

L'Homme et le ciel

Pr. Omar FASSI-FEHRI ()*



De tout temps et à tous les âges l'homme a été intrigué par le ciel, qui restait à la fois mystérieux et inaccessible; probablement la crainte de ne pas voir se renouveler le miracle du retour du soleil chaque matin, y est pour quelque chose.

Le mouvement du soleil a probablement fourni aux hommes leur première horloge; les phases de la lune ont été à la base des premiers calendriers; l'aspect du ciel indiquait aux premiers agriculteurs l'époque des semailles ou des récoltes.

Aujourd'hui encore on continue d'observer le ciel et l'Univers, avec des moyens de plus en plus puissants. Si pendant des millénaires le seul instrument utilisé était l'œil (humain), l'astronomie est probablement la science qui a été le plus tributaire des progrès des techniques d'expérimentation et d'observation (lunette, télescope, radiotélescope, satellite, sonde spatiale...).

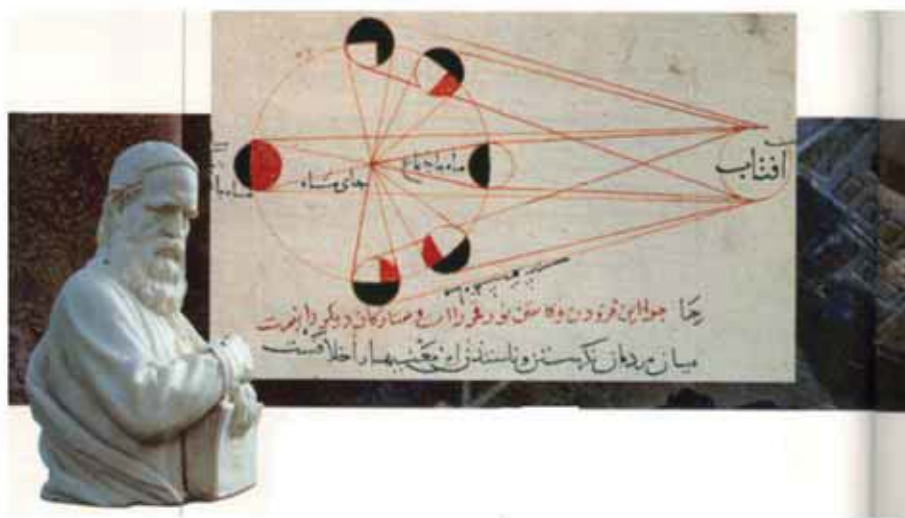
L'astronomie est la science qui consiste à observer le ciel; les grandes étapes qui ont marqué son évolution jalonnent aussi l'histoire de la pensée humaine, et des civilisations qui se sont succédées : les mésopotamiens, les premiers à étudier systématiquement le ciel et à inventer la division sexagésimale, les égyptiens, qui ont les premiers adopté l'année de 365 jours, les chinois, qui ont réussi à déterminer la périodicité des éclipses, les grecs, qui ont fait faire des avancées considérables à la connaissance du monde (détermination du rayon de la terre par Eratosthène, Pythagore au VIII^{ème} siècle av. J.C affirme déjà que la terre est sphérique), les arabes, qui ont réalisé les premières éphémérides, et ont donné de grands astronomes comme Ibn Yunus, Al-Sûfi, Al-Hazin (Ibn Al-Haytham), Al-Biruni ...; à partir du XVI^{ème} siècle apparut une nouvelle génération d'astronomes qui ont battu en brèche l'idée de géocentrisme (la terre est le centre de l'univers) en vigueur pendant toute la période précédente avec les avancées dûes à Copernic, Kepler, Galilée et Newton; jusqu'au XIX^{ème} siècle l'œil est le seul récepteur placé derrière une lunette ou un télescope; avec les progrès réalisés dans différentes disciplines scientifiques, en particulier la révolution relativiste, et avec l'apparition de nouveaux instruments, on assiste au développement de l'Astronomie et de l'Astrophysique modernes; les diapositives qui vont être présentées fixent les grands moments de l'évolution de cette science passionnante.

(*) Secrétaire perpétuel de l'Académie Hassan II des Sciences et Techniques.

LE PHÉNOMÈNE D'ÉCLIPSE

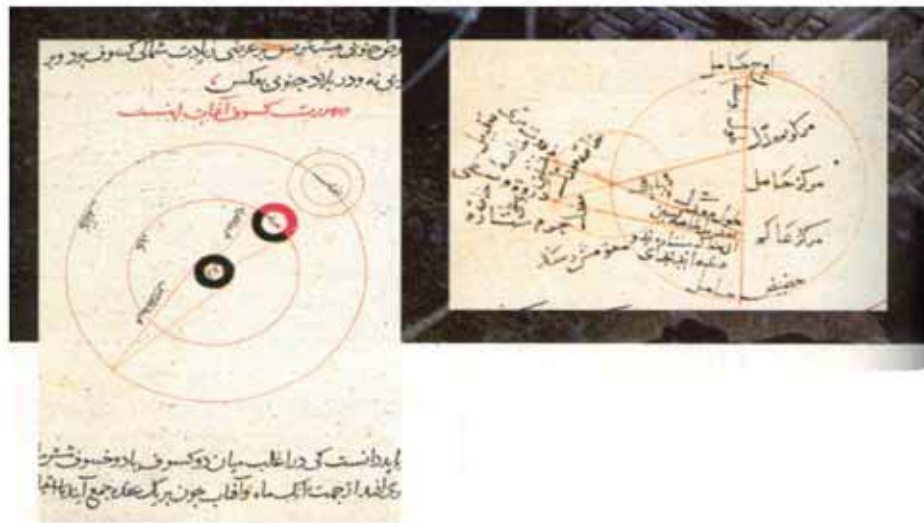


La particularité du système Terre-Soleil-Lune, c'est que les diamètres apparents du Soleil et de la Lune, vus de la Terre, sont pratiquement identiques, c'est-à-dire d'un demi-degré. Le diamètre effectif de la lune est environ cinq cents fois inférieur à celui du Soleil, mais sa distance moyenne de la Terre, 384 400 Km, est environ cinq cents fois inférieure à la distance Terre-Soleil. Les deux disques semblent donc avoir la même grosseur dans le ciel.



