



Cette page de la revue ne sera disponible à la lecture de manière gratuite seulement 3 ans après sa publication.

Si vous avez besoin de ces informations, vous pouvez adhérer au CLEA et vous abonner à la revue trimestrielle en version papier ou pdf ou acheter seulement ce numéro des Cahiers Clairaut en ligne :

<https://ventes.clea-astro.eu/>

Comité de Liaison Enseignants et Astronomes

Le **CLEA**, Comité de liaison enseignants et astronomes, est une association déclarée à but non lucratif (loi de 1901), fondée en 1977. Elle réunit des enseignants et des astronomes professionnels qui veulent ensemble promouvoir l'enseignement de l'astronomie à tous les niveaux de l'enseignement et dans les organismes de culture populaire.

Le **CLEA** organise des stages nationaux (écoles d'été) et régionaux. Ces stages sont ouverts aux enseignants de l'école, du collège et du lycée et, de manière générale, à tous les formateurs. On s'efforce d'y conjuguer information théorique et travaux pratiques (observations, travaux sur documents, mise au point de matériels didactiques et recherche du meilleur usage de ces matériels, etc.). Le **CLEA** favorise les échanges directs entre enseignants et astronomes, hors de toute contrainte hiérarchique.

L'organe de liaison du **CLEA**, les **CAHIERS CLAIRAUT**, est une revue trimestrielle. On y trouve des articles de fond (astrophysique, histoire, philosophie, enseignement...), des comptes rendus d'expériences pédagogiques, des notes critiques de livres récents, des innovations en matière d'activités pratiques.

Le **CLEA** a mis en place une liste de diffusion afin de permettre des échanges rapides entre les abonnés.

Présidents d'honneur

Lucienne Gouguenheim
Georges Paturel
Cécile Ferrari

Bureau du CLEA pour 2023

Président : Frédéric Pitout
Trésorière : Sylvie Thiault
Trésorière adjointe : Chantal Lecoutre
Secrétaire : Grégory Silva
Secrétaire adjoint : Vincent Bouneb

Responsables des groupes

Cahiers Clairaut : Christian Larcher

Productions pédagogiques : Pierre Causeret

École d'été d'astronomie : Frédéric Pitout

Site web : Jean-Michel Vienne

Réseau de correspondants : Sébastien Dhérissard



Merci à celles et ceux qui ont permis la réalisation de ce numéro des Cahiers Clairaut, nous citerons :

Nathalie Cartier, Pierre Causeret, Paola di Matteo, Jean-Baptiste Feldman, François Hurter, Johan Kero, Christian Larcher, Pierre Lauginie, Chantal Lecoutre, Georges Lecoutre, Benoît Mosser, Maxime Oudoux, Georges Paturel, Frédéric Pitout, Alain Rappeneau, Jean Ripert, Béatrice Sandré, Gilles Theureau,

Les auteurs recevront plusieurs numéros 183 afin de faire connaître la revue autour d'eux.

La Voie lactée derrière le moulin du Kercousquet à Clohars-Carnoët (29). On observe beaucoup plus d'étoiles dans cette région du ciel car il s'agit de notre Galaxie vue par la tranche. Le centre de la Galaxie, situé dans la constellation du Sagittaire est proche de l'horizon ici.

On peut reconnaître la constellation de l'Aigle avec l'étoile Altaïr en haut à gauche. La bande sombre qui semble partager la Voie lactée en deux presque au centre de la photo est appelée le rift de l'Aigle, il s'agit d'un nuage sombre de poussières.

Pose de 25 secondes avec boîtier Canon 6D et objectif de 24 mm ouvert à 2 à 2 500 ISO. Le moulin a été éclairé rapidement à la lampe de poche. Photo Fabien Causeret.

Les Cahiers Clairaut

Automne 2023

Éditorial

Le télescope spatial Euclid est arrivé au point de Lagrange L2 ; il va rechercher des traces laissées par la matière noire et l'énergie sombre dans la période d'expansion de l'Univers de ces dix derniers milliards d'années. La méthode consiste à mettre en évidence des distorsions gravitationnelles des images des galaxies lointaines observées via les lentilles gravitationnelles formées par les galaxies plus proches de la Terre. Ces lentilles ont l'avantage de traiter de la même manière la matière visible et la matière noire... si elle existe.

La précision des mesures concernant les 1,5 milliard de galaxies étudiées doit permettre de réaliser une cartographie 3D de l'évolution des grandes structures de l'Univers en fonction du temps et d'en déduire la part de matière « visible » et noire.

Mais en sciences rien n'est gagné d'avance. Un membre du Consortium Euclid, Henk Hoekstra, résume la situation par cette boutade : il est très difficile de trouver un chat noir dans une pièce sombre, en particulier quand il n'y a pas de chat...

Nous vous invitons à découvrir : l'histoire du concept de galaxie ; la Voie lactée dévoilée par Gaïa afin de réaliser une cartographie minutieuse de notre Galaxie ; comment mesurer sa masse avec l'hypothèse que masse noire et énergie sombre ne sont que des artefacts ; enfin, plus simplement avec vos élèves, retrouver où se trouve son centre (à la manière de Shapley).

Après cette période estivale nous vous souhaitons une bonne rentrée.

Christian Larcher (pour l'équipe)

Sommaire

Actualités

Brèves d'observatoires et autres nouvelles

Frédéric Pitout p 2

Article de fond

Les images comme passage vers la démarche scientifique (2)

Benoît Mosser p 4

Dossier : la Galaxie

p 8

Photographier la Galaxie

J-B Feldmann, A Rappeneau, M. Oudoux p 8

Histoire

Histoire et conceptions de la Voie lactée

Gilles Theureau p 10

Mots croisés

Pierre Causeret p 15

Article de fond

La Voie lactée dévoilée par Gaïa

Paola di Matteo p 16

La Galaxie dans les Cahiers Clairaut

p 21

Avec nos élèves

La Galaxie et les amas globulaires

Pierre Causeret p 22

Article de fond

La masse de notre Galaxie

Georges Paturel p 26

Article de fond

L'orbite du James Webb spatial telescope

Béatrice Sandré p 33

Observation

Le ciel d'automne 2023

Pierre Causeret p 39

Article de fond

Le pendule de Foucault (II)

Pierre Lauginie p 40

Lecture pour la marquise

Histoire d'une science impossible

Frédéric Pitout p 46

Vie association

Compte rendu de l'école d'été du CLEA 2023

Bénédicte Sévenet p 47

Solution mots croisés p 48



Cette page de la revue ne sera disponible à la lecture de manière gratuite seulement 3 ans après sa publication.

Si vous avez besoin de ces informations, vous pouvez adhérer au CLEA et vous abonner à la revue trimestrielle en version papier ou pdf ou acheter seulement ce numéro des Cahiers Clairaut en ligne :

<https://ventes.clea-astro.eu/>



Cette page de la revue ne sera disponible à la lecture de manière gratuite seulement 3 ans après sa publication.

Si vous avez besoin de ces informations, vous pouvez adhérer au CLEA et vous abonner à la revue trimestrielle en version papier ou pdf ou acheter seulement ce numéro des Cahiers Clairaut en ligne :

<https://ventes.clea-astro.eu/>



Cette page de la revue ne sera disponible à la lecture de manière gratuite seulement 3 ans après sa publication.

