

Cours d'histoire des sciences

EPITECH 1^{ère} année
2005-2006

Bertrand LIAUDET

Histoire de la représentation de l'Univers

3 : L'astronomie stellaire et la révolution einsteinienne

Introduction

Astronomie solaire vs astronomie stellaire

Au début de la révolution copernicienne, le développement de l'astronomie a surtout été un développement de la connaissance du système solaire : cinématique de Kepler, mécanique de Newton, mesure du système solaire, peuplement du système solaire. Ce mouvement, commencé en 1543 avec la publication de Copernic, s'est développé au 17^{ème} siècle et a continué jusqu'à nos jours : on a récemment découvert plusieurs dizaines de satellites de Jupiter, les dizaines de milliers d'astéroïdes au côté de Pluton, un astéroïde la taille d'une petite planète.

Cependant, la nouvelle connaissance du Monde va favoriser le développement de l'astronomie stellaire. Dès la fin du 18^{ème} siècle, son développement va commencer pour ne plus s'arrêter et amener à une nouvelle vision du Monde.

Si la première révolution a consisté dans le passage du géocentrisme à l'héliocentrisme, on peut dire que la seconde révolution, qui est l'aboutissement, ou la vérité, de la première, consiste dans le passage de l'héliocentrisme à l'a-centrisme.

Avant d'en raconter l'histoire, précisons ce que sont, à l'origine, les principaux objets de l'astronomie stellaire : les nébuleuses et les galaxies.

Premiers éléments de l'astronomie stellaire : nébuleuses et galaxies

A l'origine, le terme « nébuleuse » (du latin nebula, « nuage ») s'appliquait à tous les corps célestes d'apparence diffuse, c'est-à-dire à tous les objets étendus sur le plan du ciel, à la différence des étoiles qui paraissent ponctuelles.

Ainsi, un grand nombre d'amas d'étoiles ou de galaxies ont été initialement appelés nébuleuses, avant que leur nature ne soit clairement identifiée.

Aujourd'hui, en astronomie, une nébuleuse est une concentration de gaz et de grains de poussières observée dans le milieu interstellaire. On peut distinguer entre :

Les nébuleuses planétaires : ce sont des enveloppes de gaz qu'une ancienne étoile de masse moyenne rejette au cours d'une étape tardive de son évolution, la phase de géante rouge, lorsqu'elle atteint le stade ultime de naine blanche. Plusieurs milliers de nébuleuses planétaires ont été découvertes dans la Voie lactée. Ces nébuleuses ont un diamètre d'environ une année-lumière. Leur masse atteint le cinquième de celle du Soleil.

Les nébuleuses par réflexion et à émission sont constituées par des nuages de gaz et de poussières éclairés par des étoiles proches. Ces nébuleuses ont un diamètre d'environ 100 années-lumière. Leur masse atteint un million de Soleil ou plus.

Le langage courant, du fait de l'histoire de la découverte des nébuleuses et des galaxies, parle aussi de **nébuleuses elliptiques et spirales**. C'est ce qu'on nomme plutôt aujourd'hui « galaxie ». Elles sont situées à des millions d'années-lumière. Une galaxie peut avoir un diamètre de cent mille années-lumière et englober des centaines de milliards d'étoiles. Ce sont ces nébuleuses que Herschel a résolues en étoiles.

Une galaxie est une nébuleuse spirale composée d'un vaste ensemble d'étoiles (une centaine de milliards), de gaz et de poussières interstellaires, dont la cohésion est assurée par la gravitation autour d'un centre commun, le noyau. Une galaxie contient des nébuleuses planétaires, par réflexion et à émission.

On parle de la Galaxie (avec un grand « g ») pour la Voie lactée, c'est-à-dire la nébuleuse spirale à laquelle le Soleil appartient. Toutes les étoiles visibles à l'œil nu depuis la Terre appartiennent à la Voie lactée. Le Soleil est une étoile périphérique de cette galaxie.

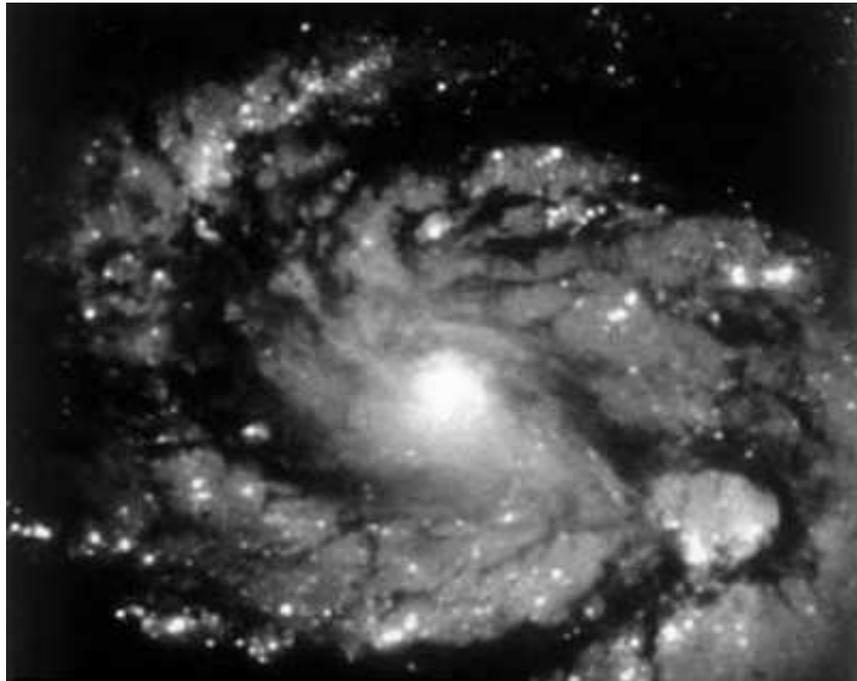
Quelques galaxies :



La Voie Lactée



La galaxie d'Andromède. Galaxie en forme de spirale, semblable à la Voie Lactée.



Galaxie M 100. Prise en photo par le télescope spatial Hubble en 1993.

Quelques nébuleuses :

La grande nébuleuse M42 d'Orion se trouve dans la constellation d'Orion, à 1 600 années-lumière de la Terre. Elle constitue un berceau d'étoiles naissantes, site d'étude privilégié de l'astronomie infrarouge.



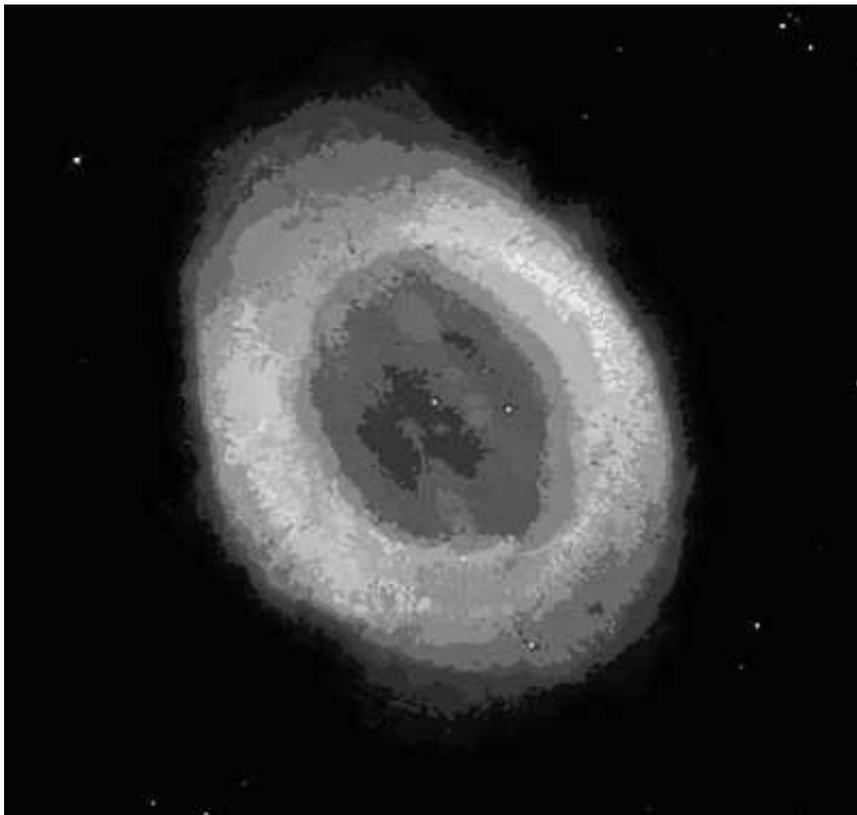
**La grande nébuleuse M42 d'Orion
Nébuleuses à l'origine des galaxies**

Engendrée par l'explosion d'une supernova au XI^e siècle, la nébuleuse du Crabe renferme un pulsar, dont le spectre d'émission, très large, s'étend dans les domaines des rayons X et gamma, de la lumière visible et des ondes radioélectriques.



La nébuleuse du Crabe

La nébuleuse du Crabe constitue le vestige de l'explosion de la supernova observée en 1054 par les astronomes chinois.



nébuleuse planétaire, issue de l'évolution non explosive d'une géante rouge

La nébuleuse annulaire M 57 (NGC 6720) est une nébuleuse planétaire située dans la constellation de la Lyre. Les nébuleuses planétaires se forment autour des étoiles qui ont éjecté leur couche extérieure et qui se trouvent dans la phase transitoire entre la géante rouge et la naine blanche. Cette image a été obtenue par le télescope spatial Hubble en octobre 1998.

Quelques éléments chiffrés

1 année-lumière = 10 000 milliards de kilomètres

Unité astronomique = Distance Terre-Soleil = 150 millions de kilomètres

Age de l'Univers : 15 milliards d'années-lumières

Taille de l'Univers de Ptolémée : moins d'une unité astronomique : environ 100 millions de kilomètres.

Taille de l'Univers actuel : 150 000 milliards de milliards de kilomètres : 1,5 millions de milliards de fois plus grand que l'Univers de Ptolémée !

Age de l'Univers chrétien : moins de 10 000 ans. L'Univers actuel est 1,5 millions de fois plus vieux que l'Univers chrétien.

Petite classification des étoiles

Développement des étoiles

1 année-lumière = 10 000 milliards de kilomètres

La Grande Nébuleuse d'Orion est le berceau d'étoiles naissantes. Ces étoiles sont en fait de grandes masses de gaz qui se contractent.

Les étoiles de taille moyenne sont à la moitié de leur vie.

Les étoiles de faible masse, comme le Soleil, finissent leur vie en se transformant en naines blanches, petites étoiles très denses et très chaudes.

Les étoiles plus massives deviennent instables et s'effondrent lors d'une explosion appelée supernova.

Etoile binaire

Système de deux étoiles liées entre elles par des forces d'attraction gravitationnelle.

La binarité n'est pas un phénomène rare dans l'Univers : plus de la moitié des étoiles de notre galaxie sont assemblées en systèmes binaires ou en systèmes multiples.

Les étoiles d'un système binaire ont un mouvement de rotation autour du centre de masse commun du système (barycentre), selon deux orbites elliptiques ou circulaires ; les deux orbites sont situées de part et d'autre du centre de masse situé au foyer des orbites elliptiques.

Etoile variable

Etoile dont la luminosité (ou l'éclat) varie au cours du temps, périodiquement ou non, sur des échelles de temps très courtes par rapport aux échelles de temps associées à l'évolution stellaire. La variation de luminosité peut être intrinsèque à l'étoile (étoile variable pulsante) ou bien extrinsèque (étoiles binaires à éclipses).

Céphéide

Les céphéides sont des étoiles variables pulsantes très lumineuses et dotées d'une variabilité d'une grande amplitude. Les céphéides montrent une variation périodique, dont la période va d'un jour environ à une centaine de jours. Elles sont toutes des centaines de fois plus lumineuses que le Soleil (300 à 40 000 luminosités solaires), alors que leur température de surface (6 000 K) est comparable à celle du Soleil.

On distingue deux types de céphéides. Les céphéides de type I, dites classiques, sont des supergéantes rouges de masse intermédiaire (3 à 9 fois la masse solaire) observées dans les bras des galaxies spirales. Les céphéides de type II sont également des étoiles évoluées, mais leur masse est plus faible (de l'ordre d'une masse solaire) et sont près de deux fois moins lumineuses.

Nébuleuse

Concentration de gaz et de grains de poussières observée dans le milieu interstellaire.

Les nébuleuses en émission

- La première classe de nébuleuses est notamment caractérisée par un spectre typique de l'ionisation des atomes d'hydrogène. Une étoile extrêmement chaude (types spectraux O et A) située à proximité émet un rayonnement intense en ultraviolet qui interagit avec les atomes de la nébuleuse. Les nébuleuses planétaires, les vestiges de supernovae et les régions HII appartiennent à ce type.
- **Les nébuleuses planétaires** : observées à travers un télescope, elles ressemblent, en général, à des planètes. En réalité, ce sont des enveloppes de gaz qu'une ancienne étoile de masse moyenne rejette au cours d'une étape tardive de son évolution, la phase de géante rouge, lorsqu'elle atteint le stade ultime de naine blanche.
- Il existe des nébuleuses plus spectaculaires, mais moins nombreuses : **les nébuleuses engendrées par des explosions de supernovae**. La plus connue est probablement la nébuleuse du Crabe, dans la constellation du Taureau.

Les nébuleuses par réflexion

La seconde classe de nébuleuses rassemble les nébuleuses caractérisées par un rayonnement similaire à celui d'une étoile. Une étoile relativement chaude (type spectral inférieur au type B) est enfouie au sein de la nébuleuse. Cette étoile est trop froide pour ioniser les atomes du nuage, mais elle illumine la poussière qui diffuse le rayonnement incident.

Ces nébuleuses sont **associées aux jeunes étoiles** en formation (protoétoiles).

Les nébuleuses en absorption

La dernière classe de nébuleuses est la plus simple à concevoir. La densité de gaz du nuage est tellement élevée que tout le rayonnement stellaire situé en arrière-plan est intégralement absorbé. Les silhouettes des nébuleuses en absorption apparaissent comme des taches sombres sur le fond lumineux. **La nébuleuse de la Tête de Cheval dans la constellation d'Orion en est un exemple célèbre.**

En final, on peut distinguer entre :

- Les nébuleuses planétaires, issues de l'évolution non explosive d'une géante rouge
- Les nébuleuses issues de l'explosion d'une supernova
- Les nébuleuses à l'origine des galaxies

Naine blanche

Objet généralement peu lumineux, de petite masse, très compact et dense, caractéristique de la phase ultime de l'évolution de la majorité des étoiles ayant épuisé leurs ressources nucléaires. C'est le destin probable de notre Soleil au terme de son évolution.

Supergéante rouge

étoile de très grande luminosité (classe de luminosité I) et de très grand rayon.

Les supergéantes sont les étoiles les plus grandes que l'on connaisse : leur diamètre dépasse 400 fois le diamètre solaire. Elles sont peu denses ; leur masse varie de 0,1 à 40 fois la masse du Soleil. Ce sont des étoiles évoluées (voir Hertzsprung-Russel, diagramme de). Le cœur stellaire est composé de noyaux de carbone ou d'éléments plus lourds (oxygène, néon, fer) (voir Triple alpha, processus).

Nova et supernova

Phases de l'évolution de certaines étoiles dont l'éclat augmente fortement et de façon soudaine.

Dans le cas d'une nova, l'augmentation de la luminosité est suivie de sa baisse progressive et le retour à un éclat normal peut prendre de nombreuses années.

Dans le cas d'une supernova, en revanche, l'explosion détruit ou altère profondément l'étoile. Les supernovae sont bien plus rares que les novae, souvent visibles sur des photographies du ciel.

Étoile à neutrons

Objet stellaire extrêmement compact et dense, constitué principalement de neutrons libres (d'où son nom), et dans une moindre mesure d'électrons, de protons et de noyaux atomiques exotiques (trop instables pour exister sur Terre).

La formation d'une étoile à neutrons résulterait de l'explosion en supernova d'une étoile massive au terme de son évolution. Au tout début de sa formation, le champ magnétique contenu dans une étoile à neutrons est très intense, et serait à l'origine d'un puissant rayonnement électromagnétique observé sous la forme d'un pulsar.

Pulsar

Source de rayonnement électromagnétique intense émis dans la gamme des longueurs d'onde radio et caractérisé par une modulation périodique de l'émission.

Selon le modèle théorique en cours à la fin du XXe siècle, le pulsar est une étoile à neutrons en rotation rapide.

Le premier pulsar (PSR 1919 + 21) a été découvert par hasard en 1968 par une étudiante britannique Jocelyn Bell-Burnell et son directeur de thèse Anthony Hewish.

Trou noir

Région de l'espace dotée d'un champ gravitationnel si fort qu'aucun corps ni aucun rayonnement ne peut s'échapper de son voisinage. Cette région a une limite sphérique appelée horizon, ou surface du trou noir, que la lumière peut traverser sans pouvoir en sortir. Ainsi, cette région apparaît noire. Un tel champ peut être créé par un corps de haute densité et de masse relativement petite — égale ou inférieure à celle du Soleil — comprimée dans un volume très petit, ou bien par un corps de faible densité et de masse très importante.

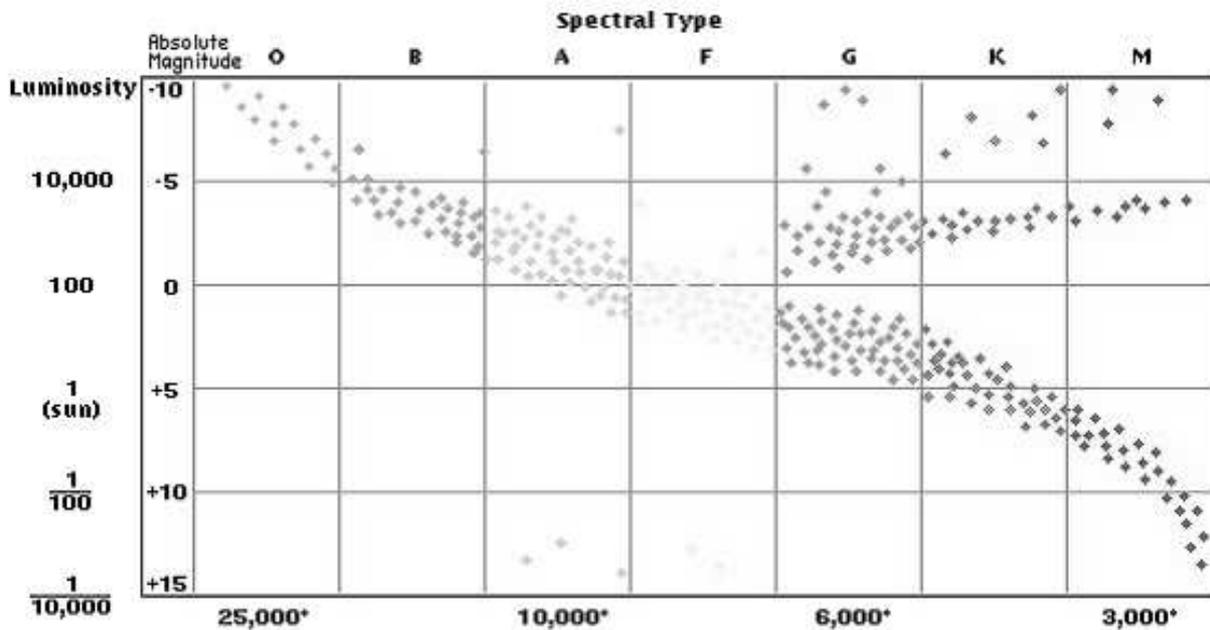
Les trous noirs peuvent se former au stade final de l'évolution d'une étoile massive. Le trou noir apparaîtrait à la suite de la contraction gravitationnelle de la masse de l'étoile lorsque cette masse atteint plusieurs fois la masse du Soleil. En effet, dans ce cas, l'étoile s'effondre indéfiniment sur elle-même, aucune pression ne pouvant enrayer cette évolution. Le trou noir obtenu est alors extrêmement dense.

Le Soleil

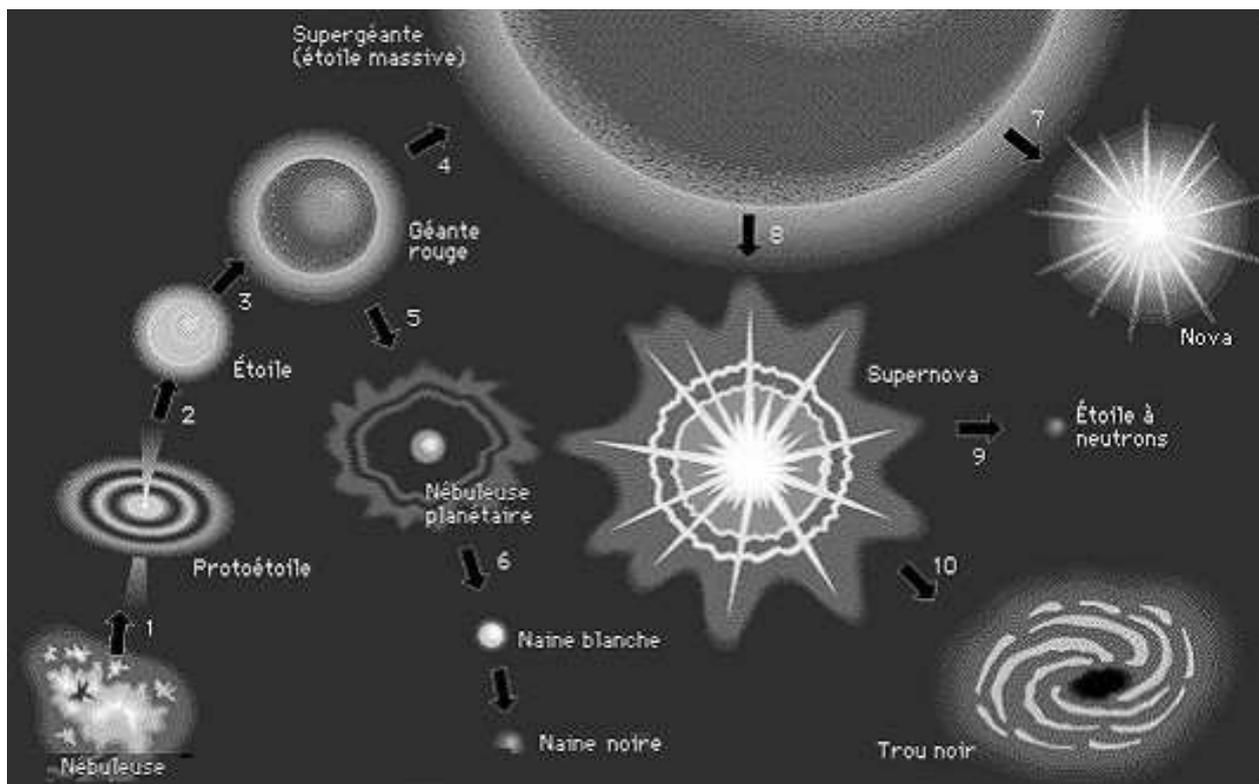
Le Soleil est aujourd'hui vieux d'environ 4,6 milliards d'années. Il recèle assez d'hydrogène dans son noyau pour que la réaction nucléaire dure encore 4,6 milliards d'années. Lorsque le Soleil aura épuisé ses réserves d'hydrogène, il changera de structure. Sa surface externe s'étendra au-delà de l'orbite actuelle de la Terre ou davantage : il se transformera en une géante rouge, légèrement plus froide en surface qu'actuellement, mais 10 000 fois plus brillante en raison de sa taille gigantesque. Le Soleil demeurera une géante rouge, brûlant l'hélium dans son noyau, pendant un demi-milliard d'années seulement : sa masse n'est pas suffisante pour qu'il puisse traverser les cycles successifs d'une combustion nucléaire ou d'une explosion cataclysmique, comme cela se produit pour certaines étoiles. Après le stade de géante rouge, le noyau résiduel du Soleil s'effondrera pour former une naine blanche, petite étoile de la taille de la Terre environ : il se refroidira alors lentement pendant plusieurs milliards d'années.

