



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.

Le **CLEA** a reçu l'agrément national des associations éducatives complémentaires de l'enseignement public.

Présidents d'honneur

Lucienne Gouguenheim
Georges Paturel
Cécile Ferrari

Bureau du CLEA pour 2025

Président : Frédéric Pitout
Vice-présidente : Léa Griton
Secrétaire : Grégory Silva
Secrétaire adjointe : Alina Cristian
Trésorier : Jean-Louis Coustillet
Trésorière adjointe : Sylvie Thiault

Responsables des groupes

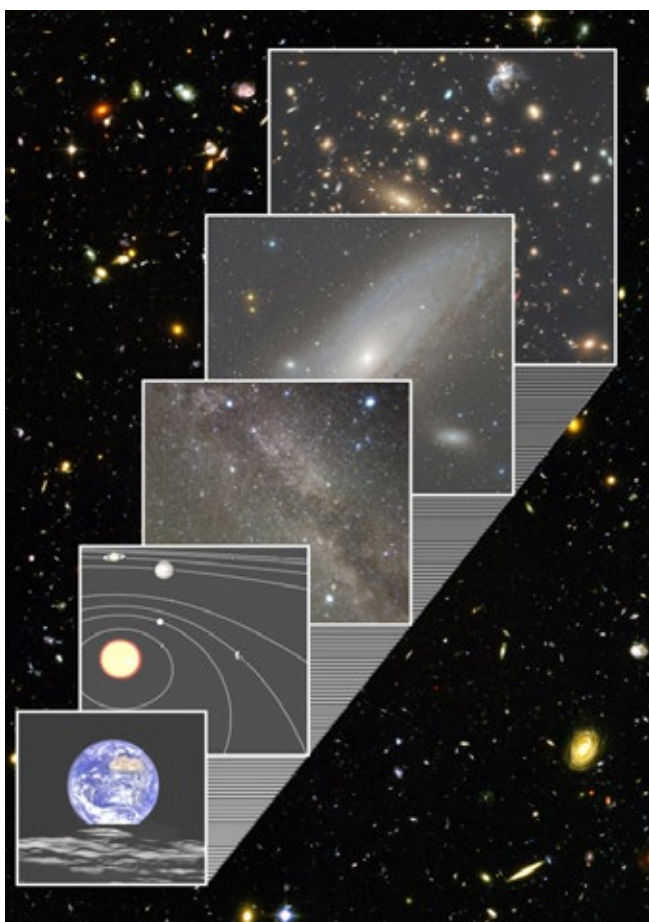
Cahiers Clairaut : Christian Larcher

Productions pédagogiques : Pierre Causeret

École d'été d'astronomie : Frédéric Pitout

Site web : Jean-Michel Vienney

Réseau de correspondants : Sébastien Dhérissard
et Floriane Michel



Merci à celles et ceux qui ont permis la réalisation de ce numéro des Cahiers Clairaut, nous citerons : Francis Berthomieu, Alain Brémond, Pierre Causeret, Nicolas Clerc, Daniel Descout, Michel Dumont, Paloma Huppert, François Hurter, Christian Larcher, Chantal Lecoutre, Georges Lecoutre, James Lequeux, Frédéric Pitout, Jean Ripert, Lionel Ruiz, Béatrice Sandré.

La couverture illustre les distances dans l'Univers, le thème du dossier de ce numéro. Cinq images représentent des objets de plus en plus lointains.

- 1. La Lune au premier plan, distante de près de 400 000 km avec la Terre au fond (image LRO).
- 2. Plan du Système solaire. On arrive jusqu'à Neptune à plus de 4 milliards de km.
- 3. Le triangle d'été avec Véga, Deneb et Altaïr. Deneb est à plus de 1 500 années-lumière, c'est 3 millions de fois la distance de Neptune.
- 4. La galaxie d'Andromède à 2,5 millions d'années-lumière, on a multiplié la distance de Deneb par 1600.
- 5. Abell 3192 constitué de deux amas de galaxies situés à 2,3 et 5,4 milliards d'années-lumière, on est encore 1000 fois plus loin. L'image de fond est le Hubble ultra deep field.

Crédits 1 : NASA. 2 : SOHO, NASA, HST (Soleil et planètes). 3 : PC/Clea. 4. AR/Cygnus21. 5. ESA/Hubble&NASA. Image de fond : NASA ESA.

Les Cahiers Clairaut

Été 2025

Éditorial

Depuis des temps immémoriaux l'humanité a toujours cherché à définir, comprendre et maîtriser le monde proche et lointain qui l'entoure. Pour cela il était indispensable de pouvoir évaluer des distances. Dès l'Antiquité le principe de la triangulation permettait de mesurer les distances inaccessibles en utilisant une base bien adaptée et surtout en réalisant des mesures d'angles aussi précises que possible. Les remarquables travaux d'Ératosthène ont tout d'abord permis de mieux connaître notre planète. Ce qui permit de choisir le rayon de la Terre comme base.

Pour des astres plus lointains on utilisa, comme nouvelle base, le rayon de l'orbite de la Terre autour du Soleil quand enfin il fut connu. À la notion de distance exprimée en kilomètres on substitua celle de parallaxe c'est-à-dire de valeur d'un angle.

À présent pour déterminer la position des objets célestes (étoiles ou galaxies lointaines) on utilise des méthodes cosmologiques décrites dans le thème de ce numéro. Ces distances cosmologiques sont indispensables pour connaître les valeurs caractéristiques de chaque objet, comme sa taille ou la quantité d'énergie qu'il rayonne.

Afin d'avoir une bonne compréhension de ces phénomènes nous vous proposons un glossaire des principaux termes techniques à la page 10.

Au moment où nous nous apprêtons à boucler ce nouveau numéro nous avons la grande tristesse d'apprendre que Daniel Bardin nous a quittés. Avec lui part l'un des membres historiques à l'origine du CLEA. Les apports de Daniel furent innombrables dans des domaines extrêmement variés.

Sa simplicité, sa gentillesse, sa bonne humeur constante, sa passion à transmettre ses connaissances et ses nombreux savoir-faire ont marqué des générations de stagiaires. Nombreux sont ceux qui se souviendront longtemps des chansons qu'il composait et interprétait en s'accompagnant à la guitare à la fin des écoles d'été.