Si vous avez besoin de ces informations, vous pouvez adhérer au CLEA et vous abonner à la revue trimestrielle en version papier ou pdf ou acheter seulement ce numéro des Cahiers Clairaut en ligne :

<https://ventes.clea-astro.eu/>



Cette page de la revue ne sera disponible à la lecture de manière gratuite seulement 3 ans après sa publication.

Si vous avez besoin de ces informations, vous pouvez adhérer au CLEA et vous abonner à la revue trimestrielle en version papier ou pdf ou acheter seulement ce numéro des Cahiers Clairaut en ligne :

<https://ventes.clea-astro.eu/>



Cette page de la revue ne sera disponible à la lecture de manière gratuite seulement 3 ans après sa publication.

Si vous avez besoin de ces informations, vous pouvez adhérer au CLEA et vous abonner à la revue trimestrielle en version papier ou pdf ou acheter seulement ce numéro des Cahiers Clairaut en ligne :

<https://ventes.clea-astro.eu/>



Cette page de la revue ne sera disponible à la lecture de manière gratuite seulement 3 ans après sa publication.

Si vous avez besoin de ces informations, vous pouvez adhérer au CLEA et vous abonner à la revue trimestrielle en version papier ou pdf ou acheter seulement ce numéro des Cahiers Clairaut en ligne :

<https://ventes.clea-astro.eu/>



Cette page de la revue ne sera disponible à la lecture de manière gratuite seulement 3 ans après sa publication.

Si vous avez besoin de ces informations, vous pouvez adhérer au CLEA et vous abonner à la revue trimestrielle en version papier ou pdf ou acheter seulement ce numéro des Cahiers Clairaut en ligne :

<https://ventes.clea-astro.eu/>



Cette page de la revue ne sera disponible à la lecture de manière gratuite seulement 3 ans après sa publication.

Si vous avez besoin de ces informations, vous pouvez adhérer au CLEA et vous abonner à la revue trimestrielle en version papier ou pdf ou acheter seulement ce numéro des Cahiers Clairaut en ligne :

<https://ventes.clea-astro.eu/>

LES CONCEPTIONS DE LA VOIE LACTÉE ET DES NÉBULEUSES

Gilles Theureau, astronome, Observatoire de Paris/PSL et LPC2E/CNRS-Orléans

Le concept de galaxie et de Voie lactée nous est familier aujourd'hui, mais il aura fallu des siècles pour qu'il se stabilise dans sa version moderne. Celle-ci date essentiellement de la première moitié du vingtième siècle, marquée par les découvertes successives d'Henrietta Leavitt sur la distance des étoiles céphéides, celles de Harlow Shapley sur la taille de la Voie lactée et la place du Soleil, et celles d'Edwin Hubble enfin sur les distances entre les « nébuleuses » du Groupe local.

Comme toujours, les premières explications sont venues des mythes, façon d'ordonner un monde en apparence chaotique par des relations entre les éléments et événements naturels. En Occident, fort du poids de la tradition grecque, c'est le thème du jet de lait qui domine, d'où le nom de Voie lactée. On se rappelle l'anecdote d'Hermès, pressé par Zeus de porter le jeune Héraclès (fils illégitime du roi de l'Olympe et de la mortelle Alcmène) téter le sein d'Héra pendant son sommeil, afin d'acquérir l'immortalité. Héra se réveille, repousse l'enfant d'où le jet de lait maternel qui s'échappe et qui crée la Voie lactée. Il est intéressant de regarder les représentations de ce mythe dans les tableaux du Tintoret (1575) et de Rubens (1637) au tournant du 16^e siècle, en pleine révolution copernicienne, au moment de l'ouverture du système du monde vers un univers infini d'étoiles : le jet de lait y est ambigu, constitué à la fois d'une substance liquide et de myriades d'étoiles. Toujours sur le thème du lait, on trouve par exemple la Voie lactée décrite comme le chemin des vaches ou le chemin du pasteur après la traite (Grèce, Roumanie). Une des images très présente également est celle du chemin céleste : les empreintes du char du dieu Soleil, qui s'écarte du chemin habituel, le trajet des comètes, filles désavouées du Soleil, qu'elles cherchent en vain à rejoindre, le chemin de Compostelle (littéralement « champ d'étoiles »), le chemin de Mahomet pour atteindre Dieu, le chemin des âmes (Grèce, Inde, Amérindiens), ou la route des oiseaux (Estonie, Finlande, Laponie). En Orient (Chine, Corée) c'est le thème du fleuve céleste ou de la marée céleste qui revient souvent : il y a notamment un très beau conte chinois qui évoque le chemin des oiseaux migrateurs emprunté une fois l'an par les deux amants le Bouvier et la Tisserande pour se retrouver, après qu'ils eurent été séparés par les



Fig.1. L'origine de la Voie lactée, Rubens, 1637.

autres dieux par le fleuve céleste et sommés de revenir à de sages occupations plutôt que de batifoler. D'autres mythes attribuent les marées au débordement de la mer quand la Voie lactée passe sous l'horizon.

En Occident, les premières explications rationnelles nous viennent des penseurs présocratiques. Certains pythagoriciens (6^e siècle av. J.-C.) parlent de la route d'une des étoiles (météores) tombées du ciel, ou de l'ancienne route du Soleil, qui aurait altéré, brûlé, cette région du ciel. Le Parménide (d'après Pseudo-Plutarque +130) évoque sans originalité un mélange d'une épaisse et fine substance de la couleur du lait. Chez Anaxagore (500-428 av. J.-C.), « quand le Soleil passe sous la Terre, il en projette l'ombre sur la voûte céleste et, dans cette ombre, nous distinguons un très grand nombre d'étoiles : c'est la Voie lactée ; si ailleurs nous en voyons moins, c'est que leur éclat est noyé dans la lumière du Soleil ». Diverses interprétations sont relatées par Macrobie (5^e siècle apr. J.-C.) dans son commentaire du *Songe de Scipion*,

extrait de *la République* de Cicéron : il cite Posidonius, défenseur d'une émanation de la chaleur australe qui tempère les régions non visitées par le Soleil, ou encore Diodore de Cronus, pour qui il s'agit d'un sentier de feu, Théophraste, qui suggère les points de suture des deux hémisphères célestes, et enfin Démocrite (460-370 av. J.-C.), savant atomiste, qui affirme qu'il s'agit d'une grande densité de petites étoiles. On notera la modernité de la dernière assertion ! En fait, cette ambiguïté entre substance céleste et phénomène stellaire, on va la retrouver débattue pendant près de deux millénaires, depuis les écrits d'Aristote jusqu'au *Messenger Céleste* de Galilée publié en 1610. Chez Aristote, qui a été le premier à construire un système cohérent entre la physique terrestre, l'astronomie et la cosmologie, la Voie lactée ne peut être autre chose qu'un phénomène atmosphérique. Dans son système, la Terre est immobile au centre de l'Univers et tient son statut de la pesanteur, comme centre de la chute des corps. Le monde est structuré en fonction des quatre éléments d'Empédocle, la terre, l'eau, l'air et le feu, dans cet ordre, du plus lourd au plus léger. Le monde de la corruption et du changement est cantonné à l'intérieur de l'orbe lunaire, quand le monde au-delà, siège de la perfection divine et de la permanence, est le lieu d'un cinquième élément, dont les mouvements naturels sont circulaires et immuables. Dans ce schéma, un objet aussi biscornu qu'ambigu comme la Voie lactée ne peut qu'appartenir au monde terrestre, et il en fait un phénomène météorologique, au même titre que les nuages, ou d'ailleurs, que les comètes. Aristote la décrit comme une sorte d'exhalaison chaude qui monte se frotter à l'orbe de la Lune et s'y enflamme, les comètes résultant du même processus mais de manière éparse. À l'opposé, nous avons la vision atomiste déjà mentionnée : l'Univers est constitué d'un nombre infini d'étoiles sur une profondeur insondable, lesquelles sont séparées de distances variées et sujettes à collisions, destruction et renaissance. Lucrèce (99-51 av. J.-C.) reprendra cette idée en y ajoutant un phénomène de réfraction : ce n'est pas la multitude d'étoiles, mais la juxtaposition et le mélange des rayons lumineux qui crée la Voie lactée. C'est cependant la cohérence du système d'Aristote qui va l'emporter pendant de nombreux siècles, malgré des critiques de plus en plus affirmées. Les néoplatoniciens (5-6^e siècle apr. J.-C.) diront par exemple que ce qu'il propose n'est pas mieux que les mythes : comment expliquer la permanence de la Voie lactée ? Le fait qu'on n'y voie aucune variation climatique à