Diagramme de Hertzsprung-Russell

Le type spectral et la température sont portés en abscisse ; la luminosité et la magnitude absolue sont portées en ordonnée. Ce diagramme s'est révélé d'un grand intérêt pour étudier les propriétés intrinsèques des étoiles.



Phases de l'évolution d'une étoile



Lorsque les gaz et les poussières interstellaires d'une nébuleuse se contractent (1), il se forme une proto-étoile, qui laisse échapper des jets de matière. Celle-ci continue à se condenser par gravitation, tout en s'échauffant. Lorsque la température au centre de la proto-étoile atteint 10 millions de degrés, des réactions nucléaires se produisent (2) : une étoile est née. Puis, l'enveloppe de l'astre subit une expansion et un échauffement (3), ce qui conduit à la formation d'une géante rouge, de diamètre égal à 10 à 100 fois celui du Soleil. L'évolution de la géante rouge dépend de sa masse. Si celle-ci est inférieure à 1,4 fois celle du Soleil, l'astre devient

instable : il éjecte ses couches extérieures dans l'espace (5), créant une nébuleuse planétaire. Puis, l'étoile se contracte à nouveau (6) : il se forme une naine blanche, astre de la taille de la Terre. Cette petite étoile se refroidit, donnant naissance à une naine noire, trop froide pour briller. Si la géante rouge est une étoile massive, elle fabrique des éléments lourds, tels que le fer ; elle grossit (4) et devient une supergéante. Puis elle explose et sa matière est libérée dans l'espace. Si c'est l'astre entier qui explose (8), il évolue vers une supernova ; si c'est seulement la partie externe qui est impliquée (7), il y a formation d'une nova. Selon sa masse, la supernova donne naissance à une étoile à neutron (9) ou à un trou noir (10), lorsque le cœur de l'astre qui a explosé présente une masse suffisamment élevée.

Structures stellaires

La galaxie à laquelle appartient le système solaire est la Voie Lactée. La galaxie la plus proche de la Voie Lactée, Andromède, est située à 2,3 millions d'années-lumière. Notre galaxie possède toutefois deux petites galaxies satellites, le Grand et le Petit Nuage de Magellan, situés respectivement à environ 150 000 et 200 000 années lumière.

Les regroupements de galaxies que l'on observe dans l'Univers sont appelés amas et superamas.

Les galaxies présentent une grande diversité de taille (entre 2000 et 500 000 années-lumière de diamètre) et de forme. On distingue des galaxies elliptiques, des galaxies spirales, des galaxies lenticulaires, alors que d'autres ont des formes irrégulières. Le rayonnement provenant des galaxies permet de répartir ces dernières en galaxies normales et galaxies actives, parmi lesquelles les quasars.

Les galaxies spirales comme la Voie Lactée sont les plus nombreuses. Elles ont en fait la forme d'un disque en rotation autour de son centre, le noyau ou bulbe, très dense, entouré d'un halo, peu dense. Le disque se prolonge fréquemment par un ou deux bras spiralés, composés d'étoiles, de poussières et de gaz.

D'après les théories de la formation stellaire, les étoiles, que l'on compte par centaines de milliards au sein des galaxies, sont façonnées par la condensation de nuages moléculaires de gaz. Ce phénomène tend à raréfier ce gaz dans le milieu interstellaire au cours de l'évolution des galaxies. Le gaz est quasiment absent dans les galaxies anciennes, situées au confins de l'Univers observable. Les positions et les trajectoires des étoiles dépendent de la classe à laquelle elles appartiennent.

Amas d'étoiles, amas stellaire

Groupe stable d'étoiles liées physiquement; nébulosité apparente qu'un instrument puissant permet de résoudre en des milliers d'étoiles, avec une partie centrale condensée.

Superamas

Amas d'amas galactiques.

Une grande concentration de centaines ou de milliers de groupes de galaxies. Les Superamas ont une taille variant entre 100 et 500 millions d'années lumière et sont généralement inclus dans de vastes feuilletés et murs de galaxies entourant de grands vides dans lesquels on ne trouve que peu de galaxies. Les superamas se sont formés dans l'univers primordial lorsque la matière s'est regroupée sous l'influence de la gravitation.

Amas globulaire

Amas de forte densité de forme approximativement sphérique.

Cosmologie et cosmogonies

Cosmogonie vs cosmologie

La cosmogonie est la science qui étudie la structure, l'origine et l'évolution des objets célestes.

La cosmologie est la science qui étudie la structure, l'origine et l'évolution d'un objet unique : l'Univers comme un tout. Par définition, la cosmologie est unique, tandis qu'il existe plusieurs cosmogonies.

Le terme cosmologie n'est apparu qu'en 1731 dans un ouvrage du philosophe allemand Christian Wolff (disciple de Leibniz, premier grand professeur de philosophie en Allemagne, professeur de Kant). La première apparition en français du mot « cosmologie » figure dans l'essai de cosmologie de Maupertuis en 1750. Cosmologie est un mot qui vient remplacer le mot d'Astrologie qui correspond aux conceptions de Ptolémée qui ont été balayés par le modèle copernicien. L'astrologie a d'abord été remplacée par l'astronomie (on est passé du « logos » : science et discours, au « nomos » : loi). Mais la science des lois des astres ne peut pas remplacer le discours général sur les astres. D'où assez probablement la création du mot « cosmologie ».

On peut ici reprendre une remarque de Marcel Conche (philosophe matérialiste et athée, né en 1922) : toute prise de position sur la totalité est métaphysique et nécessairement sans preuve¹.

La cosmogonie est clairement scientifique car ses objets sont assez clairement déterminés (la Terre, le Soleil, le Système solaire, la Voie Lactée, etc.).

La cosmologie est tendanciellement métaphysique car son objet unique, l'Univers, c'est-à-dire la totalité, n'est pas clairement déterminé. De plus, cette unicité ne permet pas de faire des expériences à proprement parler.

Une cosmologie peut inclure des cosmogonies, ou bien les laisser dans l'obscurité.

Avant la révolution copernicienne, l'astrologie est une cosmologie. La cosmogonie est réduite à la mythologie biblique : autant dire qu'elle n'existe pas. La révolution copernicienne, en aboutissant à une cinématique² céleste (Kepler) puis à une mécanique céleste (Newton) crée la cosmogonie en tant que science : petit à petit elle conduit à découper l'Univers en différents sous-systèmes. C'est le principe même du développement scientifique. Cependant, la cosmologie n'en a pas disparu pour autant. La recherche d'une explication complète pour l'Univers entier reste légitime du point de vue scientifique. Il faut tout de même garder à l'esprit que qu'une cosmologie à proprement parler scientifique ne peut pas exister, ce qu'on peut encore formuler en disant qu'une cosmologie qui devient scientifique se transforme en cosmogonie.

On peut donc considérer que la révolution copernicienne est le passage d'une cosmologie à une autre : de la cosmologie chrétienne à la cosmologie scientifique. La cosmologie scientifique se caractérise par l'ouverture à l'infiniment petit et à l'infiniment grand, par la multiplication des objets célestes (des particules élémentaires aux galaxies) et par la distinction entre cosmogonies et cosmologies.

L'honneur de la cosmologie scientifique consiste à créer des objets cosmogoniques.

¹ Cité dans *Athéisme et matérialisme aujourd'hui*, Yvon Quiniou, Editions Pleins Feux, 2004. Yvon Quiniou s'attache à distinguer le matérialisme et l'athéisme.

² Rappelons que la cinématique est la partie de la mécanique qui étudie le mouvement indépendamment des forces qui le produisent ; et que la mécanique est la science du mouvement et de l'équilibre des corps.

Premières cosmogonies et cosmologies scientifiques

Les cosmogonies scientifiques du système solaire doivent expliquer pourquoi les planètes tournent dans le même sens autour du Soleil et pourquoi leurs plans orbitaux sont pratiquement confondus avec le plan équatorial du Soleil³.

Au début du 18^{ème} siècle, un grand nombre de cosmogonies et de cosmologies sont proposées. On peut les classer en deux catégories : les cosmogonies accidentelles et les cosmologies nécessaires.

Les cosmogonies accidentelles (ou contingentes ou catastrophistes)

Ce sont les cosmologies qui considèrent que le Soleil préexistait à l'apparition des planètes, et que c'est une catastrophe (un événement exceptionnel et violent) qui a conduit à la création des planètes.

Buffon et la rencontre d'une comète avec le Soleil

En 1749, Jean-Louis Leclerc (1707-1788), comte de Buffon, astronome, mathématicien, physicien et surtout naturaliste, publie les trois premiers volumes de l'Histoire naturelle, parmi lesquels on trouve La Théorie de la Terre. Il fait l'hypothèse que les planètes du Système solaire résultent de la collision d'une comète avec le Soleil.

Objections :

Une première objection viendra du mathématicien Leonhard Euler qui dit que la matière arrachée aurait dû retomber sur le Soleil au terme de sa première révolution.

L'objection définitive viendra de la connaissance de la nature des comètes. Constituées de glace et de matière légère, elles ne sauraient arracher la matière nécessaire à la création des planètes.

Réactions de l'Eglise :

La faculté de théologie de Paris (la Sorbonne) censurera la Théorie de la Terre comme « non conforme à la religion » en 1751.

Buffon répondra à la Sorbonne : « Je n'ai eu aucune intention de contredire le texte de l'Écriture ; je crois très fermement tout ce qui y est rapporté sur la création [...] j'abandonne ce qui, dans mon livre, regarde la formation de la Terre, et en général tout ce qui pourrait être contraire à la narration de Moïse, n'ayant présenté mon hypothèse sur la formation des planètes que comme une pure supposition philosophique ».

Mais, dans une correspondance privée, il dira : « Quand la Sorbonne m'a fait des chicanes, je n'ai fait aucune difficulté de lui donner toutes les satisfactions qu'elle a pu désirer : ce n'est qu'un persiflage ; mais les hommes sont assez sots pour s'en contenter. »

Les tempêtes solaires par rapprochement d'étoiles

Dans la première moitié du XX^{ème} siècle, l'hypothèse catastrophiste sera adaptée. On proposera que ce soit le rapprochement d'une étoile du Soleil qui ait causé une marée solaire semblable à celles causées sur Terre par la Lune.

Objections :

La faible densité d'étoiles dans l'Univers rend la probabilité d'un tel événement très faible. Cette hypothèse fait du système solaire une extraordinaire exception.

La découverte d'exoplanètes montre que le système solaire n'est pas une exception. Cette découverte a probablement sonné le glas de cette hypothèse.

³ A l'exception de Mercure, dont le plan orbital est incliné de 7° par rapport à l'écliptique et de Pluton, incliné de 17°, les plans des autres planètes sont inclinés à moins de 3°23. Rappelons que le statut de planète de Pluton est problématique.

Les cosmologies nécessaires ou nébulaires

Les cosmologies nécessaires ou nébulaires expliquent la totalité de l'organisation de l'Univers et à cette occasion la formation du système solaire.

Les cosmologies nébulaires sont nécessairement basées sur un événement accidentel puisqu'il faut bien justifier un commencement (le Big bang !). Mais la portée de cet événement est plus vaste que dans le cas des cosmogonies accidentelles. L'accident concerne l'Univers dans son entier, au lieu de ne concerner qu'un objet de l'Univers.

1755 : Les « univers-îles » de Kant

Pour développer son Histoire générale de la nature et théorie du ciel, livre publié en 1755, Kant s'est inspiré d'un compte rendu d'un ouvrage de vulgarisation de Thomas Wright dans lequel ce dernier décrivait un univers sphérique, semblable à une noix vide, dont la coquille contiendrait tous les astres du ciel, tandis qu'au centre se trouveraient Dieu et le Paradis, Dieu commandant alors tous les mouvements du ciel à l'aide de la gravitation. Kant retint du compte rendu qu'il lût, que l'Univers était composé d'un disque d'étoiles aplati.

De même que dans leur système les planètes sont très proches d'un plan commun, de même les étoiles fixes se rapportent par leur position, d'aussi près que possible, à un certain plan qui doit être conçu comme s'étendant au travers du ciel tout entier. [...] En recherchant les causes de cette détermination, j'ai trouvé que, selon toute vraisemblance, lesdites étoiles fixes ou étoiles stables pourraient bien être en fait des étoiles errantes d'un ordre supérieur se mouvant très lentement.

Kant a aussi lu le catalogue de Maupertuis dans lequel il décrit les nébuleuses comme des « grandes masses de lumière aplaties par une puissante rotation ». Ainsi, Kant considère que les nébuleuses ne peuvent « être autre chose que des amas de nombreuses étoiles ».

Si un système d'étoiles fixes se rapportant dans leurs positions à un plan commun, ainsi que nous avons esquissé la Voie lactée [...] est contemplé à une distance aussi incommensurable par l'œil de l'observateur qui se trouve en dehors de ce monde, alors ce système, considéré selon un angle étroit, apparaîtra sous un petit angle comme un petit espace éclairé d'une faible lumière et dont la figure sera circulaire si sa surface se présente directement à l'œil, et elliptique s'il est vu de côté.

Kant réalise ici que, selon l'angle d'observation, les galaxies se présenteront comme des « nébuleuses » apparemment rondes, ovales ou linéaires, d'où l'aspect nébulaire.

Dans ces deux extraits, Kant décrit un Univers constitué d'un ensemble de galaxies dérivant dans l'immensité de l'Univers. C'est la théorie des « Univers-îles », théorie pour laquelle le Soleil est donc radicalement une étoile parmi d'autres dans une galaxie parmi d'autres.

Kant développe aussi une théorie de la constitution des systèmes stellaires. Pour Kant, l'Univers est initialement rempli de particules matérielles distribuées chaotiquement. Ces particules, abandonnant leur équilibre initial, s'agglomèrent autour des particules les plus massives, débutant ainsi la formation du Soleil. Les planètes sont créées du fait de l'existence d'une force de répulsion qui agit à courte distance et contrarie le mouvement initial d'agglutination en imprimant une déviation latérale à certaines particules (cette idée n'est pas sans rappeler le « clinamen » des Epicuriens. Pour Epicure et Lucrèce, le clinamen est un jeu (au sens d'une imperfection) dans le mécanisme de la pesanteur. Ce jeu est le hasard à l'origine des choses).

1761 : le cas Lambert

Dans ses Lettres cosmologiques de 1761, Jean-Henri Lambert (1728-1777), grand mathématicien, reprend les grandes lignes des hypothèses kantienne pour décrire la « machine du monde ». Mais pour lui, le système solaire dans son ensemble tourne autour d'un autre système planétaire plus important, qui en fait autant autour d'un autre système d'ordre plus élevé, formant ainsi une chaîne sans fin.

D'autre part, Lambert affirme, comme Giordano Bruno au 16^{ème} siècle, que l'univers est habité.

Je ne puis admettre que le Créateur les ait laissées vides, je n'hésite pas à remplir chacun de ces systèmes solaires avec des globes habités [...] Ceux qui doutent encore de cela, ou qui le dénie, sont les mêmes qui n'ont que leurs yeux comme moyen de vérification, et qui n'écoutent jamais les preuves venant des principes généraux.

On voit que Lambert le mathématicien était aussi un exalté ! Son modèle de satellites en série est modèle de mathématicien, pas vraiment un modèle de physicien. Rappelons qu'au Roi Frédéric II de Prusse qui lui demandait « que savez-vous », il répondit : « tout ». Et quand Frédéric II lui demanda « Comment l'avez-vous appris », il répondit : « De moi-même ». Ce qui en dit long sur son rapport à l'expérience.

1796 : le monde selon Laplace

Pierre-Simon Laplace (1749-1827) est parfois désigné comme le Newton français. Né après la querelle des cartésiens et des newtoniens, il peut accepter la loi de la gravitation sans état d'âme. Laplace est surtout connu pour son Traité de mécanique céleste (1799-1825), monument d'analyse scientifique qui fait le point sur les problèmes célestes de son temps. Pour certains historiens français, Laplace gagne le pari d'expliquer la stabilité du monde à l'aide des seuls principes de Newton. Laplace parachève en quelque sorte la mécanique de Newton. C'est un point de vue d'historien français, peu partagé par les historiens anglais !

Après la parution du Traité de mécanique céleste, il avait vulgarisé ses idées dans l'Exposition du système du monde (1796). A Napoléon qui s'étonnait de l'absence de Dieu dans l'ouvrage, Laplace aurait répliqué :

Sire, je n'avais pas besoin de cette hypothèse.

Sans connaître les travaux de Kant, Laplace reprend l'hypothèse de la nébuleuse primitive. Il évite toutefois de s'intéresser au premier commencement et propose une théorie validée par les principes de la mécanique céleste :

L'état actuel du système solaire est le résultat d'une lente évolution à partir d'une sphère de matière diffuse, homogène, entourant le Soleil, comme une gigantesque atmosphère et tournant seulement sur elle-même. Le jeu naturel des lois de la mécanique (gravitation comprise) fait alors prévoir que la nébuleuse s'aplatira, se fractionnera en anneaux concentriques dont la matière, enfin, se condensera en planètes⁴.

Laplace est un déterministe convaincu. Il est aussi resté célèbre pour ce qu'on a appelé le « démon de Laplace » :

Une intelligence qui pour un instant donné connaîtrait toutes les forces dont la nature est animée et la situation respective des êtres qui la composent, si d'ailleurs elle était assez vaste pour soumettre ses données à l'analyse, embrasserait dans la même formule les mouvements des plus grands corps de l'univers et ceux du plus léger atome : rien ne serait incertain pour elle et l'avenir comme le passé seraient présents à ses yeux.

On retrouve là la querelle entre Newton et Leibniz, et on peut se demander si Laplace n'est pas alors leibnizien, en ce sens que le principe du démon de Laplace est bien d'affirmer un déterminisme absolu et donc bien de nier toute liberté. On peut se demander ce qu'est l'influence de Laplace dans le développement du positivisme français à partir de d'Auguste Comte. On peut constater que Laplace évite la question de l'origine quand Kant y répond en Epicurien. Newton

⁴ Reste à savoir si Laplace considérait le Soleil comme une étoile parmi d'autres dans une galaxie parmi d'autres.

croyait à l'omniprésence de Dieu pour assurer la stabilité du système solaire. En excluant cet artéfact, on peut se demander si Laplace n'a pas poussé trop loin le règne du déterminisme.

Herschel (1738-1822) : le père de l'astronomie stellaire, le dernier des grands observateurs classiques

Brève biographie

William Herschel est né à Hanovre (Basse-Saxe, nord-ouest de l'Allemagne) en 1738.

Pendant la guerre de 7 ans (1756-1763), il est hautboïste dans un régiment. Il fuit en Angleterre en 1757 où il devient organiste de la chapelle à Bath en 1765 (sud-ouest de l'Angleterre).

Herschel s'intéresse à l'astronomie. Il utilise d'abord des lunettes à réfraction puis la lunette de Newton et commence à fabriquer ses propres lunettes. En 1772, il fait venir sa sœur Caroline.

En 1774, il commence à scruter le ciel systématiquement. En 1781, il découvre Uranus. Mais il croit avoir repéré une comète ! Après 5 mois de calcul, c'est Pierre-Simon Laplace qui comprendra la nature de cet astre qu'il nommera « la planète de Herschel ». Le système solaire vient de doubler de taille.

Herschel a réussi à construire un réflecteur de 6 mètres de long avec un miroir de 47 centimètres. Il a essayé de construire un miroir de 1 mètre de diamètre. Mais quand il fit couler le métal en fusion, le moule en crottin de cheval se brisa, et le carrelage du sous-sol de la maison où le coulage était réalisé éclata jusqu'au plafond.

Après la découverte d'Uranus, le roi Georges III chargera Herschel de la supervision des travaux pour la construction d'un télescope d'un mètre. Ce télescope au miroir de 1,20 mètre de diamètre et au tube de 12 mètres de long restera le plus grand télescope du monde pendant un peu plus d'un demi-siècle (de 1786 à 1845).

Avec ce télescope, Herschel découvrit les 6^{ème} et 7^{ème} satellites de Saturne. Cependant, ce télescope était d'un usage peu pratique : il fallait hurler les instructions au pilote, et les variations de température et d'humidité amenaient de la buée sur le miroir. Herschel revint donc rapidement aux télescopes plus modestes de sa fabrication.

A partir de 1785, Herschel va surtout s'intéresser aux étoiles.

Les grands réflecteurs

1671 : Newton

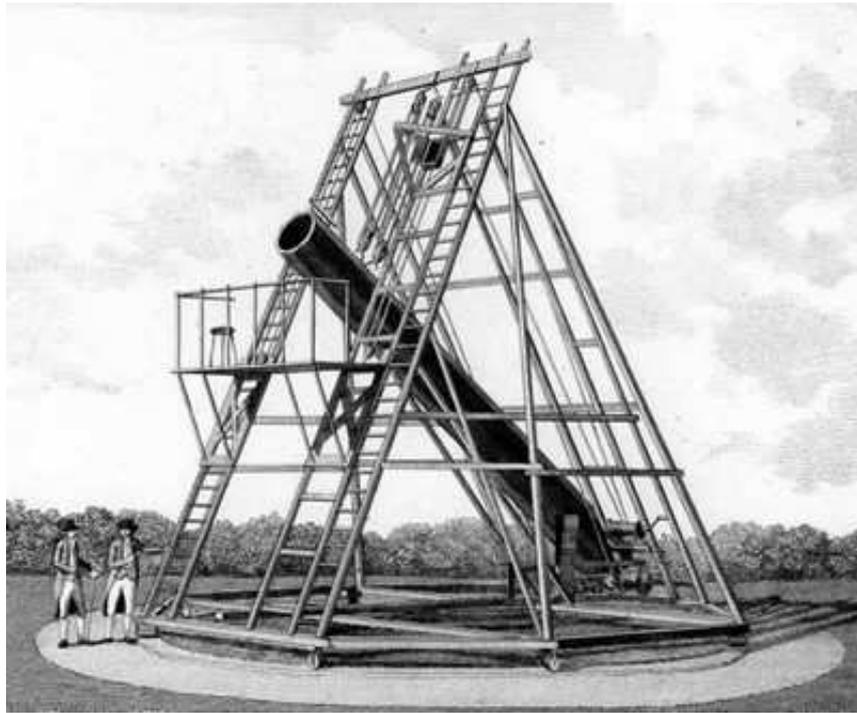
En 1671, Newton a inventé un nouveau type de télescope : le télescope à réflexion.