Christian Larcher pour l'équipe



Sommaire

Actualités

Brèves d'observatoires et autres nouvelles

Frédéric Pitout 2

Avec nos élèves

Réalisation d'une terrella

Élèves de A. Durieux 5

Dossier : distances dans l'Univers

Notions de base

Glossaire distances dans l'Univers

Pierre Causeret 10

Article de fond

Les distances dans l'Univers

James Lequeux 12

Les distances dans les productions du CLEA 16

Exercice

La distance de ϵ Éridan

Béatrice Sandré 17

Histoire

Le « Grand Débat »

Alain Brémond 19

Article de fond

Distance des céphéides

Béatrice Sandré 23

Mots croisés 27

Article de fond

Les distances cosmologiques

Nicolas Clerc 28

Avec nos élèves

Des maquettes de l'Univers

Pierre Causeret 33

Observation

Le ciel de l'été 2025

Pierre Causeret 34

Article de fond

Les supernovæ de type II

Daniel Descout 35

Lecture pour la marquise

Exoplanète / Aurores

Christian Larcher 41

Information

Centre Astro de l'OHP

Paloma Huppert 42

Vie associative

Hommage à Daniel Bardin

Francis Berthomieu, Jean Ripert 47

« Et si ? », éclipse du 07/09/2025, solutions jeu 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/>

RÉALISATION D'UNE TERRELLA

Billel Hassainil, Kaan Karacelik, Emy Morent, Giuliano Van Caemerbeke
élèves du lycée Colbert de Tourcoing

Un pari audacieux tenté par des élèves du lycée Colbert de Tourcoing dans le cadre des Olympiades de physique : reconstituer un dispositif permettant de simuler des aurores polaires comme Kristian Birkeland l'avait fait au tout début du xx^e siècle avec sa « Terrella ».

Nous sommes un groupe de quatre adolescents issus de trois classes différentes : Emy est en seconde générale, Kaan et Giuliano en première générale avec spécialité physique-chimie, Billel est en terminale générale avec spécialité physique-chimie.

Voici l'histoire de notre engagement dans ce projet.

Cela a commencé lorsque Billel, en classe de première cette année-là, a souhaité réaliser une boule à plasma afin de participer aux Olympiades de physique. Cela n'étant pas facile à réaliser et étant peu aisé à comprendre car les composants ne sont pas étudiés dans les programmes de lycée, notre professeur de physique et de chimie lui a proposé de travailler sur le thème des aurores boréales dans laquelle la notion de plasma est également présente. Billel a donc travaillé d'arrache-pied. Un an plus tard, il a eu besoin de camarades avec qui développer ses recherches. Il a passé une petite annonce dans le lycée et c'est ainsi que Giuliano, Kaan et Emy l'ont rejoint pour compléter le quatuor. Kaan était d'autant plus intéressé que des aurores étaient visibles en France depuis plusieurs semaines. Il avait réussi à photographier une aurore boréale depuis son jardin de Roncq (Nord), le soir de l'orage magnétique du 10 mai 2024 (voir figure 1).



Fig.1. Aurore à Roncq (Nord) la nuit du 10 au 11 mai 2024, iPhone 11 Photo Kaan.

Nous avons donc travaillé à la compréhension de ce beau phénomène. Nous avons aussi eu la chance de discuter avec Jean Lilensten, spécialiste français du sujet travaillant à l'Institut de planétologie et d'astrophysique de Grenoble (IPAG).

Plan

- Qu'est-ce qu'une aurore polaire ?
- Comment les simuler ?
- Comment simuler le rôle du champ magnétique terrestre ?

L'aurore polaire

L'événement d'aurore polaire ayant été bien décrit dans le n°186 des Cahiers Clairaut, nous allons donc vous présenter le dispositif principal utilisé lors du concours pour simuler des aurores polaires. Ce dispositif est inspiré de l'invention de la « Terrella » de Kristian Birkeland (voir figure 2).

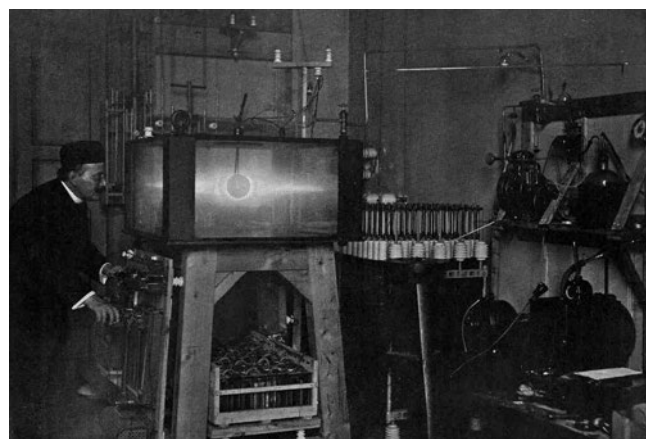


Fig.2. Kristian Birkeland et sa Terrella (crédits Wikipédia).

Comment simuler l'interaction entre particules du vent solaire et particules de l'atmosphère ?

Nous savons qu'une aurore boréale se produit lorsqu'il y a des particules éjectées à grande vitesse du Soleil et

qu'elles interagissent avec les composantes de la haute atmosphère terrestre.

Pour simuler ce vent solaire, nous avons décidé d'utiliser un générateur haute tension (6 000 V) relié à deux électrodes placées sous une cloche à vide (voir figure 3).

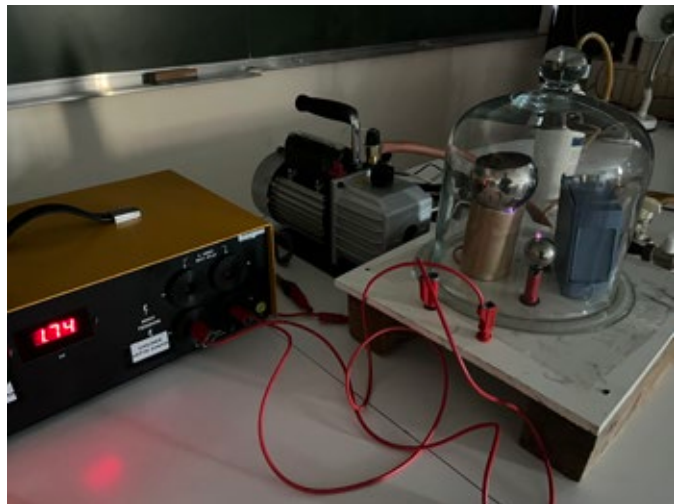


Fig.3. Photo du dispositif. Les deux électrodes sont issues du matériel d'électrostatique et sont alimentées par un générateur haute tension (6 kV). La grande peut accueillir un aimant. Sous la cloche à vide, nous avons aussi placé un pressiomètre. Crédit A Durieux.