Successeur & novateur

A la fois astronome, mathématicien et poète, Al Khayyām jette au XI^e siècle les premiers ponts entre la géométrie des grecs et l'algèbre d'Al Khawārizmī.



UN FIN OBSERVATEUR

Même s'il n'a pas vraiment innové, Al Birûni (XIe siècle) maîtrise parfaitement les théories importantes de son époque, notamment en astronomie. Ce qui, combiné à ses observations, lui vaut le surnom de « Maître ».

(A gauche : éclipses du Soleil et de la Lune; à droite, modèle planétaire d'après Al-Birûnî.



Abd-al-rahman al-Sûfi porta sur une carte céleste la faible lueur qui, un millénaire plus tard, devait nous révéler le monde des galaxies.

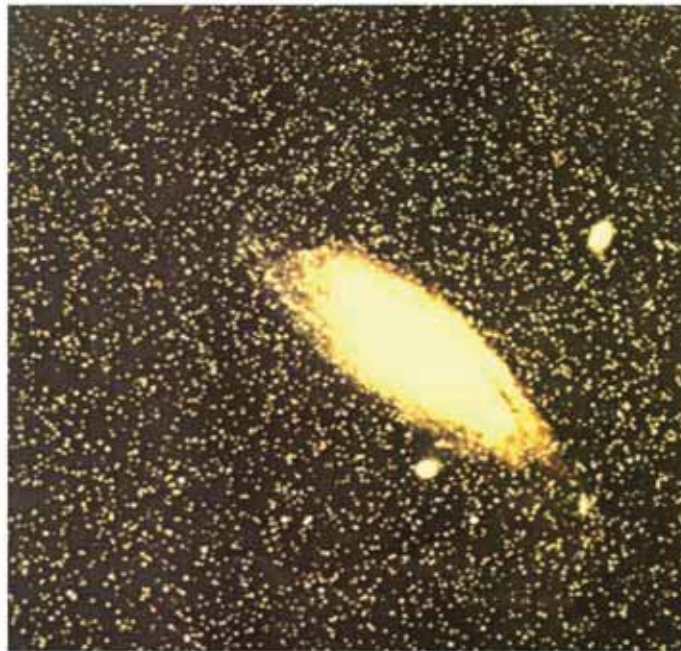
On peut, par une nuit sans lune, percevoir faiblement la nébuleuse d'Andromède.

Elle est le seul astre extragalactique visible à l'œil nu dans l'hémisphère boréal.

Abd-al-rahman al-Sûfi la repéra au dixième siècle.

Sur cette gravure extraite d'un mémoire d'Ismaël Bouillaud de 1667, elle est figurée par le petit nuage elliptique sous le bras d'Andromède, devant la bouche du poisson.

C'est en 1923 seulement, après l'avènement des grands télescopes, qu'Edwin Hubble reconnut sa vraie nature, celle d'une galaxie semblable à la nôtre, et ouvrit alors le domaine de la cosmologie.



La grande nébuleuse d'Andromède, l'une de nos plus proches voisines :
c'est une galaxie spirale semblable à la nôtre,
observée déjà par Abderrahman Al-Sûfi à l'oeil nu.

INSTRUMENTS DE L'ASTRONOMIE

Janvier 1610, Galilée dirige sa lunette vers le ciel



Le télescope de Herschel a permis de voir les 1^{ères} nébuleuses et Uranus



Prochaine génération de télescope : aussi grand que la Tour Eiffel



Astrolabe (arabe) en laiton ou en cuivre

Construit à Grenade vers 1280 (utilisé pour déterminer la hauteur du ciel ou d'un astre sur l'horizon)

Instrument utile aux navigateurs

L'ASTRONOMIE MODERNE



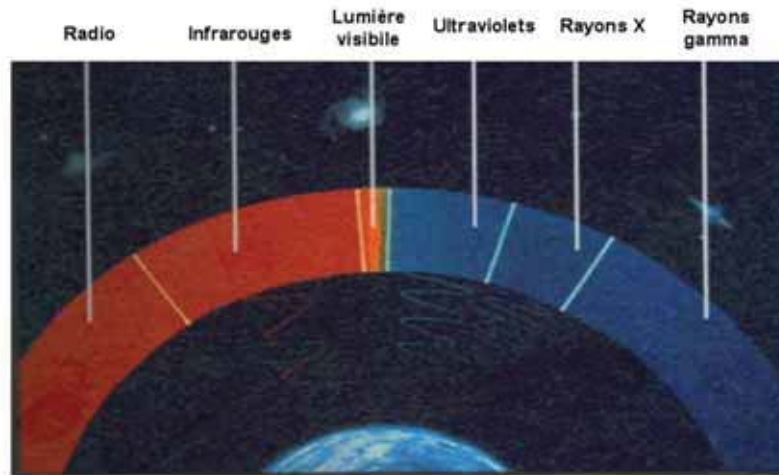
Le soir du 7 janvier 1610 marque le début de 1^{ère} de l'astronomie moderne ; à l'aide d'une petite lunette qu'il venait d'achever, Galilée découvrit les satellites de la planète Jupiter, et des cratères sur la lune. Deux lunettes de Galilée (à droite) sont conservées au Musée de l'Histoire des Sciences de Florence. L'objectif de la plus grande n'a même pas 4 cm de diamètre. Le doge de Venise fut tellement enthousiasmé par la lunette que Galilée lui avait offerte, qu'il lui tripla sa dotation annuelle. Au cours des trois siècles suivants des lunettes de plus en plus perfectionnées furent construites. Le télescope Hale, qui est représenté ici, possède un miroir parabolique de 5m de diamètre; cet instrument, achevé en 1948, capte 40 000 fois plus de lumière que les petites lunettes de Galilée. La lumière passe par la trappe de la coupole, touche le grand miroir (en bas, caché par la lourde carcasse métallique) et est réfléchi vers le cylindre qui se trouve dans la partie supérieure de l'instrument, où elle peut être captée par une plaque photographique. L'observateur peut prendre place dans le cylindre. Depuis 1950 la plaque photographique (la rétine des astronomes) peut enregistrer la lumière qui entre dans l'instrument pendant des heures entières ; de cette manière il est possible de photographier les astres qui ne sont même pas perceptibles à l'œil dans les lunettes les plus puissantes.

