

# astronomie 2

l'univers

# Contenus

## Articles

Astronomie	1
Big Bang	14
Galaxie	32
Évolution stellaire	45
Amas globulaire	50
Étoile à neutrons	53
Quasar	63
Expansion de l'Univers	68
Trou noir	72
Fond diffus cosmologique	91
Astrophysique	97
Univers	101
Destin de l'Univers	106
Âge de l'univers	108
Énergie sombre	109
Matière noire	114
Accélération de l'expansion de l'Univers	123

## Références

Sources et contributeurs de l'article	124
Source des images, licences et contributeurs	126

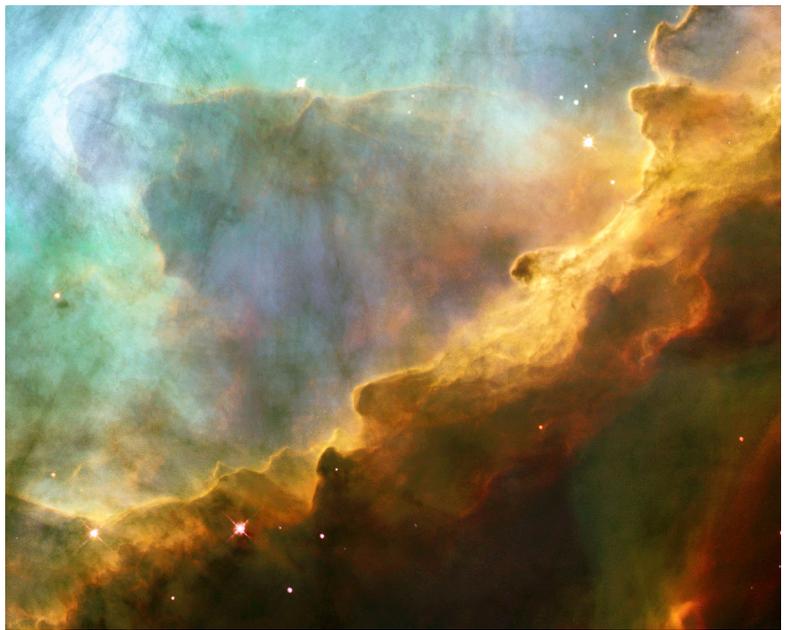
## Licence des articles

Licence	128
---------	-----

# Astronomie

L'**astronomie** (Grec ancien *ἀστρονομία* [astronomia], « la loi des astres ») est la science de l'observation des astres, cherchant à expliquer leur origine, leur évolution, ainsi que leurs propriétés physiques et chimiques. Avec plus de 7 000 ans d'Histoire, les origines de l'astronomie remontent au-delà de l'Antiquité dans les pratiques religieuses préhistoriques.

L'astronomie est l'une des rares sciences où les amateurs jouent encore un rôle actif. Elle est pratiquée à titre de loisir par un large public d'astronomes amateurs.



Nébuluse M17 : photographie prise par le télescope Hubble.

## Historique

Article détaillé : Histoire de l'astronomie.

L'astronomie est considérée comme la plus ancienne des sciences<sup>[1]</sup>. L'archéologie révèle en effet que certaines civilisations disparues de l'Âge du bronze, et peut-être du Néolithique, avaient déjà des connaissances en astronomie. Elles avaient compris le caractère périodique des équinoxes et sans doute leur relation avec le cycle des saisons, elles savaient également reconnaître certaines constellations. L'astronomie moderne doit son développement à celui des mathématiques depuis l'antiquité grecque et à l'invention d'instruments d'observation à la fin du Moyen Âge. Si l'astronomie s'est pratiquée pendant plusieurs siècles parallèlement à l'astrologie, le siècle des Lumières et la redécouverte de la pensée grecque a vu naître la distinction entre la raison et la foi, si bien que l'astrologie n'est plus pratiquée par les astronomes.



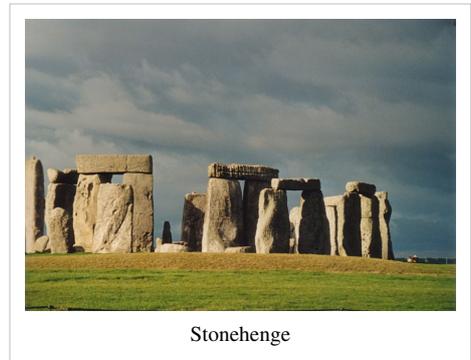
Sur tous les continents et depuis la haute antiquité, l'observation du ciel a une grande importance (Codex Duran).

## Antiquité

À ses débuts, l'astronomie consiste *simplement* en l'observation et en la prédiction du mouvement des objets célestes visibles à l'œil nu. Néanmoins nous devons à ces différentes civilisations de nombreux apports et découvertes :

### Dans la Haute Antiquité

- Préalables :
  - Inutile de préciser que toutes les observations se faisaient à l'œil nu puisque les anciens étaient aidés dans cette tâche par l'absence de pollution industrielle et surtout lumineuse. C'est pour cette raison que la plupart des observations à l'*antique* seraient impossibles aujourd'hui. Les dessins de la Grotte de Lascaux sont en étude, on a pensé que les dessins servaient d'emplacements de constellations.
  - Il ne faut pas s'y tromper, ces observations, parfois relativement simples en apparence (simple dessin de quatre ou cinq astres), supposent déjà une haute avancée dans la civilisation, à savoir l'existence d'un ensemble regroupant au minimum : une écriture ou tout au moins de son ébauche, (une proto-écriture regroupant conjointement un ensemble de signes représentant les principaux objets et événements) et un « système » comprenant une cosmogonie, une cosmologie, une carte du ciel connu sans oublier un calendrier (parfois très développé) et un observatoire, celui-ci souvent rudimentaire. Sans ces préalables, il ne saurait exister d'observation astronomique enregistrable.
  - Durant des millénaires, l'astronomie fut couramment associée à l'astrologie, qui en était d'ailleurs souvent le *primum movens*. Le divorce n'interviendra qu'au siècle des Lumières pour se perpétuer de nos jours.
- Les systèmes les mieux connus sinon les plus développés sont :
  - au Néolithique : tous les grands cercles mégalithiques sont en fait des observatoires astronomiques, citons les plus connus : Nabta Playa vieux de 6 000 à 6 500 ans et Stonehenge (Wiltshire, Angleterre) 1 000 ans plus tard. Flammarion, qui le comprit l'un des premiers, parlera au sujet des cercles mégalithiques de « monuments à vocation astronomique » et d'« observatoires de pierre ».
- aux débuts de l'Histoire :
  - dans l'ancien monde :
    - l'astronomie indienne et chinoise : ainsi, le Rig-Veda mentionne 27 constellations associées au mouvement du Soleil ainsi que les 13 divisions zodiacales du ciel.
    - l'astronomie sumérienne, et ses dérivées les astronomies chaldéenne, mésopotamienne, égyptienne et hébraïque. Si bien que la Bible contient un certain nombre d'énoncés au sujet de la position de la Terre dans l'Univers et sur la nature des étoiles et des planètes.
  - dans le nouveau monde, les astronomies amérindiennes sont aussi déjà très développées notamment la Toltèque, la Zapotèque (assez proche) et la Maya tout à fait originale. Ainsi, sans aucun instrument optique, l'astronomie Maya avait réussi à décrire avec précision les phases et éclipses de Vénus !



Stonehenge

En Mésopotamie, l'astronomie voit apparaître ses premiers fondements mathématiques. Le repérage des trajets des astres errants se fait d'abord sur 3 voies parallèles à l'équateur. Puis, après les premières observations systématiques de la fin du 2<sup>e</sup> millénaire (~ -1200), les trajets du Soleil et de la Lune sont mieux connus. Vers le 8<sup>e</sup> siècle av. JC apparaît la notion d'écliptique et plus tard encore une première forme de zodiaque à 12 parties égales (dans le temps, pas encore dans l'espace). Vers le milieu du 1<sup>er</sup> millénaire on voit ainsi cohabiter un repérage en 12 signes très pratiques pour les calculs de position des astres, et un repérage en constellations utilisé pour les interprétations de la divination astrale. On détermine seulement vers ce moment-là les périodes des cycles des planètes, apparaît aussi le découpage en 360° de l'écliptique. L'astronomie mésopotamienne est différenciée en général de l'astronomie

grecque par son caractère arithmétique : contrairement à l'astronomie grecque, l'astronomie mésopotamienne est empirique. On ne cherche pas les causes des mouvements, on ne crée donc pas de modèles pour en rendre compte, les phénomènes ne sont pas perçus comme des apparences résultant d'un cosmos représentable géométriquement. Les astronomes mésopotamiens ont cependant le grand mérite d'avoir consigné soigneusement de nombreuses observations dès le VIII<sup>e</sup> siècle au moins. Ces observations seront très utiles aux astronomes grecs.

### Dans l'Antiquité classique et tardive

Article détaillé : Astronomie grecque.

Les anciens Grecs, avec, entre autres, Ératosthène, Eudoxe de Cnide, Apollonius, et surtout Hipparque et Ptolémée, élaborent progressivement une théorie géocentrique très élaborée. Aristarque de Samos pose quant à lui les bases d'une théorie héliocentrique. En ce qui concerne le Système solaire, grâce à la théorie des épicycles et à l'élaboration de tables fondées sur cette théorie, il fut possible, dès l'époque alexandrine, de calculer de manière assez précise les mouvements des astres, y compris les éclipses lunaires et solaires.

Concernant l'astronomie stellaire, ils apportent d'importantes contributions, notamment la définition du système de magnitude. Ainsi, l'*Almageste* de Ptolémée (90 - 168) contient déjà une liste de quarante-huit constellations et 1 022 étoiles.

### Moyen Âge

À cette époque, l'astronomie ne peut être étudiée sans l'apport d'autres sciences qui lui sont complémentaires et nécessaires : les mathématiques (géométrie, trigonométrie), ainsi que la philosophie. Elle sert au calcul du temps.

Sur les sciences et l'éducation en général au Moyen Âge :

Articles détaillés : Science du Moyen Âge, Éducation médiévale et Sciences et techniques islamiques.

### Haut Moyen Âge

- L'astronomie indienne aurait culminé vers 500, avec l'*Āryabhaṭīya*, qui présente un système mathématique quasi-copernicien, dans lequel la Terre tourne sur son axe. Ce modèle considère le mouvement des planètes par rapport au Soleil.
- Pour naviguer sur mer mais aussi dans le désert, les civilisations arabes avaient besoin de données très précises. Dérivée des astronomies indienne et grecque, l'astronomie arabe culminera vers le 10<sup>e</sup> siècle.

Il faut signaler le rôle de Boèce comme fondateur dès le VI<sup>e</sup> siècle du quadrivium, qui inclut l'arithmétique, la géométrie, la musique et l'astronomie.

Après les invasions barbares, l'astronomie se développe relativement peu en Occident.

Elle est par contre florissante dans le monde musulman à partir du IX<sup>e</sup> siècle :

- l'astronome persan al-Farghani (805–880) écrit beaucoup sur le mouvement des corps célestes ; Il effectue une série d'observations qui lui permettent de calculer l'obliquité de l'écliptique ;
- Al-Kindi (801–873), philosophe et scientifique encyclopédique, écrit 16 ouvrages d'astronomie ;
- Al-Battani (855–923), astronome et mathématicien ;
- Al-Hasib Al Misri (850–930), mathématicien égyptien ;
- Al-Razi (864–930), scientifique persan ;
- Al-Farabi (872–950) grand philosophe et scientifique.

À la fin du X<sup>e</sup> siècle, un grand observatoire est construit près de Téhéran par l'astronome al-Khujandi.

La philosophie (Platon et Aristote) fait partie intégrante, avec l'ensemble des autres sciences (médecine, géographie, mécanique, etc.) de ce grand mouvement de renaissance appelé *âge d'or de la civilisation arabo-musulmane*.

Article détaillé : Civilisation islamique.

voir aussi L'âge d'or des sciences arabes <sup>[2]</sup>.

Saint Bède le Vénérable au VIII<sup>e</sup> siècle développa en Occident les arts libéraux (trivium et quadrivium). Il établit les règles du comput pour le calcul des fêtes mobiles, et pour le calcul du temps, qui nécessitaient des éléments d'astronomie.

D'autres éléments furent introduits en Occident par l'intermédiaire de Gerbert d'Aurillac (Sylvestre II) un peu avant l'an mille, avec la philosophie d'Aristote. Il est difficile de savoir exactement quels astronomes musulmans étaient connus de Gerbert d'Aurillac. Gerbert est important pour la compréhension du développement historique de l'ensemble du savoir occidental, qui incluait la philosophie.

### Bas Moyen Âge

L'œuvre d'Al-Farghani est traduite en latin au XII<sup>e</sup> siècle, en même temps que bien d'autres traités arabes et que la philosophie d'Aristote.

Article détaillé : Moyen Âge.

Dans le monde musulman, on peut citer :

- en Perse, Omar Khayyam (1048–1131), qui compile une série de tables astronomiques et réforme le calendrier ;
- Ibn al-Haytham (965–1039), mathématicien et physicien arabo-islamique ;
- Al-Biruni, (973–1048), mathématicien, astronome, encyclopédiste, etc. ;
- Nasir ad-Din at-Tusi (1201–1274), philosophe, mathématicien, astronome et théologien (considéré comme l'un des fondateurs de la trigonométrie) ;
- Al-Kashi (1380–1429), en Iran et Ouzbékistan actuels.

On peut encore citer Al-Maghribi, Al-Sufi.

### Époque moderne

Pendant la Renaissance, Copernic propose un modèle héliocentrique du Système solaire ayant de nombreux points communs avec la thèse de Nasir ad-Din at-Tusi, avec le *De revolutionibus* publié en 1543 après sa mort.

Près d'un siècle plus tard, cette idée est défendue, étendue et corrigée par Galilée et Kepler. Galilée imagine une lunette astronomique, en s'inspirant des travaux du hollandais Hans Lippershey (dont la lunette ne grossissait que trois fois et déformait les objets), pour améliorer ses observations. S'appuyant sur des relevés d'observation très précis faits par le grand astronome Tycho Brahe, Kepler est le premier à imaginer un système de lois régissant les détails du mouvement des planètes autour du Soleil, mais n'est pas capable de formuler une théorie allant au-delà de la simple description présentée dans ses lois.

C'est Isaac Newton qui, en décrivant la gravitation par ses lois du mouvement permet finalement de donner une explication théorique au mouvement des planètes. Il invente aussi le télescope réflecteur, qui améliore les observations.

Le passage du modèle géocentrique de Ptolémée au modèle héliocentrique avec Copernic / Galilée / Newton est décrit par le philosophe des sciences Thomas Samuel Kuhn comme une révolution scientifique<sup>[3]</sup>.



Dessin d'un astronome chinois en 1675.

## Époque contemporaine

On découvre que les étoiles sont des objets très lointains : l'étoile la plus proche du Système solaire, Proxima du Centaure, est à plus de quatre années-lumière.

Avec l'introduction de la spectroscopie, on montre qu'elles sont similaires au soleil, mais dans une grande gamme de température, de masse et de taille. L'existence de notre Galaxie, en tant qu'ensemble distinct d'étoiles, n'est prouvée qu'au début du XX<sup>e</sup> siècle du fait de l'existence d'autres galaxies.

Peu après, on découvre l'expansion de l'univers, conséquence de la loi de Hubble, établissant une relation entre la vitesse d'éloignement des autres galaxies par rapport au Système solaire et leur distance.

La cosmologie fait de grands progrès durant le XX<sup>e</sup> siècle, notamment avec la théorie du Big Bang, largement supportée par l'astronomie et la physique, comme le rayonnement thermique cosmologique (ou rayonnement fossile), et les différentes théories de nucléosynthèse expliquant l'abondance des éléments chimiques et de leurs isotopes.

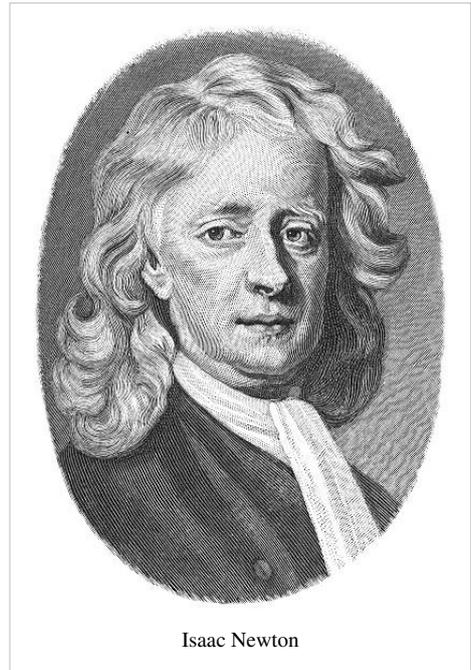
Dans les dernières décennies du XX<sup>e</sup> siècle, l'apparition des radiotélescopes, de la radioastronomie, et des moyens de traitement informatique, autorise de nouveaux types d'expérimentations sur les corps célestes éloignés, par analyse spectroscopique des raies d'émission émises par les atomes et leurs différents isotopes lors des sauts quantiques, et transmis à travers l'espace par les ondes électromagnétiques.

L'UNESCO décrète 2009 comme étant l'Année mondiale de l'astronomie.

## Disciplines de l'astronomie

À son début, durant l'Antiquité, l'astronomie consiste principalement en l'astrométrie, c'est-à-dire la mesure de la position dans le ciel des étoiles et des planètes. Plus tard, des travaux de Kepler et de Newton naît la mécanique céleste qui permet la prévision mathématique des mouvements des corps célestes sous l'action de la gravitation, en particulier les objets du Système solaire. La plus grande partie du travail dans ces deux disciplines (l'astrométrie et la mécanique céleste), auparavant effectué à la main, est maintenant fortement automatisée grâce aux ordinateurs et aux capteurs CCD, au point que maintenant elles sont rarement considérées comme des disciplines distinctes. Dorénavant, le mouvement et la position des objets peuvent être rapidement connus, si bien que l'astronomie moderne est beaucoup plus concernée par l'observation et la compréhension de la nature physique des objets célestes.

Depuis le XX<sup>e</sup> siècle, l'astronomie professionnelle a tendance à se séparer en deux disciplines : astronomie d'observation et astrophysique théorique. Bien que la plupart des astronomes utilisent les deux dans leurs recherches, du fait des différents talents nécessaires, les astronomes professionnels tendent à se spécialiser dans l'un ou l'autre de ces domaines. L'astronomie d'observation est concernée principalement par l'acquisition de données, ce qui inclut la construction et la maintenance des instruments et le traitement des résultats. L'astrophysique théorique est principalement concernée par la recherche des implications observationnelles de différents modèles, c'est-à-dire qu'elle cherche à comprendre et à prédire les phénomènes observés.



Isaac Newton



Observations astronomiques et gravimétriques faites sur l'île de Cayenne en Guyane française) par l'astronome français Jean Richer, d'après une gravure de Sébastien Leclerc.

L'astrophysique est la branche de l'astronomie qui détermine les phénomènes physiques déduits par l'observation des astres. Actuellement, les astronomes ont tous une formation poussée en astrophysique et leurs observations sont presque toujours étudiées dans un contexte astrophysique. En revanche il existe un certain nombre de chercheurs et chercheuses qui étudient exclusivement l'astrophysique. Le travail des astrophysiciens est d'analyser des données d'observations astronomiques et d'en déduire des phénomènes physiques.

Les domaines d'études de l'astronomie sont aussi classés en deux autres catégories :

- Par sujet, généralement selon la région de l'espace (par exemple, l'astronomie galactique) ou le type de problème traité (formation des étoiles, cosmologie)
- Par le mode d'observation, selon le type de particules détectées (lumière, neutrino) ou la longueur d'onde (radio, lumière visible, infrarouge).

## Disciplines par sujet

### Astronomie solaire

Article détaillé : Soleil.

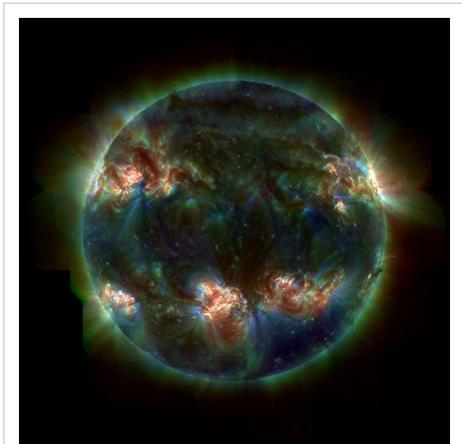
L'étoile la plus étudiée est le Soleil, une petite étoile typique de la séquence principale de type spectral G2V et vieille d'environ 4,6 milliards d'années. Le Soleil n'est pas considéré comme une étoile variable, mais il subit des changements périodiques de son activité, ce qui peut être vu grâce aux taches solaires. Ce cycle de fluctuation du nombre de taches dure 11 ans. Les taches solaires sont des régions plus froides que la normale qui sont associées à une activité magnétique intense.

La luminosité du Soleil a régulièrement augmenté au cours de sa vie. Aujourd'hui, il est en effet 40 % plus brillant qu'au moment où il est devenu une étoile de la séquence principale. Le Soleil a également subi des changements périodiques de luminosité ayant eu un impact significatif sur la Terre. Par exemple, on soupçonne le minimum de Maunder d'être la cause du petit âge glaciaire survenu durant le Moyen Âge.

Au centre du Soleil se trouve le cœur. Une zone où la température et la pression sont suffisantes pour permettre la fusion nucléaire. Au-dessus du noyau se trouve la zone de radiations, où le plasma transporte les flux d'énergie au moyen de radiations. La couche recouvrant la zone de radiations forme la zone de convection où l'énergie est conduite vers la photosphère grâce à la convection, autrement dit, les déplacements physiques du gaz. On croit que cette zone de convection est à l'origine de l'activité magnétique qui génère les taches.

La surface extérieure du Soleil est appelée la photosphère. Juste au-dessus de cette couche se trouve une mince région appelée la chromosphère. Ensuite, nous avons la couronne solaire.

Le vent solaire, un flux de plasma constitué essentiellement de particules chargées, « souffle » constamment à partir du Soleil jusqu'à l'héliopause. Le vent solaire interagit avec la magnétosphère terrestre de la Terre pour créer les ceintures de Van Allen. Les aurores polaires sont également une conséquence de ce vent solaire.



Une image de la photosphère du Soleil en ultraviolets prise par le télescope TRACE.

## Planétologie

Article détaillé : Planétologie.

Ce domaine de l'astronomie s'intéresse à l'ensemble des planètes, des lunes, des planètes naines, des comètes, des astéroïdes, et des autres corps orbitant autour du soleil ; ainsi qu'aux exoplanètes. Le Système solaire a été relativement bien étudié, d'abord à l'aide de télescopes puis aux moyens de sondes. Cela a fourni une bonne compréhension globale de la formation et de l'évolution de ce système planétaire, bien qu'un grand nombre de découvertes soient encore à accomplir.

Le Système solaire est subdivisé en cinq parties : le Soleil, les planètes internes, la ceinture d'astéroïdes, les planètes externes et le nuage d'Oort. Les planètes internes sont toutes telluriques, il s'agit de Mercure, Vénus, la Terre, et Mars. Les planètes externes, des géantes gazeuses, sont Jupiter, Saturne, Uranus et Neptune. Derrière Neptune se trouve la ceinture de Kuiper, et finalement, le nuage d'Oort, qui s'étend probablement sur une année-lumière.

Les planètes ont été formées par un disque protoplanétaire qui entourait le Soleil lorsqu'il venait de se former. Grâce à un processus combinant attraction gravitationnelle, collision, et accrétion, le disque forma des amalgames de matières qui allaient devenir, avec le temps, des protoplanètes. À ce moment-là, la pression de radiation du vent solaire a expulsé la majorité de la matière qui ne s'était pas assemblée, et seules les planètes munies d'une masse suffisante purent retenir leur atmosphère gazeuse. Les planètes ont continué d'éjecter la matière restante durant une période d'intense bombardement météoritique, comme en témoigne les nombreux cratères trouvés, entre autres, sur la Lune. Durant cette période, quelques protoplanètes ont pu entrer en collision, et selon l'hypothèse majeure, c'est ainsi que la Lune fut formée.

Une fois qu'une planète atteint une masse suffisante, les matériaux de différentes densités commencent à se séparer entre eux, c'est la différenciation planétaire. Ce processus peut former un noyau rocheux ou métallique, entouré par un manteau et une croûte. Le cœur peut inclure des régions solides et liquides, et dans certains cas, il peut générer son propre champ magnétique, qui protège la planète et son atmosphère des attaques du vent solaire.

## Astronomie stellaire

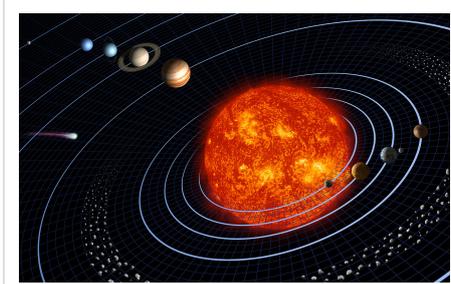
Article détaillé : Étoile.

L'étude des étoiles et de l'évolution stellaire est fondamentale pour notre compréhension de l'univers. L'astrophysique des étoiles a été déterminée grâce à l'observation et à la compréhension théorique ainsi que par des simulations informatiques.

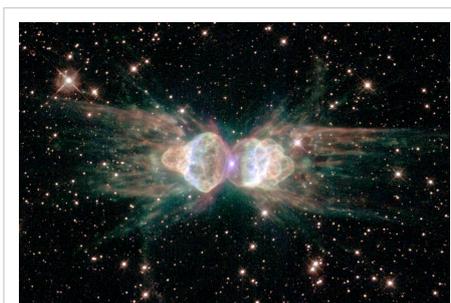
Une étoile se forme dans des régions denses de poussières et de gaz, connues sous le nom de nuages moléculaires géants. Lorsqu'ils sont déstabilisés, les fragments peuvent s'effondrer sous l'influence de la gravité pour former une protoétoile. Une région suffisamment dense et chaude provoquera une fusion nucléaire, créant ainsi une étoile de la séquence principale.

Presque tous les éléments plus lourds que l'hydrogène et l'hélium ont été créés dans le noyau des étoiles.

Les caractéristiques de l'étoile résultant dépendent d'abord de sa masse de départ. Plus l'étoile est massive, plus sa luminosité est importante et plus elle videra le stock d'hydrogène présent dans son noyau rapidement. Au fil du temps, cette réserve est entièrement convertie en hélium, et l'étoile commence alors à évoluer. La fusion de l'hélium



Représentation du Système solaire (échelles non respectées)



La nébuleuse planétaire de la Fourmi. Les éjections de gaz de l'étoile centrale mourante montrent des lobes symétriques, à l'inverse des figures chaotiques des explosions ordinaires.

requiert une plus grande température dans le noyau, de cette façon, l'étoile s'agrandit et son noyau se densifie en même temps. Devenue une géante rouge, notre étoile consume alors son hélium. Cette phase est relativement courte. Les étoiles très massives peuvent aussi subir une série de phases rétrécissantes, où la fusion se poursuit en éléments de plus en plus lourds.

Le destin final de l'étoile dépend de sa masse: les étoiles qui sont plus de 8 fois plus massives que le soleil peuvent s'effondrer en supernova; alors que les étoiles plus légères forment des nébuleuses planétaires et évoluent en naines blanches. Ce qui reste d'une très grosse étoile est une étoile à neutrons, ou dans certains cas un trou noir. Les étoiles binaires proches peuvent suivre des chemins plus complexes dans leur évolution, comme un transfert de masses sur le compagnon d'une naine blanche pouvant causer une supernova. Les nébuleuses planétaires et les supernovas sont nécessaires à la distribution de métaux dans le milieu interstellaire; sans cela, toutes les nouvelles étoiles (leur système planétaire y compris) seraient uniquement formées à partir d'hydrogène et d'hélium.

### Astronomie galactique

Article détaillé : Astronomie galactique.

Le Système solaire orbite au sein de la Voie lactée, une galaxie spirale barrée qui est un membre important du Groupe local. C'est une masse tournante formée de gaz, d'étoiles et d'autres objets maintenus ensemble par une attraction gravitationnelle mutuelle. Étant donné que la Terre est située dans un bras extérieur poussiéreux, il y a une grande partie de la Voie lactée que l'on ne peut pas voir.

Au centre de la Voie lactée se trouve le noyau, un bulbe de forme étirée qui d'après de nombreux astronomes abriterait un trou noir supermassif en son centre gravitationnel. Celui-ci est entouré de quatre bras spiraux majeurs démarant du noyau. C'est une région active de la galaxie qui contient beaucoup d'étoiles jeunes appartenant à la population II. Le disque est entouré par un halo sphéroïdal d'étoiles plus vieilles de population I, ainsi que par une concentration relativement dense d'amas globulaires.

Entre les étoiles se trouve le milieu interstellaire, une région de matière éparpillée. Dans les régions les plus denses, des nuages moléculaires formés principalement d'hydrogène moléculaire contribuent à la formation de nouvelles étoiles. Cela commence avec des nébuleuses sombres qui se densifient puis s'effondrent (en un volume déterminé par la longueur de Jeans) pour former des protoétoiles compactes.

Quand des étoiles plus massives apparaissent, elles transforment le nuage en une région HII de gaz et de plasma luminescent. Le vent stellaire et les explosions de supernova servent finalement à disperser le nuage, laissant souvent derrière lui un ou plusieurs amas ouverts. Ces amas se dispersent graduellement et les étoiles rejoignent la population de la Voie lactée.

Les études cinématiques de la matière présente dans la Voie lactée ont démontré qu'il y a plus de masse qu'il n'y paraît. Un halo de matière noire semble dominer la masse, bien que la nature de cette matière noire reste indéterminée.



Vue d'artiste de notre Voie lactée.

### Astronomie extra-galactique

Article détaillé : Astronomie extragalactique.

L'étude des objets situés en dehors de notre galaxie est une branche de l'astronomie concernée par la formation et l'évolution des galaxies ; leur morphologie et classification ; l'examen des galaxies actives ; ainsi que par les groupes et amas de galaxies. Ces derniers sont importants pour la compréhension des structures à grande échelle de l'univers.

La plupart des galaxies sont organisées en formes distinctes, ce qui permet d'établir un schéma de classification. Elles sont communément divisées en galaxies spirales, elliptiques et irrégulières.

Comme son nom l'indique, une galaxie elliptique a la forme d'une ellipse. Ses étoiles se déplacent sur une orbite choisie au hasard sans aucune direction préférée. Ces galaxies ne contiennent que peu ou pas de gaz interstellaire, peu de régions de formation d'étoiles, et généralement des étoiles âgées. On trouve généralement des étoiles dans les noyaux d'amas galactiques qui peuvent se former à partir de la fusion de plus grandes galaxies.

Une galaxie spirale est organisée comme un disque plat en rotation, avec généralement un bulbe proéminent ou une barre en son centre, ainsi que des bras spiraux qui s'étendent vers l'extérieur. Ces bras sont des régions poussiéreuses de formations d'étoiles où les jeunes étoiles massives produisent une teinte bleue. Les galaxies spirales sont typiquement entourées d'un halo d'étoiles plus vieilles. La Voie lactée et la galaxie d'Andromède sont des galaxies spirales.

Les galaxies irrégulières sont chaotiques en apparence et ne sont ni spirales, ni elliptiques. Environ un quart des galaxies sont irrégulières. La forme si particulière peut être le résultat d'une interaction gravitationnelle.

Une galaxie active est une structure dont une partie significative de l'énergie qu'elle émet ne provient pas de ses étoiles, de son gaz ou de sa poussière. Ce type de galaxie est alimenté par une région compacte en son noyau, généralement grâce à un trou noir supermassif, pense-t-on, qui émettrait des radiations grâce aux matériaux qu'il avale.

Une radiogalaxie est une galaxie active qui est vraiment très lumineuse dans le domaine radio du spectre électromagnétique et qui produit de gigantesques lobes de gaz. Les galaxies actives émettant des radiations très énergétiques incluent les galaxies de Seyfert, les quasars et les blazars. Les quasars semblent être les objets les plus lumineux de l'univers connu.

Les grandes structures du cosmos sont représentées par des groupes et des amas de galaxies. Cette structure est organisée de manière hiérarchique, dont les plus grandes connues à ce jour sont les superamas. Le tout est agencé en filaments et en murs, laissant d'immenses régions vides entre eux.



Effet de lentille gravitationnelle produit par l'amas de galaxies (centre de l'image). Le champ gravitationnel de cet amas courbe la lumière émise par les objets plus lointains, et ceux-ci apparaissent déformés (objets bleus).

## Cosmologie

Article détaillé : Cosmologie.

La cosmologie (du grec *κοσμος*, « monde, univers » et *λογος*, « mot, étude ») pourrait être considérée comme l'étude de l'univers comme étant un tout.

Les observations de la structure de l'univers à grande échelle, une branche appelée cosmologie physique, a donné une profonde connaissance de la formation et de l'évolution du cosmos. La théorie bien acceptée du Big Bang est fondamentale à la cosmologie moderne qui dit que l'univers a commencé comme un simple point et qu'il s'est ensuite agrandi durant 13,7 milliards d'année jusqu'à son état actuel. Le concept du Big Bang peut être retracé jusqu'à la découverte du fond diffus cosmologique en 1965.

Dans ce processus d'expansion, l'univers a connu plusieurs stades d'évolution. Dans les tout premiers temps, nos théories actuelles montrent une inflation cosmique extrêmement rapide, ce qui a homogénéisé les conditions de départ. Ensuite, la nucléosynthèse primordiale a produit les éléments de base de l'univers nouveau-né.

Lorsque les premiers atomes furent formés, l'espace devint transparent aux radiations, libérant ainsi de l'énergie, perçue aujourd'hui à travers le fond diffus cosmologique. L'expansion de l'univers connut alors un âge Sombre dû au manque de sources d'énergie stellaires.

Une structure hiérarchique de la matière commença à se former à partir de variations minuscules de la densité de matière. La matière s'accumula alors dans les régions les plus denses, formant des nuages de gaz interstellaire et les toutes premières étoiles. Ces étoiles massives déclenchèrent alors le processus du réionisation et semblent être à l'origine de la création de beaucoup d'éléments lourds du jeune univers.

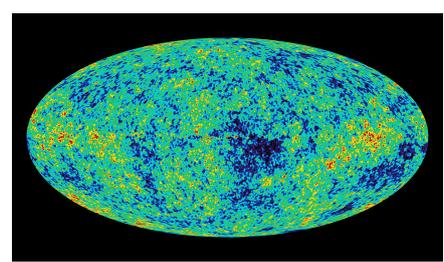
L'attraction gravitationnelle a regroupé la matière en filaments, laissant ainsi d'immenses régions vides dans les lacunes. Graduellement, des organisations de gaz et de poussière ont émergé pour former les premières galaxies primitives. Au fil du temps, celles-ci ont attiré plus de matière, et se sont souvent organisées en amas de galaxies, puis en superamas.

L'existence de la matière noire et de l'énergie sombre est fondamentale à la structure de l'univers. On pense maintenant qu'elles sont les composantes dominantes, formant 96 % de la densité de l'univers. Pour cette raison, beaucoup d'efforts sont déployés dans le but de découvrir la composition et la physique régissant ces éléments.

## Disciplines par type d'observation

Article détaillé : Astronomie d'observation.

En astronomie, l'information provient principalement de la détection et de l'analyse de la lumière visible ou d'une autre onde électromagnétique. L'astronomie d'observation peut être divisée selon les régions observées du spectre électromagnétique. Certaines parties du spectre peuvent être observées depuis la surface de la Terre, alors que d'autres sont seulement observables à de hautes altitudes voire dans l'espace. Des informations spécifiques sur ces sous-branches sont données ci-dessous.



Le fond diffus cosmologique, cartographié par WMAP.

## Radioastronomie

Article détaillé : Radioastronomie.

La radioastronomie étudie les radiations d'une longueur d'onde supérieure au millimètre. La radioastronomie est différente des autres formes d'observations astronomiques dans la mesure où les ondes radio sont traitées davantage comme des ondes plutôt que comme des photons discrets. Il est plus facile de mesurer l'amplitude et la phase des ondes radio que celles de longueurs d'ondes plus courtes.

Bien que certaines ondes radio soient produites par certains objets astronomiques sous forme d'émissions thermiques, la plupart des émissions radio qui sont observées depuis la Terre sont vues sous forme de rayonnement synchrotron, qui est produit lorsque les électrons oscillent autour de champs magnétiques. En outre, un certain nombre de raies spectrales produites par le gaz interstellaire, notamment la raie d'hydrogène à 21 cm, sont observables dans le domaine radio'.

Une grande variété d'objets sont observables en ondes radio, ce qui inclut les supernovae, le gaz interstellaire, les pulsars et les noyaux galactiques actifs'.

## Astronomie infrarouge

Article détaillé : Astronomie infrarouge.

