

L'astronomie dans le monde

Un thermomètre teste le Big Bang

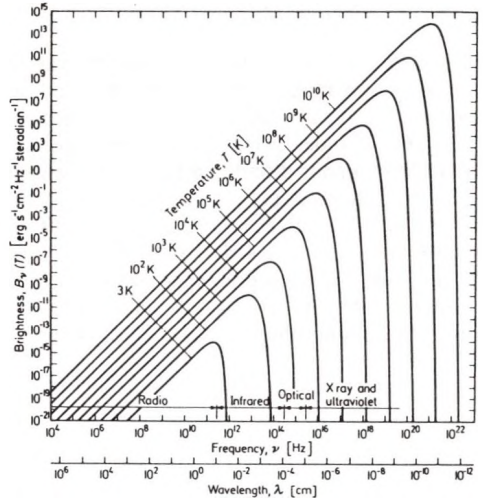
Quelques centaines de milliers d'années après le Big Bang, l'univers passait par une phase très intéressante de son évolution que l'on peut encore observer actuellement. Cette phase a marqué le passage d'un univers chaud et opaque à un univers froid et transparent. Jusqu'alors les photons étaient entravés dans leur progression par les électrons libres (phénomène de « diffusion Thomson »). La chute progressive de la température amena la recombinaison de ces derniers sur les noyaux pour former des atomes neutres. Les diffusions cessèrent et les photons purent parcourir sans encombre de très grandes distances — distances si grandes que certains d'entre eux sont encore en chemin et peuvent parfois être observés lorsqu'ils viennent mourir sur un récepteur approprié. On parle de « découplage de la matière et du rayonnement ».

À quoi ressemblait l'univers lors de cette phase de transition ? On peut le comparer à un immense four porté à la température de 3000 degrés Kelvin. Partout où se serait porté le regard, il n'aurait intercepté qu'un rayonnement aveuglant de couleur orangée. Le cosmos se comportait comme un gigantesque « corps noir », c'est-à-dire un corps absorbant et émettant parfaitement la lumière. Le rayonnement d'un corps noir est décrit par des lois bien connues des physiciens, et il a la caractéristique fondamentale de ne dépendre que de la température. La longueur d'onde λ_{\max} du maximum d'émission se déduit de la température T par la loi de Wien :

$$T \lambda_{\max} = 2900$$

en prenant comme unités le micromètre (μm) et le degré K. Ainsi l'univers primitif, à 3000 K, émettait surtout aux alentours de 1 μm , dans l'infrarouge très proche. Ce qui ne l'empêchait pas de rayonner de façon appréciable dans le domaine visible. La figure ci-dessous montre la distribution spectrale de

corps noirs à diverses températures, entre 3K et 10^{10} K.



Rayonnement du corps noir à diverses températures

Comment observer ce passé lointain ? La vitesse finie (c'est-à-dire non infinie) de la lumière nous permet de remonter aisément dans le temps : un astre situé à une année-lumière de distance est vu tel qu'il était il y a un an. (Une vitesse infinie aurait des conséquences vertigineuses !) Les objets extragalactiques nous font remonter dans un passé encore bien plus ancien, qui se chiffre en milliards d'années. On peut imaginer qu'en regardant suffisamment loin (quelque 15 milliards d'années-lumière) on pourrait observer le corps noir de l'univers primitif. Et en effet, comme nous le faisons remarquer plus haut, ce rayonnement n'a pas disparu. Il a cependant subi de grosses modifications. Les longueurs d'onde de ses photons ont subi la même expansion que celle de l'univers. L'augmentation des distances par suite de l'expansion peut s'écrire comme une fonction

du temps $R = R(t)$. Si l'on appelle t_0 l'époque du découplage et t l'époque actuelle, on peut montrer que

$$\lambda_{\max(t_0)}/\lambda_{\max(t)} = R(t_0)/R(t)$$

et, avec la loi de Wien,

$$T(t_0)/T(t) = R(t)/R(t_0).$$

On constate l'expansion de l'univers par le décalage des raies spectrales vers le rouge (le redshift, $z = \lambda/\lambda_0$ où λ est la différence de longueur d'onde). Ainsi, si une raie spectrale dont la longueur d'onde en laboratoire est de 486 nm (nanomètres) est vue dans le spectre d'une galaxie à 972 nm, on a un redshift de 1. En effet, $z = (972 - 486)/486 = 1$.

