

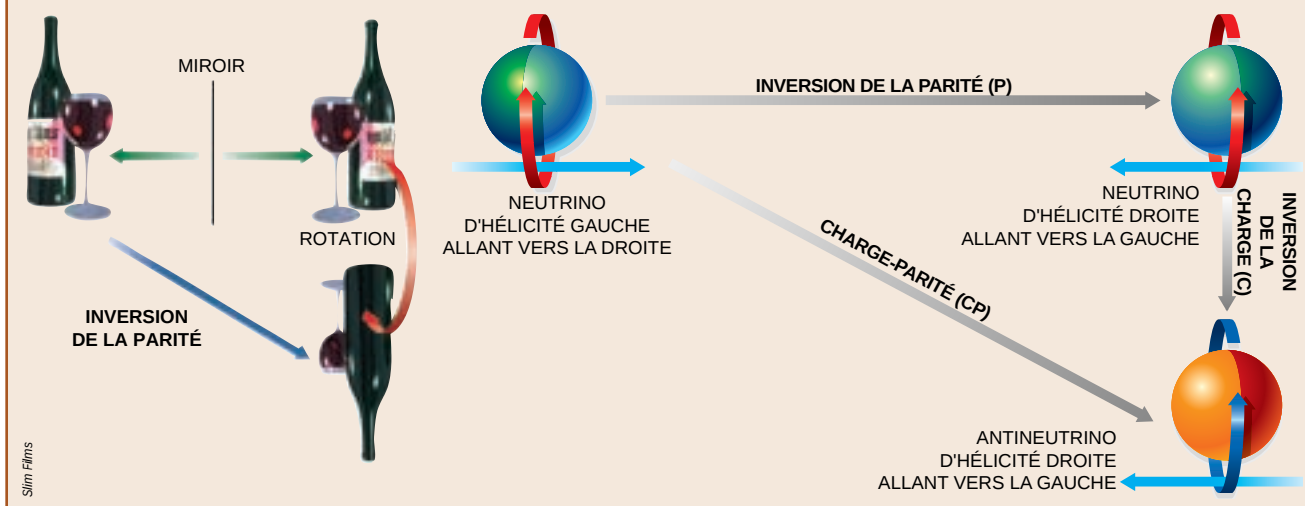
La conjugaison de charge et l'inversion de parité

L'étude des symétries est importante en physique. La conjugaison de charge (C) est l'opération qui inverse les signes des nombres quantiques, telle la charge électrique, et transforme ainsi une particule en son antiparticule. L'inversion de parité (P) correspond à une réflexion dans un miroir, puis à une rotation de 180 degrés autour d'un axe perpendiculaire au miroir. Cette opération inverse le sens de tous les vecteurs associés à un objet.

Les lois de la mécanique classique et de l'électromagnétisme

restent inchangées après chacune de ces deux opérations. Selon le Modèle standard de la physique quantique, l'interaction forte est également invariante. En revanche, l'interaction faible est modifiée par la conjugaison de charge ou par l'inversion de parité.

En 1964, des expériences ont montré que, contrairement à ce qui était admis, la combinaison des inversions de charge et de parité (symétrie CP) était violée. Les physiciens ont alors cherché pourquoi la nature est différente après une telle combinaison de symétries.



d'électrons ou de positrons à des énergies différentes, produirait un nombre élevé de collisions. Une telle machine, où le nombre de collisions serait élevé, a depuis reçu le nom d'usine asymétrique à mésons B.

En 1993, le ministère américain de l'Énergie et l'agence japonaise *Monbusho* ont approuvé deux projets de machines qui fabriqueraient environ 30 millions de paires de mésons B par an. Le projet américain, à Stanford, utilise le tunnel rectiligne qui existe déjà pour accélérer les électrons et les positons. Ces deux types de particules circuleront ensuite dans deux nouveaux anneaux, puis se heurteront en un point de croisement. La construction de cet accélérateur coûtera environ un milliard de francs. Le projet japonais, à Tsukuba, repose aussi sur l'emploi de tunnels existants : ceux qui abritaient autrefois le collisionneur *Tristan*.

Physiciens et ingénieurs mettent au point les détecteurs qui identifieront les rares désintégrations des mésons B liés à la symétrie CP. Ils utiliseront un détecteur au silicium du même type que ceux qui ont été utilisés pour la découverte du quark *top* (voir *La découverte du quark top*, par Tony Liss et Paul Tipton, *Pour la Science*, octobre 1997), qui permettra de mesurer la position

des particules avec une précision de 80 micromètres.

Le détecteur le plus interne de l'expérience américaine, nommé BABAR, sera placé au point de croisement des faisceaux d'électrons et de positons. Sa paroi interne, composée de silicium, formera un cylindre d'environ 30 centimètres de diamètre et de 60 centimètres de long. Les couches externes mesureront l'énergie, la vitesse et le pouvoir de pénétration de chaque particule créée. On reconstituera les événements originels à partir de ces mesures. Plus de 500 participants (dont nous-mêmes), provenant de 70 institutions de neuf nationalités différentes, construisent aujourd'hui ce détecteur et se partagent son coût de construction : 450 millions de francs (le réseau *World Wide Web*, utilisé par *Internet*, fut inventé au CERN pour faciliter les collaborations internationales de ce type).

L'expérience japonaise, nommée BELLE, est également une collaboration internationale. Ces deux usines à mésons B livreront probablement leurs premiers résultats dans les semaines à venir.

Les désintégrations de mésons B montreront sans doute d'autres types de violation CP, que le collisionneur et le détecteur de Cornell étudieront, une fois achevés les travaux en cours. Plusieurs expériences sur la physique des mésons B sont également menées dans divers accélérateurs de protons aux quatre coins du Globe ; ils fourniront des indices complémentaires sur la violation de la symétrie CP.

Ces usines à mésons B confirmeront-elles la validité du Modèle standard et aideront-elles à en déterminer les paramètres restants ? Ou bien réfuteront-elles ses prévisions ? Comprendrons-nous enfin pourquoi notre Univers est composé d'une majorité de matière ?

Helen QUINN travaille à l'Accélérateur linéaire de Stanford. Michael WITHELL est professeur à l'Université de Santa Barbara.

Richard FEYNMAN, *The Character*, MIT Press, 1965.

A. ZEE, *Fearful Symmetry : The Search*

for Beauty in Modern Physics, Macmillan Publishing, 1986.

Robert G. SACHS, *The Physics of Time Reversal*, University of Chicago Press, 1987.

Martin GARDNER, *The New Ambidextrous Universe : Symmetry and Asymmetry from Mirror Reflections to Superstrings*, W.H. Freeman and Company, 1990.