La lumière est captée au moyen d'un **miroir** concave au fond du télescope et renvoyée dans l'oculaire qui se trouve alors latéralement dans la partie haute de la lunette.

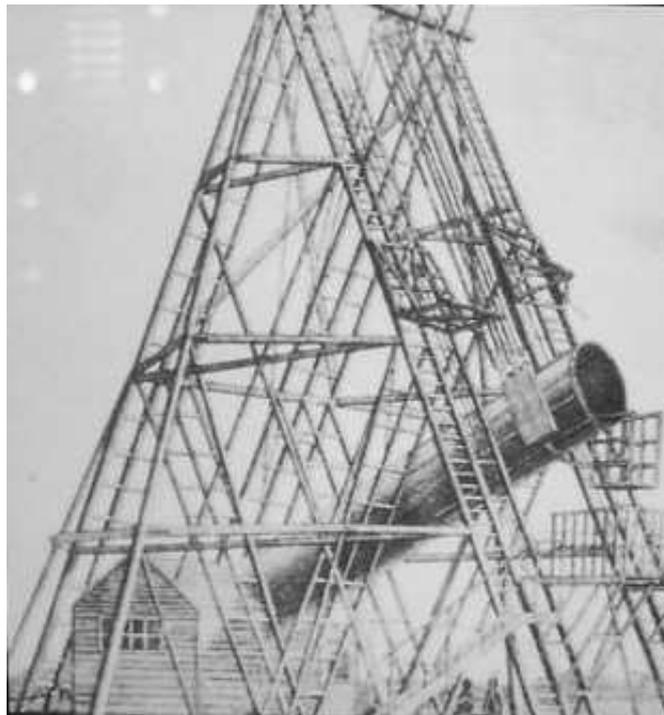


1786 : Herschel

C'est Herschel, le père de l'astronomie stellaire, qui va développer l'usage de ces télescopes. Avec ses propres ressources, il fabriquera un réflecteur de 6 mètres de long et doté d'un miroir de 47 cm. Le plus grand télescope du monde sera construit en 1786 avec l'argent de la couronne d'Angleterre et sous la direction de Herschel : un réflecteur de 1,2 mètre de diamètre et 12 mètres de longueur focale.



Schématiquement, on peut dire que les télescopes à réfraction sont liés à l'astronomie du système solaire et les télescopes à réflexion liés à l'astronomie stellaire.



1786- Le réflecteur de 1,2 mètres

Après la mort d'Herschel, l'histoire des grands réflecteurs va continuer.

1845 : Lord Rosse

En 1845, William Parsons (1800-1867 ; lord Rosse) construira un réflecteur de 16,6 mètres de long, doté d'un miroir en bronze de 1,82 mètres de diamètre. Pendant 70 ans (jusqu'en 1917), ce sera le plus grand télescope du monde.



1845 : le réflecteur de 1,82 mètre

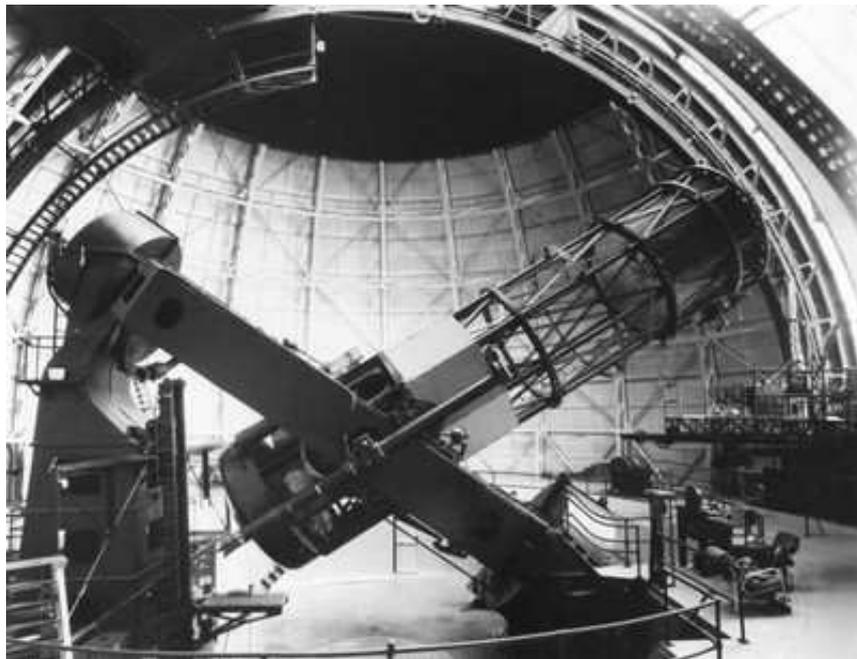
Ce télescope a été restauré :



1917-1945-George Ellery Hale

L'Américain George Ellery Hale (1868-1938) fera construire 4 télescopes en 1897, 1908, 1917 et 1948. Le premier avait un miroir de 1,02 mètres. Celui de 1917, appelé « télescope de Hooker », avait un miroir de 2,54 mètres (100 pouces). Le dernier, réalisé après sa mort à l'observatoire du mont Palomar, est un télescope de 5,08 mètres (200 pouces). Ces deux derniers furent successivement les plus grands du monde.





1917 : trois photos du télescope de Hooker de 2,54 mètres



1948 : le télescope de 5,04 mètres



L'observatoire de Mont Palomar

Tableau synthétique

Année	Diamètre	Lieu	Créateur
1786	120		Herschel (1738-1822)
1845	182	Birr (Angleterre)	William Parsons (1800-1867, Lord Rosse)
1908	152	Mont Wilson, Californie	George Ellery Hale (1868-1938)
1917	254	Mont Wilson, Californie	George Ellery Hale (1868-1938)
1948	508	Mont Palomar, Californie	George Ellery Hale (1868-1938)
1976	600	Mont Pastoukhov, Caucase	URSS
1993	1000	Haway	Etats-Unis

Le dernier télescope de Hale est resté le plus grand du monde jusqu'en 1976, date de la construction d'un télescope de 6 mètres en URSS.

Depuis la fin des années 1990, plusieurs télescopes de plus de 8 mètres ont été construits.

Les télescopes de plus de 8 mètres permettent de découvrir les exoplanètes.

Premier catalogue de nébuleuses : Messier (1730-1817)

Charles Messier (1730-1817), astronome français né à Badonviller, est connu pour le catalogue des nébuleuses et des amas d'étoiles qu'il établit de 1758 à 1784. Observateur opiniâtre, Messier découvrit seize comètes et en observa plus de quarante. Son catalogue décrit une centaine d'objets galactiques ou extragalactiques (nébuleuses, galaxies, amas d'étoiles), dont la nomenclature astronomique actuelle a conservé la numérotation, précédée de la lettre M.

Son catalogue servira de base à Herschel.

Les galaxies et la décomposition des nébuleuses en étoiles

En 1781, Herschel reçoit un exemplaire du nouveau catalogue de Charles Messier sur les nébuleuses qui apparaissent alors comme des îles rayonnantes de lumière.

Herschel décompose la plupart des nébuleuses en étoiles.

En 1786, il publie un catalogue de 1000 nébuleuses.

- En 1789 et 1802, il publie deux autres catalogues jusqu'à 2500 nébuleuses : plus de 20 fois plus que dans le catalogue de Messier.
- Herschel évalue le nombre d'étoiles de la Voie lactée à plus de 75 millions, quantité extravagante pour l'époque.
- Il va confirmer l'aplatissement de la Voie lactée.

Il s'intéressera à la grande nébuleuse d'Andromède, dont il présumera, à juste titre, qu'elle est composée de millions d'étoiles. Il remarque même que la partie centrale d'Andromède revêt une « couleur rouge pâle », ce qui est vrai : le centre de cette galaxie géante est plus chaud que sa périphérie. Le centre est constitué de vieilles étoiles, rouges et jaune, tandis qu'à la périphérie prédominent les étoiles jeunes et bleues. Cependant, on ne comprend pas comment cette distinction, qui ne sera établi qu'au XX^{ème} siècle, a pu être observée par Herschel...

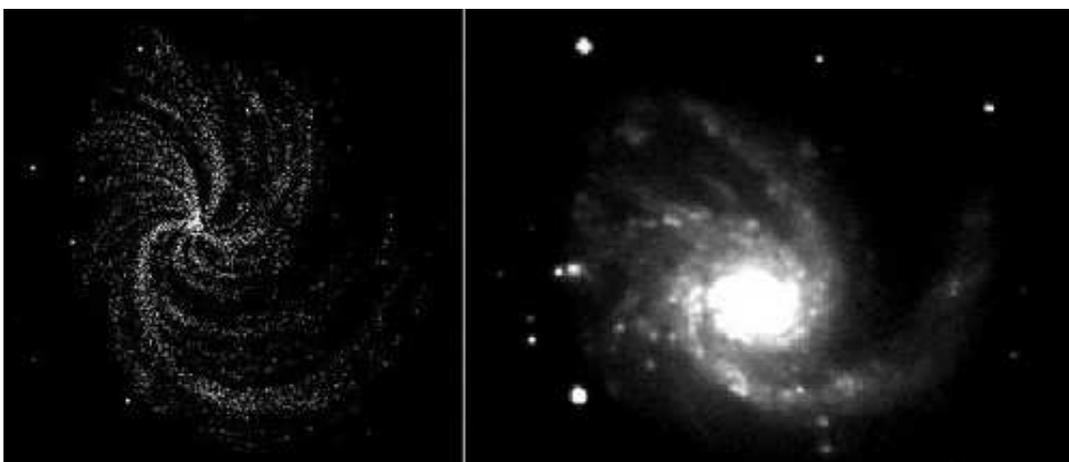
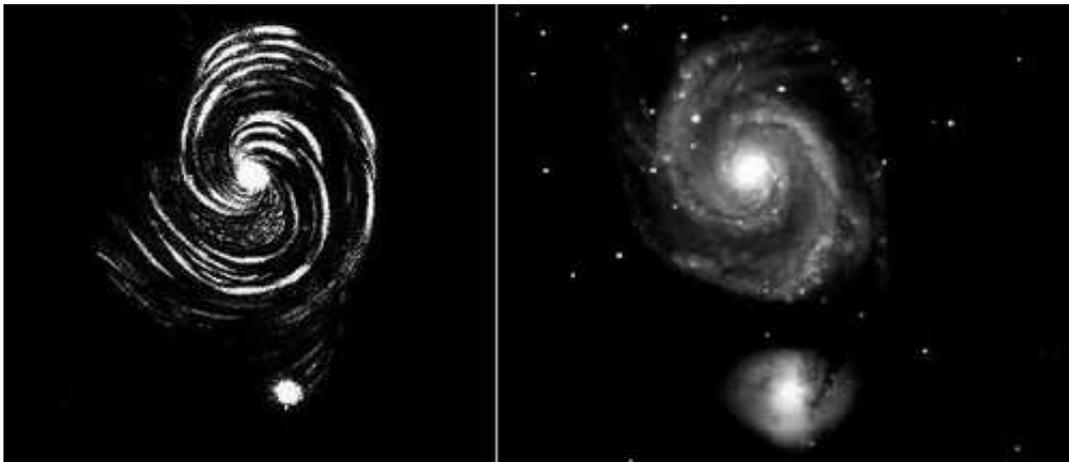
Point de vue cosmologique de Herschel

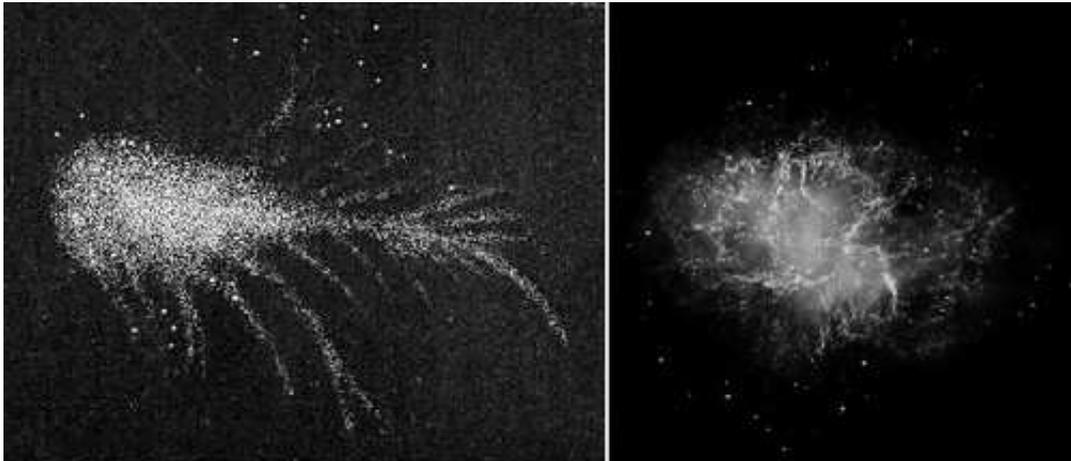
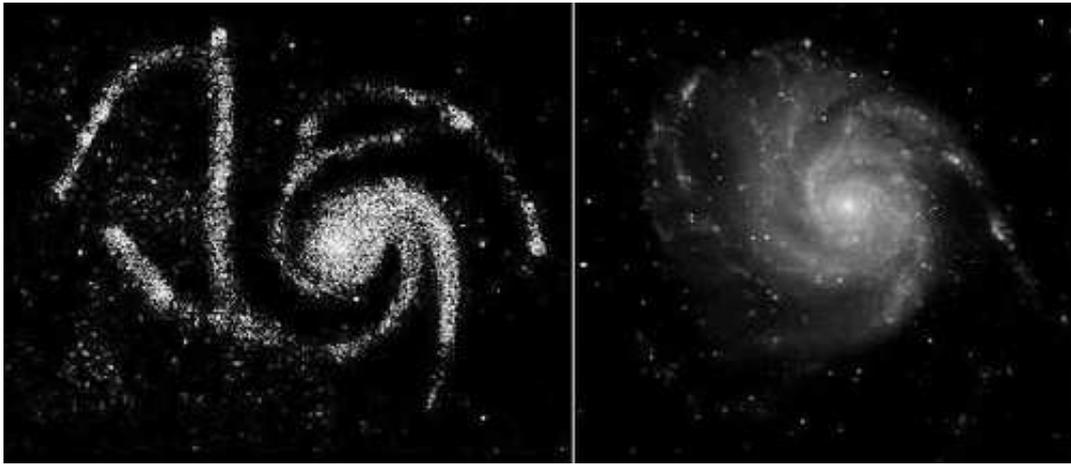
- Herschel placera le Soleil au centre de la Voie lactée.
- Herschel estimera que certaines nébuleuses se situent hors de notre galaxie et peuvent avoir une taille comparable à la Voie lactée, reprenant l'hypothèse kantienne des « univers-îles ».

La représentation du Ciel vers 1850, avant la photographie :

Pour se donner une idée de ce que voyait Herschel, on peut regarder les dessins de Lord Rosse fait avec son télescope de 182 cm, contre 120 pour Herschel.

Dessins de Lord Rosse, vers le milieu du 19^{ème} siècle, et photographie contemporaine correspondante.





Découverte d'étoiles doubles

Herschel révèle l'existence d'étoiles doubles. En 1820, il peut affirmer que les étoiles doubles tournent l'une autour de l'autre en application des lois de la gravitation. Newton triomphe une fois de plus.

Actuellement, on sait que les étoiles binaires sont des systèmes de deux étoiles liées entre elles par des forces d'attraction gravitationnelle. Les étoiles d'un tel système ont un mouvement de rotation autour du centre de masse commun du système (barycentre), selon deux orbites elliptiques ou circulaires ; les deux orbites sont situées de part et d'autre du centre de masse situé au foyer des orbites elliptiques. Pendant tout leur parcours le long de leurs orbites, les étoiles binaires conservent une même distance, les orbites étant telles que chaque étoile effectue une révolution complète de son orbite en un même laps de temps, dénommé période orbitale du système binaire, ou plus simplement période du système.

Découverte de nébuleuses planétaires

Herschel pensera d'abord que les nébuleuses pourraient toutes être résolues en étoiles avec des instruments plus performants.

En 1790, il découvre une nébuleuse étrange dans la constellation du Taureau. Dans son journal, il note :

Une étoile avec une magnitude 8 environ, avec une atmosphère légèrement lumineuse. [...] L'étoile est parfaitement au centre et l'atmosphère si diluée, si floue, si homogène qu'on ne peut en rien conjecturer qu'elle est constituée

d'étoiles ; de même qu'il n'y a pas le moindre doute sur le lien évident entre l'atmosphère et l'étoile.

Herschel décide donc que certaines nébuleuses ne sont pas formées d'étoiles, mais d'un « fluide brillant » à composition inconnue.

On sait aujourd'hui qu'il venait de découvrir une nébuleuse planétaire.

Herschel va alors classer à part une centaine de nébuleuses dont les formes irrégulières évoquent

Découverte de nébuleuses à l'origine des galaxies

Herschel voit dans la nébuleuse d'Orion, qui se trouve à 1600 années-lumière, « le matériau chaotique de futurs soleils ». C'est toujours ce qu'on pense aujourd'hui, alors qu'Orion est étudiée par l'astronomie infrarouge.

C'est cette découverte qui convertira Laplace à l'hypothèse des « univers-îles ».

Conclusion

L'importance de Herschel vient de ce qu'il s'occupe essentiellement d'astronomie stellaire. Tandis que les astronomes de son temps s'occupent d'astronomie solaire et s'occupe de corriger les orbites planétaires et de mesurer la distance Terre-Soleil, Herschel recense les objets de l'espace « supra-solaire ». Il voit infiniment loin dans l'espace. Et connaissant la finitude de la vitesse de la lumière, il sait qu'il voit aussi infiniment loin dans le temps. Herschel est le Tycho Brahé du monde « supra-solaire », Kant en ayant été, en quelque sorte, le Copernic (Kant, dont, rappelons-le, la Critique de 1781 se voudra être une révolution copernicienne en théorie de la connaissance : « Jusqu'ici, on admettait que toute notre connaissance devait nécessairement se régler d'après des objets [...] Que l'on fasse donc une fois l'essai de voir si nous ne réussissons pas mieux, dans les problèmes de métaphysique, dès lors que nous admettrions que les objets doivent se régler d'après notre connaissance. ») Disons à l'avance que le XIXème siècle sera un siècle de physiciens (les Galilée du « supra-solaire », et qu'Einstein sera le Newton du monde « supra-solaire »).

La parallaxe stellaire et la mesure de l'Univers

Principe de la parallaxe

Alpha du Centaure est l'étoile la plus proche du Soleil. Aujourd'hui, on sait qu'il s'agit d'un système triple d'étoiles, mais visible à l'œil nu, Alpha du Centaure semble être une étoile unique. Alpha du Centaure se situe à 4,3 années-lumière du Soleil (40 000 milliards de kilomètres, 250 000 fois la distance Terre-Soleil). Sa parallaxe est de 0,76 seconde d'arc, soit un cinq-millième de degré.

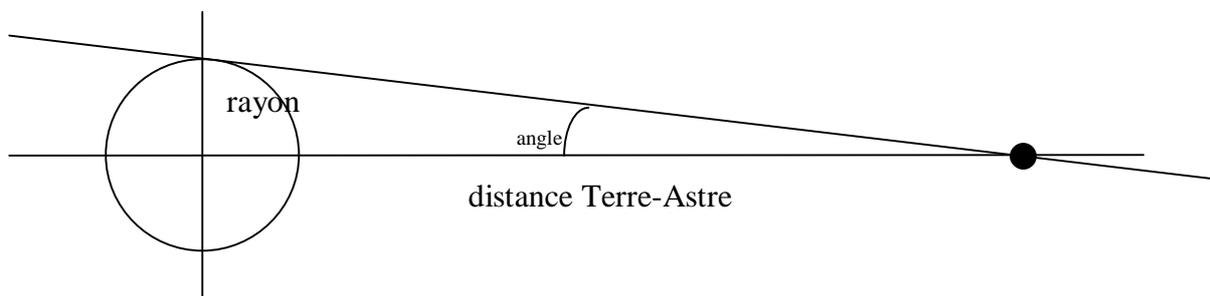
Rappelons que Tycho Brahé (1546-1601) mesurait avec une précision en minute (un soixantième de degré) quand ses prédécesseurs en étaient au demi-degré de précision. Cassini (1625-1712) avait atteint une précision à la seconde d'arc (un trois mille six centième de degré).

Définition et principe de calcul

La parallaxe est déplacement de la position apparente d'un astre, dû au changement de position de l'observateur.

C'est l'angle sous lequel on observerait, de l'astre, une longueur de référence choisie, liée à la Terre.

Pour les astres du Système solaire (Soleil, Lune, planètes) : cette longueur est le rayon équatorial terrestre. La parallaxe horizontale est l'angle formé entre la droite qui relie le centre de l'astre et le centre de la Terre et la droite passant par un point A de la surface terrestre pour lequel l'astre est à l'horizon.



$$\text{tangente}(\text{angle}) = \text{rayon} / \text{distance Terre-Astre}$$

Pour les étoiles : on utilise le rayon de l'orbite terrestre comme longueur de référence : c'est la parallaxe annuelle, car elle est liée à la rotation de la Terre autour du Soleil.