INSTRUMENTS DE L'ASTROPHYSIQUE



Contrairement à d'autres disciplines comme la chimie ou la physique, l'astronomie n'est pas une science expérimentale, mais une science basée sur l'observation. Depuis l'époque de Galilée, une discipline peut-être qualifiée de sciences si elle s'appuie sur les méthodes de l'expérimentation : cela signifie qu'une hypothèse formulée à partir de mesures effectuées sur un phénomène donné doit être validée par des expériences pouvant être reproduites, par exemple en laboratoire. Un chimiste peut ainsi renouveler autant de fois qu'il le veut une réaction chimique donnée afin de l'étudier tout comme un physicien peut faire tomber mille fois une pierre d'une tour jusqu'à ce qu'il ait bien compris quelles sont les caractéristiques de sa trajectoire. En astronomie, naturellement, l'expérimentation est impossible: on ne peut pas créer des planètes, des étoiles ou des galaxies en laboratoire! Pour étudier les astres, il n'y a que leur observation. Tout ce que nous savons des étoiles et de tous les autres objets célestes, nous le devons à la lumière et aux autres radiations électromagnétiques que nous parvenons à capter.

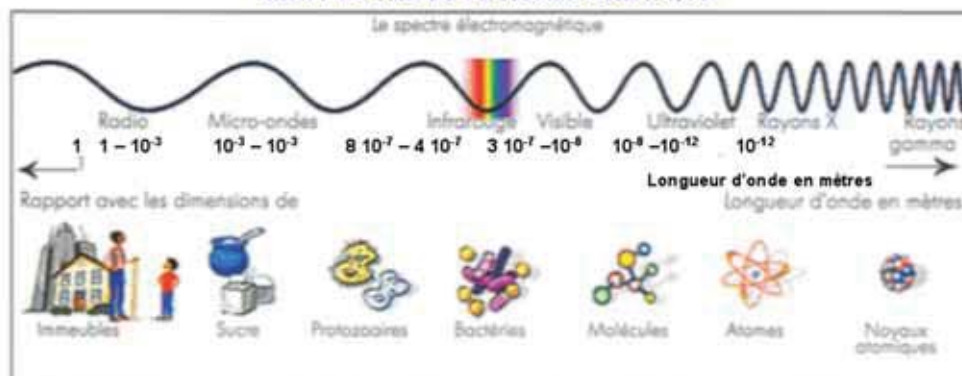
On peut ainsi connaître la position des astres, ou analyser le rayonnement que l'on capte, pour savoir quel objet, quelle est sa composition, à quelle distance il se trouve.



TOUTES LES COULEURS DE L'UNIVERS

Depuis la Terre, nous ne pouvons recueillir qu'une petite partie des ondes électromagnétiques qui proviennent des corps célestes. En effet, l'atmosphère retient une grande partie de rayonnements, comme le rayonnement X, le rayonnement gamma et l'ultraviolet. Cette protection est naturellement indispensable à la vie sur terre, qui serait autrement impossible, mais elle nous prive également d'informations fondamentales sur les différents objets célestes et sur les processus physiques qui s'y déroulent, en un mot, sur leur nature. Si l'on veut analyser l'ensemble du rayonnement électromagnétique, il est indispensable d'aller au-delà de l'atmosphère, en utilisant des observatoires astronomiques montés sur les satellites artificiels.