Ces deux électrodes sont placées sous un vide partiel pour recréer les conditions de haute atmosphère. Lorsqu'on descend sous une pression de 50 hPa on commence à voir apparaître une lueur rose entre les deux électrodes (voir figure 4).



Fig.1. Un plasma s'établit entre les deux électrodes. La désexcitation des ions N_2^+ produit la lumière rose. Crédit A Durieux.

Nous avons caractérisé cette lumière à l'aide d'un spectrophotomètre et Jean Lilensten nous a indiqué qu'il s'agissait de la lumière produite par la désexcitation du diazote ionisé N_2^+ .

Sous l'intense champ électrique, des électrons sont arrachés et accélérés. Ils possèdent une énergie suffisante (voir encadré A) pour ioniser le diazote présent et former

l'ion N_2^+ . Par effet cascade, cet ion peut aider à la formation d'un autre ion et ainsi de suite : on a ainsi la formation d'un plasma. La désexcitation de ces particules nous donne cette lumière rose (voir encadré B).

À force de faire des essais, le plasma a commencé à faire fondre les bornes électriques de notre plateau et les décharges ne se faisaient plus entre les deux électrodes mais entre la base des fils électriques et le plateau métallique. (voir figure 5).



Fig.5. Le plastique des bornes électriques présentes sur le plateau d'origine a fondu à cause de décharges observées entre la base des fils électriques et le métal du plateau. Crédit A Durieux.

Nous ne parvenions plus à utiliser notre Terrella. Nous avons donc dû reconstruire notre propre plateau dans un matériau isolant : une plaque murale pour cabine de douche (voir figure 6). Ce choix nous a créé un autre problème, comme nous le verrons après...

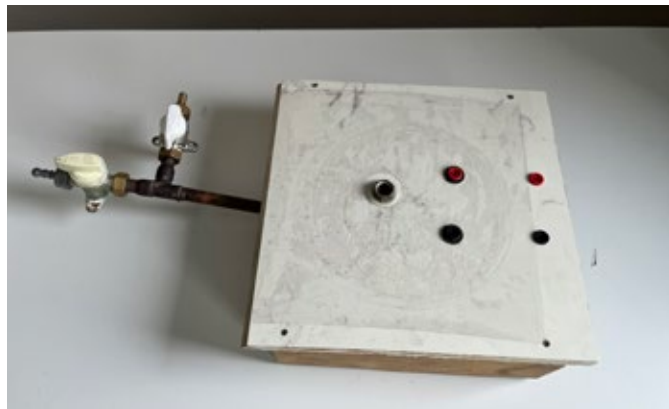


Fig.6. Notre nouveau plateau, créé dans un matériau isolant. Crédit A Durieux.

Simuler le rôle du champ magnétique terrestre

Mais pour simuler une aurore boréale, il faut aussi simuler le champ magnétique terrestre car il joue un rôle important en déviant les particules du vent solaire. Comme les lignes de champ magnétique de la Terre sont comparables à celle d'un aimant droit, nous avons donc placé un aimant droit à l'intérieur de l'une des électrodes, qui était creuse (voir figure 3). Cependant cette électrode étant composée

d'acier, les lignes de champ magnétique n'étaient plus du tout celles d'un aimant droit et cela ne nous permettait pas de prévoir la déviation des électrons. Il aurait fallu que nous disposions d'une électrode creuse dans un métal non magnétique, en aluminium par exemple.

Utiliser l'aimant directement en tant qu'électrode aurait pu être envisagé mais dans ce cas, nous ne pouvions plus espérer simuler les ovales auroraux. En effet, les ovales auroraux existent car le champ magnétique terrestre est créé au centre de la Terre et non aux pôles. Au lieu de chercher en vain une électrode creuse convenable, nous aurions plutôt dû essayer quand même d'utiliser notre aimant comme électrode...

De toutes façons, Jean Lilensten nous a fait comprendre que notre Terrella ne nous aurait pas permis d'obtenir ces ovales : d'une part, parce que nous ne parvenions pas à reproduire le champ magnétique d'un aimant droit, d'autre part parce que le libre parcours moyen des électrons était trop faible dans notre dispositif (voir encadré A).

Monsieur Lilensten nous a recommandé de baisser la pression à quelques pascals de manière à augmenter le libre parcours moyen et permettre ainsi au plasma de s'étendre et de pouvoir faire le tour de l'électrode (et ainsi de simuler les ovales auroraux).

Le problème c'est que le plateau sous notre cloche à vide

se déformait lorsque le vide était trop poussé et cela créait des fuites sous la cloche à vide. Cela était dû à notre choix de matériau pour refaire le plateau.

Nous n'avons pas eu le temps de le renforcer ni d'augmenter l'étanchéité sous la cloche à l'aide d'un joint torique pour le concours.

Pour illustrer l'influence du champ magnétique lors du concours nous avons utilisé un tube de Perrin et des bobines de Helmholtz (voir figure 7). Ce dispositif permet d'envoyer des électrons, à l'aide d'un canon à électrons, dans une ampoule contenant un gaz raréfié. Ce dernier émet une lueur bleutée à chaque contact avec un électron. L'ensemble de ce phénomène se passe également sous un vide partiel.

De plus, autour de cette ampoule sont placées deux bobines de Helmholtz permettant de créer un champ magnétique. Ce champ magnétique est essentiel car il permet de diriger le faisceau d'électrons lorsqu'on tourne l'ampoule et d'obtenir un cercle. Voilà qui nous ramenait aux ovales auroraux.