L'angle est tellement faible, qu'on a :

$$\text{tangente}(\text{angle}) \cong \text{angle}$$

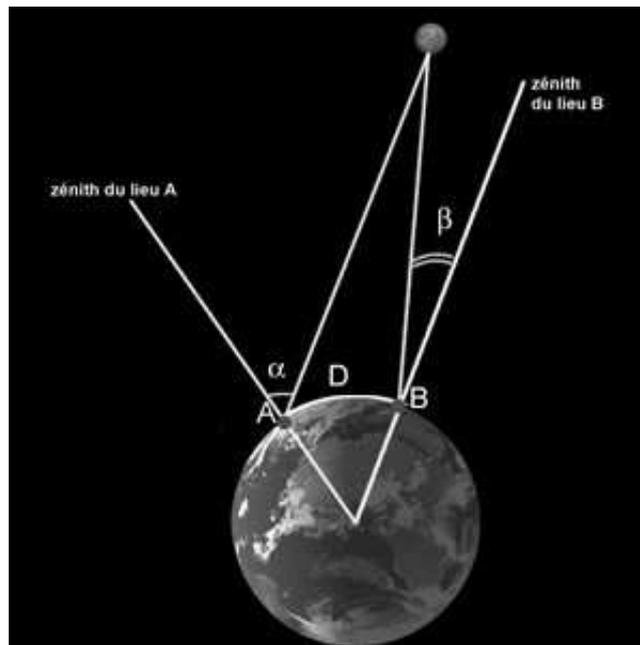
D'où la formule pour calculer la distance :

$$\text{Distance Terre-Etoile} = 150 \cdot 10^6 / \text{angle}$$

L'angle étant donné en radian.

Alpha du Centaure, l'étoile la plus proche du Soleil, à une parallaxe de 0,76'', soit $0,76 \cdot \pi / 180 / 3600$ radians ($4,8481 \cdot 10^{-6}$). Ce qui conduit à une distance Terre-Etoile d'environ 40 000 milliards de kilomètres.

Précisions



L'image ci-contre montre le principe de détermination de la distance Terre-Lune par la parallaxe (on connaît D et le rayon terrestre et on mesure α et β). Comme nous l'avons vu précédemment, il est impératif de disposer d'instruments capables de mesurer une différence entre les angles α et β . Cela limite la distance à la Terre mesurable.

Bessel (1784-1846)

1838 : Calcul de la parallaxe d'une étoile : 61 du Cygne

Friedrich Wilhelm Bessel (1784-1846), astronome et mathématicien allemand qui travaille au laboratoire de Königsberg (devenu Kaliningrad) sur le télescope de précision construit à Munich par le grand opticien Joseph von Fraunhofer, annonce qu'après 18 mois d'observation il a réussi à mesurer la parallaxe de l'étoile 61 du Cygne.

Calculée à partir du chiffre avancée par Bessel, la distance de 61 du Cygne approche à 10% la valeur exacte de 10,9 années-lumières (environ 100 000 milliards de kilomètres, soit environ 700 000 fois la distance Terre-Soleil).

1834 : Découverte d'une étoile double

S'appuyant sur la découverte de l'existence d'étoiles doubles par Herschel, Bessel fait l'hypothèse de l'existence d'un compagnon de Sirius⁵, la plus brillante des étoiles visibles de la Terre située à 8,6 années-lumière, soit environ 80 000 milliards de kilomètres, soit environ 500 000 fois la distance Terre-Soleil.

Sirius est effectivement une étoile double. Son compagnon, Sirius B, fut observé pour la première fois en 1862 par l'Américain Alvan Clark. Par la suite, on a pu mesurer qu'elle était de petite taille et de faible éclat : c'est une naine blanche (étoile de la taille de la Terre et de la masse du Soleil).

⁵ Sirius est l'étoile la plus brillante du ciel. Elle est située dans la constellation du Grand Chien. Les Égyptiens de l'Antiquité la vénéraient pour les crues du Nil et les bonnes moissons. L'éclat intense de Sirius est en grande partie dû à sa proximité : sa distance étant de 8,6 années-lumière, c'est l'une des étoiles les plus proches. On peut l'observer de n'importe quel point de la Terre. Sa masse et sa température superficielle sont supérieures à celles du Soleil, et sa température superficielle est plus élevée.

Struve (1793-1864)

1837 : Calcul de la parallaxe d'une étoile : Véga

Wilhelm Struve (1793-1864) est un astronome russe. Il semble qu'il ait réussi à calculer la parallaxe de Véga, l'étoile la plus lumineuse de l'hémisphère Nord dès 1837. La valeur de cette parallaxe est de : $0,125''$, soit une distance de 26,1 années-lumière.

Grandeur et limite de la parallaxe

Avec le calcul de la distance Terre-Etoile, la dimension de l'univers de Ptolémée, limité à environ une demie distance Terre-Soleil, est multipliée par un million ! Et on sait que d'autres étoiles sont beaucoup plus lointaines : l'univers devient infiniment grand.

Les triangles d'Aristarque s'étendent jusque dans des profondeurs insondables : on considère actuellement qu'on peut les utiliser pour jusqu'à quelques centaines d'années-lumière c'est-à-dire quelques millions de milliards de kilomètres, ou plusieurs millions de fois la distance Terre-Soleil !

La spectroscopie stellaire : les débuts de l'astrophysique

Développement de la spectroscopie

Origines

L'origine de la spectroscopie date de 1666, année où Newton reproduit l'expérience de Francesco Maria Grimaldi (1618-1663), un jésuite italien, en produisant un arc-en-ciel de couleurs à partir de la lumière du soleil dirigée sur un prisme (c'est-à-dire un morceau de verre découpé en forme de triangle).

La lumière du Soleil, appelée par définition « lumière blanche », s'étale alors en un spectre contenant toutes les couleurs de l'arc-en-ciel.

On explique le phénomène en attribuant à chaque couleur un indice de réfraction différent.

En 1800, Herschel découvre le rayonnement infra-rouge en découvrant dans le spectre solaire l'existence d'un échauffement notable dans une zone située en deçà du rouge.

En 1801, Johann Wilhem Ritter (1776-1810) découvre par le noircissement du chlorure d'argent une nouvelle radiation inconnue, l'ultraviolet, au-delà de l'autre extrémité du spectre.

Cependant, à cette époque, on ne connaît toujours pas vraiment le spectre du Soleil.

C'est en 1802 que le physicien anglais William Wollaston visualise pour la première fois avec plus de précision le spectre du Soleil.

Il s'avère qu'il utilise un prisme défectueux, qui porte une incision sur sa face. De ce fait, le spectre du Soleil s'enrichit de bandes obscures d'épaisseurs variables, assez semblables à des touches de piano ou à un code barres.

Cependant, Wollaston n'ira pas au-delà dans son étude.

Fraunhofer et les raies d'absorption

Issu d'une famille de vitriers, Fraunhofer (1787-1826) va évoluer vers le polissage des lentilles et la fabrication de verre pour les lunettes astronomiques. Désireux d'améliorer la correction des couleurs dans ses lentilles, Fraunhofer commence par utiliser les raies spectrales comme source de lumière monochromatique.

Vers 1813, il fait passer la lumière du Soleil par une fente qu'il oriente ensuite vers un prisme. En visualisant le spectre avec une lunette, il constate l'existence d'une « grande quantité de lignes verticales ».

Il constate que la Lune et les planètes envoient des lumières qui produisent les mêmes raies sombres. Mais quand il braque son télescope sur d'autres étoiles, il constate que les raies spectrales ont un aspect tout à fait différent.

Fraunhofer meurt à 39 ans sans avoir eu le temps de décrypter le sens de ces lignes : il laisse en héritage 576 raies.

Les raies d'émission

En 1849, Foucault à Paris et Miller à Londres découvrent des raies brillantes coïncidant avec les raies sombres de Fraunhofer. Mais ces connaissances restent inexplicables.

Kirchhoff et Bunsen, les lois de Kirchhoff

Gustave Kirchhoff et Robert Bunsen (l'inventeur du bec Bunsen) sont deux physiciens qui travaillent sur la spectroscopie. Ils ont fabriqué un bon spectroscopie.

Un moment déterminant de leur étude intervient par hasard. Ils assistent un soir, de la fenêtre de leur laboratoire de Heidelberg, à l'incendie qui ravage le port de Mannheim, distant de 15 km. Ils pointent leur spectroscope sur cet incendie et reconnaissent dans les flammes les raies révélatrices du baryum et du strontium. Or ces deux éléments étaient bien présents dans l'entrepôt en flamme.

Kirchhoff et Bunsen vont découvrir que les éléments chimiques absorbent les raies qu'ils peuvent émettre (d'où les raies noires). Kirchhoff comprend que « les raies sombres du spectre solaire sont dues à la présence, dans l'atmosphère incandescente du Soleil, de substances qui, dans le spectre d'une flamme, produisent des raies brillantes à la même place. »

Ces résultats, regroupés sous le nom de «Loi de Kirchhoff », même s'ils n'expliquent pas la cause du phénomène, montrent que chaque élément chimique présente un spectre différent. Ils rendent donc possible la connaissance de la composition des étoiles à partir de leurs lumières.

Composition chimique du Soleil

Depuis 1850, la communauté scientifique sait qu'une des raies de Fraunhofer dans le spectre du Soleil coïncide avec la raie jaune émise par une vapeur de sodium.

Kirchhoff identifiera dans le Soleil : le sodium, le calcium, le magnésium, le fer, le chrome, le nickel, le barium, le cuivre et le zinc.

En 1868, les scientifiques détecteront un élément inconnu dans le spectre du Soleil. Il sera nommé « hélium », car on le croyait alors exclusif au Soleil.

William Huggins (1824-1910) et la spectroscopie stellaire

Composition chimique des étoiles

William Huggins (1824-1910) est un riche astronome amateur, lorsqu'il entend dire que Kirchhoff et Bunsen ont découvert que les raies de Fraunhofer étaient constituées de banals éléments chimiques présents dans l'astre solaire. Il décide alors d'adapter un spectroscope sur son télescope et commence à étudier les spectres des étoiles.

De plus, en collaboration avec son épouse férue de photographie, Margaret Lindsay Murray, il va associer un appareil photo à son télescope-spectroscope.

Il finit par identifier le fer, le sodium, le calcium, le magnésium et le bismuth dans le spectre de deux étoiles : Aldébaran et Bételgeuse⁶, c'est-à-dire les mêmes éléments que dans le Soleil. Pour la première fois, on prouve que les substances présentes dans le système solaire sont aussi présente dans les étoiles.

La composition des nébuleuses planétaires : résurgence de l'anthropocentrisme naïf

En 1864, Huggins va aussi pointer son télescope sur des nébuleuses. Il appréhende d'y découvrir le secret de la création ! Il écrit dans son journal : « Après quelques moments d'hésitation, j'approchais mon œil du spectroscope, et je pointais le télescope pour la première fois vers une nébuleuse planétaire dans le Dragon... Je regardais dans le spectroscope. Le spectre que j'y vis n'était pas celui que j'attendais ! Une seule raie brillante ! ... L'énigme des nébuleuses était résolue. La réponse, venue à nous dans la lumière même, disait : pas d'agrégat d'étoiles, mais un gaz lumineux. »

Huggins commencera par conclure, à tort, que toutes les nébuleuses sont gazeuses : les elliptiques aussi bien que les spirales, et qu'aucune d'entre elles ne comprend d'étoiles !

⁶ Bételgeuse est une des plus grandes étoiles qu'on puisse observer. Son diamètre est d'environ 500 millions de km (environ 700 fois celui du Soleil), elle se trouve dans la constellation d'Orion à environ 600 années-lumière de la Terre.

La découverte de Huggins favorise le développement d'une cosmologie « centrée » : ainsi, à l'aube du XXème siècle et alors que l'astronomie stellaire progresse grandement, on pense généralement que le Soleil se trouve au centre de la Voie lactée (ou pas très loin) qui est considérée comme un système stellaire qui rassemble toutes les étoiles et les nébuleuses du ciel et qui représente donc la totalité de l'Univers observable.

De nombreux savants se sont engouffrés dans l'hypothèse mono-galaxique centrée. On peut se demander si ce n'est pas le vertige des découvertes de Darwin, dont Nietzsche tire une conséquence possible radicale : « Dieu est mort », qui a causé leur désarroi.

Composition chimique des nébuleuses spirales

En 1888, Huggins relève le spectre de la galaxie d'Andromède, mais il ne réussit pas à l'interpréter. C'est un astronome allemand qui montrera en 1897 que le spectre d'Andromède n'est pas gazeux, mais comparable à celui d'une étoile.

Cette découverte prouve que certaines galaxies spirales, au moins, sont composées d'étoiles. Cela met à bas le dernier avatar d'une cosmologie anthropocentrique.

Rôle de la photographie

La photographie (Niépce vers 1824, Daguerre en 1839) va rapidement être utilisée en astronomie. En astronomie solaire, elle va permettre de découvrir des centaines d'astéroïdes. En astronomie stellaire, elle va permettre de découvrir des supernovae, mais aussi les variations lumineuses des céphéides ce qui mènera à la localisation du Soleil dans la Voie lactée.

1917 : Supernova extragalactique

Dans une galaxie moyenne, deux ou trois étoiles supergéantes explosent chaque siècle : ce sont les supernovae. Dans la mesure où des milliers de nébuleuses spirales sont à portée de télescopes et d'appareils photo, la détection de supernovae n'est qu'une question de temps.

La première supernova ainsi repérée appartient à la galaxie d'Andromède et se situe à proximité du centre de la spirale ! Ce qui conduisait plutôt à faire de la supernova l'origine d'un système stellaire plutôt que son aboutissement !

En 1917, c'est l'étude d'archives photographiques qui va prouver l'existence de novae situées plutôt dans les bras de la galaxie. Cette première découverte à partir d'archives photographiques va faire des émules : de nombreuses autres novae seront ainsi découvertes.

Ces observations seront un élément de preuve important en faveur de la théorie des « univers-îles ».

1912 : Henrietta Swan Leavitt (1868-1921) : mesure de l'Univers par les céphéides

Les céphéides⁷ sont des étoiles géantes dites « variables, c'est-à-dire des étoiles dont la luminosité (ou l'éclat, la magnitude) varie au cours du temps, périodiquement ou non, sur des échelles de temps très courtes par rapport aux échelles de temps associées à l'évolution stellaire.

Henrietta Swan Leavitt (1868-1921) est une des nombreuses femmes engagées au poste de « calculatrice » dans les bureaux de l'observatoire de Harvard à Cambridge dans le Massachusetts. Elle passe ses journées à examiner les plaques photographiques prises avec le télescope à réfraction de 61 centimètres de la station du Pérou (une annexe de Harvard). Sa tâche consiste à comparer des milliers d'images d'étoiles grosses comme des têtes d'épingles à différentes dates et à déceler des variations de luminosité pour identifier les étoiles pulsantes. Au cours de sa vie, elle va repérer 2400 étoiles « variables », soit la moitié de celles connues à son époque.

Vers 1912, Henrietta Swan Leavitt constate que la luminosité apparente des céphéides du Petit Nuage de Magellan (galaxie située à environ 200 000 années-lumière) est d'autant plus grande que leurs périodes d'oscillations sont grandes. La distance de toutes ces céphéides pouvant être considérée comme étant la même, Leavitt en conclut que la luminosité absolue des céphéides est corrélée à leur périodicité.

Cette hypothèse s'est avérée exacte. Aujourd'hui, on considère que la pulsation des céphéides vient du fait qu'elle traverse une phase d'instabilité quand leurs réserves en hydrogène diminuent et qu'elles commencent à brûler de l'hélium. La période d'une céphéide, c'est-à-dire le temps nécessaire à chacune pour achever le cycle complet des variations de luminosité, est reliée à leur brillance absolue (et non pas seulement apparente).

Cette corrélation s'avère très importante puisqu'elle va permettre de calculer la distance des céphéides.

⁷ Les céphéides sont nommées d'après l'étoile prototype delta Céphée située dans la constellation Céphée, proche du pôle Nord céleste. Cette étoile, découverte en 1784, a une période de 3 à 4 jours, et sa luminosité apparente varie d'un facteur 30 à 50.

Le principe est le suivant : la corrélation permet de mesurer la magnitude absolue à partir de la période ($M=kT$). Or, la décroissance de la luminosité obéit à une loi en $1/R^2$. Donc, il suffit de mesurer la magnitude apparente (MA), et on aura : $MA=M/R^2$, donc $R^2 = M/MA$.

Alors que la mesure de la parallaxe nous conduisait à des mesures de l'ordre de 500 années-lumière, avec la mesure de la période et de la luminosité apparente des céphéides, on arrive à des mesures de l'ordre de 30 millions d'années-lumière.

Date	Qui	Type d'objet	Méthode	Distance en années-lumière
1838 1837	Friedrich Bessel (1784-1846) Wilhelm Struve (1793-1864)	Etoiles de notre Galaxie	Parallaxe	500
1912	Henrietta Leavitt (1868-1921)	Etoiles de galaxies voisines	Céphéides	30 millions

1914-1921 : Harlow Shapley (1885-1972) : la localisation du Soleil

Cartographie de la Voie lactée

La relation période-luminosité sera la pierre angulaire de la mesure des distances dans la Voie lactée et l'espace intergalactique.

Entre de 1914 à 1921, l'Américain Harlow Shapley (1885-1972) travaille à l'observatoire du Mont Wilson sous la direction de George Ellery Hale sur le grand télescope de 1,52 mètres. (Hale, 1868-1938 ; celui qui fabriquera les télescopes géants, dont 2 fois le plus grand du monde ; cf. le chapitre sur Herschel).

Shapley est résolu à dresser la carte de la Voie lactée. Il photographie des amas globulaires et y repère systématiquement des céphéides pour calibrer l'éloignement des amas.

Shapley a ainsi découvert que les amas globulaires se distribuent le long d'une étendue d'espace sphérique, comme s'ils étaient intégrés à un énorme superamas, et que le centre de cette sphère n'était pas du tout le Soleil.

Il suppose donc que le cœur du superamas correspond au centre de la Voie lactée. Et il ajoute que « le système solaire ne peut plus conserver sa position centrale ».

Taille de la Voie lactée

Avant Shapley, les chercheurs estimaient le diamètre de la Voie lactée entre 15 000 et 20 000 années-lumière. Avec les résultats de ses travaux sur les céphéides et la carte de la Voie lactée, Shapley décrète que le chiffre correct est de 300 000 années-lumière.

C'est 10 fois plus que les dimensions admises par ses contemporains, mais encore 3 fois plus que les estimations avancées aujourd'hui !

Il y a plusieurs raisons à cette erreur :

- 1) La méconnaissance de l'existence de gaz et de poussières interstellaires qui estompent la luminosité des étoiles.
- 2) La méconnaissance d'un deuxième type de céphéides, 2 fois moins lumineuses que les premières.

La Grande Galaxie de Shapley : dernier avatar de l'anthropocentrisme naïf

Avec cette erreur de dimension, Shapley va considérer que la Voie lactée est l'Univers dans son entier. Il considérera les autres galaxies comme de simples satellites de la Voie lactée.

Un système mono-galaxique maintient fondamentalement la vision du monde de Newton : la gravitation est la loi fondamentale qui régit l'univers. Même si la question de l'origine reste entière, on peut toujours l'arrêter à une présence initiale de matière. Le système mono-galaxique va donc à l'encontre de l'idée d'expansion de l'Univers.

1924 : Edwin Hubble (1889-1953) : la victoire définitive des « univers-îles »

1924 : la céphéide d'Andromède

En 1920, Shapley et Herbert Curtis (1872-1942), partisans des « univers-îles », débattent formellement dans le cadre de l'Académie des sciences américaine sur la controverse entre les « univers-îles » et le modèle mono-galactique.

Pour Curtis, les nébuleuses en spirales, comme Andromède, sont des galaxies d'étoiles, et non pas des nuages de matières interstellaires. Mais ce n'est pas prouvé.

De 1914 à 1917, Edwin Hubble (1889-1953) travaille à l'observatoire de Yerkes de l'université de Chicago. Il va photographier sans relâche Andromède. Mais les premiers résultats ne permettent pas de garantir qu'on a affaire à une galaxie plutôt qu'à une nébuleuse. À partir de 1919, Hubble travaille à l'observatoire du mont Wilson où est installé depuis 1917 un réflecteur de 2,54 mètres. Il continue d'observer Andromède.

Le 9 février 1924, il envoie à Shapley qui a quitté Mont Wilson pour l'observatoire de Harvard une petite note laconique : « Cela vous intéressera d'apprendre que j'ai découvert une céphéide variable dans la nébuleuse d'Andromède ».

Hubble en déduit qu'Andromède se trouve à environ un million d'années-lumière, ce qui la place bien au-delà des dimensions de la « Grande Galaxie » de Shapley.

Novae et étoiles géantes

Hubble va aussi identifier des novae et des étoiles géantes en Andromède et dans d'autres galaxies, ce qui contribuera à démontrer que les lois de la gravitation se vérifient au-delà de notre Galaxie.

L'univers observable encore agrandi

Dans les années 30 et 40, Hubble et Humason, un observateur hors pair, qui avait commencé comme mulotier et comme concierge à l'observatoire, vont repérer et cataloguer des galaxies toujours plus lointaines.

Conclusion

La tâche consistant à localiser notre place au sein de l'Univers s'est pourvue, et, de nos jours, on peut affirmer sans trop de risques d'erreur que le Soleil est une étoile jaune typique située dans le disque d'une grande galaxie spirale où elle occupe une position excentrée d'environ deux tiers par rapport au centre galactique.

Le problème de la lumière

Le problème de la lumière peut s'exprimer par la phrase de Louis de Broglie : « Si nous savions ce qu'est un rayon de lumière, nous saurions beaucoup de choses ».

Les deux modèles de compréhension de la lumière : Newton et Huygens

Isaac Newton (1643-1727) et le Traité d'optique

L'héritage de Newton repose sur deux piliers : les Principia (la mécanique céleste) et le Traité d'optique.

Newton fait des expériences sur la décomposition de la lumière avec un prisme.

Il publiera la première partie de son traité d'optique en 1675, et le reste en 1704.

Newton a une conception corpusculaire de la lumière : pour lui, la lumière est composée de particules dont les masses différentes provoquent sur notre rétine des sensations distinctes : les couleurs. La propagation rectiligne de la lumière et la réflexion découlent tout logiquement de ce concept.

La réfraction est plus difficile à comprendre. Elle s'expliquerait par la masse des particules et à une action attractive qu'exerce un corps transparent sur les corpuscules de lumière qui le traverse.

Christian Huygens (1629-1695) et le Traité de la lumière

Pour Christian , astronome, mathématicien et physicien hollandais, la lumière a une nature ondulatoire.

Quand on considère l'extrême vitesse dont la lumière s'étend dans toutes les directions, et que quand il en vient de différents endroits, même de sens opposés, elles se traversent l'une l'autre sans se perturber, on comprend bien que quand nous voyons un objet lumineux, ce ne saurait être par le transport d'une matière, qui depuis cet objet s'en vient jusqu'à nous, ainsi qu'une balle ou une flèche traverse l'air : car assurément cela répugne trop à ces deux qualités de la lumière, et surtout à la dernière. C'est donc d'une autre manière qu'elle s'étend, et ce qui peut nous conduire à la comprendre c'est la connaissance que nous avons de l'extension du son dans l'air.

