

Une nouvelle classe de galaxies superlumineuses dans l'infrarouge

par Lucienne GOUGUENHEIM
Observatoire de Paris, 92195 Meudon Principal Cedex
et Université Paris-Sud Centre d'Orsay

1. ÉTOILES JEUNES, MILIEU INTERSTELLAIRE ET FORMATION D'ÉTOILES DANS LES GALAXIES.

La façon dont les galaxies forment les étoiles est l'une des clés du monde de leur évolution. Parce qu'elles ont des durées de vie courtes, les étoiles bleues, très chaudes, sont des étoiles jeunes. Elles sont donc de bons indicateurs de la formation récente d'étoiles. Ces étoiles rayonnent l'essentiel de leur énergie dans l'ultraviolet : on peut montrer, en utilisant la loi de Wien ($\lambda_m T = 2,9 \times 10^{-3}$) qu'une étoile de température superficielle égale à 20 000 K rayonne le maximum de son énergie au voisinage de la longueur d'onde $\lambda_m = 0,15 \mu\text{m}$, alors que le Soleil, à 6 000 K rayonne le maximum de son énergie dans le visible, autour de $\lambda_m = 0,5 \mu\text{m}$.

L'ensemble des observations effectuées jusqu'ici concernant les étoiles bleues et les régions de gaz ionisé qu'elles provoquent montrent que ces étoiles sont fréquentes dans les galaxies spirales tardives et les irrégulières mais pratiquement absentes des spirales peu avancées et des elliptiques. En outre, dans les galaxies spirales, les étoiles jeunes se distribuent essentiellement le long des bras.

Dans cet exemple, le milieu interstellaire est un indicateur de formation stellaire parce qu'on l'observe excité par le rayonnement UV des étoiles jeunes : une nébuleuse brillante rayonne dans le visible dans les raies de la série de Balmer de l'hydrogène par un mécanisme d'ionisation par le rayonnement UV de longueur d'onde plus courte que $0,0912 \mu\text{m}$ suivi d'une recombinaison sur un état excité et d'une cascade radiative (Figure 1).

De façon plus générale, le milieu interstellaire est lié à la formation des étoiles puisqu'il en est le progéniteur. Il se présente sous différentes conditions physiques, incluant notamment :

- des nuages de gaz diffus, de densité de 10 à 50 atomes par cm^3 ,

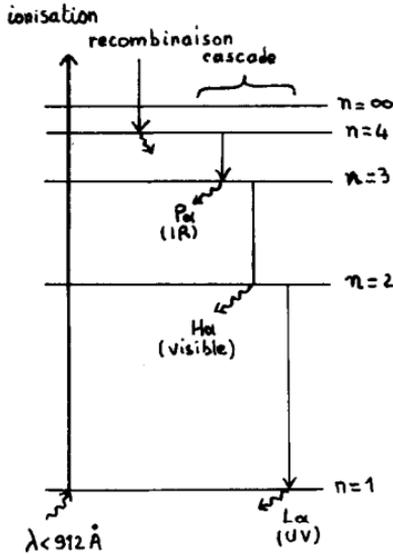


Figure 1

relativement froids (40 à 100 K), composés pour l'essentiel d'hydrogène sous forme atomique ; on l'observe grâce à la raie émise par l'hydrogène à la longueur d'onde de 21 cm.

– des régions plus denses (10^2 à 10^7 atomes par cm^3) et moléculaires : la concentration des petites particules solides, appelées «poussières», dont les dimensions typiques sont de l'ordre de $0,1 \mu\text{m}$, y assure la protection des molécules contre la dissociation par la lumière. On observe ce milieu par les différentes raies moléculaires accessibles à la radioastronomie, essentiellement, dans le cas des galaxies extérieures, par les raies de CO à 2,6 et 1,3 mm de longueur d'onde.

– les poussières, si elles sont chauffées par un rayonnement ultraviolet de longueur d'onde plus courte que leurs dimensions, rayonnent dans l'infrarouge lointain.

L'observation du spectre, et en particulier du spectre de raies, émis par ces différentes composantes, nous renseigne donc sur l'état physique et l'abondance du milieu interstellaire et, en conséquence, sur son aptitude à former des étoiles. La composante la plus dense est probablement la plus proche de la formation stellaire, puisque les étoiles se forment à partir d'un gaz assez dense pour être autogravitant.

