

sine de *Yersinia*, elles peuvent pénétrer dans des cellules de mammifères.

Les signaux chimiques synthétisés par les bactéries font partie d'un groupe de substances nommées métabolites secondaires. À l'inverse des métabolites primaires tels les acides aminés et les vitamines, les métabolites secondaires ne sont pas indispensables à la survie et à la croissance des cellules bactériennes. Dans ce cas, pour quelles raisons les bactéries synthétisent-elles une telle variété de ces composés ?

Des signaux intéressants

Parmi ces métabolites secondaires, beaucoup sont des armes que les bactéries utilisent contre les micro-organismes avec lesquels elles sont en compétition : voici pourquoi certains d'entre eux sont des antibiotiques. Cependant, certains de ces métabolites secondaires sont normalement synthétisés à des concentrations bien trop faibles pour protéger efficacement ces bactéries, et nous pensons qu'ils sont souvent utilisés à des fins de communication. Les besoins de communication expliqueraient pourquoi les bactéries ont continué à fabriquer, à travers les âges, toute une gamme de composés sans nécessité apparente.

Un sous-ensemble de ces métabolites secondaires pourrait jouer un double rôle, en agissant de manière défensive à forte concentration et comme messenger aux faibles concentrations. À l'Institut Pasteur, Julian Davies et Charles Thompson ont ainsi découvert qu'à des doses trop faibles pour inhiber la croissance de bactéries cibles, certains antibiotiques libé-



H. Reichenbach, 1989, Allemagne

5. LA STRUCTURE DE CE CORPS FRUCTIFÈRE de la myxobactérie *Chondromyces crocatus* est plus complexe que celle de *Myxococcus xanthus*. *Chondromyces crocatus* commence sa différenciation comme *Myxococcus xanthus*, mais, au lieu de former des spores dans un monticule, elle produit une tige dont les branches portent une vingtaine de petits groupes de spores, à leur extrémité. Une telle structure résulte de communications complexes entre les cellules bactériennes.

rés par des cellules bactériennes stimulaient l'expression des gènes d'autres cellules bactériennes du même type. D'autres métabolites secondaires qui n'ont pas d'effet antibiotique connu seraient en fait des molécules messagers plutôt que des agents de guerre biochimique.

En espionnant les conversations des bactéries, nous devrions mieux comprendre la tactique de survie de ces créatures qui figurent parmi les plus simples sur terre. Nos indiscretions pourraient bien mener à la découverte de nouvelles substances utiles au genre humain.

Richard LOSICK est directeur du Département de biologie cellulaire et moléculaire de l'Université Harvard. Dale KAISER est professeur de biologie du développement à l'Université Stanford.

H. BARBIER-BRYGOS, U. BONAS, J. GIRAUDAT et M. SCHULTZE, *Communication cellulaire et transduction de signaux chez les végétaux supérieurs*, in *Médecine Science*, n° spécial, vol. 12, pp. 137-142, 1996.

J. WILLEY, R. SANTAMARINA, J. GUIJARRO, M. GEISTLICH et R. LOSICK, *Extracellular Complementation of a Developmental Mutation Implicates a Small Sporulation Protein in Aerial Mycelium Formation by*

S. coelicolor, in *Cell*, vol. 65, n° 4, pp. 641-650, 17 mai 1991.

M.J. McFALL-NGAI et E.G. RUBY, *Symbiont Recognition and Subsequent Morphogenesis as Early Events in an Animal-Bacterial Mutualism*, in *Science*, vol. 254, pp. 1491-1494, 6 décembre 1991.

D. KAISER et R. LOSICK, *How and Why Bacteria Talk to Each Other*, in *Cell*, vol. 73, n° 5, pp. 873-885, 4 juin 1993.

J.B. BLISKA, J.E. GALÁN et S. FALKOW, *Signal Transduction in the Mammalian Cell During Bacterial Attachment and Entry*, *ibid.*, pp. 903-920.

S.R. LONG et B.J. STASKAWICZ, *Prokaryotic Plant Parasites*, *ibid.*, pp. 921-935.

Les galaxies fantômes

GREGORY BOTHUN

En dix ans, les astronomes ont découvert plus d'un millier de galaxies géantes à faible brillance de surface. Cette population modifie nos idées sur l'évolution des galaxies et la répartition de la masse dans l'Univers.

Notre vision de l'Univers évolue avec les télescopes. Dans les années 1920, l'astronome Edwin Hubble confirme que l'Univers s'étend bien au-delà de notre Galaxie. Les astronomes découvrent alors que l'Univers contient d'innombrables galaxies assez semblables à la nôtre, chacune comprenant des dizaines, voire des centaines de milliards d'étoiles. Ces galaxies sont regroupées dans des amas de quelques centaines de galaxies, lesquels peuvent être regroupés dans des superamas. Certains de ces superamas s'étendent sur des millions d'années-lumière, ce qui en fait les plus grandes structures connues de l'Univers.

Les astronomes distinguent alors trois types de galaxies : les galaxies elliptiques, les galaxies spirales et les galaxies irrégulières. Les galaxies elliptiques ont la forme d'un ballon de rugby, avec un centre plus brillant. Les galaxies spirales, telle la Voie lactée, sont plates, avec un bulbe central, duquel partent des bras spiraux peuplés d'étoiles plus jeunes et plus bleues que celles du bulbe. Enfin les galaxies irrégulières ont une masse relativement faible et n'ont pas de forme définie.