Huygens, Traité de la lumière, 1690

Astronomie et vitesse de la lumière

1676 : Roëmer et la vitesse finie de la lumière

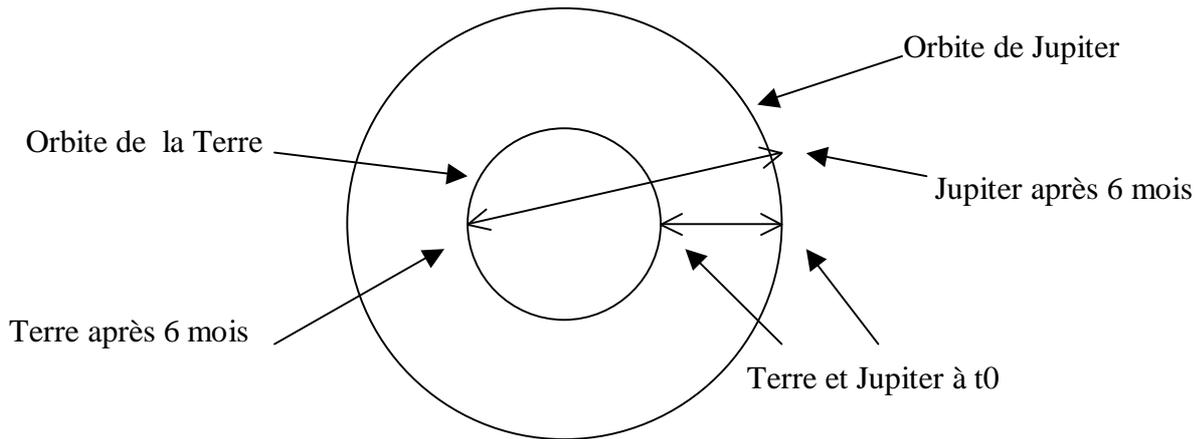
Le premier calcul de la vitesse de la lumière est pourtant antérieur à la publication des Principia.

Roëmer était un Danois que Picard a rencontré en 1671. Picard l'a immédiatement invité à venir à Paris. Il y devint professeur d'Astronomie du Dauphin et fit son entrée à l'Observatoire et à l'Académie des sciences.

En 1676, Roëmer étudiait les satellites de Jupiter et cherchait à expliquer le mystère de leur éclipse erratique.

En septembre 1676, il annonce que l'éclipse d'Io prévue pour le 9 novembre, le plus proche et le plus rapide des satellites, se ferait avec 10 minutes de retard. Sa prévision fut un succès.

Roëmer constate une différence de 22 minutes (de temps) dans le rythme des éclipses selon que la Terre se trouve au point le plus proche ou au point le plus éloigné de Jupiter.



Roëmer explique le phénomène en disant que la lumière met 22 minutes pour parcourir une distance égale au diamètre de l'orbite terrestre.

À l'époque, la distance Terre - Soleil n'était pas connue précisément. Roëmer n'a donc pas calculé la vitesse de la lumière, mais au moins a-t-il posé que la vitesse de la lumière était finie, et non pas infinie comme on le pensait jusqu'alors.

En prenant la mesure de Cassini pour la distance Terre - Soleil : 146 millions de kilomètres, on arrive à une vitesse de la lumière de 212 000 kilomètres par seconde.

Malheureusement, Cassini discrédita le travail de Roëmer. Après le décès de Picard, Roëmer, souffrant de ses démêlés avec ses collègues de l'Observatoire et de l'ambiance hostile aux protestants, quitta la France et retourna au Danemark pour s'occuper de questions d'adduction d'eau de Copenhague. Il est vrai qu'il s'était chargé de travaux d'hydraulique pour le château de Versailles.

1729 : James Bradley et l'aberration des fixes

L'aberration des fixes est l'angle formé entre la direction apparente d'une étoile et sa direction vraie.

Très tôt formé à la parallaxe, James Bradley (1693-1762), astronome britannique, va, dès 1717 et en compagnie de Edmund Halley (1656-1742), établir la parallaxe de Mars, et calculer l'unité astronomique entre 149 et 200 millions de kilomètres.

En 1725, Bradley observe Gamma du Dragon, une étoile qui passe au zénith à la latitude de Londres. Il suppose qu'au fil des mois, la position apparente de gamma du Dragon va se déplacer sous l'effet du changement de perspective dû à la révolution de la Terre. Il compte mesurer ce déplacement avec un fil à plomb. Au fur et à mesure que les mois passent, Bradley accumule les renseignements sur l'étoile et constate que les variations de positions les plus notables se produisent non pas annuellement, mais quotidiennement : les étoiles qui semblent fixes dans le ciel sont en réalité animées d'un très léger déplacement de période annuelle, sur de petites orbites elliptiques d'environ 40 secondes d'arc.

En 1728, il a observé plus de 200 étoiles et constate qu'elles se comportent toutes de la même façon. Ces deux dernières constatations font tomber l'hypothèse de la mesure de la parallaxe (la parallaxe stellaire sera mesurée pour la première fois en 1838 par Bessel).

C'est en observant une girouette en haut du mât d'un bateau, et en constatant qu'elle semble changer de direction chaque fois que l'embarcation vire de bord, qu'il trouva la solution du problème. De même que c'est l'orientation du bateau qui change et pas celle du vent, de même, c'est l'orientation de la Terre qui change et pas celle de la lumière. Chaque fois que la Terre

« vire de bord » (pendant le mouvement diurne), par rapport au « vent » de lumière, il y a inversion du mouvement.

On prend aussi l'image d'une pluie verticale qui donne l'impression de tomber à l'oblique quand on avance. Si on ralentit et si on s'arrête, la pluie revient apparemment à la verticale. Si on redémarre en sens inverse, la pluie apparaît oblique dans l'autre sens.

Bradley publie sa théorie de l'aberration des étoiles fixes en 1729.

Cette théorie est traditionnellement considérée comme la première preuve du mouvement de la Terre. C'est la vitesse de la lumière associée à la vitesse de rotation de la Terre qui explique cette apparence de mouvement des étoiles.

Lumière et gravitation

1801 : la déflexion d'un rayon lumineux près du Soleil

En 1801, l'astronome bavarois Johann von Soldner avait prévu que si la lumière était un jet de particules, celles-ci devaient être soumises à l'attraction gravitationnelle : c'est le principe de déviation de la lumière par les corps massifs. Il calcule qu'un rayon lumineux rasant le Soleil devrait être dévié de 0,84 secondes d'arc.

1783 : Les trous noirs

En 1783, le pasteur John Michell dira à la Royal Society :

Si le rayon d'une sphère de même densité que le Soleil dépassait le rayon de ce dernier dans la proportion de 1 à 500, alors un objet qui tomberait d'une hauteur infinie sur un tel corps aurait à sa surface une vitesse supérieure à celle de la lumière. Par conséquent, en supposant que la lumière soit attirée par la même force en proportion de sa force d'inertie, alors toute la lumière émise par un tel corps y retournerait par sa propre gravité.

Laplace reprendra cette idée dans son traité de mécanique en 1799 :

Il existe donc dans les espaces célestes des corps obscurs aussi considérables, et peut-être en aussi grand nombre, que les étoiles. Un astre lumineux de même densité que la Terre, dont le diamètre serait deux cent cinquante fois plus grand que celui du Soleil, ne laisserait en vertu de son attraction, parvenir aucun de ses rayons jusqu'à nous ; il est donc possible que les plus grands corps lumineux de l'Univers soient par cela même invisibles.

Laplace, Traité de mécanique céleste

Le traité de mécanique céleste sera régulièrement réédité depuis 1799 jusqu'en 1825. Mais Laplace éliminera le paragraphe cité à partir de la 3^{ème} édition de son œuvre, sous l'influence du développement de la théorie ondulatoire.

Young et Fresnel : la nature ondulatoire de la lumière

1802 : les interférences de Thomas Young (1773-1829)

Thomas Young (1773-1829) est un enfant surdoué. Il sait lire à 2 ans. A l'adolescence, il écrit couramment en anglais, latin, grec, français et italien. Il met à profit ce don des langues pour déchiffrer les hiéroglyphes. Une querelle d'antériorité l'opposera à Champollion pour savoir lequel des deux avait décrypté le premier l'écriture des pharaons.

En 1802, il écrit un article pour la revue de la Royal Society dans lequel il traite d'une expérience qui prouve que la lumière a une nature ondulatoire.

L'expérience de Young est la suivante : si on envoie de la lumière sur une feuille percée de deux petits trous, on constate une succession de bandes claires et obscures à l'endroit où les deux

parties du faisceau se mélangent. Si on bouche un des trous, on constate une lumière unique sur l'écran.

Cette expérience prouve que, en quelque sorte, la lumière peut annuler la lumière, que l'addition de deux lumières peut engendrer de l'obscurité.

Young est celui qui appellera ce phénomène : interférence.

1813 : le cas Fresnel (1788-1829)

Sans rien savoir du travail de Young, Augustin Fresnel, ingénieur en travaux public de quinze ans le cadet de Young, va développer la même expérience en 1813. Le plus étonnant est que l'expérience de Young, pourtant fondamentale, n'était pas connue non plus des plus grands savants de l'époque, comme Gay-Lussac ou Arago. Arago raconte ainsi qu'il fit un jour l'éloge de Fresnel à Young, qui lui déclara alors que l'expérience dont il faisait tant de cas était consignée depuis 1807 dans le traité de philosophie naturelle de Young.

Le problème de l'éther (la quintessence)

Les interférences s'expliquent très bien avec le modèle ondulatoire, tandis qu'elles ne s'expliquent pas avec le modèle corpusculaire.

Mais la nature ondulatoire de la lumière pose inévitablement le problème de son milieu de propagation.

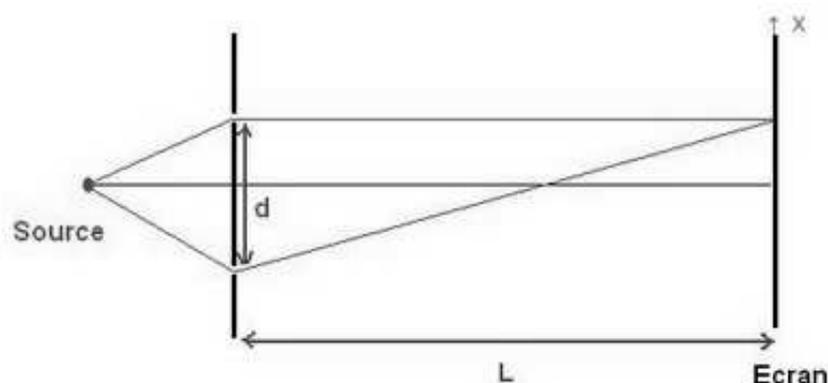
On en vient donc à considérer que l'Univers est rempli d'une substance particulière qui permet de propager l'onde lumineuse. Reprenant la terminologie de l'antiquité, Fresnel appelle cette substance : éther.

Tout le 19^{ème} siècle croira à l'existence de l'éther. Aujourd'hui, on n'y croit plus, mais la lumière reste de nature ondulatoire...

Le problème de l'éther est éminemment cosmologique puisque son principe est qu'il est présent dans la totalité de l'Univers. Ca n'est pas un objet particulier de l'Univers avec sa propre cosmogonie. Avec l'éther, on ajoute un absolu de plus aux deux absolus initiaux qu'étaient l'espace et le temps.

Le problème contemporain de l'interférence

Dans l'expérience de Young, on constate que si on bouche un trou, on retrouve une seule tache lumineuse, sans zones obscures. Les interférences apparaissent quand il y a deux trous. Le résultat n'est pas la simple somme des résultats avec un seul trou.



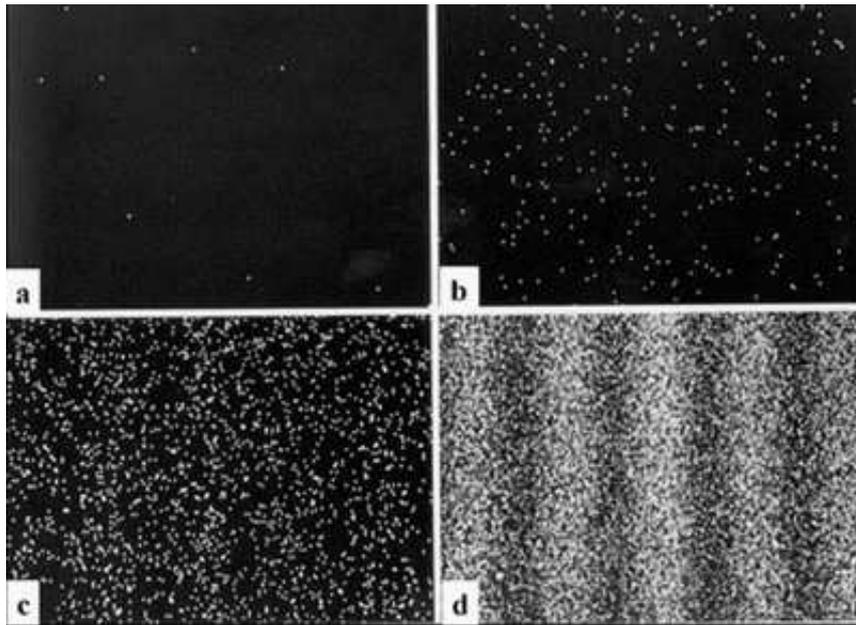
Si on fait une expérience similaire avec des corpuscules, qu'obtient-on ? Soit le système suivant : un lanceur de petits projectiles tire contre un mur ayant un peu d'épaisseur. Dans ce mur il y a deux petits trous qui permettent aux projectiles de passer à travers le mur, en étant éventuellement déviés par rebond contre l'épaisseur du trou. Le lanceur se trouve à égale

distance des deux trous. Derrière ce mur, il y a un autre mur parallèle qui permet de mesurer l'impact des projectiles qui sont passés à travers le premier mur.

Si on bouche un trou, on obtient une répartition régulière des projectiles. Si on débouche les deux trous, la répartition des projectiles est la somme des deux répartitions avec un trou bouché.

Le problème des interférences lumineuses aujourd'hui, c'est que, si on considère que la lumière est constituée de particules (les photons), on constate que la répartition des photons (donc de la lumière) si on ouvre les deux trous, n'est pas identique à la somme des répartitions des photons pour un seul trou fermé.

Or, on arrive, par un dispositif expérimental spécifique, à n'émettre les photons que par paquets. En mettant à la place du deuxième mur, une plaque photographique qui réagit au contact des photons, et en laissant l'expérience se dérouler pendant un certain temps, voici ce qu'on peut alors observer lorsque l'on développe la plaque photographique :



Cette expérience confirme la théorie corpusculaire de la lumière. Mais elle pose le problème suivant : le photon, en tant que corpuscule, ne se comporte pas de la même façon suivant qu'un seul trou est ouvert ou deux !

Il faudrait donc admettre, comme le dira Dirac, que « un photon n'interfère qu'avec lui-même ».

Cette expérience vaut aussi pour les électrons.

Einstein et la relativité

Newton [...], les concepts que tu as élaborés guident encore aujourd'hui nos raisonnements en physique, même si nous savons qu'il nous faut désormais les remplacer par d'autres concepts qui, plus éloignés de l'expérience directe, nous permettront seuls de parvenir à une compréhension plus profonde des relations entre les choses.

Albert Einstein

Les limites de la théorie de Newton

Le principe d'inertie découvert par Galilée stipule qu'un corps qui se déplace sans interaction avec l'extérieur, continuera sur une trajectoire rectiligne indéfiniment.

Newton ajoutera que le seul moyen de modifier cette trajectoire est d'utiliser une force : un objet subissant une force accélère d'une quantité inversement proportionnelle à la masse de l'objet dans la direction de la force. La loi de Newton dit que : $F = Gmm'/r^2$, où F est la force exercée l'un sur l'autre par deux corps de masses respectives m et m' séparés d'une distance r , et G est la constante de la gravitation.

Avant Newton, on pensait que des anges poussaient les planètes sur leurs orbites.

Avec Newton, on pense que la gravitation du Soleil tire les planètes vers le corps central, contrecarrant l'inertie des planètes. La théorie de Newton explique aussi l'aplatissement du globe terrestre et le mouvement des marées. Elle s'applique aussi à l'univers tout entier.

Cependant, la théorie de Newton pose plusieurs problèmes.

1859-1915 : Vulcain et le périhélie de Mercure

Le périhélie est le point de l'orbite d'une planète qui se trouve au plus près du Soleil.

Le système Soleil Mercure n'est pas isolé dans l'espace et subit des perturbations gravitationnelles qui peuvent faire varier la position du périhélie de Mercure, donc l'orbite de Mercure. Ainsi le périhélie va sembler "avancer" au cours du temps. La mécanique newtonnienne permet de calculer cette avance.

En 1859, un astronome amateur jure avoir vu une minuscule tache noire défiler pendant 78 minutes devant le disque solaire.

Le Verrier, qui avait calculé l'orbite de Neptune avant sa découverte sur la base des perturbations de l'orbite de Uranus, s'intéresse à cette information et fait l'hypothèse de l'existence d'une planète entre le Soleil et Mercure qu'il appelle Vulcain.

Pour calculer l'orbite de cette planète, il calcule les paramètres de l'orbite de Mercure et il constate que le périhélie avance plus que la théorie de Newton ne le prévoyait : cela vient renforcer son hypothèse : c'est Vulcain qui doit être la cause de cette avance.

Bien qu'ardemment recherchée, Vulcain, ne sera pas trouvée !

Einstein élucide l'énigme de Vulcain et de l'avance du périhélie de Mercure en novembre 1915, date à laquelle il annonce que sa théorie explique l'avance du périhélie de Mercure sans faire intervenir de phénomène mystérieux.

Concernant cette coïncidence entre la théorie et l'observation, Einstein écrira à un ami :

Je fus littéralement transporté de bonheur pendant des jours

La dualité onde - particule

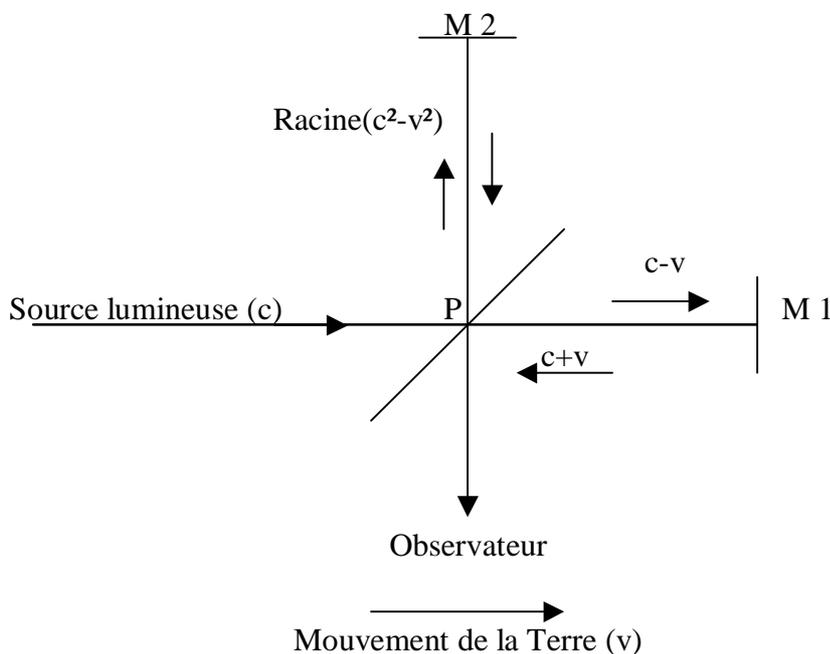
1887 : l'expérience de Michelson, le vent d'éther et la relativité galiléenne

Albert Abraham Michelson (1852-1931) est un Américain d'origine polonaise qui, comme tous les savants de son temps croyait à l'existence de l'éther remplissant aussi bien les interstices des corps terrestres que l'espace intersidéral.

Son but est d'établir l'existence de l'éther. Pour cela il s'appuie sur la théorie du vent d'éther qui suppose que si la vitesse de la lumière reste constante relativement à un éther stationnaire et partout répandu, quand la Terre s'éloigne d'une étoile A et se rapproche d'une étoile B, la vitesse observée de la lumière émanant de B est supérieure à celle de la lumière émise par A.

Pour cela, Michelson conçoit l'expérience suivante : il va mesurer la vitesse de la lumière dans deux situations différentes : quand elle arrive dans le sens du mouvement de la Terre, et, ensuite, dans la direction orthogonale.

Schéma simplifié du dispositif de Michelson-Morley :



L'onde lumineuse part de la source. En P, elle se divise en deux pour aller vers M1 et vers M2. Les deux ondes se rejoignent en P et reviennent vers l'observateur.

Michelson expliquait à sa fille : « Deux rayons de lumière font la course comme deux nageurs. L'un avance contre le courant et revient pendant que l'autre ne fait que traverser dans les deux sens, tout ne parcourant la même distance. Le second nageur gagne toujours, à condition qu'il y ait du courant dans la rivière. »

Les savants comptaient donc observer un phénomène d'interférence du fait que l'onde la même onde ne s'était pas déplacée à la même vitesse sur les deux chemins.

Mais ils ne détecteront jamais aucune variation dans la vitesse de la lumière, quelle que soit l'orientation de l'interféromètre.

Que faut-il en conclure ? Que la règle de composition des vitesses est mauvaise ? Que la vitesse de la lumière reste identique quel que soit le référentiel ? Que l'éther n'existe pas ? Quelle que soit l'hypothèse, elle conduit à une remise en question radicale de la mécanique newtonienne.

1905 : la relativité restreinte

La relativité galiléenne

Après avoir vu la gravitation universelle au sens de Newton, venons-en au principe de relativité. Ce principe n'est pas récent.

La question de la relativité est la suivante : les lois de la physique sont-elles invariantes dans n'importe quel référentiel ?

Avant même la découverte de la gravitation universelle par Newton, Galilée énonce le principe de l'inertie : tout corps abandonné à lui-même et ne subissant aucune force extérieure, est animé d'un mouvement rectiligne uniforme.

On appellera "référentiels galiléens" des systèmes de référence en mouvement de translation rectiligne uniforme les uns par rapport aux autres. Pour passer d'un référentiel R à un référentiel R' animé d'une vitesse v parallèle à l'axe des abscisses, le changement de variable est de la forme :

$$x' = x - v \cdot t$$

$$y' = y$$

$$z' = z$$

$$t' = t$$

Dans cette transformation dite "galiléenne", les lois de la mécanique et de la physique sont supposées être invariantes. Les vitesses s'additionnent.

Afin de respecter le principe d'inertie, Newton sera amené à introduire un temps absolu et un espace absolu universel.