L'astronomie infrarouge s'occupe de la détection et de l'analyse du rayonnement infrarouge (longueurs d'onde plus longues de celle de la lumière rouge). Excepté pour les longueurs d'onde situées près de la lumière visible, le rayonnement infrarouge est fortement absorbé par l'atmosphère; d'autre-part, celle-ci produit des émissions d'infrarouge significatives. Par conséquent, les observatoires infrarouges doivent être situés sur des lieux très élevés et secs, ou dans l'espace.

L'astronomie infrarouge est particulièrement utile pour l'observation des régions galactiques entourées de poussière, et pour les études des gaz moléculaires. Étant sollicitée dans le cadre de l'observation d'objets froids (moins de quelques centaines de kelvins) elle est donc également utile à l'observation des atmosphères planétaires.

Parmi les observatoires à infrarouge, on peut citer les télescopes spatiaux Spitzer et Herschel.

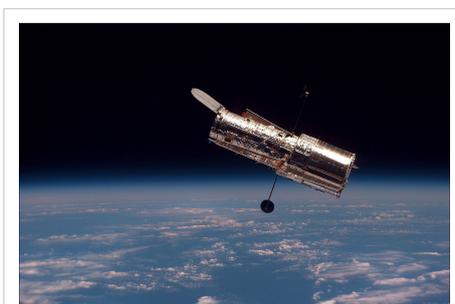
## Astronomie optique

Article détaillé : astronomie optique.

D'un point de vue historique, l'astronomie optique, également appelée l'astronomie de la lumière visible, est la plus ancienne forme d'astronomie. À l'origine, les images optiques étaient dessinées à la main. À la fin du XIX<sup>e</sup> siècle et durant une bonne partie du XX<sup>e</sup> siècle, les images furent faites en utilisant un équipement photographique. Les images modernes sont produites grâce à des détecteurs digitaux, particulièrement les caméras CCD. Bien que la lumière visible s'étende elle-même approximativement de 4 000 Å à 7 000 Å (400 à 700 nm), le même équipement peut être utilisé pour observer les ultraviolets proches ainsi que le proche-infrarouge.



Le Very Large Array est un exemple de radiotélescope.



Délibéré des contraintes atmosphériques, le télescope spatial Hubble a fourni des images exceptionnelles en lumière visible (entre autres).

En réalité, l'atmosphère n'est pas tout à fait transparente à la lumière visible. En effet, les images obtenues sur Terre dans ces longueurs d'ondes souffrent de distorsions dues aux turbulences atmosphériques. C'est ce phénomène qui est responsable du scintillement des étoiles. Le pouvoir de résolution ainsi que la magnitude limite théoriques d'un télescope terrestre sont donc diminués à cause de ces mêmes perturbations. Pour remédier à ce problème, il est donc nécessaire de quitter l'atmosphère terrestre. Une autre solution, l'optique adaptative, permet également de réduire la perte de qualité de l'image.

### Astronomie en ultraviolets

Article détaillé : Astronomie dans l'ultraviolet.

L'astronomie en ultraviolets fait référence aux observations aux longueurs d'ondes correspondant à l'ultraviolet, c'est-à-dire entre  $\sim 100$  et  $3\,200 \text{ \AA}$  ( $10$  à  $320 \text{ nm}$ ). La lumière de ces longueurs est absorbée par l'atmosphère de la Terre, les observations de ces longueurs d'ondes se font donc depuis la haute atmosphère ou depuis l'espace. L'astronomie à ultraviolets est plus indiquée pour l'observation du rayonnement thermique et des raies spectrales des étoiles bleues chaudes (étoiles OB) qui sont très lumineuses dans ce domaine. Cela comprend les étoiles bleues des autres galaxies, qui ont été les cibles de plusieurs études sur le sujet. D'autres objets sont aussi couramment observés en UV, comme les nébuleuses planétaires, les rémanents de supernovae ou les noyaux galactiques actifs. Cependant, la lumière ultraviolette est facilement absorbée par la poussière interstellaire, les mesures ont donc besoin d'être corrigées de l'extinction.

### Astronomie des rayons X

Article détaillé : Astronomie des rayons X.

L'astronomie des rayons X consiste en l'étude des objets astronomiques à des longueurs d'ondes correspondant aux rayons X, autrement dit allant d'environ  $0,1$  à  $100 \text{ \AA}$  ( $0,01$  à  $100 \text{ nm}$ ). Typiquement, les objets émettent des rayons X comme des émissions synchrotron (produit par des électrons oscillant autour des lignes d'un champ magnétique), des émissions thermiques provenant de gaz fins (appelé rayonnement continu de freinage) qui est au-dessus de  $10^7$  kelvins, ainsi que des émissions thermiques de gaz épais (appelé rayonnement du corps noir) dont la température est supérieure à  $10^7$  kelvins. Puisque les rayons X sont absorbés par l'atmosphère de la terre, toute observation en rayons X doit être effectuée par des ballons de haute altitude, par des fusées, ou par un engin spatial. Parmi les sources de rayons X notables, nous pouvons citer les binaires X, les pulsars, les rémanents de supernovae, les galaxies elliptiques ou actives, et les amas de galaxies.



Le télescope spatial à rayons X Chandra a profondément transformé notre connaissance de l'univers.

### Astronomie des rayons gamma

Article détaillé : Astronomie gamma.

L'astronomie des rayons gamma concerne les plus petites longueurs d'ondes du spectre électromagnétique. Les rayons gamma peuvent être directement observés par des satellites tels que le Compton Gamma-Ray Observatory.

La majorité des rayons gamma proviennent en réalité des sursauts gamma, des objets qui produisent un rayonnement gamma intense pour une durée variant de quelques millisecondes à quelques milliers de secondes. Seulement  $10 \%$  des sources de rayons gamma sont permanentes. Parmi ces émetteurs stables de rayons gamma, on retrouve les pulsars, les étoiles à neutrons, et les trous noirs, au même titre que les galaxies actives.

## Sciences interdisciplinaires

L'astronomie et l'astrophysique ont développé d'importants liens avec d'autres champs d'études scientifiques, à savoir :

- L'astrobiologie étudie l'apparition et l'évolution des systèmes biologiques présents dans l'univers.
- L'archéoastronomie étudie les astronomies anciennes et traditionnelles dans leurs contextes culturels, en utilisant des preuves archéologiques et anthropologiques.
- L'astrochimie étudie les substances chimiques trouvées dans l'espace, généralement dans les nuages moléculaires, ainsi que leur formation, leurs interactions, et leur destruction. Cette discipline fait le lien entre astronomie et chimie.
- la cosmochimie étudie les substances chimiques trouvées dans le Système solaire, y compris l'origine des éléments ainsi que les variations dans les rapports isotopiques.

## Astronomie amateur

Article détaillé : Astronomie amateur.

Les astronomes amateurs observent une variété d'objets célestes, au moyen d'un équipement qu'ils construisent parfois eux-mêmes. Les cibles les plus communes pour un astronome amateur sont la Lune, les planètes, les étoiles, les comètes, les essaims météoritiques, ainsi que les objets du ciel profond que sont les amas stellaires, les galaxies et les nébuleuses. Une branche de l'astronomie amateur est l'astrophotographie, consistant à photographier le ciel nocturne. Une partie des amateurs aime se spécialiser dans l'observation d'un type d'objet particulier.

La plupart des amateurs observent le ciel aux longueurs d'ondes visibles, mais une minorité travaille avec des rayonnements hors du spectre visible. Cela comprend l'utilisation de filtres infrarouges sur des télescopes conventionnels, ou l'utilisation de radiotélescopes. Le pionnier de la radioastronomie amateur était Karl Jansky qui a commencé à observer le ciel en ondes radio dans les années 1930. Un certain nombre d'amateurs utilisent soit des télescopes fabriqués de leurs mains, soit des télescopes qui ont été construits à l'origine pour la recherche astronomique mais qui leur sont maintenant ouverts (par exemple le One-Mile Telescope).

Une certaine frange de l'astronomie amateur continue de faire progresser l'astronomie. En fait, il s'agit de l'une des seules sciences où les amateurs peuvent contribuer de manière significative<sup>[réf. nécessaire]</sup>. Ceux-ci peuvent effectuer les calculs d'occultation qui servent à préciser les orbites des planètes mineures. Ils peuvent aussi découvrir des comètes, effectuer des observations régulières d'étoiles doubles ou multiples. Les avancées en technologie numérique ont permis aux amateurs de faire des progrès impressionnants dans le domaine de l'astrophotographie.



Un télescope de Dobson d'amateur.

## Notes et références

- [1] James Lequeux, « ASTRONOMIE », Encyclopædia Universalis [en ligne], consulté le 22 octobre 2012.
- [2] http://www.imarabe.org/temp/expo/sciences-arabes.html
- [3] Thomas Samuel Kuhn, *La Structure des révolutions scientifiques*, 1962

## Bibliographie

- André Brahic, *Enfants du soleil : histoire de nos origines*, Paris, O. Jacob, 1999, 366 p. (ISBN 9782738105905, résumé (http://books.google.fr/books?id=WBCif71Z9C0C))
- François Forget, François Costard et Philippe Lognonné, *La planète Mars : histoire d'un autre monde*, Paris, Éditions Belin, coll. « Bibliothèque scientifique », 2003, 144 p. (ISBN 9782701126579)
- Jean-Pierre Luminet, *Le destin de l'univers : trous noirs et énergie sombre*, Paris, Fayard, coll. « Le temps des sciences », 2006, 588 p. (ISBN 978-221363081-6)

# Big Bang

---

 Pour les articles homonymes, voir **Big Bang** (homonymie).

 Cet article possède un paronyme ; voir : Big Band.



**Cet article ne cite pas suffisamment ses sources** (janvier 2011).

Si vous disposez d'ouvrages ou d'articles de référence ou si vous connaissez des sites web de qualité traitant du thème abordé ici, merci de compléter l'article en donnant les références utiles à sa vérifiabilité et en les liant à la section « Notes et références » (modifier l'article <sup>[1]</sup>).

Le **Big Bang**<sup>[2]</sup> est un modèle cosmologique utilisé par les scientifiques pour décrire l'origine et l'évolution de l'univers<sup>[3]</sup>. Il a été initialement proposé en 1927 par le chanoine catholique belge Georges Lemaître, qui décrivait dans les grandes lignes l'expansion de l'Univers, avant que celle-ci soit mise en évidence par Edwin Hubble en 1929. Ce modèle a été désigné pour la première fois sous le terme ironique de « *Big Bang* » lors d'une émission de la BBC, *The Nature of Things* (littéralement « La nature des choses » - dont le texte fut publié en 1950), par le physicien anglais Fred Hoyle, qui lui-même préférait les modèles d'état stationnaire.

De façon générale, le terme « Big Bang » est associé à toutes les théories qui décrivent notre Univers comme issu d'une dilatation rapide qui fait penser (abusivement<sup>[4]</sup>) à une explosion, et est également le nom associé à cette époque dense et chaude qu'a connu l'Univers il y a 13,8 milliards d'années<sup>[5]</sup> sans que cela préjuge de l'existence d'un « instant initial » ou d'un commencement à son histoire.

Le concept général du Big Bang, à savoir que l'Univers est en expansion et a été plus dense et plus chaud par le passé, doit sans doute être attribué au Russe Alexandre Friedmann, qui l'avait proposé en 1922, cinq ans avant Lemaître. Son assise ne fut cependant établie qu'en 1965 avec la découverte du fond diffus cosmologique, l'« éclat disparu de la formation des mondes », selon les termes de Georges Lemaître, qui attesta de façon définitive la réalité de l'époque dense et chaude de l'Univers primordial. Albert Einstein, en mettant au point la relativité générale, aurait pu déduire l'expansion de l'Univers, mais a préféré modifier ses équations en y ajoutant sa constante cosmologique, car il était persuadé que l'Univers devait être statique.

Le terme de « Big Bang chaud » (« *Hot Big Bang* ») était parfois utilisé initialement pour indiquer que, selon ce modèle, l'Univers était plus chaud quand il était plus dense. Le qualificatif de « chaud » était ajouté par souci de précision, car le fait que l'on puisse associer une notion de température à l'Univers dans son ensemble n'était pas encore bien compris au moment où le modèle a été proposé, au milieu du XX<sup>e</sup> siècle.

## Introduction

La découverte de la relativité générale par Albert Einstein en 1915 marque le début de la cosmologie moderne, où il devient possible de décrire l'Univers dans son ensemble comme un système physique, son évolution à grande échelle étant décrite par la relativité générale.

Einstein est d'ailleurs le premier à utiliser sa théorie fraîchement découverte, tout en y ajoutant un terme supplémentaire, la constante cosmologique, pour proposer une solution issue de la relativité générale décrivant l'espace dans son ensemble, appelée univers d'Einstein. Ce modèle introduit un concept extrêmement audacieux pour l'époque, le principe cosmologique, qui stipule que l'Homme n'occupe pas de position privilégiée dans l'Univers, ce qu'Einstein traduit par le fait que l'Univers soit homogène et isotrope, c'est-à-dire semblable à lui-même quels que soient le lieu et la direction dans laquelle on regarde. Cette hypothèse était relativement hardie, car, à l'époque, aucune observation concluante ne permettait d'affirmer l'existence d'objet extérieur à la Voie lactée, bien que le débat sur cette question existe dès cette époque (par la suite appelé le Grand Débat).

Au principe cosmologique, Einstein ajoute implicitement une autre hypothèse qui paraît aujourd'hui nettement moins justifiée, celle que l'Univers est statique, c'est-à-dire n'évolue pas avec le temps. C'est cet ensemble qui le conduit à modifier sa formulation initiale en ajoutant à ses équations le terme de constante cosmologique. L'avenir lui donne tort, car dans les années 1920, Edwin Hubble découvre la nature extragalactique de certaines « nébuleuses » (aujourd'hui appelées galaxies), puis leur éloignement de la Galaxie avec une vitesse proportionnelle à leur distance<sup>[6]</sup> : c'est la loi de Hubble. Dès lors, plus rien ne justifie l'hypothèse d'un Univers statique proposée par Einstein.

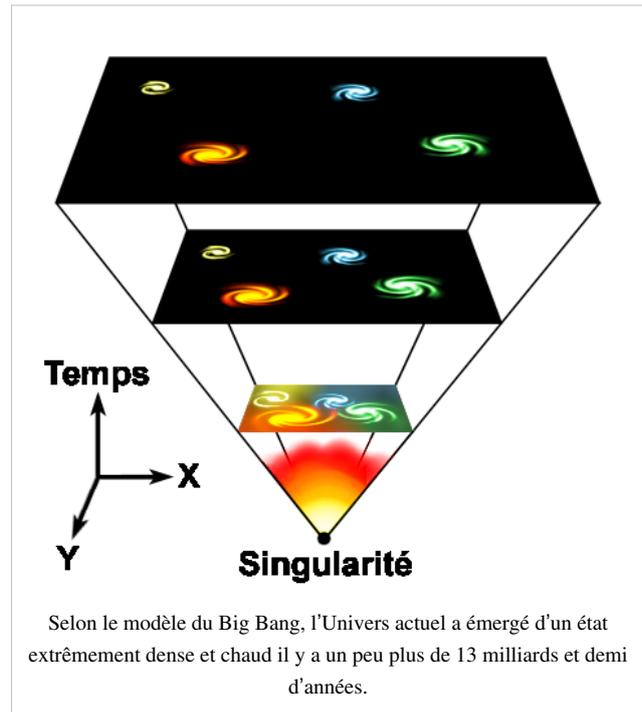
Avant même la découverte de Hubble, plusieurs physiciens, dont Willem de Sitter, Georges Lemaître et Alexandre Friedmann, découvrent d'autres solutions de la relativité générale décrivant un Univers en expansion. Leurs modèles sont alors immédiatement acceptés dès la découverte de l'expansion de l'Univers. Ils décrivent ainsi un Univers en expansion depuis plusieurs milliards d'années. Par le passé, celui-ci était donc plus dense et plus chaud.

## Big Bang ou état stationnaire ?

La découverte de l'expansion de l'Univers prouve que celui-ci n'est pas statique, mais laisse place à plusieurs interprétations possibles :

- soit il y a conservation de la matière (hypothèse *a priori* la plus réaliste), et donc dilution de celle-ci dans le mouvement d'expansion, et, dans ce cas, l'Univers était plus dense par le passé : c'est le Big Bang ;
- soit on peut imaginer, à l'inverse, que l'expansion s'accompagne d'une création (voire d'une disparition) de matière. Dans ce cadre-là, l'hypothèse la plus esthétique est d'imaginer un phénomène de création continue de matière contrebalançant exactement sa dilution par l'expansion. Un tel Univers serait alors stationnaire.

Dans un premier temps, c'est cette seconde hypothèse qui a été la plus populaire, bien que le phénomène de création de matière ne soit pas motivé par des considérations physiques. L'une des raisons de ce succès est que dans ce modèle, appelé théorie de l'état stationnaire, l'univers est éternel. Il ne peut donc y avoir de conflit entre l'âge de



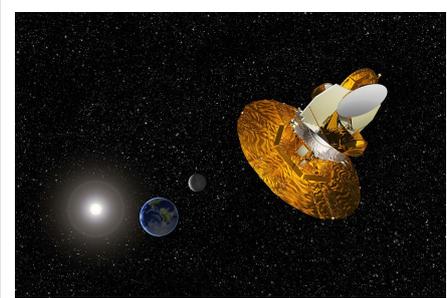
celui-ci et l'âge d'un objet céleste quelconque.

À l'inverse, dans l'hypothèse du Big Bang, l'Univers a un âge fini, que l'on déduit directement de son taux d'expansion (voir équations de Friedmann). Dans les années 1940, le taux d'expansion de l'Univers était très largement surestimé, ce qui conduisait à une importante sous-estimation de l'âge de l'Univers. Or diverses méthodes de datation de la Terre indiquaient que celle-ci était plus vieille que l'âge de l'Univers estimé par son taux d'expansion. Les modèles de type Big Bang étaient donc en difficulté vis-à-vis de telles observations. Ces difficultés ont disparu par la suite par une réévaluation plus précise du taux d'expansion de l'Univers.

## Preuves observationnelles

Deux preuves observationnelles décisives ont donné raison aux modèles de Big Bang : il s'agit de la détection du fond diffus cosmologique, rayonnement de basse énergie (domaine micro-onde) vestige de l'époque chaude de l'histoire de l'univers, et la mesure de l'abondance des éléments légers, c'est-à-dire des abondances relatives de différents isotopes de l'hydrogène, de l'hélium et du lithium qui se sont formés pendant la phase chaude primordiale.

Ces deux observations remontent au début de la seconde moitié du XX<sup>e</sup> siècle, et ont assis le Big Bang comme le modèle décrivant l'univers observable. Outre la cohérence quasi parfaite du modèle avec tout un autre ensemble d'observations cosmologiques effectuées depuis, d'autres preuves relativement directes sont venues s'ajouter : l'observation de l'évolution des populations galactiques, et la mesure du refroidissement du fond diffus cosmologique depuis plusieurs milliards d'années.



Vision d'artiste du satellite WMAP collectant les données afin d'aider les scientifiques à comprendre le Big Bang

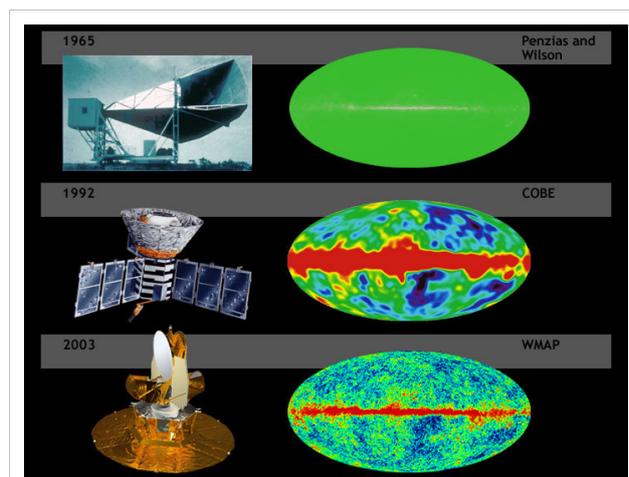
## Le fond diffus cosmologique

Article détaillé : Fond diffus cosmologique.

L'expansion induit naturellement que l'univers a été plus dense par le passé. À l'instar d'un gaz qui s'échauffe quand on le comprime, l'univers devait aussi être plus chaud par le passé. Cette possibilité semble évoquée pour la première fois en 1934 par Georges Lemaître, mais n'est réellement étudiée qu'à partir des années 1940. Selon l'étude de George Gamow (entre autres), l'univers doit être empli d'un rayonnement qui perd de l'énergie du fait de l'expansion, selon un processus semblable à celui du décalage vers le rouge du rayonnement des objets astrophysiques distants.

Gamow réalise en effet que les fortes densités de l'univers primordial doivent avoir permis l'instauration d'un équilibre thermique entre les atomes, et par suite

l'existence d'un rayonnement émis par ceux-ci. Ce rayonnement devait être d'autant plus intense que l'univers était dense, et devait donc encore exister aujourd'hui, bien que considérablement moins intense. Gamow fut le premier (avec Ralph Alpher et Robert C. Herman) à réaliser que la température actuelle de ce rayonnement pouvait être



Le fond diffus cosmologique, découvert en 1965 est le témoin le plus direct du Big Bang. Depuis, ses fluctuations ont été étudiées par les sondes spatiales COBE (1992), WMAP (2003) et Planck (2009).

calculée à partir de la connaissance de l'âge de l'univers, la densité de matière, et l'abondance d'hélium.

Ce rayonnement est appelé aujourd'hui fond diffus cosmologique, ou parfois rayonnement fossile. Il correspond à un rayonnement de corps noir à basse température (2,7 kelvins), conformément aux prédictions de Gamow. Sa découverte, quelque peu fortuite, est due à Arno Allan Penzias et Robert Woodrow Wilson en 1965, qui seront récompensés par le Prix Nobel de physique en 1978.

L'existence d'un rayonnement de corps noir est facile à expliquer dans le cadre du modèle du Big Bang : par le passé, l'univers est très chaud et baigne dans un rayonnement intense. Sa densité, très élevée, fait que les interactions entre matière et rayonnement sont très nombreuses, ce qui a pour conséquence que le rayonnement est thermalisé, c'est-à-dire que son spectre électromagnétique est celui d'un corps noir. L'existence d'un tel rayonnement dans la théorie de l'état stationnaire est par contre quasiment impossible à justifier (bien que ses rares tenants affirment le contraire).

Bien que correspondant à un rayonnement à basse température et peu énergétique, le fond diffus cosmologique n'en demeure pas moins la plus grande forme d'énergie électromagnétique de l'univers : près de 96 % de l'énergie existant sous forme de photons est dans le rayonnement fossile, les 4 % restants résultant du rayonnement des étoiles (dans le domaine visible) et du gaz froid dans les galaxies (en infrarouge). Ces deux autres sources émettent des photons certes plus énergétiques, mais nettement moins nombreux.

Dans la théorie de l'état stationnaire, l'existence du fond diffus cosmologique est supposée résulter d'une thermalisation du rayonnement stellaire par d'hypothétiques aiguillettes de fer microscopiques, un tel modèle s'avère en contradiction avec les données observables, tant en termes d'abondance du fer qu'en termes d'efficacité du processus de thermalisation (il est impossible d'expliquer dans ce cadre que le fond diffus cosmologique soit un corps noir aussi parfait) ou d'isotropie (on s'attendrait à ce que la thermalisation soit plus ou moins efficace selon la distance aux galaxies).

La découverte du fond diffus cosmologique fut historiquement la preuve décisive du Big Bang.

## La nucléosynthèse primordiale

Article détaillé : Nucléosynthèse primordiale.

Dès la découverte de l'interaction forte et du fait que c'était elle qui était la source d'énergie des étoiles, s'est posée la question d'expliquer l'abondance des différents éléments chimiques dans l'univers. Au tournant des années 1950 deux processus expliquant cette abondance étaient en compétition : la nucléosynthèse stellaire et la nucléosynthèse primordiale.

Les tenants de la théorie de l'état stationnaire supposaient que de l'hydrogène était produit constamment au cours du temps, et que celui-ci était peu à peu transformé en hélium puis en éléments plus lourds au cœur des étoiles. La fraction d'hélium ou des autres éléments lourds restait constante au cours du temps car la proportion d'hélium augmentait du fait de la nucléosynthèse, mais diminuait en proportion semblable du fait de la création d'hydrogène. À l'inverse, les tenants du Big Bang supposaient que tous les éléments, de l'hélium à l'uranium, avaient été produits lors de la phase dense et chaude de l'univers primordial.

La thèse actuelle emprunte à chaque hypothèse :

D'après celle-ci, l'hélium et le lithium ont effectivement été produits pendant la nucléosynthèse primordiale, mais les éléments plus lourds, comme le carbone ou l'oxygène, ont été créés plus tard au cœur des étoiles (nucléosynthèse stellaire). La principale preuve de cela vient de l'étude de l'abondance des éléments dits « légers » (hydrogène, hélium, lithium) dans les quasars lointains. D'après le modèle du Big Bang, leurs abondances relatives dépendent exclusivement d'un seul paramètre, à savoir le rapport de la densité de photons à la densité de baryons, qui est quasi constant depuis la nucléosynthèse primordiale. À partir de ce seul paramètre, que l'on peut d'ailleurs mesurer par d'autres méthodes, on peut expliquer l'abondance des deux isotopes de l'hélium ( $^3\text{He}$  et  $^4\text{He}$ ) et de celle du lithium ( $^7\text{Li}$ ). On observe également une augmentation de la fraction d'hélium au sein des galaxies proches, signe de

l'enrichissement progressif du milieu interstellaire par les éléments synthétisés par les étoiles.

## L'évolution des galaxies

Article détaillé : Évolution des galaxies.

Le modèle du Big Bang présuppose que l'univers ait été par le passé dans un état bien plus homogène qu'aujourd'hui. La preuve en est apportée par l'observation du fond diffus cosmologique dont le rayonnement est extraordinairement isotrope : les écarts de température ne varient guère plus d'un cent-millième de degré selon la direction d'observation.

Il est donc supposé que les structures astrophysiques (galaxies, amas de galaxies) n'existaient pas à l'époque du Big Bang mais se sont peu à peu formées. Le processus à l'origine de leur formation est d'ailleurs connu depuis les travaux de James Jeans en 1902 : c'est l'instabilité gravitationnelle.

Le Big Bang prédit donc que les galaxies que nous observons se sont formées quelque temps après le Big Bang, et d'une manière générale que les galaxies du passé ne ressemblaient pas exactement à celles que l'on observe dans notre voisinage. Comme la lumière voyage à une vitesse finie, il suffit de regarder des objets lointains pour voir à quoi ressemblait l'univers par le passé.

L'observation des galaxies lointaines, qui d'après la loi de Hubble ont un grand décalage vers le rouge montre effectivement que les galaxies primordiales étaient assez différentes de celles d'aujourd'hui : les interactions entre galaxies étaient plus nombreuses, les galaxies massives moins nombreuses, ces dernières étant apparues plus tard des suites des phénomènes de fusion entre galaxies. De même, la proportion de galaxies spirale, elliptique et irrégulière varie au cours du temps.

Toutes ces observations sont relativement délicates à effectuer, en grande partie car les galaxies lointaines sont peu lumineuses et nécessitent des moyens d'observation très performants pour être bien observées. Depuis la mise en service du télescope spatial Hubble en 1990 puis des grands observatoires au sol VLT, Keck, Subaru, l'observation des galaxies à grand redshift a permis de vérifier les phénomènes d'évolution des populations galactiques prédits par les modèles de formation et d'évolution des galaxies dans le cadre des modèles du Big Bang.

L'étude des toutes premières générations d'étoiles et de galaxies demeure un des enjeux majeurs de la recherche astronomique du début du XXI<sup>e</sup> siècle.

## La mesure de la température du fond diffus cosmologique à grand décalage vers le rouge

En décembre 2000, Raghunathan Srianand, Patrick Petitjean et Cédric Ledoux ont mesuré la température du fond diffus cosmologique baignant un nuage interstellaire dont ils ont observé l'absorption du rayonnement émis par le quasar d'arrière plan PKS 1232+0815, situé à un décalage vers le rouge de 2,57<sup>[7]</sup>.

L'étude du spectre d'absorption permet de déduire la composition chimique du nuage, mais aussi sa température si l'on peut détecter les raies correspondant à des transitions entre différents niveaux excités de divers atomes ou ions présents dans le nuage (dans le cas présent, du carbone neutre). La principale difficulté dans une telle analyse est d'arriver à séparer les différents processus physiques pouvant peupler les niveaux excités des atomes.

Les propriétés chimiques de ce nuage, ajoutées à la très haute résolution spectrale de l'instrument utilisé (le spectrographe UVES du Very Large Telescope) ont pour la première fois permis d'isoler la température du rayonnement de fond. Srianand, Petitjean et Ledoux ont trouvé une température du fond diffus cosmologique comprise entre 6 et 14 kelvins, en accord avec la prédiction du Big Bang, de 9,1 K, étant donné que le nuage est situé à un décalage vers le rouge de 2,33 771<sup>[précision nécessaire]</sup>.

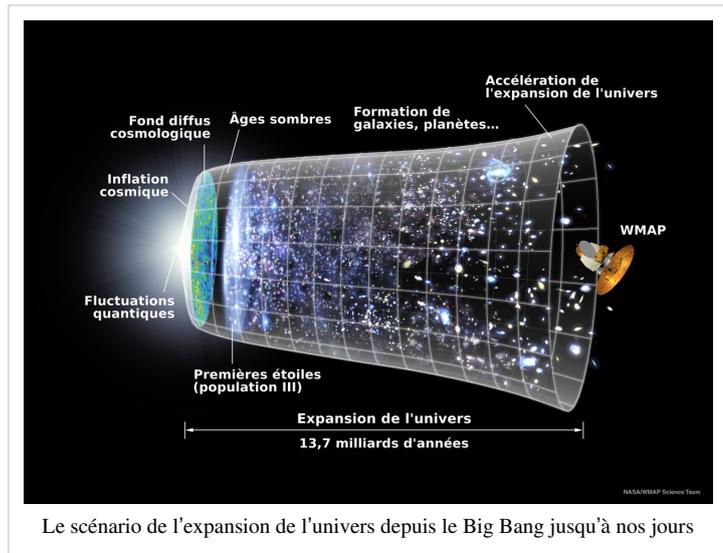
## Chronologie à rebours du Big Bang

Du fait de l'expansion, l'univers était par le passé plus dense et plus chaud. La chronologie du Big Bang revient essentiellement à déterminer à rebours l'état de l'univers à mesure que sa densité et sa température augmentent dans le passé.

### L'univers aujourd'hui (+ 13,8 milliards d'années)

L'univers est à l'heure actuelle extrêmement peu dense (quelques atomes par mètre cube, voir l'article densité critique) et froid (2,73 kelvins, soit  $-271\text{ }^{\circ}\text{C}$ ). En effet, s'il existe des objets astrophysiques très chauds (les étoiles), le rayonnement ambiant dans lequel baigne l'univers est très faible. Cela provient du fait que la densité d'étoiles est

extrêmement faible dans l'univers : la distance moyenne d'un point quelconque de l'univers à l'étoile la plus proche est immense<sup>[précision nécessaire]</sup>. L'observation astronomique nous apprend de plus que les étoiles ont existé très tôt dans l'histoire de l'univers : moins d'un milliard d'années après le Big Bang, étoiles et galaxies existaient déjà en nombre. Cependant, à des époques encore plus reculées elles n'existaient pas encore. Si tel avait été le cas, le fond diffus cosmologique porterait les traces de leur présence.



Le scénario de l'expansion de l'univers depuis le Big Bang jusqu'à nos jours

### La recombinaison (+ 380 000 ans)

Articles détaillés : Recombinaison (cosmologie) et Découplage (cosmologie).

380 000 ans après le Big Bang, alors que l'univers est mille fois plus chaud et un milliard de fois plus dense qu'aujourd'hui, les étoiles et les galaxies n'existaient pas encore. Ce moment marque l'époque où l'univers est devenu suffisamment peu dense pour que la lumière puisse s'y propager, essentiellement grâce au fait que le principal obstacle à sa propagation était la présence d'électrons libres. Lors de son refroidissement, l'univers voit les électrons libres se combiner aux noyaux atomiques pour former les atomes. Cette époque porte pour cette raison le nom de recombinaison. Comme elle correspond aussi au moment où l'univers a permis la propagation de la lumière, on parle aussi de découplage entre matière et rayonnement. La lueur du fond diffus cosmologique a donc pu se propager jusqu'à nous depuis cette époque<sup>[8]</sup>.

### La nucléosynthèse primordiale (+ 3 minutes)

Moins de 380 000 ans après le Big Bang, l'univers est composé d'un plasma d'électrons et de noyaux atomiques. Quand la température est suffisamment élevée, les noyaux atomiques eux-mêmes ne peuvent exister. On est alors en présence d'un mélange de protons, de neutrons et d'électrons. Dans les conditions qui règnent dans l'univers primordial, ce n'est que lorsque sa température descend en dessous de 0,1 MeV (soit environ un milliard de degrés) que les nucléons peuvent se combiner pour former des noyaux atomiques. Il n'est cependant pas possible de fabriquer ainsi des noyaux atomiques lourds plus gros que le lithium. Ainsi, seuls les noyaux d'hydrogène, d'hélium et de lithium sont produits lors de cette phase qui commence environ une seconde après le Big Bang et qui dure environ trois minutes<sup>[9]</sup>. C'est ce que l'on appelle la nucléosynthèse primordiale, dont la prédiction, la compréhension et l'observation des conséquences représentent un des premiers accomplissements majeurs de la cosmologie moderne.

Article détaillé : Nucléosynthèse primordiale.

## L'annihilation électrons-positrons

Peu avant la nucléosynthèse primordiale (qui débute à 0,1 MeV), la température de l'univers dépasse 0,5 MeV (cinq milliards de degrés), correspondant à l'énergie de masse des électrons. Au-delà de cette température, interactions entre électrons et photons peuvent spontanément créer des paires d'électron-positrons. Ces paires s'annihilent spontanément mais sont sans cesse recrées tant que la température dépasse le seuil de 0,5 MeV. Dès qu'elle descend en dessous de celui-ci, la quasi-totalité des paires s'annihilent en photons, laissant place au très léger excès d'électrons issus de la baryogenèse (voir ci-dessous).

Article détaillé : Annihilation électrons-positrons.

## Le découplage des neutrinos

Peu avant cette époque, la température est supérieure à 1 MeV (dix milliards de degrés), ce qui est suffisant pour qu'électrons, photons et neutrinos aient de nombreuses interactions. Ces trois espèces sont à l'équilibre thermique à des températures plus élevées. Quand l'univers refroidit, électrons et photons continuent à interagir, mais plus les neutrinos, qui cessent également d'interagir entre eux. À l'instar du découplage mentionné plus haut qui concernait les photons, cette époque correspond à celle du découplage des neutrinos. Il existe donc un fond cosmologique de neutrinos présentant des caractéristiques semblables à celles du fond diffus cosmologique. L'existence de ce fond cosmologique de neutrinos est attestée indirectement par les résultats de la nucléosynthèse primordiale, puisque ceux-ci y jouent un rôle indirect<sup>[10]</sup>. La détection directe de ce fond cosmologique de neutrinos représente un défi technologique extraordinairement difficile<sup>[11]</sup>, mais son existence n'en est aucunement remise en cause.

Article détaillé : Fond cosmologique de neutrinos.

## La baryogenèse

La physique des particules repose sur l'idée générale, étayée par l'expérience, que les diverses particules élémentaires et interactions fondamentales ne sont que des aspects différents d'entités plus élémentaires (par exemple, l'électromagnétisme et la force nucléaire faible peuvent être décrits comme deux aspects d'une seule interaction, l'interaction électrofaible). Plus généralement, il est présumé que les lois de la physique et par la suite l'univers dans son ensemble sont dans un état plus « symétrique » à plus haute température. On considère ainsi que par le passé, matière et antimatière existaient en quantités strictement identiques dans l'univers. Les observations actuelles indiquent que l'antimatière est quasiment absente dans l'univers observable<sup>[12]</sup>. La présence de matière est donc le signe qu'à un moment donné s'est formé un léger excès de matière par rapport à l'antimatière. Lors de l'évolution ultérieure de l'univers, matière et antimatière se sont annihilées en quantités strictement égales, laissant derrière elles le très léger surplus de matière qui s'était formé. Comme la matière ordinaire est formée de particules appelées baryons, la phase où cet excès de matière s'est formé est appelée baryogenèse. Très peu de choses sont connues sur cette phase ou sur le processus qui s'est produit alors. Par exemple l'échelle de température où elle s'est produite varie, selon les modèles, de  $10^3$  à  $10^{16}$  GeV (soit entre  $10^{16}$  et  $10^{29}$  kelvins...). Les conditions nécessaires pour que la baryogenèse se produise sont appelées conditions de Sakharov, à la suite des travaux du physicien russe Andreï Sakharov en 1967.