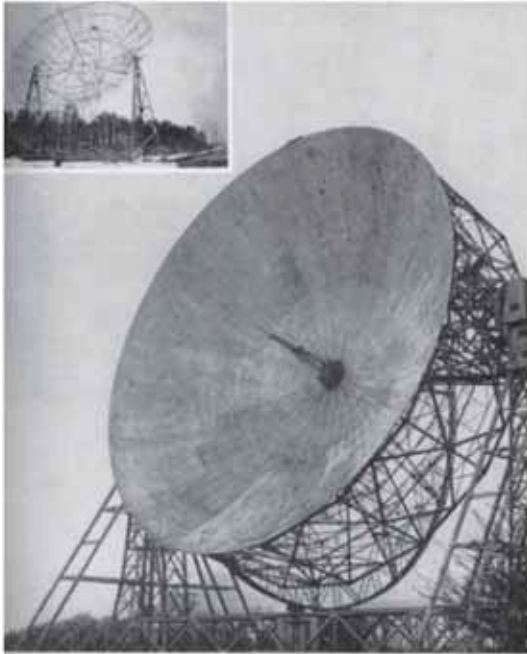
LE SPECTRE ELECTROMAGNETIQUE



RECONSTITUER LE PUZZLE

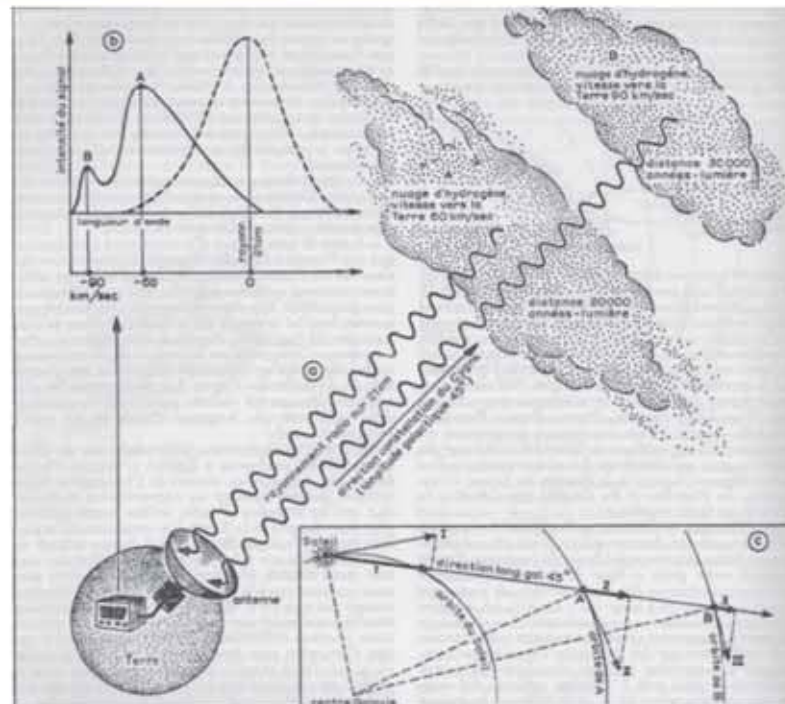
Le spectre électromagnétique est une succession continue de longueurs d'onde, allant de zéro à l'infini. Le nom donné aux différentes zones du spectre est tout à fait arbitraire, mais il permet de nous faire une idée de l'énergie transportée par le rayonnement. La région du spectre observable à l'œil nu correspond à la bande visible très étroite. Chaque type de rayonnement nous donne des informations sur les différents sous-systèmes de l'objet céleste.

La Radio-astronomie



Jusque vers 1850, les astronomes se sont principalement intéressés au système solaire. Ils étudièrent les lois des mouvements planétaires et découvrirent de nouvelles planètes. A partir du milieu du 19^{ème} siècle, l'intérêt des astronomes se porta principalement sur les étoiles, ainsi que sur les objets nébuleux que l'on connaissait depuis longtemps déjà, mais dont la nature exacte était restée inconnue. En 1932, l'astronomie fut enrichie d'un nouvel instrument : le radiotélescope. Cet instrument peut capter le rayonnement radio qui est émis par certains astres et par des nuages de gaz interstellaires. Le radiotélescope a déjà permis de faire des découvertes importantes ; entre autre, il a mis en évidence la structure spiralée de notre Galaxie.

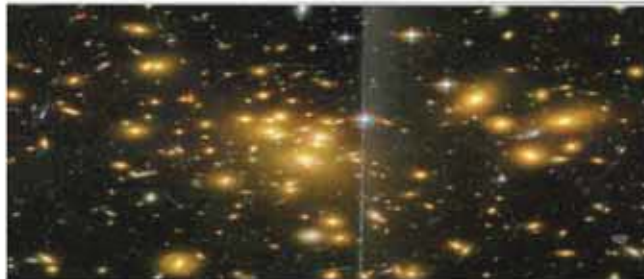
Observatoire de Jodrell Bank, Manchester



La réception du rayonnement sur 21 cm de longueur d'onde, émis par les atomes d'hydrogène interstellaire.

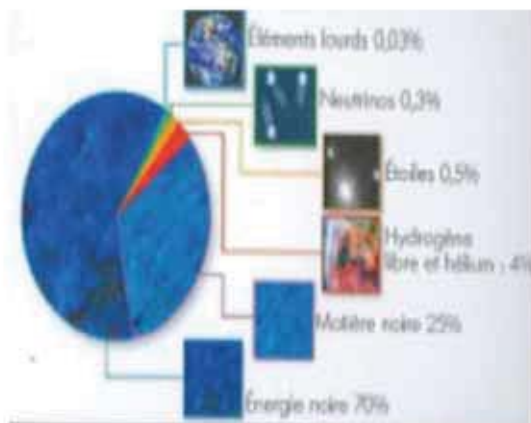
LA GRAVITATION & L'UNIVERS

Depuis l'époque de Newton nous pensons tout savoir sur la gravitation et notre expérience quotidienne nous conforte dans cette idée : si on lâche un objet, il tombe invariablement par terre. Dans le monde sensoriel, la gravité est un phénomène extrêmement facile à comprendre et à vérifier. Toutefois, nous avons besoin de clés d'explications plus sophistiquées pour interpréter certains aspects de l'Univers. C'est ce que propose la théorie de la relativité d'Einstein dans laquelle l'espace, le temps et la matière sont liés; selon cette théorie, l'espace s'étend depuis le Big Bang grâce à son énergie qui est répulsive et non attractive. De plus, l'espace et le temps peuvent parfois se mêler et former des nœuds complexes, les trous noirs, dans lesquels le temps semble s'arrêter. Ces hypothèses, qui n'étaient que pure science-fiction il y a un siècle, ont toutes été rigoureusement démontrées. A présent, il nous reste à comprendre quelle a été l'action de l'énergie initiale dans le Big Bang, ce qui se passe réellement aux abords d'un trou noir et quelle est la nature exacte de cette énergie «noire», que l'on ne connaît toujours pas et qui provoque l'expansion de l'Univers depuis sa création. Il faut aller plus loin qu'Einstein, parce que les lois de la Physique élaborés progressivement pendant des siècles qui nous ont permis d'atteindre de nombreux résultats, semblent tout simplement inapplicables dans ces situations limites. Ce n'est qu'en étudiant de façon encore plus approfondie la gravitation et ses conséquences que nous pourrions élaborer un modèle d'Univers plus conforme à la réalité. Comprendre ce qui s'est passé pendant les 3 secondes qui ont suivi le Big Bang fait partie des objectifs à atteindre par la prochaine génération d'astronomes.