Les limites de la relativité galiléenne

L'autre viendra de la découverte de l'électromagnétisme. En 1873, J. Maxwell (1831-1879), physicien écossais, publie les équations générales des champs électromagnétiques, dites « équations de Maxwell ». On constate alors que ces équations ne sont pas invariantes. Effectivement, la composition des vitesses ne fonctionne pas avec la vitesse de la lumière qui ne dépend pas de la vitesse de la source.

Serait-ce dû à l'existence d'un « éther » dans lequel la lumière se déplace par vibration ? On chercha alors à déceler un mouvement par rapport à l'éther. Ce fut alors la célèbre expérience de Michelson qui consiste à mesurer la vitesse de la lumière dans deux directions perpendiculaires.

Cette expérience fut faite en divers lieux, à 6 mois d'intervalle (la vitesse de la Terre change de sens) pendant des dizaines d'années et jamais on ne trouva un changement dans la vitesse de la lumière. Le mouvement de la Terre était indétectable avec cette méthode.

Ce résultat montrait que soit les équations de Maxwell étaient fausses, soit c'était la transformation galiléenne qui n'était pas correcte.

La solution de Lorentz et Poincaré

H. Poincaré montra que les équations de Maxwell étaient invariantes si on leur appliquait une transformation particulière, dite « transformation de Lorentz ».

1905 : La relativité restreinte

Einstein va réussir à étendre le principe de relativité de la mécanique à la physique à partir de deux postulats :

- tous les référentiels galiléens sont équivalents pour la formulation des lois physiques ;

- la vitesse de la lumière dans le vide est constante par rapport à n'importe quel système galiléen et est indépendante du mouvement de la source.

Ces deux postulats étaient bien sûr incompatibles avec la transformation galiléenne qui postule qu'il existe un temps absolu et que la mesure d'une longueur est indépendante du mouvement du système de référence. Einstein va donc montrer les erreurs de ces postulats.

En particulier, il montre la relativité de la notion de simultanéité qui n'a de signification que dans un système galiléen déterminé, ce qui entraîne la relativité de la notion de longueur. Longueur et temps sont liés. La transformation galiléenne doit, pour deux repères ayant leurs axes parallèles et en déplacement relatif selon l'axe x, être remplacée par la transformation de Lorentz :

$$\begin{aligned}x' &= (x-v*t) / \sqrt{(1-v^2/c^2)} \\y' &= y \\z' &= z \\t' &= (t-x*v/c^2) / \sqrt{(1-v^2/c^2)}\end{aligned}$$

La loi de composition des vitesses n'est plus celle du système galiléen.

On remarquera que pour des vitesses relatives petites devant c (i.e. v/c petit), la transformation de Lorentz se réduit à la transformation de Galilée.

Conséquences

$$E=mc^2$$

La masse croit avec la vitesse.

L'accroissement d'une masse qui se déplace à 10% de la vitesse de la lumière (30 000 km /s, soit environ 100 millions de kilomètres à l'heure. La vitesse de rotation de la Terre autour du Soleil est d'environ 100 000 km / h, et celle de Mercure d'environ 175 000 km / h) est d'à peine 0,5%.

En revanche, la masse d'un objet qui se déplace à 90% de la vitesse double. Celle d'un objet qui se déplace à la vitesse de la lumière devient infinie. Mais un objet ne pourra jamais atteindre cette vitesse limite car cela impliquerait une dépense d'énergie infinie.

Les effets de la relativité sont indécélables dans les phénomènes de la vie courante où la mécanique de Newton reste valable.

La relativité concerne uniquement les mouvements à très haute vitesse, de l'ordre de celle de la lumière.

1916 : la relativité générale

Limites de la relativité restreinte

La relativité restreinte n'a cependant pas résolu tous les problèmes.

Elle s'est montrée incapable d'incorporer la gravitation de manière satisfaisante et certaines expériences semblent toujours prouver qu'il existe un référentiel absolu. Par exemple, l'expérience du pendule de Foucault semble indiquer que l'on peut mesurer le mouvement de la Terre par rapport à un référentiel absolu.

Pour lever la contradiction, Einstein va étendre pour cela la relativité restreinte à la gravitation.

L'idée de 1907 et le principe d'équivalence

En 1907 Einstein eut l'idée « la plus heureuse de sa vie » celle qui donna naissance à la relativité généralisée.

Soit une personne en chute libre : si elle lâche un objet, elle le verra immobile par rapport à elle. Autrement dit, elle peut « travailler » comme si de rien n'était.

Il n'est pas possible, localement, de distinguer une force créée par une accélération d'une force créée par la gravitation.

Donc, l'accélération est équivalente à la gravitation. La masse inerte est équivalente à la masse pesante. C'est le principe d'équivalence.

L'espace-temps et la gravité

La relativité générale introduit aussi le concept d'espace-temps, espace à quatre dimensions comprenant les trois dimensions de l'espace classique et le temps (voir géométrie dans l'espace).

La relativité générale transfère à l'espace-temps les propriétés motrices que Newton attribuait aux forces.

L'espace est courbé par la matière.

La matière indique à l'espace-temps comment il doit se gauchir, l'espace-temps indique à la matière comment elle doit se déplacer.

La relativité générale propose donc une nouvelle approche du concept de gravité, fondée sur le principe de l'équivalence : on peut donc décrire la gravitation comme une manifestation de la courbure de l'espace.

1915 : confirmation de la relativité générale : le périhélie de Mercure

Einstein élucide l'énigme de Vulcain et de l'avance du périhélie de Mercure en novembre 1915, date à laquelle il annonce que sa théorie explique l'avance du périhélie de Mercure sans faire intervenir de phénomène mystérieux.

Concernant cette coïncidence entre la théorie et l'observation, Einstein écrira à un ami :

Je fus littéralement transporté de bonheur pendant des jours

1919 : preuve de la relativité et triomphe d'Einstein : la déflexion de la lumière

En 1911, Einstein propose de valider sa théorie par la déviation de la lumière d'une étoile rasant de près le soleil.

Cette étude n'est possible que pendant une éclipse totale.

Einstein prévoyait une déflexion de 0,87 secondes d'arc.

La mesure fut tentée une première fois sans succès pour cause de mauvais temps en 1912. En 1914, un projet de mesure fut arrêté par la guerre.

Ces contretemps permirent à Einstein de constater une erreur dans ses calculs : ainsi il annonça une déflexion de 1,75 secondes d'arc, valeur qui correspond bien à la réalité.

En mai 1919, une éclipse devait permettre la mesure. Ce sont les Anglais, malgré la guerre, qui décidèrent cette opération de mesure dès 1917. La mesure devait être faite au Brésil et dans le golfe de Guinée.

Les mesures donnent une déviation de 1,8 secondes d'arc : partout dans le monde, cela marque le triomphe d'Einstein.

Einstein écrira :

Pendant l'éclipse de 1919, [Max Planck] est resté debout toute la nuit pour voir si elle allait confirmer la déviation de la lumière. S'il avait vraiment compris la relativité générale, il serait allé se coucher comme moi.

Les cosmologies relativistes

1917 : la cosmologie d'Einstein : un Univers stationnaire, fini et sans limites

Le modèle des « univers-îles »

En 1917, Einstein postule que l'Univers est homogène. Cela va plutôt dans le sens du modèle des univers-îles.

Le fini sans limites vs le fini avec limites ou l'infini sans limites

Avec l'hypothèse de l'homogénéité et la relativité générale, Einstein arrive à la conclusion que l'Univers est fini et sans limites : c'est une hyper-sphère.

Les géométries non-euclidiennes vont permettre de « comprendre » cela.

Les géométries non-euclidiennes

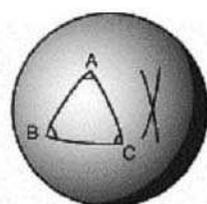
Les géométries non-euclidiennes sont des géométries fondées sur des axiomes différents de ceux qu'Euclide (3^{ème} siècle avant J.-C.) a énumérés dans les *Éléments*, et particulièrement le 5^{ème} postulat qui affirme qu'on ne peut tracer qu'une seule parallèle à une droite donnée et passant par un point extérieur à la droite.

Dans la première partie du 19^{ème} siècle, les mathématiciens allemand Carl Friedrich Gauss (1777-1855), russe Nikolai Ivanovitch Lobatchevski (1793-1856) et hongrois János Bolyai (1802-1860) montrent séparément qu'il est possible de construire un système de géométrie cohérent, dans lequel le 5^{ème} postulat euclidien est remplacé par un autre, selon lequel, par tout point n'appartenant pas à une droite donnée, on peut tracer un nombre infini de parallèles à la droite.

Plus tard, vers 1860, le mathématicien allemand Georg Friedrich Bernhard Riemann (1826-1866) montre qu'on peut construire une autre géométrie, dans laquelle il n'existe aucune parallèle à toute droite donnée.

La géométrie de Gauss-Bolyai-Lobatchevski est souvent appelée **géométrie hyperbolique** : elle peut être décrite par la géométrie d'un espace plan constitué uniquement des points intérieurs à un cercle, et dans laquelle les seules droites possibles sont les cordes du cercle.

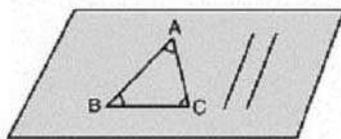
La géométrie riemannienne ou **géométrie sphérique** (ou elliptique) a pour modèle la géométrie de la surface d'une sphère dans laquelle les droites sont des grands cercles.



$$\hat{A} + \hat{B} + \hat{C} > 180^\circ$$

Géométrie sphérique

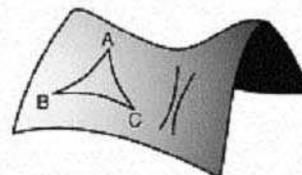
Univers fini et sans limites



$$\hat{A} + \hat{B} + \hat{C} = 180^\circ$$

Géométrie euclidienne

Univers fini ou infini



$$\hat{A} + \hat{B} + \hat{C} < 180^\circ$$

Géométrie hyperbolique

Univers fini ou infini

La notion d'hyper-sphère

Les géométries non-euclidiennes permettent en partie de comprendre cela.

La sphère est la surface à 2 dimensions d'un volume sphérique à 3 dimensions. Pour un être à deux dimensions vivant sur une sphère, la sphère est finie et sans limites.

L'hyper-sphère est l'hyper-surface à 3 dimensions d'un hyper-volume sphérique à 4 dimensions (la boule quadri-dimensionnelle d'espace-temps que l'entendement humain ne peut pas se représenter. Pour un être à 3 dimensions (un homme) vivant dans cette hyper-sphère, elle apparaît finie et sans limites.

Mais il faut bien dire que l'analogie ne rend pas véritablement compréhensible (au sens kantien : un concept et une intuition) la notion d'hyper-sphère.

Univers stable vs univers en expansion : la constante cosmologique

Les calculs d'Einstein le conduisent à une surprise qu'il a du mal à accepter : l'Univers ne peut pas être stable : ou bien les galaxies s'éloignent les unes des autres, ou bien elles se rapprochent les unes des autres.

Pour obtenir que les galaxies restent éternellement à leur place, Einstein introduit dans ses équations la « constante cosmologique » appelée aussi « facteur lambda ».

Cette constante est calculée précisément par Einstein de façon à imposer la constance du rayon de l'hypersphère et la densité de matière dans l'univers au cours du temps.

Bilan synthétique de l'Univers d'Einstein

- Hyper-sphère
- Densité de matière = constante
- Statique
- Constante cosmologique

1917 : la cosmologie de De Sitter : un Univers stationnaire et infini

Le Hollandais Willem De Sitter (1872-1934) propose une autre cosmologie à partir de physique relativiste : pour De Sitter l'espace est vide (et donc non homogène) et infini

Bilan synthétique de l'Univers de De Sitter

- Espace sphérique projectif
- Densité de matière = 0 (univers vide)
- Statique
- Constante cosmologique

Remarques sur les deux premières cosmologies relativistes

La création presque synchrone de deux cosmologies relativistes assez différentes nous montre d'emblée qu'avec les équations relativistes, on va pouvoir développer plusieurs modèles concurrents. Ce sont ensuite les faits expérimentaux qui invalideront certains modèles et en valideront d'autres.

On peut faire la comparaison avec les modèles de Ptolémée, Brahé et Copernic. Les mathématiques peuvent produire de nombreux modèles à base circulaire qui soient équivalents. C'est finalement le modèle de Kepler qui va l'emporter : il n'est plus à base circulaire et c'est celui qui rendra compte des faits concernant l'orbite de Mars.

Cependant, cette analogie est limitée par le fait que dans le cas des orbites du système solaire, le problème était cosmogonique, tandis qu'on traite ici de cosmologie, c'est-à-dire de la Totalité.

1922 : La cosmologie de Friedmann : l'Univers en expansion

En 1922, le mathématicien russe Alexandre Friedmann (1888-1925) réalise en analysant les équations de la relativité qu'elles conduisent à deux types d'Univers : le type stationnaire

d'Einstein et De Sitter, pour lequel la courbure de l'espace ne varie pas avec le temps, et le type variable. Il écrit :

Dans certains cas, le rayon de courbure de l'Univers part d'une certaine valeur et augmente constamment au cours du temps ; dans d'autres cas le rayon de courbure varie de façon périodique, l'Univers se contractant en un point (de volume nul), puis, à partir de ce point, augmente de rayon jusqu'à une certaine valeur maximale, puis diminue à nouveau pour redevenir un point, et ainsi de suite.

Cette dernière solution évoque une étape d'expansion suivie d'une autre de contraction.

Friedmann communiquera le résultat de ses recherches à Einstein, mais celui-ci dédaignera sa contribution, jusqu'à sa mort en 1925.

Bilan synthétique de l'Univers de Friedmann

- Hyper-sphère
- Densité de matière = fonction du temps
- Dynamique : expansion - contraction (modèle fermé)
- Constante cosmologique = 0

1927 : L'expansion de l'Univers selon Lemaître

En 1927, le mathématicien et prêtre belge Georges Lemaître (1896-1966) conçoit un « univers homogène de masse constante et de rayon croissant ». Lemaître reprend la vision de Friedmann alors qu'il ne la connaît pas, mais en s'appuyant sur plus de données d'observation. Ainsi, il énonce avant Hubble, la proportionnalité entre la vitesse de fuite des galaxies et leur distance.

Lemaître soumet son modèle à Einstein en 1927, mais comme avec Friedmann, celui-ci le dédaignera.

Lemaître finira évêque et sera le président de l'Académie pontificale des sciences de 1960 jusqu'à sa mort en 1966.

Bilan synthétique de l'Univers de Lemaître

- Espace sphérique projectif
- Densité de matière = fonction du temps
- Dynamique : expansion perpétuelle accélérée
- Constante cosmologique

1929 : L'expansion de l'Univers selon Hubble

Le décalage spectral de la lumière des galaxies

L'astronome américain Vesto Melvin Slipher (1875-1969) qui étudie le spectre des galaxies, remarque qu'à l'exception de quelques systèmes proches, comme la galaxie d'Andromède, les raies des spectres des corps astraux sont décalées vers les plus grandes longueurs d'onde (le rouge). Il publie ses résultats en 1922.

Slipher n'est pas celui qui interprétera ses résultats. Ceci s'explique par le fait que d'une part, ce n'est pas un théoricien, et d'autre part, à l'époque, la représentation de l'Univers était statique que le modèle des Univers-îles ne l'avait pas encore emporté.

Rappelons que les premières mesures de l'univers en millions d'années-lumière datent du travail sur les céphéides d'Henrietta Leavitt en 1912, et que par la suite, la représentation de l'image de l'Univers va consister tout d'abord à cartographier la Voie Lactée, à décentrer le Soleil et la Voie Lactée de l'Univers (« Grand Débat de 1920) et à faire progresser le modèle des Univers-îles

contre le modèle mono-galactique (découverte d'une céphéide en Andromède en 1924 par Hubble).

La loi et la constante de Hubble

C'est Hubble qui va interpréter ces résultats grâce à son travail d'observation des céphéides dans les galaxies et à la connaissance des distances des galaxies que cela lui procure.

En 1929, Hubble compare les distances qu'il a estimées pour différentes galaxies avec les décalages vers le rouge observés par Slipher pour ces galaxies : le spectre des galaxies présente un décalage spectral systématique vers le rouge et proportionnel à leur distance. C'est ce qui le conduit à la loi de Hubble : plus une galaxie est lointaine, plus sa vitesse d'éloignement est grande. La constante de Hubble est égale au rapport entre la vitesse d'éloignement d'une galaxie et sa distance.

Critiques de la loi de Hubble

Hubble constate que le spectre d'Andromède est décalé vers le bleu. Cette particularité est expliquée en partie par la rotation de notre Galaxie, phénomène qui engendre une perception de rapprochement pour des galaxies voisines comme Andromède.

Le Soleil circule à la vitesse de 215 km/s autour du centre de la Voie Lactée.

La loi de Hubble est établie sur la base d'une observation de quelques galaxies proches à moins de 100 millions d'années-lumière. Les mesures nouvelles ne parviendront pas à prendre la loi en défaut. Par contre, elles conduiront à des changements de la valeur de la constante de Hubble, ce qui est important car cette constante permet d'estimer l'âge de l'Univers.

Constante de Hubble et âge de l'Univers

La formule de la loi de Hubble est : $v = H_0 \times d$

H_0 est la constante de Hubble : elle est donnée en 1/s.

Mais, v étant donnée en km/s et d étant donnée en « mégaparsec » (environ 3,26 millions d'années lumière), H_0 est donnée en km/s par mégaparsec.

Remarque

Hubble n'a jamais admis l'expansion de l'Univers !

1932 : L'expansion de l'Univers selon Einstein-De Sitter : le 1^{er} modèle standard

Après les résultats publiés par Hubble, Einstein va abandonner son modèle statique en 1931 en reconnaissant l'apport de Friedmann et Lemaître.

En 1932, il proposera avec De Sitter un modèle dynamique. Dans ce modèle, Einstein et De Sitter ne citeront ni Friedmann et ni Lemaître !

Ce modèle revient à un univers euclidien infini et sans limites. La densité de la matière y est fonction du temps et c'est un univers en expansion perpétuellement ralentie.

Ce modèle est le premier à envisager l'existence d'une **matière noire** qui, n'émettant pas de radiations électromagnétiques, n'avait pas encore pu être détectée.

Ce modèle sera le modèle standard pendant 60 ans.

Il sera conforté dans les années 80 par le modèle dit d'inflation.

Il a été abandonné aujourd'hui car l'âge de l'Univers qu'il propose est trop court.

Bilan synthétique de l'Univers de Einstein - De Sitter

- Espace euclidien infini.
- Densité de matière = fonction du temps.

- Dynamique : expansion perpétuelle décélérée.
- Constante cosmologique = 0.

Le Big Bang et l'astrophysique moderne

Les premières cosmologies relativistes considèrent toujours que l'Univers existe de toute éternité.

C'est à partir de la théorie de l'expansion de l'Univers et à partir des analyses physiques sur la composition de l'Univers et sur la composition et le fonctionnement des étoiles que la théorie du Big Bang, c'est-à-dire celle qui (re)donne une origine à l'Univers, va se développer.

1931 : l'atome primitif de Lemaître

En 1931, Lemaître, en s'appuyant sur la découverte de Hubble, considère que si les galaxies de l'Univers sont en expansion, c'est qu'elles ont été regroupées en un même point à un moment donné. Il se demande donc si l'Univers n'a pas une origine dans l'espace et le temps.

Il va parler d'un « atome primitif » pour désigner l'objet singulier responsable de cette expansion.

L'atome primitif, c'est la première intuition du Big Bang.

En 1931, dans un article intitulé : « L'expansion de l'espace », Lemaître parle d'une première expansion explosive, comme un « feu d'artifice ».

En 1946, dans « L'hypothèse de l'atome primitif : essai de cosmogonie », il peaufinera cette vision.

Ces vues sont en opposition frontale avec les opinions dominantes des scientifiques pour qui l'Univers a toujours existé.

Au début, Einstein juge la thèse de Lemaître « inspirée par le dogme chrétien de la Création, et injustifiée sur le plan de la physique ».

1938-1946 : Alpher, Bethe et Gamow : éléments d'astrophysique

1938 : Bethe et Gamow : la chaîne proton-proton : la lumière du Soleil

Hans Bethe (1906- toujours vivant en 2004) est un physicien et astronome allemand qui a fui le régime nazi et a émigré aux Etats-Unis.

En 1938, il conçoit avec Georges Gamow (1904-1968) physicien et astronome russe, qui a fui le régime soviétique et a émigré aux Etats-Unis en 1934, le cycle de la fusion de deux protons en hélium.

C'est ce qu'on appelle « la chaîne proton-proton ».

Ils montrent que la fusion de deux protons peut engendrer une énergie approximativement égale à celle qu'irradie le Soleil.

Plus généralement, cette réaction est la source principale d'énergie du Soleil et de toutes les étoiles de faible masse (inférieure à deux fois la masse solaire). Cette série de réactions s'amorce lorsque la température de la matière stellaire atteint **10 millions de degrés**.

1938 : Bethe et le cycle du carbone : la lumière des étoiles

Cependant, l'énergie dégager par la fusion de l'hydrogène ne permet pas de rendre compte de la luminosité beaucoup plus intense d'étoiles bien plus grosses que le Soleil.

Toujours en 1938, Bethe, seul cette fois-ci, écrit un article qui résout ce problème en identifiant ce qu'on appelle « le cycle du carbone ». Il s'agit d'une réaction de fusion qui n'est possible qu'à une température qui n'est atteinte qu'au cœur des étoiles dont la masse est au moins 2 à 3 fois supérieure à celle du Soleil.

En bref, le cycle du carbone s’amorce dès que la température centrale des étoiles atteint **16 millions de degrés**. Il commence par la collision d’un noyau d’hydrogène avec un noyau de carbone-12, produisant de l’azote-13, puis au fil des collisions, de l’azote-14, de l’oxygène-15 et de l’azote-15. En fin de chaîne, l’azote-15, après une ultime collision avec un proton, se désintègre en hélium-4 et en carbone-12, restituant ainsi le carbone mis en œuvre au départ. Le carbone joue ainsi un rôle essentiel de catalyseur ; l’oxygène et l’azote ne sont que des noyaux transitoires du cycle. Lorsque les noyaux d’hydrogène du cœur de l’étoile ont été consommés, le cycle s’arrête.

La chaîne pp et le cycle du carbone caractérisent le premier statut évolutif nucléaire des étoiles : la séquence principale. Il succède au stade immédiatement antérieur à celui de la séquence principale (stade pré-séquence principale), au cours duquel la jeune étoile récemment formée (entre 1 et 10 millions d’années) puise l’essentiel de son énergie dans la contraction gravitationnelle (cf. le diagramme de Hertzsprung-Russell).