Article détaillé : Baryogenèse.

## L'ère de grande unification

Un nombre croissant d'indications suggère que les forces électromagnétiques, faible et forte ne sont que des aspects différents d'une seule et unique interaction. Celle-ci est en général appelée théorie grand unifiée (« GUT » en anglais, pour *Grand Unified Theory*), ou grande unification. On pense qu'elle se manifeste au-delà de températures de l'ordre de  $10^{16}$  GeV ( $10^{29}$  kelvin). Il est donc probable que l'univers ait connu une phase où la théorie grand unifiée était de mise. Cette phase pourrait être à l'origine de la baryogenèse, ainsi éventuellement que de la matière noire, dont la nature exacte reste inconnue.

Article détaillé : Ère de grande unification.

## L'inflation cosmique

Le Big Bang amène de nouvelles questions en cosmologie. Par exemple, il suppose que l'univers est homogène et isotrope (ce qu'il est effectivement, du moins dans la région observable), mais n'explique pas pourquoi il devrait en être ainsi. Or dans sa version naïve, il n'existe pas de mécanisme pendant le Big Bang qui provoque une homogénéisation de l'univers (voir ci-dessous, le problème de l'horizon). La motivation initiale de l'inflation était ainsi de proposer un processus provoquant l'homogénéisation et l'isotropisation de l'univers.

L'inventeur de l'inflation est Alan Guth qui a été le premier à proposer explicitement un scénario réaliste décrivant un tel processus. À son nom méritent aussi d'être associés ceux de François Englert et Alexei Starobinsky, qui ont également travaillé sur certaines de ces problématiques à la même époque (1980). Il a par la suite été réalisé (en 1982) que l'inflation permettait non seulement d'expliquer pourquoi l'univers était homogène, mais aussi pourquoi il devait aussi présenter de petits écarts à l'homogénéité, comportant les germes des grandes structures astrophysiques.

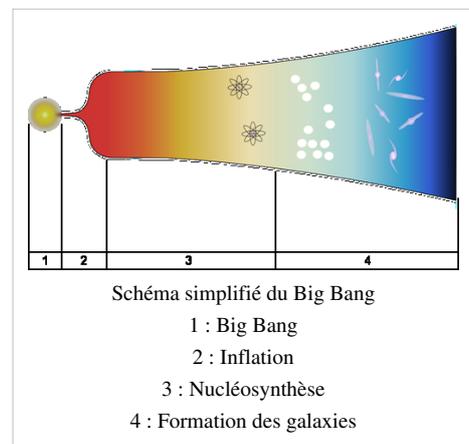
L'on peut montrer que pour que l'inflation résolve tous ces problèmes, elle doit avoir eu lieu à des époques extrêmement reculées et chaudes de l'histoire de l'univers (entre  $10^{14}$  et  $10^{19}$  GeV, soit de  $10^{27}$  à  $10^{32}$  degrés...), c'est-à-dire au voisinage des époques de Planck et de grande unification. L'efficacité de l'inflation à résoudre la quasi-totalité des problèmes exhibés par le Big Bang lui a rapidement donné un statut de premier plan en cosmologie, bien que divers autres scénarios, souvent plus complexes et moins aboutis (pré Big Bang, défauts topologiques, univers ekpyrotique), aient été proposés pour résoudre les mêmes problèmes. Depuis l'observation détaillée des anisotropies du fond diffus cosmologique, les modèles d'inflation sont sortis considérablement renforcés. Leur accord avec l'ensemble des observations allié à l'élégance du concept font de l'inflation le scénario de loin le plus intéressant pour les problématiques qu'il aborde.

La phase d'inflation en elle-même se compose d'une expansion extrêmement rapide de l'univers (pouvant durer un temps assez long), à l'issue de laquelle la dilution causée par cette expansion rapide est telle qu'il n'existe essentiellement plus aucune particule dans l'univers, mais que celui-ci est empli d'une forme d'énergie très homogène. Cette énergie est alors convertie de façon très efficace en particules qui très vite vont se mettre à interagir et à s'échauffer. Ces deux phases qui closent l'inflation sont appelées préchauffage pour la création « explosive » de particules et réchauffage pour leur thermalisation. Si le mécanisme général de l'inflation est parfaitement bien compris (quoique de très nombreuses variantes existent), celui du préchauffage et du réchauffage le sont beaucoup moins et sont toujours l'objet de nombreuses recherches.

Articles détaillés : Inflation cosmique, Préchauffage (cosmologie) et Réchauffage (cosmologie).

## L'ère de Planck — La cosmologie quantique

Au-delà de la phase d'inflation, et plus généralement à des températures de l'ordre de la température de Planck, on entre dans le domaine où les théories physiques actuelles ne deviennent plus valables, car nécessitant un traitement de la relativité générale incluant les concepts de la mécanique quantique. Cette théorie de la gravité quantique, non découverte à ce jour mais qui sera peut-être issue de la théorie des cordes encore en développement, laisse à l'heure actuelle place à des spéculations nombreuses concernant l'univers à cette époque dite ère de Planck. Plusieurs auteurs, dont Stephen Hawking, ont proposé diverses pistes de recherche pour tenter de décrire l'univers à ces époques. Ce domaine de recherche est ce que l'on appelle la cosmologie quantique.



Articles détaillés : Ère de Planck et Cosmologie quantique.

## Les problèmes apparents posés par le Big Bang et leurs solutions

L'étude des modèles de Big Bang révèle un certain nombre de problèmes inhérents à ce type de modèle. En l'absence de modifications, le modèle naïf du Big Bang apparaît peu convaincant, car il nécessite de supposer qu'un certain nombre de quantités physiques sont soit extrêmement grandes, soit extrêmement petites par rapport aux valeurs que l'on pourrait naïvement penser leur attribuer. En d'autres termes, le Big Bang semble nécessiter d'ajuster un certain nombre de paramètres à des valeurs inattendues pour pouvoir être viable. Ce type d'ajustement fin de l'univers est considéré comme problématique dans tout modèle physique (en rapport avec la cosmologie ou pas, d'ailleurs), au point que le Big Bang pourrait être considéré comme un concept posant autant de problèmes qu'il n'en résout, rendant cette solution peu attractive, malgré ses succès à expliquer nombre d'observations. Fort heureusement, des scénarios existent, en particulier l'inflation cosmique, qui, inclus dans les modèles de Big Bang, permettent d'éviter les observations initialement considérées comme étant problématiques. Il est ainsi possible d'avoir aujourd'hui une vision unifiée du contenu matériel, de la structure, de l'histoire et de l'évolution de l'univers, appelée par analogie avec la physique des particules le modèle standard de la cosmologie.

### Le problème de l'horizon

Article détaillé : Problème de l'horizon.

Les observations indiquent que l'univers est homogène et isotrope. Il est facile de montrer à l'aide des équations de Friedmann qu'un univers homogène et isotrope à un instant donné va le rester. Par contre, le fait que l'univers soit homogène et isotrope dès l'origine est plus difficile à justifier.

À l'exception d'arguments esthétiques et de simplicité, il n'existe pas a priori de raison valable de supposer que la nature ait choisi que l'univers soit aussi homogène et isotrope que ce que l'on observe. Aucun mécanisme satisfaisant n'explique par ailleurs pourquoi il devrait exister de petits écarts à cette homogénéité, comme ceux qui sont observés dans les anisotropies du fond diffus cosmologique et qui seraient responsables de la formation des grandes structures dans l'univers (galaxie, amas de galaxies, etc.).

Cette situation est insatisfaisante et on a longtemps cherché à proposer des mécanismes qui, partant de conditions initiales relativement génériques, pourraient expliquer pourquoi l'univers a évolué vers l'état observé à notre ère. On peut en effet montrer que deux régions distantes de l'univers observable sont tellement éloignées l'une de l'autre qu'elles n'ont pas eu le temps d'échanger une quelconque information, quand bien même elles étaient bien plus proches l'une de l'autre par le passé qu'elles ne le sont aujourd'hui. Le fait que ces régions distantes présentent essentiellement les mêmes caractéristiques reste donc difficile à justifier. Ce problème est connu sous le nom de problème de l'horizon.

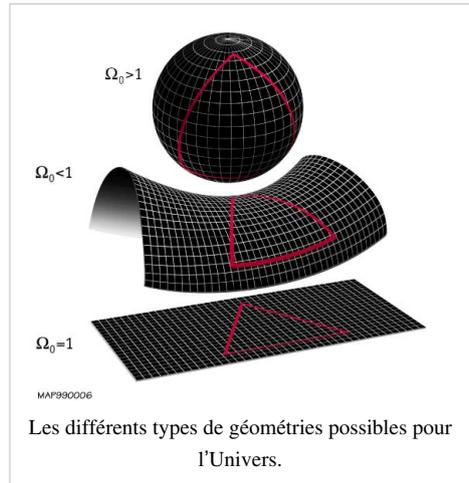
## Problème de la platitude

Article détaillé : Problème de la platitude.

Un autre problème qui apparaît quand on considère l'étude de l'évolution de l'univers est celui de son éventuel rayon de courbure.

La relativité générale indique que si la répartition de matière est homogène dans l'univers, alors la géométrie de celui-ci ne dépend que d'un paramètre, appelé courbure spatiale. Intuitivement, cette quantité donne l'échelle de distance au-delà de laquelle la géométrie euclidienne (comme le théorème de Pythagore) cesse d'être valable. Par exemple, la somme des angles d'un triangle de taille gigantesque (plusieurs milliards d'années-lumière) pourrait ne pas être égale à 180 degrés. Il reste parfaitement possible que de tels effets, non observés, n'apparaissent qu'à des distances bien plus grandes que celles de l'univers observable.

Néanmoins un problème apparaît si l'on remarque que cette échelle de longueur, appelée rayon de courbure, a tendance à devenir de plus en plus petite par rapport à la taille de l'univers observable. En d'autres termes, si le rayon de courbure était à peine plus grand que la taille de l'univers observable il y a 5 milliards d'années, il devrait être aujourd'hui plus petit que cette dernière, et les effets géométriques sus-mentionnés devraient devenir visibles. En continuant ce raisonnement, il est possible de voir qu'à l'époque de la nucléosynthèse le rayon de courbure devait être immensément plus grand que la taille de l'univers observable pour que les effets dus à la courbure ne soient pas encore visibles aujourd'hui. Le fait que le rayon de courbure soit encore aujourd'hui plus grand que la taille de l'univers observable est connu sous le nom de problème de la platitude.



## Problème des monopôles

Article détaillé : Problème des monopôles.

La physique des particules prévoit l'apparition progressive de nouvelles particules lors du refroidissement résultant de l'expansion de l'univers.

Certaines sont produites lors d'un phénomène appelé transition de phase que l'on pense générique dans l'univers primordial. Ces particules, dont certaines sont appelées monopôles, ont la particularité d'être stables, extrêmement massives (ordinairement  $10^{15}$  fois plus que le proton) et très nombreuses. Si de telles particules existaient, leur contribution à la densité de l'univers devrait en fait être considérablement plus élevée que celle de la matière ordinaire.

Or, si une partie de la densité de l'univers est due à des formes de matière mal connues (voir plus bas), il n'y a certainement pas la place pour une proportion significative de monopôles. Le problème des monopôles est donc la constatation qu'il n'existe pas en proportion significative de telles particules massives dans l'univers, alors que la physique des particules prédit naturellement leur existence avec une abondance très élevée.

## Problème de la formation des structures

Article détaillé : Problème de la formation des structures.

Si l'observation révèle que l'univers est homogène à grande échelle, elle révèle aussi qu'il présente des hétérogénéités importantes à plus petite échelle (planètes, étoiles, galaxies, etc.). Le fait que l'univers présente des hétérogénéités plus marquées à petite échelle n'est pas évident en soi. L'on sait expliquer comment, dans certaines circonstances, une petite hétérogénéité dans la distribution de matière peut croître jusqu'à former un objet astrophysique significativement plus compact que son environnement : c'est ce que l'on appelle le mécanisme d'instabilité

gravitationnelle, ou instabilité de Jeans (du nom de James Jeans). Cependant, pour qu'un tel mécanisme se produise, il faut supposer la présence initiale d'une petite hétérogénéité, et de plus la variété des structures astrophysiques observées indique que la répartition en amplitude et en taille de ces hétérogénéités initiales suivait une loi bien précise, connue sous le nom de spectre de Harrison-Zeldovitch. Les premiers modèles de Big Bang étaient dans l'incapacité d'expliquer la présence de telles fluctuations. On parlait alors du problème de la formation des structures.

## Solutions proposées

### Sur le problème de l'horizon

Les problèmes de l'horizon et de la platitude ont une origine commune. Le problème de l'horizon vient du fait qu'à mesure que le temps passe, l'on a accès à des régions de plus en plus grandes, et contenant de plus en plus de matière. Par exemple, avec une expansion dictée par de la matière ordinaire, un nombre croissant de galaxies est visible au cours du temps. Il est donc surprenant que celles-ci possèdent les mêmes caractéristiques.

On se rend compte que ce problème pourrait être résolu si on imaginait qu'une certaine information sur l'état de l'univers ait pu se propager extrêmement rapidement tôt dans l'histoire de l'univers. Dans un tel cas, des régions extrêmement distantes les unes des autres pourraient avoir échangé suffisamment d'information pour qu'il soit possible qu'elles soient dans des configurations semblables. La relativité restreinte stipule cependant que rien ne peut se déplacer plus vite que la lumière, aussi paraît-il difficilement imaginable que le processus proposé soit possible.

Néanmoins, si on suppose que l'expansion de l'univers est très rapide et se fait à taux d'expansion constant, alors on peut contourner la limitation de la relativité restreinte. En effet, dans un tel cas, la distance entre deux régions de l'univers croît exponentiellement au cours du temps, tandis que la taille de l'univers observable reste constante. Une région initialement très petite et homogène va donc avoir la possibilité de prendre une taille démesurée par rapport à la région de l'univers qui est observable. Quand cette phase à taux d'expansion constant s'achève, la région homogène de l'univers dans laquelle nous nous trouvons peut alors être immensément plus grande que celle qui est accessible à nos observations. Quand bien même la phase d'expansion classique reprend son cours, il devient naturel d'observer un univers homogène sur des distances de plus en plus grandes, tant que les limites de la région homogène initiale ne sont pas atteintes. Un tel scénario nécessite que l'expansion de l'univers puisse se faire à taux constant, ou plus généralement de façon accélérée (la vitesse à laquelle deux régions distantes s'éloignent doit croître avec le temps). Les équations de Friedmann stipulent que cela est possible, mais au prix de l'hypothèse qu'une forme de matière atypique existe dans l'univers (elle doit avoir une pression négative).

### Sur le problème de la platitude

Le problème de la platitude peut se résoudre de façon essentiellement identique. Initialement, le problème vient du fait que le rayon de courbure croît moins vite que la taille de l'univers observable. Or cela peut ne plus être vrai si la loi qui gouverne l'expansion est différente de celle qui gouverne l'expansion d'un univers rempli de matière ordinaire. Si en lieu et place de celle-ci l'on imagine qu'une autre forme de matière aux propriétés atypiques existe (que sa pression soit négative), alors on peut montrer que dans un tel cas, le rayon de courbure va croître plus vite que la taille de l'univers observable. Si une telle phase d'expansion s'est produite dans le passé et a duré suffisamment longtemps, alors il n'est plus surprenant que le rayon de courbure ne soit pas mesurable.

### Sur le problème des monopôles

Enfin, le problème des monopôles est naturellement résolu avec une phase d'expansion accélérée, car celle-ci a tendance à diluer toute la matière ordinaire de l'univers. Cela amène un nouveau problème : la phase d'expansion accélérée laisse un univers homogène, spatialement plat, sans reliques massives, mais vide de matière. Il faut donc repeupler l'univers avec de la matière ordinaire à l'issue de cette phase d'expansion accélérée.

Le scénario de l'inflation cosmique, proposé par Alan Guth au début des années 1980 répond à l'ensemble de ces critères. La forme de matière atypique qui cause la phase d'expansion accélérée est ce que l'on appelle un champ scalaire (souvent appelé inflaton dans ce contexte), qui possède toutes les propriétés requises. Il peut être à l'origine du démarrage de cette phase accélérée si certaines conditions favorables génériques se trouvent réunies en un endroit de l'univers. À l'issue de cette phase d'expansion accélérée, c'est le champ scalaire lui-même responsable de cette phase d'expansion qui devient instable et se désintègre en plusieurs étapes en particules du modèle standard au cours d'un ensemble de processus complexes appelés préchauffage et réchauffage (voir plus haut).

Les premiers modèles d'inflation souffraient d'un certain nombre de problèmes techniques, notamment les circonstances qui donnaient lieu au démarrage de la phase d'expansion accélérée et à son arrêt étaient peu satisfaisantes. Les modèles d'inflation plus récents évitent ces écueils, et proposent des scénarios tout à fait plausibles pour décrire une telle phase.

### Sur la formation des grandes structures

De plus l'inflaton possède, comme toute forme de matière, des fluctuations quantiques (résultat du principe d'indétermination d'Heisenberg). Une des conséquences inattendues de l'inflation est que ces fluctuations, initialement de nature quantique, évoluent durant la phase d'expansion accélérée pour devenir des variations classiques ordinaires de densité. Par ailleurs le calcul du spectre de ces fluctuations effectué dans le cadre de la théorie des perturbations cosmologiques montre qu'il suit précisément les contraintes du spectre de Harrison-Zeldovitch.

Ainsi, l'inflation permet d'expliquer l'apparition de petits écarts à l'homogénéité de l'univers, résolvant du même coup le problème de la formation des structures susmentionné. Ce succès inattendu de l'inflation a immédiatement contribué à en faire un modèle extrêmement attractif, d'autant que le détail des inhomogénéités créées lors de la phase d'inflation peut être confronté aux inhomogénéités existant dans l'univers actuel.

L'accord remarquable entre des prédictions et les observations, observé par l'étude des données relatives aux fluctuations du fond diffus cosmologique observé entre autres par les satellites COBE et WMAP (et bientôt également par le satellite Planck), ainsi que les catalogues de galaxies comme celui réalisé par la mission SDSS est sans nul doute un des plus grands succès de la cosmologie du XX<sup>e</sup> siècle.

Il n'en demeure pas moins vrai que des alternatives à l'inflation ont été proposées malgré les succès indéniables de celle-ci. Parmi ceux-ci, citons le pré Big Bang proposé entre autres par Gabriele Veneziano, et l'univers ekpyrotique. Ces modèles sont globalement considérés comme moins génériques, moins esthétiques et moins achevés que les modèles d'inflation. Ce sont donc ces derniers qui à l'heure actuelle sont de loin considérés comme les plus réalistes.

## Le modèle standard de la cosmologie

Article détaillé : Modèle standard de la cosmologie.

La construction de ce qui est désormais appelé le modèle standard de la cosmologie est la conséquence logique de l'idée du Big Bang proposée dans la première partie du XX<sup>e</sup> siècle. Ce modèle standard de la cosmologie, qui tire son nom par analogie avec le modèle standard de la physique des particules, offre une description de l'univers compatible avec l'ensemble des observations de l'univers. Il stipule en particulier les deux points suivants :

- L'univers observable est issu d'une phase dense et chaude (Big Bang), durant laquelle un mécanisme a permis à la région qui nous est accessible d'être très homogène mais de présenter de petits écarts à l'homogénéité parfaite. Ce

mécanisme est probablement une phase de type inflation, quoique d'autres mécanismes aient été proposés.

- L'univers actuel est rempli de plusieurs formes de matières :
  - Les photons, c'est-à-dire les particules représentant toute forme de rayonnement électromagnétique,
  - Les neutrinos,
  - La matière baryonique, qui forme les atomes,
  - Une ou plusieurs formes de matière inconnues en laboratoire mais prédites par la physique des particules appelées matière noire, responsable entre autres de la structure des galaxies, bien plus massives que l'ensemble des étoiles qui les composent,
  - Une forme d'énergie aux propriétés inhabituelles, appelée énergie noire ou constante cosmologique, responsable de l'accélération de l'expansion de l'univers observée aujourd'hui (et probablement sans rapport direct avec l'inflation).

Un très grand nombre d'observations astronomiques rendent ces ingrédients indispensables pour décrire l'univers que nous connaissons. La recherche en cosmologie vise essentiellement à déterminer l'abondance et les propriétés de ces formes de matière, ainsi qu'à contraindre le scénario d'expansion accélérée de l'univers primordial (ou d'en proposer d'autres). Trois ingrédients de ce modèle standard de la cosmologie nécessitent de faire appel à des phénomènes physiques non observés en laboratoire : l'inflation, la matière noire et l'énergie noire. Néanmoins, les indications observationnelles en faveur de l'existence de ces trois phénomènes sont telles qu'il semble extrêmement difficile d'envisager d'éviter d'y faire appel. Il n'existe de fait aucun modèle cosmologique satisfaisant s'affranchissant d'un ou plusieurs de ces ingrédients.

## Quelques idées fausses sur le Big Bang

### Le Big Bang ne se réfère pas à un instant « initial » de l'histoire de l'univers

Il indique seulement que celui-ci a connu une période dense et chaude. De nombreux modèles cosmologiques décrivent de façons très diverses cette phase dense et chaude. Le statut de cette phase a d'ailleurs été soumis à maints remaniements. Dans un de ses premiers modèles, Georges Lemaître proposait un état initial dont la matière aurait la densité de la matière nucléaire ( $10^{15} \text{ g/cm}^3$ ). Lemaître considérait (à juste titre) qu'il était difficile de prétendre connaître avec certitude le comportement de la matière à de telles densités, et supposait que c'était la désintégration de ce noyau atomique géant et instable qui avait initié l'expansion (hypothèse de l'atome primitif). Auparavant, Lemaître avait en 1931 fait remarquer que la mécanique quantique devait invariablement être invoquée pour décrire les tout premiers instants de l'histoire de l'univers, jetant par là les bases de la cosmologie quantique, et que les notions de temps et d'espace perdaient probablement leur caractère usuel<sup>[13]</sup>. Aujourd'hui, certains modèles d'inflation supposent par exemple un univers éternel<sup>[14]</sup>, d'autres modèles comme celui du pré Big Bang supposent un état initial peu dense mais en contraction suivi d'une phase de rebond, d'autres modèles encore, basés sur la théorie des cordes, prédisent que l'univers observable n'est qu'un objet appelé « brane » (tiré du mot anglais « *membrane* », identique à sa traduction française) plongé dans un espace à plus de quatre dimensions (le « *bulk* »), le big bang et le démarrage de l'expansion étant dus à une collision entre deux branes (univers ekpyrotique). Cependant, c'est lors de cette phase dense et chaude que se forment les particules élémentaires que nous connaissons aujourd'hui, puis, plus tard toutes les structures que l'on observe dans l'univers. Ainsi reste-t-il légitime de dire que l'univers est né du Big Bang, au sens où l'univers tel que nous le connaissons s'est structuré à cette époque.

## **Le Big Bang n'est pas une explosion, il ne s'est pas produit « quelque part »**

Le Big Bang ne s'est pas produit en un point d'où aurait été éjectée la matière qui forme aujourd'hui les galaxies, contrairement à ce que son nom suggère et à ce que l'imagerie populaire véhicule souvent<sup>[15]</sup>. À l'« époque » du Big Bang les conditions qui régnaient « partout » dans l'univers (du moins la région de l'univers observable) étaient identiques. Il est par contre vrai que les éléments de matière s'éloignaient alors très rapidement les uns des autres, du fait de l'expansion de l'univers. Le terme de Big Bang renvoie donc à la violence de ce mouvement d'expansion, mais pas à un « lieu » privilégié. En particulier il n'y a pas de « centre » du Big Bang ou de direction privilégiée dans laquelle il nous faudrait observer pour le voir. C'est l'observation des régions lointaines de l'univers (quelle que soit leur direction) qui nous permet de voir l'univers tel qu'il était par le passé (car la lumière voyageant à une vitesse finie, elle nous fait voir des objets lointains tels qu'ils étaient à une époque reculée, leur état actuel nous étant d'ailleurs inaccessible) et donc de nous rapprocher de cette époque. Ce qu'il nous est donné de voir aujourd'hui n'est pas l'époque du Big Bang lui-même, mais le fond diffus cosmologique, sorte d'écho lumineux de cette phase chaude de l'histoire de l'univers. Ce rayonnement est essentiellement uniforme quelle que soit la direction dans laquelle on l'observe, ce qui indique que le Big Bang s'est produit de façon extrêmement homogène dans les régions qu'il nous est possible d'observer. La raison pour laquelle il n'est pas possible de voir jusqu'au Big Bang est que l'univers primordial est opaque au rayonnement du fait de sa densité élevée, de même qu'il n'est pas possible de voir directement le centre du Soleil et que l'on ne peut observer que sa surface. Voir l'article fond diffus cosmologique pour plus de détails.

## **Implications philosophiques et statut épistémologique**

L'aspect étonnamment « créationniste » que suggère le Big Bang — du moins dans son interprétation naïve — a bien sûr été à l'origine de nombreuses réflexions, y compris hors des cercles scientifiques, puisque pour la première fois était entrevue la possibilité que la science apporte des éléments de réponse à des domaines jusque là réservés à la philosophie et la théologie. Ce point de vue sera en particulier exprimé par le pape Pie XII (voir ci-dessous).

Remarquons au passage que la chronologie suggérée par le Big Bang va à l'inverse des convictions des deux grands architectes des théories de la gravitation, Isaac Newton et Albert Einstein, qui croyaient que la Création était éternelle. Dans le cas d'Einstein, toutefois, il ne semble pas avéré qu'il y avait un préconçu philosophique pour motiver cette intuition, qui pourrait être avant tout issue de motivations physiques (voir l'article univers d'Einstein).

Lemaître élaborera un point de vue différent de celui exprimé par le pape : la cosmologie et la science en général, n'a pas vocation à conforter ou à infirmer ce qui est du domaine du religieux (ou philosophique). Elle se contente de proposer un scénario réaliste permettant de décrire de façon cohérente l'ensemble des observations dont on dispose à un instant donné. Pour l'heure, l'interprétation des décalages vers le rouge en termes d'expansion de l'univers est établie au-delà de tout doute raisonnable, aucune autre interprétation ne résistant à un examen sérieux, ou étant motivée par des arguments physiques pertinents, et l'existence de la phase dense et chaude est également avérée (voir plus haut).

## **Critiques de la part de scientifiques**

Par contre les convictions ou les réticences des acteurs qui ont participé à l'émergence du concept ont joué un rôle dans ce processus de maturation, et il a souvent été dit que les convictions religieuses de Lemaître l'avaient aidé à proposer le modèle du Big Bang, bien que cela ne repose pas sur des preuves tangibles<sup>[16]</sup>. Notons à l'inverse que l'idée que tout l'univers eût pu avoir été créé à un instant donné paraissait à Fred Hoyle bien plus critiquable que son hypothèse de création lente mais continue de matière dans la théorie de l'état stationnaire, ce qui est sans doute à l'origine de son rejet du Big Bang. De nombreux autres exemples de réticences sont connus chez des personnalités du monde scientifique, en particulier :

- Hannes Alfvén, prix Nobel de physique 1970 pour ses travaux sur la physique des plasmas, qui rejeta en bloc le Big Bang, préférant lui proposer sa propre théorie, l'univers plasma, reposant sur une prééminence des

phénomènes électromagnétiques sur les phénomènes gravitationnels à grande échelle, théorie aujourd'hui totalement abandonnée ;

- Edward Milne, qui proposa des cosmologies newtoniennes, et fut d'ailleurs le premier à le faire (quoiqu'après la découverte de la relativité générale), dans lesquelles l'expansion était interprétée comme des mouvements de galaxies dans un espace statique et minkowskien (voir univers de Milne) ;
- De façon plus posée, Arno Allan Penzias et Robert Woodrow Wilson qui reçurent le prix Nobel de physique pour leur découverte du fond diffus cosmologique, apportant ainsi la preuve décisive du Big Bang, ont reconnu qu'ils étaient adeptes de la théorie de l'état stationnaire. Wilson déclara notamment<sup>[17]</sup> ne pas avoir eu la certitude de la pertinence de l'interprétation cosmologique de leur découverte :

« Arno et moi, bien sûr, étions très heureux d'avoir une réponse de quelque nature que ce soit à notre problème. Toute explication raisonnable nous aurait satisfait. [...] Nous nous étions habitués à l'idée d'une cosmologie de l'état stationnaire. [...] Philosophiquement, j'aimais la cosmologie de l'état stationnaire. Aussi ai-je pensé que nous devions rapporter notre résultat comme une simple mesure : au moins la mesure pourrait rester vraie après que la cosmologie derrière s'avèrerait fausse. »

Même aujourd'hui, et malgré ses succès indéniables, le Big Bang rencontre encore une opposition (quoique très faible) de la part d'une partie du monde scientifique, y compris chez certains astronomes. Parmi ceux-ci figurent ses opposants historiques comme Geoffrey Burbidge, Fred Hoyle et Jayant Narlikar, qui après avoir finalement abandonné la théorie de l'état stationnaire, en ont proposé une version modifiée, toujours basée sur la création de matière, mais avec une succession de phases d'expansion et de recontraction, la théorie de l'état quasi stationnaire<sup>[18]</sup>, n'ayant pas rencontré de succès probant en raison de leur incapacité à faire des prédictions précises et compatibles avec les données observationnelles actuelles, notamment celles du fond diffus cosmologique<sup>[19]</sup>. Une des critiques récurrentes du Big Bang porte sur l'éventuelle incohérence entre l'âge de l'univers, plus jeune que celui d'objets lointains, comme cela a été le cas pour les galaxies Abell 1835 IR1916 et HUDF-JD2, mais la plupart du temps, ces problèmes d'âge résultent surtout de mauvaises estimations de l'âge de ces objets (voir les articles correspondants), ainsi qu'une sous-estimation des barres d'erreur correspondantes<sup>[20]</sup>.

Dans le monde francophone, Jean-Claude Pecker, membre de l'académie des sciences, Jean-Marc Bonnet-Bidaud, astrophysicien au Commissariat à l'énergie atomique émettent des critiques sur le Big Bang<sup>[21]</sup>. Christian Maignan, chercheur au Groupe de recherches en astronomie (GRAAL) de l'université de Montpellier continue à défendre fermement la réalité du Big Bang mais se montre néanmoins insatisfait du modèle standard de la cosmologie. Il critique notamment ce qu'il décrit comme « la soumission inconditionnelle au modèle d'univers homogène et isotrope » (c'est-à-dire satisfaisant au Principe cosmologique) qui conduit selon lui à des difficultés<sup>[22]</sup>. La plupart de ces critiques ne sont cependant pas étayées par des éléments scientifiques concrets, et ces personnes ne comptent pas de publications sur le sujet dans des revues scientifiques à comité de lecture<sup>[23]</sup>. Il n'en demeure pas moins que la presse scientifique grand public se fait souvent l'écho de telles positions marginales, offrant parfois une vision faussée du domaine à ses lecteurs<sup>[24]</sup>.

## Statut actuel

Les progrès constants dans le domaine de la cosmologie observationnelle donnent une assise unanimement considérée comme définitive au Big Bang, du moins parmi les chercheurs travaillant dans le domaine<sup>[25]</sup>. Il n'existe d'autre part aucun modèle concurrent sérieux au Big Bang. Le seul qui ait jamais existé, la théorie de l'état stationnaire, est aujourd'hui complètement marginal du fait de son incapacité à expliquer les observations élémentaires du fond diffus cosmologique, de l'abondance des éléments légers et surtout de l'évolution des galaxies. Ses auteurs se sont d'ailleurs finalement résignés à en proposer au début des années 1990 une version significativement différente, la théorie de l'état quasi stationnaire, qui comme son nom ne l'indique pas comporte un cycle de phases denses et chaudes, lors desquelles les conditions sont essentiellement semblables à celles du Big Bang.

Il n'existe désormais pas d'argument théorique sérieux pour remettre en cause le Big Bang. Celui-ci est en effet une conséquence relativement générique de la théorie de la relativité générale qui n'a à l'heure actuelle pas été mise en défaut par les observations. Remettre en cause le Big Bang nécessiterait donc soit de rejeter la relativité générale (malgré l'absence d'éléments observationnels allant dans ce sens), soit de supposer des propriétés extrêmement exotiques d'une ou plusieurs formes de matière. Même dans ce cas il semble impossible de nier que la nucléosynthèse primordiale ait eu lieu, ce qui implique que l'univers soit passé par une phase un milliard de fois plus chaude et un milliard de milliards de milliards de fois plus dense qu'aujourd'hui. De telles conditions rendent le terme de Big Bang légitime pour parler de cette époque dense et chaude. De plus, les seuls modèles réalistes permettant de rendre compte de la présence des grandes structures dans l'univers supposent que celui-ci a connu une phase dont les températures étaient entre  $10^{26}$  et  $10^{29}$  fois plus élevées qu'aujourd'hui.

Cela étant, il arrive que la presse scientifique grand public se fasse parfois l'écho de telles positions marginales'. Il est par contre faux de dire que l'intégralité du scénario décrivant cette phase dense et chaude est comprise. Plusieurs époques ou phénomènes en sont encore mal connus, comme en particulier celle de la baryogénèse, qui a vu se produire un léger excès de matière par rapport à l'antimatière avant la disparition de cette dernière, ainsi que les détails de la fin de la phase d'inflation (si celle-ci a effectivement eu lieu), en particulier le préchauffage et le réchauffage : si les modèles de Big Bang sont en constante évolution, le concept général est en revanche très difficilement discutable.

## Pie XII et le Big Bang

L'illustration la plus révélatrice sans doute des réactions suscitées par l'invention du Big Bang est celle du pape Pie XII. Celui-ci, dans un discours resté célèbre<sup>[26]</sup> très explicitement intitulé *Les preuves de l'existence de Dieu à la lumière de la science actuelle de la nature*, fait le point sur les dernières découvertes en astrophysique, physique nucléaire et cosmologie, faisant d'ailleurs preuve d'une connaissance aigüe de la science de son temps. Il ne mentionne aucunement la théorie de l'état stationnaire, mais tire de l'observation de l'expansion et de la cohérence entre âge estimé de l'univers et autres méthodes de datation la preuve de la création du monde :

« [...] Avec le même regard limpide et critique dont, il [l'esprit éclairé et enrichi par les connaissances scientifiques] examine et juge les faits, il y entrevoit et reconnaît l'œuvre de la Toute-Puissance créatrice, dont la vérité, suscitée par le puissant « Fiat » prononcé il y a des milliards d'années par l'Esprit créateur, s'est déployée dans l'univers [...]. Il semble, en vérité, que la science d'aujourd'hui, remontant d'un trait des millions de siècles, ait réussi à se faire témoin de ce « Fiat Lux » initial, de cet instant où surgit du néant avec la matière, un océan de lumière et de radiations, tandis que les particules des éléments chimiques se séparaient et s'assemblaient en millions de galaxies. »

Il conclut son texte en affirmant :

« Ainsi, création dans le temps ; et pour cela, un Créateur ; et par conséquent, Dieu ! Le voici, donc — encore qu'implicite et imparfait — le mot que Nous demandions à la science et que la présente génération attend d'elle. [...] »

N'approuvant pas une telle interprétation de découvertes scientifiques, Lemaître demanda audience à Pie XII, lui faisant part de son point de vue que science et foi ne devaient pas être mêlées<sup>[27]</sup>. Il est souvent dit que Pie XII se rétracta de ce premier commentaire lors d'un discours prononcé l'année suivante, devant un auditoire d'astronomes<sup>[28]</sup>. Sans parler de rétractation, Pie XII n'évoque plus la création de l'univers, mais invite les astronomes à « acquérir un perfectionnement plus profond de l'image astronomique de l'univers ».