Puisque l'univers grandit avec le temps, il diminue lorsque l'on regarde dans le passé à des redshifts de plus en plus élevés. On a

$$R(t)/R(t_0) = 1 + z$$

et donc

$$T(t_0)/T(t) = 1 + z.$$

Ainsi la température du corps noir fossile est liée au redshift par une loi très simple.

Sans doute doit-on insister sur le sens qu'il faut donner à T et R . T est la température du corps fossile qui serait mesurée par des observateurs se trouvant dans la galaxie que nous observons à un redshift z , observateurs qui auraient donc vécu il y a des millions ou des milliards d'années. De même la distance R est une distance caractéristique, dont la croissance est uniquement liée à l'expansion de l'univers. C'est le cas actuellement des distances entre amas de galaxies.

Entre la phase de recombinaison et l'époque actuelle, l'expansion de l'univers a été d'un facteur mille environ. Les distances ont été multipliées par mille, et la température du corps noir a été réduite de ce même facteur, jusqu'à 3 K.

Si l'on pouvait mesurer directement la température du rayonnement fossile dans une galaxie très éloignée, on pourrait confirmer la

relation avec le redshift. Au niveau d'astres très lointains, on devrait constater une température intermédiaire entre 3 et 3000 K. Mais comment parvenir à une connaissance de T ? Quel phénomène pourrait servir de thermomètre à distance? Les astronomes ne manquent pas de ressources. Ils connaissent des mécanismes qui affectent l'état d'atomes ou de molécules en fonction de la température du rayonnement ambiant et qui se prêtent particulièrement bien à ce genre de mesures.

Il y a plus de vingt ans déjà, l'analyse de l'excitation de molécules de CN dans le milieu interstellaire avait fourni une bonne estimation de la température du rayonnement fossile dans notre Galaxie. Ces molécules, si elles sont suffisamment loin de toute étoile, sont en équilibre avec les photons du corps noir fossile. En mesurant leur température interne, par leur état d'« excitation rotationnelle » (c'est-à-dire leur vitesse de rotation sur elles-mêmes), on obtient directement celle du corps noir. Le problème est d'effectuer cette observation beaucoup plus loin que notre banlieue galactique.

C'est en observant l'excitation d'atomes neutres de carbone, et en utilisant la puissance fantastique du télescope Keck de 10m de diamètre, que les astronomes ont mesuré pour la première fois la température du corps noir fossile telle qu'elle était il y a quelques milliards d'années, dans un nuage interstellaire situé à un redshift $z = 1.78$. La valeur prévue, utilisant la formule donnée ci-dessus, est de 7.58 K. La valeur observée est de 7.4 (± 0.8) K, en très bon accord avec la prédiction. Une autre mesure, correspondant à un autre nuage de même redshift, a donné une valeur supérieure, de l'ordre de 10 K. Mais cela n'a pas rien de surprenant. Il faut que les atomes ne soient soumis qu'au seul champ de radiation du corps noir pour en refléter la température exacte. Sans doute ceux-là sont-ils affectés par quelque excitation locale supplémentaire (étoile ou autre).

