

Le ciel de l'invisible

Philippe Laporte, CNES

Philippe Laporte nous offre ici le texte de la conférence qu'il a présentée à Toulouse à l'occasion de l'A.G. 2000 du CLEA.

Il s'agit d'un voyage dans notre Galaxie, à travers les longueurs d'onde, des plus longues aux plus courtes.

Ce périple commence ici avec les ondes radio, l'infrarouge et le visible et se poursuivra dans le prochain numéro avec l'ultraviolet, les rayons X et γ .

Présentation

1 - Pourquoi le ciel invisible ?

Depuis plusieurs milliers d'années, l'Homme regarde le ciel. Qui, un soir d'été, n'a jamais levé le nez pour observer le spectacle de ces milliers de points blancs scintillants ? Bien que le gnomon, destiné à mesurer les angles, ait été inventé bien avant notre ère, les yeux ont constitué durant de nombreux siècles le principal instrument de mesure. Pour cette raison, l'astronomie a peu progressé durant cette période : 2500 étoiles, le Soleil, la Lune et 5 "objets mobiles", en fait les planètes visibles à l'œil nu, constituaient le cheptel astronomique. L'étude du ciel sur des siècles a certes permis la découverte du parcours des astres errants, les périodes des éclipses et d'autres phénomènes, mais les mouvements et l'origine des objets étaient loin d'être expliqués. Si le ciel a été utilisé comme horloge (calendrier solaire et luni-solaire), il a aussi et surtout un aspect divin qui perdurera jusqu'au début du 17^e siècle. C'est en effet en 1609 que Galilée construisit une lunette dont le gros-

sissement était de 20 fois pour observer le ciel. Il fera des découvertes sensationnelles, qu'il publiera en 1610 dans "Le messager céleste". Ainsi, il écrivit entre autres que :

- Saturne a des oreilles (en fait les anneaux impossibles à résoudre avec cette lunette).

- la Lune possède des montagnes, comme la Terre, perdant ainsi son caractère immuable et divin.

- Vénus présente des phases, comme la Lune. Elle tourne donc autour d'un objet lumineux et ne produit pas sa propre lumière ! Encore une croyance qui tombe à l'eau...

- la Voie Lactée contient des milliers d'étoiles indiscernables à l'œil nu.

Cette dernière observation amena la question suivante, que les Grecs se posaient déjà : la Terre est-elle vraiment au centre du monde ?

L'astronomie a alors progressé au rythme des instruments. De la lunette de Galilée aux télescopes actuels (VLT, Hubble), qui nous permettent aujourd'hui de voir l'Univers à des milliards d'années lumière, les frontières ont littéralement

explosé ! Entre temps, Janski étudie les antennes radio et démontre en 1931 que le Centre Galactique émet des ondes radio. Presque 40 ans plus tard (1967), la découverte du rayonnement galactique de haute énergie (Clark et al., 1968) apporte la preuve que des phénomènes violents se déroulent dans l'Univers. Ces particules sont si rapides (10 TeV, soit 10^{-6} joule) qu'une seule d'entre elles peut posséder autant d'énergie cinétique qu'une balle de ping-pong lancée à 30 mms^{-1} qui contient 10^{23} atomes !

Mais l'atmosphère est opaque aux autres formes de rayonnement. Ce n'est qu'en 1969 que débute l'astronomie satellitaire. A cette époque de guerre froide, Russes et Américains s'espionnent à grand renfort de satellites. Ainsi, les Vela américains, comme leurs homologues russes, embarquent des détecteurs de rayons gamma et sont envoyés en orbite afin de s'assurer qu'aucune explosion nucléaire n'a lieu. Aucune alerte jusqu'en 1969 où une bouffée de photons gamma est détectée par un satellite Vela. Panique chez les propriétaires jusqu'à ce que l'analyse des données montre que les photons détectés provenaient... du ciel. Quatre ans plus tard, la découverte des sursauts gamma était annoncée.