Derrière la Voie lactée

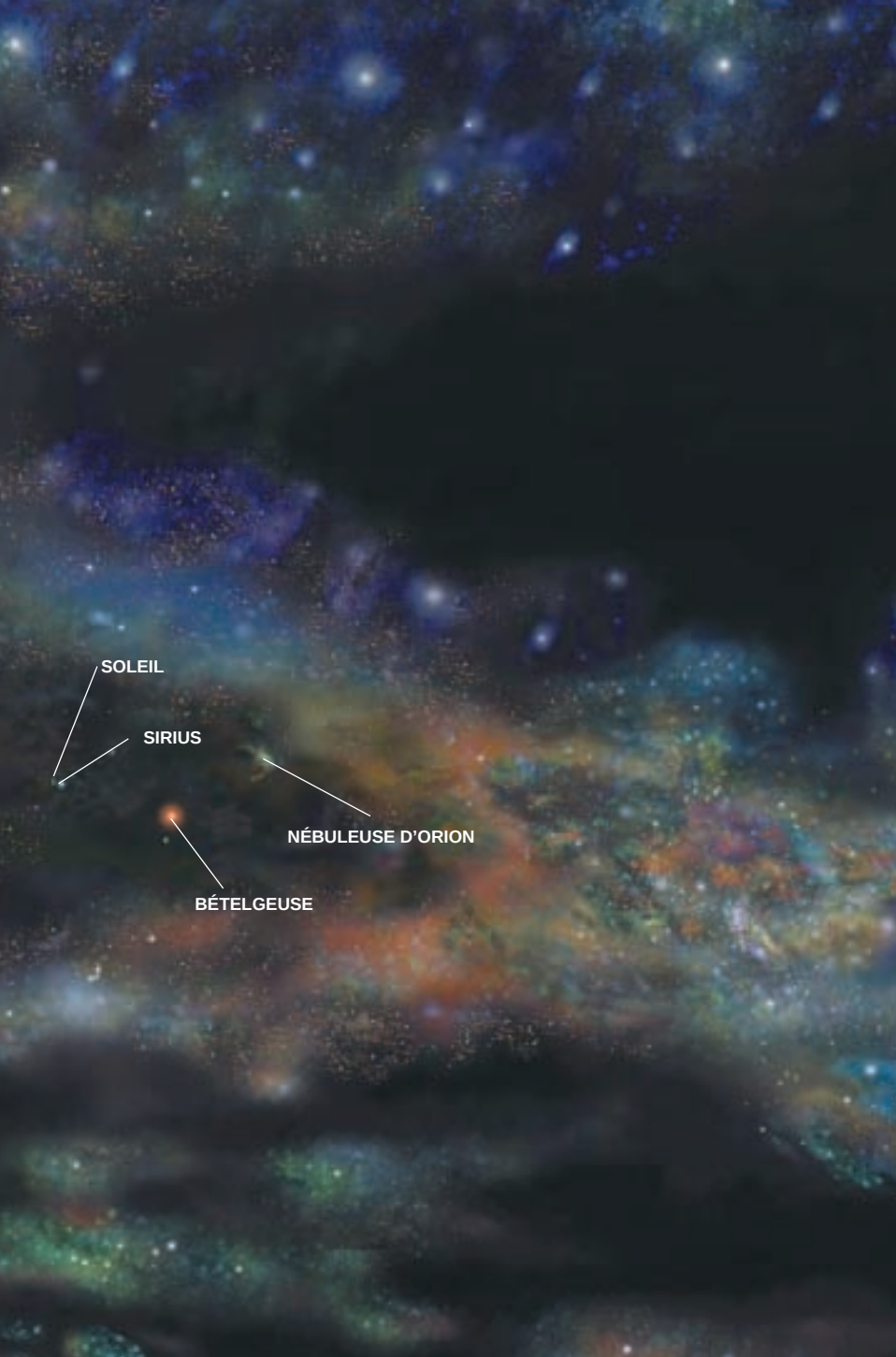
RENÉE KRAAN-KORTEWEG • OFER LAHAV

Près d'un cinquième de l'Univers échappe à l'observation, dissimulé par les étoiles et par les poussières de la Voie lactée. Depuis quelques années, les astronomes voient à travers cette matière.

1. LE DISQUE DE LA VOIE LACTÉE, sorte de crêpe cosmique contenant des étoiles, des poussières et du gaz, a une masse 100 milliards de fois supérieure à celle du Soleil. Ce disque nous cache un cinquième de l'Univers. Parmi les objets dissimulés, la galaxie sphéroïdale naine du Sagittaire, représentée ici vue de dessous (*figure principale*) et vue du dessus (*cartouche supérieur*) du plan de la Voie lactée (le dessus et le dessous étant respectivement l'hémisphère Nord galactique et l'hémisphère Sud galactique). Du Système solaire, la direction de la galaxie naine est presque totalement bloquée par le bulbe d'étoiles qui entoure le centre de notre Galaxie. Bien que la galaxie naine du Sagittaire soit la galaxie la plus proche de nous, elle n'a été découverte qu'il y a quatre ans. Une autre galaxie cachée, Dwingeloo 1, est représentée dans le cartouche.

BULBE GALACTIQUE

GALAXIE NAINES DU SAGITTAIRE



La nuit, à la campagne, une large bande lumineuse traverse le ciel : elle provient des centaines de milliards d'étoiles de notre Galaxie, la Voie lactée, ainsi que des grains de poussières interstellaires qui diffusent leur lumière. Nous sommes à environ 28 000 années-lumière du centre de la Galaxie, au milieu d'un de ses bras spiraux. Bien que superbe, la Voie lactée gêne les astronomes qui étudient l'Univers extragalactique : elle bloque la lumière en provenance de 20 pour cent du cosmos, une portion du ciel pourtant particulièrement intéressante.

En effet, quelque part derrière le disque se trouvent des parties importantes des deux plus grandes structures de l'espace proche : le superamas de galaxies des constellations de Persée et des Poissons, et le «Grand Attracteur», une gigantesque concentration de matière dont l'existence a été déduite des mouvements de milliers de galaxies à travers l'espace. Les observations révèlent également un nombre alléchant de galaxies brillantes et proches, dans la direction du disque ; beaucoup d'autres passent vraisemblablement inaperçues. Sans la connaissance de cet angle mort, l'inventaire de notre région de l'Univers ne peut être exhaustif et plusieurs questions fondamentales de la cosmologie demeurent ouvertes : quelles sont les dimensions des structures cosmiques, comment se sont-elles formées et quelle est la densité totale de matière dans l'Univers ?

Depuis quelques années, les astronomes disposent de techniques pour percer ce voile de lumière et de poussières, et pour reconstituer l'Univers caché à partir de ses effets sur les



parties visibles. Bien que l'étude soit fastidieuse, certaines découvertes spectaculaires ont déjà récompensé leurs efforts. Entre autres, les astronomes ont découvert une nouvelle galaxie, si proche que, si sa lumière n'était pas obscurcie par le disque, elle dominerait notre ciel. Ils ont découvert des amas de galaxies colossaux, et ils ont réussi à observer le cœur de l'insaisissable Grand Attracteur.