* * *

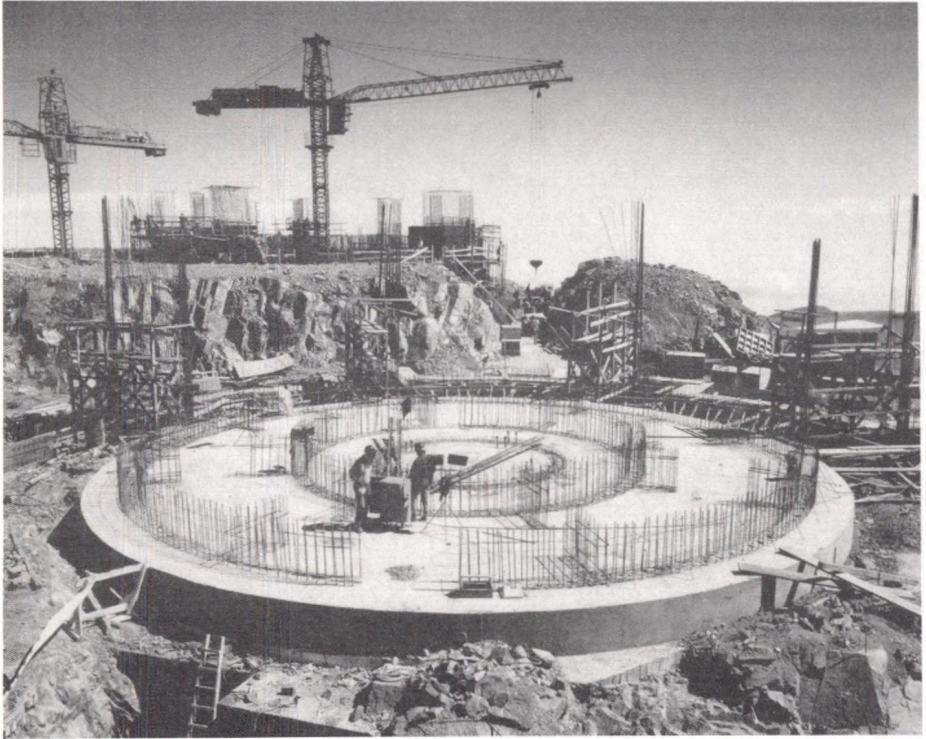
Progrès pour le VLT

Le Very Large Telescope (VLT) de l'Observatoire Européen Austral (ESO) sera un ensemble de quatre télescopes de 8m20 de diamètre. Lorsque leurs lumières seront combinées en un foyer commun, les quatre unités du VLT équivaldront à un télescope unique de 16m de diamètre.

Le pouvoir collecteur d'un tel instrument

sera vingt fois plus grand que celui des plus grands télescopes actuels de l'ESO (3m60 et 3m50) et plus du double du plus grand télescope au monde, le Keck de 10m.

Le premier miroir est en cours de polissage, un processus qui dure deux ans. Le site, une montagne du nord du Chili, est aménagé pour recevoir les télescopes, et la première des structures métalliques arrivera bientôt sur place. C'est en 1997 que le télescope VLT no. 1 devrait commencer à fonctionner.



Les travaux des fondations du premier télescope VLT sont en cours sur le Cerro Paranal, dans le désert d'Atacama, au nord du Chili. (Cliché ESO)