## Notes et références

- [1] [http://fr.wikipedia.org/w/index.php?title=Big\\_Bang&action=edit](http://fr.wikipedia.org/w/index.php?title=Big_Bang&action=edit)
- [2] Littéralement, cette expression pourrait se traduire en français par « Grand Boum », mais seule la version anglaise est utilisée, et ce même dans d'autres langues que l'anglais, tant par la presse grand public ou par les auteurs de vulgarisation que par la littérature scientifique.
- [3] *The Gale Encyclopedia of Science*, Gale Group, 2000
- [4] site de la NASA (<http://map.gsfc.nasa.gov/site/faq.html>)
- [5] [http://www.cnrs.fr/cw/dossiers/dosbig/decouv/xcroire/rayFoss/niv1\\_1.htm](http://www.cnrs.fr/cw/dossiers/dosbig/decouv/xcroire/rayFoss/niv1_1.htm)
- [6] Cette loi n'est que statistique. La galaxie d'Andromède, par exemple, se rapproche de la nôtre, qu'elle croisera dans quatre milliards d'années
- [7] Raghunathan Srianand, Patrick Petitjean & Cédric Ledoux, *The microwave background temperature at the redshift of 2.33771*, *Nature*, 408, 931 (2000), astro-ph/0012222 Voir en ligne (<http://adsabs.harvard.edu/abs/2000Natur.408..931S>).
- [8] Ce rayonnement existait cependant avant cette époque. La situation est identique à celle de la lumière du Soleil qui se propage lentement du centre du Soleil vers la surface et qui se propage ensuite librement de la surface jusqu'à nous. La zone que l'on peut observer est celle d'où a été émise la lumière pour la dernière fois et non celle où elle s'est formée.
- [9] D'où les titres *Les trois premières minutes de l'univers* et *La première seconde* des ouvrages de Steven Weinberg et Hubert Reeves.
- [10] La présence de ces neutrinos influe sur le taux d'expansion de l'univers (voir équations de Friedmann), et par suite sur la vitesse à laquelle l'univers se refroidit, et donc sur la durée de la nucléosynthèse, qui elle-même détermine en partie l'abondance des éléments qui sont synthétisés pendant celle-ci.
- [11] Voir par exemple Leo Stodolsky, *Some neutrino events of the 21st century*, in *Neutrino astrophysics*, comptes rendus du quatrième atelier SFB-375, château de Ringberg, Allemagne, 20-24 octobre 1997, page 178-181..
- [12] Si tel n'était pas le cas, un très fort rayonnement gamma serait émis du voisinage des régions où matière et antimatière coexisteraient. Un tel rayonnement n'est pas observé, bien qu'existent des sursauts gamma sporadiques.
- [13] Georges Lemaître, *The beginning of the World from the point of view of quantum theory*, *Nature*, 127, 706 (1931)
- [14] "L'inflation éternelle et ses conséquences" (<http://arxiv.org/abs/hep-th/0702178>) par Alan H Guth
- [15] , l'Observatoire de Paris, lien ([http://media4.obspm.fr/public/AMC/pages\\_redshift/bb-idee-big-bang.html](http://media4.obspm.fr/public/AMC/pages_redshift/bb-idee-big-bang.html))
- [16] Voir par exemple Georges Lemaître: el padre del big-bang (<http://www.unav.es/cryf/georgeslemaitreelpadredelbigbang.html>)
- [17] Robert Woodrow Wilson, « *Discovery of the cosmic microwave background* », dans *Modern cosmology in retrospect*, éd. B. Bertotti et al., Cambridge University Press (1990),
- [18] Voir la liste ([http://adsabs.harvard.edu/cgi-bin/nph-abs\\_connect?db\\_key=AST&sim\\_query=YES&ned\\_query=YES&aut\\_logic=OR&obj\\_logic=OR&author=Hoyle,+Fred&object=&start\\_mon=&start\\_year=&end\\_mon=&end\\_year=&tlt\\_req=YES&tlt\\_logic=AND&title=quasi+steady+state+cosmology&txt\\_logic=OR&text=&nr\\_to\\_return=100&start\\_nr=1&jou\\_pick=ALL&ref\\_stems=&data\\_and=ALL&group\\_and=ALL&start\\_entry\\_day=&start\\_entry\\_mon=&start\\_entry\\_year=&end\\_entry\\_day=&end\\_entry\\_mon=&end\\_entry\\_year=&min\\_score=&sort=SCORE&data\\_type=SHORT&aut\\_syn=YES&tlt\\_syn=YES&txt\\_syn=YES&aut\\_wt=1.0&obj\\_wt=1.0&tlt\\_wt=0.3&txt\\_wt=3.0&aut\\_wgt=YES&obj\\_wgt=YES&tlt\\_wgt=YES&txt\\_wgt=YES&tlt\\_sco=YES&txt\\_sco=YES&version=1](http://adsabs.harvard.edu/cgi-bin/nph-abs_connect?db_key=AST&sim_query=YES&ned_query=YES&aut_logic=OR&obj_logic=OR&author=Hoyle,+Fred&object=&start_mon=&start_year=&end_mon=&end_year=&tlt_req=YES&tlt_logic=AND&title=quasi+steady+state+cosmology&txt_logic=OR&text=&nr_to_return=100&start_nr=1&jou_pick=ALL&ref_stems=&data_and=ALL&group_and=ALL&start_entry_day=&start_entry_mon=&start_entry_year=&end_entry_day=&end_entry_mon=&end_entry_year=&min_score=&sort=SCORE&data_type=SHORT&aut_syn=YES&tlt_syn=YES&txt_syn=YES&aut_wt=1.0&obj_wt=1.0&tlt_wt=0.3&txt_wt=3.0&aut_wgt=YES&obj_wgt=YES&tlt_wgt=YES&txt_wgt=YES&tlt_sco=YES&txt_sco=YES&version=1)) des publications sur le sujet.
- [19] Voir la page professionnelle d'Edward L. Wright, « *Errors in the Steady State and Quasi-SS Models* (<http://www.astro.ucla.edu/~wright/stdstat.htm>) ».
- [20] Un objet dont l'âge est estimé à plus ou moins d'années est compatible avec un univers de 13,7 plus ou moins d'années. Un objet dont l'âge est estimé à 15 plus ou moins d'années est « marginalement » incompatible avec un univers de 13,7 plus ou moins d'années, mais uniquement si les barres d'erreurs ont effectivement une amplitude aussi faible.
- [21] Voir par exemple Jean-Claude Pecker, « Big Bang ? Pas Big Bang ? – Le débat sur les origines de l'Univers (<http://www.zetetique.ldh.org/bigbang.html>) », sur le site du cercle zététique, Jean-Marc Bonnet-Bidaud, « Big Bang : pourquoi il va exploser », *Ciel et Espace*, octobre 2004
- [22] Voir Christian Magnan, « Questions de cosmologie (<http://www.lacosmo.com/cosmo.html>) » et « Les gros mensonges des cosmologistes (<http://www.dogma.lu/txt/CM-MonsongesCosmologistes.htm>) ».
- [23] Voir les publications citées dans la littérature scientifique de Jean-Claude Pecker ([http://adsabs.harvard.edu/cgi-bin/nph-abs\\_connect?db\\_key=AST&qform=AST&sim\\_query=YES&ned\\_query=YES&aut\\_logic=OR&obj\\_logic=OR&author=Pecker,+J.&object=&start\\_mon=&start\\_year=&end\\_mon=&end\\_year=&tlt\\_logic=OR&title=&txt\\_logic=OR&text=&nr\\_to\\_return=100&start\\_nr=1&jou\\_pick=ALL&ref\\_stems=&data\\_and=YES&citation\\_link=YES&group\\_and=ALL&start\\_entry\\_day=&start\\_entry\\_mon=&start\\_entry\\_year=&end\\_entry\\_day=&end\\_entry\\_mon=&end\\_entry\\_year=&min\\_score=&sort=NDATE&data\\_type=SHORT&aut\\_syn=YES&tlt\\_syn=YES&txt\\_syn=YES&aut\\_wt=1.0&obj\\_wt=1.0&tlt\\_wt=0.3&txt\\_wt=3.0&aut\\_wgt=YES&obj\\_wgt=YES&tlt\\_wgt=YES&txt\\_wgt=YES&tlt\\_sco=YES&txt\\_sco=YES&version=1](http://adsabs.harvard.edu/cgi-bin/nph-abs_connect?db_key=AST&qform=AST&sim_query=YES&ned_query=YES&aut_logic=OR&obj_logic=OR&author=Pecker,+J.&object=&start_mon=&start_year=&end_mon=&end_year=&tlt_logic=OR&title=&txt_logic=OR&text=&nr_to_return=100&start_nr=1&jou_pick=ALL&ref_stems=&data_and=YES&citation_link=YES&group_and=ALL&start_entry_day=&start_entry_mon=&start_entry_year=&end_entry_day=&end_entry_mon=&end_entry_year=&min_score=&sort=NDATE&data_type=SHORT&aut_syn=YES&tlt_syn=YES&txt_syn=YES&aut_wt=1.0&obj_wt=1.0&tlt_wt=0.3&txt_wt=3.0&aut_wgt=YES&obj_wgt=YES&tlt_wgt=YES&txt_wgt=YES&tlt_sco=YES&txt_sco=YES&version=1)), celles de Jean-Marc Bonnet-Bidaud ([http://adsabs.harvard.edu/cgi-bin/nph-abs\\_connect?db\\_key=AST&qform=AST&sim\\_query=YES&ned\\_query=YES&aut\\_logic=OR&obj\\_logic=OR&author=Bonnet-Bidaud&object=&start\\_mon=&start\\_year=&end\\_mon=&end\\_year=&tlt\\_logic=OR&title=&txt\\_logic=OR&text=&nr\\_to\\_return=100&start\\_nr=1&jou\\_pick=ALL&ref\\_stems=&data\\_and=YES&citation\\_link=YES&group\\_and=ALL&start\\_entry\\_day=&start\\_entry\\_mon=&start\\_entry\\_year=&end\\_entry\\_day=&end\\_entry\\_mon=&end\\_entry\\_year=&min\\_score=&sort=NDATE&data\\_type=SHORT&aut\\_syn=YES&tlt\\_syn=YES&txt\\_syn=YES&aut\\_wt=1.0&obj\\_wt=1.0&tlt\\_wt=0.3&txt\\_wt=3.0&aut\\_wgt=YES&obj\\_wgt=YES&tlt\\_wgt=YES&txt\\_wgt=YES&tlt\\_sco=YES&txt\\_sco=YES&version=1](http://adsabs.harvard.edu/cgi-bin/nph-abs_connect?db_key=AST&qform=AST&sim_query=YES&ned_query=YES&aut_logic=OR&obj_logic=OR&author=Bonnet-Bidaud&object=&start_mon=&start_year=&end_mon=&end_year=&tlt_logic=OR&title=&txt_logic=OR&text=&nr_to_return=100&start_nr=1&jou_pick=ALL&ref_stems=&data_and=YES&citation_link=YES&group_and=ALL&start_entry_day=&start_entry_mon=&start_entry_year=&end_entry_day=&end_entry_mon=&end_entry_year=&min_score=&sort=NDATE&data_type=SHORT&aut_syn=YES&tlt_syn=YES&txt_syn=YES&aut_wt=1.0&obj_wt=1.0&tlt_wt=0.3&txt_wt=3.0&aut_wgt=YES&obj_wgt=YES&tlt_wgt=YES&txt_wgt=YES&tlt_sco=YES&txt_sco=YES&version=1)), et celles de Christian Magnan ([http://adsabs.harvard.edu/cgi-bin/nph-abs\\_connect?db\\_key=AST&qform=AST&sim\\_query=YES&ned\\_query=YES&aut\\_logic=OR&obj\\_logic=OR&](http://adsabs.harvard.edu/cgi-bin/nph-abs_connect?db_key=AST&qform=AST&sim_query=YES&ned_query=YES&aut_logic=OR&obj_logic=OR&)

author=Magnan,+C. &object=&start\_mon=&start\_year=&end\_mon=&end\_year=&tlt\_logic=OR&title=&txt\_logic=OR&text=&nr\_to\_return=100&start\_nr=1&jou\_pick=ALL&ref\_stems=&data\_and=YES&citation\_link=YES&group\_and=ALL&start\_entry\_day=&start\_entry\_mon=&start\_entry\_year=&end\_entry\_day=&end\_entry\_mon=&end\_entry\_year=&min\_score=&sort=NDATE&data\_type=SHORT&aut\_syn=YES&tlt\_syn=YES&txt\_syn=YES&aut\_wt=1.0&obj\_wt=1.0&tlt\_wt=0.3&txt\_wt=3.0&aut\_wgt=YES&obj\_wgt=YES&tlt\_wgt=YES&txt\_wgt=YES&tlt\_sco=YES&txt\_sco=YES&version=1)

- [24] Voir par exemple « Big Bang : il n'a peut-être jamais eu lieu », *Science et Vie*, avril 2006
- [25] Voir par exemple l'ensemble des articles de cosmologie basés sur les résultats de COBE (<http://www-spire.slaac.stanford.edu/spires/find/hep?c=ASJOA,396,L1>), WMAP (<http://www-spire.slaac.stanford.edu/spires/find/hep/www?rawcmd=c+astro-ph+0302209>) (<http://www-spire.slaac.stanford.edu/spires/find/hep/www?rawcmd=c+astro-ph+0603449>), ou SDSS (<http://www-spire.slaac.stanford.edu/spires/find/hep/www?rawcmd=c+astro-ph+0305492>) (<http://www-spire.slaac.stanford.edu/spires/find/hep/www?rawcmd=c+astro-ph+0403325>) (<http://www-spire.slaac.stanford.edu/spires/find/hep/www?rawcmd=c+astro-ph+0410239>) (<http://www-spire.slaac.stanford.edu/spires/find/hep/www?rawcmd=c+astro-ph+0507711>)
- [26] S. S. Pie XII, « Les preuves de l'existence de Dieu à la lumière de la science actuelle de la nature », discours prononcé à l'Académie pontificale des sciences le 22 novembre 1951, trad. parue dans *La Documentation catholique*, , 16 décembre 1951
- [27] Georges Lemaître, « Je pense que quiconque croit à un être suprême soutenant chaque être et chaque acte croit aussi que Dieu est également caché, et peut se réjouir de voir comment la physique actuelle fournit un voile cachant la création », manuscrit non publié, 1931.
- [28] Discours prononcé par S. S. Pie XII lors du congrès de l'union astronomique internationale à Rome (Italie), le 7 septembre 1952, trad. française dans *La Documentation catholique*, , 5 octobre 1952

## Bibliographie

- Voir Ouvrages grand public sur la cosmologie : niveau élémentaire (collège ou lycée)
- Voir Ouvrages spécialisés sur la cosmologie : niveau avancé (cycle universitaire)

## Annexes

### Articles connexes

- Historique du Big Bang

#### Concepts fondamentaux

- Relativité restreinte
- Relativité générale
- Cosmogonie
- Cosmologie
- Expansion de l'Univers
- Fond diffus cosmologique
- Nucléosynthèse primordiale
- Inflation cosmique
- Big Bounce
- Big Crunch
- Big Rip
- Liste de problèmes non résolus de la physique

#### Fondateurs du modèle

- Albert Einstein
- Alexandre Friedmann
- Georges Lemaître
- Edwin Hubble
- George Gamow
- Arno Allan Penzias
- Robert Woodrow Wilson
- James Peebles

- Alan Guth

## Liens externes

- Dossier Sagascience du CNRS : Big bang (<http://www.cnrs.fr/cw/dossiers/dosbig/>)
- Vidéo-conférence (<http://www.canal-u.tv/canalu/content/view/full/103426>) sur le thème : « Le Big Bang » (intervention de Marc Lachièze-Rey)
- ([en](http://www.astro.ucla.edu/~wright/cosmolog.htm)) Ned Wright's Cosmology Tutorial (<http://www.astro.ucla.edu/~wright/cosmolog.htm>), initiation à la cosmologie, sur le site professionnel d'Edward L. Wright. Il existe un lien vers une version française.
- ([fr](http://luth2.obspm.fr/~luminet/Books/FL.html)) Présentation de l'ouvrage *L'Invention du big bang* (<http://luth2.obspm.fr/~luminet/Books/FL.html>) par son auteur Jean-Pierre Luminet
- Voir aussi Sites grand public sur la cosmologie
- ([fr](http://sites.radiofrance.fr/franceinter/em/lateteauccarre/index.php?id=86421)) Texte de l'explication de la théorie du Big Bang, *Le Big Bang en trois minutes* (<http://sites.radiofrance.fr/franceinter/em/lateteauccarre/index.php?id=86421>) par Christophe Galfard, le 23 octobre 2009
-  Portail de la cosmologie
-  Portail de l'astronomie
-  Portail de la physique

## Galaxie

 Cet article concerne les galaxies au sens général. Pour les articles homonymes, voir Galaxie (homonymie). Pour notre propre galaxie, voir Voie lactée.

Une **galaxie** est un assemblage d'étoiles, de gaz, de poussières et de matière noire, contenant parfois un trou noir supermassif en son centre.

La Voie lactée, la galaxie dans laquelle se trouve le Système solaire, compte quelques centaines de milliards d'étoiles ( $10^{11}$ )<sup>[1]</sup> et a une extension de l'ordre de 80 000 années-lumière. La plupart des galaxies typiques comportent un nombre similaire d'astres, mais il existe aussi des galaxies naines comptant à peu près une dizaine de milliards d'étoiles ( $10^{10}$ ), et des galaxies géantes comptant plusieurs milliers de milliards d'étoiles ( $10^{12}$ ). Sur la base de ces chiffres et de la taille de l'Univers observable, on estime que celui-ci compte quelques centaines de milliards de galaxies de masse significative. La population de galaxies naines est cependant très difficile à déterminer, du fait de leur masse et de leur luminosité très faibles. L'Univers dans son ensemble, dont l'extension réelle est inconnue, est susceptible de compter un nombre immensément plus grand de galaxies.



M51, la Galaxie du Tourbillon, un exemple typique de galaxie spirale.

Les galaxies en tant que systèmes stellaires de grande taille ont été mises en évidence dans le courant des années 1920, principalement par l'astronome américain Edwin Hubble, bien que des premières données indiquant ce fait remontent à 1914. Les galaxies sont de trois types morphologiques principaux : elliptiques, spirales, irrégulières. Une description plus étendue des types de galaxies a été donnée à la même époque par Edwin Hubble et est depuis nommée séquence de Hubble.

Toutes les étoiles ne sont pas situées dans les galaxies. S'il semble établi que c'est au sein des galaxies que se forment les étoiles, celles-ci sont susceptibles d'en être expulsées, soit du fait d'interactions entre galaxies, soit du fait de rencontres rapprochées entre une étoile et un astre très massif, tel un trou noir supermassif situé au centre d'une galaxie. On observe ainsi certaines étoiles dotées d'une vitesse élevée par rapport à leur galaxie, signe qu'elles n'y sont plus liées gravitationnellement. De telles étoiles sont de ce fait appelées « étoiles en fuite ». Plusieurs représentantes de cette classe sont connues, telles SDSS J090745.0+024507 et GRO J1655-40, toutes deux en train de quitter la Voie lactée. La première est probablement issue d'une rencontre rapprochée avec le trou noir central de notre Galaxie, Sgr A\*, la seconde est sans doute issue d'une supernova asymétrique dont le résidu compact a été expulsé de la région où l'explosion a eu lieu.

## Étymologie

Le mot « galaxie » provient du terme grec désignant notre propre galaxie, ὁ γαλαξίας / *ho galaxias* (« laiteux », sous-entendu κύκλος / *kyklos* « cercle »)<sup>[2]</sup>, dérivé du nom τὸ γάλα / *to gala* « lait ». On trouve aussi en grec ancien ὁ τοῦ γάλακτος κύκλος / *ho tou galaktos kyklos* « le cercle de lait »<sup>[3]</sup>, ou encore ὁ κύκλος γαλακτικός / *ho kyklos galaktikos*, « cercle laiteux »<sup>[réf. nécessaire]</sup>, à cause de son apparence dans le ciel. Dans la mythologie grecque, Zeus plaça son fils Héraclès, né de son union avec la mortelle Alcmène, sur le sein de son épouse Héra lorsqu'elle était endormie afin que le bébé devienne immortel en buvant son lait divin. Lorsque celle-ci se réveilla, elle se rendit compte qu'elle allaitait un bébé inconnu qu'elle repoussa, et un jet de lait aspergea le ciel, formant cette pâle bande lumineuse appelée « Voie lactée ».

Dans la littérature astronomique, le mot « Galaxie » muni d'un *G* majuscule se réfère à notre propre galaxie (la Voie lactée), afin de la distinguer des autres galaxies.

Avant la mise en évidence des galaxies, était employé le terme de « nébuleuse », qui décrivait tout objet diffus de la sphère céleste. Cette dénomination remonte à William Herschel, qui établissant son catalogue d'objets du ciel profond, utilisa le terme de « *nébuleuse spirale* » pour des objets tels que M31. Ceux-ci allaient plus tard être identifiés comme étant d'immenses agglomérations d'étoiles, et lorsque les distances entre elles commencèrent à être comprises, elles furent nommées « *univers-îles* ». Cependant, cette nomenclature tomba donc en désuétude au profit du terme « galaxie ».

## Identification des galaxies

Des dizaines de milliers de galaxies ont été recensées, parmi d'autres objets, à travers de nombreux catalogues astronomiques, tels que le catalogue Messier et le New General Catalogue, qui référencent également des nébuleuses, mais aussi plus spécifiquement les catalogues PGC, UGC, MCG, CGCG, IC, etc. Ainsi, la galaxie spirale barrée couramment appelée M109 est-elle également identifiée par les numéros NGC 3992, PGC 37617, UGC 6937, MCG+09-20-044, CGCG269-023, etc. Certaines galaxies remarquables ont reçu un nom d'usage (parfois plusieurs) couramment employé à la place des numéros d'identification, telles que par exemple la galaxie d'Andromède, les nuages de Magellan, les galaxies des Antennes, la galaxie du Tourbillon (également appelée *galaxie des Chiens de Chasse*), la galaxie du Sombrero, etc.

## Quelques ordres de grandeur

Une galaxie typique comme la Voie lactée comprend quelques centaines de milliards d'étoiles et a une taille de l'ordre de 100 000 années-lumière (une année-lumière équivaut à environ 9 500 milliards de kilomètres). De façon remarquable, ces chiffres peuvent s'exprimer uniquement en termes de diverses constantes fondamentales. Plus précisément, un raisonnement simple permet de relier la taille d'une galaxie au phénomène d'instabilité gravitationnelle qui voit un objet plus dense que le milieu ambiant se contracter sous certaines conditions du fait de son propre champ gravitationnel. Ceci se produit essentiellement quand un objet se refroidit brutalement, auquel cas sa pression baisse brutalement et ne peut plus contrer l'effet attractif de la gravité. Dans ce contexte, on prédit que la masse  $M_g$  et la taille  $R_g$  d'une galaxie sont vraisemblablement de l'ordre de :

$$M_g \sim \frac{\alpha^5}{\alpha_G^2} \left( \frac{m_p}{m_e} \right)^{\frac{1}{2}} m_p \simeq 1,5 \times 10^{11} M_\odot,$$

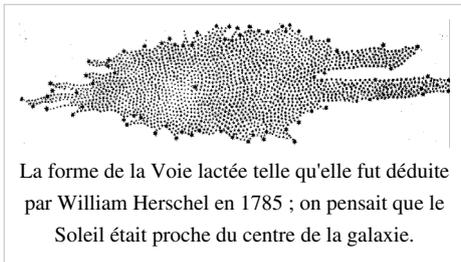
$$R_g \sim \frac{\alpha^3}{\alpha_G} \left( \frac{m_p}{m_e} \right)^{\frac{1}{2}} \lambda_e \simeq 74 \text{ kpc},$$

où  $\alpha$  et  $\alpha_G$  représentent respectivement la constante de structure fine (électromagnétique) et la constante de structure fine gravitationnelle, et  $m_p$  et  $m_e$  la masse du proton et de l'électron, respectivement.

Il faut plus de dix milliards d'années pour que la lumière des plus lointaines galaxies parvienne jusqu'à la Terre<sup>[4]</sup>.

## Historique des observations

### La Voie lactée



La forme de la Voie lactée telle qu'elle fut déduite par William Herschel en 1785 ; on pensait que le Soleil était proche du centre de la galaxie.

Article détaillé : Voie lactée.

Dès l'Antiquité, les philosophes tentèrent de saisir la nature de la bande lumineuse connue sous le nom de Voie lactée. Le philosophe grec Anaxagore (500—428 av. J.-C.) la concevait comme « l'effet de la lumière des astres qui ne sont pas offusqués par le Soleil ». De la même manière, Démocrite (450—370 av. J.-C.), suggéra qu'elle était due à un grand nombre de petites étoiles. Aristote, cependant, pensait que ce

qu'on observait était la combustion d'une partie de l'air, enflammé par le mouvement des astres, impliquant donc qu'elle se trouvât dans la sphère sublunaire.

L'astronome perse Al-Biruni (973 - 1048 apr. J.-C.) réfuta cependant cette proposition, en tentant de calculer la parallaxe de la Voie lactée, et en notant que puisqu'elle est nulle, elle doit se trouver à grande distance de la Terre, et donc hors de l'atmosphère. Il proposa également que la Voie lactée était une collection d'innombrables étoiles nébuleuses. Les preuves de cela vinrent en 1610, quand Galilée utilisa sa lunette astronomique pour étudier la Voie lactée et découvrit qu'elle était effectivement composée d'un nombre incalculable d'étoiles de faible éclat. Dans un traité de 1755, Emmanuel Kant, devançant le travail de Thomas Wright,

spécula à juste titre que notre galaxie pouvait être un corps en rotation d'un nombre incroyable d'étoiles tenues ensemble par des forces gravitationnelles, au même titre que le Système solaire. Le disque d'étoiles résultant peut être vu, en perspective, comme une bande dans le ciel, pour un observateur se trouvant en son sein. Kant avança également que quelques-unes des nébuleuses visibles dans le ciel nocturne pourraient être des galaxies.

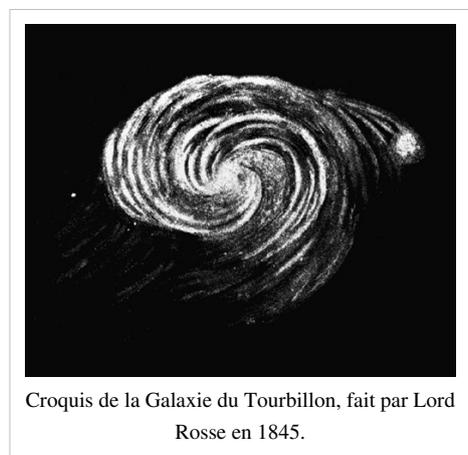
La première tentative de description de la forme de la Voie lactée et de la disposition du Soleil en son sein fut faite par William Herschel en 1785. Il compta avec beaucoup de prudence le nombre d'étoiles dans différentes régions du ciel. Il fit un diagramme de la forme de la Voie lactée et plaça le Système solaire près du centre. En 1920, Jacobus Kapteyn arriva à une image d'une petite galaxie ellipsoïdale (d'environ 15 000 parsecs de diamètre), avec le Soleil également proche du centre'. Une méthode différente, proposée par Harlow Shapley, fondée sur la position des amas globulaires, mena à une image radicalement différente de tout ce qui avait été vu jusque-là : un disque plat d'un diamètre d'environ 70 000 parsecs (soit un peu plus de 200 000 années-lumière) avec le Soleil très éloigné du centre. Les deux analyses ne tinrent pas compte de l'absorption de la lumière par la poussière interstellaire (phénomène appelé extinction) présente dans le plan galactique, mais après que Robert Jules Trumpler eut quantifié cet effet en 1930, en étudiant les amas ouverts, l'image actuelle de notre galaxie émergea.

### Les autres objets nébuleux

Vers la fin du XVIII<sup>e</sup> siècle, Charles Messier établit un catalogue contenant 110 « nébuleuses », comme on appelait alors indistinctement les objets diffus observés dans le ciel. Ce catalogue fut suivi d'un plus grand, de 5 000 objets, établi par William Herschel. En 1845, Lord Rosse construisit un nouveau télescope qui fut capable de distinguer les nébuleuses elliptiques et spirales. Il essaya également de mettre en évidence des sources ponctuelles à l'intérieur de certaines nébuleuses, donnant ainsi crédit à la conjecture de Kant.



Cœur de la Voie lactée vu en infrarouge par le télescope spatial Spitzer de la NASA.



Croquis de la Galaxie du Tourbillon, fait par Lord Rosse en 1845.



Photographie de la « Grande nébuleuse d'Andromède » (NGC 224) datant de 1899. On y reconnaît également ses deux satellites les plus brillants, M32 et NGC 205.

En 1917, Herber Curtis observa des clichés de la supernova SN 1885A dans la « grande nébuleuse d'Andromède » (M31, dans le catalogue Messier). En cherchant dans la photographie, il trouva 11 novas de plus. Curtis remarqua que ces novas étaient en moyenne 10 magnitudes plus faibles que celle de notre galaxie. Grâce à ces résultats, il fut capable d'estimer la distance qui nous sépareit d'elles à environ 150 000 parsecs. Il devint donc adepte de ce que l'on appelle la théorie des « univers-iles », avançant que les nébuleuses spirales sont en réalité des galaxies indépendantes, mais sa découverte resta peu diffusée.

En 1920, le « Grand Débat », concernant la nature de la Voie lactée, des nébuleuses spirales, et la taille de l'Univers, prit place avec comme principaux protagonistes Harlow Shapley et Herber Curtis. Pour

renforcer son idée que la grande nébuleuse d'Andromède était une galaxie externe, Curtis nota l'apparence des lignes sombres s'apparentant aux nuages de poussière présents dans la Voie lactée, ainsi qu'un décalage de la lumière dû à l'effet Doppler-Fizeau.

Le fait fut définitivement établi par Edwin Hubble au début des années 1920 en utilisant un nouveau télescope. Il fut capable de résoudre les parties externes de quelques nébuleuses spirales comme étant des collections d'étoiles individuelles et identifia quelques variables appelées céphéides, dont la période de variation de lumière est fonction de la luminosité absolue. Ceci permit ainsi d'estimer la distance nous séparant de ces nébuleuses : elles étaient bien trop lointaines pour faire partie de la Voie lactée. En 1936, Hubble créa un système de classification des galaxies qui est encore utilisé de nos jours : la séquence de Hubble.

## Composition

### Milieu interstellaire

Article détaillé : milieu interstellaire.

### La matière sombre

Article détaillé : Matière noire.

Dans les années 1970, on réalisa que la masse totale visible, dans les galaxies, des étoiles et du gaz, ne pouvait pas expliquer correctement la vitesse de rotation de celles-ci, qui est systématiquement anormalement élevée par rapport à ce qu'elle aurait dû être étant donné la masse visible dont les galaxies étaient composées. Ceci amena à postuler l'existence d'une nouvelle forme de matière, appelée matière sombre. Celle-ci n'émet aucun rayonnement, mais son existence est révélée par l'influence de son champ gravitationnel sur la dynamique des étoiles. Dès le début des années 1990, le télescope spatial Hubble apporta une grande amélioration dans les observations lointaines. Ces nouvelles observations permirent notamment d'établir que la matière sombre de notre Galaxie ne peut se composer uniquement d'étoiles faibles et petites. D'autres observations cosmologiques arrivent à la même conclusion, attestant l'idée que la matière sombre est une nouvelle forme de matière inconnue en laboratoire<sup>[réf. nécessaire]</sup>. Au sein des galaxies, la matière forme un halo sphérique plus étendu que la galaxie elle-même, et ayant un profil de densité dit en « sphère isotherme », c'est-à-dire décroissant comme l'inverse du carré de la distance au centre<sup>[réf. nécessaire]</sup>.

## Types et morphologie

Article détaillé : Classification des galaxies.

Il y a trois grands types de galaxies : les elliptiques, les spirales, et les irrégulières. Une description détaillée des différents types de galaxies basée sur leur apparence est établie par la séquence de Hubble. Puisque la séquence de Hubble est entièrement basée sur la caractéristique morphologique visuelle, il arrive qu'elle ne tienne pas compte de caractéristiques importantes telles que le taux de formation d'étoiles (dans les galaxies starburst) ou l'activité du noyau (dans les galaxies actives).

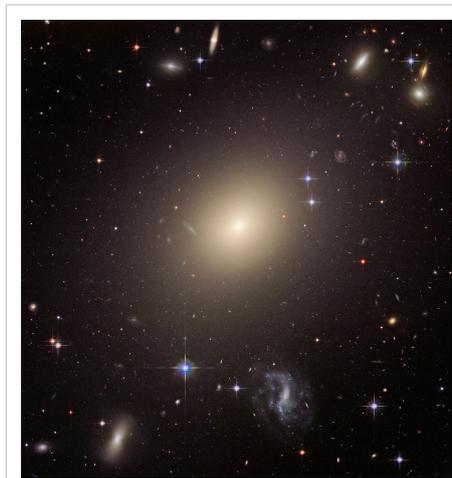
À l'époque de la réalisation de sa classification, Hubble pensait que les différents types de morphologies galactiques correspondaient à un degré d'évolution variable de ces objets, partant d'un état sphérique sans structure (type E0), puis s'aplatissant progressivement (type E1 à E7), avant de produire les bras spiralés (types Sa, Sb, Sc, ou SBa, SBb, SBc). Cette hypothèse d'évolution a depuis été totalement invalidée, mais la dénomination en termes de « galaxie précoce » (*early-type galaxy* en anglais) pour les elliptiques et « galaxie tardive » (*late-type galaxy*) pour les spirales est par contre, toujours usitée.



Les différents types de galaxies, selon la classification de Hubble : le type *E* correspond à une galaxie elliptique, le *S* à une galaxie spirale et le *SB* à une galaxie spirale barrée.

## Galaxies elliptiques

Article détaillé : Galaxie elliptique.



La galaxie elliptique géante ESO 325-G004.

Le système de classification de Hubble compte les galaxies elliptiques sur base de leur excentricité (c'est-à-dire de l'aplatissement de leur image projetée sur le ciel), allant de E0 (presque sphérique) à E7 (fortement allongée), le chiffre suivant le « E » correspondant à la quantité  $10 \times \left(1 - \frac{b}{a}\right)$ , où  $a$  et  $b$  sont le demi grand axe et le demi petit axe de la galaxie telle qu'elle est observée. Ces galaxies ont un profil ellipsoïdal, leur donnant une apparence elliptique quel que soit l'angle de vue. Leur apparence montre peu de structures et elles ne possèdent pas beaucoup de matière interstellaire. Par conséquent, ces galaxies contiennent peu d'amas ouverts et ont un taux de formation d'étoiles peu élevé. Des étoiles plus anciennes et plus évoluées, tournant autour de leur centre de gravité commun de manière aléatoire, dominent donc ces galaxies. En ce sens, elles présentent une certaine similitude avec les amas globulaires, mais à plus grande échelle.

Les galaxies les plus grandes sont des elliptiques géantes. On pense que de nombreuses galaxies elliptiques se sont formées grâce à une interaction de galaxies qui ont fini par fusionner. Elles peuvent atteindre des tailles énormes (comparée aux galaxies spirales, par exemple). D'autre part, ces galaxies elliptiques géantes sont souvent trouvées au cœur des grands amas de galaxies. Les galaxies starburst sont souvent le résultat d'une collision des galaxies. La galaxie elliptique géante la plus proche de notre Galaxie est M87, dans la constellation de la Vierge, à 60 millions d'années-lumière.

## Galaxies spirales

Article détaillé : Galaxie spirale.

Les galaxies spirales forment la classe la plus emblématique des galaxies. Elles sont faites d'un disque en rotation et composé d'étoiles et de milieu interstellaire, avec un bulbe central d'étoiles généralement plus anciennes. De ce bulbe émergent des bras relativement brillants. Dans le schéma de classification de Hubble, les galaxies spirales correspondent au type *S*, suivi d'une lettre (*a*, *b*, ou *c*), qui indique le degré d'enroulement des bras spiraux ainsi que la taille du bulbe central. Une galaxie *Sa* est dotée de bras relativement mal définis et possède une région centrale relativement importante. En revanche, une galaxie *Sc* possède des bras très ouverts et bien tracés ainsi qu'un bulbe de petite taille.



La galaxie spirale M63.

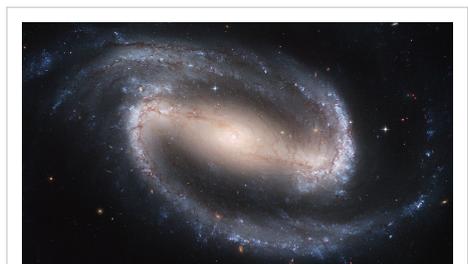
Dans les galaxies spirales, les bras spiraux forment une spirale logarithmique approximative, un schéma qui peut être, en théorie, le résultat d'un dérangement dans la masse d'étoiles rotative uniforme. Les bras spiraux tournent autour du centre, au même titre que les étoiles, mais avec une vitesse angulaire constante. Cela veut dire que les étoiles entrent et sortent des bras spiraux ; les étoiles proches du centre galactique orbitent plus vite que les bras alors que les étoiles les plus externes se déplacent moins vite que les bras. On pense que les bras spiraux sont des zones où la densité de matière est plus haute, on peut donc les voir comme des « vagues de densité ». Lorsque les étoiles traversent un bras, la vitesse de chaque système stellaire est modifiée par les forces gravitationnelles supplémentaires exercées par une densité de matière plus élevée (cette vélocité retourne à la normale une fois que l'étoile ressort du bras). Cet effet est semblable à une « vague » de ralentissement sur une autoroute saturée en voitures.

Les bras sont visibles à cause de leur teneur en étoiles jeunes et brillantes, dues à la forte densité de matière qui facilite la formation d'étoiles. Or les étoiles les plus lumineuses sont aussi les plus massives, et ont une durée de vie très brève (quelques millions d'années contre 10 milliards d'années pour le Soleil), aussi les zones les plus lumineuses sont-elles au voisinage des lieux de formation d'étoiles, les étoiles massives n'ayant pas le temps de s'en éloigner significativement lors de leur brève existence.