Depuis, de nombreux satellites ont été lancés pour scruter le ciel dans les autres domaines "oubliés" de longueur d'onde : infrarouge, ultraviolet, rayons X. Toutes les fenêtres de longueurs d'ondes étant ouvertes, l'astronome peut étudier un objet céleste sous toutes ses coutures. De grands progrès vont en découler, comme la découverte des microquasars ou la compréhension de l'origine de l'Univers.

Que savons-nous aujourd'hui du ciel ? A quoi ressemble ce ciel invisible à nos yeux mais porteur de tant d'informations ? C'est ce que nous allons découvrir tout au long des pages suivantes. Mais le voyage ne va pas se faire dans l'espace ou dans le temps, comme il est d'usage, mais à travers les longueurs d'ondes; un voyage dans la cinquième dimension, en quelque sorte !

2. le support graphique

En 1996, l'équipe muséologique de la Cité de l'espace a demandé à l'équipe du CESR¹ dans laquelle je travaillais de développer deux éléments d'exposition. Le premier devait proposer un voyage dans l'Univers, où le visiteur a les commandes d'un vaisseau spatial imaginaire. Le second est de montrer le ciel à toutes les longueurs d'ondes. Autrement dit, si vous aviez des yeux capables de voir dans l'infrarouge, comment verriez-vous le monde ? C'est à partir de ce logiciel qu'a été réalisée cette conférence.

Le principe est le suivant : le domaine visible avec l'œil nu perd ses couleurs et devient noir et blanc. Le spectre coloré (du rouge au violet) est distribué des ondes radio (rouge) au rayonnement de haute énergie (violet) en passant par tous les dégradés. Ainsi, en tournant un simple bouton pour changer la longueur d'onde, il est possible de voir le ciel changer d'aspect. Mais ce n'est pas tout car plusieurs options sont possibles :

- une vue du ciel depuis Toulouse, pour se repérer plus aisément (la vue principale est en coordonnées galactiques).
- un accès à l'historique des instruments d'observation utilisés dans le domaine de longueur d'onde en cours, ainsi que leurs principes de fonctionnement.
- une aide.
- un tableau, dessiné par Loustal sur notre demande, où sont cachés des objets de la vie courante émettant dans les différents domaines de longueur d'onde.

3 - Quelques détails

La représentation galactique a été choisie afin de voir la totalité du ciel sur une seule carte. La figure 6 représente la carte galactique du visible. A titre de repérage, la nébuleuse du Crabe, M1, se situe sur le bord droit de la carte. La constellation Cassiopée (le W) est à 30° du bord gauche de la carte, noyée dans la luminosité de la galaxie. La Grande Ourse est proche du nord galactique, notamment constituée par les 3 étoiles brillantes. Enfin, le pôle sud céleste se situe à proximité des deux nuages visibles dans l'hémisphère sud.

Tous les panneaux du choix multiple (près de cent !) utilisés pour la conférence n'ont pu être reproduits ici. Seules les neuf représentations galactiques ainsi que quelques instruments incontournables sont figurés, mais tous les commentaires sont retranscrits.

4 - Les prérequis

4.1. La loi de Wien

Les étoiles et les nuages de gaz interstellaires se comportent comme des corps noirs. La quantité d'énergie qu'ils déversent dans l'Univers se calcule à partir de leur température effective. Ainsi, la photosphère du Soleil (surface lumineuse) a une température de 5770 K, ce qui implique une puissance P égale à $63,5 \text{ MWm}^{-2}$, d'après la formule suivante : $P = \sigma T^4$.

σ est la constante de Stefan et vaut $5,67 \times 10^{-8} \text{ Wm}^{-2}\text{K}^{-4}$.

D'autre part, les corps noirs ont un spectre d'émission caractéristique, passant par un maximum à une longueur d'onde qui dépend de la température : c'est la loi de Wien : $\lambda_M T = 2870$ où T est la température et λ_M la longueur d'onde du maximum, exprimée en micromètres.

La photosphère du soleil émet donc un maximum d'énergie à une longueur d'onde d'environ $0,5 \mu\text{m}$, c'est-à-dire le visible...