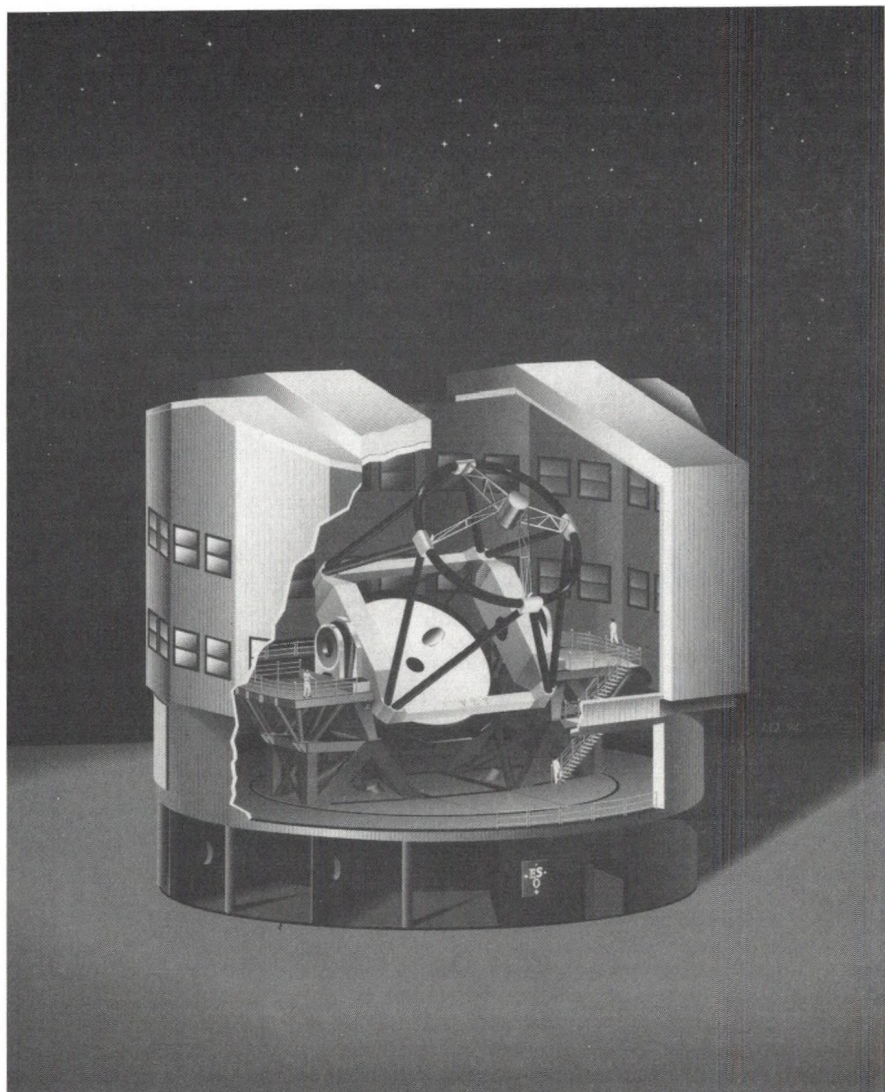


Schéma d'un des télescopes de 8m20 du VLT. Le diamètre du bâtiment est de 35m.
(Cliché ESO)

Io, un satellite sulfureux

Io est certainement l'un des astres les plus exotiques du système solaire. C'est le seul, avec la Terre, sur lequel on ait observé en direct de formidables éruptions volcaniques. Triton, le gros satellite de Neptune, est un troisième astre montrant une activité volcanique, mais de moindre envergure et apparemment très superficielle.

Au moment même où la sonde Voyager détectait cette activité de Io, des chercheurs américains la prévoyait de façon théorique, à partir des lois de la mécanique : Io est si proche de Jupiter que sa masse est littéralement pétrée par les effets de marée. Il en résulte un échauffement et l'énergie ainsi libérée entretient la fusion des couches internes et les pressions responsables des éruptions.

Mais on vient de constater, en rassemblant les mesures faites en infrarouge, que le rayonnement thermique de Io est supérieur à ce que prédisait la théorie des marées. Il ne faut cependant pas renoncer à cette explication du volcanisme. Il semble que, tout simplement, ce soit le rayonnement solaire qui chauffe certaines roches (laves) particulièrement noires et absorbantes, les portant à des températures de l'ordre de 300 degrés K, soit une centaine de degrés de plus que le reste de la surface de Io exposée au Soleil.

Notre conception de la nature du sol de Io est, elle aussi, en train de changer. Après les observations de Voyager, on s'accordait à penser que le soufre était un composant essentiel des éjectats volcaniques et, par conséquent, de la couche superficielle. Mais une analyse détaillée montre que le soufre ne peut rendre compte ni des températures élevées des éruptions, ni de la vitesse de refroidissement des matériaux éjectés. De plus les masses en jeu sont si considérables que le soufre ne peut raisonnablement les expliquer. L'hypothèse la plus probable que l'on avance maintenant est que les laves de Io sont essentiellement constituées de silicates.

Un acide aminé interstellaire

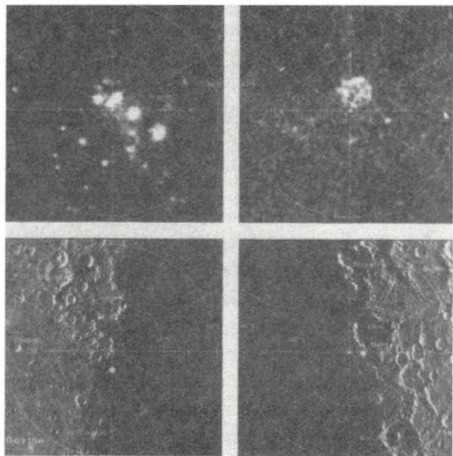
Les acides aminés sont des constituants essentiels de la matière vivante. Après en avoir détectés au sein de météorites, les astronomes en avaient cherché vainement les traces dans les nuages moléculaires intersidéraux. Il faut dire que ces nuages constituent de fantastiques laboratoires de chimie. On y a décelé à l'heure actuelle non loin d'une centaine de composés divers, la plupart à base de carbone, et contenant jusqu'à treize atomes. On a aussi de fortes présomptions pour l'existence de molécules bien plus complexes, mais beaucoup plus difficiles à détecter, comme les PAHs (hydrocarbures polyaromatiques) et les « *bucky balls* » (grosses molécules sphériques de carbone dont la plus célèbre est C_{60}).

