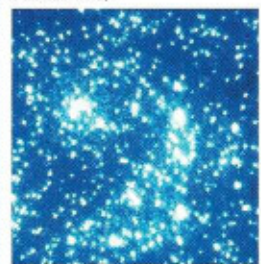




L'Univers

NOTRE MONDE ET BIEN AU-DELÀ

- Selon le sens commun, l'univers, représente tout ce qui existe.
- En astronomie, la définition de l'univers (qui s'écrit alors avec une majuscule) ou cosmos, se fonde sur l'observation (l'univers représente tout ce qui est observable, directement ou indirectement) et sur quelques principes fondamentaux (on considère notamment que les mêmes lois physiques s'appliquent partout dans l'univers).
- Dans ce cadre, l'univers englobe tout, c'est-à-dire aussi bien le vide interstellaire (entre les étoiles) que la matière dans son ensemble, quelle que soit la forme sous laquelle elle se présente, particules élémentaires, atomes ou corps complexes (gaz, poussières, matériaux, planètes, **étoiles**, nébuleuses...).



- On a longtemps cru l'univers immuable, infini et, surtout, vide (au-delà de la « voûte céleste »). Il a fallu attendre le ^{xx} siècle pour se rendre compte que la réalité était beaucoup plus complexe.
- Toutefois, même si notre connaissance de l'univers a beaucoup progressé depuis que l'on s'intéresse à l'infiniment grand, son étude, la cosmologie est encore une science jeune et très conjecturale. Les mystères de l'univers semblent même s'épaissir, car chaque réponse apportée soulève de nouvelles questions.

ÉTUDE DE L'UNIVERS

LES SCIENCES DE L'UNIVERS

Cosmologie : étude de l'univers (ou cosmos), de ses origines, de ses lois et propriétés, de sa structure et de son évolution.

Cosmographie : branche de la cosmologie qui tente de définir les lois régissant l'univers.

Astrométrie : discipline qui détermine la position et le mouvement des astres sur la sphère céleste.

Astrophysique : étude physique de l'espace ainsi que de la constitution, des propriétés et de l'évolution des différents objets célestes (planètes, étoiles, nébuleuses, etc.).

Radioastronomie : étude des corps célestes par l'analyse de leurs rayonnements électromagnétiques.

FORCES EN JEU DANS L'UNIVERS

- On part du postulat selon lequel les forces que l'on a définies sur Terre sont valables dans tout l'univers et dans toutes circonstances. Ces forces sont les suivantes :
 - Gravitation** : phénomène d'attraction mutuelle des corps. C'est la force la plus importante à l'échelle de l'univers. Elle assure la stabilité des systèmes solaires et la cohésion des galaxies.
 - Force électromagnétique** : cette force résulte de l'interaction entre charges électriques. Elle se manifeste lors des contacts, pressions et frottements entre les corps, sous la forme de champs magnétiques et d'ondes électromagnétiques (lumière, rayonnements infrarouge, ultraviolet, X et gamma).
 - Interaction nucléaire forte** : assure la cohésion de la matière à l'échelle des noyaux des atomes et des particules élémentaires, et leur permet de s'unir (à très faible distance, 10^{-10} m), malgré les forces électrostatiques de répulsion.
 - Interaction nucléaire faible** : s'exerce entre les particules élémentaires en fonction de leurs propriétés (« saveurs ») et se manifeste dans les réactions de fusion nucléaire au cœur des étoiles.

MODÈS DE CLASSEMENT DES CORPS CÉLESTES

Magnitude : éclat, luminosité d'un corps céleste. On distingue la magnitude absolue de la magnitude apparente. Cette dernière correspond à l'éclat tel qu'il nous parvient après avoir été altéré par la distance, l'atmosphère et les erreurs de mesure.