Bilan

Nous avons réussi à reproduire et à simuler une partie des paramètres intervenant dans les aurores polaires : l'accélération des particules et l'interaction avec de la matière sous vide partiel, créant de la lumière. Cependant, la complexité du phénomène ne nous permettait pas de tout expliquer et encore moins dans une seule manip. Certains points auraient pu être améliorés, nous aurions par exemple aimé montrer que l'introduction de gaz différents dans la cloche permettait un changement de couleurs des aurores (cela a été testé avec du CO_2 mais cela n'a pas été probant lors du concours). Nous aurions aussi aimé pouvoir mieux illustrer le rôle du champ magnétique terrestre (et il y a aussi un champ magnétique porté par les particules de vent solaire).

Notre objectif de départ : comprendre pourquoi des aurores boréales se sont produites dans le Nord de la France, a abouti. Nous avons réussi à réaliser, à l'aide du matériel présent au lycée, un dispositif permettant de simuler des aurores boréales et d'obtenir des résultats exploitables (par analyse spectrale).

La rencontre, fin janvier 2025 à Marseille, d'autres élèves passionnés de science comme nous, à l'occasion des Olympiades de physique, fut une belle expérience. Lors de ce concours, nous avons exposé les points suivants :

- qu'est-ce qu'une aurore polaire ?
- pourquoi a-t-on pu en observer en France ces derniers temps ?
- pourquoi voit-on différentes couleurs ?
- comment en simuler au lycée ?

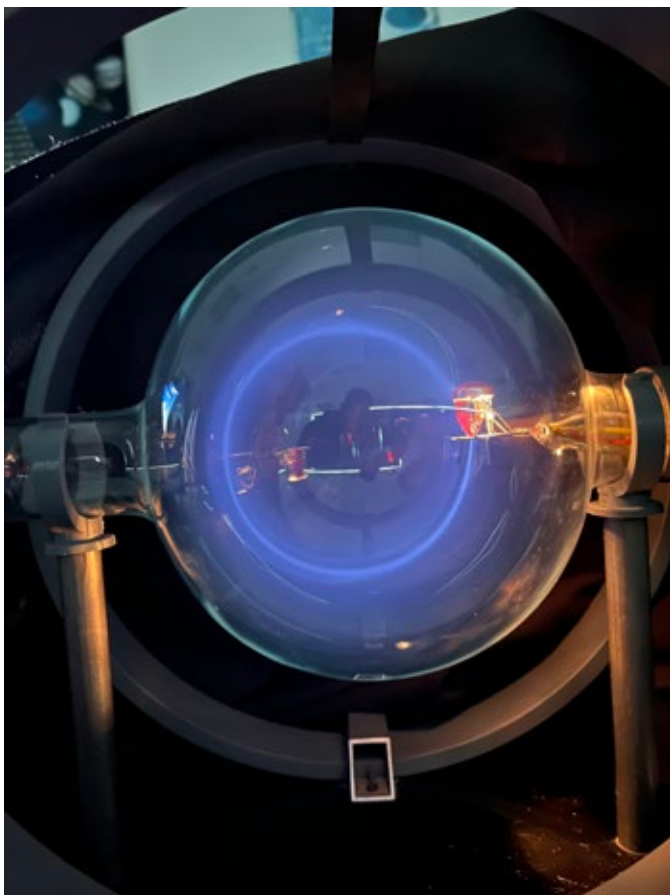


Fig.7. Tube de Perrin utilisé avec les bobines de Helmholtz. Crédit A Durieux.

Nous sommes très fiers des résultats intéressants que nous avons réussi à obtenir tout au long de ce projet même si nous sommes conscients qu'il reste des points à améliorer.

Nous tenons à adresser nos remerciements aux personnes qui nous ont aidés dans la réalisation de ce projet : Monsieur Lilensten mais aussi Monsieur Pujol, de l'université de Lille qui nous a prêté un spectrophotomètre à fibre optique. Nous remercions particulièrement notre professeur de physique-chimie, Monsieur Durieux : sa

disponibilité, ses connaissances et son soutien ont été des éléments essentiels qui ont permis de mener à bien cette initiative. Sans toutes ces contributions, ce projet n'aurait pas pu voir le jour. Vous pourrez retrouver ci-dessous la bibliographie que nous avons utilisée. Nous espérons également que vous avez pris plaisir à lire ce texte et que, tout comme nous, vous avez été émerveillé par le fascinant sujet des aurores boréales ! ■

Encadré A : libre parcours moyen et énergie

Dans un matériau, la distance maximale que peut parcourir une particule sans en rencontrer une autre est appelée libre parcours moyen, noté ici λ . Il dépend de la pureté du matériau et de sa température.

Calcul du libre parcours moyen dans le diazote :

$$T = 293 \text{ K}$$

$$\sigma = 315 \text{ pm} = 3,15 \cdot 10^{-10} \text{ m (diamètre de la molécule)}$$

$$\lambda = \frac{kT}{\pi\sqrt{2}\sigma^2 p} = \frac{1,38 \cdot 10^{-22} \times 293}{\pi\sqrt{2}(3,15 \cdot 10^{-10})^2 \times p} \approx \frac{9 \cdot 10^{-2}}{p}$$

$$\text{Si } p = 1000 \text{ hPa} \quad \text{alors } \lambda = 9 \cdot 10^{-8} \text{ m} = 0,09 \text{ } \mu\text{m}$$

$$\text{Si } p = 50 \text{ hPa} \quad \text{alors } \lambda = 1,8 \cdot 10^{-5} \text{ m} = 18 \text{ } \mu\text{m}$$

Dans notre expérience, les électrons se trouvent sous la cloche entre les deux électrodes d'un générateur haute tension : ils sont soumis à la force électrique $\vec{F} = q\vec{E}$ où $\vec{E}$ est le champ électrique existant entre les deux électrodes.