2. LE MILIEU INTERSTELLAIRE EST GÉNÉRALEMENT EN ÉCART À L'ÉQUILIBRE THERMODYNAMIQUE LOCAL.

L'interprétation de l'observation des raies interstellaires est délicate, parce que ce milieu est généralement en écart à l'équilibre thermodynamique local (ETL).

Dans le cas où le milieu est en équilibre thermique, des lois simples décrivent le champ de rayonnement (loi de Planck) et la répartition des atomes ou des molécules dans les différents états d'énergie (loi de Boltzmann). En outre, une raie spectrale, qui résulte de la transition entre deux niveaux d'énergie, se décrit uniquement en fonction de la température et des transitions radiatives entre ces deux niveaux (microréversibilité des processus).

Si u_ν est la densité d'énergie du champ de rayonnement à la fréquence $\nu = (E_2 - E_1)/h$, E_1 et E_2 les énergies des niveaux, g_1 et g_2 leurs poids statistiques, N_1 et N_2 leurs populations, A_{21} , B_{21} et B_{12} les coefficients de probabilité d'Einstein d'émission spontanée, d'émission induite et d'absorption, respectivement, l'équilibre des échanges entre les deux niveaux (Figure 2) et la loi de Boltzmann permettent de déduire la température et l'abondance de l'élément chimique responsable des raies observées à partir de l'intensité de ces raies, pourvu que le milieu soit assez transparent, c'est-à-dire que les photons émis lors de la transition en sortent.

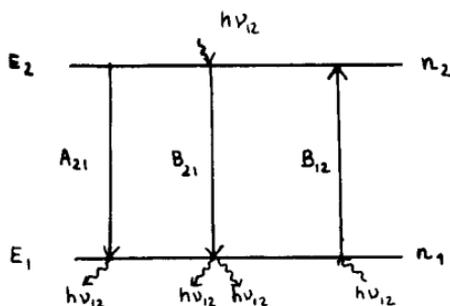


Figure 2

Aucun milieu astrophysique n'est totalement en équilibre thermodynamique. Mais il arrive assez souvent que les conditions de l'équilibre thermodynamique soient réalisées localement : on parle alors d'équilibre thermodynamique local (ETL). Ceci peut se faire lorsque les variations de température dans le milieu sont suffisamment progressives de telle sorte

qu'on puisse le décomposer en une succession de cellules de température constante à l'intérieur desquelles s'est instauré un état d'équilibre. Ceci se produit si les libres parcours moyens des particules (matière et photons) sont petits devant la dimension de la cellule (Figure 3). On conçoit donc que l'E.T.L. est d'autant mieux réalisé que les processus collisionnels sont importants.

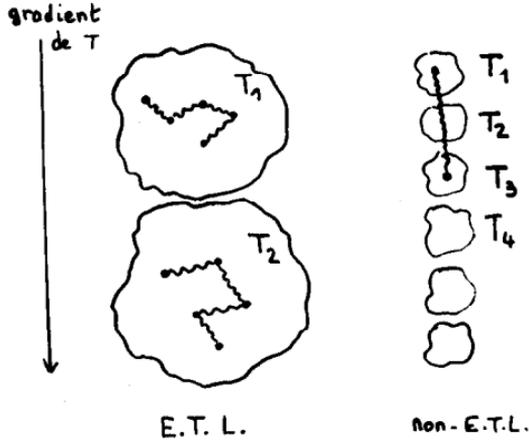


Figure 3

Dans le cas contraire, le milieu est en écart à l'E.T.L. et les lois de l'équilibre thermodynamique ne sont plus valables, même localement. Pour rendre compte de la formation d'une raie spectrale, on ne peut plus se contenter de considérer les seules transitions radiatives entre les deux niveaux d'énergie impliqués dans la formation de la raie. La seule loi applicable est la stationnarité de la population d'un niveau d'énergie : l'ensemble des transitions qui le peuplent, incluant donc tous les processus, radiatifs ou collisionnels, et égal à celles qui le dépeuplent. Dans ce cas, l'intensité observée d'une raie ne dépend pas seulement de l'abondance de l'élément concerné et de la température mais du détail des divers processus physiques.