Ainsi, il aura ainsi fallu moins de 40 ans à l’humanité pour passer d’une méconnaissance totale de la physique sub-atomique, à la compréhension des mécanismes de fusion thermonucléaire qui alimentent le Soleil. Mais c’est là une autre histoire...

Pour l’anecdote, notons que l’article de Bethe dans lequel il décrit la chaîne du carbone, a d’abord été proposé à la publication dans la prestigieuse *Physical Review*. Mais Bethe a repris son article avant la publication pour le donner à l’Académie des sciences de New-York qui offrait un prix de 500 dollars au meilleur papier non publié sur la production d’énergie stellaire. Bien entendu, Bethe gagna ce prix. Bethe expliqua qu’il avait besoin de cet argent pour aider sa mère à émigrer. « J’ai employé une partie du prix à aider ma mère à émigrer. Les nazis étaient tout à fait prêts à laisser ma mère partir, mais ils voulaient 250 dollars, en dollars, pour lui rendre ses meubles. » Ainsi, la découverte qui permet de savoir pourquoi les étoiles brillent a servi à libérer les meubles d’une vieille dame au prise avec l’un des régimes les plus sanguinaires de l’humanité...

1946 : la nucléosynthèse primordiale de George Gamow : l’origine de l’Univers

En 1946, Gamow écrit un article avec son élève Ralph Alpher au sujet de la nucléosynthèse primordiale.

Au moment de publier l’article, Gamow ajoute le nom de Bethe à l’article qui porte désormais la signature : Alpher, Bethe et Gamow ! (Alpha, bêta et gamma).

Cet article explique l’origine de l’Univers et la formation des éléments légers comme l’hydrogène, l’hélium, le lithium.

Si l’atome primitif de Lemaître était la première intuition du Big-Bang, l’article de Alpher, Bethe et Gamow en est la première théorie. Alpher, Bethe et Gamow sont en quelque sorte les Kepler du Big Bang, dont Lemaître est le Copernic, et dont Einstein est le Newton, mais un Newton un peu étrange puisque venu avant Copernic et Kepler !

L’article laisse la question de l’origine des éléments lourds dans l’ombre. C’est plus tard qu’on comprendra que les réactions nucléaires se poursuivent dans les étoiles lorsque la température au centre de l’étoile dépasse **200 millions de degrés**, conduisant au processus triple-alpha. Dans cette réaction nucléaire, trois noyaux d’hélium fusionnent pour donner un noyau de carbone.

Réception de la cosmologie de Gamow : naissance du syntagme Big Bang

1948 : L’Univers stationnaire de Bondi, Gold et Hoyle

En 1948, Après la guerre, les Autrichiens Hermann Bondi et Thomas Gold et l’Anglais Fred Hoyle (1915-2001), se retrouvent à Cambridge. En 1948, ils exposent dans deux articles séparés les éléments de leur thèse commune.

D'après eux l'Univers est non seulement homogène et isotrope, mais il est aussi inchangé dans le temps : il n'a pas d'histoire et il est éternel : il est et restera le même de toute éternité et pour toute l'éternité.

On appelle leur théorie celle de l'état stationnaire.

Pour justifier l'expansion des galaxies révélée par Hubble, les savants proposent une création continue de matière pour compenser la dilution liée à l'expansion et maintenir l'homogénéité. D'après leurs calculs, il suffirait qu'un seul atome d'hydrogène apparaisse par décimètre cube d'espace chaque milliard d'année.

Bilan synthétique de l'Univers de Bondi, Gold et Hoyle

- Espace euclidien infini.
- Densité de matière = constante
- Dynamique : expansion perpétuelle exponentielle avec création continue de matière
- Constante cosmologique = 0.

1948 : Hoyle et le Big Bang

Lors d'un débat radiophonique vers 1948, Fred Hoyle appelle la théorie de Gamow de ce qu'il veut être un sobriquet : Big Bang.

Le sobriquet va rapidement devenir l'étendard de la nouvelle théorie.

A dire vrai, Fred Hoyle était pourvu d'un grand talent de vulgarisation, d'une grande ironie et d'une grande imagination ! Il deviendra un écrivain prolifique en publiant de nombreux ouvrages de vulgarisation en astronomie, ainsi que des romans de science-fiction ayant pour toile de fond l'actualité cosmologique. Hoyle sera aussi un grand zélateur de la panspermie, théorie selon laquelle une vie extraterrestre a inséminé la Terre (voir exobiologie). Il dira : « Je ne crois pas qu'un Boeing 747 puisse émerger par hasard d'un tas d'ordures... ». Sa contribution sur l'origine de la vie réside en une critique rigoureuse du néodarwinisme (voir évolution biologique), ce qui lui attire à nouveau les foudres de la communauté scientifique.

1951 : Pie XII et Jean-Paul II

Le 22 novembre 1951, dans un discours devant l'Assemblée pontificale des sciences (dont Lemaître est membre depuis 1936 et qu'il présidera entre 1960 et 1966), le pape Pie XII (1876-1958, pape de 1939 à 1958) dira :

Il me semble, en vérité, que la science d'aujourd'hui, remontant d'un trait de millions de siècles, a réussi à se faire le témoin de ce Fiat Lux, de cet instant où surgit du néant, avec la matière, un océan de lumière et de radiations, tandis que les particules des éléments se séparaient et s'assemblaient en millions de galaxies.

Pie XII, 1951

C'est une interprétation du passage de la Bible (de la Genèse) qui dit :

Fiat Lux

Que la lumière soit

Ce passage de l'Ancien Testament doit être mis en parallèle avec le début de l'Évangile de Jean :

Au commencement était le Verbe⁸

Lemaître toutefois n'était pas d'accord avec une telle interprétation. Il en parla à Pie XII qui, en 1953, considérait publiquement que la cosmologie scientifique ne parlait pas de Fiat Lux.

Stephan Hawking raconte au sujet de son entrevue avec Jean-Paul II l'anecdote suivante :

⁸ « In principio erat Verbum » en Latin. « ên arkhé ên o logos » en Grec. L'hébreu correspondant est Dabar, qu'on traduit plutôt par « Parole ».

[En 1981] mon intérêt pour l'origine et le destin de l'Univers fut réveillé au cours d'une conférence sur la cosmologie organisée au Vatican par les jésuites [...] À la fin de cette conférence, les savants se firent accorder une audience avec le pape qui estima que c'était une bonne chose d'étudier l'évolution de l'Univers de puis le Big-Bang, mais que nous ne devrions pas nous occuper du Big Bang lui-même parce que c'était le moment de la Création et donc l'œuvre de Dieu.

Stephen Hawking, Une brève histoire du temps

On comprend à ce sujet l'intérêt qu'il peut y avoir à distinguer entre matérialisme et athéisme, ou encore entre un athéisme méthodologique et un athéisme dogmatique (ou métaphysique), pour reprendre les distinctions d'Yvon Quiniou. Pour le dire comme ce dernier

« Dieu est bien mort épistémologiquement, et cela a quelque chose de nouveau comparé à la survie qui était la sienne au cœur de la réflexion dans et sur la science aux époques précédentes [...] L'interrogation sur une origine éventuelle de l'Être (matériel) demeure ouverte. Non fausse question qu'il faudrait cesser de se poser - c'est la position du scientisme -, mais vraie question à laquelle on ne peut apporter de réponse vraie ou certaine, à savoir sur le terrain de la science. »

Yvon Quiniou, Athéisme et matérialisme aujourd'hui, 2004

Années 50 et 60 : la communauté scientifique

Dans les années 50 et pendant la première moitié des années 60, la théorie du Big Bang n'a pas bonne presse dans la communauté scientifique. Le relent de créationnisme qu'elle véhicule et le contexte idéologique de la Guerre froide, associée la jeunesse de la science astrophysique contribuent à maintenir cette théorie au second plan même si elle est la continuité logique du premier modèle standard d'Einstein et De Sitter.

Ce qui lui manque, c'est une preuve.

1965 : Première preuve du Big Bang : découverte du rayonnement fossile

1948 : Principe du rayonnement fossile et mesures théoriques

En conséquence de son modèle de nucléosynthèse primordiale (le Big Bang), Gamow considère dès 1948 que l'Univers doit avoir gardé la trace de cette chaleur initiale.

En 1948, Alpher et Robert Hermann calculeront une valeur à ce rayonnement fossile : 5 K. Puis, ils trouveront une valeur de 28 K.

En 1950, Gamow proposera une valeur de 3 K, puis 7 K en 1953 et 6 K en 1956. Mais il ne précise pas par quel calcul.

1965 : Penzias et Wilson découvrent le rayonnement fossile

En 1965, deux chercheurs américains des laboratoires Bell (AT&T), Arno Penzias et Robert Wilson, qui travaillent sur une antenne radio très sensible dédiée à l'écoute des satellites artificiels, découvrent par hasard, dans leur poste de radio un étrange bruit correspondant à une longueur d'onde de 7,35 centimètres,

Penzias et Wilson procèdent à tous les réglages possibles pour l'éliminer. En vain. Quels que soient leurs efforts, et quelle que soit l'orientation de leur antenne dans le ciel, les deux chercheurs ne parviennent pas à se débarrasser de ce bruit de fond.

Ils révéleront leur expérience dans l'Astrophysical Journal de juillet 1965 sans savoir l'interpréter.

C'est l'équipe de physiciens constituée par Peebles, Roll et Wilkinson et dirigée par Robert Dicke qui interprètera ce bruit de fond comme un signal cosmologique : le fameux rayonnement de fond du ciel prévu par Gamow, dont la mesure est alors de 3 K.

Par la suite, l'expérience de Penzias et Wilson sera maintes fois confirmées, notamment en 1992 par le satellite COBE, qui vérifiera la nature thermique, l'homogénéité et l'isotropie du rayonnement de fond cosmologique à une précision de 10^{-5} . Il donne valeur de 2,736 K avec une fluctuation d'un point à l'autre du ciel de 0,017 K.

Un bémol dans la Légende

Au début du XXème siècle, avant les mesures de Hubble, Guillaume, Regener, Nernst et Eddington calculèrent la température que devrait avoir le rayonnement dans l'hypothèse d'un Univers stationnaire de durée infinie, ayant atteint un certain équilibre entre matière et rayonnement. Eddington obtient la valeur de 3,8 K.

La découverte de Penzias et Wilson, si elle servit de preuve du Big Bang, ne servit par pour autant de preuve au modèle stationnaire !

Autre preuve du Big Bang : la composition chimique de l'Univers

En 1964, Hoyle avait déjà reconnu que son modèle ne pouvait pas expliquer l'abondance de l'Hélium dans l'Univers. En 1965, il doit admettre son incapacité à élucider ce rayonnement.

La force théorique du modèle du Big Bang est qu'il permet de comprendre la composition chimique de l'Univers.

Cosmologie et épistémologie

Les modèles standards

Les modèles standards sont les modèles du Big Bang. On les appelle aussi modèles de Friedmann et Lemaître. Le modèle de Einstein et De Sitter est le premier modèle standard de ce type.

La matrice générale du modèle standard est à la fois physique et cosmologique.

L'Univers est (ou est expliqué comme étant) une structure spatio-temporelle associée à de la matière et à des rayonnements. Les relations entre ces trois éléments (l'espace-temps, la matière et les rayonnements) sont régies par la théorie de la relativité générale.

À partir de cette matrice, on peut concevoir une grande variété de modèles d'Univers.

La matrice standard (matrice des modèles standard de Big Bang) décrit un univers homogène (c'est-à-dire dont la matière est uniformément répartie dans tout l'espace), en expansion depuis une singularité initiale (en mathématique, une singularité est un point où certaines quantités deviennent infinies) remontant à une quinzaine de milliards d'années.

À en croire Jean-Claude Luminet, astrophysicien français, traducteur de Friedman et partisan du Big Bang :

Malgré leur grande simplicité, les modèles standard de Big Bang fournissent une excellente description de l'Univers durant une grande partie de son évolution, expliquant le noir du ciel, le décalage vers le rouge des galaxies, la proportion des éléments chimiques légers, le nombre d'espèces différentes de neutrinos, l'existence d'un rayonnement diffus de corps noir à la température de 2,73 Kelvins uniformément réparti sur le fond de ciel, et les petites irrégularités observées dans les rayonnements.

Jean-Claude Luminet, Le débat cosmologique, <http://luth2.obspm.fr/~luminet/PLS.html>

Organisation spatio-temporelle

Les modèles cosmologiques standard (modèles de Friedmann-Lemaître) sont caractérisés par un espace non euclidien, c'est-à-dire courbe.

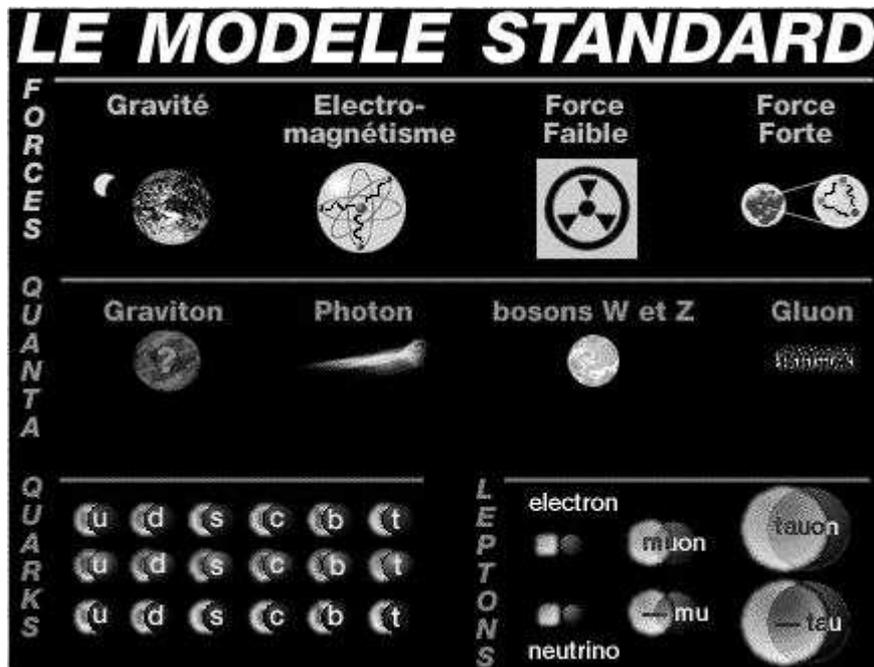
La mesure de la courbure de l'Univers est très proche de zéro.

Notre Univers est donc très proche de l'Univers plat décrit par les lois de la géométrie euclidienne.

Organisation matérielle

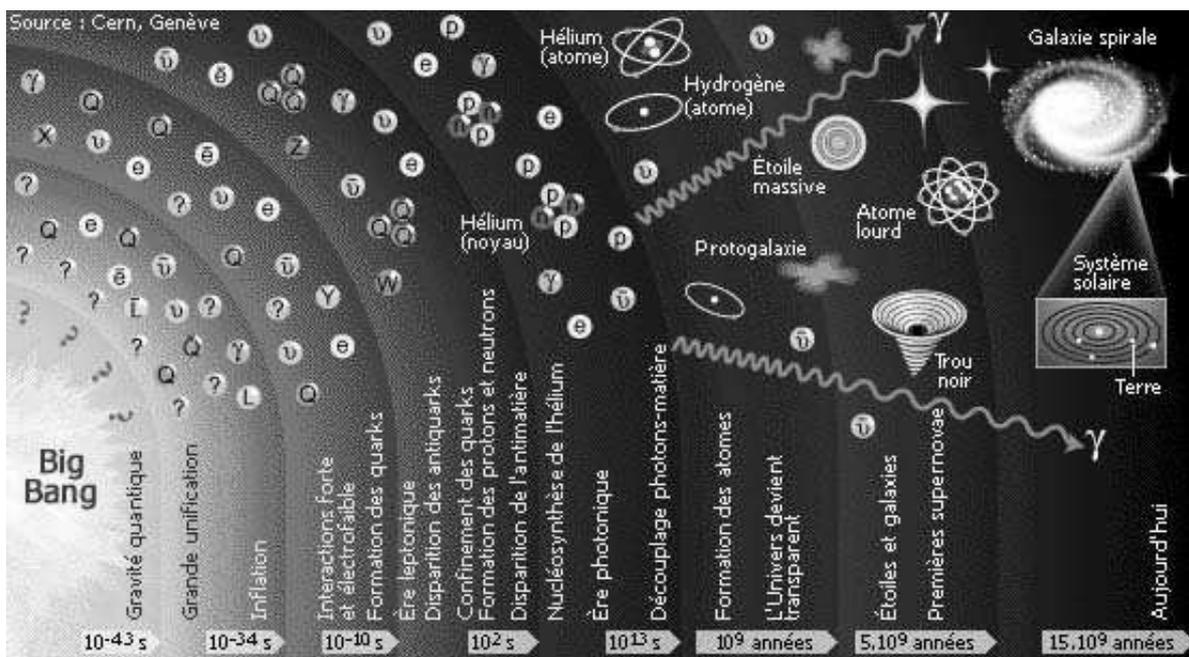
La science distingue aujourd'hui 4 interactions fondamentales pour expliquer l'organisation de la matière (par ordre décroissant d'intensité) :

- Les interactions fortes : ce sont les forces de plus grande intensité. Elles sont à l'origine de la cohésion des protons et des neutrons au sein du noyau atomique.
- Les interactions électromagnétiques : assurent les liaisons entre les électrons et le noyau. Ces interactions sont responsables des réactions chimiques.
- Les interactions faibles : elles gouvernent la désintégration de certains noyaux radioactifs.
- L'interaction gravitationnelle : elles sont encore plus faibles, même si elles sont observables à grande échelle (chute des corps, mouvement des astres).



Chronologie

Les modèles de Big Bang fournissent aussi des chronologies pour l'Univers.



Les cent premières secondes correspondent à une période de prédominance des radiations.

Entre 10^{-6} et 10^{-4} seconde, l'Univers prend une taille équivalente à celle du Système solaire. Les protons et les neutrons apparaissent.

La nucléosynthèse primordiale commence après 1 seconde et permet la formation d'Helium (2 protons et 2 neutrons). Après 3 minutes, la matière de l'Univers se compose de 75% de noyaux d'hydrogène ^1H et de 25% noyaux d'hélium ^2He . En fait, il existe aussi des traces de ^7Li (lithium à 3 protons et 4 neutrons) et d'isotopes tels que deutérium ^2H , ^3He , ^4He , etc. Près de 99 p. 100 de la matière actuelle de l'Univers se forme à cette époque.

De 3 minutes à 300 000 ans, les noyaux capturent des électrons et forment des atomes stables. La température va descendre jusqu'à 4000 degrés. A la fin, les photons peuvent circuler dans l'Univers sans interaction avec la matière : c'est le rayonnement fossile.

La dernière étape, de 300 000 ans à maintenant : c'est l'ère stellaire. Elle voit la constitution des étoiles, des galaxies, des planètes et des atomes plus lourds.

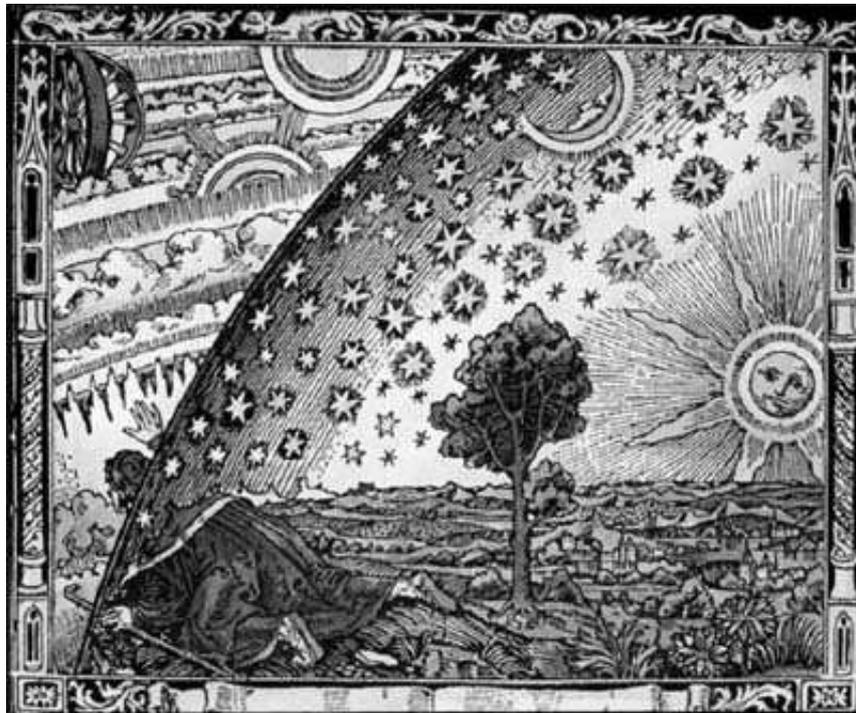
Les paradoxes

Le problème du fini et de l'infini

Le monde de Ptolémée est un monde fini. La sphère des étoiles fixes vient clore l'Univers.

Pour les pythagoriciens (avant Platon et Aristote) et particulièrement pour Archytas de Tarente, le monde fini posait un problème :

Si je suis à l'extrémité du ciel, puis-je allonger la main ou un bâton ? Il est absurde de penser que je ne le peux pas ; et si je le peux, ce qui se trouve au-delà est soit un corps, soit l'espace. Nous ne pouvons donc aller au-delà de cela encore, et ainsi de suite. Et s'il y a toujours un nouvel espace vers lequel on peut tendre le bâton, cela implique clairement une extension sans limites.



Avec la révolution copernicienne et l'espace newtonien, on est passé à un Univers infini constitué par une structure d'espace euclidien.

La relativité générale a transformé cette structure euclidienne en faisant de l'espace un espace-temps déformé par la présence de matière. La gravitation étant la manifestation de la courbure de l'espace-temps elle dicte les trajectoires des particules matérielles et des rayons lumineux qui sont alors astreints à suivre les contours de cette géométrie non euclidienne.

Les modèles standard n'ont pas tranché sur la question du fini ou de l'infini.

Certains modèles standard reprennent la première conception d'Einstein de 1917 : celle de l'hyper-sphère, ce qui donne un modèle à la fois fini et sans limite.

D'autres modèles proposent un espace euclidien infini (Einstein - De Sitter, 1927).

Le problème du Tout

L'Univers est la Totalité. Quelle que soit sa taille. Qu'il soit fini ou infini, il n'y a rien d'autre en dehors de cette Totalité. Ni espace, ni temps.

Le problème du commencement

Le Big Bang n'est pas la violente explosion qui a donné naissance à l'Univers. C'est seulement l'instant qui marque le début de l'intelligibilité de l'Univers.