On peut calculer le travail de cette force le long du libre parcours moyen :

$$W_\lambda(\vec{F}_e) = F_e \times \lambda = |q| \times E \times \lambda$$

Avec :

$$e = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ C}$$

$$E = \frac{U}{d} = \frac{5000}{0,05} = 1 \times 10^5 \text{ V/m}$$

$$\lambda = 18 \text{ } \mu\text{m} = 1,8 \times 10^{-5} \text{ m}$$

$$\text{On obtient } W_\lambda(\vec{F}_e) = 1,8 \text{ eV}$$

On trouve une valeur qui est de l'ordre de grandeur des transitions entre les niveaux d'énergie des molécules présentes. Cela justifie pourquoi nous voyons une lumière apparaître lors de notre expérience.

Encadré B : calcul pour la transition énergétique E2 - E1 de l'azote

$$\Delta E = \frac{h \times c}{\lambda} = 3,1 \text{ eV}$$

$$\lambda = \frac{h \times c}{\Delta E} \approx \frac{6,63 \cdot 10^{-34} \times 3 \cdot 10^8}{(3,1 \times 1,6 \cdot 10^{-19})} \approx 4,01 \cdot 10^{-7} \text{ m}$$

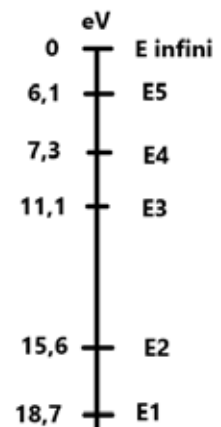
$$\lambda \approx 401 \text{ nm}$$

Cela correspond à la longueur d'onde du violet.

L'atome d'azote émet donc du violet lorsqu'il effectue la transition de l'étage E2-E1.

Remarque : L'ion N_2^+ possède des niveaux d'énergie démultipliés, c'est-à-dire qu'il y a beaucoup plus de niveaux d'énergie autour des niveaux de l'atome d'azote. Son spectre contient aussi des raies de longueur d'onde proches de 400 nm.

DIAGRAMME NIVEAU D'ENERGIE DE L'ATOME D'AZOTE



Bibliographie et sources :

- Planeterrella.osug.fr
- Wikipedia sur Kristian Birkeland et les aurores boréales.
- Journal en ligne *le Point* pour les aurores aperçues dans le Nord (2/12/2023).
https://www.lepoint.fr/science/des-aurores-boreales-illuminent-le-ciel-du-nord-de-la-france-02-12-2023-2545473_25.php

- Conférence RCE 2018 - Les aurores dans le ciel et en laboratoire avec la Terrella » tenue par Antoine Viel.
<https://www.youtube.com/watch?v=ayv6nPs8tZ0>
- *Les aventures d'Anselme Lanturlu: Pour quelques ampères de plus* de Jean-Pierre Petit.
<https://www.savoir-sans-frontieres.com/JPP/telechargeables/Francais/amperes.htm>
- Source Agence spatiale canadienne :
<https://www.asc-csa.gc.ca/fra/astronomie/auores-boreales/qu-est-ce-qu-une-aurore-boreale.asp>
<https://gq.mines.gouv.qc.ca/geologie-pour-tous/geomagnetisme/>
- aurora-maniacs.com , indice Kp.
- Cahier Clairaut 186 de juin 2024.



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 DISTANCES DANS L'UNIVERS

James Lequeux, Observatoire de Paris

L'article décrit les différentes méthodes historiques utilisées depuis le XVI^e siècle pour déterminer la distance des astres de notre Galaxie puis celles qui se trouvent bien au-delà. Il rappelle la controverse qui eut lieu en 1920 entre Shapley et Curtis sur la possibilité des « univers-îles » situés bien au-delà de notre Galaxie.

Jusqu'au XVI^e siècle, on ne savait à peu près rien sur la distance des objets astronomiques, même ceux du Système solaire à l'exception de la Lune. Tycho Brahe est un des premiers, sinon le premier, à avoir pensé que si un astre, par exemple la comète qu'il était en train d'étudier, occupe la même position par rapport aux étoiles voisines lorsqu'on l'observe au même moment depuis deux lieux distants l'un de l'autre, il doit être lointain : il a ainsi montré que cette comète, de même que la supernova qu'il avait découvert en 1572, étaient des objets beaucoup plus éloignés que la Lune. Le même raisonnement a été utilisé en 1672 par Cassini et Richer en France pour obtenir la distance de Mars lorsqu'elle était au plus près de la Terre¹. Les deux premiers ont vu que sa position était légèrement décalée par rapport aux étoiles voisines selon qu'on l'observait depuis Paris ou depuis Cayenne en Guyane : c'est l'effet de parallaxe. Ils en ont déduit sa distance, puis en appliquant les lois de Kepler la distance de la Terre au Soleil, certes peu précise mais 20 fois plus grande que ce qu'on imaginait à l'époque.

Les distances dans notre Galaxie, la Voie lactée

Les étoiles étant énormément plus lointaines que le Soleil, il est évidemment difficile d'obtenir leur distance. Pour ceci, il a fallu sélectionner des étoiles très brillantes ayant un mouvement propre important, c'est-à-dire se déplaçant rapidement sur le ciel. Elles sont donc certainement relativement assez proches, et observer leur position par rapport aux étoiles voisines beaucoup plus faibles, que l'on pouvait donc à bon droit supposer bien plus lointaines. Cette fois, l'observation à partir de deux lieux sur la surface de la Terre n'avait aucune chance de donner un résultat, et il fallait faire l'observation à partir de positions éloignées de la Terre sur son orbite, donc à des moments différents de l'année. Les premiers résultats positifs sont arrivés en 1838, grâce au perfectionnement des instruments d'observation qui permettaient une meilleure précision dans la mesure des positions des étoiles. Entre 1837 et 1838, Friedrich Wilhelm Bessel (1784-1846) a ainsi pu mesurer la distance de l'étoile 61

Cygni, tandis qu'Otto Wilhelm von Struve (1819-1905) obtenait celle de Véga et Thomas Maclear (1794-1879) celle de α Centauri, qui s'est plus tard révélée une des deux étoiles les plus proches de nous.

On exprime généralement la distance des étoiles par leur parallaxe, c'est à dire l'angle sous lequel on verrait le rayon de l'orbite terrestre depuis l'étoile². On peut aussi l'exprimer en parsec, qui comme son nom l'indique est la distance d'un objet depuis lequel on verrait ce rayon sous un angle de 1 seconde de degré. Par exemple, la parallaxe de α Centauri est de 0,751", correspondant à une distance de $1/0,751 = 1,33$ parsec. Le parsec est l'unité de distance utilisée par les astronomes professionnels, tandis que les astronomes amateurs tendent à utiliser l'année-lumière, la distance parcourue par la lumière pendant 1 an, qui parle peut-être mieux à l'imagination. 1 parsec = 3,26 années-lumière.