Type spectral : méthode permettant de classer les étoiles en fonction de leur couleur, donc de leur spectre électromagnétique. L'analyse spectrale des étoiles permet de les répartir en classes (O, B, A, F, G, K, M), ordonnées suivant leur température de surface. Chaque type est divisé en sous-catégories portant un numéro de 1 à 9 alors que la luminosité est graduée sur une échelle de I à VII. Ainsi, le type spectral de notre Soleil est G2V.

STRUCTURE DE L'UNIVERS

L'ESPACE-TEMPS

- Selon la théorie de la relativité générale énoncée par Einstein, l'univers est un espace-temps dans lequel les trois dimensions spatiales sont liées avec une quatrième dimension, le temps.
- C'est un espace courbe car déformé par la matière et l'énergie qu'il renferme (qu'on peut se représenter en imaginant une boule de pétanque posée sur une toile tendue). Au voisinage des objets de l'univers (étoiles par exemple), la

distance la plus courte entre deux points est ainsi représentée par une ligne courbe (et non par une ligne droite).

AMAS D'ÉTOILES ET DE GALAXIES

- L'univers présente une structure comparable à celle d'une éponge : les zones de matières s'agglomèrent à l'échelle cosmique en une structure filamenteuse plus ou moins dense évoluant dans le vide.
- Les nuages de gaz et les étoiles (éventuellement pourvus d'un système planétaire), sont regroupés en galaxie, puis en amas de galaxies, puis en amas d'amas ou « superamas ».



- Ainsi, à la manière des poupées russes, la matière est répartie en une succession de systèmes (galaxies, amas, superamas), imbriqués les uns dans les autres, regroupés par la force de gravitation.

ÉLÉMENTS COMPOSANT L'UNIVERS

Étoile : astre émettant de la lumière (alors que les planètes ne font que la refléter), formé d'une sphère de gaz dense et chaude, dont le cœur est le siège de réactions thermonucléaires.

Planète : corps céleste solide ou gazeux en orbite autour d'une étoile.

Constellation : groupement d'étoiles formant une figure sur la voûte céleste. Les étoiles d'une constellation semblent se situer sur un même plan mais peuvent être à des distances importantes les unes des autres voire dans des régions différentes de l'univers. Les constellations sont utiles pour se repérer dans le ciel.

Espace interstellaire : entre les différentes étoiles s'étend le vide interstellaire. Cet espace n'est pas réellement vide car parcouru de rayonnements, de particules. Il renferme des poussières et des molécules de gaz extrêmement

Les distances astronomiques

Unité astronomique (symbole : ua)

: distance moyenne de la Terre au Soleil, soit environ 150 millions de kilomètres.

Année-lumière (ou année de lumière, symbole : al) : distance parcourue par la lumière en une année. La vitesse de la lumière étant de 300 000 km/s, une année-lumière correspond à 10 000 milliards de km.

Parsec (symbole : pc) : distance équivalant à 3,26 années-lumière, soit à 30 000 milliards de kilomètres.

dispersées, qui forment la matière interstellaire.

Galaxie : vaste ensemble d'étoiles, de poussières et de gaz réunis par la force gravitationnelle. Elles sont de formes diverses : irrégulières, elliptiques ou en spirale. Elles se regroupent en amas : notre Galaxie ou **Voie lactée** fait partie d'un amas local qui comprend le Petit et le Grand Nuage de Magellan, ainsi que la galaxie d'Andromède et plusieurs galaxies naines.

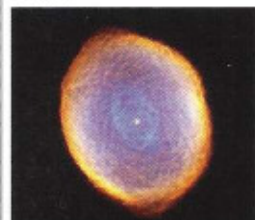


Amas : groupe de corps célestes de même nature (étoiles, galaxies, amas de galaxies) liés par gravitation.

Quasar : astre encore mal connu situé aux confins de l'univers.

Extrêmement lumineux, les quasars ne sont probablement pas des étoiles mais les noyaux très actifs de galaxies alimentés par des trous noirs.