4.2. L'effet Doppler

La variation de longueur d'onde est liée à la vitesse (très inférieure à c) par la relation : $(\lambda' - \lambda) / \lambda = v / c$ où c est la vitesse de la lumière, v la vitesse du corps, λ la longueur d'onde au repos et λ' la longueur d'onde vue.

En route

Notre voyage va débiter par les ondes radio, domaine des grandes longueurs d'ondes. Il se terminera avec les photons gamma, vecteurs d'information sur les phénomènes violents de l'Univers.

1 - Les ondes radio

Notre exploration commence par deux raies extrêmement importantes en astrophysique. Il s'agit de la raie 21 cm de l'hydrogène et de la raie à 2,6 mm du CO. La première raie est émise par l'hydrogène atomique froid. Principal constituant de l'Univers, il est fondamental de le traquer pour connaître la répartition de la masse. La figure 1 montre le ciel à cette longueur d'onde là. On constate que la plupart de l'hydrogène se concentre au niveau du disque de notre galaxie. C'est la raison pour laquelle les étoiles naissent actuellement dans cette zone. La boucle visible au-dessus de la galaxie est aujourd'hui inexpliquée.

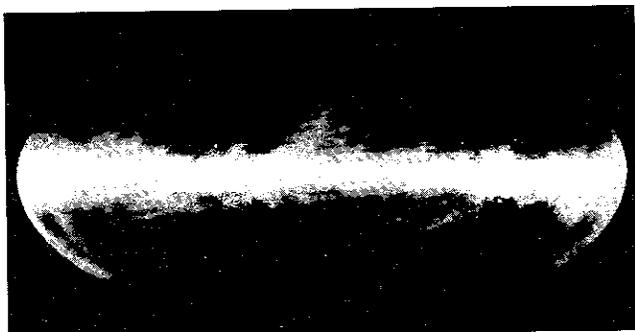


fig. 1 : vue du ciel à la longueur d'onde de 21 cm

La seconde raie concerne le monoxyde de carbone. Composé toxique pour l'Homme, il est recherché car il constitue un marqueur pour l'hydrogène moléculaire (deux atomes d'hydrogène). Les astronomes connaissent la proportion relative entre ces deux composés. Détecter le monoxyde de carbone et calculer son abondance à partir de l'intensité de son émission permet alors de déduire la quantité d'hydrogène moléculaire présent dans la même région. Sur la figure 2, on constate que sa répartition est encore plus confinée dans le disque galactique.



fig. 2 : vue du ciel à la longueur d'onde du CO

L'étude en laboratoire permet de connaître avec précision la longueur d'onde d'émission des composés au repos. L'effet Doppler permet alors de mesurer la vitesse relative des nuages de gaz d'hydrogène dans notre Galaxie. Cette célérité est notamment reliée à la distance qui sépare le nuage du centre de la galaxie. On peut ainsi cartographier notre galaxie et obtenir sa structure tridimensionnelle. En utilisant ce principe, on peut aussi déterminer la distance d'autres sources.

Un exemple : GRS 1915+105

Cet objet est soupçonné d'être le second microquasar découvert dans notre galaxie, après 1E1740.7-2942 (source proche du centre de notre galaxie). Un microquasar est un trou noir de masse stellaire (de 3 à 10 masses solaires) autour duquel gravite une étoile. Cette dernière subit une telle attraction gravitationnelle qu'une partie de son gaz se déverse vers le trou noir. Cette matière est fortement accélérée et spirale autour de l'objet central : c'est un disque d'accrétion. La gravitation est telle que le gaz s'échauffe à plusieurs millions de degrés et émet des rayons X. Episodiquement, la partie du disque la plus proche du trou noir se vide et une partie de la matière est projetée au niveau des pôles, formant des jets qui rayonnent en radio et infrarouge.

Ces objets sont ainsi nommés car on les soupçonne d'être des modèles réduits des quasars, détectés il y a 35 ans sous forme de sources radio puissantes et provenant d'une région dont la taille était inférieure à quelques secondes d'arc. On sait aujourd'hui que ces objets appartiennent à des galaxies lointaines, suggérant l'énorme quantité d'énergie que rayonnent ces corps.