C'est le cas des raies d'émission de l'hydrogène de la série de Balmer dans le visible, observées dans les nébuleuses brillantes et dont il a été question plus haut. Elles résultent d'un processus d'ionisation de l'hydrogène par le rayonnement UV des étoiles chaudes suivi de la recombinaison sur un état excité et des cascades successives assurant le retour à l'état fondamental. Les seules raies visibles impliquées lors de ces cascades sont celles de la série de Balmer. La plus intense est la raie H_{α} située dans le rouge et qui est à l'origine de la belle couleur rouge de ces nébuleuses.

La grande intensité de la raie H_{α} n'est pas due à la température élevée qui assurerait un peuplement plus important du niveau $n = 3$ de l'atome d'hydrogène, mais au grand nombre de photons ionisants de longueur d'onde plus courte que $0,0912 \mu\text{m}$ émis par l'étoile excitatrice.

3. LE SATELLITE IRAS ET LA DÉCOUVERTE DES GALAXIES «STARBURST».

Chauffées par le rayonnement UV, les particules solides du milieu interstellaire sont susceptibles de rayonner dans l'infrarouge lointain, inobservable depuis le sol.

Une équipe de chercheurs américains, anglais et néerlandais a lancé en janvier 1984 un satellite (InfraRed Astronomical Satellite, ou IRAS) qui a observé le ciel de façon systématique pendant près de deux ans, dans 4 bandes de longueur d'onde autour de 12, 25, 60 et $100 \mu\text{m}$. IRAS était équipé d'un miroir de 57 cm de diamètre en béryllium refroidi à 2,5 K par de l'hélium liquide, pour se prémunir contre tout rayonnement IR parasite.

IRAS a découvert près de 250 000 sources de rayonnement IR et parmi elles environ 20 000 galaxies dont la moitié étaient jusque là inconnues, parce que trop peu brillantes dans le domaine visible. Certaines de ces galaxies sont de véritables monstres, dont la luminosité IR atteint cent et même mille milliards de fois celle du Soleil. Cette émission IR témoigne d'une activité colossale de formation d'étoiles, qui, contrairement à la situation classique que nous avons décrite plus haut, s'effectue dans le noyau même de la galaxie.

Contrairement aux galaxies à noyaux actifs connues jusqu'ici (voir par exemple l'article de Suzy COLLIN dans le numéro 41 des Cahiers Clairaut), l'émission intense est due à la présence d'une formidable quantité d'étoiles, incluant en particulier un nombre important d'étoiles très chaudes. Ces galaxies émettent un rayonnement radio continuum fort intense, qui provient des restes de supernovae, produites par les plus massives des étoiles récemment formées, celles qui ont la durée de vie la plus courte. Les étoiles un peu moins massives, elles aussi très chaudes, sont encore en activité et sont responsables du chauffage des poussières et de leur rayonnement infrarouge.

Les anglosaxons ont nommé ces galaxies «starbursts», ce qui signifie «galaxie subissant une flambée de formation stellaire». Elles sont généralement riches en poussières qui masquent leur structure globale et les

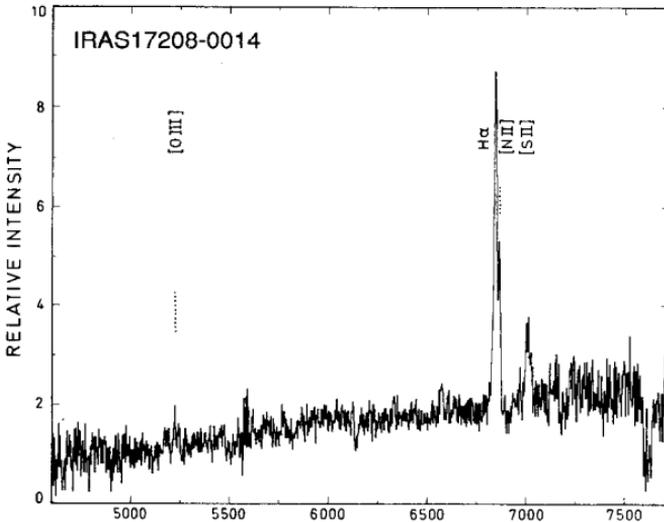


Figure 4 : le spectre de la galaxie a été obtenu avec le télescope de 3,6 m de l'ESO (European Southern Observatory). Il présente des raies d'émission très nettes du côté du rouge. Ces raies sont notées H_{α} pour la première raie de la série de Balmer, [NII] pour la raie interdite de l'azote une fois ionisé, [SII] pour la raie interdite du soufre une fois ionisé ; du côté du bleu, seule est visible la raie interdite de l'oxygène deux fois ionisé ([OII]) et la raie H_{β} n'est pas décelée, ce qui traduit une importante extinction, due aux poussières.