## Galaxies spirales barrées

Article détaillé : Galaxie spirale barrée.

La majorité des galaxies spirales ont une bande d'étoiles linéaire en leur centre, à partir de laquelle émergent les bras spiraux. Dans la classification de Hubble, elles sont désignées d'un *SB*, suivi d'une lettre minuscule (*a*, *b*, ou *c*), indiquent encore une fois la forme et la disposition des bras spiraux (de la même manière que les galaxies spirales non-barrées). On pense que les barres sont des structures temporaires qui peuvent survenir suite à un rayonnement de densité du cœur vers l'extérieur, ou suite à une interaction avec une autre galaxie faisant intervenir la force de marée. De nombreuses galaxies spirales barrées sont actives, cela est peut-être du gaz canalisé le long des bras.



La galaxie spirale barrée NGC 1300.

Notre propre galaxie est une grande galaxie spirale barrée d'environ 30 000 parsecs de diamètre et de 1 000 parsecs d'épaisseur. Elle contient approximativement  $2 \times 10^{11}$  étoiles et a une masse totale d'environ  $6 \times 10^{11}$  masses solaires.

## Morphologies particulières

Article détaillé : Galaxie irrégulière.

Les galaxies particulières sont des formations galactiques développant des propriétés inhabituelles dues à des interactions gravitationnelles avec d'autres galaxies, les forces de marée, responsables de ces déformations. Les galaxies annulaires, possédant une structure formée d'étoiles et de gaz en forme d'anneau autour du centre galactique, sont de bons exemples de galaxies particulières. Une galaxie annulaire peut se former lorsqu'une galaxie plus petite passe à travers le centre d'une galaxie spirale. Un tel évènement a pu se produire sur la galaxie d'Andromède, qui présente plusieurs anneaux en infrarouge.

Une galaxie lenticulaire est une forme de transition, ayant à la fois les propriétés d'une galaxie elliptique et spirale. Dans la séquence de Hubble, elles portent la mention *SO*. Elles possèdent des bras, certes mal définis, et un halo d'étoiles elliptique (les galaxies lenticulaires barrées sont de type *SBO*).

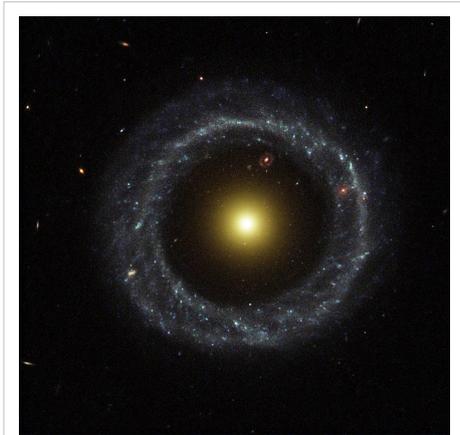
En plus de morphologies mentionnées ci-dessus, il existe un certain nombre de galaxies qui n'entrent dans aucune de ces catégories. Il s'agit des galaxies irrégulières. Une galaxie *Irr-I* possède une certaine structure, mais n'est pas clairement apparentée à un type quelconque de la séquence de Hubble. Les galaxies *Irr-II* ne possèdent aucune structure comparable à quoi que ce soit dans le schéma de Hubble, et peuvent même avoir été déchirées. Des exemples proches de galaxies irrégulières (naines) sont les nuages de Magellan.

## Galaxies naines

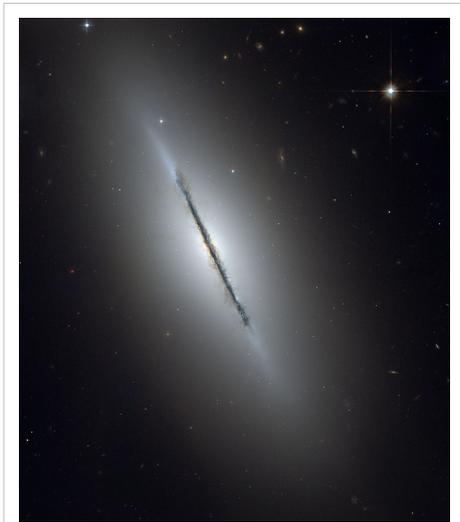
Article détaillé : Galaxie naine.

En dépit de la prééminence des grandes galaxies elliptiques et spirales, il semble que la plupart des galaxies de l'univers sont des galaxies naines. Ces galaxies minuscules ont une taille pouvant descendre à 1 % de celle de la Voie lactée, et contiennent seulement quelques milliards, voire quelques centaines de millions d'étoiles. Des galaxies naines ultra-compactes, qui ont été trouvées récemment, font seulement 100 parsecs de long.

La majorité des galaxies naines orbitent autour d'une galaxie plus grande ; la Voie lactée a au moins une douzaine de satellites nains, chiffre probablement inférieur au nombre total de satellites de ce type. Les galaxies naines peuvent elles-mêmes aussi être classées comme étant elliptiques, spirales, ou irrégulières.



L'objet de Hoag, une galaxie annulaire.

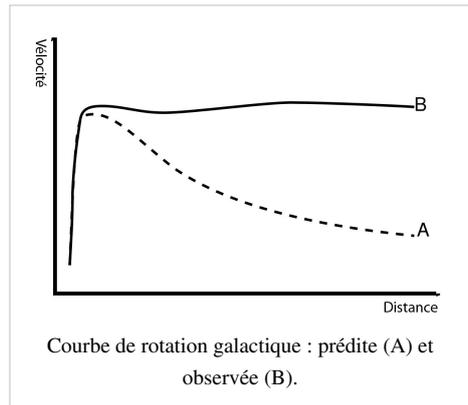


La galaxie lenticulaire NGC 5866.

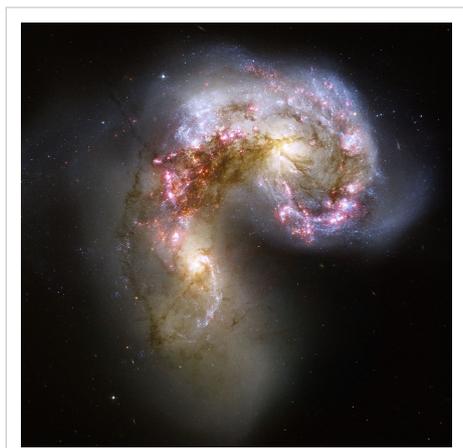
## Rotation des galaxies

Un graphique représentant la vitesse de rotation de la matière en fonction de la distance entre celle-ci et le centre galactique peut prendre deux formes, la courbe plate B étant la plus répandue. Analysons de plus près les formes des courbes de rotation. L'article cité<sup>[5]</sup> en donne un grand nombre.

Près du centre galactique, la vitesse est proportionnelle à la distance au centre galactique. La vitesse angulaire de rotation est donc constante comme dans un solide. La courbe devient ensuite parabolique, ce qui correspond à une densité de masse d'étoiles constante. Après le maximum, la courbe est généralement plate, la densité d'étoiles est décroissante. Enfin, très loin du centre galactique où la densité d'étoiles est très faible, on retrouve les lois de Kepler, qui ne peuvent être vérifiées qu'en présence d'étoiles suffisamment lumineuses faisant partie de la galaxie en question. (cf article Matière noire)



## Activités exceptionnelles



Les Galaxies des Antennes, une paire de galaxies en interaction allant probablement fusionner dans 400 millions d'années.

### Interaction

La distance moyenne séparant les galaxies dans un amas est relativement petite. Par conséquent, les interactions entre galaxies sont assez fréquentes, et jouent un rôle important dans leur évolution. Lorsque deux galaxies se manquent de peu, elles subissent néanmoins des déformations dues à la force de marée, et peuvent échanger une certaine quantité de gaz et de poussière.

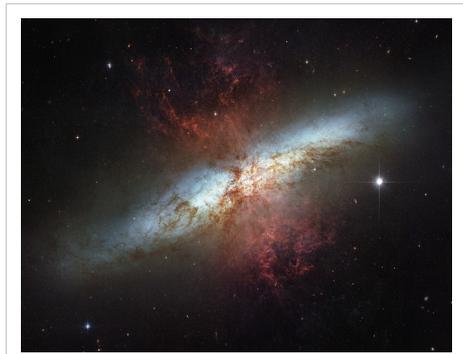
Les collisions se produisent lorsque deux galaxies passent directement l'une à travers l'autre et ont un moment angulaire relatif suffisant pour ne pas fusionner. Les étoiles de ces galaxies en interactions subiront la traversée sans entrer en collision les unes avec les autres. Cependant, le gaz et la poussière présents dans les deux galaxies interagissent. Cela peut déclencher un sursaut de formation d'étoiles car le milieu interstellaire a été dérangé et comprimé. Une collision peut sévèrement

distordre les deux galaxies, formant des structures s'apparentant à des barres, des anneaux, ou des longues queues.

L'interaction la plus violente est la fusion galactique. Dans ce cas, le moment relatif des deux galaxies est insuffisant pour leur permettre de se libérer de l'emprise de l'autre et de poursuivre leurs routes. Au lieu de ça, elles fusionneront graduellement pour former une galaxie unique, plus grande. Les fusions apportent d'énormes changements à la morphologie des deux galaxies de départ. Cependant, dans le cas où l'une des deux galaxies est beaucoup plus massive que l'autre, on assiste à un phénomène de cannibalisme. Dans ce cas, la galaxie la plus grande restera relativement inchangée tandis que la plus petite sera déchirée à l'intérieur de l'autre. La Voie lactée est actuellement en train d'absorber de la sorte la Galaxie Elliptique Naine du Sagittaire et la Galaxie Naine du Grand Chien.

## Starburst

Article détaillé : Galaxie starburst.



M82, l'archétype des galaxies starburst.

Les étoiles sont créées dans les galaxies à partir du gaz froid qui s'est formé dans les nuages moléculaires géants. Certaines galaxies, les *galaxies starburst*, ont un taux de formation d'étoiles vertigineux. Toutefois, si elles continuaient à fonctionner ainsi, ces galaxies épuiserait leurs réserves de gaz en un laps de temps inférieur à leur durée de vie. Par conséquent, un tel évènement ne dure en général que 10 millions d'années, ce qui est relativement court par rapport à l'histoire de la galaxie. Les galaxies starburst étaient plus communes dans le passé, et contribuent actuellement d'environ 15 % au taux de formations d'étoiles total.

Les galaxies starburst sont caractérisées par de fortes concentrations de gaz et de poussière ainsi qu'un nombre élevé de jeunes étoiles. Les plus massives d'entre elles ionisent les nuages environnants et créent des régions HII. Ces étoiles massives finissent en supernovas, produisant ainsi un rémanent qui interagit avec le gaz environnant. Cela enclenche une réaction en chaîne de formation d'étoiles qui se propage à travers toute la région gazeuse. Un tel sursaut d'étoiles ne prend fin que lorsque le gaz disponible est consommé ou dispersé.

Les starburst sont souvent associés avec les galaxies en interaction ou en fusion. L'exemple-type de galaxie subissant un starburst est M82, qui a récemment interagit avec M81, de taille supérieure. les galaxies irrégulières présentent souvent des nœuds où le taux de formation est particulièrement élevé.

## Noyau actif

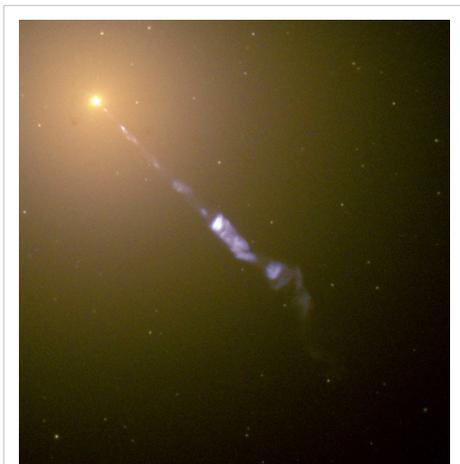
Article détaillé : Galaxie active.

Certaines galaxies sont dites actives. Cela veut dire qu'une partie significative de l'énergie totale est émise par des sources autres que les étoiles, la poussière, ou le milieu interstellaire.

Le modèle standard décrivant une galaxie est basé sur le disque d'accrétion présent autour du trou noir supermassif de la galaxie. Le rayonnement issu des galaxies actives provient de l'énergie potentielle gravitationnelle de la matière lorsqu'elle tombe du disque vers le trou noir. Environ 10 % de ces objets présentent une paire de jets de particules dont la vitesse est proche de celle de la lumière.

Les galaxies actives émettant un rayonnement hautement énergétique sous forme de rayons X sont appelées galaxies de Seyfert ou quasars, selon leur luminosité. On pense que les blazars sont des galaxies actives émettant des jets pointés vers la terre. Une radiogalaxie émet un rayonnement situé dans les ondes radio depuis ses jets.

Un modèle unificateur explique que les différences entre les divers types de galaxies actives ne sont dues qu'à l'angle de vue de l'observateur.



M87, une radiogalaxie elliptique émettant un jet de particules.

## Formation et évolution

Articles détaillés : Évolution des galaxies et Formation des galaxies.

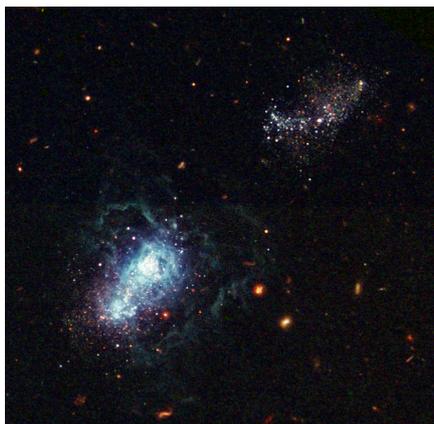
L'étude de la formation et de l'évolution galactique permet d'esquisser des réponses aux questions concernant l'évolution des galaxies à travers l'histoire de l'univers. Dans ce domaine, quelques théories sont devenues largement acceptées, mais c'est encore un champ très actif de l'astrophysique. Des travaux récents laissent penser que les premières galaxies se seraient formées plus tôt que prévu (une galaxie lointaine contenant des étoiles âgées de 750 millions d'années se serait ainsi formée 200 millions d'années environ après le Big Bang)<sup>[6]</sup>.

### Formation

Les modèles cosmologiques actuels décrivant la formation de l'univers sont basés sur la théorie du Big Bang, selon laquelle l'espace-temps, et avec lui toute la matière et l'énergie composant l'univers, a jailli dans une expansion sans commune mesure, alors qu'il était comprimé à une taille infinitésimale. Environ 300 000 ans après cet événement initial, la température avait baissé suffisamment pour permettre la formation des atomes d'hydrogène et d'hélium, dans un phénomène appelé Recombinaison. Presque tout l'hydrogène était neutre (non-ionisé) et absorbait donc la lumière, les étoiles ne s'étaient pas encore formées ; pour cette raison, cette période porte le nom d'Âge sombre. C'est à partir des fluctuations de densité (ou irrégularités anisotropiques) que les plus grandes structures de la matière commencèrent à se former. Des agglomérations de matière baryonique se condensèrent à l'intérieur de halos de matière noire froide. Ces structures primordiales finirent par devenir les galaxies que nous observons aujourd'hui.

Des preuves de l'apparence des galaxies primordiales ont été trouvées en 2006, lorsque l'on a découvert que la galaxie IOK-1 avait un décalage vers le rouge anormalement élevé de 6,96, ce qui correspond à seulement 750 millions d'années après le Big Bang, ce qui en fait l'objet le plus lointain jamais observé. Bien que certains scientifiques ont déclaré que d'autres objets (tels que Abell 1835 IR1916) possédaient des *redshifts* encore plus haut (reflétant donc l'univers à des époques encore antérieures), l'âge et la composition de IOK-1 sont établis avec plus de fiabilité. L'existence de telles protogalaxies suggère qu'elles ont dû se développer durant l'Âge sombre.

### Évolution



I Zwicky 18 (en bas à gauche) ressemble à une galaxie récemment formée.

Un milliard d'années après la formation de la galaxie, des structures clés commencent à apparaître : des amas globulaires, le trou noir supermassif central et le bulbe galactique constitué d'étoiles de population II. La création d'un trou noir supermassif semble jouer un rôle majeur car il régule activement la croissance des galaxies en limitant la quantité totale de matière ajoutée. Durant cette époque, les galaxies subissent un sursaut majeur de formation d'étoiles.

Durant les deux milliards d'années suivantes, la matière accumulée s'installe dans le disque galactique. Une galaxie continuera d'absorber les matériaux environnants (présents dans les nuages interstellaires rapides et dans les galaxies naines) durant toute sa vie. Ces matériaux se constituent principalement d'hydrogène et d'hélium. Le cycle de naissance et de mort des étoiles augmente lentement la quantité de matériaux lourds, ce qui peut éventuellement mener à la formation de

planètes.

L'évolution des galaxies peut être fortement affectée par une interaction ou une collision. Les fusions de galaxies étaient fréquentes dans le passé, et la majorité des galaxies avaient des morphologies particulières. Étant donnée la distance entre les étoiles, la grande majorité des systèmes stellaires ne seront pas dérangés par une collision. Cependant, le déchirement gravitationnel de gaz et de poussière interstellaire produit une longue trainée d'étoiles. De

telles structures, causées par la force de marée, peuvent être vues sur les Galaxies des Souris ou des Antennes.

La Voie lactée et la galaxie d'Andromède se rapprochent l'une de l'autre à la vitesse de 130 km/s, et pourraient bien entrer en collision dans 5 à 6 milliards d'années. Bien que la Voie lactée ne soit jamais entrée en collision avec une grande galaxie comme Andromède, le nombre de preuves de collision de la Voie lactée avec des galaxies naines augmente.

De telles interactions à grande échelle sont rares. Dans le passé, les fusions de deux systèmes de taille égales devinrent moins fréquentes. La plupart des galaxies brillantes sont restées pratiquement inchangées durant les derniers milliards d'années, et le taux net de formation d'étoiles a probablement atteint son maximum il y a approximativement 10 milliards d'années.

## Tendances futures

À présent, la plupart des étoiles se forment dans les petites galaxies, où le gaz froid n'est pas épuisé. Les galaxies spirales, comme la Voie lactée, produisent des étoiles de nouvelles générations tant qu'elles ont des nuages d'hydrogène moléculaire denses. Les galaxies elliptiques déjà en grande partie dépourvues de ce gaz ne forment donc pas d'étoiles. Les réserves de matière créant les étoiles sont limitées : une fois que les étoiles ont converti tout l'hydrogène disponible en éléments plus lourds, la formation de nouvelles étoiles prendra fin.

L'époque actuelle d'étoiles naissantes devrait continuer durant encore cent milliards d'années. Mais l'« Ère Stellaire » s'arrêtera dans dix à cent mille milliards d'années ( $10^{13}$  à  $10^{14}$ , lorsque les étoiles les moins massives (et donc celles qui ont la plus grande durée de vie), les minuscules naines rouges, d'environ 0,08 masse solaire, finiront leur « combustion » et s'effondreront.

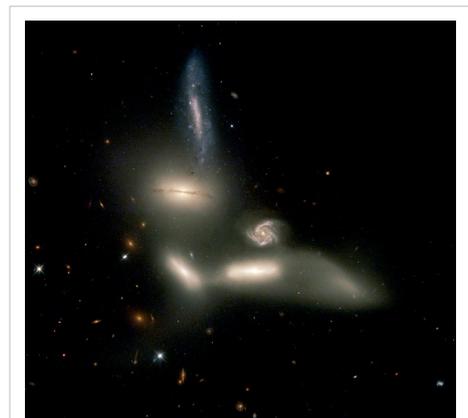
À la fin de l'Ère Stellaire, les galaxies ne seront composées que d'objets compacts : des naines brunes, des naines blanches en train de se refroidir (qui, une fois froides, deviennent des naines noires), des étoiles à neutrons, et des trous noirs ; ainsi que des planètes et divers planétésimaux. Ensuite, toute la matière tombera dans les trous noirs centraux ou sera dispersée dans l'espace intergalactique.

## Structures à plus grande échelle

La plupart des galaxies sont gravitationnellement reliées à un certain nombre d'autres. Les groupes de galaxies sont les types de groupes galactiques les plus courants dans l'univers, et ceux-ci contiennent la majorité des galaxies (et donc la majorité de la masse baryonique) présentes dans l'univers. Ils comportent quelques dizaines de membres. La Voie lactée fait ainsi partie d'un groupe de galaxies appelé Groupe local dont elle est le membre le plus massif avec la Galaxie d'Andromède (M31), ses autres membres étant de masse nettement plus faible.

Lorsqu'une concentration de galaxies contient plus d'une centaine de galaxies situées dans une zone de quelques mégaparsecs, elle est alors appelée amas. Les amas de galaxies sont souvent dominés par une galaxie elliptique géante. Avec le temps, celle-ci détruit ses satellites, qui viennent ajouter leur masse à la sienne, par le biais des forces de marée. L'amas auquel appartient le Groupe local est appelé amas de la Vierge, du nom de la constellation dans laquelle se trouve son centre.

Les superamas contiennent des dizaines de milliers de galaxies, elles-mêmes isolées ou regroupées en amas et en groupes. À l'échelle des superamas, les galaxies seraient disposées en feuilles et en filaments, laissant entre eux d'immenses vides. À une échelle supérieure, l'Univers semble être isotrope et homogène.



Le Sextette de Seyfert est un exemple de groupe de galaxies compact.

Groupes, amas et superamas ne sont pas des structures figées. Les galaxies qui les composent interagissent entre elles, et sont susceptibles de fusionner. D'autres galaxies peuvent y naître à partir de la matière présente non encore condensée en galaxies.

## Observations à longueurs d'onde multiple

Initialement, la majorité des observations se faisaient en lumière visible. Comme les étoiles rayonnent le gros de leur lumière dans ce domaine du spectre électromagnétique, l'observation des étoiles formant les galaxies externes à la Voie lactée est un composant majeur de l'astronomie optique. En outre, elle est également utile à l'observation des régions HII ionisées et des bras poussiéreux.

La poussière présente dans le milieu interstellaire est opaque à la lumière visible. Par contre, elle devient plus transparente dans l'infrarouge lointain ; celui-ci peut donc être utile à l'observation de l'intérieur des nuages moléculaires géants et des noyaux galactiques. L'infrarouge peut aussi être utilisé pour observer les galaxies distantes et décalées vers le rouge qui se sont formées tôt dans l'histoire de l'Univers. Comme la vapeur d'eau ainsi que le dioxyde de carbone absorbent des portions utiles du spectre infrarouge, les observatoires à infrarouges se situent en haute altitude ou dans l'espace.

La première étude non-visuelle des galaxies, en particulier des galaxies actives, fut faite en ondes radio. L'atmosphère est en effet presque transparente aux ondes radio situées entre 5 Hz et 3 GHz (l'ionosphère terrestre bloque le signal en dessous de cette plage). De grands interféromètres radio ont été utilisés pour cartographier les jets émis par les galaxies actives. Les radiotélescopes peuvent aussi être utilisés pour observer l'hydrogène neutre (via la raie à 21 centimètres), incluant potentiellement, la matière non-ionisée des débuts de l'univers qui forma les galaxies en s'effondrant.

Les télescopes à ultraviolet permettent de mieux mettre en évidence les étoiles chaudes, souvent massives et de durée de vie limitée, mettant ainsi en évidence le phénomène de formation d'étoiles dans les galaxies. Dans le domaine des rayons X, on observe la matière beaucoup plus chaude, notamment la distribution du gaz chaud au sein des amas de galaxies, ainsi que des phénomènes énergétiques au sein du cœur des galaxies où se trouve souvent un trou noir supermassif dont la présence est entre autres trahie par l'existence de volutes de gaz très chaud en train d'être englouties par le trou noir central.

## Bibliographie

### • Références générales

- Terence Dickinson, *The Universe and Beyond*, Firefly Books Ltd., 2004 (ISBN 1552979016)
- James Binney, Michael Merrifield, *Galactic Astronomy*, Princeton University Press, 1998 (ISBN 0691004021)
- David Merritt, *Dynamics and Evolution of Galactic Nuclei*, Princeton University Press, 2013 (ISBN 069112101X)

## Notes et références

- (en) Cet article est partiellement ou en totalité issu de l’article de Wikipédia en anglais intitulé « Galaxy <sup>[7]</sup> » ( voir la liste des auteurs <sup>[8]</sup> )

[1] [http://www.esa.int/Our\\_Activities/Space\\_Science/Herschel/How\\_many\\_stars\\_are\\_there\\_in\\_the\\_Universe](http://www.esa.int/Our_Activities/Space_Science/Herschel/How_many_stars_are_there_in_the_Universe)

[2] *Trésor de la langue française informatisé*, article « Galaxie ».

[3] Henry George Liddell et Robert Scott, *A Greek-English Lexicon. Revised and augmented throughout by Sir Henry Stuart Jones with the assistance of Roderick McKenzie*, Oxford, Clarendon Press. 1940, articles « γαλαξίας » et « γάλα ».

[4] Document du magazine Ciel & Espace, 10 octobre 2008. ([http://www.cieletespace.fr/evenement/2201\\_une-galaxie-lointaine-observee-grace-un-telescope-gravitationnel](http://www.cieletespace.fr/evenement/2201_une-galaxie-lointaine-observee-grace-un-telescope-gravitationnel)) Consulté le 2009-08-31

[5] *Galaxy Rotation Curves Without Non-Baryonic Dark Matter* (<http://arxiv.org/abs/astro-ph/0506370>)

[6] Johan Richard et al. *Discovery of a possibly old galaxy at  $z=$ , multiply imaged by the massive cluster Abell 383* (<http://arxiv.org/abs/1102.5092>) ; Travaux publiés en avril 2011 sur le site de la revue Monthly Notices of the Royal Astronomical Society.

[7] <http://en.wikipedia.org/wiki/Galaxy?oldid=211826709>

[8] <http://en.wikipedia.org/wiki/Galaxy?action=history>

# Évolution stellaire



**Cet article ne cite pas suffisamment ses sources** (juillet 2007).

Si vous disposez d'ouvrages ou d'articles de référence ou si vous connaissez des sites web de qualité traitant du thème abordé ici, merci de compléter l'article en donnant les références utiles à sa vérifiabilité et en les liant à la section « Notes et références » (modifier l'article [1]).

L'**évolution d'une étoile**, ou **évolution stellaire**, désigne l'ensemble des phénomènes allant de la formation à la « mort » d'une étoile. Elle peut être décomposée en plusieurs phases principales dont la formation de l'étoile, son séjour sur la séquence principale et sa phase finale.

Durant sa *vie*, une étoile émet des particules et des rayonnements électromagnétiques (dont une partie sous forme de rayonnements visibles) grâce à l'énergie dégagée par les réactions de fusion nucléaire qui se produisent dans les zones internes de l'étoile.

La plus grande partie de l'existence de l'étoile se passe sur la séquence principale, où elle brûle de l'hydrogène pour former de l'hélium. Une fois le cœur de l'étoile appauvri en hydrogène, elle quitte la séquence principale pour évoluer vers son stade ultime d'évolution, laissant un objet compact : une naine blanche, une étoile à neutrons ou encore un trou noir.



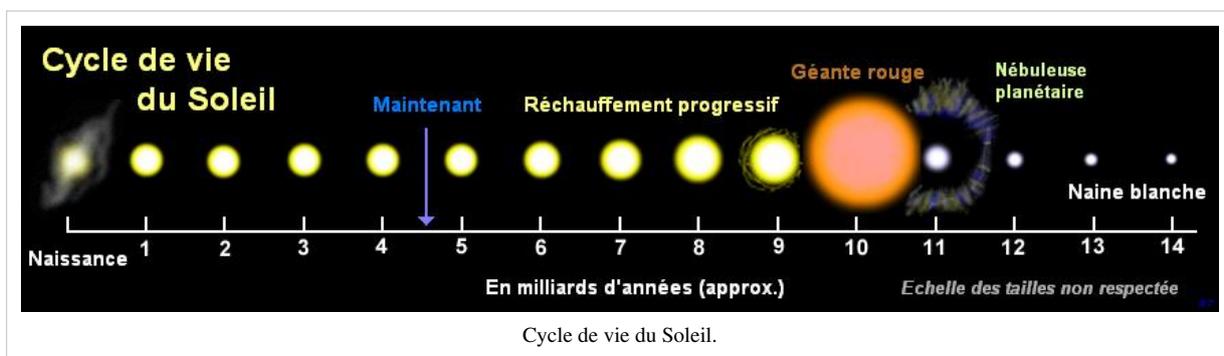
L'amas stellaire M24.

## La formation

Article détaillé : Naissance des étoiles.

Les étoiles se forment à partir de nuages interstellaires qui se contractent sous l'effet de la gravitation. Lorsque l'étoile en formation est suffisamment dense, la pression qui règne au cœur déclenche les premières réactions de fusion : on parle alors de proto-étoiles. Ces proto-étoiles naissent généralement dans des nuages capables de former des centaines d'étoiles en même temps (voir par exemple la nébuleuse d'Orion).

En fonction de leur masse et de leur état évolutif, les étoiles peuvent être classées en familles dans un Diagramme de Hertzsprung-Russell : la séquence principale, les branches des géantes, les étoiles de Wolf-Rayet, la branche des naines blanches, etc.



## La séquence principale

Article détaillé : Séquence principale.

Durant la phase de séquence principale, l'étoile est en équilibre hydrostatique, elle subit deux forces qui s'opposent et la maintiennent en équilibre :

- d'une part les réactions thermonucléaires qui ont lieu au cœur de l'étoile, qui exercent une pression radiative qui tend à la faire augmenter de volume, ce qui entraîne une diminution de la température de l'étoile ;
- d'autre part les forces de gravité, qui ont tendance à la faire se contracter et donc à réaugmenter la température de l'étoile.

Ces deux forces en équilibre, maintiennent les réactions nucléaires au centre de l'étoile et préviennent tout emballement du cœur de l'étoile.

Lorsque le cœur de l'étoile atteint une température de l'ordre d'un million de degrés, il devient le siège de réactions thermonucléaires (fusion du deutérium, du lithium et du béryllium). Vers 7 à 8 millions de degrés, la température est assez élevée pour que les noyaux d'hydrogène du plasma, les plus communs, commencent à fusionner pour donner essentiellement de l'hélium  $^4\text{He}$ , suivant une réaction de fusion nucléaire appelée cycle proton-proton, de rendement global égal à  $64\,000\text{ GJ}\cdot\text{kg}^{-1}$  (par kg d'hydrogène).

Si la température dépasse 18 millions de degrés, une autre chaîne de réactions devient prédominante : le cycle carbone-azote-oxygène, ou cycle CNO, dont l'efficacité est beaucoup plus dépendante de la température que le cycle proton-proton. Dans le Soleil, 2,5 % de l'énergie sont générés par ce cycle. Mais dans les étoiles plus massives, la prédominance du cycle CNO a des conséquences majeures sur leur structure.

Parce que les conditions de température et de pression qui permettent la fusion de l'hydrogène ne se rencontrent que dans le cœur des étoiles, et parce qu'il n'y a pas de convection entre ce cœur et l'enveloppe de l'étoile (pour apporter du combustible neuf au cœur), il se produit un enrichissement du cœur en produits de fusion (l'hélium), qui va ralentir les réactions de fusions. Ces produits de fusion ne sont pas des déchets car ils serviront de combustible nucléaire ultérieurement. En fait, dans le cas du Soleil, environ 10 % de sa masse d'hydrogène seulement fusionne en hélium au cours de la séquence principale. Sachant que la luminosité du Soleil est de  $3,9\times 10^{26}\text{ W}$  et que sa masse est de  $1,99\times 10^{30}\text{ kg}$ , on peut en déduire que la durée de vie d'une étoile comme le Soleil est d'environ 10 milliards d'années sur la séquence principale. Cette durée de vie dépend toutefois fortement des réactions nucléaires qui se déroulent au sein de l'étoile : les étoiles massives, qui contiennent beaucoup plus d'hydrogène que le Soleil, ont paradoxalement une durée de vie sur la séquence principale beaucoup plus courte.

Au fur et à mesure de sa vie sur la séquence principale, l'étoile doit légèrement se contracter pour contrer l'effet de l'enrichissement de son cœur en produits de fusion (le nombre de noyaux diminuant). Ceci conduit à une légère augmentation au cours du temps de sa luminosité.

## Évolution finale

Parcours évolutifs de différents types d'étoiles. Les parcours débutent sur la séquence principale et se terminent lorsqu'il n'y a plus de fusion nucléaire.

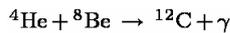
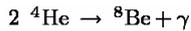
Le parcours du Soleil est présenté en jaune.

La masse d'une étoile est l'élément déterminant de son évolution. Plus une étoile est massive, plus elle consomme rapidement l'hydrogène qu'elle contient car la température y est plus élevée de par la compression plus forte de la gravité. Dans le cas des étoiles de quelques masses solaires, lorsque le cœur de l'étoile ne contient plus suffisamment d'hydrogène, elle devient géante rouge. À partir de ce moment-là, l'étoile est vouée à former une nébuleuse planétaire, alors que le noyau devient une naine blanche. Les étoiles les plus massives évoluent vers les branches des géantes et des supergéantes et finiront en supernovas.

## Les géantes rouges

Article détaillé : Géante rouge.

Dans la séquence principale, seul l'hydrogène contenu dans le cœur de l'étoile est consommé, ce qui correspond environ à 10 % de la masse. Lorsque la concentration en hélium atteint un certain seuil, la pression radiative diminue et l'étoile se contracte. Ce phénomène entraîne une augmentation de la température et de la pression des couches intermédiaires, qui contiennent encore de l'hydrogène, et où se déclenchent alors des réactions de fusion. La pression radiative augmente à nouveau mais, provenant des couches externes, elle s'exerce tant vers l'extérieur que sur le noyau qui se contracte et augmente encore de température. Quand la température du cœur atteint  $100 \times 10^6$  K, de nouvelles réactions ont lieu dans le noyau, qui conduisent à la transmutation de l'hélium en carbone par la réaction *triple alpha* :



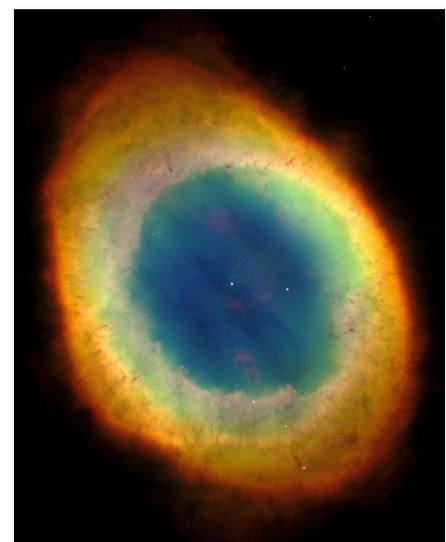
La géante rouge s'anime d'un nouvel équilibre hydrostatique. Les couches externes de l'étoile se dilatent ce qui a pour conséquence de diminuer la température de la chromosphère de 5 500 K à 3 700 K. L'étoile gonfle et prend une teinte rouge. D'où la phase de géante rouge. Le diamètre de l'étoile étant supérieur à celui de l'étoile d'origine et pour une masse inférieure, la gravité superficielle de la géante rouge est plus faible ce qui entraîne des pertes considérables de matière qui peuvent atteindre  $10^{-5} M_{\odot} \cdot \text{an}^{-1}$ , où  $M_{\odot}$  est la masse du Soleil.

## Les nébuleuses planétaires

Articles détaillés : Nébuleuse protoplanétaire et Nébuleuse planétaire.

Lorsque la géante rouge arrive en fin de vie, ayant brûlé ses réserves d'hélium et d'hydrogène son noyau se contracte tandis que les couches périphériques sont expulsées et forment une nébuleuse planétaire (NP). Le modèle de « *vent stellaire* » est communément adopté pour décrire la formation des nébuleuses planétaires : la géante rouge perd ses couches périphériques sous la forme d'un vent stellaire relativement lent, de l'ordre de  $10 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$ . Puis lorsque le noyau est *mis à nu*, le vent stellaire s'accélère pour atteindre  $1\,000 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$ .

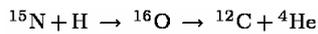
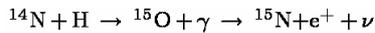
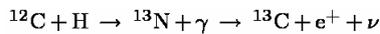
Les couches externes éjectées par l'étoile ne peuvent pas entretenir de réaction nucléaire : elles ne produisent plus de lumière visible. C'est le rayonnement ultraviolet émis par le noyau résiduel qui est responsable de la luminosité de la nébuleuse planétaire par le phénomène de photoionisation (puis recombinaison électronique). Le noyau résiduel, pour sa part, est composé des *déchets* de fusion et ne peut pas non plus maintenir de réactions nucléaires : son rayonnement est lié à son refroidissement, suivant une loi de corps noir. Ce noyau résiduel est un corps compact qu'on appelle naine blanche.



La nébuleuse planétaire de la Lyre.