l'échelle de la Terre entière ? Pourquoi ne voile-t-elle pas la lumière des planètes si elle s'interpose ? Et pourquoi se projette-t-elle toujours devant les mêmes étoiles alors qu'on sait qu'il y a une parallaxe de la Lune, pourtant en théorie plus éloignée ? Les textes d'Aristote vont être oubliés un temps, mais on les redécouvrira au Moyen Âge, notamment chez les savants arabes, qui ne seront pas non plus avares de critiques. Al Biruni (+1029) décrit la Voie lactée comme constituée d'une collection d'innombrables fragments de même nature que les étoiles, les nébuleuses et les comètes. Averroès (1126-1198) par contre ne la situe pas parmi les étoiles fixes mais parle d'un effet de réfraction subi par les rayons lumineux des petites étoiles. Aboulfarag (1226-1286), enfin, rejette la Voie lactée au-delà de l'orbite de Saturne, et l'assimile aux autres « étoiles nébuleuses », formée d'étoiles très menues réunies ensemble.

Le véritable tournant viendra, en Occident en tout cas, au tout début du 17^e siècle. Tycho Brahé, commentant les observations de l'étoile nouvelle de 1572 (une supernova), en fera le lieu de naissance d'une étoile par condensation de la substance céleste présente dans la Voie lactée, rompant avec l'immuabilité des cieux si chère à Aristote, et la plaçant clairement dans le monde stellaire. Mais c'est surtout les premières observations télescopiques de Galilée qui vont révéler des agglomérats d'étoiles, là où à l'oeil on ne voyait jusque là qu'une nébulosité diffuse.

« Ce que nous avons observé en troisième lieu, c'est l'essence ou la matière de la VOIE LACTÉE elle-même ; grâce à la lunette, on peut si bien fixer son regard sur elle, que toutes les disputes qui ont, pendant tant de siècles, torturé les Philosophes sont détruites par l'évidence de la perception, et que nous voilà libérés de discussions

Galilée, le Messenger Céleste: la description d'Orion et les nébuleuses



Fig.2. Description d'Orion et des nébuleuses. Galilée, *Le Messenger céleste*.

verbeuses. La GALAXIE n'est, en effet, rien d'autre qu'un amas d'Étoiles innombrables regroupées en petits tas : quelle que soit, en effet, la région vers laquelle on dirige la Lunette, aussitôt une immense foule d'Étoiles s'offre à la vue, dont plusieurs semblent assez grandes et bien visibles ; mais une multitude de petites Étoiles se soustrait absolument à l'exploration. [...] En outre (ce qui est plus merveilleux encore), les Étoiles appelées par tous les astronomes jusqu'à ce jour NÉBULEUSES sont des troupes de petites Étoiles semées de manière admirable ». *Galilée (1609), Le Messager Céléste*.

Tout est dit, dans l'enthousiasme, Galilée ira même jusqu'à affirmer qu'il a résolu la nébuleuse d'Orion en étoiles, bien connue aujourd'hui pour être un gigantesque nuage de gaz berceau de futures étoiles. Les observations de Galilée ouvrent donc définitivement le système fermé et géocentrique des Grecs, pour en faire un monde infini d'étoiles, toutes bientôt accompagnées de leur cortège de planètes. Mais y a-t-il réellement un nombre infini d'étoiles ? Pourquoi sont-elles concentrées dans la Voie lactée ? Les nébuleuses sont-elles d'autres Voies lactées ? Avec le soudain essor de la physique mathématique de Newton et de ses applications en mécanique céleste, ces questions vont devenir secondaires pendant près de deux siècles. Le monde occidental en pleine expansion colonisatrice se concentrera sur la maîtrise de l'astrométrie et des éphémérides, qui lui donnent les clés pour la navigation et la domination des mers, et on oubliera un temps les interrogations sur la nature de la Voie lactée et des nébuleuses.

Les progrès viendront dans ce domaine des réflexions de philosophes ou d'astronomes atypiques, en dehors des systèmes académiques. Thomas Wright (1711-1786), mathématicien, architecte et astronome anglais, est un de ceux-là. Ce sera un des premiers à se poser la question de la position de l'observateur par rapport au phénomène « Voie lactée » et à y apporter sa maîtrise de la perspective héritée de ses conceptions de jardins. Dans *An Original Theory or new Hypothesis of the Universe*, paru en 1750, il nous livre ses principales réflexions, qu'il présente prudemment comme une « hypothèse probable », mais qu'il a l'ambition d'en faire « une théorie rationnelle et régulière de l'univers connu ». Il y utilise quelques arguments mathématiques et démonstrations rigoureuses, fait appel

à l'usage de l'analogie et à des principes de symétrie, mais brandit aussi des arguments d'ordre théologique. La Création est pour lui nécessairement infinie, donc l'Univers l'est également ; il est de plus ordonné de manière régulière et sa forme se doit d'être sphérique (un argument très pythagoricien). Pour interpréter le phénomène Voie lactée, il part de l'analogie avec le Système solaire : il y existe un point, le Soleil, d'où on voit l'ordre régulier du système, imperceptible depuis la Terre, et qui s'est résolu avec le passage à l'héliocentrisme. De même il doit exister un point dans l'Univers, un centre commun au mouvement des étoiles (on a découvert récemment les mouvements propres stellaires) d'où l'on voit apparaître comme une évidence cette symétrie et cette harmonie. Il nous propose deux modèles, l'un constitué d'une ou plusieurs coquilles sphériques d'étoiles imbriquées comme des poupées russes, autour d'une présence divine, l'autre constitué d'anneaux d'étoiles concentriques, à la manière des anneaux de Saturne. Voilà comment il décrit le premier, depuis la position d'un observateur interne au système :

« Imaginons un vaste [...] milieu étendu comme un plan, et enfermé entre deux surfaces [...] mais d'une telle profondeur ou épaisseur qu'il occupe un espace égal au double rayon de la création visible, [...]. La planche XXIII en représente une simple section. [...]. Maintenant, dans cet espace considérons toutes les étoiles distribuées au hasard, mais à une distance si ajustée l'une de l'autre que la totalité du milieu est remplie avec une sorte d'irrégularité régulière d'objets. Et ensuite, considérons les conséquences [qu'en pourrait tirer] un œil situé près du point central, ou n'importe où le long du plan médian,