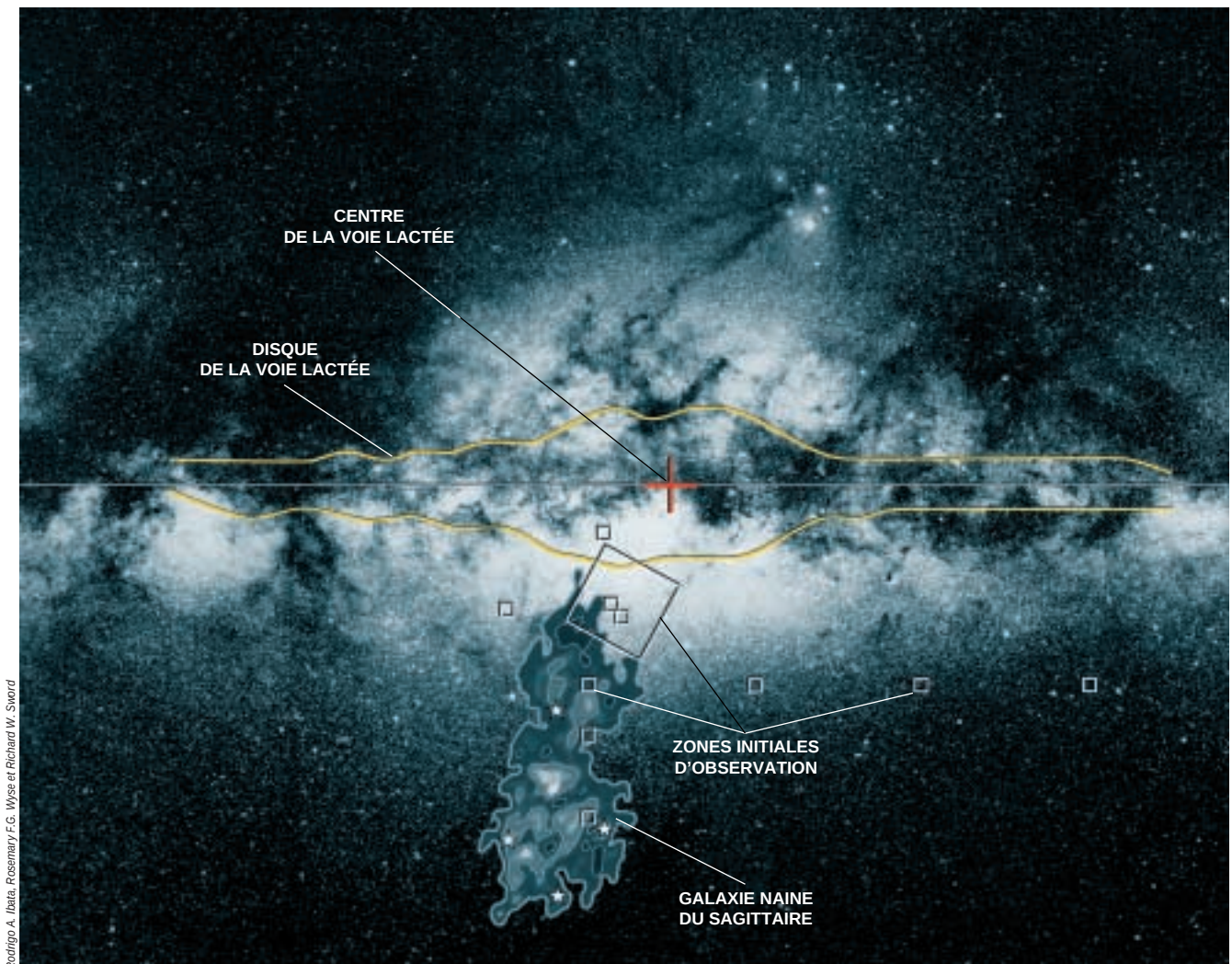
Dans les années 1920, les astronomes commencèrent à distinguer les galaxies extérieures à la Voie lactée (les nébuleuses de notre Galaxie (les nébuleuses sont des rassemblements de quelques milliers d'étoiles situées dans la Galaxie). Les galaxies étaient visibles dans toutes les régions du ciel, excepté dans la direction de la Voie lactée, qui fut ainsi nommée la zone d'exclusion (voir la figure 6). Aujourd'hui, les astronomes savent que les galaxies extérieures se composent de

milliards d'étoiles et d'innombrables nuages de gaz et de poussières. Dans la zone d'exclusion, la lumière des galaxies est invisible, noyée par la lumière des nombreuses étoiles de notre Galaxie ou absorbée par les poussières galactiques.

Les astronomes étudièrent d'abord peu la zone d'exclusion, se concentrant sur des régions non obscurcies du ciel. Puis, il y a 20 ans, une observation cruciale montra que l'astronomie ratait peut-être quelque chose. Des mesures du fond diffus cosmologique, un rayonnement issu d'un événement qui s'est déroulé peu après le Big Bang, révélaient une asymétrie dipolaire : ce rayonnement était environ 0,1 pour cent plus chaud que la moyenne dans une direction du ciel, et plus froid de la même proportion dans la direction opposée. Ces mesures, confirmées par le satellite *COBE* en 1989 et en 1990, indiquent que notre Galaxie et ses

voisines, le «Groupe local» de galaxies, se déplacent à une vitesse de 600 kilomètres par seconde dans la direction de la constellation de l'Hydre (le Groupe local de galaxies comporte une trentaine de galaxies, dont les principales sont la Voie lactée, Andromède et M33). Cette vitesse et sa direction sont obtenues après soustraction de tous les mouvements connus, tels la révolution du Soleil autour du centre galactique et le mouvement de notre Galaxie vers sa voisine, la galaxie spirale d'Andromède.

Pourquoi le Groupe local se déplace-t-il vers la constellation de l'Hydre? Les galaxies s'assemblent en groupes, réunis en amas qui, eux-mêmes, s'agglomèrent en superamas séparés par des régions dépourvues de galaxies. Si la matière est répartie irrégulièrement autour du Groupe local, elle peut exercer une attraction gravitationnelle dans une direction.



2. DES GALAXIES CACHÉES apparaissent quand on analyse soigneusement les clichés astronomiques. Dwingeloo 1, d'abord détectée par un radiotélescope néerlandais, en 1994, est une galaxie

spirale visible comme un fond peu brillant dans la constellation de Cassiopée (page suivante). En revanche, la galaxie sphéroïdale naine du Sagittaire ne peut être distinguée directement : ses étoiles sont

Des galaxies peuvent-elles s'attirer mutuellement sur les distances énormes qui les séparent? Très facilement, car les galaxies sont si massives qu'elles agissent à des distances considérables. En proportion, elles sont plus proches les unes des autres que ne le sont les étoiles de notre Galaxie.

Pour estimer théoriquement la vitesse du Groupe local due à l'attraction d'autres galaxies, les astronomes additionnent toutes les forces gravitationnelles des galaxies connues. La direction de la vitesse résultante est décalée de 20 degrés par rapport à la direction de l'asymétrie cosmologique observée, mais ces estimations demeurent imprécises, en partie parce qu'elles ne prennent pas en compte les galaxies situées derrière la zone d'exclusion.