Nébuleuse : nuage de très faible densité formé de poussières et de gaz interstellaires. Les **nébuleuses planétaires**, comme celle du Crabe, sont composées de nuages de gaz expulsés par une étoile en fin de vie. Elles peuvent émettre de la lumière, réfléchir celle qu'elles reçoivent ou l'occulter dans le cas des nébuleuses obscures.



L'Univers en chiffres

Âge estimé de l'Univers

15 milliards d'années

Nombre estimé de galaxies dans l'Univers

125 milliards

Nombre d'étoiles

2 000 milliards de milliards

Élément le plus commun

L'hydrogène représenterait 94 % des atomes présents dans l'Univers

Étoile la plus proche du Soleil

Proxima Centauri (constellation du Centaure) à 42 000 milliards de km (4,2 al)

Le Grand Nuage de Magellan



170 000 années-lumière

Deep Field



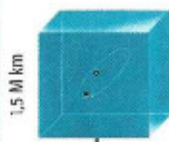
12 milliards d'années-lumière

La grande galaxie la plus proche

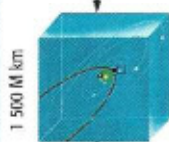
Les galaxies les plus éloignées

Structure et dimensions de l'Univers

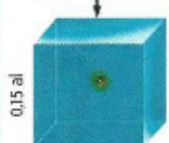
Dimensions de la Terre et du système solaire comparées à celles de l'univers : le premier cube a une arête de 1,5 millions de km, et chacun des cubes est 1 000 fois plus grand que le précédent.



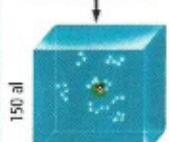
La planète Terre et son satellite, la Lune, qui se trouve à 380 000 km.



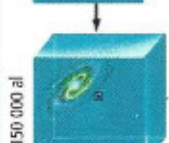
Le système solaire : les orbites des cinq planètes les plus proches du Soleil, soit à moins de 777 millions de km (l'orbite rouge est celle d'une comète qui se déplace bien au-delà du système solaire).



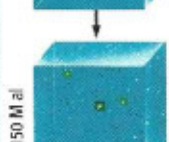
Les étoiles voisines les plus proches du Soleil se trouvent bien au-delà de ce cube, à plus de 4 années-lumière.



Dans un espace de 85 années-lumière autour du Soleil, il existe de nombreuses étoiles : on sait que des planètes gravitent autour de certaines d'entre elles.



Le Soleil se trouve à la périphérie de sa galaxie, la Voie lactée, dont le diamètre maximal est de 100 000 années-lumière.



Dans un espace de 100 millions d'années-lumière autour de la Voie lactée, il existe des milliers d'autres galaxies.

Amas stellaire : groupement d'étoiles formant des nuages très lumineux. Ils sont de deux sortes. Les amas globulaires, très denses, lointains et de forme sphérique, sont composés d'étoiles liées par la force de gravitation. Dans les amas ouverts, moins denses, les étoiles sont nées simultanément d'une même nébuleuse.

STADES DE L'ÉVOLUTION DES ÉTOILES

Géante rouge : stade d'une étoile – d'une masse de une à 10 fois celle du Soleil – en fin de vie (ce sera le cas du Soleil dans environ 5 milliards d'années). Très lumineuse mais de température et de densité faibles par rapport à une étoile jeune.

Nova : explosion d'une étoile géante accompagnée de l'éjection des couches externes conduisant à la création d'une naine blanche.

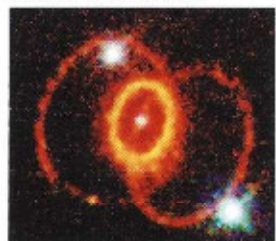
Naine blanche : corps très compact et de petites dimensions résultant de la contraction du noyau d'une étoile peu massive à la fin de son existence. Sa couleur blanche témoigne de sa haute température.

Naine noire : naine blanche refroidie. Stade final de la vie d'une étoile peu massive.

Supergéante : stade succédant à celui de géante rouge dans le cas des étoiles de masse supérieure à 10 fois celle du Soleil.