rendent difficiles à observer dans le visible. Leur spectre de raies dans le domaine visible présente des raies d'émission caractéristiques des nébuleuses excitées, mais témoigne aussi d'une très forte extinction due à la présence des poussières. Sur le figure 4 on voit la raie H_{α} très intense ; par contre, H_{β} dans le bleu est invisible.

Jusqu'à l'ère IRAS, le prototype des galaxies «starbursts» était M82, la galaxie compagnon de la belle spirale M81 qui rayonne 4 fois plus d'énergie dans l'IR que dans le bleu, alors que ce rapport est généralement inférieur à l'unité pour les galaxies classiques. IRAS a découvert des galaxies où il dépasse la centaine !

On ne sait pas encore bien quel mécanisme est à l'origine de cette extraordinaire flambée de formation stellaire. Peut-être est-ce la fusion de 2 galaxies comme le suggère la présence fréquente d'un noyau double.

4. DE GIGANTESQUES MASERS OH

Le radical OH est la première molécule à avoir été observée dans le milieu interstellaire, en 1963. Il peut émettre 4 raies au voisinage de la longueur d'onde 18 cm qui correspondent à la structure du niveau électronique, vibrationnel et rotationnel fondamental (Figure 5).

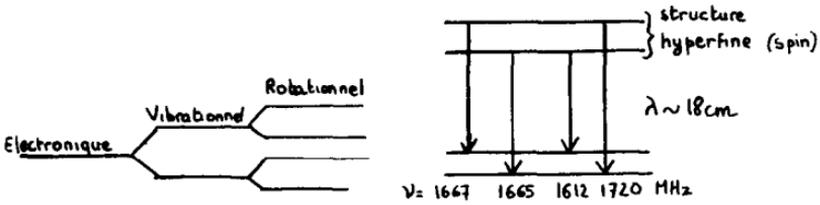


Figure 5

Cette raie est parfois amplifiée par un effet MASER (Microwave Amplification by Stimulated Emission of Radiation), effet typiquement associé à une condition d'écart à l'ETL (Figure 6). Le maser résulte d'une surpopulation du niveau supérieur de la transition, assurée par des transitions venant d'un niveau supérieur lui-même peuplé par collisions ou rayonnement. On donne à ce dernier mécanisme le nom de «pompe» du maser.

Une fois peuplé, le niveau supérieur se désexcite à la fois par transitions spontanées et par transitions induites par la présence de photons indentiques à celui émis lors de la transition : il y a ainsi amplification du rayonnement. Dans les masers galactiques, le rayonnement amplifié a souvent pour origine les photons créés par émission spontanée qui, à leur tour, stimulent l'émission d'autres molécules.

Le phénomène «Megamaser», découvert dans des galaxies lointaines, possède une ampleur très supérieure à celle des masers galactiques, d'où leur nom qui nous rappelle qu'ils sont un million de fois plus intenses que les masers galactiques. Le premier megamaser a été découvert accidentellement dans la galaxie Arp 220 (Figure 7) par des radioastronomes d'Arecibo, alors qu'ils cherchaient à observer une raie en absorption à 18 cm de longueur d'onde provoquée par les molécules OH du milieu interstellaire sur le rayonnement émis par une radiosource centrale.