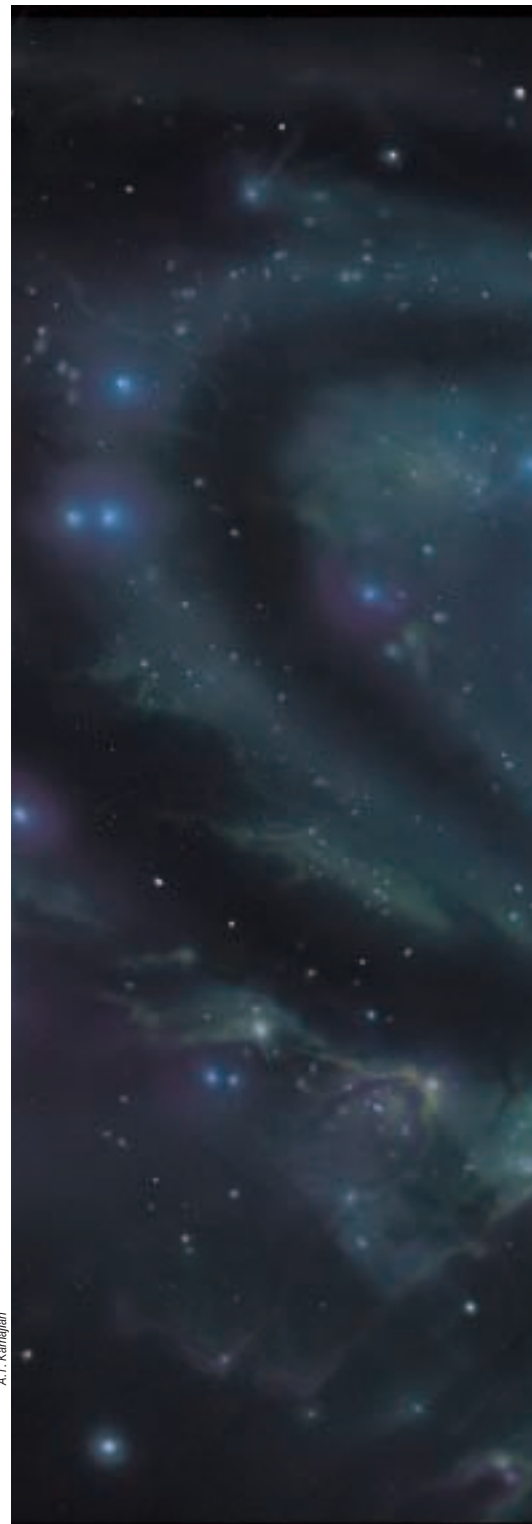
Hormis des perfectionnements mineurs, cette classification des galaxies a peu changé depuis son élaboration par Hubble, voilà 70 ans. Toutefois, des améliorations techniques ont permis de trouver de plus en plus d'objets de faible luminosité en dehors de la Galaxie. Ces dix dernières années, mes collègues et moi-même avons utilisé une méthode d'amplification du contraste photographique mise au point par l'astronome David Malin, de l'Observatoire anglo-australien. Associée à

des caméras à transfert de charges (CCD) améliorées, ces techniques nous ont permis de découvrir une nouvelle population de galaxies.

Par leur forme et par leur nombre d'étoiles, ces galaxies ressemblent aux galaxies spirales. Toutefois, elles sont beaucoup plus grandes et contiennent donc beaucoup moins d'étoiles par unité de volume. Dans une galaxie spirale ordinaire, les bras spiraux sont des pouponnières d'étoiles, peuplées de jeunes étoiles émettant une lumière plutôt bleue. En revanche, dans ces galaxies diffuses, les bras spiraux contiennent beaucoup plus de gaz et ont une structure moins enroulée. Apparemment, le gaz de ces galaxies à «faible brillance de surface» met plus longtemps à se transformer en étoiles : ces galaxies évoluent quatre à cinq fois plus lentement que les galaxies spirales classiques, et l'Univers n'est pas assez vieux pour que ces galaxies aient fini d'évoluer.

Notre travail de ces dix dernières années montre que ces galaxies seraient aussi nombreuses que l'ensemble de toutes les autres galaxies. Autrement dit, la moitié des galaxies de l'Univers avaient été oubliées.

L'abondance de ces galaxies, pour être extraordinaire, n'est cependant pas suffisante pour résoudre l'une des grandes énigmes de la cosmologie : celle de la masse manquante. Depuis longtemps, les astronomes savent que la masse de matière visible de l'Univers ne suffit pas à rendre compte du mouvement à grande échelle des galaxies dans les amas et dans les superamas. Aussi plus de 90 pour cent de la masse de l'Univers serait-elle de



1. CETTE GALAXIE À FAIBLE BRILLANCE DE SURFACE, Malin-1, est beaucoup plus grande qu'une galaxie spirale ordinaire telle la Voie lactée, que l'on a dessinée dans le coin supérieur à la même échelle.

A.T. Kamajian

la matière noire, c'est-à-dire non lumineuse et inobservable, sauf par ses effets gravitationnels.