Céphéïde : supergéante instable. C'est une étoile à magnitude variable dont la distance est facilement mesurable.

Supernova : stade d'explosion des couches extérieures d'une étoile supergéante, qui devient extrêmement lumineuse. Ce stade mène à la naissance après implosion d'une étoile à neutrons ou d'un trou noir.



Étoile à neutrons : corps céleste de très grande densité formé par l'effondrement d'une étoile supergéante après son explosion en supernova.

Pulsar : étoile à neutrons tournant très rapidement sur elle-même en émettant un signal radio régulier.

Trou noir : stade final de l'évolution d'une étoile de masse au moins trois fois supérieure à celle du Soleil. Il est le résultat de l'effondrement du noyau en un corps extrêmement dense et générant une telle force de gravité que rien ne peut s'en échapper, pas même la lumière.

OBSERVATION DE L'UNIVERS

• L'observation de l'Univers a commencé à l'œil nu, puis les astronomes se sont dotés d'outils optiques (lunettes, télescopes) et mathématiques avec, entre autres, les lois de Kepler (1571-1630) et de Newton (1642-1727), sur les orbites des astres et la gravitation universelle. Au XX^e siècle, de nouvelles méthodes d'étude de l'espace sont apparues. L'électronique a élargi le champ des observations, tandis que l'astronautique

a permis d'envoyer des télescopes dans l'espace (**Hubble**), augmentant ainsi leurs performances. Parallèlement, l'énonciation des théories de la relativité d'Einstein (1879-1955) apportait une nouvelle façon de percevoir l'Univers.



MOYENS D'OBSERVATION

• **Télescopes** : ils permettent l'observation de phénomènes visibles. Les **observatoires** qui les renferment sont souvent placés à l'écart des villes et en altitude.



L'astronomie spatiale utilise des télescopes envoyés dans l'espace et échappant ainsi aux perturbations de l'atmosphère.

• **Radiotélescopes** : ils

permettent l'observation de phénomènes dont les rayonnements électromagnétiques sont non lumineux.

• **Mise en pratique de l'effet Doppler-Fizeau** : la fréquence d'un signal électromagnétique varie en fonction du mouvement de sa source par rapport à un observateur. La longueur d'onde de ce signal semble plus courte si l'objet se rapproche (la fréquence augmente : l'onde est « compressée ») et plus longue s'il s'éloigne (la fréquence diminue). Ainsi, lorsqu'un corps lumineux s'approche, la fréquence de son signal augmente et sa lumière se décale vers le violet du spectre. Lorsqu'il s'éloigne, la fréquence s'allonge et sa lumière se décale vers le rouge.

MESURE DES DISTANCES

• Dans un rayon de 300 années-lumière, on mesure la distance d'un objet grâce à son parallaxe annuel. Il est déterminé en observant son déplacement apparent dans le ciel sur une année.

• Entre 300 et 500 années-lumière, on utilise comme référentiel les céphéïdes, étoiles dont la luminosité varie régulièrement et dont il est facile de calculer la distance.

• Au-delà de 500 années-lumière, on utilise l'analyse du spectre électromagnétique. Le décalage vers le rouge est proportionnel à la distance de l'astre.

LES DIFFÉRENTS RAYONNEMENTS

Rayonnement visible

Applications : photométrie et spectroscopie (composition et évolution de la matière), astronomie optique, télescopes au sol ou dans l'espace (**Hubble**).

Rayonnement radio

Sources : pulsars, quasars. Applications : radioastronomie, morphologie du milieu interstellaire.

Rayonnement infrarouge

Sources : poussières et nuages, étoiles de petite masse, planètes géantes.

Applications : température des étoiles les plus froides (naines et géantes), analyse de molécules dans l'espace.

Rayonnement ultraviolet

Sources : étoiles chaudes et supernovae.

Applications : étude de la composition chimique du milieu stellaire.