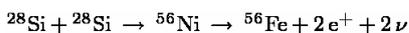
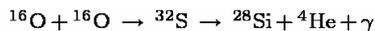
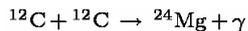
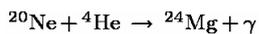
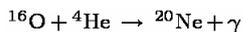
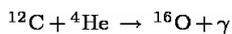
## Le cas des étoiles massives

Les étoiles de plus de 6 masses solaires sortent de la séquence principale en quelques centaines de millions d'années seulement. La fusion de l'hydrogène est accélérée par un phénomène de catalyse, qui n'a lieu que dans les conditions de pression et de température que l'on retrouve dans le cœur des étoiles les plus massives. Il s'agit du **cycle catalytique du carbone** (ou **cycle CNO**) :



L'atome de carbone subit des transmutations successives au cours desquelles il capture plusieurs noyaux d'hydrogène, subit deux désintégrations  $\beta^+$ , ce qui donne deux neutrons, puis en fin de cycle, la fusion d'un quatrième noyau d'hydrogène provoque la formation d'un atome d'oxygène instable qui se scinde en carbone et en hélium. Le carbone  $^{12}\text{C}$ , que l'on retrouve en fin de cycle, joue donc simplement le rôle de catalyseur.

Ces étoiles sont suffisamment massives pour qu'à de plus hautes températures, de nouvelles réactions de fusion se mettent en place :



Chaque réaction demande des conditions de température et de pression plus importantes que la réaction précédente, l'étoile alterne donc les phases de fusion, d'arrêt des réactions et de contraction du cœur de l'étoile. Il se forme une structure en oignon avec du centre vers l'extérieur des zones de réaction du silicium, de l'oxygène, du carbone, de l'hélium et de l'hydrogène. Lorsque l'étoile en arrive au stade ultime et produit du fer, il n'est plus possible de produire de l'énergie par fusion (le fer est l'élément le plus stable). À ce moment-là les réactions de fusion dans le cœur s'arrêtent définitivement, et l'étoile s'effondre sur elle-même. Il se produit une supernova, qui va conduire à la création d'une étoile à neutrons ou d'un trou noir. Il s'agit d'un événement très rare et qui libère une quantité d'énergie phénoménale en un temps très bref, de quelques heures à quelques jours au plus. Dans certains cas d'étoiles de très grandes masses, il se produit non pas une supernova, mais un sursaut gamma, événement connu le plus énergétique dans l'Univers.

## Le cas des étoiles binaires

Article détaillé : Étoile binaire.

Certaines étoiles binaires sont suffisamment proches pour interagir et s'échanger de la matière, soit sous forme de vent stellaire, soit par débordement du lobe de Roche (l'étoile devient plus grande que son lobe de Roche, et va transvaser son surplus de matière sur l'astre compagnon. Dans certains cas, si cet astre compagnon est une naine blanche, cela va avoir tendance à réactiver les réactions nucléaires à la surface de la naine blanche, voire à créer une supernova de type Ia (explosion de naine blanche). Il est également possible que deux étoiles se percutent. Ceci produit une nouvelle étoile plus massive. Toutefois, la convection interne qui résulte de cet événement peut *nettoyer* le cœur de l'étoile de ses déchets, augmentant la durée de vie de l'étoile résultante.

## Tableau récapitulatif

Masse de l'étoile (en masses solaires, $M_{\odot}$ ( $1 M_{\odot} = 1,9891 \times 10^{30}$ kg))	30 $M_{\odot}$	10 $M_{\odot}$	3 $M_{\odot}$	1 $M_{\odot}$	0,3 $M_{\odot}$
Luminosité pendant la séquence principale (Soleil=1)	10 000	1 000	100	1	0,004
Vie sur séquence principale (en milliards d'années)	0,06	0,10	0,30	10	800
Les réactions nucléaires s'arrêtent aux noyaux de	fer	silicium	oxygène	carbone	hélium
Phénomène terminal	supernova	supernova	nébuleuse planétaire	vent stellaire	vent stellaire
Masse éjectée	24 $M_{\odot}$	8,5 $M_{\odot}$	2,2 $M_{\odot}$	0,3 $M_{\odot}$	0,01 $M_{\odot}$
Nature du noyau résiduel	trou noir	étoile à neutrons	naine blanche	naine blanche	naine blanche
Masse du cadavre stellaire	6 $M_{\odot}$	1,5 $M_{\odot}$	0,8 $M_{\odot}$	0,7 $M_{\odot}$	0,3 $M_{\odot}$
Densité (eau=1)	$3 \times 10^{15}$	$5 \times 10^{14}$	$2 \times 10^7$	$10^7$	$10^6$
Rayon (en m)	6192,21	17861,44	$2,67 \times 10^6$	$3,22 \times 10^6$	$5,22 \times 10^6$
Gravité (en $m \cdot s^{-2}$ )	$5,19 \times 10^{12}$	$2,5 \times 10^{12}$	$1,49 \times 10^7$	$8,99 \times 10^6$	$1,46 \times 10^6$

## Références

[1] [http://fr.wikipedia.org/w/index.php?title=%C3%89volution\\_stellaire&action=edit](http://fr.wikipedia.org/w/index.php?title=%C3%89volution_stellaire&action=edit)

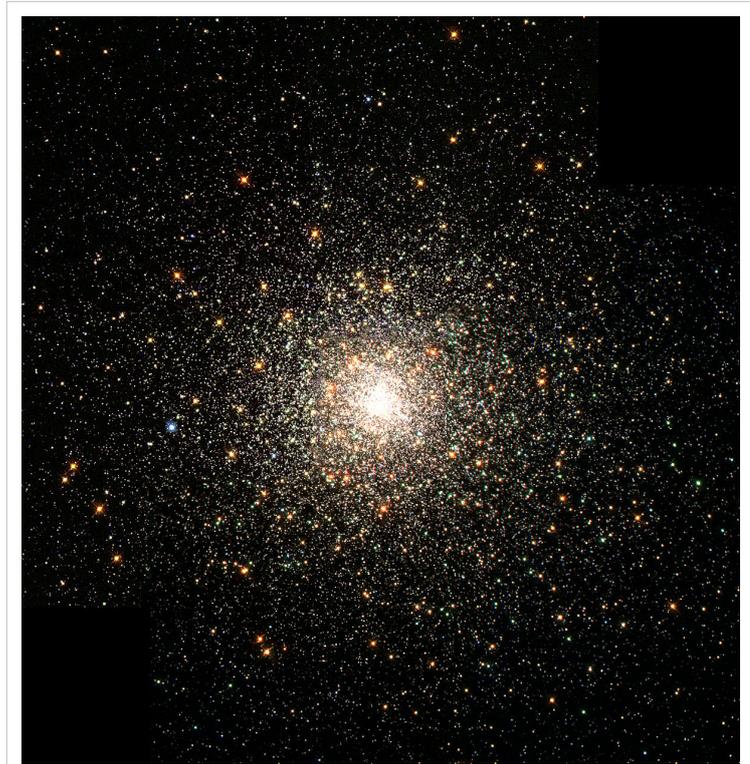
# Amas globulaire

En astronomie, un **amas globulaire**<sup>[1]</sup> est un amas stellaire très dense, contenant typiquement une centaine de milliers d'étoiles distribuées dans une sphère dont la taille varie de 20 à quelques centaines d'années-lumière. Leur densité est ainsi nettement plus élevée que celle des amas ouverts. Les étoiles de ces amas sont généralement des géantes rouges.

On compte 150 amas globulaires dans notre Galaxie. Mais il en existe sans doute d'autres, indétectables car masqués par le centre galactique.

Les amas globulaires font partie du halo galactique, ils orbitent autour du centre galactique à une distance variant de 1 à 100 kiloparsecs<sup>[réf. nécessaire]</sup> (voir article de Halton C. Arp, *Globular Clusters*, dans *Galactic Structure*, 1965, p. 401). C'est par leur étude que Harlow Shapley, en 1918, a pu déterminer la position du Soleil au sein de la Galaxie.

Comme les amas globulaires contiennent les étoiles les plus âgées d'une galaxie, ils contribuent également de façon importante à l'étude de l'évolution des étoiles et des galaxies.



L'amas globulaire M80

## Formation

La plupart des amas globulaires sont très anciens et se sont probablement formés en même temps que leur galaxie hôte. Néanmoins, certains amas globulaires de couleur bleue ont été récemment observés et leur couleur est, normalement, représentative des étoiles chaudes et jeunes. On ne sait pas encore si des amas globulaires peuvent se former relativement tard dans la vie d'une galaxie.

## Composition

Certains amas globulaires, comme Omega Centauri de notre Galaxie, peuvent avoir une masse de plusieurs millions de masses solaires.

Certaines étoiles de type particulier, comme les traînardes bleues (*blue stragglers*), les pulsars-millisecondes ou les binaires X de faible masse (*low-mass X-ray binaries*), sont beaucoup plus communes dans les amas globulaires.

La densité des étoiles dans les amas globulaires étant très élevée, les collisions ou quasi-collisions entre étoiles y sont parfois possibles, contrairement aux autres régions d'une galaxie.

## Distribution

Lorsqu'on a pris en compte la distance des amas globulaires, il est apparu que leur distribution était fortement asymétrique et que la partie observable du disque galactique n'en constituait qu'une fraction, le reste étant obscurci par le gaz et la poussière du disque galactique.

## Historique des observations

### Découvertes d'amas globulaires

Nom de l'amas	Découvert par	Année
M22	Abraham Ihle	1665
ω Cen	Edmond Halley	1677
M5	Gottfried Kirch	1702
M13	Edmond Halley	1714
M71	Philippe Loys de Chéseaux	1745
M4	Philippe Loys de Chéseaux	1746
M15	Jean-Dominique Maraldi	1746
M2	Jean-Dominique Maraldi	1746

Le premier amas globulaire M22 a été découvert en 1665 par Abraham Ihle, un astronome amateur allemand. À cause de la faible ouverture des télescopes de cette époque, les étoiles individuelles des amas ne pouvaient être résolues. Le premier à obtenir ce niveau de détail fut Charles Messier quand il observa l'amas M4. Les huit premiers amas observés apparaissent dans le tableau ci-contre. Plus tard, Abbé Lacaille lista les amas NGC 104, NGC 4833, M55, M69 et NGC 6397 dans son catalogue datant de 1751–52. Le *M* avant le numéro de l'amas fait référence au catalogue de Charles Messier, tandis que *NGC* vient du catalogue *New General Catalogue* établi par John Dreyer.

William Herschel commença un programme d'observation en 1782, utilisant un télescope plus grand capable de séparer les étoiles des 33 amas globulaires connus à ce moment. Au passage, Il découvrit 37 nouveaux amas. Le premier à utiliser le terme *amas globulaire* fut Herschel dans son catalogue des objets lointains de 1789.

Le nombre d'amas globulaires découverts augmenta régulièrement, atteignant 83 en 1915, 93 en 1930 et 97 vers 1947. Au total, 151 amas globulaires sont recensés dans notre galaxie, sur un total estimé de  $180 \pm 20$ . On pense que de nombreux amas sont cachés derrière le nuage de gaz et de poussière du noyau galactique.

Au début de l'année 1914, Harlow Shapley débuta une série d'études des amas globulaires, publiées dans une quarantaine d'articles scientifiques. Il observa des étoiles céphéides variables dans les amas, ce qui lui permit de déterminer leur distance (en correspondance avec leur luminosité).



M75 est un amas globulaire très dense de classe I.

La plupart des amas globulaires de la Voie lactée sont observés à proximité du noyau galactique et une majorité apparaît dans la partie du ciel céleste centrée sur le noyau. En 1918, cette distribution très asymétrique a été utilisée par Harlow Shapley pour déterminer les dimensions de notre galaxie dans son ensemble. En prenant l'hypothèse que les amas globulaires suivaient une distribution plus ou moins sphérique autour du centre de la galaxie, il utilisa leur position pour calculer la position du Soleil dans la Voie lactée. Ce faisant, Shapley a délogé le soleil à la périphérie de notre galaxie (dont on sait maintenant qu'il se trouve à quelque 7,8 kpc du centre <sup>[citation nécessaire]</sup>). Il a ainsi montré que la taille de notre galaxie est bien plus grande que ce qu'on pensait auparavant. Les distances estimées par Shapley étaient faussées parce qu'il n'avait pas tenu compte de l'absorption de la lumière des astres observés en provenance de certains amas par la poussière galactique, faisant paraître

ces amas plus lointains. Son estimation est cependant du même ordre de grandeur que la taille actuellement admise.

Les mesures de Shapley indiquaient aussi que le Soleil était relativement loin du centre de la Galaxie, contrairement aux données de son époque reposant sur la distribution régulière des étoiles ordinaires dans le ciel. En fait, les étoiles ordinaires sont souvent obscurcies par le gaz et les poussières du disque galactique alors que les amas globulaires sont en dehors de ce disque et peuvent être vus de beaucoup plus loin.

Henrietta Swope et Helen Battles Sawyer ont participé plus tard aux travaux de Shapley. Entre 1927 et 1929, Harlow Shapley et Helen Sawyer commencèrent à classer les amas selon leur densité en étoiles. Les amas les plus denses sont ainsi dits de classe I, jusqu'aux amas les moins denses de classe XII. Le système de H. Shapley et H. B. Sawyer issu de cette classification est aujourd'hui utilisé.

## Notes et références

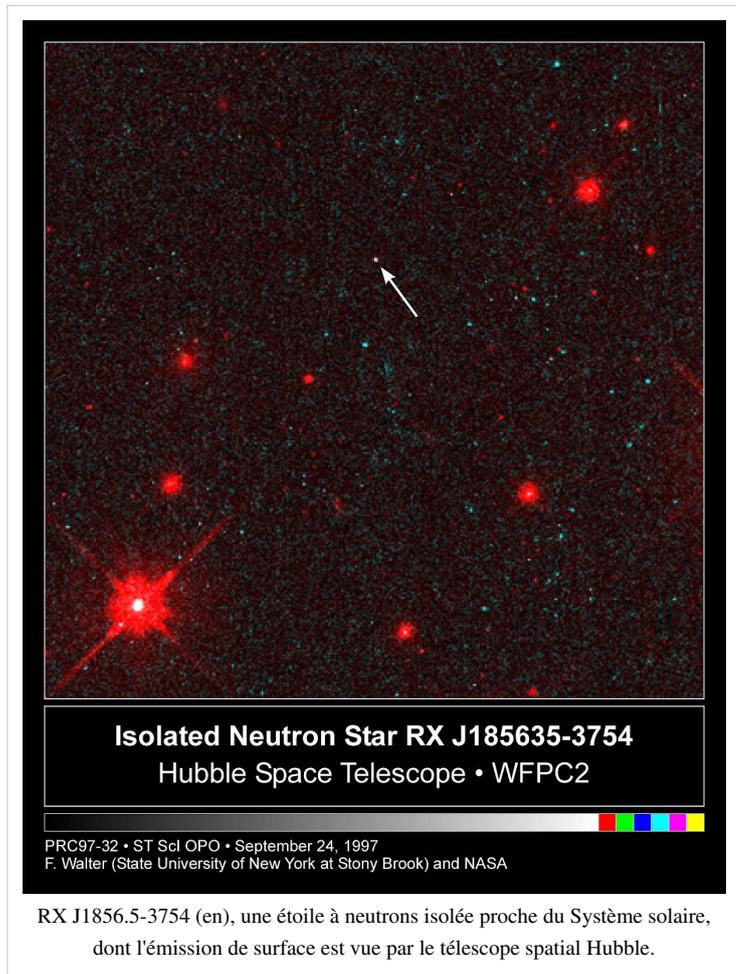
[1] Du latin *globulus*, petite boule, ou petit globe. Voir aussi globule et globulaire sur le Wiktionnaire.

# Étoile à neutrons

Une **étoile à neutrons** est un astre principalement composé de neutrons maintenus ensemble par les forces de gravitation. De tels objets sont le résidu compact issu de l'effondrement gravitationnel du cœur d'une étoile massive quand celle-ci a épuisé son combustible nucléaire, d'où leur nom. Cet effondrement s'accompagne d'une explosion des couches externes de l'étoile, qui sont complètement disloquées et rendues au milieu interstellaire, phénomène appelé supernova. Le résidu compact n'a d'étoile que le nom : il n'est plus le siège de réactions nucléaires et sa structure est radicalement différente de celle d'une étoile ordinaire. Sa masse volumique est en effet extraordinairement élevée, de l'ordre de  $10^{15}$  grammes (soit un milliard de tonnes) par centimètre cube, et sa masse comprise dans une fourchette très étroite, autour de 1,4 fois la masse du Soleil, correspondant à ce que l'on appelle la masse de Chandrasekhar. Cette masse occupe un volume très restreint, d'un rayon d'environ 10 à 20 kilomètres seulement.

À leur naissance, les étoiles à neutrons sont dotées d'une vitesse de rotation très élevée, de plusieurs dizaines de tours par seconde. Elles possèdent également un champ magnétique très intense, allant jusqu'à  $10^{11}$  teslas. Leur intérieur est également très atypique, étant principalement composé de neutrons dans un état superfluide. On y trouve également des proportions plus modestes de protons et d'électrons supraconducteurs. La région la plus centrale d'une étoile à neutrons est actuellement mal connue du fait de sa densité trop élevée. Elle peut être composée de neutrons ou de formes de matière plus exotiques.

Selon les circonstances, une étoile à neutrons peut se manifester sous divers aspects. Si elle tourne rapidement sur elle-même et qu'elle possède un puissant champ magnétique, elle projette alors le long de son axe magnétique un mince pinceau de radiations, et un observateur placé approximativement dans la direction de cet axe observera une émission pulsée par un effet de phare, appelée pour cette raison pulsar. Une étoile à neutrons située dans un système binaire peut arracher de la matière à son étoile compagnon et donner lieu à une émission pulsée ou continue dans le domaine des rayons X et gamma. Isolée et sans son émission pulsée, une étoile à neutrons est nettement plus difficile à détecter car seule l'émission thermique de sa surface est éventuellement décelable.



## Historique

Le concept d'étoiles à neutrons est né immédiatement après la découverte du neutron en 1932 par James Chadwick. Le physicien Lev Landau proposa alors qu'il puisse exister des astres presque entièrement composés de neutrons et dont la structure serait déterminée par un effet de mécanique quantique appelé pression de dégénérescence, à l'instar d'une autre classe d'astres, les naines blanches dont la structure est déterminée par la pression de dégénérescence des électrons. Deux ans plus tard, en 1934, les astronomes Walter Baade et Fritz Zwicky eurent l'intuition que le passage d'une étoile ordinaire à une étoile à neutrons libérerait une quantité considérable d'énergie et donc de rayonnement électromagnétique, donnant l'illusion de l'allumage d'un astre nouveau. Ils proposèrent alors le terme de « super-nova » pour décrire ce phénomène, par opposition au phénomène de nova bien documenté et largement moins énergétique<sup>[1]</sup>, terme finalement transformé en « supernova ».

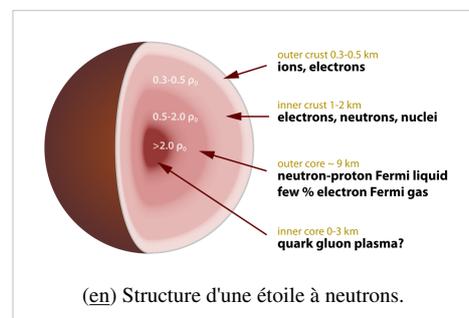
L'étude des étoiles à neutrons n'a pris son essor qu'à partir de leur phénomène d'émission pulsée les révélant sous la forme de pulsar. Le premier pulsar découvert fut PSR B1919+21 en 1967, par Jocelyn Bell, alors étudiante d'Antony Hewish. Le lien entre pulsar et étoiles à neutrons fut fait presque immédiatement par l'identification d'un pulsar au sein de la Nébuleuse du Crabe, le rémanent de la supernova historique SN 1054, prouvant ainsi que les étoiles à neutrons étaient effectivement produites lors de l'explosion de supernovæ. Par la suite, de nombreux autres pulsars furent découverts au sein de rémanents de supernova. Cependant, la durée de vie d'un rémanent de supernova avant sa dispersion dans le milieu interstellaire est nettement plus brève que la durée pendant laquelle l'émission pulsée de l'étoile à neutrons est observable. Aussi la plupart des pulsars ne sont pas associés à un rémanent<sup>[2]</sup>.

Aujourd'hui (2008) près de 2 000 étoiles à neutrons sont connues, la majeure partie — plus de 1 500 — étant détectée sous la forme de pulsars, l'autre sous la forme de sources de rayons X (principalement binaires X ou plus rarement par leur émission de surface). Leur étude permet de reconstituer certains aspects de la physique des étoiles à neutrons.

## Structure d'une étoile à neutrons

Comme dans tout astre, la densité d'une étoile à neutrons augmente à mesure que l'on s'approche du centre. On distingue ainsi dans une étoile à neutrons plusieurs couches, selon la densité et les propriétés de la matière qui les compose.

- À la surface, on parle d'**atmosphère** ou plus rarement d'**océan** pour désigner la couche de quelques centimètres où la matière est partiellement liquide, bien que de densité très élevée.
- En dessous existe la **croûte externe**, composée de la même matière que l'intérieur d'une naine blanche, c'est-à-dire des noyaux atomiques très fortement ou totalement ionisés et d'électrons libres. Quand la densité augmente sont favorisées des réactions de fusion entre protons des noyaux atomiques et électrons libres qui forment des neutrons. Ceci a pour conséquence d'enrichir les noyaux atomiques en neutrons par rapport à leur état à basse densité. Ainsi peuvent se former des noyaux atomiques étranges tels le nickel-62 (à  $2 \times 10^8 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ ), du zinc-80 (à  $5 \times 10^{10} \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ ), puis du krypton-118 (à  $4 \times 10^{11} \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ ).
- Au-delà d'une densité de  $4,3 \times 10^{11} \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ , les noyaux deviennent trop riches en neutrons. Une partie de leurs neutrons s'échappe des noyaux, en formant un fluide supplémentaire. La matière est donc composée de noyaux très riches en neutrons, d'électrons de moins en moins nombreux et de neutrons libres. C'est la **croûte interne**.
- Au-delà d'une densité de  $1,7 \times 10^{14} \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ , les noyaux atomiques achèvent de se dissoudre. On a alors un mélange de fluides de neutrons, protons et électrons, ces derniers étant nettement minoritaires par rapport aux neutrons. Des muons peuvent également être présents en sus des électrons. Cette région est appelée **noyau externe**.
- Si la densité centrale dépasse les  $3 \times 10^{15} \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ , il devient difficile de connaître avec précision l'état de la matière. On est alors dans la région du **noyau interne**. Les modifications tiennent essentiellement à une réorganisation des



constituants internes des neutrons et des protons, appelés quarks. Ces particules existent dans les protons et neutrons sous deux formes, appelées  $u$  (de l'anglais « *up* », doté d'une charge électrique égale aux  $2/3$  de celle du proton) et  $d$  (pour « *down* », charge électrique de  $-1/3$ ). Un proton possède trois quarks  $uud$  et un neutron trois quarks  $udd$ . Il est possible qu'à très haute densité d'autres états de quarks puissent exister de façon stable, comme sous la forme de condensats de pions ou de kaons (possédant chacun un quark et un antiquark), et un plasma de quarks libres de gluons (les gluons sont les particules véhiculant l'interaction forte, à laquelle sont soumis les quarks). Il est également possible qu'un autre type de quark, dit  $s$  (pour « *strange* ») existe dans des combinaisons de trois quarks, on parle alors d'hypérons. De telles configurations sont parfois appelées étoile étrange (quand le quark  $s$ , dit quark étrange joue un rôle) ou étoile à quarks (quand une phase de quarks libres se développe).

Il n'est bien sûr pas possible d'avoir un accès direct aux régions internes des étoiles à neutrons. Cependant, certaines propriétés peuvent être mises en évidence par l'observation, comme la mesure de la masse, du rayon d'une étoile à neutrons, ou d'une combinaison de ces deux quantités.

D'autres phénomènes, comme le ralentissement des pulsars, et de brusques variations de leur vitesse angulaire (appelés *glitches*) permettent également de déterminer l'ordre de grandeur de leur champ magnétique, ainsi que de prouver que leur intérieur est superfluide.

## Détermination des masses et rayons des étoiles à neutrons

Il est difficile de déterminer la masse d'une étoile à neutrons isolée. En revanche, si celle-ci fait partie d'un système binaire, il est possible de contraindre sa masse par l'étude de son orbite. En pratique cela n'est faisable de façon robuste que si l'on a un système très serré de deux étoiles à neutrons et que l'on observe l'émission pulsée de l'une d'entre elles (voire les deux). De tels systèmes sont appelés pulsars binaires, ou pulsars doubles quand on observe l'émission pulsée des deux astres. Dans de telles configurations, il est possible de déterminer la masse des deux astres, en raison d'effets dus à la relativité générale qui dépendent de diverses combinaisons des deux masses. La prise en compte de ces effets relativistes appelés pour des raisons évidentes paramètres post-képlériens est ici indispensable, car en ne tenant compte que des effets de gravitation universelle, un seul paramètre appelé fonction de masse est déterminable, celui-ci ne donnant que peu d'information sur les deux masses. En tenant compte des corrections de relativité générale, les paramètres post-képlériens permettent de contraindre les masses de ces objets.

### Masses

#### Précession relativiste du périastre

Le phénomène de précession du périastre est dû à la relativité générale. Celui-ci a été la première confirmation observationnelle de la relativité générale quand Albert Einstein le calcula pour la planète Mercure pour laquelle il montra qu'il expliquait les irrégularités alors inexplicées de son orbite. Pour un système binaire dont les composantes possèdent les masses  $M_1$  et  $M_2$  et dont l'orbite a une excentricité  $e$  et une période  $P_b$ , la précession relativiste du périastre  $\dot{\omega}$  s'écrit :

$$\dot{\omega} = \frac{3}{1 - e^2} T_{\odot}^{\frac{2}{3}} \left( \frac{P_b}{2\pi} \right)^{-\frac{5}{3}} \left( \frac{M_1 + M_2}{M_{\odot}} \right)^{\frac{2}{3}},$$

où on a introduit la quantité  $T_{\odot}$  correspondant au temps caractéristique associé au rayon de Schwarzschild d'un objet d'une masse solaire, soit :

$$T_{\odot} = \frac{GM_{\odot}}{c^3} \simeq 4,95 \mu\text{s}.$$

( $G$  est la constante de gravitation,  $c$  la vitesse de la lumière et  $M_{\odot}$  la masse du Soleil, soit environ  $2 \times 10^{30}$  kg.) La précession peut se réécrire :

$$\dot{\omega} \simeq \frac{0,2}{1-e^2} \left( \frac{P_b}{1j} \right)^{-\frac{5}{3}} \left( \frac{M_1 + M_2}{M_\odot} \right)^{\frac{2}{3}} \text{ deg} \cdot \text{an}^{-1}.$$

Historiquement, la première mesure de la précession relativiste d'un pulsar binaire fut réalisée au milieu des années 1970 avec le premier pulsar binaire découvert, PSR B1913+16, dont la période orbitale est de 7 h 45 min 6,9807 s, l'excentricité de 0,6171308. La précession observée de 4,226621 degrés par an permet alors de déduire une masse totale du système de 2,85 masses solaires, soit à une bonne précision près le double de la masse de Chandrasekhar, comme attendue pour deux étoiles à neutrons. L'effet est également observé dans d'autres pulsars binaires comme PSR B1534+12 (1,755794 degré par an), PSR J1906+0746 (7,57 degrés par an), PSR B2127+11C (4,4644 degrés par an) et PSR J0737-3039 (16,90 degrés par an). Dans tous les cas, la masse totale du système est de l'ordre de deux fois la masse de Chandrasekhar, soit dans les 2,8 masses solaires.

Il est en principe possible que la précession observée ait d'autres causes, du moins pour partie, que l'effet de relativité générale. Cependant, l'analyse des autres sources possibles de précession (effets de marée, aplatissement des astres) indique que ces effets sont négligeables.

### Effet Doppler

Une étoile à neutrons vue comme un pulsar se comporte à une excellente approximation comme une horloge dont on observe les pulsations émises à intervalles réguliers. De plus, une horloge située dans le champ gravitationnel d'un astre suffisamment massif est vue comme retardant lentement par rapport à une horloge identique restée sur Terre. Ceci provient du fait que la présence d'un champ gravitationnel affecte l'écoulement du temps. Dans l'hypothèse où une étoile à neutrons est elle-même plongée dans le champ gravitationnel d'un autre astre, l'écoulement du temps y est donc modifié par la présence à proximité de cet autre astre. Si maintenant, l'étoile à neutrons se déplace dans le champ gravitationnel de cet astre, alors cet effet d'écoulement du temps va être modulé du fait de la variation du champ gravitationnel ressenti par l'étoile à neutrons.

Cette dernière contribution s'écrit, en notant  $T_p$  le temps « vécu » par l'étoile à neutrons (appelé temps propre) et  $t_p$  celui d'un observateur loin du champ gravitationnel de l'étoile compagnon :

$$T_p = t_p - \frac{GM_2}{ac^2} \left( 1 + \frac{M_2}{M_1 + M_2} \right) - \gamma \sin E(t),$$

$M_1$  étant la masse du pulsar observé,  $M_2$  celle de son compagnon (observé ou non),  $a$  le demi grand axe de l'orbite et  $E$  l'anomalie excentrique. Le premier terme n'est pas directement observable, n'étant pas distinguable de l'effet de ralentissement du temps existant à la surface de l'étoile à neutrons elle-même. Le second terme est, lui, observable dès que l'orbite est non circulaire. Il vaut :

$$\gamma = \frac{eP_b}{2\pi} \frac{GM_2}{ac^2} \left( 1 + \frac{M_2}{M_1 + M_2} \right).$$

L'effet est traditionnellement exprimé en remplaçant le demi grand axe  $a$  par sa valeur donnée par la troisième loi de Kepler, soit :

$$\gamma = e \left( \frac{P_b}{2\pi} \right)^{\frac{1}{3}} T_\odot^{\frac{2}{3}} \frac{M_2(M_1 + 2M_2)}{M_\odot^{\frac{2}{3}}(M_1 + M_2)^{\frac{4}{3}}}.$$

Cet effet périodique est d'amplitude faible : même pour une orbite serrée (période de 8 heures), l'amplitude est de l'ordre de quelques millièmes de seconde (4,295 ms pour PSR B1913+16, bien aidé par la forte excentricité du système).

### Effet Shapiro

La différence d'écoulement du temps en fonction du champ gravitationnel affecte aussi le temps de propagation des signaux, ce à quoi s'ajoute un effet supplémentaire dû au fait que les signaux lumineux émis par le pulsar ne se propagent pas en ligne droite quand ils passent au voisinage d'un éventuel compagnon. Ceci affecte l'intervalle de temps entre les différentes pulsations reçues du pulsar et est connu sous le nom d'effet Shapiro, du nom d'Irwin Shapiro, qui en fit la prédiction en 1964 avant sa détection grâce aux sondes Viking posées sur Mars.

Au cours d'une orbite, les temps d'arrivée des signaux sont modulés de la quantité :

$$\Delta_S = 2r \ln \left( 1 - e \cos E - s \left[ \sin \omega (\cos E - e) + \sqrt{1 - e^2} \cos \omega \sin E \right] \right),$$

où  $\omega$  est la longitude du périastre, qui est mesuré indépendamment par l'étude de l'orbite. Les quantités  $r$  et  $s$  sont appelées respectivement paramètre d'amplitude et paramètre de forme.

Ils dépendent des masses par les formules :

$$r = T_{\odot} \frac{M_2}{M_{\odot}},$$

$$s = \frac{a \sin i}{c} \left( \frac{P_b}{2\pi} \right)^{-\frac{2}{3}} T_{\odot}^{-\frac{1}{3}} \left( \frac{M_1 + M_2}{M_{\odot}} \right)^{\frac{2}{3}} \frac{M_{\odot}}{M_2}.$$

Le paramètre  $s$  est en général inutile pour contraindre les masses, car il dépend du sinus de l'angle d'inclinaison  $i$  qu'il n'est pas possible de déterminer, sauf cas très particulier (par exemple en cas de binaire à éclipses). Par contre le paramètre  $r$  donne immédiatement la masse du compagnon de l'étoile à neutrons. L'effet Shapiro reste extrêmement faible. Son amplitude est de l'ordre du temps mis par la lumière pour parcourir une distance de l'ordre du rayon de Schwarzschild de l'étoile, soit quelques microsecondes. Il n'est ainsi pas mis en évidence dans PSR B1913+16, mais l'est dans PSR B1534+12 et PSR J0737-3039, qui incidemment sont tous deux vus quasiment par la tranche ( $i$  très proche de 90 degrés, son sinus étant très proche de 1).

### Rayonnement gravitationnel

Un système de deux corps massifs en orbite l'un avec l'autre va être le siège de l'émission d'ondes gravitationnelles, à l'instar de deux objets possédant une charge électrique qui sont le siège de l'émission de rayonnement électromagnétique, quand ils se trouvent accélérés l'un par rapport à l'autre. Les ondes gravitationnelles, prédites par Albert Einstein dans le cadre de la relativité générale, n'ont jamais été observées directement, mais leur mise en évidence explicite a été réalisée avec des étoiles à neutrons, en l'occurrence au sein du pulsar binaire PSR B1913+16. L'émission d'ondes gravitationnelles provoque une lente usure de l'orbite des deux corps, qui lentement spiralent l'un avec l'autre. En pratique, cette émission se traduit par l'observation d'une baisse de la période orbitale du système.

Un calcul classique permet d'évaluer cette variation selon la formule :

$$\dot{P}_b = -\frac{192\pi}{5} \left( \frac{2\pi T_{\odot}}{P_b} \right)^{\frac{5}{3}} \frac{1 + \frac{73}{24}e^2 + \frac{37}{96}e^4}{(1 - e^2)^{\frac{7}{2}}} \frac{M_1 M_2}{M_{\odot}^{\frac{5}{3}} (M_1 + M_2)^{\frac{1}{3}}}.$$

L'effet étant cumulatif au cours du temps, il n'est pas difficile à mettre en évidence pour un pulsar binaire en orbite serrée. Par contre, il est très difficile de distinguer cette usure réelle de l'orbite par une variation apparente de la période orbitale qui, elle, est due à des considérations purement cinématiques. Si le système observé accélère ou décélère par rapport à la Terre, une variation supplémentaire de la période du signal émis (quel qu'il soit) se superpose à sa variation intrinsèque par le simple fait que la distance parcourue par le signal entre l'émission et la réception varie de façon non linéaire. En pratique, cela se produit dans deux cas : soit l'objet est effectivement accéléré, par exemple s'il tombe vers le centre d'un amas globulaire, auquel cas on parle d'accélération séculaire, soit il se déplace en ligne droite suivant un mouvement rectiligne et uniforme, mais suffisamment vite pour que sa distance varie de façon non linéaire. On parle alors d'effet Shklovski. Dans les cas où il est possible de contraindre ces effets, on peut utiliser la formule du rayonnement gravitationnel pour contraindre les masses, comme ce fut le cas

pour PSR B1913+16, ce qui valut le Prix Nobel de physique aux découvreurs de cet objet, Russell Alan Hulse et Joseph Taylor, qui mirent en évidence son rayonnement gravitationnel. Le pulsar binaire PSR B1534+12 est un exemple de pulsar binaire, dont on observe une usure de la période orbitale, mais dont l'amplitude ne correspond pas à la valeur attendue, les masses étant connues par ailleurs grâce aux autres paramètres post-képlériens. Il est considéré que ce désaccord provient d'une contribution notable de l'effet Shlovski que l'on contraint ici dans le cas de ce pulsar.

### Récapitulatif

Plus d'une demi-douzaine de couples d'étoiles à neutrons sont connus à ce jour, dont six ou sept permettent de déterminer assez précisément les masses des deux astres. Parmi ceux-ci, un seul est un pulsar double, PSR J0737-3039, les autres ne laissant voir qu'un pulsar et un compagnon sombre. La masse déduite du compagnon étant dans la même plage de masse (1,0 à 1,5 masse solaire), il est interprété comme étant une autre étoile à neutrons : il n'est ni assez massif pour être un trou noir, ni assez lumineux pour être une naine blanche.

