 100$ jours — lumière.

4. LES GALAXIES N

Une carte du ciel, le « Palomar Sky Survey », a été réalisée avec le télescope de Schmidt du Mont Palomar de 1949 à 1954. Les astres enregistrés étaient beaucoup plus faibles que dans les travaux antérieurs; la magnitude limite atteinte dans le bleu était $B \sim 21$. Cette carte a bouleversé notre vision de l'Univers en faisant apparaître que les galaxies étaient beaucoup plus nombreuses qu'on ne le pensait auparavant. On a également observé des galaxies d'apparence compacte, nommées galaxies N. Ces objets ont été définis par Morgan (1958) puis par Matthews et coll. (1964) : galaxies à noyau brillant, ponctuel; ce noyau émet une part importante de la luminosité du système; il est entouré d'une nébulosité faible et peu étendue.

L'application de la loi de Hubble à ces astres ne paraît pas poser de problèmes particuliers et conduit à des distances ~ 50 à $1\,000$ Mpc; leur éclat dépasse celui des galaxies géantes mais par un facteur modeste, en général < 3 . Ce sont des galaxies actives typiques.

Certaines de ces galaxies N émettent en onde radio et, selon Sandage (1973), les 12 galaxies N du Catalogue de radiosources 3C R de Cambridge sont des objets composites, formés d'une galaxie elliptique géante rouge et d'un « miniquasar » bleu.

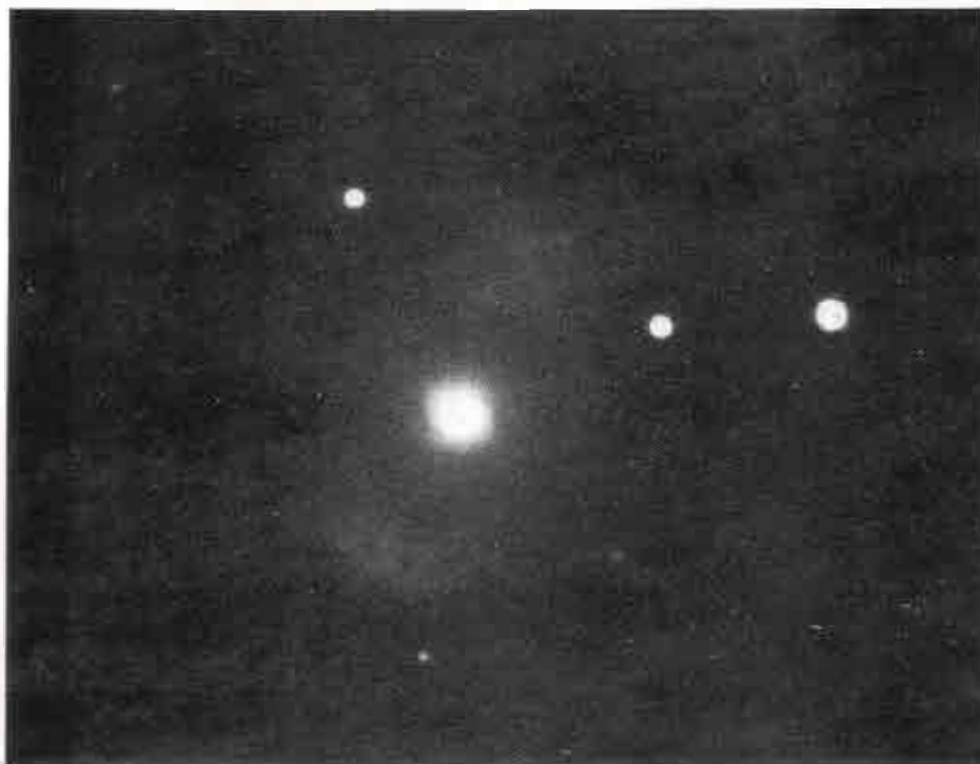
5. LES OBJETS DE TYPE BL LACERTAE

En 1968, une radiosource ponctuelle en onde radio, a été identifiée à un astre optique classé auparavant comme étoile variable : BL Lacertae. Cet astre avait toutes les propriétés d'un quasar sauf une : son spectre était purement continu et l'absence de raies d'émission ne permettait pas de mesurer son décalage vers le rouge et donc, dans l'hypothèse cosmologique, d'évaluer sa distance et, à partir de celle-ci, son éclat.