Bien que les galaxies à faible brillance de surface ne soient pas assez nombreuses et massives pour constituer à elles seules la matière noire tant recherchée par les cosmologistes, elles pourraient résoudre une autre énigme, qui concerne la masse baryonique des galaxies. Les baryons sont les constituants de la matière ordinaire, principalement des protons et des neutrons. Leur fusion produit l'énergie des

étoiles et, donc, des galaxies. Cependant la quantité d'hélium de l'Univers, telle qu'on la déduit des observations spectroscopiques, indique qu'il devrait y avoir bien plus de baryons que l'on n'en voit dans les populations connues de galaxies. Les baryons manquants se trouvent-ils dans l'espace intergalactique ou dans une population de galaxies inconnues ou difficiles à détecter, telles les galaxies à faible brillance de surface? Une meilleure connaissance de ces dernières résoudrait peut-être ce problème, mais aussi changerait

nos idées sur la formation et l'évolution des galaxies.

Un astronome réhabilité

Le problème des galaxies diffuses, qui agite l'astronome moderne, n'est pourtant pas d'aujourd'hui : il est né il y a 20 ans, lorsque l'astronome Michael Disney, aujourd'hui à l'Université de Cardiff, constata que les catalogues de galaxies découvertes par les télescopes optiques ne recensaient que les galaxies faciles à détecter, c'est-à-dire



celles qui ressortaient bien sur le fond du ciel. Pourquoi ces galaxies brillantes auraient-elles été représentatives de la population générale ? À cette époque, cependant, les astronomes n'avaient détecté aucune galaxie très diffuse, de sorte que la communauté astronomique balaya ces soupçons, admettant que les objets extragalactiques diffus seraient très rares.

Dix ans plus tard, nous avons ressuscité l'hypothèse de M. Disney : en 1986, mes collègues et moi-même avons découvert de manière inattendue une très grande galaxie spirale à faible brillance de surface : c'est même la galaxie spirale la plus massive (et la plus lumineuse) de toutes les galaxies spirales connues. Cette galaxie se trouve à moins de 800 millions d'années-lumière (une année-lumière, la distance parcourue par la lumière en un an, est égale à $8,7 \times 10^{15}$ mètres), ce qui est proche à l'échelle extragalactique. Si elle était aussi proche de nous que la galaxie spirale d'Andromède, située à deux millions d'années-lumière, elle sous-tendrait, dans le ciel,

un angle de 20 degrés, soit 40 fois le diamètre angulaire de la pleine lune.

Pourquoi un objet si massif et si proche a-t-il échappé aux observations pendant aussi longtemps ? Nous l'avons vu précédemment, les galaxies spirales sont formées de deux éléments : un bulbe (ou noyau) central et un disque périphérique, structuré en bras spiraux. Les disques émettent généralement une lumière dont l'intensité décroît de manière exponentielle avec la distance au centre galactique.

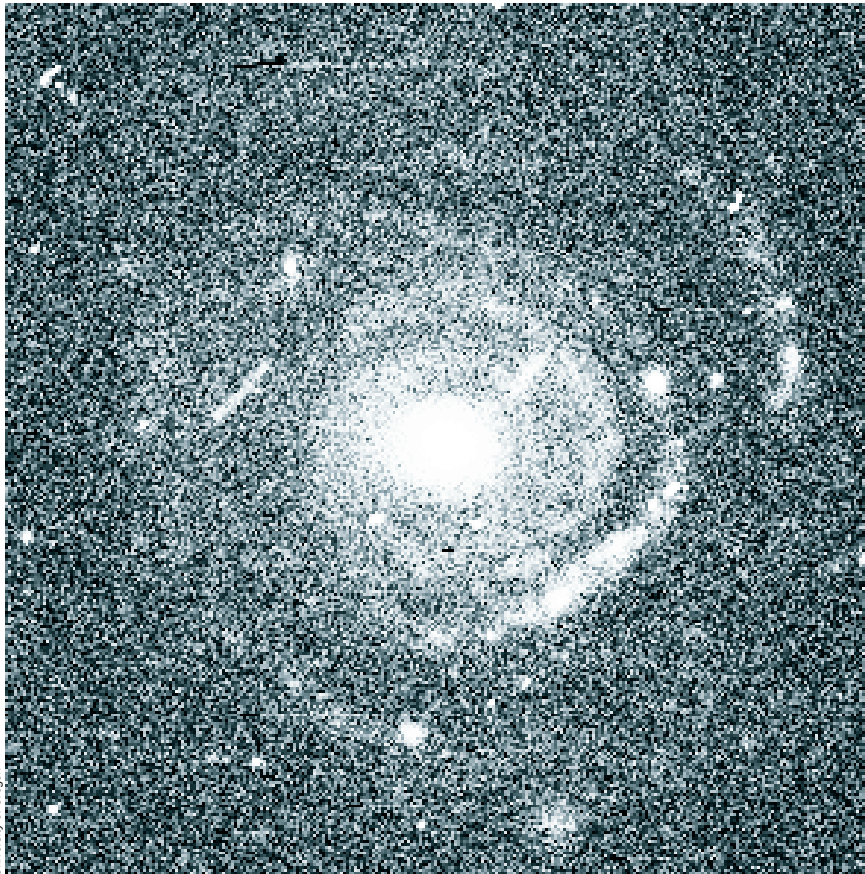
Cette particularité fournit aux astronomes un moyen commode pour mesurer la taille d'une galaxie : la longueur caractéristique d'une galaxie spirale (l'indicateur de taille utilisé par la majorité des astronomes) est la distance du centre galactique au point du disque où la luminosité a été divisée par e , (le nombre e , égal à 2,718..., est la base des logarithmes népériens). Notre Galaxie, la Voie lactée, dont le diamètre est de 100 000 années-lumière, a une longueur caractéristique d'environ 9 000 années-lumière.