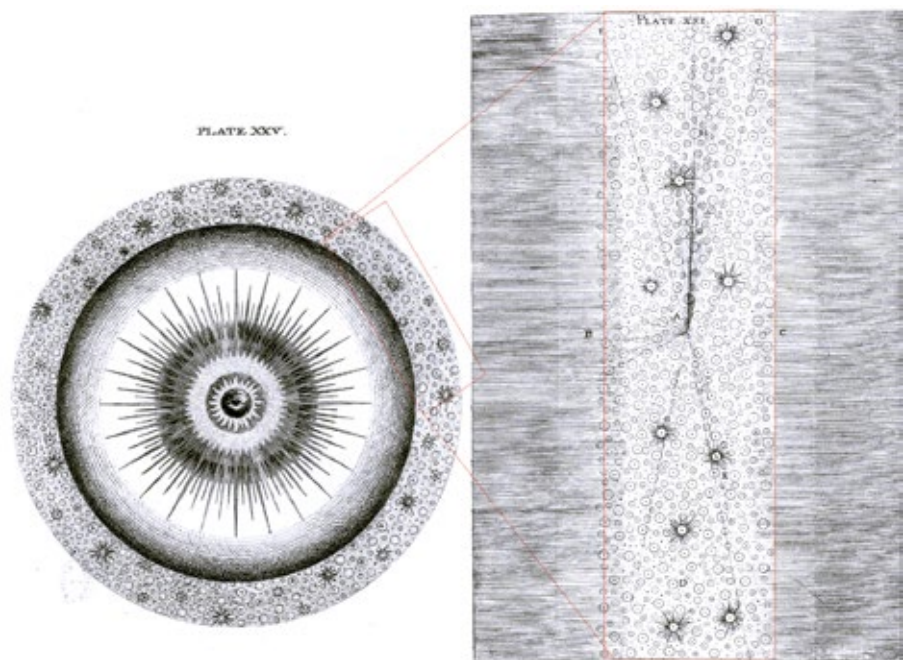


Fig.3. Premier modèle de Thomas Wright. La Voie lactée est une coquille d'étoile vue de l'intérieur. On voit à droite une coupe du système, avec les « rayons visuels » issus de l'observateur.

comme au point A. N'est-il pas, pensez vous, très évident, que les étoiles paraissent dispersées au hasard de chaque côté, lorsque l'observateur avance à travers chaque surface, et de plus en plus près des points B et C, mais que dans la direction du plan général vers H et D, par l'atténuation continuelle des rayons visuels, se rassemblant comme en H, entre les limites D et G, elles doivent infailliblement aboutir à la plus grande confusion ? ». *Thomas Wright (1750), An Original Theory of the Universe, 7^e lettre.*

Faisant lui aussi l'analogie avec la structure du Système solaire, Emmanuel Kant réinterprétera les représentations de Thomas Wright, en y intégrant les idées de Maupertuis dans son *Discours sur la Figure des Astres* (1732), et la notion d'un Univers en évolution, doté d'un centre, et structuré par la gravitation. Cela aboutira en outre à la première formulation de la notion « d'univers île » proposée un siècle plus tard par Alexander von Humboldt :

« si un système d'étoiles fixes se rapportant dans leurs positions à un plan commun, ainsi que nous avons esquissé la Voie lactée, est si éloigné de nous que toute connaissance des étoiles particulières dont il se compose ne soit plus perceptible, même plus au télescope ; [...] si un tel monde d'étoiles fixes est contemplé à une distance aussi incommensurable par l'oeil de l'observateur qui se trouve en dehors de ce monde, ce monde-ci apparaîtra sous un petit angle comme un petit espace éclairé d'une faible lumière et dont la figure sera circulaire si sa surface se présente directement à l'œil, et elliptique s'il est vu de côté. [...] tout concorde pour que nous considérons ces figures elliptiques comme de tels ordres de mondes et, pour ainsi dire, comme des voies lactées [...] ». Emmanuel Kant (1755), *Histoire générale et théorie du ciel*.

Même s'ils sont marqués par les découvertes scientifiques de leur temps (les observations télescopiques des nébuleuses, les mouvements propres des étoiles, les succès de la gravitation universelle de Newton), les modèles de Wright et de Kant sont avant tout philosophiques et spéculatifs. Ils s'appuient en outre sur très peu de données observationnelles et restent essentiellement qualitatifs. Les premières réelles recherches scientifiques, incluant la construction d'instruments dédiés, la mise en oeuvre

des campagnes d'observation et l'acquisition de vraies mesures quantitatives, vont être entreprises par un astronome germano-anglais, William Herschel.

D'une famille de musiciens, pratiquant lui-même le hautbois, le violon et l'orgue, William Herschel fuit le Hanovre où il est né, alors dévasté par la guerre de sept ans, et s'installe définitivement en Angleterre en 1757, où il obtient quelques années plus tard un poste de chef de chœur et d'organiste à la chapelle de Bath. Fêré de mathématiques et d'astronomie, il commencera en parallèle une carrière d'astronome amateur. Devant le prix des télescopes de grand diamètre, il construit très vite ses propres instruments et polira lui-même plus de 200 miroirs, réalisant avec l'aide de sa sœur Caroline des télescopes de 7,20 et bientôt 40 pieds (12 mètres !) de longueur focale, et de diamètre atteignant les 18,7 pouces (50 cm). Ses objectifs sont clairement l'astronomie stellaire et l'univers profond, à la différence de ses contemporains concentrés sur l'astrométrie précise des positions des planètes et sur les vérifications de la mécanique céleste.

À partir de 1783, il va se passionner pour l'exploration des nébuleuses, sur la base du catalogue de Charles Messier publié quelques années auparavant, et répertoriant à l'époque les objets diffus « à ne pas confondre avec des comètes ». William Herschel découvrira et cataloguera avec sa sœur Caroline plus de 2 500 nébuleuses et amas d'étoiles, observables depuis l'hémisphère nord. Il assortira ses découvertes de considérations méthodologiques sur les protocoles d'observations et les techniques de comptage, d'une classification descriptive et phénoménologique précise des objets, et même de diverses tentatives de reconstruction cosmologiques et cosmogoniques. Le relais sera pris par son fils John à partir de 1830, qui mènera une campagne d'observation complémentaire dans l'hémisphère sud, ajoutant 2 500 objets et fondant ce qui deviendra le bien connu catalogue NGC (« New General Catalogue of galaxies and clusters of stars »). S'il a fondé à proprement parler la cosmologie observationnelle, William Herschel est entré à la Royal Society grâce à une autre découverte fameuse et plus en phase avec son temps : celle de la planète Uranus en 1781.



Fig.4. La Voie lactée comme strate d'étoiles, William et Caroline Herschel (1784-1785).