Depuis 1968 on connaît une trentaine de radiosources de ce type; certains de ces objets sont très variables, ainsi l'astre OJ 287 présente des variations extrêmes d'éclat de 4 magnitudes, soit un facteur 40.

6. LES GALAXIES DE MARKARIAN

Depuis 1972, B. Y. Markarian, astronome d'Arménie soviétique, publie des listes de galaxies présentant un excès d'ultraviolet par rapport aux galaxies normales; plus de 600 ont été ainsi recensées. La plupart de ces astres diffèrent peu des galaxies ordinaires; certains cependant sont des radiosources, d'autres des galaxies de Seyfert : depuis le travail original de Seyfert, le nombre de galaxies de ce type est ainsi passé de 12 à 100 environ.



Photographie 2. — Galaxie de Seyfert NGC 4151. Cliché O.H.-P., C.N.R.S. 1964, Ch. Fehrenbach.
On note la très grande luminosité du noyau de cette galaxie.

Apport des observations dans l'infrarouge et dans le domaine des rayons X

Depuis quelques années, on observe les astres dans les fenêtres de l'atmosphère terrestre à des longueurs d'onde comprises entre 1 et 40 μm et dans la fenêtre à 300 μm . Tandis que les galaxies normales émettent peu dans l'infrarouge, les galaxies actives et certains quasars présentent une émission infrarouge importante; Jean-Claude Pecker abordera ce sujet. Deux mécanismes d'émission sont possibles :

- une émission synchrotron analogue à celle que l'on rencontre dans le domaine radio et dans le domaine optique;
- une émission thermique : des poussières sont chauffées par le rayonnement du noyau et réémettent dans l'infrarouge.

Avec le premier mécanisme, l'émission peut présenter des variations analogues à celles observées dans le domaine optique et le rayonnement est polarisé.

D'autre part, parmi les trois cents sources de rayons X observées à ce jour, plusieurs dizaines sont extragalactiques. Parmi celles-ci on note :

(a) des sources ponctuelles : un quasar 3C 273, deux galaxies N, 3C 120 et 3C 390,3, une dizaine de galaxies de Seyfert, en particulier NGC 4151 (photographie n° 2) et une radiogalaxie à jet (Virgo A);

(b) des sources étendues qui ont été identifiées à des amas de galaxies.

Caractéristiques communes à tous les objets extragalactiques actifs

Dans un article de synthèse, K. Brecher (1977) décrit ces caractéristiques :

- 1° grande luminosité; seules les galaxies les plus brillantes sont actives;
- 2° émission non thermique avec un excès ultraviolet, infrarouge, radio, rayons X;
- 3° rapide variabilité impliquant une petite dimension de la partie active;
- 4° aspect photographique particulier : noyau brillant;
- 5° quelquefois apparence explosive ou présence d'un jet (3C 273, Virgo A);
- 6° le système n'est pas en équilibre gravitationnel, il y a des mouvements internes à grande vitesse;
- 7° un spectre non stellaire et des raies d'émission souvent larges.