L'autre paramètre qu'utilisent les astronomes pour caractériser les galaxies est la brillance de surface au centre, qui est la mesure de l'intensité de la composante bleue de la lumière au centre de la galaxie. Cette intensité révèle la densité stellaire (voir la figure 3). Le terme «de surface» renvoie au fait que les galaxies, qui sont tridimensionnelles, sont observées dans le plan du ciel ; aussi leur luminosité est-elle projetée sur cette «surface» à deux dimensions.

La brillance de surface au centre est exprimée en magnitudes apparentes par seconde d'angle carré. L'échelle des magnitudes attribue une valeur numérique à la luminosité d'un objet astronomique : plus cette valeur est élevée, moins l'objet est lumineux.

Cette échelle est également logarithmique : une différence de cinq magnitudes correspond à un rapport de luminosité d'un facteur 100. Une galaxie spirale typique a une brillance de surface au centre (dans la partie bleue de son spectre) d'environ 21,5 magnitudes par seconde d'angle carré. Les galaxies à faible brillance de surface sont celles dont la brillance de surface au centre est d'au moins 23 magnitudes par seconde d'angle carré : c'est environ la luminosité du fond du ciel, mesurée dans la partie bleue du spectre visible, par une nuit sans lune, dans un bon site d'observation astronomique.

Par un calcul simple, les deux paramètres précédents (la longueur caractéristique et la brillance de surface au centre) conduisent à la masse et à la luminosité d'une galaxie. Les catalogues de galaxies standards classent habituellement les galaxies selon leur taille ou leur luminosité, déduits de la longueur caractéristique et de la brillance de surface au centre. Comme les caractéristiques des galaxies à faible brillance de surface sont en cours d'étude, l'intervalle de variation des paramètres caractéristiques n'est pas encore connu. Cet intervalle de variation dépend du mécanisme de formation des galaxies, lequel reste également mal connu. La découverte des galaxies diffuses prend ici toute son importance, car elle a notablement élargi l'intervalle de variation de ces paramètres. Lorsque cet intervalle sera définitivement établi, nous pourrons ajuster les théories de formation des galaxies, car ces théories doivent être compatibles avec les valeurs observées des longueurs caractéristiques et des brillances de surface au centre.



2. LA TECHNIQUE DE D. MALIN fait ressortir les galaxies à faible brillance de surface. Cette galaxie, nommée Malin-2, a été découverte en 1990 ; c'est la deuxième galaxie diffuse découverte. Elle est à 450 millions d'années-lumière de la Terre. Avec une longueur caractéristique de 50 000 années-lumière, elle est environ cinq fois plus grande que la Voie lactée.



3. LA BRILLANCE DE SURFACE d'une galaxie spirale décroît de manière exponentielle avec la distance au centre de la galaxie. Au-delà du bulbe central, toutefois, la décroissance de la luminosité devient

quasi linéaire. Le prolongement de la région linéaire vers la gauche coupe l'axe vertical en une valeur nommée brillance de surface au centre, un indicateur de la densité d'étoiles.

Premières lueurs

C'est en 1983 que les astronomes ont pressenti que certaines galaxies ont une brillance de surface au centre nettement inférieure à celle des galaxies classiques les moins lumineuses : William Romanishin, de l'Université d'Oklahoma, Stephen et Karen Strom, aujourd'hui à l'Université d'Amherst, examinèrent le *Catalogue général des galaxies d'Uppsala*. Dans l'échantillon compilé par ces astronomes, peu de galaxies avaient une brillance de surface au centre supérieure à 23 magnitudes, mais l'analyse révéla une classe de galaxies contenant de grandes quantités de gaz et ayant d'autres propriétés inhabituelles.

Au vu de leurs résultats, je soupçonnai que la vision classique sur la répartition des galaxies dans l'Univers était biaisée. Cette répartition est une carte tridimensionnelle de l'Univers connu, indiquant la position des galaxies les unes par rapport aux autres, ainsi que leur type. Les positions relatives sont déduites de la mesure du décalage vers le rouge de la luminosité optique des galaxies (le décalage vers le rouge d'une émission est la diminution de la fréquence de cette émission due à l'effet Doppler, qu'on observe pour des corps s'éloignant rapidement les uns des autres). Les galaxies à faible brillance de surface sont toutefois trop faibles pour que l'on mesure leur décalage vers le rouge par spectroscopie optique.

Puis, au début de l'année 1984, l'astronome Allan Sandage, de l'Institut Carnegie à Washington, publia les premiers résultats de sa cartographie photographique des galaxies dans l'amas de la Vierge, effectuée à l'observatoire

de Las Campanas, au Chili : quelques galaxies naines étaient diffuses.

Avec des collègues, nous entreprîmes alors de rechercher les galaxies à faible brillance de surface qui, pensions-nous, avaient échappé à A. Sandage. Comment trouver des galaxies si faibles qu'elles avaient échappé à tant d'astronomes ? Nous devions manifestement nous armer de patience et, surtout, utiliser une technique exceptionnelle. Les journaux scientifiques nous avaient appris que D. Malin avait mis au point une méthode d'amplification du contraste des photographies qui lui avait permis de trouver des halos et d'autres débris gravitationnels de faible brillance de surface autour des galaxies ordinaires. Cette technique pouvait-elle être utilisée pour la recherche de galaxies entières à faible brillance de surface ? D. Malin piqua notre curiosité en nous avouant que, chaque fois qu'il appliquait sa technique à une plaque photographique, il trouvait partout des «petits machins à peine visibles».