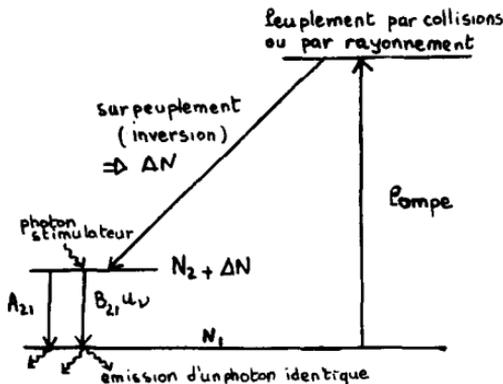


Figure 6

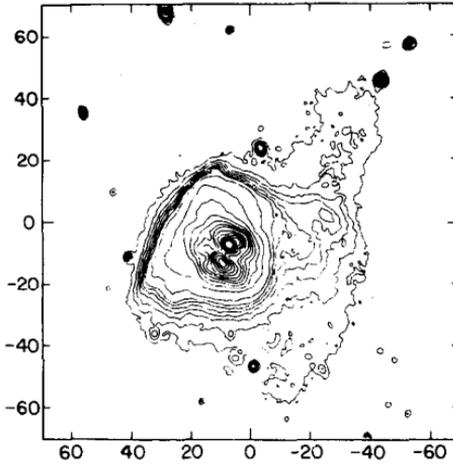


Figure 7 : Photographie dans le rouge de la galaxie Arp 220, obtenue avec une caméra CCD au télescope de 5 mètres du Mont Palomar, présentée à gauche sous la forme d'une carte avec des contours d'égal intensité lumineuse (le pas correspond à un facteur 2) et des axes gradués en seconde d'arc sur le ciel. Arp 220 est un système de deux galaxies en fusion ; le noyau double est traversé par une bande de poussières et deux extensions peu lumineuses en forme de boucle s'échappent au-delà du bord ouest du noyau sur environ 100 000 années de lumière ; ces extensions de gaz sont le résultat classique des effets de marée dus à l'interaction gravitationnelle très serrée de deux galaxies en disque. Arp 220, située à une distance de 230 millions d'années de lumière, a été le premier megamaser découvert par hasard en 1982. Les données du satellite IRAS ont montré par la suite qu'il s'agissait d'une galaxie très lumineuse émettant près de 90 % de sa lumière dans l'IR.

Notre équipe (Lucette BOTTINELLI, Michel DENNEFELD, Anne-Marie LE SQUEREN, Jean-Michel MARTIN et Georges PATUREL) est partie de l'idée qu'il y avait un lien entre l'émission IR et le phénomène megamaser. Les premiers niveaux de rotation de la molécule, correspondant tous à l'état électronique et à l'état vibrationnel fondamentaux, peuvent en effet être peuplés par un rayonnement IR de longueur d'onde 120, 80, 53 et 35 μm respectivement (voir la Figure 8). Partant de l'idée que le mécanisme de pompage résidait dans le rayonnement IR plutôt que dans les collisions, nous avons recherché l'émission OH dans des galaxies de très grande luminosité IR.

5. AUTOPSIE D'UN MEGAMASER

L'étude détaillée de la galaxie IRAS 17208-0014, découverte par IRAS et que nous avons indentifiée à une galaxie, est riche d'enseignements.

Tout d'abord son spectre (Figure 4) montre une raie H_α très intense alors que H_β , dans le bleu, n'est pas visible. Ce rapport d'intensité très

inhabituel provient de l'extinction considérable que subit la lumière dans ces galaxies très empoussiérées. Le décalage spectral de la raie H_{α} témoigne d'une grande vitesse d'éloignement, égale à $12\,700\text{ km s}^{-1}$. Le spectre radio obtenu à Nançay montre 2 raies d'émission à 1667 et 1665 MHz, très intenses (Figure 10) malgré la grande distance de la galaxie (environ 600 millions d'années de lumière). Le spectre à 21 cm obtenu à Nançay (Figure 9) est tout aussi étonnant, puisque la raie est considérablement élargie, alors que la faible dimension (environ 600 années de lumière) de la radiosource centrale, mesurée au moyen d'un interféromètre de très bon pouvoir séparateur, le Very Large Array (VLA) aux États-Unis et le réseau MERLIN en Angleterre (Figure 11) laisserait présager un très faible élargissement par effet Doppler-Fizeau, les vitesses d'ensemble du gaz HI devant la radiosource étant essentiellement transverses (Figure 9). Le gaz du noyau est donc animé de mouvements extrêmement violents.

Nos observations confirment qu'il y a superposition de la radiosource et de la région qui émet les raies à 18 cm. Le maser est donc particulièrement puissant parce qu'il amplifie le rayonnement continuum de la radiosource.