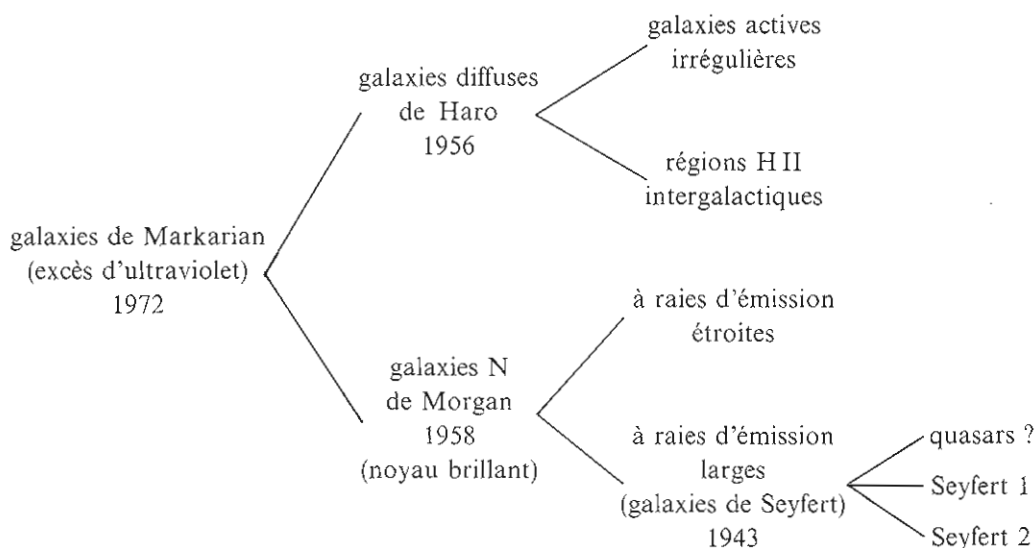


Fig. 2. — Classement des galaxies actives d'après S. van den Berg, 1975.

Classement des objets extragalactiques actifs

Dans un autre article de synthèse, S. van den Berg (1975) a proposé un schéma pour classer les objets actifs (*fig. 2*), qui tient compte de leurs propriétés morphologiques et spectroscopiques; ce schéma n'a pas la prétention d'expliquer les origines de l'activité.

Problèmes non complètement résolus

1. FRÉQUENCE DU PHÉNOMÈNE ACTIF

Suivant les estimations, 2 à 5 % des galaxies sont des galaxies de Seyfert. Si on admet que l'existence d'une galaxie est de $\sim 10^{10}$ ans, ou bien quelques pour-cent des galaxies passent toute leur vie à l'état actif, ou bien chacune des galaxies brillantes montre de l'activité pendant une durée ~ 2 à $5 \cdot 10^8$ ans, l'activité pouvant se produire au cours de périodes plus ou moins longues $\sim 10^7$ ans, séparées par des phases d'accalmie.

2. DISTANCE DES OBJETS

a. *BL Lacertae*

J'ai indiqué qu'en 1973 Sandage avait proposé de considérer les galaxies N comme des objets formés d'une galaxie elliptique géante (de magnitude absolue $M_v \sim -22,5$ à -23) et d'un noyau central qu'il baptise miniquasar. Il a été possible, grâce à l'électronographie de décomposer BL Lacertae en une grande galaxie et un astre de type quasar (Wlérick, Michet, Lelièvre 1974). En faisant l'hypothèse que la galaxie est elliptique et géante, on obtient une estimation de la distance : 300 ± 80 Mpc. Cette valeur a été confirmée par spectroscopie des raies d'absorption de la galaxie (Oke et Gunn, 1974, $z=0,07$, $D \sim 350$ Mpc). On en déduit que l'éclat absolu de BL Lacertae varie dans les limites :

$$-24 < M_v < -27.$$

Or $M_v = -27$ correspond à l'éclat des quasars brillants si on suppose ceux-ci à distance cosmologique.

Depuis, on a trouvé des raies d'émission très faibles dans le noyau de BL Lacertae (Miller, 1976) et ces raies ont le même décalage vers le rouge que les raies d'absorption de la galaxie.