Cette découverte lui donnera même le statut d'astronome du roi, une position à part qui lui permettra une grande indépendance et une grande liberté de recherche. Un autre volet unique de ses travaux, dans la foulée de ses études de parallaxes, est l'étude de la structure de la Voie lactée comme strate d'étoiles. Il a conçu une méthode statistique de comptages d'étoiles, les « jauges », qui lui a permis d'évaluer la profondeur de la distribution des étoiles dans le champ de son télescope. Cette méthode repose sur quelques hypothèses simplificatrices : les étoiles sont supposées identiques, le rapport des magnitudes apparentes mesurées à l'oeil est égal au rapport des distances, les étoiles sont distribuées uniformément dans l'espace, son télescope est suffisamment sensible pour atteindre les limites de la Voie lactée, et enfin le milieu entre les étoiles est vide de toute matière qui pourrait altérer leur rayonnement. Là encore, ce travail n'a pu être fait sans l'aide constante de Caroline. Ils mesureront ensemble 3 400 jauges, échantillonnant ainsi environ 1/250 du ciel, et ils en tireront la première représentation 3D de la distribution d'étoiles constituant la Voie lactée. Ils obtiendront un système aplati, aux bords certes irréguliers mais en relatif accord avec les spéculations de Wright et Kant. Wilhelm Struve, astronome allemand, reprendra ces travaux en les étalonnant avec les premières mesures de parallaxes stellaires et obtiendra en 1847 un système de 13 000 années lumière (a.l.) de diamètre. Si le système d'Herschel est bien plus petit que les dimensions réelles (100 000 a.l.), c'est qu'il ignore un aspect essentiel : le

milieu interstellaire n'est pas vide. Il absorbe ou diffuse le rayonnement et la portée des télescopes en lumière visible est limitée à notre environnement local.

Avec l'invention de la spectroscopie et son application à l'astrophysique, le débat au cours du XIX^e siècle va peu à peu se reporter sur la nature même des nébuleuses et sur leur caractère « ambigu » connu depuis l'Antiquité : sont-elles formées d'étoiles, ou de gaz, ou les deux à la fois ? Sont-elles des systèmes assujettis à notre Voie lactée, ou des univers-îles autonomes et de même taille ? Et d'ailleurs, quelle est la réelle taille de la Voie lactée ? La première mesure d'une raie d'émission dans une nébuleuse, la nébuleuse de l'Œil du Chat, a été obtenue par William Huggins en 1864, prouvant sa nature gazeuse. Quelques décennies plus tard, Julius Scheiner en 1899, obtiendra le premier spectre de la galaxie d'Andromède, après une pause de 7 h 30. La présence à la fois d'un spectre continu de type stellaire et de raies d'émissions caractéristiques d'un gaz chaud, montrera que étoiles et gaz y cohabitent.

La réponse finale quant au statut relatif des nébuleuses et de la Voie lactée viendra des mesures de distances. L'astronome américaine Henrietta Leavitt (Harvard) a montré en 1912 que les étoiles variables de type céphéide, observées dans le Petit Nuage de Magellan, une petite galaxie satellite de la nôtre, peuvent être utilisées comme indicateur de distance (en échelle logarithmique, leur période de pulsation apparente est proportionnelle

à leur luminosité). Cette découverte permettra bientôt, combinée avec celles d'autres étoiles variables les RR Lyrae, de mesurer la distance des amas globulaires, supposés liés à la Voie lactée, ainsi que la distance des nébuleuses spirales telles qu'Andromède (M31) ou la galaxie du Triangle (M33). C'est Harlow Shapley (Harvard) qui en 1918, donnera la première estimation moderne de la taille de la Voie lactée et de la position du Soleil dans le système : une taille globale de 300 000 a.l., et une distance au centre de 60 000 a.l. pour le Soleil, soit une très grosse galaxie (il se trompe d'un facteur trois, en particulier parce qu'il néglige l'absorption de la lumière par le milieu interstellaire). Entre 1923 et 1929, Edwin Hubble, mesurant des céphéides dans trois nébuleuses M31, M33 et NGC 6822, montrera que celles-ci sont respectivement éloignées de 900 000, 860 000 et 700 000 a.l., soit bien au-delà des limites du système de Shapley (Hubble

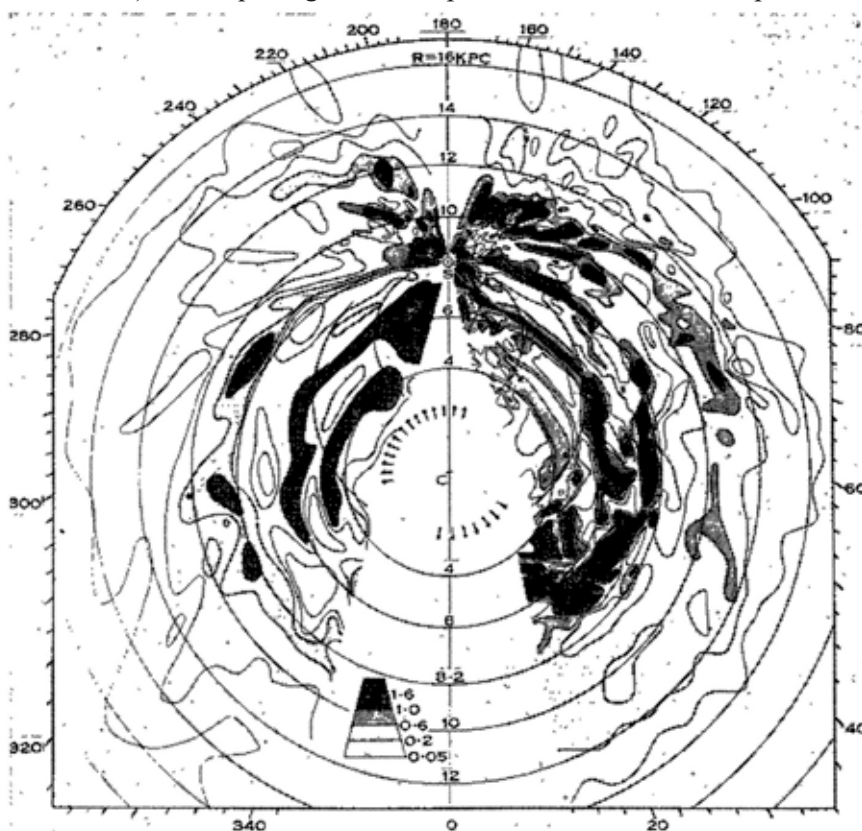


Fig.5. L'apport de la radioastronomie. La structure spirale tracée par l'émission à 21 cm de l'hydrogène neutre du milieu interstellaire (Oort, 1964). 'S' la position du Soleil, 'C' le centre galactique, les courbes de niveaux en dégradé de gris montrent la densité de gaz.

sous-estime les distances d'un facteur deux, à cause d'une mauvaise calibration de la relation période-luminosité des céphéides). En attribuant un statut de galaxies, similaires à la Voie lactée, à ces nébuleuses, la cosmologie et l'astrophysique extragalactique moderne étaient nées. L'essor de la radioastronomie et de l'astronomie infrarouge viendront compléter le tableau, en donnant accès dans la seconde moitié du vingtième siècle à la cartographie du gaz et de la poussière à grande échelle.

Nous sommes aujourd'hui dans une nouvelle ère de l'étude de la Voie lactée, où l'on parle d'archéologie galactique, c'est à dire une étude très précise de la composition chimique, des positions et des vitesses des populations d'étoiles, à partir de très grands relevés spectroscopiques, photométriques et astrométriques stellaires, tels ceux fournis par le satellite Gaia, qui permettent de remonter à l'histoire de leur formation et de leur évolution. La sensibilité des grands télescopes modernes comme le VLT et bientôt l'ELT, ou des télescopes spatiaux comme le Hubble Space Telescope ou le James Webb, permettent par ailleurs d'étudier en détails également les galaxies lointaines et de reconstituer leur évolution au cours de l'histoire cosmique.

matière noire, celui du champ magnétique galactique, ou l'influence des trous noirs super-massifs centraux, on a aujourd'hui une idée assez cohérente autour d'un concept de formation hiérarchique : les galaxies se forment par des fusions successives de plus petites galaxies, épuisant leur gaz à chaque nouvelle rencontre dans de grandes flambées d'étoiles, jusqu'à former les grandes galaxies elliptiques massives que l'on trouve au cœur des amas.