Comment expliquer ce décalage entre la direction du dipôle cosmologique et celle de la vitesse estimée? En

postulant l'existence d'attracteurs. Un groupe d'astronomes a utilisé les mouvements de centaines de galaxies pour déduire l'existence du Grand Attracteur, situé à environ 200 millions d'années-lumière de notre Galaxie (voir *Un Grand Attracteur attire-t-il notre Galaxie?*, par Alan Dressler, *Pour la Science*, novembre 1987). Le Groupe local de galaxies semble être tiraillé entre ce Grand Attracteur et le superamas de Persée-Poissons, à l'opposé du ciel et à une distance semblable. Pour déterminer lequel de ces mastodontes galactiques l'emportera, les astronomes doivent comptabiliser la masse de toutes les parties cachées de ces structures.

Ces deux structures appartiennent à une longue chaîne de galaxies, nommée «Plan supergalactique». Dans l'Univers, la fréquence de formation d'une structure aussi colossale dépend de la nature de la matière sombre qui

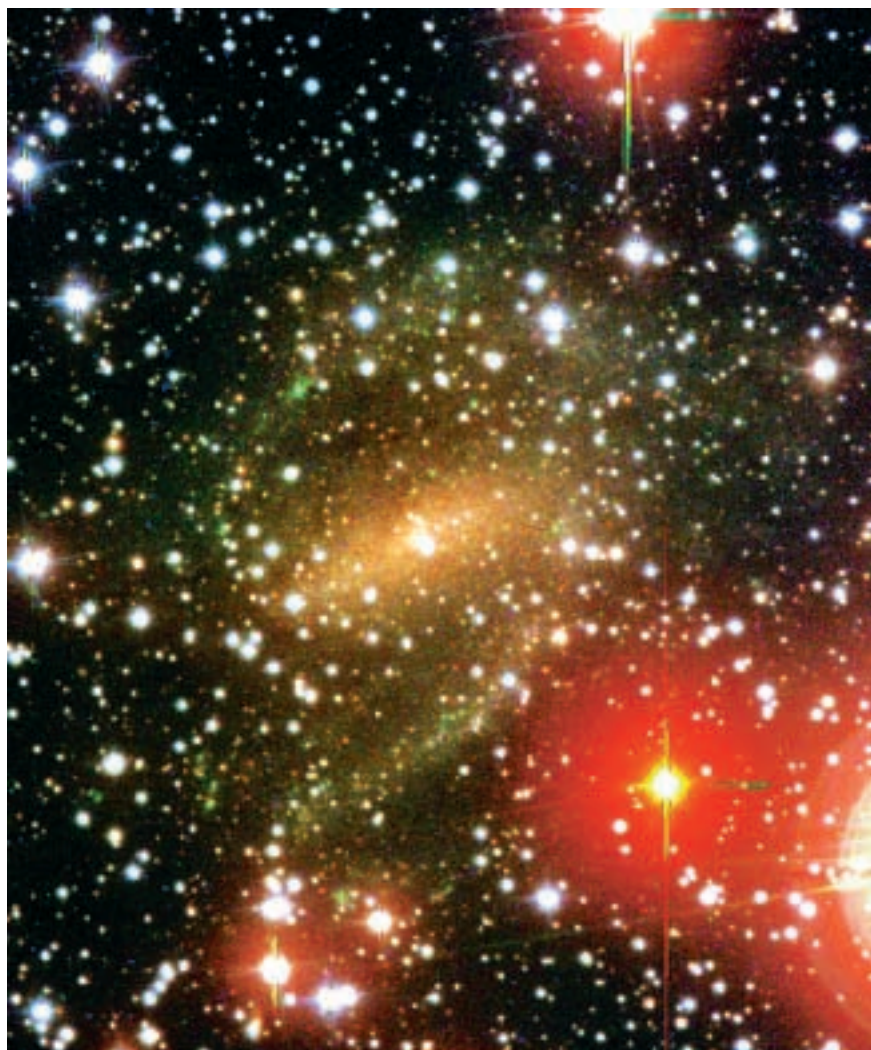
constitue l'essentiel de la masse de l'Univers. De telles chaînes de galaxies sont plus probables dans un Univers dominé par des particules de matière sombre chaude (comme des neutrinos massifs) que dans un Univers dont la matière sombre est froide (comme des axions ou d'autres particules hypothétiques). Toutefois, les astronomes ne peuvent distinguer entre ces deux hypothèses sans une cartographie complète de ces structures.

Les galaxies proches ne doivent pas être négligées dans le décompte : comme la gravité est plus intense à petite distance, une force notable est engendrée par les galaxies les plus proches, même si elles sont peu massives. Or, cinq des huit galaxies apparemment les plus brillantes se trouvent dans la zone d'exclusion : elles sont si proches et si lumineuses qu'elles brillent à travers notre Galaxie. Ces galaxies appartiennent aux groupes de galaxies Centaure A et IC342, proches voisins du Groupe local. En plus de ces groupes que les astronomes décèlent, probablement beaucoup d'autres, dont la lumière est entièrement bloquée, nous échappent.

Lever le voile

Notre position pourrait être pire : si nous habitons la galaxie d'Andromède à une position similaire à la nôtre (aux deux tiers du centre), la proportion obscurcie du ciel ne serait pas très différente, mais nous perdrons notre vision claire de l'amas de galaxies le plus proche, dans la constellation de la Vierge. Cependant, même les plus optimistes d'entre nous jugent que nous ne sommes pas si bien placés. Comme l'orbite du Soleil autour du centre galactique est inclinée par rapport au plan galactique, le Système solaire est tantôt au-dessus, tantôt au-dessous du plan galactique. Aujourd'hui, nous ne sommes qu'à 40 années-lumière au-dessus du plan. Si nous étions nés voici 15 millions d'années, nous nous trouverions à près de 300 années-lumière au-dessus du plan – au-delà de la couche d'extinction la plus épaisse – et nous distinguerions une bonne partie de la zone d'exclusion actuelle. Dans 35 millions d'années, le Système solaire aura traversé le disque galactique et se retrouvera de l'autre côté.

Comment connaître le ciel extragalactique situé derrière la zone



Dwingeloo Obscured Galaxy Survey Team, Shaun Hughes et Steve J. Maddox, Isaac Newton Telescope

mélangées à celles de la Voie lactée et doivent être identifiées une à une (page précédente). Dans l'image reconstruite de cette galaxie naine, la Voie lactée traverse le centre de l'image horizontalement.

d'exclusion? On peut d'abord étudier soigneusement les images en lumière visible, parce que la poussière ne masque pas toutes les galaxies de la zone : certaines se dévoilent, mais elles paraissent d'autant plus faibles et plus petites qu'elles sont proches du plan galactique. L'apparence curieuse de

ces galaxies et la grande densité des étoiles à l'avant-plan déroutent les programmes automatiques de détection de galaxies. Pour détecter ces objets étranges et faibles, rien ne vaut l'œil. Le recensement photographique de l'Observatoire du mont Palomar et sa contrepartie pour l'hémisphère