Des mesures analogues ont été effectuées avec un autre objet de type BL Lac, AP Librae, composé d'une galaxie elliptique et d'un noyau (à raies d'émission très faibles). On a trouvé :

$$z_{\text{abs.galaxie}} = z_{\text{ém.noyau}} = 0,048.$$

Compte tenu des résultats sur ces deux astres et sur certaines galaxies N, il semble que, au moins pour les valeurs de z petites ($z < 0,20$), il n'y a pas d'objection à une interprétation cosmologique du paramètre z , c'est-à-dire à une interprétation semblable à celle des galaxies normales.

b. Cas des astres de type 3C 48

On connaît maintenant quatre objets pour lesquels $0,3 < z < 0,4$ et qui présentent la particularité suivante : ils sont formés d'un noyau type quasar et d'une nébulosité différente d'une galaxie; cette nébulosité présente uniquement des raies d'émission et une grande extension ~ 300 kpc.

Or on a trouvé : $z_{\text{ém noyau}} = z_{\text{ém.nébulosité}}$.

Ceci semble exclure une composante d'origine gravitationnelle dans le paramètre z pour les objets de ce type.

c. Cas des objets à grand z

Pour $z > 1$, on n'a plus de preuves directes du caractère cosmologique du paramètre z , cependant les mesures sur BL Lacertae montrent que le débit d'énergie de cet astre est du

même ordre de grandeur que celui des quasars supposés à distance cosmologique. Donc, au moins pour les quasars qui ne sont pas plus brillants que BL Lacertae, il n'y a pas d'objections, *a priori*, à les placer à grande distance.

3. STRUCTURE

Dans le cas des galaxies de Seyfert, la galaxie est presque toujours de type spirale. Dans le cas des galaxies N radioémissives, Sandage (1973) avait conclu à une structure de type elliptique. G. Lelièvre (1976) a repris par électrographie l'étude de ces galaxies. Il a pu montrer que 3C 303 a effectivement une structure elliptique mais que 3C 120 a plutôt les propriétés d'une spirale et que, en tout cas, sa morphologie est perturbée. Pour 3C 445 la structure est également perturbée.