Références

Frédéric Chaberlot, *La Voie lactée : Histoire des conceptions et des modèles de notre Galaxie des temps anciens aux années 1930*, CNRS Editions, 2003.

Jacques Merleau-Ponty, *La Science de l'Univers à l'âge du positivisme*, VRIN, 1983.

Ronald Lessens, *William Herschel, musicien astronome*, Ed. Burillier, 2003.

Robert Smith, *The Expanding Universe, Astronomy's 'Great Debate' 1900-1931*, Cambridge University Press, 1982.

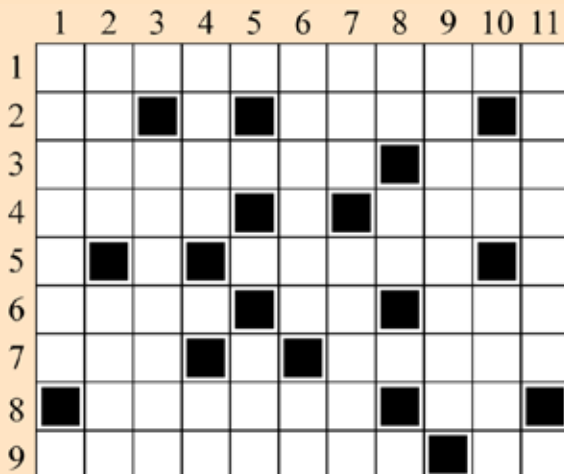
Galilée, *Le Messenger Céleste*, Collection Sources du Savoir, SEUIL.

Thomas Wright, *An Original Theory of the Universe*, American Elsevier Inc., 1971 (traduction d'après F.Chaberlot).

Emmanuel Kant, *Histoire Générale et Théorie du Ciel*, Librairie Philosophique, J.Vrin, 1984.

Même s'il reste des zones d'ombre comme le rôle de la

Mots croisés « la Galaxie »



Horizontalement

1. Ces amas entourent la Galaxie.
2. Paresseux. Frais.
3. Il a supposé que certaines « nébuleuses » ne faisaient pas partie de notre Voie lactée. Type de prépa.
4. Composant de notre Galaxie. Il a imaginé les galaxies comme des univers-îles.
5. Il fut grand en 1920 pour savoir si notre Voie lactée englobait tout l'Univers.
6. Elle fut captive du 9. Attrapé. Galaxie pour Kant.
7. La bonne période pour observer la Voie lactée. Bien aller.
8. Il a photographié de nombreuses galaxies mais aussi le cœur de la Voie lactée. Là où se couche Pollux par exemple.
9. C'est grâce à lui et à Héra qu'existe la Voie lactée. Comme un œil sans lunette.

Verticalement

1. Voie lactée.
2. Prénom ou leirruoc. Pays entre l'Aube et l'Yonne.
3. Péjoratif quand il est beau.
4. Populaires le 14 juillet. Demi gâteau.
5. Type de spirale de notre Galaxie.
6. Comme une célèbre voie. Au cœur de Halley.
7. Peut-être 13 Ga pour celui de la Galaxie. Elle a eu un tuyau.
8. Chez les Cassini, c'est Jacques. Particule ou millénaire.
9. Celle de notre Galaxie est différentielle, sauf dans le bulbe.
10. La dernière à avoir été observée dans notre Galaxie date de 1604. On y trouve des galaxies comme M65, mais pas d'amas globulaire.
11. Il a réalisé un panorama à 360° de la Voie lactée en infrarouge.

Solution p. 48



Cette page de la revue ne sera disponible à la lecture de manière gratuite seulement 3 ans après sa publication.

Si vous avez besoin de ces informations, vous pouvez adhérer au CLEA et vous abonner à la revue trimestrielle en version papier ou pdf ou acheter seulement ce numéro des Cahiers Clairaut en ligne :

<https://ventes.clea-astro.eu/>



Cette page de la revue ne sera disponible à la lecture de manière gratuite seulement 3 ans après sa publication.

Si vous avez besoin de ces informations, vous pouvez adhérer au CLEA et vous abonner à la revue trimestrielle en version papier ou pdf ou acheter seulement ce numéro des Cahiers Clairaut en ligne :

<https://ventes.clea-astro.eu/>



Cette page de la revue ne sera disponible à la lecture de manière gratuite seulement 3 ans après sa publication.

Si vous avez besoin de ces informations, vous pouvez adhérer au CLEA et vous abonner à la revue trimestrielle en version papier ou pdf ou acheter seulement ce numéro des Cahiers Clairaut en ligne :

<https://ventes.clea-astro.eu/>



Cette page de la revue ne sera disponible à la lecture de manière gratuite seulement 3 ans après sa publication.

Si vous avez besoin de ces informations, vous pouvez adhérer au CLEA et vous abonner à la revue trimestrielle en version papier ou pdf ou acheter seulement ce numéro des Cahiers Clairaut en ligne :

<https://ventes.clea-astro.eu/>



Cette page de la revue ne sera disponible à la lecture de manière gratuite seulement 3 ans après sa publication.

Si vous avez besoin de ces informations, vous pouvez adhérer au CLEA et vous abonner à la revue trimestrielle en version papier ou pdf ou acheter seulement ce numéro des Cahiers Clairaut en ligne :

<https://ventes.clea-astro.eu/>

LA GALAXIE ET SES AMAS GLOBULAIRES

Pierre Causeret

Une activité pour trouver le centre de la Galaxie à la manière de Harlow Shapley.

Dans un petit instrument, un amas globulaire apparaît comme un disque flou. C'est Charles Messier qui le premier distingua des étoiles individuelles dans un amas globulaire de la constellation du Scorpion, proche d'Antarès : « en employant un bon télescope pour l'observer, on peut percevoir de très petites étoiles », écrit-il. Il le nota en 4^e position dans son catalogue et on l'appelle depuis Messier 4 ou M4.

Peu de temps après, William Herschel, avec ses télescopes de gros diamètre (jusqu'à plus d'un mètre) résolut en étoiles de nombreux autres amas globulaires. Ce même Herschel introduisit le terme d'amas globulaire en référence à leur apparence sphérique.

Le catalogue de Messier contient 28 amas globulaires, allant de la magnitude 5,1 à 9,3.

Observer des amas globulaires

Le plus célèbre est M13, l'amas d'Hercule, numéro 13 du catalogue de Messier. Il est facile à trouver actuellement le soir au sud-ouest entre les étoiles η (êta) et ζ (dzêta) de la constellation d'Hercule, au tiers à partir de la première (voir carte). Aux jumelles, il apparaît comme une tache floue. Pour y distinguer des étoiles individuelles, il faut un instrument d'au moins 100 mm de diamètre et grossir plus de 50 fois. Dans un télescope de plus gros diamètre, 300 mm ou plus, on a l'impression de le voir en relief.

Dans cette même région du ciel, on peut rechercher M92, lui aussi dans Hercule, M15 dans Pégase ou M71 dans la Flèche.