Rayonnement X

Sources : restes de supernovae, enveloppes de possibles trous noirs

Applications : observation de transferts de masse entre étoiles.

Rayonnement gamma

Sources : supernovae, novae, pulsars.

Applications : recherche de trous noirs.

DÉTECTION DES PLANÈTES EXTRA SOLAIRES

• Une planète exerce une action gravitationnelle sur son étoile et peut être détectée en mesurant les perturbations qu'elle fait subir au mouvement de celle-ci.

• Une planète occulte une partie du rayonnement de son étoile en s'interposant dans sa rotation entre elle et l'observateur. Elle peut être détectée en mesurant les variations de luminosité de son étoile.

CONSÉQUENCES

DE L'ÉLOIGNEMENT DES ÉTOILES

• Du fait de la vitesse limitée de la lumière, les objets lointains que nous observons ont évolué depuis l'époque à laquelle ils ont émis le signal que nous recevons.

• Regarder des corps très éloignés revient donc à regarder dans le passé (ainsi, une étoile située à 100 années-lumière nous apparaît telle qu'elle était il y a un siècle).

• Théoriquement, en regardant suffisamment loin, on pourrait être témoin des premiers âges de l'Univers.

HISTOIRE DE L'UNIVERS

• La théorie de la relativité générale ne plaide pas en faveur d'un Univers statique. En effet, les équations d'Einstein permettent de décrire l'Univers comme un espace en expansion.

• Par ailleurs, l'observation indique que les galaxies s'éloignent toutes les unes des autres (décalage de leur spectre électromagnétique vers le rouge). Plus elles sont éloignées, plus elles s'éloignent rapidement (plus leur spectre se décale vers le rouge).

• En fait, ce ne sont pas les galaxies qui s'éloignent mais l'espace qui les sépare, qui se dilate à l'image d'un ballon que l'on gonfle et à la surface duquel les galaxies seraient disposées.

• Cela suggère qu'à une époque reculée, la matière devait être condensée en un même point. Le début de ce mouvement d'expansion serait



marqué par une explosion primordiale, le Big Bang, ayant donné naissance à l'Univers, il y a 15 milliards d'années.

BIG BANG ET RAYONNEMENT FOSSILE

• Le Big Bang porte en son nom même la preuve qu'il ne fait pas l'unanimité puisqu'il a été nommé ainsi par dérision, par l'un de ses détracteurs. Les arguments en faveur du Big Bang apparaissent toutefois plus solides que les arguments opposés.

• L'un des meilleurs repose sur la découverte d'un « rayonnement fossile », qui n'a pu être émis que dans les conditions d'équilibre thermodynamique parfait qui existaient lors de la phase dense et chaude, peu après le Big Bang, aux premiers temps de l'histoire de l'Univers. Ce rayonnement, dont le spectre se situe dans les micro-ondes, est homogène et présent dans toutes les directions de l'Univers.

SCÉNARIO DU BIG BANG

• En donnant naissance à l'Univers, le Big Bang aurait engendré à la fois la matière, l'espace et le temps. On peut donc considérer qu'il n'y avait pas d'« avant le Big Bang » puisque le temps serait né de lui.

• L'étude du comportement des particules dans un accélérateur recrée les conditions régnant aux premiers instants de l'Univers a permis d'avancer un scénario. Les connaissances actuelles permettent d'envisager le déroulement suivant :

• 10⁻⁴² seconde après le Big Bang : la matière de l'Univers est contenue dans une sphère d'un centième de millimètre de rayon dans laquelle règne une densité de 10³¹ kg/cm³ et une température de 10³² degrés.

• Une seconde plus tard : l'Univers s'est dilaté de façon brutale et d'un facteur de 10¹⁰. Dans la « soupe » primordiale formée de particules énergétiques, des réactions complexes se produisent jusqu'à ce que la baisse de température les interrompe et permette la création des protons, électrons et neutrons. La densité tombe à 10 kg/cm³ et la température à 10 milliards de degrés.