La distance de GRS 1915+105 est de $12,5 \text{ kpc} \pm 1,5 \text{ kpc}$ et a été déterminée grâce à l'effet Doppler. En effet, en prenant des spectres des nuages d'hydrogène dans la direction de GRS1915+105 et dans une direction très proche, on obtient deux spectres. Le premier contient les raies d'absorption des nuages présents devant la source, plus ou moins décalées selon l'éloignement des différents nuages, mais pas le second. En combinant ces données avec celle du second spectre, on détermine la position de la source par rapport aux nuages d'hydrogène : la position de GRS 1915+105 est déterminée ! Profitons de cet exemple pour aborder l'intérêt de l'étude d'un objet dans plusieurs domaines de longueur d'onde. Des observations ont été réalisées en radio, infrarouge et rayons X. Mais aucun modèle n'arrivait à expliquer élégamment le comportement de ce microquasar. Il a fallu effectuer des observations simultanées dans ces trois domaines de longueur d'onde pour avancer un modèle cohérent. L'analyse des données a permis de déceler une succession dans le temps des événements X, infrarouge et radio. Le rayonnement X provient du disque extrêmement chaud en rotation autour du corps noir. Cette émission s'arrête au moment du vidage du disque. La matière éjectée au niveau des pôles est animée d'une grande vitesse et rayonne fortement dans l'infrarouge. La perte d'énergie progressive augmente la longueur d'onde de l'émission synchrotron, emmenant graduellement l'émission dans les ondes radio (fig. 3).

C'est donc l'expérience PRONAOS (fig 4), télescope de 2 mètres de diamètre embarqué sous ballon stratosphérique, qui a observé plusieurs amas de galaxie et qui a fini de confirmer l'existence de l'effet SZ. L'intérêt majeur est que l'étude de cet effet fournit des informations sur la matière traversée au sein des amas et des grandes structures de l'Univers.

Un autre apport de l'expérience PRONAOS est une dizaine de cartes de $1^\circ \times 1^\circ$ de régions extrêmement froides. Les régions observées concernent des zones où se situent des candidats pré-stellaires, c'est-à-dire des nuages froids, en cours d'effondrement ou sur le point de le faire. En se contractant, le centre du nuage s'échauffe et lorsqu'une température de l'ordre de 15 millions de degrés est atteinte, les réactions nucléaires de fusion de l'hydrogène s'enclenchent : une étoile est née ! Mais nous avons un problème : les calculs montrent que la poussière à elle seule ne peut évacuer le surplus de chaleur produit par l'effondrement du nuage, ce qui stopperait prématurément le processus. Or, ce n'est pas le cas, puisque les étoiles existent !

On suppose que d'autres composés contribuent aussi à évacuer la chaleur. Les suspects sont l'eau, l'oxygène, le carbone et le monoxyde de carbone. Ils seraient capables d'absorber une grande quantité de chaleur et restitueraient l'énergie emmagasinée via leurs raies d'émissions. C'est ce que l'analyse des données nous permettra de savoir...

Que verrait-on dans la vie courante si nos yeux voyaient dans l'infrarouge ? Les militaires en ont déjà une idée avec leurs lunettes de vision nocturne. Tous les objets sont chauds. C'est-à-dire nous, les animaux, les surfaces chauffées par le Soleil, un feu dans son âtre ou dans une forêt. Mais nous trébucherions sur les objets froids, plongerions dans les rivières car invisibles, etc !

Déplaçons-nous vers les longueurs d'ondes plus courtes et passons de 1 mm à 10 μm (figure 5).