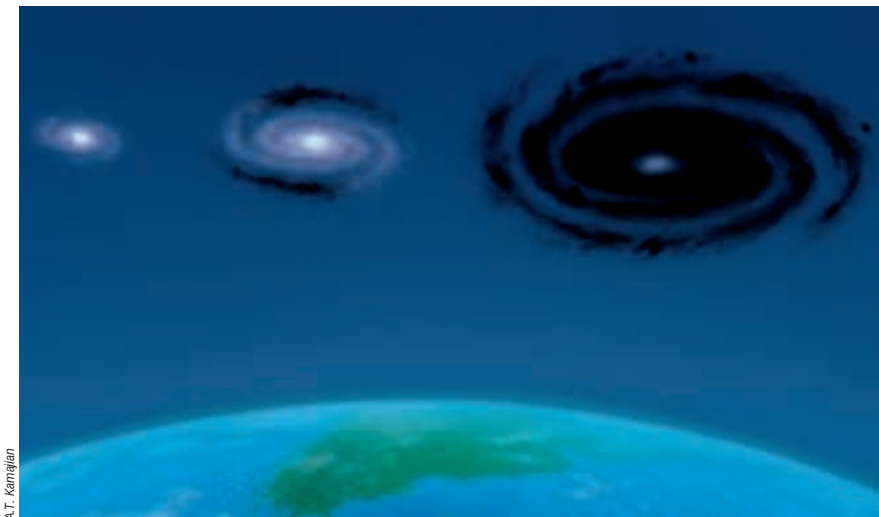
D. Malin augmente le contraste des images photographiques en empilant plusieurs plaques de verre d'une même image, puis en éclairant la pile par une face. L'image de la source lumineuse, apparaissant sur l'autre face de la pile, a un contraste supérieur à celui d'une image isolée. Plus on empile d'images, plus le contraste résultant est élevé. La technique (de «malinisation») nécessite un alignement précis des images ; c'est dans cet alignement que D. Malin avait fait de grands progrès.

D. Malin accepta d'analyser des images de quelques régions sélectionnées de un degré carré, dans l'amas de la Vierge. Utilisant à la fois le *Catalogue général d'Uppsala*, le relevé de

A. Sandage et le traitement des données par D. Malin, nous avions établi une liste d'objets à faible brillance de surface dont nous voulions approfondir l'analyse. Notre entreprise suivait son cours, lorsque nous fîmes le genre de découverte qui transforme un projet scientifique normal en une aventure exceptionnelle.

En février 1986, nous entrions dans la seconde phase du projet, qui nécessitait l'utilisation du télescope de 2,54 mètres de Las Campanas pour prendre des images numériques des régions de l'amas de la Vierge, étudiées par D. Malin. Notamment, nous voulions photographier des objets que nous avions identifiés lors de la première phase et pour lesquels nous voulions approfondir l'analyse. La plupart de ces galaxies étaient des taches diffuses, avec peu de structure apparente, mais l'une d'entre elles semblait avoir comme une structure en spirale très peu visible, reliée à une région centrale ponctuelle. Sur une photographie précédente, cette région apparaissait comme une étoile faiblement lumineuse, sans nébuleuse associée.

Bien que très faible, le centre de cet objet était juste assez lumineux pour que nous l'analysions par spectroscopie optique. En mai 1986, Jeremy Mould et moi enregistrâmes le spectre de l'objet à l'aide du télescope de cinq mètres de diamètre à l'Observatoire du mont Palomar, en Californie : nous fûmes surpris de découvrir que le spectre de l'objet présentait des raies d'émission (des pics d'énergie lumineuse) à des longueurs d'onde caractéristiques. Seuls des phénomènes bien connus au sein des galaxies, tels la formation d'étoiles et d'autres mécanismes où le gaz est ionisé, produisent des raies d'émission,



A.T. Kamajian

4. CES TROIS GALAXIES SPIRALES montrent pourquoi les galaxies à faible brillance de surface sont si longtemps restées invisibles. Toutes les galaxies ordinaires (à gauche) sont plus lumineuses que le fond du ciel nocturne. Dans la galaxie du milieu, le bulbe central et une partie des bras spiraux sont plus brillants que le fond du ciel. Toutefois, presque toutes les galaxies à faible brillance de surface (à droite) sont aussi sombres que le ciel nocturne. Des astronomes utilisant des techniques optiques ne peuvent voir cette galaxie ; au mieux, ils confondraient son bulbe à peine visible avec une étoile faiblement lumineuse.

et nous n'avions jamais rencontré aucun de ces phénomènes dans les galaxies observées au mont Palomar.

Des calculs rapides, fondés sur l'analyse des décalages vers le rouge de ces raies d'émission, indiquèrent que cet objet était 25 fois plus éloigné que l'amas de la Vierge. Or sa largeur angulaire sur notre mosaïque de caméra était d'environ 2,5 minutes : si l'objet était une galaxie et s'il était bien 25 fois plus éloigné que l'amas de la Vierge, il devait avoir environ 20 fois la taille de la Voie lactée (pour des dimensions mesurées par les longueurs caractéristiques)! Ce résultat semblait si improbable que je pariais avec J. Mould une caisse de bière que nous étions en train de détecter le spectre d'une galaxie située loin derrière l'amas de la Vierge et qui apparaissait à travers une galaxie naine beaucoup plus proche, située au sein de l'amas.