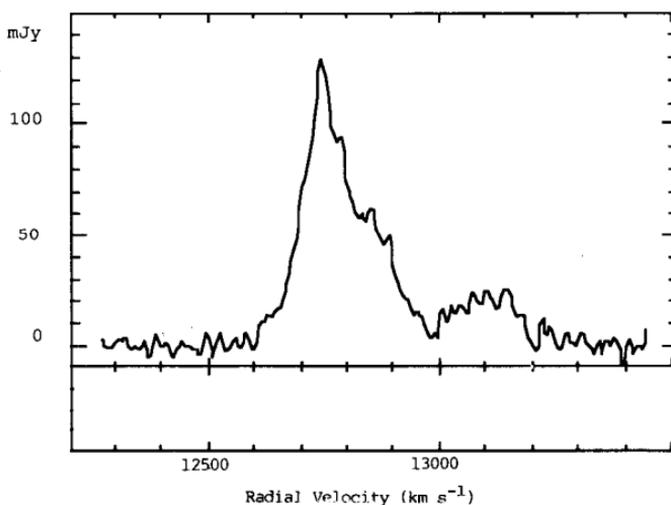


Figure 10 : Profil des raies à 1667 MHz (à gauche) et 1665 MHz (à droite) de la molécule OH dans la même galaxie IRAS 1720-0014.

6. LE POMPAGE DU MASER EST-IL BIEN DU AU RAYONNEMENT IR ?

Les plus grands radiotélescopes (Arecibo, Jodrell Bank, Green Bank, Nançay et Parkes) ont entrepris de rechercher de telles sources. Plusieurs centaines ont été observées, parmi lesquelles 26 megamasers seulement ont été découverts, dont 18 à Nançay. Il s'agit donc d'un phénomène extrêmement rare. Comme les objets rares sont peu nombreux dans un volume d'espace trop petit, il faut explorer un très grand volume, donc atteindre de très grandes distances, pour en trouver plusieurs. La Figure 12 montre la raie de OH à 1667 MHz observée dans une galaxie dont la distance est un record : son décalage spectral est si grand ($50\,000\text{ km s}^{-1}$) que la raie 18 cm est observée à 21 cm de longueur d'onde !

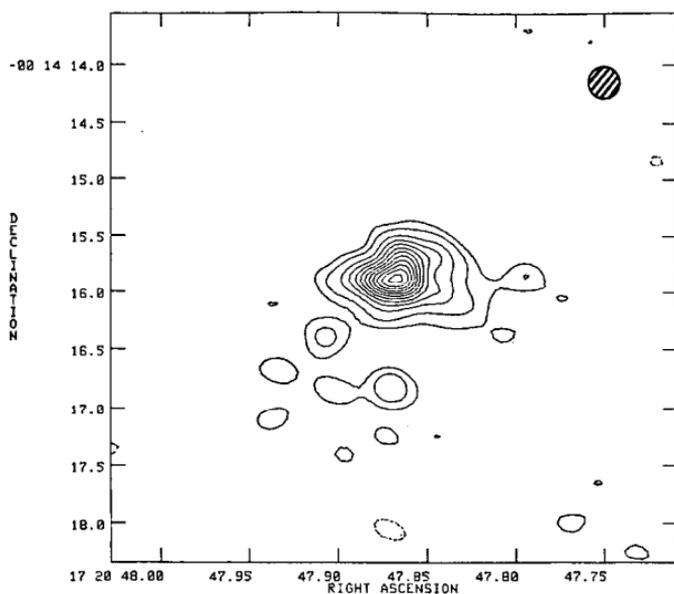


Figure 11 : Cartographie de la radiosource centrale de IRAS 17208-0014 avec une résolution spatiale de $0''3$ (MERLIN).

Un résultat intéressant se déduit de la figure 13 où la puissance rayonnée dans la raie 1667 MHz, L_{OH} , est portée en fonction de la puissance rayonnée en IR, L_{IR} . Dans un milieu assez transparent pour que tous les photons émis à 18 cm de longueur d'onde en sortent, L_{OH} est proportionnel au nombre de photons 18 cm émis. Or, ce nombre de photons est proportionnel d'une part au nombre de photons stimulateurs, c'est-à-dire à la puissance rayonnée dans le continuum à la longueur d'onde de 18 cm et d'autre part à la population de molécules inversées

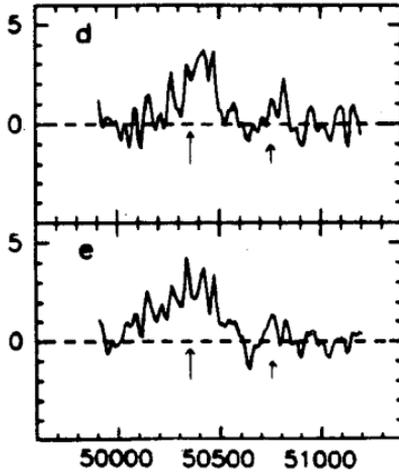


Figure 12 : Deux profils de la raie de OH dans une galaxie lointaine.