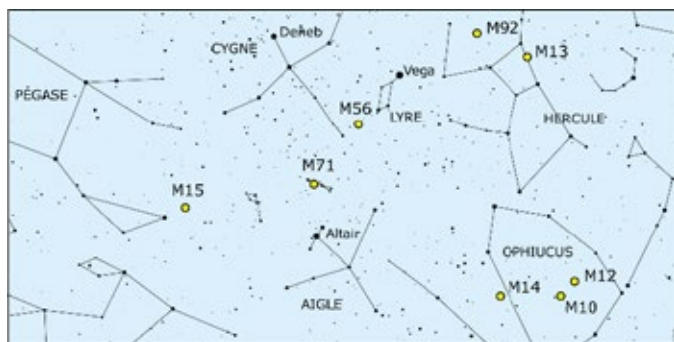


Fig.1. Quelques amas globulaires à observer en été et en automne.



Fig.2. M13, le plus connu des amas globulaires, photographié avec un Schmidt-Cassegrain de 200 mm (30 poses de 2 min, photo Francis Legrand / Cygnus 21).

Shapley et les amas globulaires

Harlow Shapley (1885-1972) est un astronome américain qui a travaillé à l'observatoire du Mont Wilson en Californie. Henrietta Leavitt venait de découvrir la relation période-luminosité des céphéides sur des étoiles du nuage de Magellan : la période de variation d'éclat d'une étoile de ce type dépend directement de sa magnitude absolue¹. Shapley calibre cette relation, ce qui permet de déterminer la distance de n'importe quelle Céphéide : sa période donne sa magnitude absolue et, en comparant celle-ci à sa magnitude visuelle, on en déduit sa distance. Il applique cette méthode à des céphéides d'amas globulaires pour calculer leur distance. Puis, connaissant la direction de ces amas globulaires et leur distance, il peut réaliser ainsi un plan en 3D de leur répartition dans l'espace. Il s'aperçoit alors qu'ils semblent entourer une région située dans la direction du Sagittaire. Il supposera qu'il s'agit du centre de notre Galaxie. Shapley imaginait ce centre à près de 50 000 années lumière, distance nettement surestimée. mais il faut dire qu'on ne connaissait pas à l'époque le phénomène d'absorption de la lumière par les nuages interstellaires. Nous vous proposons de rechercher vous-même la position du centre de la Galaxie à partir de mesures modernes des distances d'amas globulaires (voir encadré).

1 La magnitude d'une étoile est une fonction logarithmique de son éclat. La magnitude absolue est sa magnitude à une distance de 10 parsecs.

Trouvez le centre de la Galaxie à la manière de Shapley

Nous utiliserons les 28 amas globulaires du catalogue de Messier même si, à l'époque de Shapley, on en connaissait plus de 80. Les données sont biaisées du fait que Messier observait depuis l'hémisphère nord et n'avait donc pas catalogué les amas globulaires trop proches du pôle Sud céleste. Pour chaque amas globulaire, le tableau sous cet encadré donne ses coordonnées célestes ainsi que sa distance (de manière plus précise que Shapley). Que peut-on faire à partir de ses données ? Voici trois activités possibles.

1. Une carte 2D

On peut placer ces différents amas globulaires sur une carte du ciel sans tenir compte de leur distance. On s'aperçoit alors qu'ils ne sont pas répartis uniformément sur le fond du ciel. C'est un premier indice qui permet de penser que le Système solaire n'est pas au centre de la Galaxie (figure 3). Si vous voulez faire réaliser cette activité à un groupe d'élèves, vous pourrez utiliser la carte disponible sur notre site où sont indiquées les lignes de déclinaison et d'ascension droite.

2. Une carte 3D

De nombreux logiciels permettent de représenter des points dans l'espace à partir de leurs coordonnées. Il faudra parfois transformer les coordonnées sphériques en coordonnées cartésiennes (X, Y, Z) à partir de ces formules : $X = d \cos \alpha$; $Y = d \sin \alpha$; $Z = d \sin \delta$ où d est la distance de l'amas, α son ascension droite, δ sa déclinaison et (X, Y, Z) ses coordonnées cartésiennes dans un repère centré sur le Système solaire avec pour plan de référence le plan de l'équateur céleste et comme origine le point vernal.

La figure 4 donne un exemple de représentation en 3D. On peut également utiliser GeoGebra pour placer les amas globulaires.

3. Calculer la position du « centre »

On appelle ici centre, le barycentre des 28 amas globulaires affectés du même coefficient. Si on appelle A_i les différents amas de coordonnées (d, α , δ) et O la position de l'observateur, on doit avoir $\overrightarrow{OG} = \frac{1}{29} \sum \overrightarrow{OA_i}$. On peut calculer les coordonnées cartésiennes du point G en faisant simplement la moyenne des coordonnées cartésiennes (X, Y, Z) des différents amas

	α (°)	δ (°)	mag	dia (')	distance (kal)	constellation
M2	323,4	-0,8	6,5	16'	37,5	Verseau
M3	205,5	28,4	6,2	18'	33,9	Chiens de chasse
M4	245,9	-26,5	5,6	36'	7,2	Scorpion
M5	229,6	2,1	5,7	23'	24,5	Serpent
M9	259,8	-18,5	7,7	12'	25,8	Ophiuchus
M10	254,3	-4,1	6,6	20'	14,3	Ophiuchus
M12	251,8	-1,9	6,7	16'	16	Ophiuchus
M13	250,4	36,5	5,8	20'	25,1	Hercule
M14	264,4	-3,2	7,6	11'	30,3	Ophiuchus
M15	322,5	12,2	6,2	18'	33,6	Pégase
M19	255,7	-26,3	6,8	17'	28	Ophiuchus
M22	279,1	-23,9	5,1	32'	10,4	Sagittaire
M28	276,1	-24,9	6,8	11,2'	18,3	Sagittaire
M30	325,1	-23,2	7,2	12'	26,1	Capricorne
M53	198,2	18,2	7,6	13'	58	Chevelure de Bérénice
M55	295	-31	6,3	19'	17,3	Sagittaire
M56	289,2	30,2	8,3	8,8'	32,9	Lyre
M62	255,3	-30,1	6,5	15'	22,5	Ophiuchus
M68	189,9	-26,7	7,8	11'	33,3	Hydre
M69	277,8	-32,3	7,6	9,8'	29,7	Sagittaire
M70	280,8	-32,3	7,9	8'	29,3	Sagittaire
M71	298,4	18,8	8,2	7,2'	13	Flèche
M72	313,4	-12,5	9,3	6,6'	55,4	Poissons
M75	301,5	-21,9	8,5	6,8'	67,5	Sagittaire
M79	81	-24,5	7,7	9,6'	42,1	Lièvre
M80	244,3	-23	7,3	10'	32,6	Scorpion
M92	259,3	43,1	6,4	14'	26,7	Hercule
M107	248,1	-13,1	7,9	13'	20,9	Ophiuchus

Les 28 amas globulaires du catalogue de Messier.

Pour simplifier les calculs, les coordonnées ascension droite (α) et déclinaison (δ) ont été données en degrés décimaux.

La distance est en milliers d'années-lumière.

La magnitude (mag), le diamètre apparent (dia) ainsi que la constellation sont donnés à titre d'information.