Déterminé à gagner mon pari, je me rendis, en octobre 1986, à l'Observatoire radioastronomique d'Arecibo : je voulais régler la fréquence centrale d'observation sur le décalage vers le rouge moyen de l'amas de la Vierge. Les galaxies contiennent beaucoup de gaz, tel l'hydrogène, qui émettent des ondes radiométriques décalées vers le rouge de la même façon que la lumière. Si mon hypothèse d'une galaxie naine, à l'avant-plan, dans l'amas de la Vierge, était juste, alors, en réglant les appareils sur la fréquence

des émissions gazeuses décalées provenant de la Vierge, j'aurais détecté des signaux de l'hypothétique galaxie naine. Toutefois je ne trouvais aucun signal de ce type.

Je me retrouvais brièvement dans l'impasse avant d'avoir la meilleure idée de ma carrière. À l'Observatoire du mont Palomar, les signaux que nous avions reçus en provenance de cette galaxie située dans la direction de l'amas de la Vierge étaient décalés de 8,3 pour cent vers le rouge. Bien qu'Arecibo soit un radiotélescope et non un télescope optique, ce décalage devait s'appliquer à toute émission issue de l'objet, quelle que soit sa fréquence. Aussi, deux jours avant que ma campagne à Arecibo ne s'achève, je réglai la fréquence d'observation sur 21,1 centimètres, c'est-à-dire la longueur d'onde des émissions radio de l'hydrogène atomique, décalée vers le rouge de 8,3 pour cent. Dix minutes plus tard, j'étais récompensé par un superbe signal.

La plus grande galaxie connue

L'hydrogène atomique, qui représente environ dix pour cent de la masse de nombreuses galaxies, se concentre dans les bras des galaxies spirales. Aussi utilise-t-on souvent ses émissions pour déterminer si un objet très lointain est, ou non, une galaxie. La signature du signal à 21,1 centimètres reçu à Arecibo était exactement celle d'un disque

galactique en rotation. Je perdis ainsi mon pari en découvrant Malin-1, une galaxie spirale immense, extraordinairement diffuse. Malin-1 possède une brillance de surface au centre de 26,5 magnitudes par seconde d'angle carré, soit seulement un pour cent de la luminosité d'une galaxie ordinaire.

Nous commençâmes alors trois nouvelles études, afin de savoir si l'Univers renfermait d'autres galaxies du même type. Tout d'abord, nous analysâmes des plaques photographiques résultant du projet de cartographie étendue de l'Observatoire du mont Palomar.

Puis nous appliquâmes la technique de malinisation à l'amas du Fourneau : nous avons alors détecté des galaxies dont l'intensité lumineuse de surface au centre descendait à 27 magnitudes par seconde d'angle carré, soit à peine deux pour cent plus brillantes que le fond du ciel nocturne. Enfin, avec Michael Irwin, de l'Observatoire royal de Greenwich, nous avons appliqué des techniques de balayage automatique des plaques photographiques.

Au total, nous avons ainsi détecté un millier d'objets que nous pensons être des galaxies à faible brillance de surface. L'échantillon est assez varié, avec à la fois des galaxies naines, pauvres en gaz, et environ une dizaine d'objets très grands et riches en gaz comme Malin-1 (dix ans après sa découverte, Malin-1 demeure la plus grande galaxie connue). La plupart de ces galaxies ont les mêmes tailles, vitesses de rotation et masses que les galaxies spirales ordinaires, mais quelques-unes sont gigantesques, avec des longueurs caractéristiques supérieures à 50 000 années-lumière.

Dans les amas de galaxies et, peut-être, dans l'Univers en général, les galaxies à faible brillance de surface semblent être bien plus nombreuses que les galaxies ordinaires. En outre, si le quotient de la masse par la luminosité augmente lorsque la brillance de surface diminue (c'est-à-dire que moins les galaxies sont visibles, plus elles sont massives), alors ces galaxies diffuses abritent une grande partie, voire l'essentiel de la masse baryonique de l'Univers.

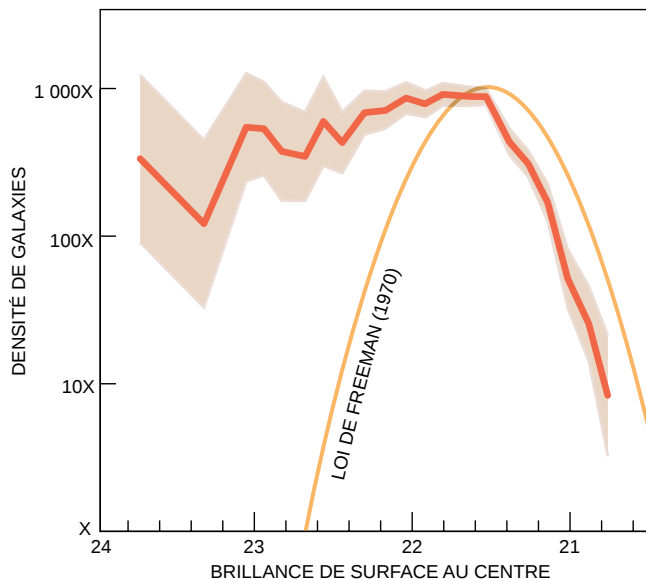
La conséquence la plus marquante de ces recherches provient d'une analyse récente effectuée par Stacy McGaugh, de l'Institut Carnegie, à Washington. S. McGaugh a examiné la densité spatiale des galaxies en fonc-

tion de leur brillance de surface au centre, et elle a observé que la courbe tracée différait complètement de la courbe prévue (voir la figure 5) : au total, l'Univers semble contenir autant de galaxies très diffuses ayant une brillance de surface au centre de 27 magnitudes par seconde d'angle carré que de galaxies ordinaires de 23, 21 ou 20 magnitudes. Autrement dit, plus de la moitié de toutes les galaxies sont des galaxies spirales de brillance de surface au centre égale ou supérieure à 22 magnitudes par seconde d'angle carré.