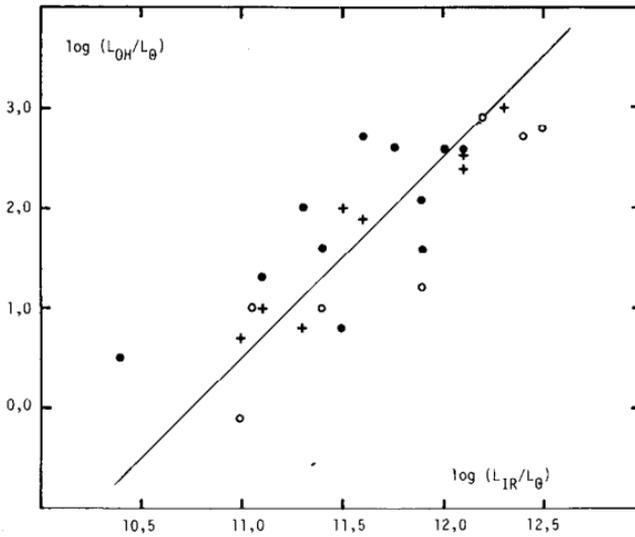


Figure 13 : Relation montrant que L_{OH} est proportionnel à L_{IR}^2 .

(surpopulation Δn du niveau supérieur). Les radioastronomes d'Effelsberg ont montré que la puissance rayonnée dans le continuum radio est très étroitement proportionnelle à la puissance rayonnée en infrarouge. Ce résultat s'interprète aisément, parce que ces deux rayonnements ont la même origine, à savoir les étoiles jeunes et massives : les plus massives, dont la durée de vie est la plus courte ont déjà explosé en supernovae

dont les restes sont responsables du rayonnement radio continuum. Les autres rayonnent l'UV qui chauffe les poussières et les conduit à rayonner en infrarouge.

Le résultat de la figure 13 montre donc que l'inversion de population Δn est elle aussi proportionnelle à la luminosité IR :

$$L_{OH} \propto L_{\nu} \times \Delta n = L_{IR} \times L_{IR} = L_{IR}^2$$

Ceci démontre que c'est bien le rayonnement IR qui est à l'origine de l'inversion de population, donc du processus de pompage.

7. CONCLUSION ET PERSPECTIVES

Il reste encore beaucoup de choses à comprendre. Tout d'abord, le mécanisme précis du pompage ; les travaux en cours suggèrent qu'il s'explique par un phénomène de recouvrement de raies dû à un champ de vitesses important. Ces travaux sont délicats d'une part parce que la condition de non-ETL oblige à traiter simultanément un grand nombre de niveaux d'énergie de la molécule (les quelques niveaux de rotation indiqués sur la figure 8 donnent une idée de la complexité du problème) et d'autre part parce que le milieu n'est pas transparent pour les raies IR : on ne peut donc pas relier simplement les intensités des raies observées au nombre de photons IR émis. Les observations IR en projet (notamment le satellite ISO) permettront certainement de faire avancer nos idées. Un autre problème fort important concerne la rareté du phénomène, même parmi la population des galaxies de très grande luminosité IR. Les travaux en cours portent sur l'augmentation de l'échantillon et sur la détermination de la localisation précise des différentes composantes du gaz (hydrogène atomique et moléculaire), par interférométrie à très grandes lignes de bases.

Cet exemple illustre bien aussi les méthodes de l'astrophysique moderne qui utilise de plus en plus pour résoudre les problèmes des approches multi-longueurs d'onde et multi-techniques. On peut souligner aussi l'importance des études systématiques, portant sur des échantillons bien sélectionnés et dépourvus de biais : le résultat important de la figure 13 a été obtenu ici grâce à la recherche patiente de megamasers de luminosité IR plus faible, donc plus difficiles à détecter ; avant leur découverte, on pensait que la luminosité OH était proportionnelle à la luminosité IR (et non à son carré) ; les conséquences, au niveau de l'interprétation du phénomène sont de taille !