LA RECETTE DE L'UNIVERS

Une pincée d'éléments lourds, 0,3% de neutrinos, seulement 0,5% d'étoiles et 4% d'hydrogène et d'hélium. Voilà ce que contient l'Univers, dans toutes les longueurs d'onde. Le reste, les 95%, seraient de la matière et de l'énergie noires dont nous n'avons pas constaté directement l'existence mais dont nous pouvons mesurer les effets. Voilà de façon très résumée à quel point sont parvenues les observations les plus récentes, grâce en particulier en télescope Hubble.

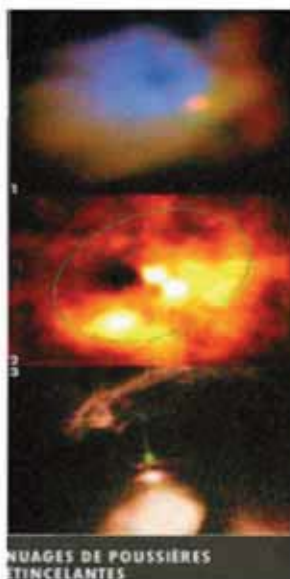


ENERGIE

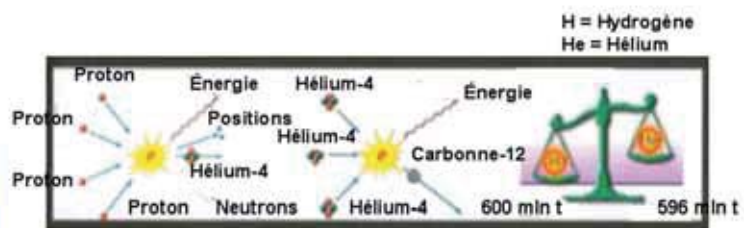
Les étoiles sont formées à partir d'énormes nuages de gaz et de poussières qui, lentement mais inexorablement, se contractent sous l'action de la force gravitationnelle. Les réactions nucléaires ont lieu au centre des protoétoiles à des températures de l'ordre de millions de degrés à des densités très élevées. Ces réactions, au cours desquelles les noyaux les plus légers se fondent en noyaux d'éléments plus lourds, provoquent l'expulsion d'énormes quantités d'énergie vers l'extérieur de l'étoile.



Réactions à l'intérieur des étoiles (le soleil par exemple)

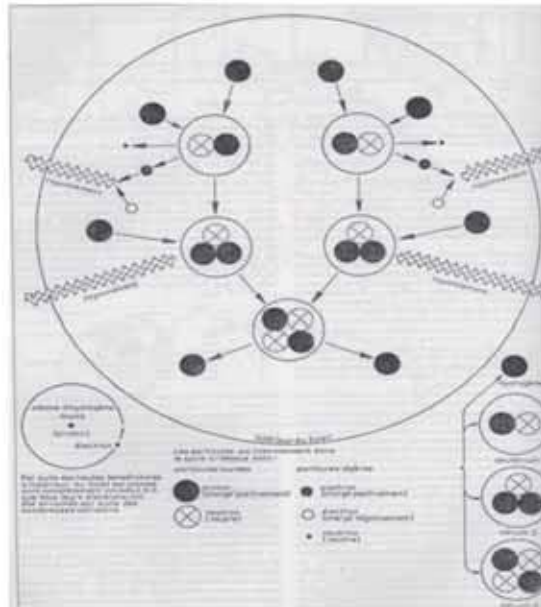


NUAGES DE POUSSIÈRES
ÉTINCELANTES



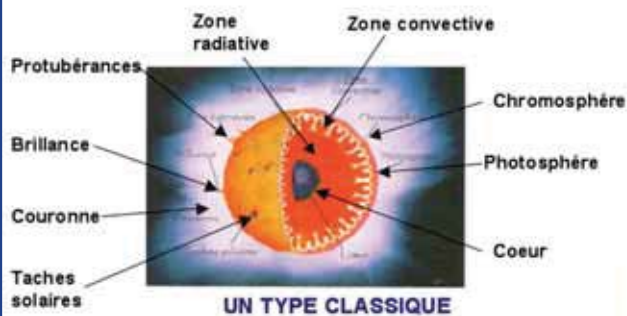
Chaque seconde, notre soleil brûle 600 millions de tonnes d'hydrogène et le transforme grâce à des réactions nucléaires en 596 millions de tonnes d'hélium. La différence de masse, 4 millions de tonnes, est convertie en énergie selon la fameuse équation d'Einstein $E = mc^2$. La fusion de 4 noyaux d'hydrogène (protons) donne un noyau d'hélium et la fusion de 3 noyaux d'hélium donne un noyau de carbone.

Réactions thermonucléaires



La réaction proton-proton, source d'énergie nucléaire à l'intérieur des étoiles, où la température est de 15 millions de degré au moins. C'est la même réaction qui se produit également dans le soleil.