De surcroît, les galaxies à faible brillance de surface ressemblent beaucoup aux galaxies bleues faiblement lumineuses détectées dans les cartographies de l'Univers lointain. Ces deux classes de galaxies partagent des attributs comme la couleur, la brillance de surface moyenne et l'étendue de la nébulosité. Ainsi, ces galaxies bleues faiblement lumineuses pourraient être des galaxies à faible brillance de surface en phase initiale de formation d'étoiles. Aux courtes distances, c'est-à-dire dans les parties de l'Univers où les objets sont vus tels qu'ils étaient dans un passé plus récent, les galaxies bleues ont une brillance de surface si faible que l'on ne peut plus les détecter. Si les galaxies bleues faiblement lumineuses sont vraiment des galaxies à faible brillance de surface jeunes, alors la densité des galaxies à faible brillance de surface doit être encore supérieure à ce que l'on pense aujourd'hui.

Des études sur la couleur des galaxies à faible brillance de surface, qui sont généralement assez bleues, corroborent cette hypothèse, dont on a besoin pour interpréter la composante bleue de ces galaxies, signe de formation d'étoiles. Généralement la teinte bleue indique une galaxie qui n'a pas évolué au-delà d'une phase de formation précoce, un fait en accord avec les faibles densités de ces structures ; aussi la plupart des galaxies à faible brillance de surface se seraient-elles formées assez tardivement, tout comme leurs premières étoiles.

Plusieurs autres particularités des galaxies diffuses doivent nous faire révi-



5. LES GALAXIES DIFFUSES (23 ou 24 magnitudes apparentes par seconde d'angle carré) sont probablement aussi nombreuses que les galaxies ordinaires, pour lesquelles cette magnitude est de 21,5 ou 22. Sur ce diagramme, la zone grisée indique le domaine d'incertitude des données numériques. La courbe orange montre la distribution supposée des galaxies avant la découverte des galaxies à faible brillance de surface, au milieu des années 1980.

ser les théories de l'évolution des galaxies. Par exemple, la quantité d'hydrogène neutre dans les galaxies à faible brillance de surface est du même ordre de grandeur que dans les galaxies spirales ordinaires, encore que les galaxies à faible brillance de surface aient des densités inférieures de ce gaz. Autrement dit, les étoiles ne se formeraient que si la densité gazeuse atteignait une valeur seuil à la surface des disques de gaz en rotation. En outre, les galaxies spirales à faible brillance de surface sont pauvres en gaz moléculaire.

L'ensemble de toutes ces observations indique que la densité d'hydrogène neutre à la surface des galaxies diffuses est insuffisante pour transformer ce gaz en nuages moléculaires géants qui, dans les galaxies ordinaires, se fragmentent ensuite pour former des étoiles massives. Les galaxies spirales à faible brillance de surface semblent évoluer de façon différente, avec de petites étoiles qui ne se formeraient qu'au sein de nuages d'hydrogène neutre de plus faible densité. Contenant peu d'étoiles massives, ces galaxies synthétiseraient lentement les éléments lourds (au numéro atomique supérieur à 12). Ordinairement, les galaxies massives contiennent beaucoup d'éléments lourds ; si, malgré leur masse, les galaxies à faible brillance de surface sont si pauvres en éléments lourds, c'est qu'elles sont parmi les objets les moins évolués de l'Univers : elles ont peu

changé depuis des milliards d'années.

En une décennie, l'exploration de cette nouvelle population de galaxies a bouleversé nos connaissances de l'évolution des galaxies et de la répartition de la matière dans l'Univers. Au cours des prochaines années, nous rechercherons ces galaxies de manière plus systématique, par des cartographies de larges régions du ciel là où il est le plus sombre. Lors de ces prochaines campagnes, nous utiliserons des techniques qui détecteront des galaxies dont la brillance de surface au centre atteint 27 magnitudes par seconde d'angle carré. Les données révéleront si la densité des galaxies dans l'espace, en fonction de leur brillance de surface au centre, continue

de rester plate lorsque cette intensité varie d'un facteur 100.

L'étendue finale des découvertes potentielles et de leurs implications pour notre compréhension de l'évolution galactique et de la structure de l'Univers est encore... diffuse. Toutefois, il est réconfortant de constater que de grandes découvertes astronomiques sont encore possibles : l'Univers n'a pas dévoilé tous ses secrets.

Gregory BOTHUN est professeur de physique à l'Université de l'Oregon.

Stacy S. McGAUGH et Gregory D. BOTHUN, *Structural Characteristics and Stellar Composition of Low Surface Brightness Disk Galaxies*, in *Astronomical Journal*, vol. 107, n° 2, pp. 530-542, février 1994.

Stacy McGAUGH, Gregory D. BOTHUN et James M. SCHOMBERT, *The Morphology of Low Surface Brightness Disk Galaxies*, in *Astronomical Journal*, vol. 109, n° 5, pp. 2019-2033, mai 1995.