Pulsar	Masse totale ( $M_{\odot}$ )	Masse ( $M_{\odot}$ )
PSR J0737-3039A	2,588(3)	1,337(5)
PSR J0737-3039B	2,588(3)	1,250(5)
PSR J1518+4904	2,62(7)	$1,56^{+0,13}_{-0,44}$
PSR J1518+4904 (compagnon)	2,62(7)	$1,05^{+0,45}_{-0,11}$
PSR B1534+12	2,6784	1,3332(10)
PSR B1534+12 (compagnon)	2,6784	1,3452(10)
PSR J1756-2251	2,58	1,40(3)
PSR J1756-2251 (compagnon)	2,58	1,18(3)
PSR J1811-1736	2,57(10)	<1,74
PSR J1811-1736 (compagnon)	2,57(10)	>0,93
PSR J1829+2456	2,5(2)	<1,38
PSR J1829+2456 (compagnon)	2,5(2)	<1,30(8)
PSR J1906+0746	2,61(2)	
PSR J1906+0746 (compagnon)	2,61(2)	
PSR B1913+16	2,8284	1,4408(3)
PSR B1913+16 (compagnon)	2,8284	1,3873(3)
PSR B2127+11C	2,712	1,349(40)
PSR B2127+11C (compagnon)	2,712	1,363(40)

## Rayon

Il est en principe possible de déterminer le rayon d'une étoile à neutron si l'on observe l'émission thermique en provenance de sa surface. La puissance rayonnée par un objet de rayon  $R$  et dont la surface est portée à la température  $T$  s'écrit en effet :

$$L = 4\pi R^2 \sigma T^4,$$

$\sigma$  étant la constante de Stefan. Un certain nombre de pulsars sont suffisamment proches pour que leur émission de surface soit, semble-t-il, visible. C'est, en autres, le cas de PSR J0633+1746 (Geminga), PSR B0833-45 (pulsar de Vela), PSR B1055-52 ou PSR B1706-44<sup>[3]</sup>. Malheureusement, il est extrêmement difficile d'exploiter ce genre de relations, pour plusieurs raisons :

- Il est souvent difficile de connaître la distance exacte de l'étoile à neutrons. La quantité observée est la densité de flux, qui nécessite de connaître cette distance pour en déduire la luminosité  $L$  ;
- quand on déduit malgré tout des observations la luminosité, celle-ci n'est connue que dans une certaine bande de fréquence, correspondant aux rayons X. Pour obtenir la température, plusieurs étapes sont nécessaires, parmi lesquelles, sa compacité, ainsi que la proportion de rayonnement absorbé par le milieu interstellaire ;
- de plus, la composition chimique de l'atmosphère de l'étoile à neutrons est extrêmement difficile sinon impossible à déterminer, du fait de l'absence quasi permanente de raies d'émission. *A priori*, la surface d'une étoile à neutrons est soit composée d'éléments légers (hydrogène et hélium), soit d'éléments lourds (principalement du fer). Les éléments légers ont une opacité relativement faible, ce qui empêche de pouvoir considérer que la surface de l'étoile à neutrons est à l'équilibre thermique, condition pourtant nécessaire pour pouvoir utiliser la formule ci-dessus. Le problème est cependant nettement moins sérieux pour les atmosphères composées d'éléments lourds.

Au final, une modélisation complexe est nécessaire pour pouvoir tenter d'extraire le rayon de l'étoile à neutrons, avec un résultat guère efficace. Par exemple, l'hypothèse d'une atmosphère d'éléments lourds ne marche pas du tout pour extraire le rayon des étoiles à neutrons jeunes, ceux-ci s'avérant avec cette modélisation largement trop petits pour être acceptables. C'est le cas de RX J0822.0-4300 (l'étoile à neutrons du rémanent Puppis A), pour lequel on trouve un rayon compris entre 1 et 1,6 kilomètre, le pulsar de Vela (entre 1,7 et 2,5 km), ou PSR B1706-44 (entre 1,9 et 5,8 km). Pour les étoiles à neutrons plus âgées (plus de 100 000 ans), le modèle s'avère plus satisfaisant, avec des résultats autorisant ou en tout cas s'approchant des valeurs de l'ordre de 10 km pour le rayon. C'est le cas de Geminga (entre 2,7 et 8,7 km), PSR B1055-52 (entre 6,5 et 19,5 km), RX J1856.5-3754 (plus de 16 km), ou RX J0720.4-3125 (entre 5 et 15 km). L'incertitude sur la distance est ici extrêmement handicapante : l'incertitude d'un facteur 3 pour la distance de PSR B1055-52 ou RX J0720.4-3125 explique à elle seule l'incertitude finale sur le rayon. Il est donc à l'heure actuelle impossible de faire une analyse suffisamment précise du rayon de l'étoile pour contraindre sa structure interne et notamment la composition du cœur.

À l'inverse, la modélisation des étoiles à neutrons par une atmosphère d'hydrogène permet d'obtenir des valeurs (fort imprécises) plus compatibles avec les valeurs attendues.

## Rapport masse-rayon

Dans l'hypothèse où des atomes (éventuellement fortement ionisés) se trouvent à la surface d'une étoile à neutrons, il est en principe possible d'observer des raies d'émission ou d'absorption venant d'eux, et par suite mesurer le décalage vers le rouge d'origine gravitationnelle issu de la surface de l'étoile à neutrons. Celui-ci, noté comme de coutume  $z$ , est donné en fonction de la masse  $M$  et du rayon  $R$  de l'étoile à neutron par la formule :

$$1 + z = \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{2GM}{Rc^2}}},$$

$G$  et  $c$  étant respectivement la constante de Newton et la vitesse de la lumière. L'observation du décalage vers le rouge permet donc d'accéder directement au rapport masse-rayon de l'étoile. Or les observations des pulsars binaires contraignent assez directement la masse à une fourchette relativement étroite aux alentours de 1,35 masse solaire, on

est ainsi en mesure d'obtenir le rayon. De plus, le rapport masse-rayon ne dépend guère de la masse de l'étoile, mais surtout de sa densité centrale, qui est elle-même essentiellement déterminée par la nature de la matière qui s'y trouve. Il est ainsi possible de tester directement certains aspects relatifs à l'équation d'état de la matière des étoiles à neutrons, et, dans l'idéal de contraindre les hypothèses relatives aux étoiles étranges ou étoiles à quarks, dont le cœur est susceptible d'abriter une forme relativement exotique de matière. La raison à cela est que ces deux formes possibles d'étoiles sont notablement plus compactes qu'une étoile à neutrons ordinaire, aussi une valeur élevée du décalage vers le rouge gravitationnel est-elle un bon moyen d'attester leur existence.

Par exemple, la binaire X à faible masse EXO 0748-676, découverte par le satellite artificiel EXOSAT. Lors d'une phase d'activité en 2000, il avait été possible d'identifier de probables raies d'émission de l'oxygène VIII et du fer XXV et XXVI, c'est-à-dire d'atomes ne possédant plus qu'un seul ou deux électrons, permettant d'associer à l'astre un décalage vers le rouge gravitationnel de 0,35<sup>[4]</sup>. D'autres détections de décalage vers le rouge avaient été effectuées auparavant, mais uniquement sur des astres à très fort champ magnétique, qui lui-même influence la position des raies spectrales (voir Effet Zeeman). L'utilisation de EXO 0748-676, dont le champ magnétique déduit des propriétés du rayonnement X de l'astre est relativement faible, échappe donc à ce type de biais.

Le décalage vers le rouge observé est relativement intéressant. Sa valeur est incompatible avec une étoile à neutrons de masse et d'équation d'état usuelles (1,4 masse solaire et pas d'étoile étrange ou d'étoile à quarks). Si le cœur de l'étoile n'est pas composé de matière exotique, alors sa masse est comprise, selon les équations d'état envisageables, entre 1,6 et 1,8 masse solaire, alors que si sa masse est bien de 1,4 masse solaire, le décalage vers le rouge pointe assez fortement en faveur d'une étoile à quarks dont le cœur est dit en phase CFL (*Color-flavor locked*). La mesure de la masse de l'étoile à neutrons est ainsi ici indispensable pour discriminer entre ces deux hypothèses.

À noter au passage que ce type de mesure est extrêmement sensible aux détails de la phase d'activité de l'astre. Lors d'une autre phase d'activité en 2003, et malgré un temps d'observation considérable (600 000 secondes, soit près de 7 jours) avec le télescope spatial XMM-Newton, aucune raie précédemment mise en évidence sur cet astre n'a été revue<sup>[5]</sup>.

## Structure interne

### La croûte

La croûte d'une étoile à neutrons correspond à la région principalement composée de noyaux atomiques.

#### État fondamental de la matière dense (croûte externe)

Un aperçu de la structure de la croûte peut être donné en calculant l'état de plus basse énergie de la matière à haute pression. Tant que celle-ci n'est pas trop élevée (voir ci-dessous), l'état le plus stable est a priori un cristal de noyaux atomiques tous identiques. Sous sa forme la plus compacte, le cristal est de type cubique centré. On sait qu'à pression nulle, ce cristal est composé de noyaux de fer-56 (c'est-à-dire composé de 26 protons et 30 neutrons). Leur masse volumique est de 7,86 grammes par centimètre cube. À mesure que l'on augmente la pression la composition du noyau le plus stable est susceptible de changer, principalement pour la raison suivante : si l'on considère une maille élémentaire du cristal, celui-ci contient un noyau, possédant  $Z$  protons et  $A$  nucléons, ainsi que  $Z$  électrons (pas nécessairement liés au noyau, celui-ci étant susceptible d'être ionisé), alors l'équation donnant le potentiel chimique  $\mu$  d'un des  $A$  nucléons s'écrit :

$$A\mu = W(A, Z) + Z\mu_e,$$

$\mu_e$  étant le potentiel chimique des électrons et  $W$  l'énergie de noyau, incluant son énergie de masse et son énergie de liaison.

Cette équation se réécrit :

$$\mu = \frac{W(A, Z)}{A} + \frac{Z}{A}\mu_e.$$

Les électrons vont assez vite ne plus être liés aux noyaux : les électrons étant des fermions, le nombre de ceux-ci ayant une basse énergie est limité, et la pression aidant, la quasi-totalité d'entre eux acquièrent une énergie suffisante pour ne plus être liés au noyau. Les électrons se comportent ainsi comme un gaz de Fermi. Dans un tel gaz, la dépendance du potentiel chimique avec la pression  $P$  est connue, en l'occurrence on a  $\mu_e \propto P^{\frac{1}{4}}$ . Le phénomène d'enrichissement en neutrons de la matière dense peut alors s'expliquer ainsi : passer d'un noyau  $(A, Z)$  à un noyau  $(A', Z')$  peut se faire même si l'énergie de liaison par nucléon du second noyau est moindre, dans l'hypothèse où la baisse du rapport  $Z/A$  en facteur de la contribution au potentiel chimique des électrons la compense.

La difficulté de la méthode ci-dessus réside dans celle du calcul de l'énergie  $W$  du noyau. Celle-ci peut être obtenue expérimentalement pour des noyaux pas trop instables, mais nécessite au bout d'un moment de faire appel à l'extrapolation de formules établies, ou alors à des calculs complexes de physique nucléaire. Doit en particulier être pris en compte le fait qu'un noyau atomique peut être décrit par un formalisme appelé modèle en couches, qui révèle que certaines valeurs pour le nombre de protons et de neutrons, appelées nombres magiques confèrent une meilleure stabilité aux noyaux, à l'instar des atomes qui sont chimiquement plus stables quand ils comportent un certain nombre d'électrons (c'est la fameuse série de gaz rares, avec dans l'ordre 2, 10, 18, 26, 54, 86 électrons pour respectivement l'hélium, le néon, l'argon, le krypton et le radon). En physique nucléaire, les nombres magiques sont 2, 8, 20, 28, 50, 82, 126. Il existe également des « sous-couches » relativement stables, notamment celle à 40 neutrons ou protons. Les calculs de la configuration la plus stable des noyaux remonte à 1971, avec un travail désormais classique de Gordon Baym, Christopher Pethick (de) et Peter Sutherland<sup>[6]</sup>, et a été amélioré par la suite par Pawel Haensel et ses collaborateurs<sup>[7]</sup>. Les calculs révèlent ainsi qu'à partir d'une masse volumique de  $7,96 \times 10^6$  grammes par centimètre cube, l'état le plus stable est d'abord composé de noyaux de nickel, à 28 protons (un des nombres magiques). Ces noyaux de nickel ont au départ 62 nucléons (soit 34 neutrons), et s'enrichissent de 2, puis quatre neutrons supplémentaires (nickel-66). Passé  $1,49 \times 10^9$  g·cm<sup>-3</sup>, l'état le plus stable est formé de noyaux à 50 neutrons, s'appauvrissant progressivement en protons, allant du krypton-86 (36 protons) au nickel-78 (28 protons, ce noyau est stabilisé par le fait que le nombre de neutrons et protons est à chaque fois un nombre magique). Ce noyau est le plus neutronisé à avoir été obtenu en laboratoire. La suite des prédictions, quand la masse volumique dépasse les  $9,64 \times 10^{10}$  g·cm<sup>-3</sup> est plus incertaine, en l'absence de données expérimentales. Il semble que le nouvel état le plus stable fasse appel à des noyaux à 82 neutrons, s'appauvrissant progressivement en protons. Le premier de la liste est le ruthénium-126 (44 protons et 82 neutrons), et le dernier le krypton-118 (36 protons et 82 neutrons). Les incertitudes sur cette dernière partie sont non négligeables, Pawel Haensel ayant fait remarquer qu'il était possible que ce soit une configuration avec une sous-couche de 40 protons (zirconium) qui soit préférée<sup>[8]</sup>.

Le tableau ci-dessous résume la succession des noyaux supposés les plus stables à mesure que la densité de la matière augmente.

Élément et nombre de nucléons (A)	Nombre de protons (Z)	Nombre de neutrons (N)	Z / A	Masse volumique maximale (g·cm <sup>-3</sup> )	Saut en densité par rapport à l'état précédent (%)
Fe-56	26	30	0,4643	$7,96 \times 10^6$	-
Ni-62	28	34	0,4516	$2,71 \times 10^8$	2,9
Ni-64	28	36	0,4375	$1,30 \times 10^9$	3,1
Ni-66	28	38	0,4242	$1,48 \times 10^9$	3,1
Kr-86	36	50	0,4186	$3,12 \times 10^9$	2,0
Se-84	34	50	0,4048	$1,10 \times 10^{10}$	3,3
Ge-82	32	50	0,3902	$2,80 \times 10^{10}$	3,6
Zn-80	30	50	0,3750	$5,44 \times 10^{10}$	3,9

Ni-78	28	50	0,3590	$9,64 \times 10^{10}$	4,3
Ru-126	44	82	0,3492	$1,29 \times 10^{11}$	4,0
Mo-124	42	82	0,3387	$1,88 \times 10^{11}$	3,0
Zr-122	40	82	0,3279	$2,67 \times 10^{11}$	3,2
Sr-120	38	82	0,3167	$3,79 \times 10^{11}$	3,4
Kr-118	36	82	0,3051	$4,33 \times 10^{11}$	3,6

Ce type de structure cristalline existe jusqu'à environ  $4,33 \times 10^{11}$  g·cm<sup>-3</sup>, moment où l'état le plus stable n'est plus un cristal de noyaux baignant dans un liquide d'électrons, mais un mélange noyau-neutrons libres-électrons. Cette transition est traditionnellement appelée point de fuite neutronique, car c'est le moment où il devient thermodynamiquement avantageux pour les neutrons de diffuser en dehors des noyaux.

## Annexes

### Bibliographie

- (en) Max Camenzind, *Compact Objects in Astrophysics*, Springer Verlag (2007), 680 pages, (ISBN 9783540257707), chapitres 6 et 7, pages 187 à 354.

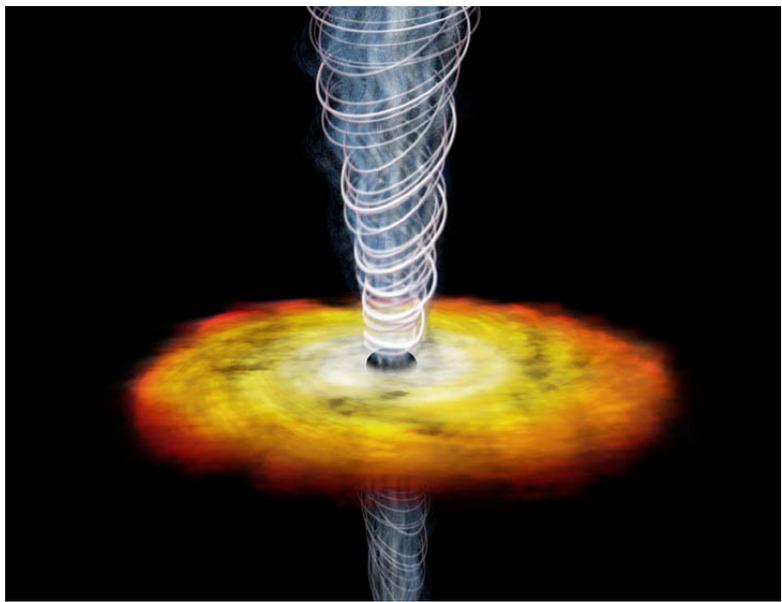
### Notes et références

- [1] Walter Baade & Fritz Zwicky, ' ', **20**, 254-259 (1934) Voir en ligne (<http://www.pnas.org/cgi/reprint/20/5/254>).
- [2] Sans compter le fait que l'explosion d'une supernova n'étant pas symétrique, le pulsar est en général animé d'une vitesse de quelques centaines de kilomètres par seconde par rapport au centre de masse du rémanent, dont ils finissent par sortir une fois la matière du rémanent suffisamment ralentie par le milieu interstellaire : même si le rémanent gardait une identité sur des durées plus longues, les pulsars âgés finiraient par en sortir.
- [3] Pour cette section, voir Dany Page, ' ', **155**, 623-650 (2004), astro-ph/0403657 Voir en ligne (<http://adsabs.harvard.edu/abs/2004ApJS..155..623P>).
- [4] J. Cottam, F. Paerels & M. Mendez, ' ', *Nature*, **420**, , **51-54** (2002), astro-ph/0211126 Voir en ligne ([http://cdsads.u-strasbg.fr/cgi-bin/nph-bib\\_query?2002Natur.420...51C&db\\_key=AST&nosetcookie=1](http://cdsads.u-strasbg.fr/cgi-bin/nph-bib_query?2002Natur.420...51C&db_key=AST&nosetcookie=1)).
- [5] J. Cottam, ' ', **672**, 504-509 (2008), arXiv:0709.4062 (astro-ph) Voir en ligne ([http://cdsads.u-strasbg.fr/cgi-bin/nph-bib\\_query?2008ApJ..672..504C&db\\_key=AST&nosetcookie=1](http://cdsads.u-strasbg.fr/cgi-bin/nph-bib_query?2008ApJ..672..504C&db_key=AST&nosetcookie=1)).
- [6] Gordon Baym, & Peter Sutherland, ' ', **170**, 299-317 (1971) Voir en ligne (<http://adsabs.harvard.edu/abs/1971ApJ...170..299B>).
- [7] Pawel Haensel & Bernard Pichon, ' ', **283**, 313-318 (1994), nucl-th/9310003 Voir en ligne (<http://adsabs.harvard.edu/abs/1994A&A...283..313H>).
- [8] Pawel Haensel, J. L. Zdunik & J. Dobaczewski, ' ', **222**, 353-357 (1989) Voir en ligne (<http://adsabs.harvard.edu/abs/1989A&A...222..353H>).

# Quasar

☞ Pour les articles homonymes, voir Quasar (homonymie).

Un **quasar** (**source de rayonnement quasi-stellaire**<sup>[1]</sup>, équivalent à **presqu'étoile**<sup>[2],[3],[4]</sup>) est une galaxie très énergétique avec un noyau galactique actif. Les quasars sont les entités les plus lumineuses de l'univers<sup>[5]</sup>. Bien qu'il y ait d'abord eu une certaine controverse sur la nature de ces objets jusqu'au début des années 1980, il existe maintenant un consensus scientifique selon lequel un quasar est la région compacte entourant un trou noir supermassif<sup>[6]</sup> au centre d'une galaxie massive. Leur taille est de 10 à 10 000 fois le rayon de Schwarzschild<sup>[7]</sup> du trou noir. Leur source d'énergie provient du disque d'accrétion entourant le trou noir.



Vue d'artiste du quasar GB1508, entre le blazar (en blanc) et le disque en (jaune).

Avec les télescopes optiques, la plupart des quasars ressemblent à de petits points lumineux, bien que certains soient vus comme étant les centres de galaxies actives (couramment connus sous l'abréviation AGN, pour Active Galaxy Nucleus). La majorité des quasars sont beaucoup trop éloignés pour être vus avec de petits télescopes, mais 3C 273, avec une magnitude apparente (ou relative) de 12,9, est une exception. À 2,44 milliards d'années-lumière, c'est un des objets lointains observables avec un équipement d'amateur.

Certains quasars montrent de rapides changements de luminosité, ce qui implique qu'ils sont assez petits (un objet ne peut pas changer plus vite que le temps qu'il faut à la lumière pour voyager d'un bout à l'autre ; voir l'article sur le quasar J1819+3845 pour une autre explication). Actuellement, le quasar ULAS J1120+0641 est le plus lointain jamais observé, et se situe à 12,9 milliards d'années-lumière de la Terre<sup>[8]</sup>

On pense que les quasars gagnent en puissance par l'accrétion de matière autour des trous noirs supermassifs qui se trouvent dans le noyau de ces galaxies, faisant des « versions lumineuses » de ces objets connus comme étant des galaxies actives. Aucun autre mécanisme ne paraît capable d'expliquer l'immense énergie libérée et leur rapide variabilité.

La connaissance des quasars avance rapidement. Dans les années 1980, il n'y avait aucun consensus sur leur origine.

## Structure

Un quasar est composé de trois grandes parties principales :

- Le trou noir supermassif comportant la quasi-totalité de la masse du quasar (de quelques millions à quelques dizaines de milliards de fois la masse du Soleil<sup>[9]</sup>). Il est également le centre du quasar.
- Le disque d'accrétion est le disque formé par la matière qui tombe dans le trou noir. La force de friction engendrée par le frottement des gaz dans le disque génère une forte chaleur.
- Les jets de gaz qui sont expulsés du disque d'accrétion par les lignes de champs magnétique du trou noir atteignent une vitesse proche de celle de la lumière.

## Propriétés

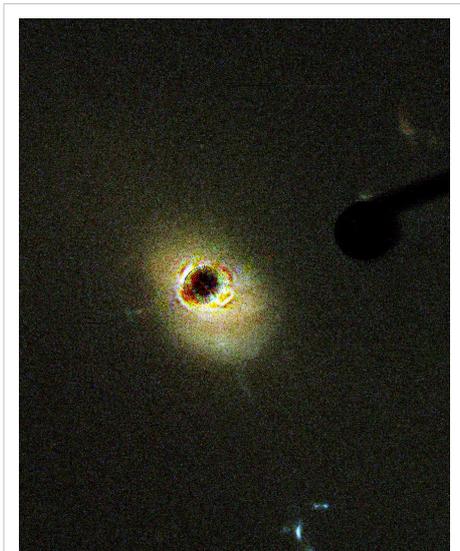
On recense plus de 100 000 quasars (113 666 d'après le plus grand catalogue actuel<sup>[10]</sup>). Tous les spectres observés montrent des décalages vers le rouge allant de 0,06 à 6,4. Par conséquent, tous les quasars connus se situent à de très grandes distances de nous, le plus proche de nous étant à environ 240 Mpc (~783 millions d'a.l.) et le plus éloigné étant à environ 4 Gpc (~13 milliards d'a.l.), aux limites de l'univers observable. Comme la lumière prend beaucoup de temps pour couvrir ces grandes distances, la plupart des quasars qui se trouvent au-delà de 1,0 gigaparsec de distance sont vus tels qu'ils existaient dans un passé très lointain de l'Univers, leur lumière ne nous parvenant qu'aujourd'hui.

Quoique faibles quand ils sont observés optiquement (leur décalage vers le rouge élevé implique que ces objets s'éloignent de nous) les quasars sont les objets les plus brillants connus dans l'Univers. Le quasar qui apparaît le plus brillant dans notre ciel est l'hyper-lumineux 3C 273, dans la constellation de la Vierge. Il a une magnitude apparente d'environ 12,9 (assez brillant pour être vu avec un petit télescope) mais sa magnitude absolue est de -26,7. Cela veut dire qu'à une distance de 10 pc (~ 33 années-lumière), cet objet luirait dans le ciel aussi fortement que le Soleil. La luminosité de ce quasar est donc  $2 \times 10^{12}$  fois plus forte que celle du Soleil, ou environ 100 fois plus forte que la lumière totale d'une galaxie géante, telle que notre Voie lactée.

Le quasar super-lumineux APM 08279+5255 avait, lorsqu'on l'a découvert en 1998, une magnitude absolue de -32,2, quoique les images à haute résolution des télescopes Hubble et Keck révèlent que ce système est gravitationnellement grossi. Une étude du grossissement gravitationnel dans ce système suggère qu'il a été amplifié par un facteur d'environ 10. Cela est encore beaucoup plus lumineux que les quasars tout proches tels que 3C 273. On pensait que HS 1946+7658 avait une magnitude absolue de -30,3, mais lui aussi était mis en valeur par l'effet de grossissement gravitationnel.

On a découvert que les quasars variaient en luminosité sur différentes échelles de temps. Certains varient en brillance tous les  $x$  mois, semaines, jours, ou heures. Cette découverte a permis aux scientifiques de *théoriser* le fait que les quasars génèrent et émettent leur énergie dans une petite région, puisque chaque partie de quasar doit être en contact avec d'autres parties sur une échelle de temps pour coordonner les variations de luminosité. Ainsi, un quasar dont la luminosité varie sur une échelle de temps de quelques semaines ne peut être plus grand que quelques *semaines-lumière*.

Les quasars montrent beaucoup de propriétés comparables à celles des galaxies actives : le rayonnement est non-thermique, et quelques-uns ont des jets et des lobes comme ceux des radiogalaxies. Les quasars peuvent être



Le quasar 3C 273, le plus lumineux jamais observé. Photographie prise par le télescope spatial Hubble.

observés sur de nombreuses régions du spectre électromagnétique : les ondes radio, les infrarouges, la lumière visible, les ultraviolets, les rayons X et même les rayons gamma.

La plupart des quasars sont les plus brillants dans le domaine du proche ultraviolet ( $\sim 1216$  angströms, ce qui correspond à la raie d'émission Lyman- $\alpha$  de l'hydrogène) dans leur référentiel propre, mais à cause des redshifts (décalages vers le rouge) considérables de ces sources, le pic de luminosité a été observé aussi loin que 9 000 A.

Les *quasars de fer* montrent des raies d'émission très fortes résultant du fer ionisé, tel que IRAS 18508-7815.

## Génération d'émission

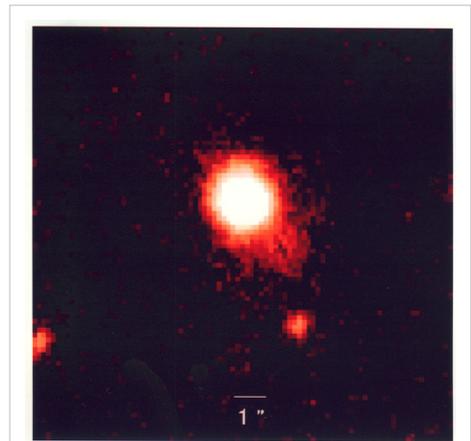
Comme les quasars montrent des propriétés communes à toutes les galaxies actives, beaucoup de scientifiques ont comparé les émissions des quasars et celles des petites galaxies actives due à leur similarité. La meilleure explication pour les quasars est qu'ils deviennent puissants grâce aux trous noirs supermassifs. Pour créer une luminosité de  $10^{40}$  W (la brillance typique d'un quasar), un trou noir supermassif devrait consommer la matière équivalente de 10 étoiles par an. Les quasars les plus brillants sont connus pour dévorer 1 000 masses solaires de matière par an. Les quasars sont connus pour s'allumer ou s'éteindre selon leur environnement. Une des implications est qu'un quasar ne pourrait, par exemple, continuer de se nourrir à ce rythme pendant 10 milliards d'années. Ce qui explique plutôt bien pourquoi il n'y a aucun quasar près de nous. Dans ce cas de figure, lorsqu'un quasar a terminé d'avaloir du gaz et de la poussière, il devient une galaxie ordinaire.

Les quasars fournissent également des indices quant à la fin de la réionisation du Big Bang. Les plus vieux quasars ( $z > 4$ ) montrent une onde Gunn-Peterson et des régions d'absorption devant eux, indiquant que le milieu intergalactique était fait de gaz neutre, à ce moment-là. Des quasars plus récents montrent qu'ils n'ont aucune région d'absorption mais plutôt des spectres contenant une zone avec un pic connu sous le nom de forêt Lyman- $\alpha$ . Cela indique que l'espace intergalactique a subi une réionisation dans le plasma, et que le gaz neutre existe seulement sous la forme de petits nuages.

Une autre caractéristique intéressante des quasars est qu'ils montrent des traces d'éléments plus lourds que l'hélium. Cela indique que ces galaxies ont subi une importante phase de formation d'étoiles créant une population III d'étoile, entre l'époque du Big Bang et l'observation des premiers quasars. La lumière de ces étoiles a pu être observée grâce au télescope spatial Spitzer de la NASA (quoique fin 2005, cette interprétation demande encore à être confirmée).

## Historique

Les premiers quasars furent découverts avec des radiotélescopes vers la fin des années 1950. Beaucoup furent enregistrés comme des sources radio sans objet visible associé. En utilisant de petits télescopes et le télescope Lovell comme interféromètre, on a remarqué qu'ils avaient une très petite taille angulaire. Des centaines de ces objets ont été répertoriés dès 1960 et répertoriés dans le Third Cambridge Catalogue. En 1960, la source radio 3C 48 fut finalement reliée à un objet optique. Les astronomes détectèrent ce qui paraissait être une pâle étoile bleue à l'endroit des sources radios et obtinrent son spectre. Contenant énormément de raies d'émission inconnues — le spectre irrégulier défiait toute interprétation — la revendication de John Bolton parlant d'un grand redshift ne fut pas acceptée.



Cette photo, prise en lumière infrarouge, est une image en fausses couleurs d'un « tandem quasar-supernova », avec la plus lumineuse des explosions jamais observées dans ce type de combinaison. Ce couple fut découvert par une équipe de chercheurs venant de six institutions différentes.

En 1962, une percée fut accomplie. Une autre source radio, 3C 273, allait subir cinq occultations par la Lune. Les mesures effectuées par Cyril Hazard et John Bolton durant l'une des occultations en utilisant le radiotélescope de Parkes permirent à Maarten Schmidt d'identifier l'objet du point de vue optique. Il obtint un spectre optique en utilisant le télescope Hale (5,08 m) du mont Palomar. Ce spectre révéla les mêmes raies d'émission étranges. Schmidt réalisa que c'étaient les raies de l'hydrogène *redshiftées* (décalées vers le rouge) de 15,8 % ! Cette découverte démontra que 3C 273 s'éloignait à la vitesse de 47 000 km/s. Cette découverte révolutionna l'observation des quasars et permit à d'autres astronomes de trouver des redshifts émanant des raies d'émission et venant d'autres sources radio. Comme Bolton l'avait prédit plus tôt, 3C 48 s'avéra avoir un redshift équivalent à 37 % de la vitesse de la lumière.

Le mot « quasar » fut inventé par l'astrophysicien chinois Hong-Yee Chiu dans la revue *Physics Today*, pour désigner ces intrigants objets qui devenaient populaires peu après leur découverte, mais qui se désignaient alors par leur appellation complète (quasi-stellar radio source) :

« Pour l'instant, le mot plutôt maladroit et indéterminable de « quasi-stellar radio source » est utilisé pour décrire ces objets. Comme la nature de ces objets nous est complètement inconnue, il est difficile de leur donner une nomenclature courte et appropriée, même si leurs propriétés essentielles viennent de leur nom. Par esprit pratique, la forme abrégée « quasar » sera utilisée tout au long de cet article. »

— Hong-Yee Chiu, *Physics Today*, Mai 1964

Plus tard, on découvrit que certains quasars (en fait, seulement ~10 %) n'avaient pas de fortes émissions radio. De là le nom de « QSO » (*quasi-stellar object*) utilisé (en plus du mot « quasar ») en référence à ces objets, comprenant la classe des *radio-fort* et des *radio-silencieux*.

Le grand sujet de débat dans les Années 1960 était de savoir si les quasars étaient des objets proches ou lointains comme le suppose leur redshift. On suggéra, par exemple, que le redshift des quasars n'était pas dû à l'effet Doppler, mais plutôt à la lumière s'échappant d'un puits gravitationnel profond. Cependant, une étoile avec une masse suffisante pour former un tel puits serait instable. Les quasars montrent également des raies spectrales inhabituelles, auparavant visibles sur une nébuleuse chaude de basse densité, qui serait trop diffuse pour générer l'énergie observée et pour accéder au profond puits gravitationnel. Il y eut également de sérieux soucis en ce qui concerne l'idée de quasars cosmologiques lointains. Un des principaux arguments en leur défaveur était qu'ils impliquaient des énergies qui excédaient les processus de conversion connus, y compris la fusion nucléaire. À ce stade, certains suggérèrent que les quasars étaient faits d'une forme d'antimatière stable inconnue jusqu'ici et qui pouvait passer pour être leur brillance, thèse développée et encore soutenue par certains<sup>[11]</sup>. Cette objection s'effaça avec la proposition d'un mécanisme de disque d'accrétion, dans les années 1970. Et aujourd'hui, la distance cosmologique des quasars est acceptée par la majorité des chercheurs.

En 1979, l'effet de lentille gravitationnelle prédit par la théorie de la relativité générale d'Einstein fut confirmée lors de l'observation des premières images du double quasar 0957+561.

Dans les années 1980, des modèles unifiés furent développés dans lesquels les quasars étaient vus simplement comme une classe de galaxies actives, et un consensus général a émergé : dans beaucoup de cas, c'est seulement l'angle de vue qui les distingue des autres classes, tels que les blazars et les radiogalaxies. L'immense luminosité des quasars serait le résultat d'une friction causée par le gaz et la poussière tombant dans le disque d'accrétion des trous noirs supermassifs, qui peut transformer de l'ordre de 10 % de la masse d'un objet en une énergie comparable à 0,7 % pour le p-p du processus de fusion nucléaire et qui domine la production d'énergie dans les étoiles comme le Soleil.

Ce mécanisme explique aussi pourquoi les quasars étaient plus communs lorsque l'Univers était plus jeune, comme le fait que cette production d'énergie se termine lorsque le trou noir supermassif consume tous les gaz et toutes les poussières se trouvant près de lui. Cela implique la possibilité que la plupart des galaxies, dont notre Voie Lactée, soient passées par un stade actif (apparaissant comme étant des quasars ou une autre classe de galaxies actives dépendant de la masse du trou noir et de son disque d'accrétion) et soient maintenant paisibles car elles n'ont plus de

quoi se nourrir (au centre de leur trou noir) pour générer des radiations.

## Notes et références

- [1] *quasi-stellar radio*source en anglais) ou, plus récemment, « **source de rayonnement astronomique quasi-stellaire** », (*QUAsi-Stellar Astronomical Radio*source en anglais), le nom ayant été modifié pour que les premières lettres de ses éléments correspondent à l'acronyme
- [2] <http://www.forumfr.com/sujet420522-post70-big-bang-et-trous-noirs-theorie.html>
- [3] [http://archive-fr.com/fr/c/cite-sciences.fr/2012-05-12\\_3484\\_5/Les\\_trous\\_noirs\\_agrave\\_l\\_origine\\_des\\_galaxies\\_universcience\\_fr/](http://archive-fr.com/fr/c/cite-sciences.fr/2012-05-12_3484_5/Les_trous_noirs_agrave_l_origine_des_galaxies_universcience_fr/)
- [4] <http://www.universcience.fr/fr/science-actualites/enquete-as/wl/1248100300838/les-trous-noirs-a-l-origine-des-galaxies/>
- [5] <http://www.mystere-tv.com/quasars-les-plus-gros-trous-noirs-de-l-univers-v1214.html>
- [6] <http://forums.futura-sciences.com/physique/410411-cest-quoi-un-quasar.html>
- [7] <http://www.mssl.ucl.ac.uk/~gbr/Project%20Website/styled-5/index.html>
- [8] « Astronomie : découverte d'un quasar, objet le plus brillant de l'Univers jeune » (<http://www.nationalgeographic.fr/actualite/astronomie-decouverte-de-lobjet-le-plus-brillant-de-lunivers-jeune/798180/>), **National Geographic France**, 30 juin 2011.
- [9] <http://scienceforseniorcitizens.com/quasars/>
- [10] The construction of the Large Quasar Astrometric Catalogue, J. Souchay, A. H. Andrei, C. Barache, S. Bouquillon, A.-M. Gontier, S. B. Lambert, C. Le Poncin-Lafitte, F. T. A. F. Arias, D. Suchet, and M. Baudin, 2006, *Astrometry & Astrophysics*
- [11] D.L. Mamas, (2011) An explanation for quasars and gamma ray bursts. *Physics Essays*: December 2011, Vol. 24, No. 4, pp. 475-476. <http://physicsessays.org/browse-journal-2/product/199-3-pdf-dean-l-mamas-an-explanation-for-quasars-and-gamma-ray-bursts.html>

## Annexes

### Articles connexes

- Blazar
- Galaxie active
- Microquasar
- Pulsar
- Trou noir supermassif
- Amas quasi-stellaire

### Liens externes

- (en) Catégorie Quasars ([http://www.dmoz.org/Science/Astronomy/Galaxies/Active\\_Galactic\\_Nuclei\\_-\\_Quasars/](http://www.dmoz.org/Science/Astronomy/Galaxies/Active_Galactic_Nuclei_-_Quasars/)) de l'annuaire dmoz
- (en) Universe Viewer - logiciel interactif de visualisation et traitements géodésiques d'objets astronomiques (<http://home.gna.org/universeviewer>)
-  Portail de l'astronomie

# Expansion de l'Univers

☞ Pour les articles homonymes, voir Expansion.