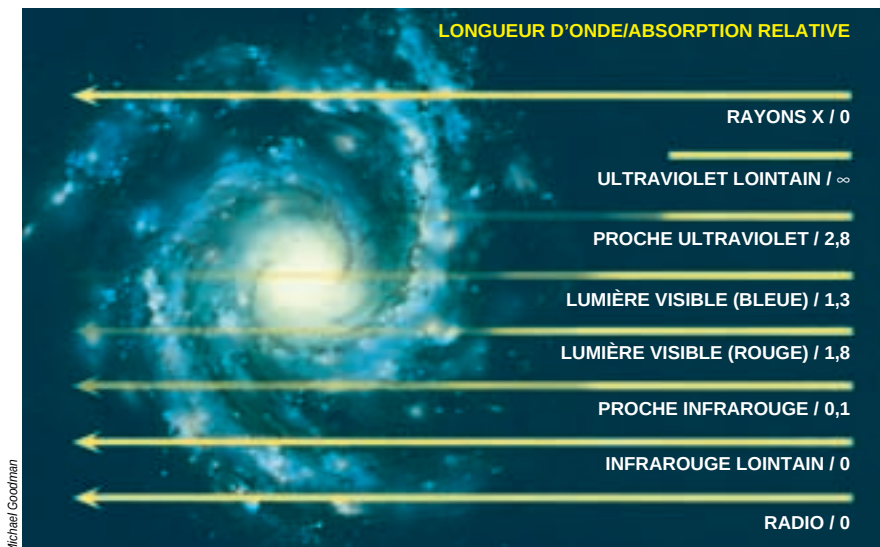
austral, effectués dans les années 1950, sont réétudiés avec soin depuis dix ans. Les astronomes ont couvert une fraction importante de la zone d'exclusion, identifiant 50 000 nouvelles galaxies.

Dans les régions où l'extinction de la lumière par les poussières est trop importante, les galaxies sont complètement obscurcies, et des méthodes spéciales de détection s'imposent. L'une d'elles consiste à observer des longueurs d'onde supérieures, car plus la longueur d'onde est grande, moins le rayonnement interagit avec les particules microscopiques de poussières. Le rayonnement de longueur d'onde égale à 21 centimètres, émis par l'hydrogène neutre, est idéal à cet égard : il est abondant dans les galaxies spirales riches en gaz, dans les galaxies intrinsèquement peu lumineuses et dans les galaxies naines – c'est-à-dire la plupart des galaxies, hormis les galaxies elliptiques pauvres en gaz.

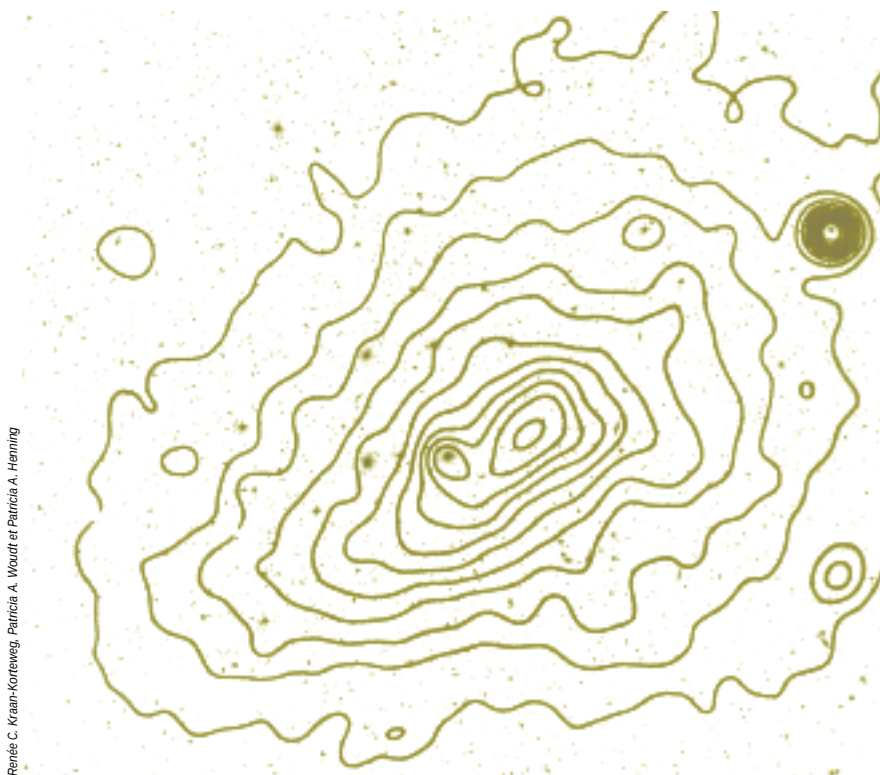
En 1987, Patricia Henning, de l'Université du Nouveau-Mexique, et Frank Kerr, de l'Université du Maryland, ont commencé l'étude de la zone d'exclusion à la longueur d'onde de 21 centimètres. À l'aide du radiotélescope de Green Bank, en Virginie occidentale, ils ont détecté 18 nouvelles galaxies. Malheureusement, le télescope s'effondra avant l'achèvement du projet (voir la figure 5). Une équipe internationale dont nous faisons partie commença alors une étude plus systématique, à l'aide du radiotélescope de 25 mètres de diamètre de Dwingeloo, aux Pays-Bas. Nous voulions cartographier toutes les galaxies spirales dans la portion septentrionale de la zone d'exclusion, jusqu'à une distance de 175 millions d'années-lumière. Nous avons déjà découvert plus de 40 galaxies.

Depuis 1997, une autre étude est dirigée par Lister Staveley-Smith et par l'un de nous (R. Kraan-Korteweg). C'est un recensement des galaxies situées derrière la Voie lactée australe, avec une sensibilité accrue. À l'aide d'un instrument spécial, adapté au radiotélescope de Parkes, en Australie, nous verrons des galaxies jusqu'à 500 millions d'années-lumière. Plus de 100 galaxies ont déjà été détectées, et plusieurs milliers d'autres sont attendues.

Les ondes radio ne sont pas les seules qui traversent la zone d'exclusion : les rayonnements infrarouges,



3. L'OPACITÉ DE LA VOIE LACTÉE dépend de la longueur d'onde. Les rayonnements de grande longueur d'onde, tels les rayonnements radio et infrarouge, sont assez peu atténués, mais les ondes plus courtes (l'infrarouge proche, le visible et l'ultraviolet) sont absorbées par les poussières et par les nuages de gaz au sein de notre Galaxie. Aux très courtes longueurs d'onde, pour les rayons X par exemple, le gaz redevient transparent.



4. LE NOYAU DU GRAND ATTRACTEUR est l'amas de galaxies Abell 3627. Il apparaît en lumière visible (arrière-plan) et en rayons X (contours noirs). Plus de 100 galaxies apparaissent sur ce négatif, dont la plupart des points sont des étoiles de notre Galaxie. Les contours concentriques serrés (en haut, à droite) indiquent une galaxie brillante de l'amas.

sont également moins absorbés par les poussières que la lumière visible. Au début des années 1980, le satellite *IRAS* dressa un catalogue des objets qui émettent des infrarouges lointains (ceux dont les longueurs d'onde sont proches de celles du rayonnement radio, comprises entre 10 et 100 micromètres). Dans ce catalogue, plusieurs objets pouvaient être des galaxies spirales et des galaxies à flambées d'étoiles (des galaxies où de grandes quantités d'étoiles se forment rapidement). Cependant, en se fondant uniquement sur l'intensité du rayonnement infrarouge, on ne distingue pas les galaxies d'objets galactiques qui émettent un rayonnement d'intensité analogue (*IRAS* ne faisait pas d'images). Pour les distinguer, on utilise des caméras sensibles à l'infrarouge proche (entre 0,8 et 50 micromètres), grâce aux images desquelles on vérifie si les candidats *IRAS* sont bien des galaxies.