• Après les 3 premières minutes : la matière s'assemble et forme les noyaux atomiques des premiers éléments (du tableau de classification des éléments), les plus légers : hydrogène, hélium, lithium. L'Univers continue de se dilater et de se refroidir.

• Après 300 000 ans : l'Univers est moins dense et devient transparent aux photons (lumière). Formation des premiers atomes (noyaux et électrons). La température est de l'ordre de 3 000 K.

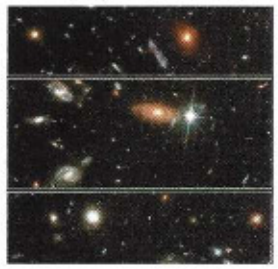
• Entre 1 et 3 milliards d'années : formation des galaxies et des quasars. L'Univers poursuit sa dilatation et son refroidissement.

• 10 milliards d'années : formation de notre système solaire.

LES RÉVÉLATIONS

DU « DEEP FIELD » D'HUBBLE

• Le télescope spatial Hubble a fourni l'image d'une portion lointaine de l'Univers (**Deep Field**).



distante de 12 milliards d'années-lumière) dans laquelle on observe un très grand nombre de galaxies, très proches les unes des autres et donc fortement soumises aux forces gravitationnelles.

• Compte tenu du temps mis par les rayonnements issus de ces galaxies pour parvenir jusqu'au télescope, une telle image montre l'état de l'Univers il y a 12 milliards d'années, à « seulement » 3 milliards d'années de sa naissance explosive.

ÉVOLUTION DE L'UNIVERS

• Déclarer que l'Univers a un commencement, c'est suggérer qu'il aura peut-être aussi une fin. L'Univers est actuellement dans une phase d'expansion, son avenir est fonction de la quantité de matière qui le compose et qui nous est inconnue puisque l'on pressent l'existence d'une « matière noire » qui pourrait considérablement influencer sur la masse totale de l'Univers.

• Trois scénarios sont ainsi envisagés, chacun dictant le caractère fini ou infini de l'Univers :

Univers ouvert et infini : la vitesse d'expansion est suffisante pour libérer l'Univers de la force de gravité. L'expansion se poursuivrait et les galaxies continueraient à s'éloigner les unes des autres jusqu'à ce que le carburant des étoiles soit épuisé. L'Univers deviendrait un cimetière glacial de naines blanches et d'étoiles à neutrons.

Univers plat et infini : la vitesse d'expansion finira par être compensée par la force de gravité. L'expansion se poursuivra en ralentissant, pour peut-être aboutir à une situation d'équilibre.

Univers fermé et fini : la gravité exercée par les corps les uns sur les autres finira par avoir raison de la force de dispersion. L'Univers rentrera alors dans une phase de contraction, le Big Crunch. Pour peu que cette contraction soit brutale, l'Univers pourrait entrer dans une nouvelle phase d'expansion. Il alternerait ainsi phases d'expansion et phases de contraction.

AU-DELÀ DE L'UNIVERS ?

La cosmologie quantique ouvre de nouvelles perspectives dans l'étude et la conception de l'Univers. Elle ne permet en effet de calculer les événements qu'en termes de probabilités et donc de « possibles » et ouvre la porte à l'existence d'univers multiples (univers parallèles) coexistants mais sans interaction entre eux. Notre Univers serait alors un monde isolé au milieu d'autres.

La matière noire

La matière recensée avec les moyens d'observation actuels est insuffisante pour expliquer la rotation des galaxies ainsi que leur mouvement au sein des amas de galaxies. Les calculs ont montré que ces mouvements seraient conformes aux lois de la gravité si l'Univers était dix fois plus massif que ce que l'on estime. Cette masse manquante serait constituée de « matière noire » : on parle aussi de « matière sombre » ou encore de « masse cachée », dont la nature demeure très conjecturale (naines brunes, grosses planètes, « cordes cosmiques », particules élémentaires inconnues...).