Un nouveau pas vient d'être franchi avec la découverte, encore à confirmer, du premier acide aminé dans un nuage moléculaire géant, Sagittarius B2, situé non loin du centre de la Galaxie. Cet hydrocarbure ne serait autre que le plus simple de tous, la glycine (NH_2CH_2COOH), qui ne contient que dix atomes.

La présence de molécules complexes dans le milieu interstellaire est à la base de l'idée, maintenant bien ancrée, que la vie n'est pas apparue à partir des éléments simples présents sur la Terre primitive, mais qu'elle a profité de l'apport extérieur de molécules déjà bien complexes. Cet apport a été facilité par les nombreux impacts cométaires des premiers âges de la planète. N'oublions pas non plus que l'eau des océans a sans doute la même origine extraterrestre. Décidément, que serions-nous sans les astres chevelus ? Leur rôle semble être bien plus fondamental que ceux qui leur étaient assignés dans les siècles passés et qui étaient d'illuminer les cieux en annonçant quelque événement important (ces fonctions ont disparu pour des raisons diverses). Les comètes ont donc peut-être fourni les matériaux de base pour le démarrage de la vie. Et elles ont ensuite façonné l'évolution au gré d'impacts catastrophiques sonnait aveuglément le glas pour de nombreuses espèces.

Les glaces de Mercure

En 1991, les astronomes américains annonçaient la découverte de glaces au pôle nord de la planète Mercure (voir *Le Ciel*, décembre 91, pages 349), découverte inattendue, mais pas si surprenante si l'on sait que des zones restent constamment abritées des rayons du Soleil, au fond des cratères polaires. On annonçait que la confirmation, ou l'infirmité, de la découverte viendrait en 1994, après observation de l'autre pôle de Mercure. Voilà qui est chose faite. Le pôle sud a été observé en février de cet année, et on y voit aussi les signes caractéristiques de la présence de glace.



Les taches blanches dans les deux images du haut indiquent la présence de glace dans les cratères profonds de Mercure. On peut effectivement associer ces taches à des cratères observés par la sonde Mariner 10 (images du bas). Cet ajustement a d'ailleurs permis de mieux connaître la position exacte du pôle de Mercure. (Cliché NASA)

La polarisation du rayonnement radar réfléchi par ces embryons de calottes polaires est très semblable à celle obtenue lorsque l'on observe les calottes de Mars ou les satellites glacés de Jupiter. L'épaisseur de glace atteint au moins deux mètres. S'y superpose probablement un dépôt de quelques dizaines de centimètres de poussière, isolant la glace et la

protégeant de l'« évaporation » ou, plus correctement, de l'érosion par les radiations cosmiques.

L'ancienneté de ces dépôts de glace doit être très grande. En fait, il s'agit sans doute du résultat d'une très lente et continue accumulation de molécules d'eau interplanétaires au cours de l'histoire du système solaire. L'analyse in situ de ces dépôts est déjà considérée comme l'une des tâches les plus intéressantes que l'on pourrait effectuer pour étudier l'origine et l'histoire de ce système.

Ulysse passe sous le Soleil

Communiqué de presse ESA

Le survol du pôle sud solaire qu'effectue la sonde Ulysse de l'ESA constitue jusqu'ici un plein succès et a déjà livré son premier lot de surprises sur le comportement de cette région inexplorée de notre étoile.

Réunis à l'ESTEC, le Centre de recherche et de technologie spatiales de l'ESA (Noordwijk, Pays-Bas), les scientifiques ont dressé un premier bilan très positif de la phase de survol polaire qui a commencé en juin dernier et s'achèvera en novembre. Ils ont notamment conclu que le Soleil présentait des caractéristiques magnétiques et dynamiques inattendues dans la région polaire sud, ce qui conduira probablement à réviser les théories sur la structure magnétique de l'astre du jour.