N.D.L.R. : Cet article, initialement publié dans les Cahiers Clairaut (n° 44) est reproduit ici en accord avec le Comité de Liaison Enseignants - Astronomes (CLEA). Toute information sur les activités du CLEA et ses publications peut être obtenue auprès de l'auteur.

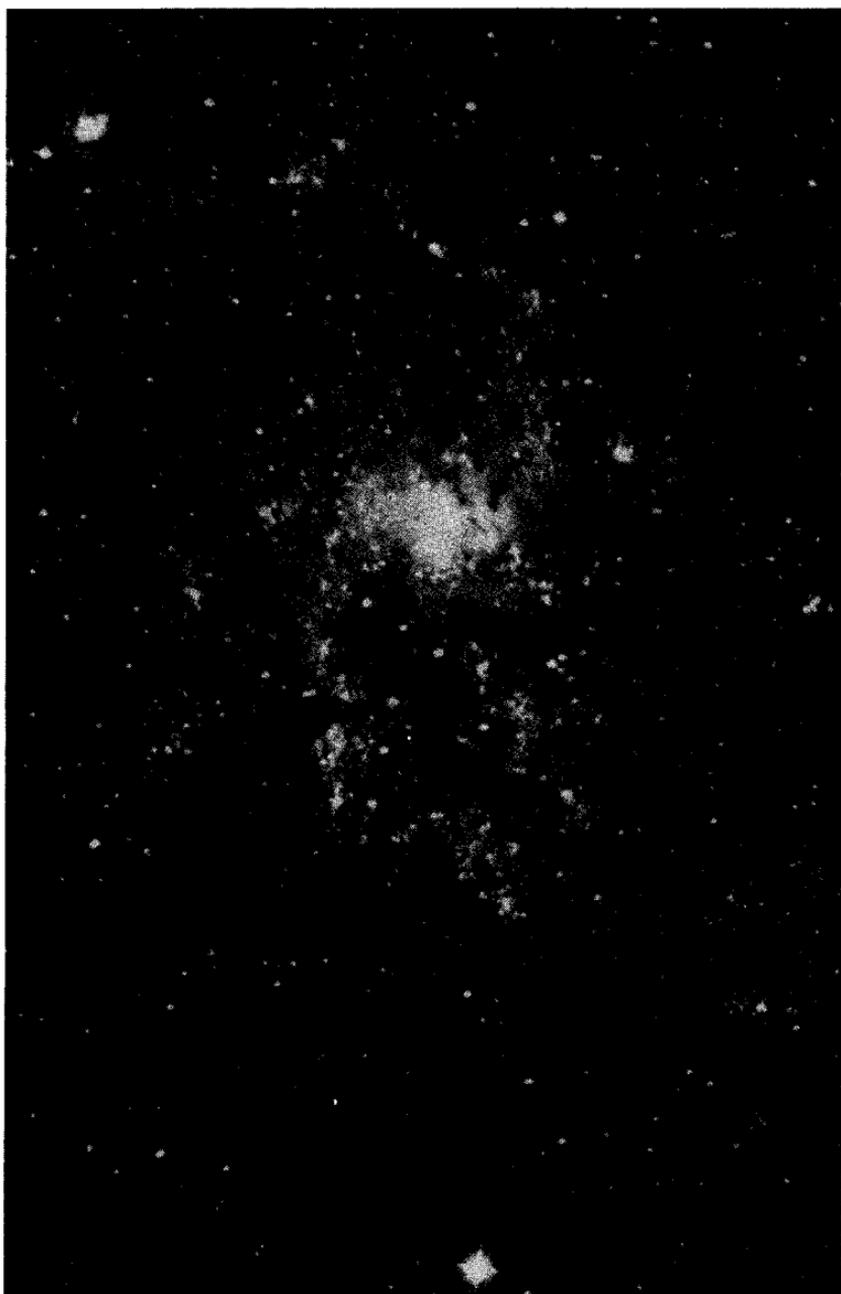


Photo de la belle galaxie spirale du Triangle, M33 prise au télescope de 193 cm de l'Observatoire de Haute Provence. On remarquera les étoiles et les nébuleuses brillantes qui sont réparties le long des bras spiraux de la galaxie.