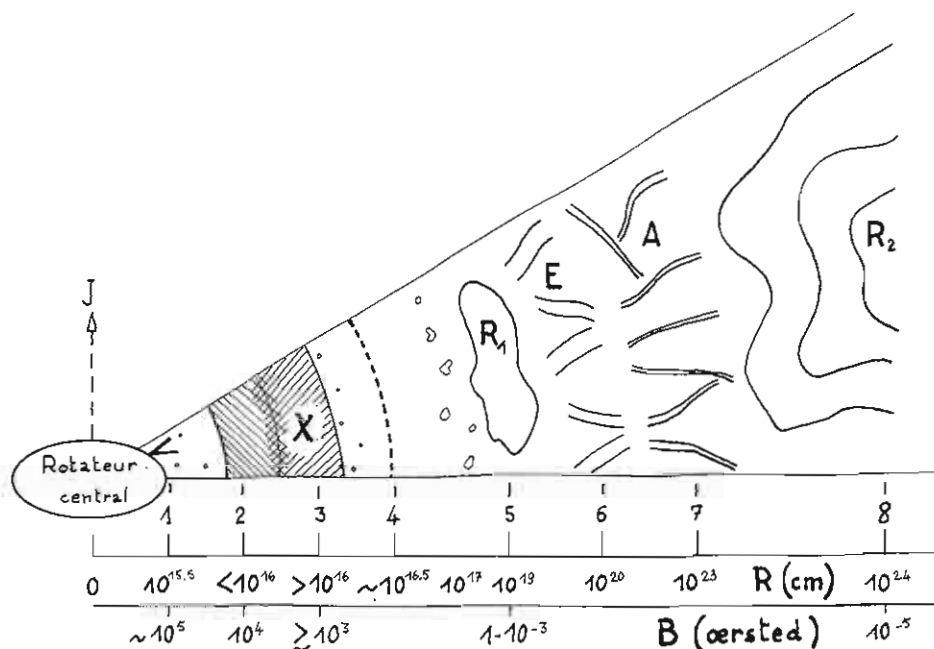


Fig. 3. — Coupe d'une radiosource dans l'hypothèse où la source d'énergie est un corps massif en rotation rapide (Cavalière et Morrison, 1971). 1 surface du rotateur; 2, 3 régions où est produit le rayonnement non thermique visible, infrarouge et X; 5 émission radio en ondes centimétriques; 6 filaments avec raies d'émission; 7 filaments absorbants; 8 émission radio en ondes décimétriques et métriques.

Par contre, il a noté que les objets de type BL Lac présentent une morphologie régulière elliptique (cas notamment de B2 1652 + 39).

La structure des quasars est inconnue. Ceux qui présentent une composante radio, compacte et unique, sont probablement associés à des galaxies spirales, tandis que ceux qui ont une structure radio double doivent être apparentés aux radiogalaxies elliptiques.

4. DIMENSIONS

La variabilité en onde radio centimétrique des sources dites compactes, conduit à des dimensions de la région radioémissives de l'ordre du mois-lumière. Les variations de flux dans le domaine optique sont plus rapides. Dans le cas de BL Lacertae (Bertaud et coll. 1969, M. P. Véron 1974), on trouve, pour le continu optique non thermique, une dimension de l'ordre de 7 jours-lumière.

Enfin, dans le cas d'une galaxie de Seyfert, M^{mes} Andrillat, Allouin et Souffrin ont observé une variation de raies d'émission par rapport au spectre original de Seyfert, ce qui implique pour la région où ces raies sont produites une dimension de quelques parsecs.

5. SOURCE D'ÉNERGIE

La source d'énergie est actuellement inconnue. L'énergie stockée est considérable. Par exemple, G. Burbidge a calculé que, pour la radiogalaxie Cygnus A, l'énergie emmagasinée dans le champ magnétique et les électrons relativistes doit être supérieure ou égale à 10^{60} erg. Des explosions en chaîne de supernovae au centre d'une galaxie pourraient fournir l'énergie suffisante. On a pensé également à un pulsar géant ayant une masse $\sim 10^8$ à $10^{10} M_{\odot}$ ($M_{\odot}$ = masse du Soleil), en rotation rapide et magnétisé. Cette super étoile proviendrait de l'effondrement gravitationnel d'une masse gazeuse où règne un champ magnétique (Morrison, 1969). Le terme ultime de l'évolution du système pourrait être un « trou noir ». La figure 3 représente la coupe de la structure du noyau d'une galaxie active ou d'un quasar dans le cas où l'énergie est empruntée à un rotateur central (Morrison et Cavalière) : en s'éloignant du centre, on trouve successivement les zones de rayonnement non thermique visible, infrarouge et X puis, au-delà d'une certaine distance critique, les rayonnements radio centimétriques, la zone, à structure filamentaire, d'émission des raies optiques et enfin la région d'émission des ondes radio décimétriques et métriques. Au-delà de la distance critique, le champ magnétique diminue très fortement.

Perspectives

Le grand télescope de l'Observatoire européen au Chili vient d'entrer en service. Il sera suivi prochainement par celui qui est situé dans l'île d'Hawaii. Ces instruments permettront de donner une impulsion décisive aux recherches sur les quasars qui sont des objets très lointains et, par suite, faiblement lumineux (malgré leur très grand éclat intrinsèque).

De même, si on dispose vers 1985 d'un grand télescope dans l'espace, l'étude à très haute résolution de la structure des galaxies de Seyfert, des galaxies N et des objets de type BL Lacertae deviendra possible et sûrement fructueuse.

On attend également d'observations spatiales dans le domaine des rayons X, des informations sur la partie la plus énergétique du rayonnement de ces objets avec l'espoir de mieux cerner les propriétés de la source d'énergie.