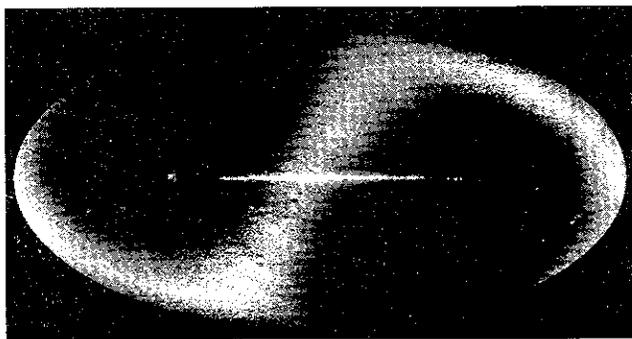


fig. 5 : l'écliptique trahi par les poussières qu'il contient

Une barre partage le ciel en deux parties. A l'évidence, elle ne fait pas partie de notre galaxie... et pourtant. Cette longueur d'onde correspond, d'après la loi de Wien, à une température de 300 K. Mais qu'est-ce qui est incliné de 63° environ par rapport au plan de notre galaxie ?

Il s'agit de l'écliptique. Ce que l'on voit, ce sont les poussières, chauffées par le Soleil.

3. Le visible

Exploré depuis plusieurs siècles, on pourrait penser que ce domaine de longueur d'onde a livré la plupart de ses secrets. Il n'en est rien parce que les instruments d'observation sont toujours plus grands et permettent de voir des objets plus faibles, plus lointains ou encore d'identifier des détails plus fins dans des corps déjà connus. De nouvelles méthodes, comme les arcs gravitationnels, sont utilisées pour déterminer la masse des amas de galaxies. La détection d'objets de grande magnitude (supérieure à 25) a permis par exemple de trouver la contrepartie optique des sursauts gamma, relançant les travaux de recherche. Nous allons aborder ici quatre sujets : trois d'actualité, l'autre d'une extrême utilité.



Fig. 6 : Le ciel dans le visible

Depuis la découverte de β Pictoris, d'autres planètes extra-solaires ont été découvertes. Mais chaque fois, il s'agissait de corps très gros ayant plusieurs fois la masse de Jupiter, et relativement éloignés de l'étoile mère. La raison est que nous sommes limités par la résolution des instruments. Nous savons donc qu'il existe d'autres planètes, mais en existe-t-il de semblables à la Terre ? Cette recherche s'explique par le fait que nous n'avons qu'un seul exemple de vie : nous. Trouver une planète semblable à la notre relancerait certains débats...

Pour atteindre ce but, COROT sera prochainement envoyé en orbite. A l'aide d'un système optique très performant, il devrait être capable de détecter le passage de planètes devant la couronne de l'étoile étudiée. Ces occultations, faibles, devraient permettre la découverte, s'il en existe, de planètes de petite taille, comparable à la nôtre. Réponse dans quelques années !

Hipparque a vécu deux siècles avant JC. Il a entre autres réalisé le premier catalogue d'étoiles (850 en tout), nommant ainsi certaines d'entre elles pour plusieurs siècles. C'est en son souvenir que le satellite Hipparcos a observé et repéré très précisément par la méthode de la parallaxe² des milliers d'étoiles et des objets émettant en radio. Le résultat

est un catalogue sûr permettant de créer un système fiable de passage d'un système de coordonnées à l'autre. Une autre conséquence est la révision des étalons de mesure de l'Univers. Ces derniers sont en effet créés en se référant au précédent, cumulant ainsi les erreurs. La première étape est de rechercher la distance des étoiles proches en mesurant leur parallaxe. Ceci permet d'accéder à la plupart des types d'étoiles existants (étoiles étalons) et de construire un diagramme HR (Hertzsprung-Russel) où les étoiles sont disposées en fonction de leur luminosité (axe vertical) et de leur température (axe horizontal). C'est la base du système de détermination des distances. L'erreur est celle commise sur l'angle de parallaxe.

Il est possible de constituer un diagramme HR pour un amas stellaire lointain. La différence par rapport à notre premier diagramme est que les étoiles seront moins brillantes car plus éloignées. Comme l'éclat décroît avec la distance, la différence de hauteur sur l'axe vertical du diagramme HR entre l'amas d'étoiles lointaines et le groupe étalon indique la distance de ce groupe. Mais il y a de la matière entre nous et cet amas, qui absorbe une partie de la lumière. La différence d'ordonnée n'est donc pas entièrement due à la distance, induisant une seconde erreur sur l'estimation de distance. Et ainsi de suite avec les céphéides (étoiles pulsantes), les populations de galaxies et les quasars, chaque "mesure" ajoutant ses erreurs à celles déjà existantes. On comprend l'intérêt des mesures d'Hipparcos. Il a permis de renforcer les fondations sur lesquelles reposent notre système de mesure de l'Univers.