Deux autres recensements systématiques dans l'infrarouge proche s'achèveront en l'an 2001 : un projet américain de recensement de tout le ciel, à une longueur d'onde de deux micromètres, et le projet européen DENIS qui dresse un catalogue du ciel austral. Dans ces deux projets, on prend des images numériques dans trois bandes spectrales qui sondent la population des étoiles les plus vieilles des galaxies. De ces recensements émergent les galaxies elliptiques que l'on trouve au centre des concentrations galactiques denses ; ils complètent donc les observations dans l'infrarouge lointain et celles à 21 centimètres, qui dévoilent principalement les galaxies spirales. Une étude préliminaire a confirmé que les recensements dans l'infrarouge proche révèlent des galaxies qui n'apparaissent pas sur les photographies en lumière visible. Malheureusement, ni le visible ni l'infrarouge ne peuvent identifier de galaxies dans les parties les plus épaisses du plan galactique.

On peut aussi éviter l'obscurcissement par la Voie lactée en observant les rayonnements de très courtes longueurs d'onde, tels les rayons X. Les amas de galaxies denses émettent quantité de rayons X qui traversent facilement la Voie lactée. Toutefois, aucune étude à ces longueurs d'onde, qui pourrait utiliser, par exemple, des données du satellite *ROSAT*, n'est en cours.

Simultanément, les astronomes recourent à des moyens indirects pour explorer la zone d'exclusion. Les techniques de traitement du signal, utilisées habituellement par les ingénieurs sur des données « bruitées » ou incomplètes, ont été employées avec succès par des chercheurs de l'Université hébraïque et par l'un de nous (O. Lahav) pour prédire l'existence

d'amas comme celui de la Poupe ou des Voiles, ainsi que la continuation du Plan supergalactique à travers la zone d'exclusion. En mesurant les vitesses de galaxies adjacentes à la zone d'exclusion, on peut prédire la répartition de masse dans cette dernière. Grâce à cette méthode, nous avons prédit que le centre du Grand Attracteur se trouve sur une ligne reliant les constellations



5. CE RADIOTÉLESCOPE de 91 mètres de diamètre (*en haut*) fonctionnait à Green Bank, en Virginie. Le 16 novembre 1988, il s'est effondré (*en bas*) : une plaque métallique du support principal avait cédé. L'antenne sera remplacée par un paraboloïde de 110 mètres sur 100. Contrairement aux antennes circulaires classiques, le nouveau télescope ne possèdera aucun étau de support lui bloquant la vue du ciel.

Richard Porcas, avec l'aimable autorisation du National Radio Astronomy Observatory

du Centaure et du Paon. Cependant, ces méthodes de reconstruction ne révèlent que les structures à très grande échelle : elles ratent les galaxies individuelles et les amas plus petits.

La proie de la Voie lactée

Les méthodes précitées ouvrent lentement à l'étude astronomique le cinquième caché de l'Univers. Une découverte des plus surprenantes est intervenue en 1994, lorsque trois astronomes qui étudiaient des étoiles de la Voie lactée ont accidentellement découvert une galaxie naine sur le pas de notre porte. Cette «naine du Sagittaire» est la galaxie la plus proche connue : elle est située à seulement 80 000 années-lumière du Système solaire, soit moins de la moitié de la distance de la deuxième galaxie la plus proche, le Grand Nuage de Magellan. En fait, elle est presque dans notre Galaxie, de l'autre côté du centre galactique.

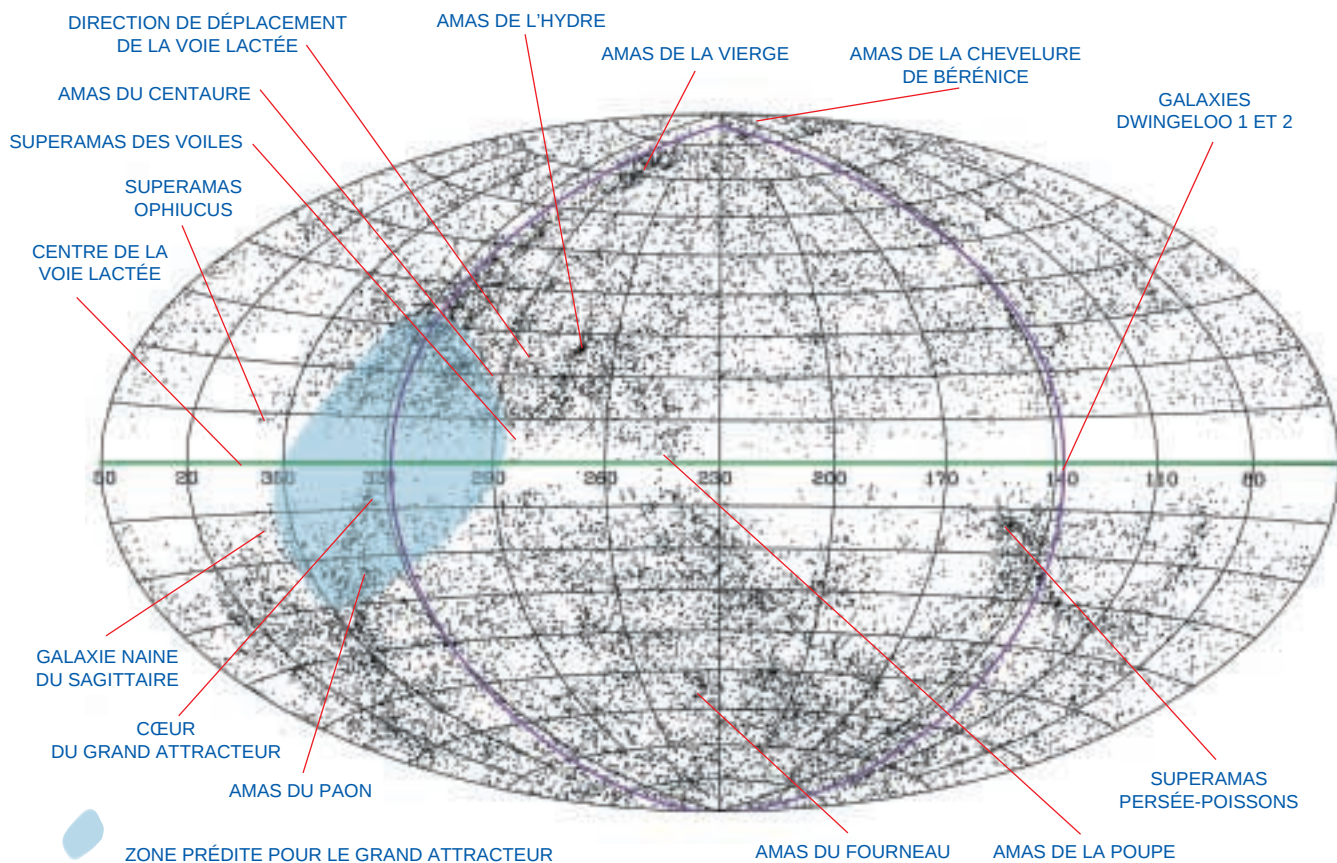
Comme la naine du Sagittaire se trouve directement derrière le bulbe central de la Voie lactée, on ne peut la voir sur des images directes. Les