Stacy McGAUGH et al., *Galaxy Selection and the Surface Brightness Distribution*, in *Astronomical Journal*, vol. 110, n° 2, pp. 573-580, août 1995.

Chris IMPEY, *Ghost Galaxies of the Cosmos*, in *Astronomy*, vol. 24, n° 6, pp. 40-45, juin 1996.

Des informations et des images sur ce sujet peuvent être trouvées sur notre site Web :

<http://www.pourla science.com>

L'introduction de l'alphabet latin au Japon

FLORIAN COULMAS

Les Japonais s'étonnèrent de l'écriture alphabétique des premiers Européens admis dans leur pays, au XVII^e siècle. Aujourd'hui encore, l'alphabet européen leur semble une modernité exotique.

On ignore quand exactement les Japonais apprirent pour la première fois l'existence d'une écriture alphabétique. Leurs relations commerciales avec la Chine ou la Corée, dès le I^{er} siècle avant J.-C., ou avec l'Indonésie et la Malaisie, vers le XIV^e siècle, leur ont certainement révélé assez tôt l'existence de l'alphabet latin des pays d'Europe, mais les premiers ouvrages d'écriture alphabétique ne semblent être entrés au Japon qu'au XVI^e siècle.

L'adaptation du système d'écriture chinois à la langue japonaise avait alors engendré un système complexe, avec deux ensembles de caractères, nommés kanji et kana. Les kanji sont les caractères chinois, qui correspondent chacun à un mot monosyllabique chinois. Les caractères kana, qui résultent de diverses simplifications des caractères kanji, ne possèdent pas de signification propre, mais représentent chacun un son monosyllabique. Il en existe deux variantes usuelles, nommées hiragana et katakana.

Les caractères kanji sont utilisés aujourd'hui comme ils l'étaient au XVI^e siècle, pour désigner la signification des mots, tandis que les signes hiragana sont employés pour représenter les éléments grammaticaux (désinences, conjugaisons...). Les caractères katakana servent, enfin, à transcrire les termes étrangers. Tandis que la prononciation d'un caractère kanji n'est pas toujours univoque, les caractères kana sont simples et précis, ce qui justifie parfois leur utilisation pour faciliter la lecture.

Au XVI^e siècle, les missionnaires jésuites qui arrivèrent au Japon, en pro-

venance des Indes néerlandaises et de Macao, apportèrent avec eux des livres écrits avec des caractères alphabétiques ; ils furent rapidement suivis par des commerçants (voir la figure 1). Ils furent les premiers à écrire, pour leur propre usage, le japonais avec des caractères de l'alphabet européen. L'un d'entre eux, Francisco Javier (1506-1552) apprit correctement le japonais et l'écrivit selon les règles orthographiques du portugais de l'époque.

Puis, en 1592, un autre jésuite, Alessandro Valignano (1539-1606), fut le premier à rédiger un livre japonais en caractères latins : il s'agissait d'une hagiographie intitulée *Sanctos no gosagveo no vchi nvqigaqi*, c'est-à-dire «Extraits des livres des saints» (le titre s'écrirait de nos jours *Sanctos no gosagyo no uchi nukigaki*). Cet ouvrage montre comment les Portugais appliquaient les conventions d'écriture de leur langue à d'autres langues, ce qui provoquait diverses incohérences ; il fut aussi la première occasion de constater que l'alphabet latin ne s'appliquait pas simplement à la langue japonaise.

Les jésuites ne savaient pas regrouper les syllabes en mots. Ils écrivaient tantôt *to xite xixi tamayeba*, tantôt *toxite xixitamayeba* (voir la figure 2, à gauche) : en effet, les textes japonais étaient écrits sans séparation entre les mots (ils le sont encore aujourd'hui). Pour effectuer la segmentation, les jésuites se fondèrent sur des fonctions spécifiques des systèmes kanji et kana, bien que ces fonctions ne soient pas toujours invariables dans les divers styles d'écriture.

Valignano, qui pensait que son travail était d'une immense importance culturelle, croyait que les Japonais l'accueilleraient avec enthousiasme, mais il fut amèrement déçu : pour mieux lire ses textes, les Japonais les convertirent dans leur écriture (voir la figure 2, à droite).

En effet, l'écriture proposée par les Portugais était illogique, car, souvent, elle utilisait plusieurs signes pour traduire un seul mot japonais, plusieurs lettres pour écrire une seule syllabe (voir la figure 3). En outre, les mêmes syllabes n'étaient pas toujours écrites avec les mêmes lettres : les lettres *e* et *ye*, par exemple, représentaient le même signe. De surcroît, les syllabes commençant par certains sons qui appartiennent à des séries, en japonais (tel [k]), étaient transcrites alphabétiquement par des syllabes qui ne commençaient pas toutes par la même lettre (par exemple, *ca*, *qe*, *qi*, *co*, *cu* et *qu*).

L'instabilité de l'alphabet

Ainsi les Portugais écrivaient *atayeta-maite* le mot «prêter», que l'on transcrit aujourd'hui *ataetamaite*. La lettre *y* indique une palatalisation douce : une réminiscence d'un *y* pour favoriser le passage du *a* au *e*, sans pour autant constituer un phonème. De tels exemples indiquent que les Portugais ne comprenaient pas bien le principe de leur propre écriture et ne savaient pas analyser phonétiquement le japonais, une condition qui semble aujourd'hui indispensable à la transcription alphabétique des langues.