Les progrès dans la mesure de la parallaxe des étoiles ont été assez lents, car c'est une mesure difficile. Cependant, en 1924, le *General Catalogue* de Schlesinger en recensait 1870. Puis vinrent les satellites astrométriques Hipparcos, et plus récemment Gaia, qui mesuraient plusieurs fois dans l'année la position des étoiles dans un système de référence basé sur la position des quasars, lesquels sont des objets extrêmement éloignés et donc fixes à la précision des mesures. Hipparcos ne couvrait pas la totalité de la Galaxie, ce qui n'est pas le cas de Gaia qui a mesuré la parallaxe de près de 2 milliards d'étoiles, dont certaines sont en dehors de notre Galaxie et appartiennent aux Nuages de Magellan, deux galaxies satellites de la nôtre situées à une cinquantaine de kiloparsecs (kpc) de nous.

Il existe d'autres méthodes pour obtenir des distances dans notre Galaxie, dont l'intérêt est qu'elles permettent d'accéder à d'autres objets que les étoiles. Comme le disque galactique tourne sur lui-même en se déformant, il y a une relation entre la distance et la vitesse d'éloignement ou de rapprochement (la vitesse radiale) des objets dans une direction donnée : on peut la mettre à profit pour avoir la distance des objets dont la vitesse radiale est connue

¹ Voir l'article sur le sujet dans le n° 137 des Cahiers Clairaut (2012) accessible en ligne.

² Voir schéma page 11.

(figure 1). C'est le cas, par exemple des nébuleuses gazeuses comme la fameuse nébuleuse d'Orion, dont on peut obtenir la vitesse radiale en mesurant le déplacement de leurs raies d'émission par effet Doppler-Fizeau ; ceci peut se faire aussi bien en optique qu'en radio car le gaz

ionisé émet aussi des raies de recombinaison radio de l'hydrogène, de l'hélium et du carbone, ce qui permet d'atteindre des objets qui sont invisibles optiquement en raison de l'absorption de la lumière par les poussières interstellaires.

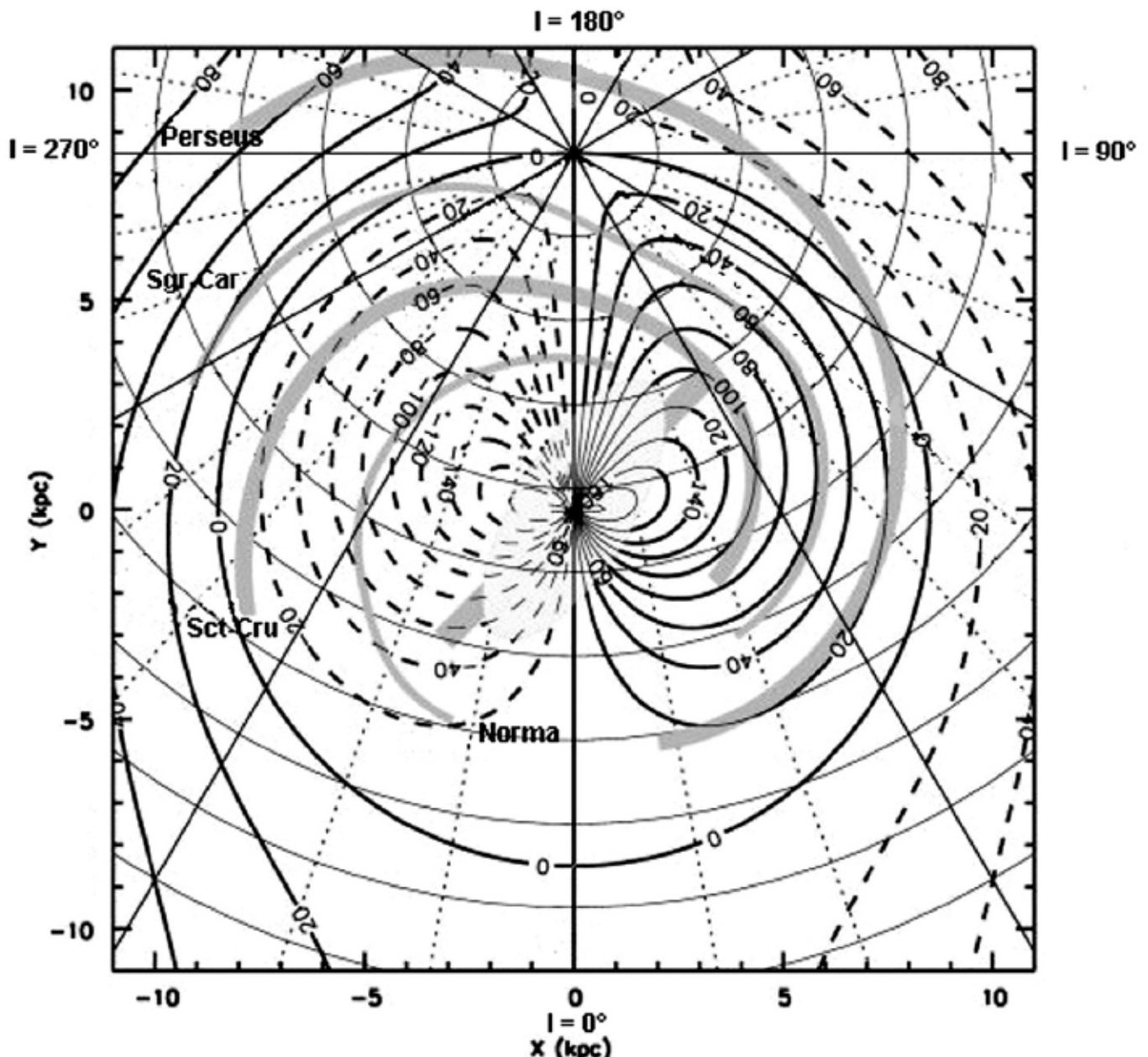


Fig.1. Le champ de vitesses radiales du disque galactique. Nous sommes à la position $x = 0$, $y = 8,5$ kpc, et les vitesses sont exprimées par rapport à nous. Le Centre galactique est à la position (0, 0). Les lignes d'égale vitesse positives (éloignement) sont en traits pleins, celles de vitesses négatives (rapprochement) en traits interrompus. Les vitesses radiales sont indiquées en km/s. On voit que les lignes de visées dans la région intérieure au Soleil coupent deux fois les iso-vitesses, ce qui peut conduire à une ambiguïté lorsqu'on utilise la vitesse radiale d'un objet pour en déduire sa distance. Les principaux bras spiraux sont indiqués en grisé, avec leur nom.