astrophysiciens l'ont détectée en analysant les vitesses des étoiles : ils ont remarqué un groupe d'étoiles qui se mouvaient différemment des étoiles de notre Galaxie. En notant avec précision la position de ces étoiles et leur vitesse, en cherchant d'autres étoiles à la même distance et en compensant la lumière des étoiles connues situées à l'avant-plan, ils ont identifié la naine du Sagittaire (voir la figure 2). Elle s'étend sur au moins 20 degrés d'angle, de sorte qu'elle est la structure apparente la plus grande du ciel, après la Voie lactée elle-même. Son diamètre angulaire correspond à une taille d'au moins 28 000 années-lumière, environ un cinquième de la taille de notre Galaxie, même si elle est 1 000 fois moins massive que la Voie lactée.

Selon de nombreux modèles de formation des galaxies, les grandes galaxies se forment par agrégation de galaxies plus petites. Un tel mécanisme reste vraisemblablement à l'œuvre aujourd'hui, il a cependant rarement été observé. La galaxie naine du Sagittaire semble avoir été perturbée par les forces de marées engendrées par la Voie

lactée, mais son noyau paraît intact. Après une dizaine de rotations autour de notre Galaxie, cette galaxie a été peu modifiée, ce qui indique que sa cohésion est assurée par de grandes quantités de matière sombre (par opposition à la matière lumineuse, telle que les étoiles ou les nuages de gaz). Bien que stable, cette galaxie naine sera tout de même engloutie par notre Galaxie, d'ici un milliard d'années. Sa découverte montre que des fusions de galaxies se produisent encore aujourd'hui et qu'elles ne détruisent pas nécessairement le disque de la galaxie la plus grande.

La galaxie du Sagittaire n'est que l'une des nombreuses surprises procurées par l'étude de la zone d'exclusion. En août 1994, nous avons examiné les spectres produits par la raie à 21 centimètres de l'hydrogène. Nous avons choisi une région où de nombreuses structures filamenteaires constituées de galaxies disparaissent derrière la zone d'exclusion et où réside le groupe de galaxies IC342, proche de notre Galaxie. Nous avons assez vite trouvé un spectre curieux dans la direction de la constellation



6. TRENTE MILLE GALAXIES, prélevées dans trois catalogues astronomiques classiques, sont représentées par des points sur cette carte. Les galaxies apparaissent partout dans le ciel, sauf dans la zone d'ex-

clusion, qui correspond au plan de la Voie lactée (ligne verte, au centre). En dehors de cette zone, les galaxies semblent se rassembler près d'une ligne qui délimite le Plan supergalactique (ligne violette).

Abell 3627

Lorsque George Abell découvre l'amas de galaxies Abell 3627, au bord de la Voie lactée, il mentionne dans son catalogue : «Assez riche en galaxies spirales.» Toutefois, il ne voyait, sur ses plaques photographiques, que les galaxies les plus importantes, la lumière des galaxies plus petites étant absorbée par la poussière et le gaz de notre Galaxie, derrière laquelle se trouve cet amas. Ce sont les galaxies plus petites et moins brillantes qui ont été découvertes récemment.

Pour s'assurer que les galaxies repérées sur les plaques photographiques appartiennent bien à l'amas, il a fallu mesurer leur vitesse d'éloignement, car les vitesses des galaxies qui appartiennent à un même amas sont réparties autour d'une vitesse moyenne. Pour ce faire, Renée Kraan-Korteweg a travaillé avec notre équipe de l'Observatoire de Paris. Nous avons utilisé le positionneur automatique de fibres MEFOS installé

sur le télescope de 3,60 mètres de diamètre de l'Observatoire européen austral, à La Silla (Chili).

À l'aide de cet instrument, nous enregistrons simultanément le spectre de 30 galaxies : les 30 bras portant les fibres optiques étaient positionnés automatiquement en regard de la lumière parvenant des objets choisis à l'avance. L'instrument n'étant efficace que dans les zones de grande densité de galaxies, des mesures complémentaires pour les régions plus clairsemées ont été entreprises au télescope de 1,93 mètre de diamètre situé en Afrique du Sud et au radiotélescope de Perkes, en Australie. Les vitesses ainsi mesurées ont permis de montrer que les galaxies découvertes dans cette région appartenaient bien à l'amas, ce qui faisait de lui un amas très massif qui pouvait être le cœur du Grand Attracteur, si longtemps recherché.

Chantal BALKOWSKI, DARC,
Observatoire de Paris

de Cassiopée, qui se révéla être une nouvelle galaxie voisine.

George Hau, de l'Université de Cambridge, identifia alors un objet qui émettait une très faible lumière visible, superposée au signal radio. Peu de temps après, des images plus sensibles obtenues par différents télescopes révélèrent la forme de cette galaxie : une barre avec des bras spiraux à ses extrémités (voir la figure 2). Si elle n'était pas obscurcie par le plan de la Voie lactée, cette galaxie – nommée Dwingeloo 1 – serait l'une des dix les plus brillantes du ciel. D'après sa vitesse de rotation, elle est environ trois fois moins massive que la Voie lactée : elle a une masse analogue à M33, la troisième en masse du Groupe local, après la Voie lactée et Andromède.