Solutions

1. Carte 2D

La carte représente le ciel jusqu'à la déclinaison de -40° , on a donc toute la voûte céleste visible depuis la latitude de 50° N. Les 28 amas globulaires du catalogue de Messier y sont représentés. Ils semblent entourer la région du Sagittaire et d'Ophiucus.



Fig.3. Position des 28 amas globulaires du catalogue de Messier. Le point rouge indique la position du centre de la Galaxie telle qu'on la connaît aujourd'hui.

2. Carte 3D

Si on représente la position de ces amas globulaires en 3D, on voit bien qu'ils sont tous situés du même côté du Système solaire (figure 4).

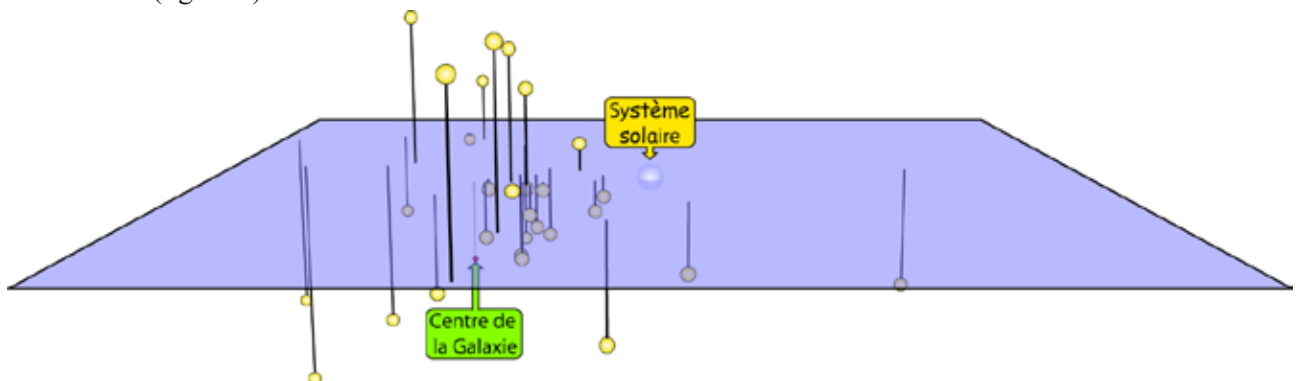


Fig.4. Répartition des 28 amas globulaires du catalogue Messier dans notre Galaxie. Le plan bleu est le plan de l'équateur céleste. On a également noté la position du centre de la Galaxie telle qu'on la connaît aujourd'hui.

3. Calcul de l'isobarycentre des amas globulaires

Un tableur permet de calculer facilement les coordonnées cartésiennes de chaque amas à partir des formules données dans l'encadré puis les coordonnées cartésiennes X_G , Y_G , Z_G de l'isobarycentre G en en faisant la moyenne.

On obtient $X_G = -0,21$; $Y_G = -19,12$; $Z_G = -3,19$.

Il est ensuite facile de déterminer la distance de G en calculant $\sqrt{X_G^2 + Y_G^2 + Z_G^2}$.

On trouve 19,4 kal soit 19 400 années-lumière.

Le centre de la Galaxie est donné à plus de 26 000 années-lumière. La différence est importante mais on a néanmoins obtenu le bon ordre de grandeur.

On peut ensuite calculer les coordonnées équatoriales de notre isobarycentre.

Pour l'ascension droite α , on utilise à nouveau ces deux formules : $X = d \cos \alpha$; $Y = d \sin \alpha$.

Ce qui donne $\alpha = \text{atan2}(Y_G, X_G)$. Attention, dans les tableurs, l'ordre des paramètres est en général inversé et il faut écrire $\text{atan2}(X_G, Y_G)$.

Complément

Extrait d'un article de A. Brun paru dans L'Astronomie en 1973 page 210.

Dans une série de lumineuses études parues dans les célèbres "Contributions" du Mont Wilson, Shapley fit connaître les résultats de ses recherches sur la structure de la Voie lactée et du système des amas globulaires qui lui est associé. Il montra que ces amas, au nombre d'une centaine, étaient presque tous groupés dans une moitié du ciel (ce qui, chose extraordinaire, avait été peu remarqué auparavant). Il en conclut que le Soleil occupe une position très excentrique dans notre univers stellaire contrairement à l'opinion généralement admise que le Soleil était au voisinage du centre de la Voie lactée. Il prouva que l'ensemble des amas globulaires forme un immense système sphérique concentrique à la masse des étoiles, qui, elles, forment un disque circulaire aplati de 100 000 a.l. de diamètre et relativement très mince, sauf en son centre, le moyeu, qui peut atteindre le 1/140 du diamètre. Il plaçait le Soleil à 50 000 a.l. du centre, ce qui a été reconnu excessif. Les mesures modernes ont ramené ce chiffre à 30 000 environ.

Les conclusions de Shapley étaient basées sur des arguments si solides qu'ils furent adoptés par presque tous les astronomes. Toutefois, les dimensions de la Voie lactée paraissaient si énormes que beaucoup pensaient qu'elles étaient exagérées et il y eut de vives controverses vers les années 1920, notamment avec Heber Curtis, astronome à l'observatoire Lick, qui trouvait que ces dimensions étaient dix fois trop grandes.

Documents disponibles sur le site clea-astro.eu (cliquer sur productions récentes puis sur 183).

* *Tableau des amas globulaires du catalogue de Messier et des principaux amas globulaires NGC avec coordonnées et distance.*

* *Carte du ciel jusqu'à la déclinaison -40° avec lignes de même déclinaison et de même ascension droite pour noter la position des amas globulaires.*

Un autre article des Cahiers Clairaut sur Shapley et les amas globulaires

Après avoir terminé cet article, je me suis aperçu que Jean-Noël Terry avait écrit sur le même thème mais en partant des données de Shapley. C'est dans le numéro 103 des Cahiers Clairaut (2003) disponible en ligne sur notre site (archives des CC).

La déclinaison δ s'obtient avec l'autre formule : $Z = d \sin \delta$.

On trouve pour α , 269° ou 17 h 57 min et pour δ , -10° .

Ce qui donne un point situé un peu au-dessus du Sagittaire, du côté de la tête du Serpent, à une vingtaine de degrés au nord du centre galactique. Cet écart peut se comprendre puisque Messier n'observait pas les amas globulaires trop au sud.

L'étude des 28 amas globulaires de Messier permet donc d'avoir une assez bonne idée de la position du centre de la Galaxie. Cette idée est renforcée par le fait que la Voie lactée apparaît beaucoup plus lumineuse dans la direction du Sagittaire.

On peut supposer que si l'on prend davantage d'amas globulaires, les résultats seront meilleurs. J'ai essayé d'utiliser une liste de 58 amas globulaires de la Galaxie trouvée sur Wikipedia et, curieusement, les résultats sont moins bons surtout pour la distance. L'isobarycentre est plus proche, peut-être parce qu'on ajoute des amas globulaires lointains et que, parmi ceux-ci, il manque une partie de ceux qui sont situés derrière le centre galactique, cachés par les poussières.



Cette page de la revue ne sera disponible à la lecture de manière gratuite seulement 3 ans après sa publication.

Si vous avez besoin de ces informations, vous pouvez adhérer au CLEA et vous abonner à la revue trimestrielle en version papier ou pdf ou acheter seulement ce numéro des Cahiers Clairaut en ligne :

<https://ventes.clea-astro.eu/>