A l'intérieur du soleil



Le Soleil représente l'exemple type de l'étoile en phase de combustion d'hydrogène. Il est composé d'un noyau compact (le «cœur») dans lequel ont lieu les réactions nucléaires. Ce noyau est recouvert de plusieurs couches dont la température interne baisse progressivement.

TEMPERATURE SUPERFICIELLE



LES DÉTECTIVES DE L'ÉVOLUTION

Au début du siècle dernier, les astrophysiciens téor Hertzprung et Henry Norris Russell se sont aperçus que l'on pouvait représenter les différentes phases de l'évolution des étoiles sur un seul diagramme en mettant en relation leurs propriétés fondamentales : masse, luminosité, température superficielle.

LE DIAGRAMME HR

Sur le diagramme d' Hertzprung-Russel, on voit bien la corrélation qui existe entre la température et la luminosité d'une étoile. La plupart des étoiles passent en général par une séquence très précise, la «séquence principale» qui traverse le diagramme en diagonale.

Le monde de Galaxies

DANS LE MONDE DES SPIRALES



UN TOURBILLON MAJESTUEUX

Au centre de la photo, on voit le noyau brillant, un globe de 80 années-lumière de diamètre qui émet une quantité de lumière équivalente à 100 millions de soleils. Les astronomes estiment que sa masse est équivalente à 40 millions de fois celle du soleil.



UNE LENTILLE TRES PARTICULIERE

La théorie de la relativité générale, énoncée par Albert Einstein en 1916, est, avec le principe cosmologique (selon lequel la matière est répartie dans l'univers de manière homogène et isotrope), un des deux piliers sur lesquels repose le modèle de l'univers. Cette théorie allait à l'encontre des notions élaborées par Newton, qui restent toutefois valables pour des corps qui sont au repos ou qui se déplacent très lentement par rapport à la vitesse de la lumière; selon Newton, la présence d'une masse dans l'espace environnant crée un «champ» gravitationnel et, si un deuxième corps pénètre dans ce champ, il est attiré par le premier corps. Ce principe se vérifie par exemple quand quelque chose nous échappe des mains et tombe sur le sol. Pour Einstein, c'est la matière qui déforme l'espace et au cours de cette interaction, c'est elle qui «dit» en substance à l'espace comment se courber, et l'espace «dit» en retour à la matière comment se déplacer.

La photo présente une des plus belles démonstrations de la relativité générale. Le cluster de galaxies 0024+1654, avec sa grande masse, dévie la trajectoire de la lumière en provenance d'une galaxie de deux fois plus éloignée. Une lentille qui grossit et déforme l'image originale de la galaxie, est visible sur les cinq silhouettes bleutées disposées autour de l'amas.

NOVAE & SUPERNOVAE

LA FORMATION DES NOVAE

Il s'agit d'un système binaire, formé d'une étoile naine blanche et d'une étoile géante rouge dont l'atmosphère très étendue se riche en hydrogène, mais dont le noyau est constitué à base de la première étoile. En raison de leur proximité, leur attraction gravitationnelle est forte et un flux de matière commence à passer de l'étoile géante rouge à la naine blanche. Cette matière forme un anneau autour de la naine blanche avant d'atteindre l'étoile. L'équilibre de la naine blanche est rompu et l'étoile libère périodiquement de la matière en provoquant une explosion non destructive.



NOVAE

BULLES ET ANNEAUX DE MATIÈRE

Deux exemples d'étoiles novae. En haut, la nova récemment 7 Pyroïde, qui présente une fréquence d'explosions élevée. La photo montre que l'explosion a libéré plus de 2 000 bulles de matière dispersées dans une zone d'une année lumineuse environ de diamètre. En bas, la nova de Cygne, qui a explosé le 19 février 1992. Cette explosion a produit un anneau très petit qui s'est étendu sur 160 milliards de kilomètres environ, comme on le voit sur cette photo prise en janvier 1994.





La rupture explosive d'un équilibre

L'explosion d'une supernova est due en grande partie à la rupture soudaine de l'équilibre stellaire. Après une succession de réactions nucléaires, le fer finit par implorer dans le noyau de l'étoile. Toutefois, contrairement aux réactions nucléaires habituelles, celle-ci nécessite de l'énergie au lieu d'en produire! En l'absence de pression interne, l'étoile implose, soumise à la force de gravité. Les couches périphériques de l'étoile se précipitent sur le noyau et provoquent une explosion cataclysmique. L'enveloppe stellaire est expulsée à une vitesse très élevée qui peut atteindre 30 000 Km/s et qui commence à s'étendre. Dans le noyau, il ne reste qu'une étoile à neutrons très petite mais extrêmement dense.

Le télescope Hubble

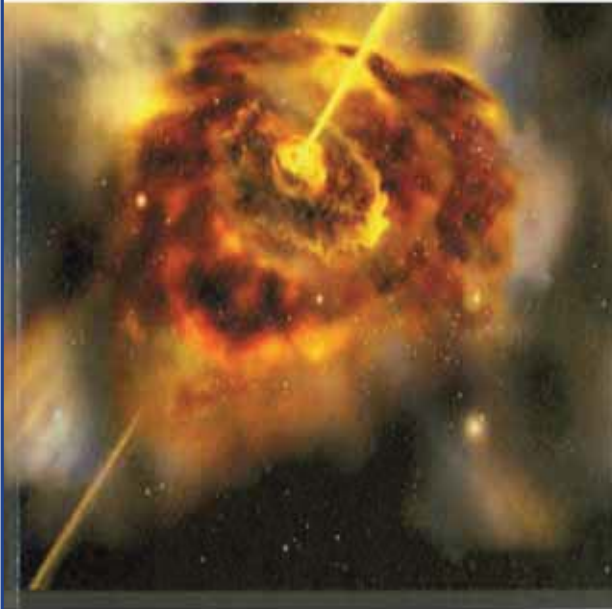
En 1990, le grand télescope spatial Hubble a été mis en orbite. Il doit son nom à l'astronome américain Edwin Hubble qui a établi pour la première fois en 1923 à quelle distance se trouvait la galaxie d'Andromède (M31), dévoilant ainsi sa véritable nature. Grâce à cet instrument puissant, qui opère au-delà de l'atmosphère terrestre, nous pouvons aujourd'hui percevoir des détails très précis des galaxies et les observer dans de nombreuses couleurs «invisibles» depuis la Terre.