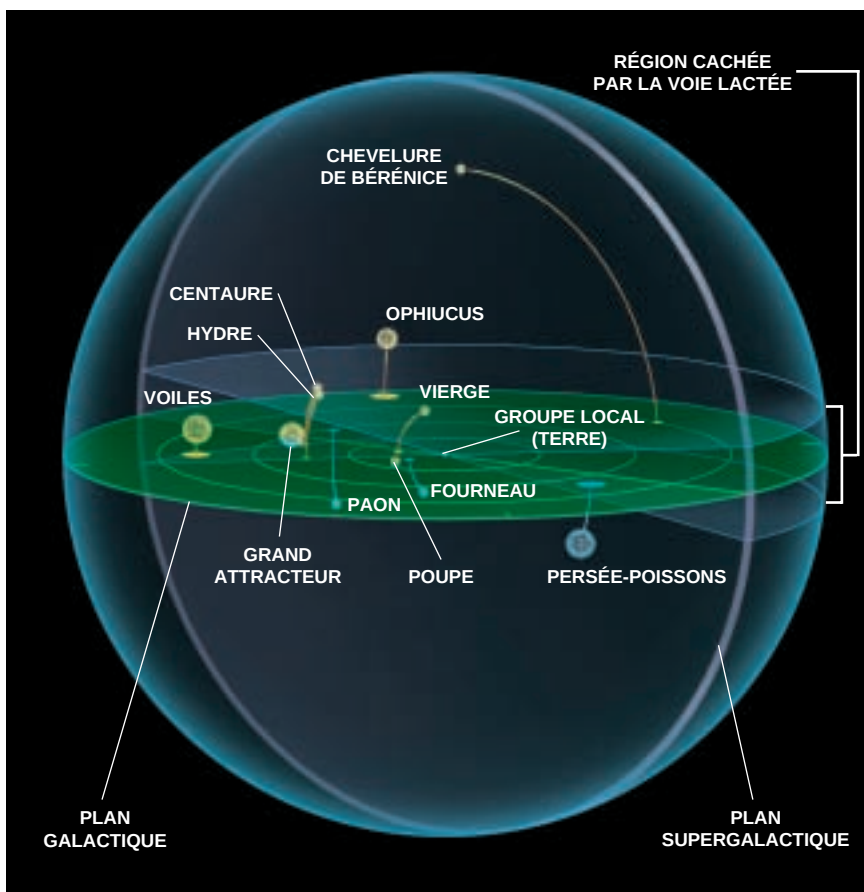
Des observations complémentaires de Dwingeloo 1 à l'aide du radiotélescope de Westerbork, aux Pays-Bas, révélèrent une autre galaxie située à un tiers de degré d'angle de la première : Dwingeloo 2, une galaxie naine deux fois plus petite et dix fois moins massive que Dwingeloo 1, est à dix millions d'années-lumière de nous, juste au-delà du Groupe local. Elle semble associée au groupe

de galaxies IC342. Plus tard, deux autres galaxies situées dans cet ensemble ont été identifiées, grâce à des images de grande sensibilité obtenues dans le visible.

Bien qu'une grande partie de la zone d'exclusion reste à observer, les astronomes savent aujourd'hui qu'il n'existe aucune galaxie de la taille d'Andromède dans notre banlieue galactique. Même s'il est dommage que nous n'ayons pas découvert de galaxies de taille comparable à la nôtre ou à celle d'Andromède, ces résultats éliminent les incertitudes sur la cinématique de notre voisinage immédiat.

Amas et superamas

Les études de la zone d'exclusion ont également rénové les théories de l'Univers plus lointain. À l'aide du radiotélescope de 100 mètres de diamètre d'Effelsberg, en Allemagne, les astronomes ont découvert un nouvel amas à 65 millions d'années-lumière, dans la constellation de la Poupe. Plusieurs autres éléments, dont une analyse des galaxies découvertes par *IRAS*, ont convergé vers la même conclusion : la prise en compte



7. CETTE REPRÉSENTATION TRIDIMENSIONNELLE de l'Univers local montre la distribution irrégulière des amas de galaxies. Le rayon de la sphère bleue représente 400 millions d'années-lumière ; le plan vert est celui de notre Galaxie, étendu à l'espace intergalactique ; les petits groupes de points sont les amas de galaxies, et les cercles sont leurs projections sur le plan galactique. De nombreux amas de galaxies se trouvent dans le plan supergalactique ou près de lui (en violet). Certains sont dissimulés dans la zone d'exclusion (secteur de part et d'autre du plan galactique).

de l'amas de la Poupe permet un meilleur accord entre le mouvement attendu du Groupe local et le mouvement théorique déduit par le rayonnement du fond cosmologique.

Ces observations pourraient-elles préciser la nature du Grand Attracteur ? Bien que la densité de galaxies visibles augmente dans la direction présumée de cette structure, son cœur a échappé aux recherches. Dans les années 1980, George Abell, alors à l'Université de Californie, a identifié un amas de galaxies situées à peu près à la bonne position ; c'était à l'époque le seul amas connu dans la zone d'exclusion. Toutefois, comme il ne comprenait que 50 galaxies, il ne pouvait s'agir d'un attracteur, encore moins d'un grand attracteur.

Cet amas était pourtant plus massif qu'on ne le pensait : avec Patrick Woudt, de l'Observatoire européen austral à Garching, en Allemagne, nous y avons découvert 600 autres galaxies. Avec des collègues en France

et en Afrique du Sud (voir l'encadré page 81), nous avons obtenu des spectres de ces objets au moyen de divers télescopes situés dans l'hémisphère Sud. Les vitesses mesurées des galaxies suggèrent que l'amas est très massif – équivalant à l'amas de la Chevelure de Bérénice (Coma), un regroupement 10 000 fois plus massif que notre Galaxie. Ainsi les astronomes ont enfin vu le centre du Grand Attracteur. Avec d'autres amas

voisins, cette découverte pourrait expliquer complètement les mouvements galactiques observés dans l'Univers proche.

La hiérarchie des structures cosmiques ne s'arrête pas là. Les recherches dans la zone d'exclusion ont identifié des regroupements encore plus grands. Kenichi Wakamatsu, de l'Université de Gifu, au Japon, a identifié un superamas à 370 millions d'années-lumière, dans la constellation d'Ophiucus. Bien que cet amas se trouve derrière le centre galactique, une région extrêmement dense en étoiles, K. Wakamatsu a identifié, sur des relevés photographiques du ciel, des milliers de galaxies qui font partie de cet amas. Le superamas d'Ophiucus pourrait être relié à un autre superamas, situé dans la constellation d'Hercule, ce qui suggère l'existence de structures cohérentes sur des échelles défiant l'imagination, même celle des astronomes.

La zone d'exclusion a gêné des générations d'astronomes. Elle bloquait l'étude de la formation de la Voie lactée, de l'origine du mouvement du Groupe local, de la connexion de chaînes de galaxies, et du nombre réel de galaxies de l'Univers. Les efforts des dix dernières années ont transformé la zone d'exclusion en l'une des régions les plus intéressantes du ciel extragalactique : le mystérieux Grand Attracteur est aujourd'hui bien cartographié, la découverte de la galaxie naine du Sagittaire a montré comment la Voie lactée s'est formée, et les vastes filaments cosmiques posent des questions sur les théories de la matière sombre et de la formation des grandes structures. Derrière ce voile, d'autres surprises attendent peut-être les astronomes, mais les pièces manquantes du ciel extragalactique se mettent en place.

Renée KRAAN-KORTEWEG enseigne au département d'astronomie de Guanajuato, au Mexique. Ofer LAHAV travaille à l'Institut d'astronomie de l'Université de Cambridge, en Angleterre.

Unveiling Large-Scale Structures behind the Milky Way, sous la direction de Chantal Balkowski et R.C. Kraan-Korteweg, Astronomical Society of the Pacific Conference Series, vol. 67, janvier 1994.

R.A. IBATA, G. GILMORE et M.J. IRWIN, *A Dwarf Satellite Galaxy in Sagittarius*, in

Nature, vol. 370, pp. 194-196, 21 juillet 1994.

Avishai DEKEL, *Dynamics of Cosmic Flows*, in *Annual Review of Astronomy and Astrophysics*, vol. 32, pp. 371-418, 1994.

R.C. KRAAN-KORTEWEG et al., *A Nearby Massive Cluster behind the Milky Way*, in *Nature*, vol. 379, pp. 519-521, 8 février 1996.

D. ALLOIN, *Les galaxies*, Flammarion, 1998.