Premier sujet d'étonnement pour les chercheurs : le peu d'activité du rayonnement cosmique au-dessus de la calotte australe du Soleil et la remarquable absence apparente de pôle magnétique sud solaire,

« Nous nous attendions à ce que le Soleil possède un champ magnétique relativement simple, du type de celui d'un barreau de fer aimanté ou du champ magnétique terrestre. Nous prévoyions de détecter un accroissement local de l'intensité du champ. Mais la sonde n'a rien observé de cela et jusqu'ici tout se passe comme si le Soleil n'avait pas de pôle magnétique sud » explique Richard Marsden, scientifique de la mission Ulysse à l'ESA.

Le pôle magnétique sud solaire n'existe-t-il réellement pas ? Va-t-il apparaître soudainement avant que le survol polaire ne s'achève ? Ces questions agitent actuellement l'équipe scientifique d'Ulysse, également impatiente de pouvoir confronter ces résultats avec ceux qui seront obtenus l'année prochaine lorsque le véhicule spatial passera au-dessus du pôle géographique nord du Soleil.

Il est cependant d'ores et déjà flagrant que la structure du champ magnétique solaire dans les régions polaires australes diffère de celle que prévoient les modèles.

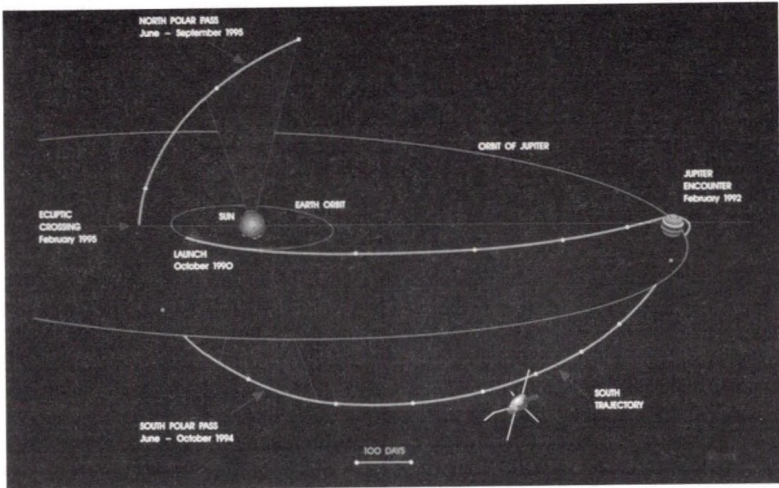
Les instruments d'Ulysse ont notamment décelé des ondes électromagnétiques très lentement variables, avec des périodes d'oscillation de 10 à 20 heures.

Et les spécialistes pressentent que tout ceci serait dû à un mécanisme imprévu de transport du champ magnétique solaire vers l'espace via le vent de particules solaires.

Il est encore bien trop tôt pour déterminer quelles seront les conséquences des nouveaux résultats présentés aujourd'hui sur la connaissance générale de notre étoile et sur celle du vent interplanétaire qu'il engendre.

Des milliards de bits d'information de haute valeur scientifique ont été acquis pendant la première partie de ce survol et il va à présent falloir les analyser en détail pendant de longs mois. Une certitude demeure toutefois : la complexité des phénomènes détectés, qui font intervenir à la fois le vent solaire, le champ magnétique, des ondes électromagnétiques et des bouffées de particules accélérées. Des éclaircissements supplémentaires seront probablement apportés à ce sujet par le survol polaire boréal de 1995 et, si la mission est prolongée, par les deux nouveaux survols polaires qui seront effectués en 2000-2001, c'est-à-dire en pleine période d'activité magnétique solaire.

Ulysse est une mission conjointe ESA-NASA. L'ESA a développé la sonde et participe à son exploitation, soit une contribution estimée à 170 millions d'ECU. Les laboratoires de recherche européens ont construit la moitié des instruments techniques. La NASA a fourni l'autre moitié des expériences ainsi que le générateur radio-isotopique d'énergie, et le lancement. Et elle assure les communications quotidiennes avec la sonde à l'aide de son réseau d'antennes spécialisées.



Trajectoire d'Ulysse (document ESA)