Le gaz interstellaire du disque galactique, qui est principalement composé d'hydrogène atomique concentré dans les bras de spirale et qui produit la raie radio à 21 cm de longueur d'onde, peut aussi être utilisé pour obtenir la distance d'objets comme les nébuleuses gazeuses, les restes de supernovæ ou les pulsars, qui émettent des ondes radio dans le continuum : ces ondes sont absorbées par l'hydrogène atomique à 21 cm, ce qui permet de savoir derrière quels nuages interstellaires se trouve la source. La figure 2 en donne un exemple. Les distances obtenues

par vitesse radiale sont forcément peu précises en raison des mouvement aléatoires des sources et des nuages de gaz absorbants, mais c'est mieux que rien quand on n'a pas d'autre critère de distance, et elles se sont révélées très utiles pour produire les cartes du disque galactique et de ses différents constituants.

Une méthode bien plus précise, mise en service en 1981, est réservée à une catégorie d'objets bien particulière, les étoiles massives en formation. Celles-ci expulsent de

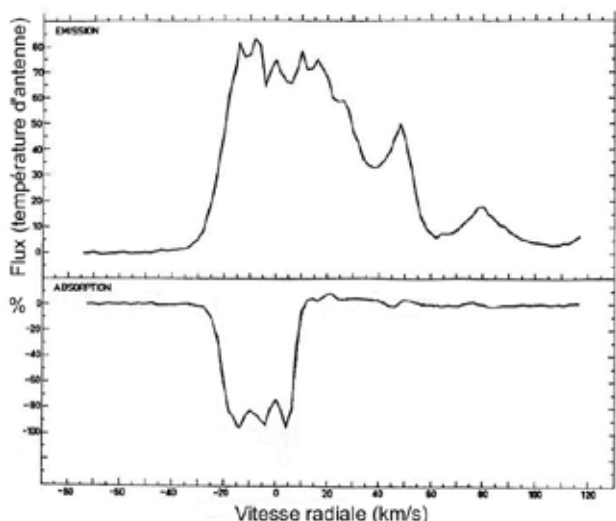


Fig.2. Profil de la raie 21 cm en absorption (en bas) devant la radiosource RCW 49, qui est une nébuleuse gazeuse invisible optiquement (longitude galactique $284,3^\circ$), et en émission au voisinage immédiat (en haut). Il n'y a pas d'absorption aux vitesses radiales supérieures à 5 km/s, ce qui permet d'avoir sa distance approximative, soit 5 kpc. Adapté de Goss et al. (1972).

temps en temps des petits globules de gaz contenant de la vapeur d'eau, lesquels produisent une émission maser à 1,35 cm de longueur d'onde. Les observations de cette émission par interférométrie à très longue base (VLBI pour *Very Long Baseline Interferometry*) permettent de suivre le déplacement angulaire de ces petits globules et de mesurer en même temps leur vitesse radiale. On s'aperçoit qu'ils proviennent d'une source bien localisée, et la combinaison de leur déplacement angulaire et de leur vitesse radiale permet d'obtenir la distance de cette source. Un exemple est montré figure 3.

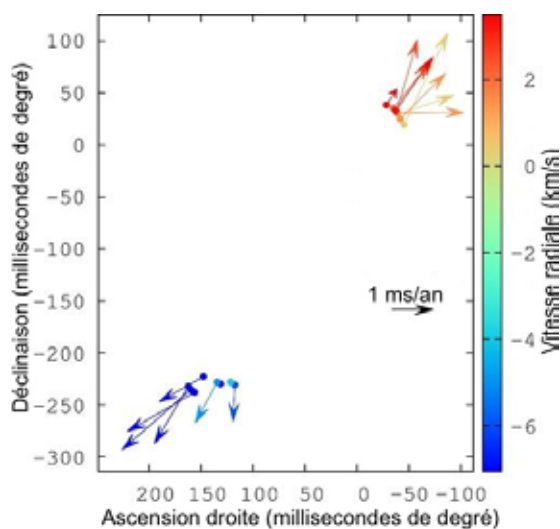


Fig.3. Mouvement des globules de l'étoile massive en formation AFGL 5142 émettant la raie maser de H_2O à 1,35 cm de longueur d'onde. La source, visible seulement dans l'infrarouge et donc non représentée, est au centre et a émis il y a environ 3 ans des globules dont le mouvement latéral est représenté par des flèches, colorées selon leur vitesse radiale. Comme la vitesse angulaire et la vitesse radiale sont toutes les deux connues et que tous les globules viennent sensiblement du même point, on en déduit la distance de la source, $2\,140 \pm 50$ parsecs. D'après Burns et al., 2017.