DUS GÉNÉRATIONS D'ÉTOILES
 Les régions centrales de cette galaxie, où la densité est élevée, contiennent des étoiles de toutes les générations, de la plus ancienne à la plus récente. Les régions périphériques, en revanche, contiennent principalement des étoiles jeunes, formées à partir du gaz et de la poussière présents dans la galaxie.

Fabriquée par la NASA avec la collaboration de l'ESA, l'Agence Spatiale Européenne, Hubble tourne en orbite autour de la terre à 612 km d'altitude. Comme il se trouve hors de l'atmosphère qui gêne l'observation du ciel, il parvient à capter des sources jusqu'à 30 fois moins lumineuses que celles que l'on observe depuis la Terre. Il nous dévoile un Univers «inédit» avec des trous noirs, des étoiles en formation et surtout de nombreuses galaxies très lointaines.

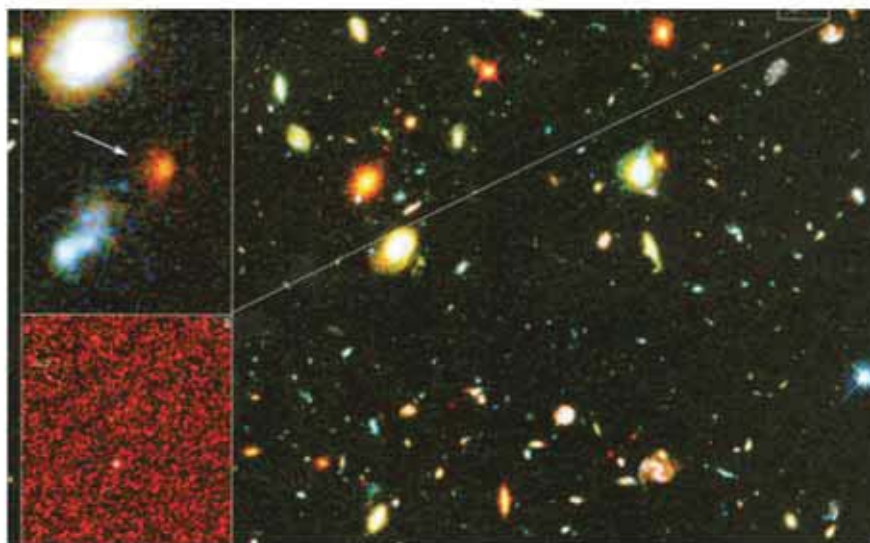
Masse noire



Une lentille pour révéler la matière noire

Abell 1689, au centre de la photo, est un des amas de galaxies connus les plus massifs, situés à 2,2 milliards d'années lumière de nous. Son énorme masse gravitationnelle est due au million de milliards d'étoiles qui composent les différentes galaxies de l'amas et à la «masse noire» qu'elles contiennent. Cet amas agit comme une lentille d'agrandissement de 2 millions d'années-lumière de diamètre. Cette lentille nous permet de voir beaucoup plus loin et de révéler des détails que l'on ne pourrait pas distinguer avec les instruments actuels. Cette lentille gravitationnelle représente un véritable «coup de main» cosmique et on a déjà découvert plus d'une, même si elles sont toujours très difficiles à identifier. Pour réaliser cette photo, il a fallu par exemple effectuer 13 heures de pose ininterrompue. Les recherches se sont portées sur les effets d'agrandissement des lentilles gravitationnelles et certains objets, comme sur cette photo, qui ne sont visibles que grâce à l'effet de la lentille, seraient en réalité distants de 13 milliards d'années-lumière. On dispose ainsi d'informations sur les premières étapes de la formation des galaxies et sur l'existence possible de la «matière noire».

Expansion de l'univers



(Temps : 15 milliards d'années environ)

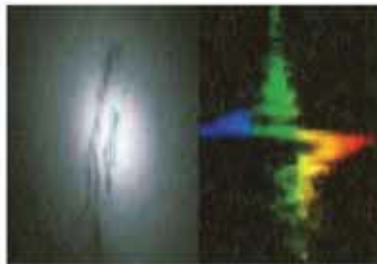
DISTANCES, MASSES, EXPANSION



HUBBLE ET LE DECALAGE VERS LE ROUGE

C'est Edwin Hubble qui, en 1929, a permis le premier d'envisager que l'Univers était en expansion. En étudiant 18 galaxies spirales, Hubble a découvert une relation entre leur éloignement et leur vitesse de déplacement. Selon les observations de l'astronome américain, plus les galaxies étaient éloignées de la notre, plus elles apparaissaient « rougeâtres ». Hubble a expliqué ce phénomène par le fait que les galaxies étaient en train de s'éloigner. En effet, si une source lumineuse s'éloigne, la radiation qu'elle émet sur le spectre se décale vers le rouge. La « loi de Hubble », qui affirme que plus une galaxie est loin de nous plus elle semble s'éloigner rapidement, a été considérablement affinée, mais reste valable et demeure un des piliers de notre cosmologie actuelle.