Dans la rubrique des événements récents, le télescope spatial Hubble a photographié le satellite Io et pris des spectres lors de l'éruption du volcan le plus actif. L'analyse des données a permis une estimation de la température et de la pression à l'intérieur de la cheminée du volcan, ainsi que la composition du matériau. Il semblerait que le manteau de Io (la zone située sous la croûte) soit dépourvu de fer, comme sur Terre. Le responsable serait l'eau, aujourd'hui disparue, qui aurait oxydé le fer, augmentant son poids et l'aidant ainsi à descendre vers le cœur de Io.

Enfin, le nuage d'Orion, qui n'en finit pas de nous montrer des objets insolites. Grâce à des observations réalisées dans ce nuage avec les télescopes des îles Canaries, une équipe de l'Institut d'Astrophysique de Tenerife a découvert 18 objets isolés et non identifiés. Le spectre révèle une température de 2000 degrés et l'âge, estimé à partir de la luminosité, serait de 5 millions d'années. Cela implique une masse comprise entre 5 et 15 fois celles de Jupiter. Trop peu massives pour être des étoiles, mais sans étoile à proximité pour être des planètes (les objets orbiteraient autour). Alors, planètes éjectées ou étoiles avortées ? Sont-ce des cas particuliers ou l'espace est-il peuplé de ces objets là en grand nombre ? La suite des observations nous le dira !

Les instruments adaptés à l'observation de ce domaine de longueur d'onde sont forcément monnaie courante puisque nous les utilisons tous les jours (des appareils photos aux

lunettes). Les télescopes qui sont destinés à l'observation du ciel, apparaissent souvent dans les revues à large diffusion. On y trouve souvent les télescopes présents au Chili, à Hawaï ou encore aux Canaries. L'histoire de ces instruments commence en 1609 pour la lunette (Galilée) et 1672 pour le télescope (Newton). La lunette atteindra son apogée au début de ce siècle et sera avantageusement remplacée par le télescope, moins sujet aux défauts optiques. La course au "plus grand, plus gros" s'est accélérée au cours de ce siècle pour atteindre des monstres de près de 10 mètres de diamètre ! Le résultat est une foule de détails sur les objets, affinant notre compréhension, ou la découverte d'autres corps, comme ces planètes errantes, complétant le tableau "anthropologique" des habitants de l'Univers.

Quels instruments pour demain ? Certainement des télescopes spatiaux (le successeur du télescope Hubble est aujourd'hui financé), mais aussi les télescopes terrestres encore plus performants (par exemple, le VLT européen). Mais n'oublions pas qu'à l'ère de l'informatique et des satellites, le Pic du Midi, avec son télescope de deux mètres, reste encore l'un des meilleurs sites d'observation au monde.



Fig 7. : l'Observatoire du Pic du Midi, situé dans les Pyrénées.

Notes :

1 - L'équipe était composée de Peter von Ballmoos (chef projet), Jürgen Knodlseder (programmation), Christophe Gallian, Philippe Laporte et Nadine Sangérotéo (base de données, ressources logiciel et mise en forme).

2 - La méthode de la parallaxe consiste à mesurer l'angle entre la direction d'une étoile et une direction fixe. Au bout de six mois, la Terre étant de l'autre côté du Soleil à 300 millions de km de la première position, on recommence l'opération. La demi-somme des angles trouvés est la parallaxe de l'étoile. La distance de l'étoile est le quotient de l'unité astronomique par la parallaxe, exprimée en radians. Les angles mesurés sont très faibles (moins d'une seconde d'arc pour l'étoile la plus proche) et la moindre erreur engendre des valeurs de distances fausses.