Premières mesures de la distance des galaxies, et controverses sur cette distance

Bien évidemment, les méthodes de mesure de distance que nous venons de décrire n'étaient pas toutes disponibles au début du xx^e siècle. On ignorait totalement à cette époque la distance des « nébuleuses », dont certaines avaient la forme de spirales, que l'on observait loin du plan de la Voie lactée. On savait cependant qu'elles pouvaient contenir des étoiles et des objets gazeux. Certaines de ces étoiles, observées dans les Nuages de Magellan qui étaient visiblement les plus proches de ces nébuleuses, ont un éclat qui varie périodiquement, ce qui les identifie à une classe d'étoiles variables de la Voie lactée, étoiles appelées céphéides d'après le nom de leur prototype, δ Cephei. L'astronome américaine Henrietta Leavitt (1868-1921), étudiant les céphéides du Petit Nuage de Magellan, qui étaient toutes à peu près à la même distance, découvrit en 1912 une relation entre leur luminosité et la période de leur variation d'éclat : elles sont d'autant plus lumineuses qu'elles sont plus lentes. Or on connaissait dans la Voie lactée la distance de céphéides dont la période de variation et la luminosité étaient connues. En les comparant à celles du Petit Nuage de Magellan, Ejnar Hertzsprung (1873-1967) put donc déterminer la distance de ce dernier, 11 kiloparsecs (kpc). En fait, cette distance était fortement sous-estimée en raison de différentes erreurs qu'il serait trop long d'exposer ici : en 1918, Harlow Shapley (1885-1972) la portait à 29 kpc. La vraie distance est 61 kpc.

On peut aussi utiliser pour mesurer les distances les étoiles géantes rouges les plus lumineuses, dont la magnitude absolue est la même partout.

Mais que dire de la distance des autres nébuleuses, comme celle d'Andromède ? En 1920, une controverse eut lieu entre Shapley et Heber Curtis (1872-1942). Shapley pensait que ces objets appartenaient à notre Galaxie, dont on avait d'ailleurs beaucoup surestimé les dimensions, tandis que Curtis imaginait que c'étaient des « univers-îles » plus ou moins semblables à la Voie lactée mais situés à grande distance. Curtis critiquait à tort l'estimation de la distance du Petit Nuage de Magellan, qu'il trouvait exagérée, mais remarquait qu'avec les instruments de l'époque on ne distinguait pas d'étoiles dans ses univers-îles, ce qui montrait qu'ils devaient être très lointains. De son côté, Shapley pensait que ces objets, dont les spectres (médiocres à l'époque) ne montraient guère les raies caractéristiques des étoiles, et où on ne distinguait effectivement pas d'étoiles individuelles sauf dans les Nuages de Magellan, devaient être d'une autre nature et appartenir à notre Galaxie.

Les choses en restèrent là jusqu'à ce qu'Edwin Hubble (1889-1953), profitant du grand télescope de 2,5 mètres de diamètre qui venait d'être mis en service au Mont Wilson, en Californie, parvienne à résoudre en étoiles la grande « Nébuleuse » d'Andromède et sa voisine Messier 33. Grâce à de très nombreuses photographies, il découvrit même dans la première en 1923 des céphéides semblables à celles de notre Galaxie et des Nuages de Magellan, ce qui lui permit d'en obtenir la distance, comme on l'avait fait précédemment pour ces derniers : 285 kpc, encore une fois très sous-estimée (le chiffre actuel est environ 800 kpc). Mais peu importe : le dilemme était résolu, ces galaxies, comme on les appelle aujourd'hui, étaient bien extérieures à la Voie lactée.

Les distances extragalactiques

Le problème maintenant était d'obtenir la distance de galaxies plus lointaines. Il fallait donc y trouver des objets très lumineux que l'on pourrait comparer aux mêmes objets proches de distance connue. Les céphéides et les étoiles géantes rouges étaient bien faibles, mais Hubble utilisa les étoiles bleues les plus lumineuses de ses galaxies, et aussi les novæ, qui sont des étoiles subissant une explosion nucléaire superficielle qui les rend très brillantes pendant quelques semaines. Il se servit aussi de la luminosité des grands complexes étoiles jeunes/nébuleuse gazeuse ionisée qui lui semblaient être plus ou moins semblables les uns aux autres. Il obtint ainsi des distances, à vrai dire assez approximatives, pour 24 galaxies (dont les deux Nuages de Magellan). Il considéra également leur vitesse radiale mesurée par spectroscopie, en particulier par Vesto Slipher (1872-1934), pour constater qu'elle augmentait en moyenne avec la distance : c'est la fameuse loi de Hubble de 1929, qui montre que l'Univers est en expansion. Notons en passant que l'astronome belge Georges Lemaître (1894-1966) avait devancé Hubble pour trouver cette relation

dès 1927, ce qui n'a été officiellement reconnu que récemment. Il serait fastidieux de retracer ici l'histoire agitée des révisions de la constante de Hubble-Lemaître qui relie distance et décalage spectral : Hubble donnait 500 km/s par million de parsecs (Mpc), les valeurs actuelles obtenues par plusieurs méthodes sont voisines de 70 km/s par Mpc.

À partir des années 1930, on a utilisé à l'envers la relation distance-décalage spectral pour obtenir la distance des galaxies, mais c'était une solution de facilité. Il fallait la vérifier en obtenant directement la distance des galaxies lointaines. La solution est venue des supernovæ, qui sont l'explosion finale de différentes classes d'étoiles. Cependant ces explosions sont rares (à peu près tous les 50 ans en moyenne dans une grande galaxie comme la nôtre), et il faut attendre que l'une d'elles survienne pour en déduire la distance de la galaxie où elle s'est produite : d'où l'intérêt de l'exploration systématique répétée de tout le ciel, que l'on réalise actuellement avec des télescopes spécialisés comme le Vera Rubin télescope américain.

Il existe différents types de supernovæ, que l'on peut distinguer par la manière dont leur luminosité varie avec le temps. Celles qui sont utiles pour la cosmologie sont les supernovæ de type SN1a, qui résultent de l'explosion d'une étoile naine blanche appartenant à un système double, qui a capturé trop de matière provenant de sa compagne. Elles peuvent être aussi brillantes qu'une galaxie tout entière (figure 4). Les supernovæ de ce type ont toutes la même luminosité à leur maximum, ce qui en fait d'excellentes « chandelles standard ». Ce sont ces supernovæ qui ont permis de découvrir l'accélération de l'expansion de l'Univers. On a pu en observer jusqu'à un décalage spectral de 2,9 grâce au télescope spatial Hubble, et son successeur le télescope spatial James Webb permettra sans doute d'aller encore plus loin.



Fig.4. La supernova 1999be dans une galaxie lointaine, observée avec le Télescope spatial Hubble. On l'observe à droite une semaine après son maximum, avec une magnitude de 15,8, aussi lumineuse que la galaxie tout entière. Le décalage spectral des deux objets est de 5 650 km/s.



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/>