DISTANCES, MASSES, EXPANSION

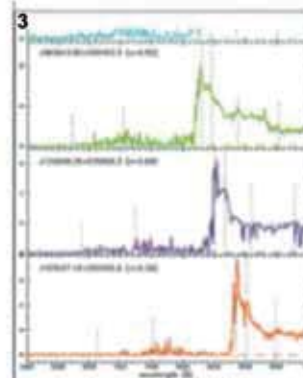
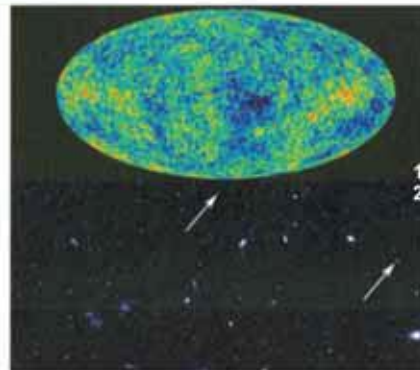


UN INDICE CLAIR ET NET

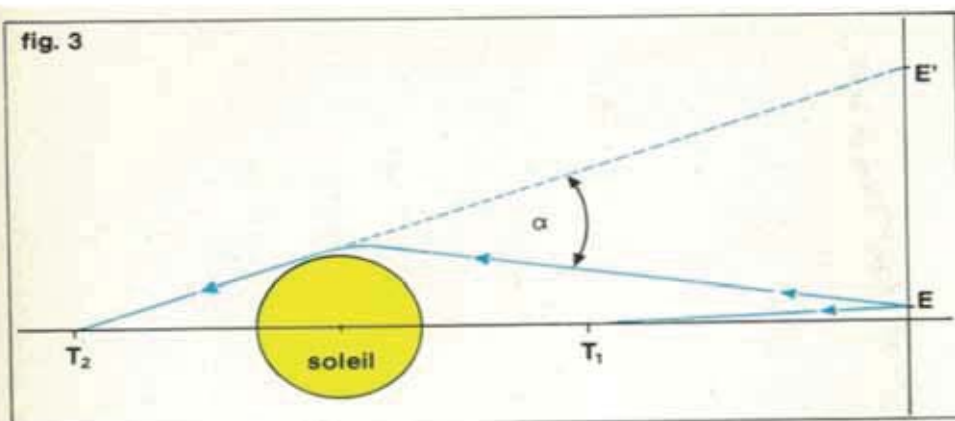
On pense que les parties centrales des galaxies évoluées contiennent souvent, voire toujours, des trous noirs extrêmement massifs. Leur existence a été révélée plusieurs fois au cours de ces dernières années par des preuves indirectes, en constatant les effets de leur présence dans le signal provenant de nombreuses galaxies. A gauche, nous voyons par exemple une des preuves les plus éclatantes de l'existence d'un trou noir dans le noyau de M84. A droite, il s'agit de la trace en zigzag qui vient de l'analyse spectroscopique de la lumière issue du centre de M84. Ces photos démontrent le mouvement de rotation du gaz et des étoiles au centre de la galaxie et en particulier la présence d'un objet extrêmement massif, 300 millions de fois supérieur à la masse du soleil, qui se rapproche et qui s'éloigne. Les vitesses en jeu sont de l'ordre de 1 300 000 Km/h et l'ensemble, composé du trou noir et du disque de poussières et d'étoiles, est contenu dans une région ne mesurant que 26 années-lumière. S'il n'y avait pas de trou noir, la trace spectroscopique serait à peu près constituée d'une ligne d'une seule couleur.

LES DERNIERS RESULTATS

On a pu observer et cartographier précisément le rayonnement de lumière micro-onde résultant des échos du Big Bang(1), nous avons relevé l'existence d'objets très lointains qui appartiennent apparemment à l'époque où les galaxies ont commencé à briller, il y a 13 milliards d'années (2), nous avons analysé le signal électromagnétique des quasars(3) qui sont apparus un milliard d'années seulement après ce que nous considérons aujourd'hui comme le début de l'expansion de l'Univers, avant la formation des étoiles.



Relativité générale



Phénomène de déviation de la lumière d'une étoile située derrière le soleil, et mesure de l'angle de déviation (déviation des rayons lumineux par le soleil)



Conclusion :

A l'issue de ce périple qui nous a permis de nous arrêter sur quelques unes des grandes étapes de l'histoire de l'Astronomie, à travers la relation de l'homme au ciel, nous allons conclure en rappelant le jugement donné par Paul Couderc, célèbre astronome français du 20^{ème} siècle : «source d'inspiration, école de vérité, l'astronomie n'a pas épuisé toutes ses vertus parce qu'elle permet toujours des libérations nouvelles».

Références Bibliographiques :

- Hubert Reeves, «Patience dans l'azur» (Éditions du Seuil).
- Hubert Reeves, «Dernières nouvelles du Cosmos» (Éditions du Seuil).
- Leopoldo Berracchio, «Le petit Atlas de l'Univers» (Flammarion)
- Brian May, Patrick Moore, Chris Lintott, «Bang : l'histoire complète de l'Univers» (Flammarion).
- Evry Schatzman, «Structure de l'Univers» (Hachette).
- Sir James Jeans, «Astronomy and Cosmology» (Dover Publications, Inc. New-York).
- Jean Heidman, «Introduction à la Cosmologie» (PUF).
- Tj. De Vries et B. Ernst, «Encyclopédie de l'Univers» (Edition Sequoia).
- Paul Couderc «l'Univers» 6th ed (PUF).
- Couderc P., Pecker J. C., Schatzman E. «l'Astronomie au jour le jour» (Gauthier-Villars).