La question du commencement reste ouverte : c'est-à-dire la question de savoir ce qu'il y avait avant le Big-Bang.

Le problème de la fin

Si l'Univers est en expansion permanente, alors il a vocation à s'éteindre complètement et à finir tel un grand cimetière.

Les modèles non-standard

Certains modèles non-standard maintiennent le Big Bang, d'autres au contraire le rejettent.

Le modèle inflationnaire (Big Bang et Big Crunch)

Le modèle inflationnaire a été proposé en 1980 par Alan Guth.

Selon ce modèle, la taille de l'Univers a augmenté d'un facteur de 10-40 en 10-20 secondes après l'explosion primordiale.

Le modèle inflationnaire prédit un Univers dont l'état est juste à la limite entre un état ouvert (courbure négative) et un état fermé (courbure positive). Si l'Univers est ouvert, l'expansion de l'Univers se poursuivra indéfiniment de plus en plus lentement ; si l'Univers est fermé, la contraction de l'Univers succédera à la phase d'expansion pour s'achever par une phase d'effondrement, surnommée le big crunch, par analogie au big bang.

Pour prédire l'avenir de l'Univers, il convient de déterminer sa densité de matière et d'énergie

La théorie de la « lumière fatiguée »

Pour les partisans de cette théorie, le décalage spectral vers le rouge ne prouve pas nécessairement l'expansion de l'Univers. Il pourrait résulter d'une interaction inconnue entre les photons et le milieu sidéral.

Le problème des quasars

Les quasars ont été détectés dans les années 60 par les radioastronomes. Ils sont jusqu'à mille fois plus lumineux qu'une galaxie, mais aussi jusqu'à cent mille fois plus petits. Les plus proches sont à 2 milliards d'années-lumière et les plus lointains à 14 milliards. Ce serait donc les objets les plus éloignés dans l'espace et le temps jamais observés.

L'astrophysicien Halton Arp prétend qu'il existe des liaisons entre certains quasars et des galaxies proches, remettant en cause l'interprétation classique par l'effet Doppler.

GUT et SUSY : l'unification des interactions fondamentales (Big Bang)

La Grande Unification (GUT en anglais), est un ensemble de théories qui cherchent à réunir les trois interactions atomiques : l'électromagnétique, la faible et la forte. On parle aussi de la théorie de la « superforce ».

SUSY (Super Symétrie) est une unification encore plus ambitieuse qui se propose d'englober aussi l'interaction gravitationnelle. C'est aussi le cas des théories des supercordes.

A en croire Arkann Simaan en mars 2005 (L'image du Monde de Newton à Einstein, préface de Jean-Claude Pecker (astrophysicien français, professeur au Collège de France et Membre de l'Académie des Sciences) aujourd'hui aucunes de ces théories ne fonctionnent : seule une théorie

dite « électrofaible » permet d'englober les interactions électromagnétiques et les interactions faibles.

Théorie des cordes, supercordes, membranes (Big Bang)

Les théories des cordes est une théorie qui cherche à unifier la mécanique quantique et la théorie de la relativité générale, c'est-à-dire les quatre interactions élémentaires.

Cette théorie considère que les briques fondamentales de l'Univers ne sont pas des particules ponctuelles mais des sortes de cordelettes vibrantes.

Elle considère aussi que l'univers contient plus de trois dimensions spatiales.

Malgré de premiers résultats partiels très prometteurs, la théorie des cordes reste toutefois incomplète.

Différents modèles indépendants ont été développés dans les années 80 :

- les théories dites bosoniques à 26 dimensions
- les théories des supercordes à 10 dimensions.

Dans les années 90, on a envisagé que toutes les théories précédemment construites soient des cas particuliers d'une théorie unique plus fondamentale, baptisée théorie M, qui ne serait pas une théorie de cordes mais plutôt de membranes, dans un espace à 11 dimensions.

En 1986 par exemple, le mathématicien japonais Noboru Nakanishi[23] de l'Université de Kyoto comparait avec beaucoup d'humour la théorie des supercordes à un "syndrome" dont l'épidémie ne touchait que les jeunes générations, "les malades n'ayant pas conscience de leur état, jugeant les symptômes de Kaluza-Klein comme normaux et ignorant le caractère quadridimensionnel du monde réel. Un possible désastre est à craindre si un antidote n'est pas bientôt découvert".

Ainsi, selon certains, une théorie des cordes ne peut même pas être fausse... On en revient à Popper et au principe de la réfutabilité.

Le modèle de l'Univers replié (Big Bang)

Jean-Pierre Luminet, astrophysicien français, traducteur de Friedman et partisan du Big Bang, écrit aujourd'hui :

Nous voyons un ciel rempli de galaxies, mais son aspect ne permet pas de décider si les galaxies des régions lointaines sont ou non des images fantômes de galaxies plus proches [...] l'Univers pourrait nous paraître vaste, "déplié", tandis qu'il serait en réalité beaucoup plus petit et "replié".

<http://luth2.obspm.fr/~luminet/topo.html>

Un univers plus petit et rempli de mirages est une possibilité. Toutefois, cet Univers ne pourrait être plus petit que plusieurs centaines de millions d'années-lumière. Soit environ un rapport de 1 à 50 (de 15 milliards à 300 millions).

La théorie de l'état quasi stationnaire

Vers 1980, Fred Hoyle améliora son modèle précédent en proposant un modèle dit « quasi-stationnaire ». C'est un modèle qui propose un Univers dont la densité oscille entre un état minimum et un état maximum, mais sans singularité (sans point de dimension nulle et de densité infinie de matière).

D'après Jean-Claude Pecker, cette hypothèse a toutes les qualités du Big Bang en ce qui concerne les faits observés, tout en utilisant très peu de paramètres. Son seul défaut est que, ne faisant pas intervenir de très forte densité, elle rend inconcevable des théories d'unification comme GUT ou SUSY.

Distinction entre cosmologie et cosmogonie

Jean-Claude Pecker dit :

Ce qui me trouble le plus, ce ne sont pas tant les contradictions du Big Bang que le conservatisme scientifique qui rejette les autres théories cosmologiques [...] Nous disposons aujourd'hui d'une façon d'interpréter l'Univers. Mais personne ne sait s'il n'existe pas une autre interprétation possible. [...] De la même façon, jusqu'en 1830, les scientifiques n'avaient pas les moyens de démontrer que c'était Copernic qui avait raison par rapport à Ptolémée.

Jean-Claude Pecker, Pour la Science n°595, 1996

Critique fondamentale

Il me semble que ce genre d'analogie (Copernic / Ptolémée et Modèle non-standard / Modèle standard) peut, fondamentalement, être critiqué ainsi :

- Le modèle de Copernic comme celui de Ptolémée est fondamentalement un modèle cosmogonique et pas cosmologique. Il traite essentiellement du système solaire, c'est-à-dire d'un objet de l'Univers parmi le Tout. Les modèles standard et non-standard sont des modèles à proprement parler cosmologiques qui s'occupent de l'Univers dans sa totalité.

Critique historique

On peut aussi, sur le plan historique, faire la remarque suivante :

Les preuves du modèle de Copernic-Kepler-Newton sont venues de la précision des prévisions qu'il apporte (observation de Mercure passant devant le Soleil en 1631, de la prévision du retour de la comète de Halley en 1759, prévision de l'existence de Neptune et découverte en 1846), de l'universalité de son champ d'application (la gravitation s'applique aux galaxies), de sa capacité à expliquer d'autres phénomènes (les marées en 1687, la forme de la Terre en 1737, l'aberration des fixes en 1729). Cependant, on peut considérer que c'est à partir des lois de Kepler de 1609 que le modèle de Copernic a définitivement gagné. C'est donc seulement entre 1543 et 1609 qu'on peut considérer qu'il y a une période d'incertitude.

Pourquoi s'est-on laissé le temps trouver la solution ? On peut rappeler quelques éléments :

- Les tables astronomiques alphonsines de 1252 étaient assez imprécises.
- L'orbite de Mars était un mystère.
- La nova de 1572 et la comète de 1577 observées par Brahé ont ébranlé le dogme de l'incorruptibilité du monde supra-lunaire.
- Les épicycles et le point équant pouvaient aussi remettre en cause le dogme du cercle et du centre.
- L'idée que les apparences peuvent nous tromper remontent au moins à l'allégorie de la caverne de Platon (La République, livre 7).

Critique sur les conséquences

Pour Alexandre Koyré, la révolution copernicienne fait passer d'un monde clos à un univers infini. Que ce soit un Univers infini ou un Univers fini et sans limites, de toute façon, la révolution copernicienne fait passer d'un monde petit (son diamètre est égal à la distance Terre-Soleil) à un Univers immensément grand (1 million de milliard de fois plus grand).

Autre révolution, quand on passe du modèle de Ptolémée au modèle Newtonien, on passe d'un modèle totalement faux à un modèle presque totalement vrai. La relativité générale n'invalide pas de modèle de Newton comme le modèle de Newton à invalider le modèle de Copernic. La relativité générale approfondit le modèle de Newton.

Une analogie, pour être pertinente, doit donc retrouver des transformations équivalentes. Or, ces deux transformations ne peuvent pas être répétées : ce sont des moments uniques dans l'histoire de la connaissance. Donc, l'analogie (Copernic / Ptolémée et Modèle non-standard / Modèle standard) n'est pas pertinente.

La question de la preuve en cosmologie : la modélisation

Pas d'expérimentation possible.

Pas d'observation directe des phénomènes, ni sur le plan de leur structure, ni sur le plan de leur histoire.

Il s'agit de construire un modèle théorique (mathématique) qui propose une histoire rendant compte des observations astronomiques et des connaissances physiques.

Le constat actuel c'est qu'il existe de nombreux modèles possibles qui atteignent ces objectifs.

Le Big Bang est-il une mythologie parmi d'autres ?

C'est ce qui a pu faire considérer le Big Bang comme une mythologie. C'est cependant une mythologie très particulière puisqu'elle rend compte de tous les phénomènes connus. Ainsi, à ce que

En 1976, Hannes Alfvén, prix nobel de physique en 1970, disait :

Le Big Bang est un mythe. Peut-être un merveilleux mythe qui mérite une palce d'honneur dans un zoo qui contiendrait déjà le mythe hindou d'un Univers cyclique, l'œuf cosmique chinois, le mythe biblique de la Création en six jours, le mythe cosmologique de Ptolémée et bien d'autres.

Quelles différences y a-t-il entre le Big Bang et les mythes cosmologiques ?

On peut considérer dans un premier temps que tous les discours cosmologiques cherchent à rendre compte des phénomènes. Même si le Big Bang rend compte d'infiniment plus de phénomènes que les autres mythes, le principe reste le même.

Les mythologies religieuses font toujours intervenir le surnaturel. C'est ce qui distingue les cosmologies issues du miracle grec des cosmologies religieuses : c'est le début de la science.

La cosmologie de Ptolémée était scientifique et fautive. Cette cosmologie est surtout une cosmogonie du fait que la perception du Tout est très limitée. Cette cosmogonie (celle du système solaire) attendait de nouvelles données d'observation pour être réfutée. La cosmologie associée est par contre devenue uniquement biblique et non plus scientifique.

Les cosmologies relativistes sont donc les premières cosmologies scientifiques sérieuses (elles sont suite à Giordano Bruno et à Kant).

Dernières avancées astronomiques

Les nouveaux outils

La radioastronomie

En 1931, l'ingénieur américain Karl Jansky a véritablement créé la radioastronomie : alors qu'il travaillait pour les Laboratoires Bell Telephone sur une expérience destinée à comprendre la cause de perturbations sur les radiocommunications transatlantiques en ondes courtes, Jansky a découvert une émission radioélectrique dans la région proche du centre de la Voie lactée.

Un autre ingénieur américain, Grote Reber, a ensuite dressé la carte de ces émissions radioélectriques galactiques, en utilisant une antenne parabolique d'un diamètre de 9,5 m, qu'il avait lui-même construite dans son jardin à Wheaton, dans l'Illinois.

En 1943, Reber découvrit également les émissions radioélectriques provenant du Soleil, qui avaient fait l'objet de nombreuses recherches.

L'informatique

Les télescopes spatiaux

Ce n'est qu'après 1960, lorsque les fusées ont été capables de propulser des satellites en orbite autour de la Terre, que le rêve d'une astronomie spatiale devient réalité.

Les Britanniques réalisent le premier programme astronomique spatial, en lançant en avril 1962 le satellite Ariel 1, destiné à l'étude des rayonnements ultraviolets et X émis par le Soleil. Six ans plus tard, le satellite américain OAO 2, du programme OAO (Orbital Astronomical Observatory) conçu par la NASA (National Aeronautics and Space Administration), a été lancé avec succès en emmenant à son bord des détecteurs sensibles à l'infrarouge, à l'ultraviolet, et aux rayons X et gamma. Cette première génération de télescopes fut extrêmement utile au développement ultérieur de télescopes spatiaux beaucoup plus complexes.

Observatoires de rayons X

Le premier télescope spatial dédié exclusivement à l'étude du rayonnement X, nommé Uhuru ou Explorer 42, fut lancé en 1970 par la NASA. Il détecta des milliers de sources réparties dans tout l'Univers

L'observatoire américain Einstein, encore nommé HEAO-2 (High Energy Astronomical Observatory), a été lancé en 1978 ; il comportait à son bord le premier télescope capable de focaliser le rayonnement X et donc de réaliser des images des sources émettrices.

Observatoires de rayons Gamma, ultraviolets, infrarouges

Observatoires spatiaux optiques

Le satellite européen Hipparcos, lancé en 1989 et qui a fonctionné jusqu'en 1993, a permis de mesurer les positions de plus d'un million d'étoiles et de déterminer la parallaxe de plus de 100 000 étoiles, augmentant considérablement le volume de l'Univers connu.

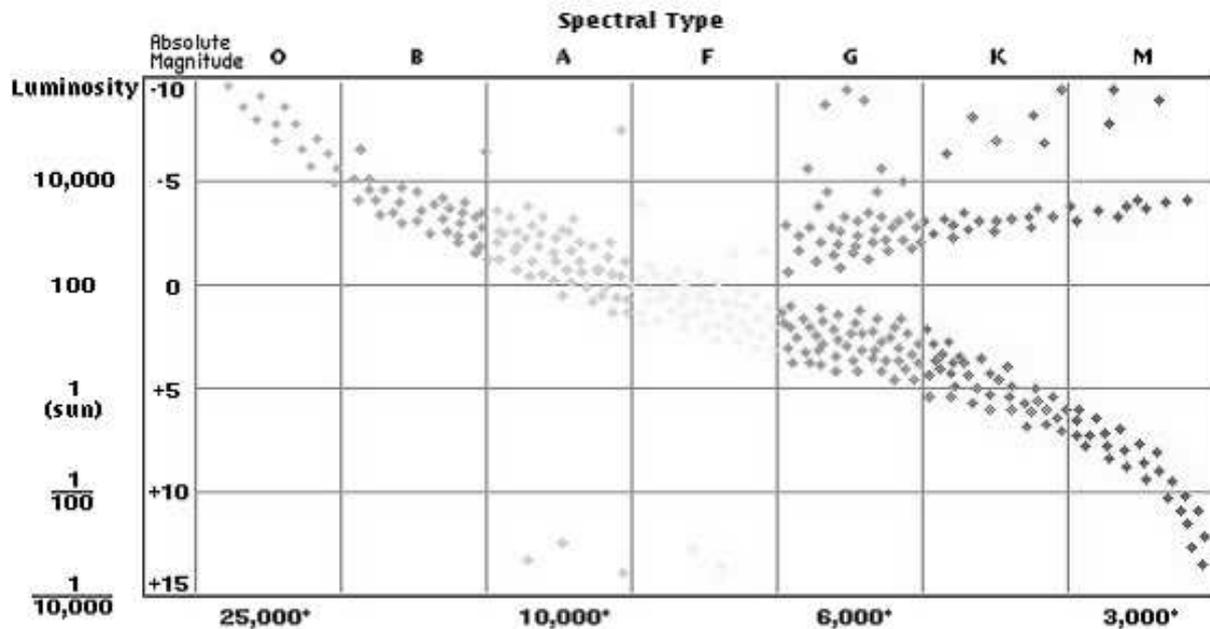
Le télescope spatial Hubble (HST, Hubble Space Telescope) de 12 t fut placé en orbite en 1990 pour réaliser une mission de 15 ans d'observations de sources de rayonnement optique.

Hubble et le fond de l'Univers.

2003 : Les données du satellite WMAP fixe l'âge de l'univers à 13,7 milliards d'années.

La classification des étoiles

Le diagramme de Hertzsprung-Russel



Les nouveaux objets

Les quasars et loi de Hubble

Sandage, Allan Rex (1926-), astronome américain, né à Iowa City, dans l'Iowa. Il fit ses études à l'université de l'Illinois et à l'Institut de technologie de Californie. En 1952, il devint astronome aux observatoires de Hale (aujourd'hui observatoire du mont Wilson et observatoire Palomar) en Californie. Avec le télescope de 5,08 m du mont Palomar, il fabriqua la première image spectrographique de sources radio quasi-stellaires, ou quasars. Il fut un pionnier de la radioastronomie.

Les quasars sont jusqu'à mille fois plus lumineux qu'une galaxie, mais aussi jusqu'à cent mille fois plus petits. Les plus proches sont à 2 milliards d'années-lumière et les plus lointains à 14 milliards. Ce serait donc les objets les plus éloignés dans l'espace et le temps jamais observés.

Les quasars jouent un rôle important dans les modèles de cosmologie.

Les pulsars

L'origine du terme « pulsar » provient de la contraction de deux mots anglo-saxons : pulsating (pulsante) et star (étoile). Le premier pulsar (PSR 1919 + 21) a été découvert par hasard en 1968 par une étudiante britannique Jocelyn Bell-Burnell et son directeur de thèse Anthony Hewish. Plus de 500 pulsars de notre Galaxie — la Voie lactée — sont désormais répertoriés. Ils sont principalement répartis dans les bras spiraux de la Galaxie.

Selon le modèle théorique en cours à la fin du XXe siècle, le pulsar est une étoile à neutrons en rotation rapide.

Les trous noirs

Le trou cosmique ultime formé lorsqu'une étoile supergéante très massive explose en supernova à la fin de sa vie. L'explosion crée un point superdense dans l'espace dont rien ne peut échapper à l'attraction gravitationnelle. Pour créer un trou noir, une étoile doit avoir une masse d'au moins 60 masses solaires, ce qui donnera un trou noir d'environ 3 masses solaires. Les trous noirs

peuvent être décelés par les effets qu'ils provoquent sur les étoiles environnantes. On pense que le centre de la plupart des galaxies, y compris la nôtre, abritent un trou noir supermassif qui a dû aspirer des milliers d'étoiles.

La matière noire

La matière noire est une matière invisible, n'émettant pas de rayonnement électromagnétique, mais dont l'existence dans l'Univers est suggérée par des éléments théoriques. On l'appelle également matière sombre.

Selon les théories en vigueur, l'Univers serait constitué à 5% d'une matière que nous connaissons et à 95% de matière noire. L'une des hypothèses les plus crédibles stipulait que cette matière noire était concentrée dans les naines brunes, corps semblables à des étoiles de petite taille, dont la luminosité est tellement faible qu'elle ne peut quasiment pas être perçue à partir de la Terre, même avec les instruments les plus perfectionnés.

Les exoplanètes

Véga, étoile de magnitude 1 de la constellation de la Lyre, la plus brillante de l'hémisphère Nord. Son éclat est teinté d'un reflet bleuté qui lui est propre. Véga se trouve à environ 26 années-lumière de la Terre. En 1983, des images du satellite astronomique infrarouge (Infrared Astronomy Satellite, IRAS) montrèrent que cette étoile est entourée d'un essaim de particules de taille indéterminée. Véga serait donc la première étoile, en dehors du Soleil, à posséder un système planétaire potentiel.

Tableaux synthétiques

Tableau synthétique des mesures de l'Univers

Date	Qui	Type d'objet	Méthode	Distance en années-lumière
			Parallaxe	500
			Céphéides	30 millions
			Supernova	7 milliards
			Quasar	12 milliards

Tableau synthétique des principales découvertes

<u>Qui</u>	<u>Découvertes</u>	<u>Quand</u>
Jean-Louis Leclerc, comte de Buffon	Histoire naturelle. Théorie de la Terre. Cosmogonie catastrophiste.	1749
Kant	Histoire générale de la nature et théorie du ciel. La théorie des « univers-îles »	1755
Lambert	Lettres cosmologiques. Les « univers-îles » habités.	1761
Laplace	Traité de mécanique céleste	1799-1825
Herschel	Télescope de 120 cm	1786
Michell	Première hypothèse des trous noirs	1784
Laplace	Reprise de l'hypothèse des trous noirs	1799

Conclusion

Si la première étape de cette révolution est en quelque sorte une « pan-théisation » (pan-divinisation), l'étape suivante va dé-diviniser le Ciel, en y faisant monter l'histoire et la corruption terrestre. C'est en quelque sorte une « a-théisation » (a-divinisation).

Ca n'est qu'à partir de ce moment là que l'homme a véritablement cessé d'être le centre de l'univers.

On peut se demander si les limites spatiales et temporelles ne nous ramènent pas à une problématique de distinction entre deux mondes.

4 : Bibliographie

Bibliographie

Littérature secondaire

Arkan Siman : L'image du monde, de Newton à Einstein (Paris : Vuibert-ADAPT/SNES, 2005). Principale source de ce cours, avec le livre de Timothy Ferris.

Timothy Ferris : Histoire du cosmos de l'antiquité au big bang (Paris : Pluriel-Hachette, 1992 - 1^{ère} édition en anglais en 1988). Principale source de ce cours, avec le livre de Arkan Siman et Joëlle Fontaine.

Arthur Koestler : Les somnambules (Paris : Calman Levy, 1980 - 1^{ère} édition en anglais en 1958)

Littérature primaire

Quelques sites internet

- Observatoire de Paris :
<http://www.obspm.fr/>
- Astrophysique sur mesure de l'Observatoire de Paris :
<http://media4.obspm.fr/index.html>
- Images récoltées par le satellite Hubble
<http://hubblesite.org/newscenter/archive/>
- Institut de mécanique céleste et de calcul des éphémérides
<http://www.imcce.fr/>
<http://www.imcce.fr/fr/ephemerides/phenomenes/passages/html/histoire.php>
- Cours d'astronomie en ligne :
<http://media4.obspm.fr/public/IUFM/>
- Cours de cosmologie en ligne :
<http://luth2.obspm.fr/~luminet/topo.html>
- Exposition de la BNF, pour l'iconographie
<http://expositions.bnf.fr/ciel/>
- Images de télescope

<http://amazing-space.stsci.edu/resources/explorations/groundup/teacher/grabbag.html>