En cosmologie, l'**expansion de l'Univers** est le nom du phénomène qui voit à grande échelle les objets composant l'univers (galaxies, amas, ...) s'éloigner les uns des autres. Cet écartement mutuel, que l'on pourrait prendre pour un mouvement des galaxies dans l'espace, s'interprète en réalité par un gonflement de l'espace lui-même, les objets célestes étant de ce fait amenés à s'éloigner les uns des autres (voir plus bas). À plus petite échelle, l'expansion n'affecte pas la taille des galaxies elles-mêmes, la gravité « intérieure » ayant un effet prédominant.

L'expansion de l'univers est la solution théorique trouvée par Friedmann pour rendre compte du fait que l'univers ne se soit pas déjà effondré sous l'effet de la gravitation. Elle permet de faire l'économie de la constante cosmologique, artifice introduit par Einstein, fermement attaché à l'idée d'un univers statique.

Du point de vue observationnel, l'expansion se traduit par une augmentation de la longueur d'onde de la lumière émise par les galaxies : c'est le phénomène de décalage vers le rouge. Ce décalage n'est pas homologue à l'effet Doppler, qui est dû au déplacement à travers l'espace de l'objet observé ; il s'agit ici de l'expansion de l'espace lui-même. On parle de décalage spectral cosmologique.

La découverte de ce décalage vers le rouge est attribuée à l'astronome américain Edwin Hubble en 1929, bien qu'il ait été implicitement mis en évidence 15 ans plus tôt par Vesto Slipher et prédit, voire mesuré, par Georges Lemaître à la fin des années 1920. De façon concomitante, l'interprétation physique correcte de ce décalage vers le rouge est donnée par la théorie de la relativité générale d'Albert Einstein, qui permet de décrire la dynamique de l'Univers dans son ensemble. L'expansion de l'Univers est de fait une vérification remarquable de la relativité générale, même si, de façon quelque peu surprenante, Albert Einstein lui-même n'y a pas adhéré initialement, tentant même d'en proposer une explication alternative, la lumière fatiguée, théorie depuis longtemps complètement abandonnée.

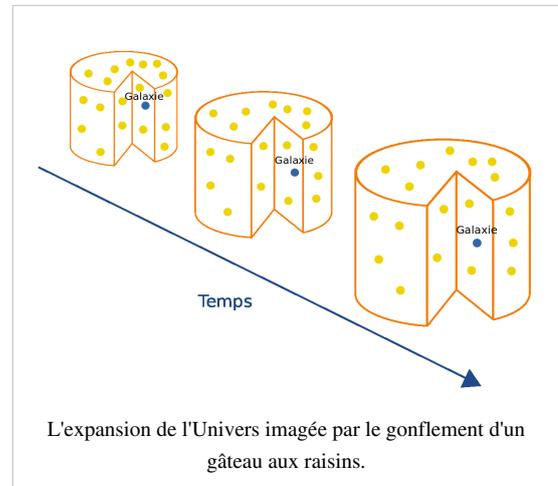
La conséquence immédiate de l'expansion de l'Univers est que celui-ci était par le passé plus dense et donc plus chaud. Le concept du Big Bang, qui repose sur l'idée qu'une telle époque dense et chaude a effectivement existé, en découle naturellement et peut donc être considéré comme établi.

Du point de vue théorique, l'expansion de l'Univers est contenue dans les modèles issus de la relativité générale décrivant l'Univers dans son ensemble. De telles constructions sont appelées de façon naturelle modèles cosmologiques<sup>[1]</sup>. Les équations qui décrivent l'expansion de l'Univers dépendent des propriétés de la ou des formes de matière qui emplissent l'Univers. Elles s'appellent équations de Friedmann.

## Manifestation de l'expansion de l'Univers

Article détaillé : Loi de Hubble.

L'expansion de l'Univers se manifeste par l'observation d'une récession (éloignement) apparente des objets astrophysiques lointains. Si l'on ne peut pas détecter de déplacement de leur position ou leur taille apparente, car le phénomène d'éloignement est très lent à l'échelle humaine<sup>[2]</sup>, on constate un décalage vers le rouge de leur spectre (c'est-à-dire de la lumière qu'ils émettent). Ce phénomène est mis en évidence par le fait que le spectre de ces objets possède des raies d'émission et d'absorption caractéristiques des éléments chimiques qui les composent, et dont la



position dans le spectre est fixée. Il existe une relation de proportionnalité entre le taux d'augmentation de la distance des galaxies (ou *pseudo-vitesse* de récession) et cette distance elle-même, cette loi étant connue sous le nom de Loi de Hubble, du nom de son découvreur, Edwin Hubble, en 1929<sup>[3]</sup>.

## Mouvements dans l'espace ou expansion de l'espace ?

En mécanique classique ou en relativité restreinte, l'observation d'un décalage vers le rouge s'interprète en termes de déplacement dans l'espace et d'effet Doppler. En relativité générale, une telle interprétation n'est plus suffisante car il n'existe pas de notion d'espace absolu comme en mécanique classique, ou tout au moins présentant une certaine structure rigide comme en relativité restreinte. L'espace de la relativité générale est, dans un certain sens, « élastique », la distance entre les points étant par exemple fonction de la structure du champ gravitationnel dans leur voisinage. Il n'en demeure pas moins que la relativité générale stipule que *localement* l'espace s'identifie à celui de la relativité restreinte. Si elle était généralisée à grande échelle l'interprétation Doppler pourrait soulever un paradoxe, car elle signifierait que des objets suffisamment éloignés s'éloigneraient à des vitesses supérieures à celle de la lumière et, de ce fait, semble enfreindre les lois de la relativité restreinte. Il n'en est rien car si ces objets se déplacent bien avec une vitesse relative plus grande que celle de la lumière, cela ne permet pas d'échange d'information. Ainsi l'accroissement de la distance mutuelle entre galaxies dû à l'expansion de l'espace n'est pas en conflit avec la relativité restreinte.

## Expansion de l'Univers, mais pas des objets astrophysiques

Contrairement à une idée parfois exprimée, l'expansion de l'Univers ne signifie pas que les objets astrophysiques voient leur taille varier : ce n'est que leur distance mutuelle qui varie au cours du temps, et ce uniquement pour des objets suffisamment éloignés. Si la dilatation de l'espace était identique à toute échelle, l'expansion de l'univers serait inobservable, puisque les instruments et moyens de mesure garderaient la même échelle relative aux distances mesurées.

Les forces nécessaires pour contrer le mouvement d'expansion à l'échelle d'un atome, d'une planète, d'une étoile, d'une galaxie, d'un amas de galaxies, sont suffisantes pour assurer la cohésion de ces objets. Il a été très facile à la force de gravitation, aux forces électromagnétiques ou à la force nucléaire forte de s'opposer à l'éloignement qui résultait de l'expansion de l'Univers.

Une façon intuitive de visualiser cela est de reprendre l'analogie de la toile élastique que l'on étire dans toutes les directions. Si l'on dessine des motifs sur la toile, alors ceux-ci grossissent en même temps qu'ils semblent s'éloigner les uns des autres lorsque l'on étire la toile. Par contre, si au lieu de dessiner des motifs, on colle sur la toile un objet rigide (une pièce de monnaie par exemple), alors, en étirant la toile, on va encore éloigner les objets les uns des autres, mais cette fois ils vont garder une taille constante. C'est un processus de ce type qui est à l'œuvre avec l'expansion de l'Univers<sup>[4]</sup>.

## Historique de la découverte

La découverte de l'expansion de l'Univers date de la première moitié du XX<sup>e</sup> siècle et s'est faite en plusieurs étapes.

Au début du XX<sup>e</sup> siècle, de nombreux objets diffus étaient vus au télescope<sup>[5]</sup>. Ces objets étaient tous désignés sous le terme générique de « nébuleuses ». En fait ils représentaient d'une part ce que nous continuons à appeler des nébuleuses et d'autre part ce que nous appelons maintenant des galaxies, c'est-à-dire des ensembles d'étoiles extérieurs à la Voie lactée. À l'époque la question de la nature et de la distance de ces nébuleuses se posait encore. La spectroscopie permit d'apporter un premier élément de réponse à partir de 1914, année où l'astronome américain Vesto Slipher montra qu'une certaine classe de ces « nébuleuses » (en fait les galaxies) présentaient une tendance systématique à s'éloigner de nous. Cela semblait indiquer que ces objets étaient situés en dehors de notre Galaxie car dans le cas contraire on se serait attendu à ce qu'une partie égale d'entre eux s'approchent et s'éloignent de nous. En outre en faisant le produit de la vitesse observée par des temps de l'ordre de quelques milliards d'années on

aboutissait à des distances parcourues dépassant la taille supposée de la Voie lactée.

En 1920 se tint une réunion scientifique sur la nature des « nébuleuses », qui fut par la suite appelée Grand Débat. Elle opposa Harlow Shapley à Heber Doust Curtis, en désaccord sur le caractère extragalactique ou non de certaines nébuleuses, en particulier la galaxie d'Andromède. Le débat n'aboutit à aucune conclusion définitive faute de données suffisantes. C'est à partir de 1925 que Edwin Hubble put observer des céphéides grâce au télescope Hooker de 2,5 mètres de l'observatoire du Mont Wilson. Au moyen de la relation période-luminosité établie par Henrietta Leavitt, il calcula la distance de plusieurs nébuleuses et prouva leur nature extragalactique.

Lemaître dès 1927 établit que les solutions cosmologiques issues de la relativité générale ne peuvent être statiques, et qu'en conséquence les objets y présentent des vitesses d'éloignement proportionnelles à leurs distances. Après plusieurs années d'observations, Edwin Hubble établit la relation entre vitesse de récession et distance de plusieurs nébuleuses rebaptisées galaxies, prouvant ainsi l'expansion de l'univers. Si cet astronome découvrit le phénomène brut, il resta perplexe quant à son interprétation<sup>[6]</sup>.

## Autres tentatives d'interprétation

Article détaillé : Lumière fatiguée.

La réalité de l'expansion de l'Univers n'a pas été acceptée d'emblée par tous les scientifiques. Cette expansion impliquait en effet que l'Univers était né du Big Bang et ce « commencement » absolu semblait à ses détracteurs en contradiction avec la position rationaliste et matérialiste de la science car il pouvait, dans leur esprit, servir d'argument à l'idée d'une création divine. Ces adversaires du Big Bang préféraient, pour cette raison, un modèle statique et éternel, sans origine. Des explications alternatives, connues sous le nom de lumière fatiguée (terme proposé par Richard Tolman en 1930), furent proposées pour réconcilier univers statique et décalage vers le rouge dès la découverte de l'expansion de l'Univers en 1929, et ce jusqu'aux années 1970.

Aucune théorie solide satisfaisante avec dilatation du temps n'ayant jamais pu être construite dans ce sens, ces explications ont été abandonnées par la communauté scientifique.

En 2012, *Un autre cosmos ?*<sup>[7]</sup>, sous la direction de Jean-Marc Bonnet-Bidaud et Thomas Lepeltier, propose un survol des autres scénarios de l'évolution du cosmos. Au sujet de la théorie de l'expansion de l'univers, Bonnet-Bidaud commente : « nous observons un décalage vers le rouge de la lumière d'objets lointains et nous en déduisons que l'Univers se dilate. Mais cette interprétation n'est qu'une des hypothèses possibles et l'on n'a pas forcément besoin d'avoir un Univers en expansion pour obtenir ce décalage vers le rouge de la lumière »<sup>[8]</sup>.

## Accélération de l'expansion ?

Article détaillé : Accélération de l'expansion de l'univers.

Article connexe : Équations de Friedmann.

L'expansion de l'Univers est modélisée par la théorie de la relativité générale. Celle-ci stipule en effet que l'Univers dans son ensemble est soumis à des forces imposées par les différentes formes de matière qui le composent, et qu'il ne peut demeurer statique : soit il est mû par une force centrifuge qui le fait s'étendre (expansion consécutive au Big Bang), soit, dépourvu d'une telle force, ses forces centripètes de gravitation le font se ramasser (Big Crunch).

Réciproquement, l'expansion de l'Univers exerce une influence sur la densité et la pression de cette matière. Ainsi, c'est la connaissance des propriétés physiques de ces formes de matière (en particulier leur équation d'état) qui permet de prédire le comportement de l'expansion. Les équations qui la décrivent sont connues sous le nom d'équations de Friedmann. Les observations permettent non seulement de connaître le taux d'expansion actuel de l'Univers (la constante de Hubble à l'instant présent), mais aussi celui de l'Univers par le passé, fournissant ainsi indirectement des informations sur les formes de matière qui emplissent l'Univers.

Dans le cadre des modèles d'univers les plus classiques, et notamment dans celui des univers de Friedmann, l'expansion ralentit au cours du temps. Dans certains cas, l'expansion finit même par s'arrêter et se muer en contraction, précipitant l'Univers dans le Big Crunch.

Cependant, en 1998, deux équipes d'astronomes, le *Supernova Cosmology Project* et le *High-Z supernovae search team* respectivement dirigés par Saul Perlmutter et Brian P. Schmidt sont parvenues au résultat inattendu que l'expansion de l'Univers semblait s'accélérer. Ce résultat est surprenant car il n'existe aucune théorie pour l'interpréter. Il implique en effet l'existence d'une forme inconnue de matière dont la pression serait négative, avec un comportement répulsif et non pas attractif vis-à-vis de la gravitation. Cette forme hypothétique et inhabituelle de matière, de nature inconnue, communément appelée énergie sombre ou parfois constante cosmologique<sup>[9]</sup>, représente à l'heure actuelle un des problèmes non résolus de la cosmologie moderne. En 2011, le Prix Nobel de physique est attribué à S. Perlmutter, B. P. Schmidt et A. G. Riess<sup>[10]</sup> pour cette découverte.

## Notes et références

- [1] En réalité le tout premier modèle cosmologique à avoir été proposé, par Albert Einstein lui-même, ne contenait pas d'expansion de l'Univers. Ce modèle, désormais appelé Univers d'Einstein est statique, et avait été bati par Einstein de façon à ne pas comporte de phase d'expansion. Il regrettera plus tard cette construction, la qualifiant de « plus grande erreur de sa vie ».
- [2] Le temps mis par deux galaxies pour doubler leur distance relative du fait de l'expansion est de l'ordre de 10 milliards d'années, voir ci-après.
- [3] Edwin Hubble, *A Relation between Distance and Radial Velocity among Extra-Galactic Nebulae*, *Proceedings of the National Academy of Sciences*, **15**, 168-173 (1929) Voir en ligne (<http://adsabs.harvard.edu/abs/1929PNAS...15..168H>).
- [4] Pour plus de détails, consulter Comment l'expansion augmente-t-elle les distances sans dilater les objets ? (<http://www.planck.fr/article397.html>)
- [5] La majorité de ces objets nébuleux était rassemblée dans le catalogue Messier.
- [6] Voir Jean-Pierre Luminet, *L'Invention du Big Bang* (2004) ISBN 2020611481, pages 108 et 109
- [7] Thomas Lepeltier et Jean-Marc Bonnet-Bidaud (dir) avec T. Lepeltier, S. Fay, J. Narlikar, L. Celnikier, J.M. Bonnet-Bidaud, T. Buchert, R. Brandenberger. « Un autre cosmos? ([http://bonnetbidaud.free.fr/cosmo/pub\\_cosmo\\_vuibert.html](http://bonnetbidaud.free.fr/cosmo/pub_cosmo_vuibert.html)) » Édition Vuibert 2012, 160 pages.
- [8] Pierre Barthélémy. « Le modèle du Big Bang est fragile (<http://passeurdesciences.blog.lemonde.fr/2012/05/14/le-modele-du-big-bang-est-fragile/>) » Un entretien avec Jean-Marc Bonnet-Bidaud. Le Monde Passeur de sciences - Blogs. 14 mai 2012
- [9] La constante cosmologique représente un des candidats possibles à l'énergie sombre, et pour beaucoup le plus vraisemblable. Il existe cependant d'autres modèles d'énergie sombre, comme la quintessence.
- [10] The Nobel Prize in Physics 2011 awarded to Saul Perlmutter, Brian P. Schmidt, Adam G. Riess ([http://www.nobelprize.org/nobel\\_prizes/physics/laureates/2011/press.html](http://www.nobelprize.org/nobel_prizes/physics/laureates/2011/press.html)) [www.nobelprize.org](http://www.nobelprize.org)

# Trou noir

🔗 Pour les articles homonymes, voir Trou noir (homonymie).



Des informations de cet article ou section devraient être mieux reliées aux sources mentionnées dans la bibliographie ou en liens externes.

Améliorez sa vérifiabilité en les associant par des références.

En astrophysique, un **trou noir** est un objet céleste dont le champ gravitationnel est si intense qu'il empêche toute forme de matière ou de rayonnement de s'en échapper (à l'exception notable de la radiation de Hawking)<sup>[1]</sup>. De tels objets n'émettent donc pas de lumière et sont alors perçus comme étant noirs. Ils ne sont pas directement observables mais plusieurs techniques d'observation indirecte dans différentes longueurs d'ondes ont été mises au point et permettent d'étudier les phénomènes qu'ils induisent sur leur environnement. En particulier, la matière qui est happée par un trou noir est chauffée à des températures considérables avant d'être engloutie et émet de ce fait une quantité importante de rayons X. Décrits par la relativité générale, leur existence est une certitude pour la quasi-totalité de la communauté scientifique concernée (astrophysiciens et physiciens théoriciens).

## Présentation et terminologie

Un trou noir possède une masse donnée, concentrée en un point que l'on appelle singularité gravitationnelle. Cette masse permet de définir une sphère appelée horizon du trou noir, centrée sur la singularité et dont le rayon est une limite maximale en deçà de laquelle le trou noir empêche tout rayonnement et *a fortiori* toute matière de s'échapper. Cette sphère représente en quelque sorte l'extension spatiale du trou noir. C'est ainsi que le terme « trou » est inapproprié : il serait plus correct de parler de « boule noire » pour conceptualiser concrètement sa forme physique réelle tridimensionnelle dans l'espace. Pour un trou noir de masse égale à la masse du Soleil, son rayon vaut environ 3 kilomètres<sup>[2]</sup>. À une distance interstellaire (en millions de kilomètres), un trou noir n'exerce pas plus d'attraction que n'importe quel autre corps de même masse ; il ne s'agit donc pas d'un « aspirateur » irrésistible. Par exemple, si le Soleil se trouvait remplacé par un trou noir de même masse, les orbites des corps tournant autour (planètes et autres) resteraient pour l'essentiel inchangées (seuls les passages à proximité de l'horizon induiraient un changement notable).

Il existe plusieurs sortes de trous noirs. Lorsqu'ils se forment à la suite de l'effondrement gravitationnel d'une étoile massive, on parle de *trou noir stellaire*, dont la masse équivaut à quelques masses solaires. Ceux qui se trouvent au centre des galaxies possèdent une masse bien plus importante pouvant atteindre plusieurs milliards de fois celle du Soleil ; on parle

alors de *trou noir supermassif* (ou trou noir galactique). Entre ces deux échelles de masse, il existerait des *trous noirs intermédiaires* avec une masse de quelques milliers de masses solaires. Des trous noirs de masse bien plus faible, qui

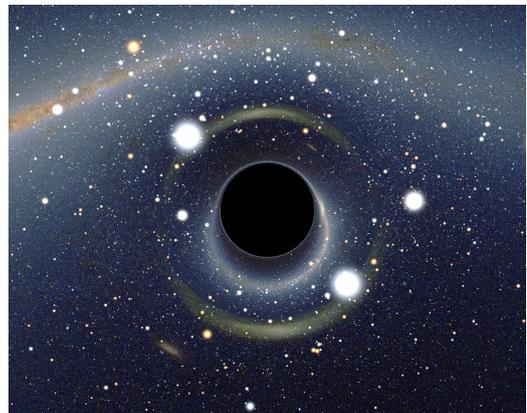


Image simulée d'un trou noir stellaire situé à quelques dizaines de kilomètres d'un observateur (à 9 fois le rayon du trou noir) et dont l'image se dessine sur la voûte céleste dans la direction du Grand Nuage de Magellan. L'image de celui-ci apparaît dédoublée sous la forme de deux arcs de cercle, en raison de l'effet de lentille gravitationnelle fort.

La Voie lactée qui apparaît en haut de l'image est également fortement distordue, au point que certaines constellations sont difficiles à reconnaître, comme la Croix du Sud (au niveau de l'étoile orange lumineuse, Gacrux, en haut à gauche de l'image) dont la forme de croix caractéristique est méconnaissable. Une étoile relativement peu lumineuse (HD 49359, magnitude apparente de 7,5) est située presque exactement derrière le trou noir. Elle apparaît ainsi sous la forme d'une image double, dont la luminosité apparente est extraordinairement amplifiée, d'un facteur d'environ 4 500, pour atteindre une magnitude apparente de -1,7. Les deux images de cette étoile, ainsi que les deux images du Grand Nuage sont situées sur une zone circulaire entourant le trou noir, appelée anneau d'Einstein.

auraient été formés au début de l'histoire de l'Univers, peu après le Big Bang, sont aussi envisagés et sont appelés *trous noirs primordiaux*. Leur existence n'est, à l'heure actuelle, pas confirmée.

Il est par définition impossible d'observer directement un trou noir. Il est cependant possible de déduire sa présence par son action gravitationnelle sur son environnement, soit par les effets sur les trajectoires des étoiles proches, soit au sein des microquasars et des noyaux actifs de galaxies, où de la matière, située à proximité, tombant sur le trou noir va se trouver considérablement chauffée et émettre un fort rayonnement X. Les observations permettent ainsi de déceler l'existence d'objets massifs et de très petite taille. Les seuls objets qui peuvent correspondre à ces observations et qui sont compatibles dans le cadre de la relativité générale sont les trous noirs.

## Historique

Article détaillé : Historique des trous noirs.

Le concept de trou noir a émergé à la fin du XVIII<sup>e</sup> siècle dans le cadre de la gravitation universelle d'Isaac Newton. La question était de savoir s'il existait des objets dont la masse était suffisamment grande pour que leur vitesse de libération soit plus grande que la vitesse de la lumière. Cependant, ce n'est qu'au début du XX<sup>e</sup> siècle et avec l'avènement de la relativité générale d'Albert Einstein que le concept de trou noir devient plus qu'une curiosité. En effet, peu après la publication des travaux d'Einstein, une solution de l'équation d'Einstein impliquant l'existence d'un trou noir central est publiée par Karl Schwarzschild<sup>[3]</sup>. Les travaux fondamentaux sur les trous noirs remontent aux années 1960, précédant de peu les premières indications observationnelles solides en faveur de leur existence. La première « observation »<sup>[4],[5]</sup> d'un objet contenant un trou noir fut celle de la source de rayons X Cygnus X-1 par le satellite Uhuru en 1971. Le terme de « trou noir » a émergé, dans le courant des années 1960, par l'intermédiaire du physicien américain Kip Thorne. Auparavant, on utilisait les termes de « corps de Schwarzschild » ou d'« astre occlus ». Le terme de « trou noir » a rencontré des réticences dans certaines communautés linguistiques, notamment francophones et russophones, qui le jugeaient quelque peu inconvenant<sup>[6]</sup>.

## Propriétés

Un trou noir est un objet astrophysique comme un autre. Il se caractérise par le fait qu'il est très difficile à observer directement (voir ci-dessous), et que sa région centrale ne peut être décrite de façon satisfaisante par les théories physiques en leur état du début du XXI<sup>e</sup> siècle, car elle abrite une singularité gravitationnelle. Cette dernière ne peut être décrite que dans le cadre d'une théorie de la gravitation quantique, manquante à ce jour<sup>[7]</sup>. En revanche, on sait parfaitement décrire les conditions physiques qui règnent dans son voisinage immédiat, de même que son influence sur son environnement, ce qui permet de les détecter par diverses méthodes indirectes.

Par ailleurs, les trous noirs sont étonnants en ce qu'ils sont décrits par un très petit nombre de paramètres. En effet, leur description, dans l'univers dans lequel nous vivons, ne dépend que de trois paramètres : la masse, la charge électrique et le moment cinétique. Tous les autres paramètres du trou noir (par exemple ses effets sur les corps environnants et leur étendue) sont fixés par ceux-ci. Par comparaison, la description d'une planète fait intervenir des centaines de paramètres (composition chimique, différenciation de ses éléments, convection, atmosphère, etc.). La raison pour laquelle un trou noir n'est décrit que par ces trois paramètres est connue depuis 1967 : c'est le théorème de calvitie démontré par Werner Israel. Celui-ci explique que les seules interactions fondamentales à longue portée étant la gravitation et l'électromagnétisme, les seules propriétés mesurables des trous noirs sont données par les paramètres décrivant ces interactions, à savoir la masse, le moment cinétique et la charge électrique.

Pour un trou noir, la masse et la charge électrique sont des propriétés habituelles que décrit la physique classique (c'est-à-dire non-relativiste) : le trou noir possède un champ gravitationnel proportionnel à sa masse et un champ électrique proportionnel à sa charge. L'influence du moment cinétique est en revanche spécifique à la relativité générale. Celle-ci stipule en effet qu'un corps en rotation va avoir tendance à « entraîner » l'espace-temps dans son voisinage. Ce phénomène, difficilement observable dans le système solaire en raison de son extrême faiblesse pour

des astres non compacts, est connu sous le nom d'effet Lense-Thirring (aussi appelé *frame dragging*, en anglais)<sup>[8]</sup>. Il prend une amplitude considérable au voisinage d'un trou noir en rotation, au point qu'un observateur situé dans son voisinage immédiat serait inévitablement entraîné dans le sens de rotation du trou noir. La région où ceci se produit est appelée ergorégion.

La masse d'un trou noir galactique correspond en général à environ un millième de la masse de la matière présente dans le bulbe central<sup>[9]</sup>.

### Quatre types théoriques

#### Les quatre types théoriques de trous noirs en fonction du moment cinétique ( $J$ ) et de la charge électrique ( $Q$ ). La masse ( $M$ ) est toujours strictement positive.

	$M > 0$	
	$J = 0$	$J \neq 0$
$Q = 0$	Schwarzschild	Kerr
$Q \neq 0$	Reissner-Nordström	Kerr-Newman

Un trou noir possède toujours une masse non nulle. En revanche, ses deux autres caractéristiques, à savoir le moment cinétique (rotation) et la charge électrique, peuvent en principe prendre des valeurs nulles (c'est-à-dire égales à zéro) ou non nulles. La combinaison de ces états permet de définir quatre types de trous noirs.

Quand la charge électrique et le moment cinétique sont nuls, on parle de trou noir de Schwarzschild, du nom de Karl Schwarzschild qui, le premier, a mis en évidence ces objets comme solutions des équations de la relativité générale (les équations d'Einstein), en 1916.

Quand la charge électrique est non nulle et le moment cinétique nul, on parle de trou noir de Reissner-Nordström. Ces trous noirs ne présentent pas d'intérêt astrophysique notable, car aucun processus connu ne permet de fabriquer un objet compact conservant durablement une charge électrique significative ; celle-ci se dissipe normalement rapidement par absorption de charges électriques opposées prises à son environnement<sup>[10]</sup>. Un trou noir de Reissner-Nordström est donc un objet théorique très improbable dans la nature.

Si le trou noir possède un moment cinétique (c'est-à-dire qu'il est en rotation sur lui-même) mais n'a pas de charge électrique, on parle de trou noir de Kerr, du nom du mathématicien néo-zélandais Roy Kerr qui a trouvé la formule décrivant ces objets en 1963. Contrairement aux trous noirs de Reissner-Nordström et de Schwarzschild, les trous noirs de Kerr présentent un intérêt astrophysique considérable, car les modèles de formation et d'évolution des trous noirs indiquent que ceux-ci ont tendance à absorber la matière environnante par l'intermédiaire d'un disque d'accrétion dans lequel la matière tombe en spiralant toujours dans le même sens dans le trou noir. Ainsi, la matière communique du moment cinétique au trou noir qui l'engloutit. Les trous noirs de Kerr sont donc les seuls que l'on s'attend réellement à rencontrer en astronomie. Cependant, il reste possible que des trous noirs à moment cinétique très faible, s'apparentant en pratique à des trous noirs de Schwarzschild, existent.

La version électriquement chargée du trou noir de Kerr, dotée comme lui d'une rotation, est connue sous le nom de trou noir de Kerr-Newman et ne présente comme le trou noir de Reissner-Nordström ou celui de Schwarzschild que peu d'intérêt astrophysique eu égard à sa très faible probabilité.

D'un point de vue théorique, il peut exister une multitude d'autres types de trous noirs avec des propriétés différentes. Par exemple, il existe un analogue du trou noir de Reissner-Nordström, mais en remplaçant la charge électrique par une charge magnétique, c'est-à-dire créée par des monopôles magnétiques, dont l'existence reste extrêmement hypothétique à ce jour. On peut de même généraliser le concept de trou noir à des espaces comprenant plus de trois dimensions. Ceci permet d'exhiber des types de trous noirs ayant des propriétés parfois différentes de celles des trous noirs présentés ci-dessus<sup>[11]</sup>.

## Le trou et le noir

L'existence des trous noirs est envisagée dès le XVIII<sup>e</sup> siècle indépendamment par John Michell<sup>[12]</sup> et Pierre-Simon de Laplace. Il s'agissait alors d'objets prédits comme suffisamment denses pour que leur vitesse de libération soit supérieure à la vitesse de la lumière — c'est-à-dire que même la lumière ne peut vaincre leur force gravitationnelle. Plutôt qu'une telle force (qui est un concept newtonien), il est plus juste de dire que la lumière subit en fait un décalage vers le rouge infini. Ce décalage vers le rouge est d'origine gravitationnelle : la lumière perd la totalité de son énergie en essayant de sortir du puits de potentiel d'un trou noir. Ce décalage vers le rouge est donc d'une nature quelque peu différente de celui dû à l'expansion de l'Univers, que l'on observe pour les galaxies lointaines et qui résulte d'une expansion d'un espace ne présentant pas de puits de potentiels très profonds. De cette caractéristique provient l'adjectif « noir », puisqu'un trou noir ne peut émettre de lumière. Ce qui est valable pour la lumière l'est aussi pour la matière : aucune particule ne peut s'échapper d'un trou noir une fois capturée par celui-ci, d'où le terme de « trou ».

## Horizon des événements

Articles détaillés : Horizon des événements et Horizon d'un trou noir.

La zone sphérique qui délimite la région d'où lumière et matière ne peuvent s'échapper, est appelée « horizon des événements ». On parle parfois de « surface » du trou noir, quoique le terme soit quelque peu impropre (il ne s'agit pas d'une surface solide ou gazeuse comme la surface d'une planète ou d'une étoile). Il ne s'agit pas d'une région qui présente des caractéristiques particulières : un observateur qui franchirait l'horizon ne ressentirait rien de spécial à ce moment-là (voir ci-dessous). En revanche, il se rendrait compte qu'il ne pourrait plus s'échapper de cette région s'il essayait de faire demi-tour. C'est une sorte de point de non retour. En substance, c'est une situation qui est un peu analogue à celle d'un baigneur qui s'éloignerait de la côte. Si par exemple le baigneur ne peut nager que deux kilomètres, il ne ressentira rien s'il s'éloigne à plus d'un kilomètre de la côte ; mais s'il doit faire demi-tour, il se rendra compte qu'il n'a pas assez d'énergie pour atteindre la rive.

En revanche, un observateur situé au voisinage de l'horizon remarquera que le temps s'écoule différemment pour lui et pour un observateur situé loin du trou noir. Si ce dernier lui envoie des signaux lumineux à intervalles réguliers (par exemple une seconde), alors l'observateur proche du trou noir recevra des signaux plus énergétiques (la fréquence des signaux lumineux sera plus élevée, conséquence du décalage vers le bleu subi par la lumière qui tombe vers le trou noir) et les intervalles de temps séparant deux signaux consécutifs seront plus rapprochés (moins d'une seconde, donc). Cet observateur aura donc l'impression que le temps s'écoule plus vite pour son confrère resté loin du trou noir que pour lui. À l'inverse, l'observateur resté loin du trou noir verra son collègue évoluer de plus en plus lentement, le temps chez celui-ci donnant l'impression de s'écouler plus lentement.

Si l'observateur distant voit un objet tomber dans un trou noir, les deux phénomènes de dilatation du temps et de décalage vers le rouge vont se combiner. Les éventuels signaux émis par l'objet seront de plus en plus rouges, de moins en moins lumineux (la lumière émise perd de plus en plus d'énergie avant d'arriver à l'observateur lointain) et de plus en plus espacés. En pratique, le nombre de photons reçus par l'observateur distant va décroître très rapidement, jusqu'à devenir nul : à ce moment-là, l'objet en train de chuter dans le trou noir est devenu invisible. Même si l'observateur distant tente d'approcher l'horizon en vue de récupérer l'objet qu'il a eu l'impression de voir s'arrêter juste avant l'horizon, celui-ci demeurera invisible<sup>[13]</sup>.

Pour un observateur s'approchant d'une singularité, ce sont les effets de marée qui vont devenir importants. Ces effets, qui déterminent les déformations d'un objet (le corps d'un astronaute, par exemple) du fait des hétérogénéités du champ gravitationnel, seront inéluctablement ressentis par un observateur s'approchant de trop près d'un trou noir ou d'une singularité. La région où ces effets de marée deviennent importants est entièrement située dans l'horizon pour les trous noirs super massifs, mais empiète notablement hors de l'horizon pour des trous noirs stellaires<sup>[14]</sup>. Ainsi, un observateur s'approchant d'un trou noir stellaire serait déchiqueté avant de passer l'horizon, alors que le même observateur qui s'approcherait d'un trou noir super massif passerait l'horizon sans encombre. Il serait tout de

même inéluctablement détruit par les effets de marée en s'approchant de la singularité.

### Dernière orbite circulaire stable (ISCO)

La dernière orbite circulaire stable, généralement abrégée en ISCO (pour l'anglais *Innermost stable circular orbit*), désigne l'orbite circulaire la plus proche d'un trou noir en-deçà de laquelle la matière finit inéluctablement par tomber sur le trou noir. Pour un trou noir de Schwarzschild, le rayon de l'ISCO vaut trois fois le rayon de Schwarzschild de ce trou noir :  $R_{\text{ISCO}} = 3 R_S = 6 G M / c^2$ .

### Singularité

Article détaillé : Singularité gravitationnelle.

Au centre d'un trou noir se situe une région dans laquelle le champ gravitationnel et les distorsions de l'espace-temps (on parle plutôt de courbure de l'espace-temps) deviennent infinis. Cette région s'appelle une singularité gravitationnelle. La description de cette région est délicate dans le cadre de la relativité générale puisque celle-ci ne peut décrire des régions où la courbure devient infinie.

De plus, la relativité générale est une théorie qui ne peut pas incorporer en général des effets gravitationnels d'origine quantique. Or quand la courbure tend vers l'infini, on peut montrer que celle-ci est nécessairement sujette à des effets de nature quantique.<sup>[réf. nécessaire]</sup> Par conséquent, seule une théorie de la gravitation incorporant tous les effets quantiques (on parle alors de gravitation quantique) est en mesure de décrire correctement les singularités gravitationnelles.

La description d'une singularité gravitationnelle est donc pour l'heure problématique. Néanmoins, tant que celle-ci est située à l'intérieur de l'horizon du trou noir, elle ne peut influencer ce qui est à l'extérieur de cet horizon, de la même façon que de la matière située à l'intérieur de l'horizon d'un trou noir ne peut en ressortir. Ainsi, aussi mystérieuses que soient les singularités gravitationnelles, notre incapacité à les décrire, signe de l'existence de limitations de la relativité générale à décrire tous les phénomènes gravitationnels, n'empêche pas la description des trous noirs pour la partie située de notre côté de l'horizon des événements.

### Formation

La possibilité de l'existence des trous noirs n'est pas une conséquence exclusive de la relativité générale : la quasi-totalité des autres théories de la gravitation physiquement réalistes permet également leur existence. Toutefois, la relativité générale, contrairement à la plupart de ces autres théories de la gravité, non seulement prédit que les trous noirs *peuvent* exister, mais aussi qu'ils seront formés partout où suffisamment de matière peut être compactée dans une région de l'espace. Par exemple, si l'on compressait le Soleil dans une sphère d'environ trois kilomètres de rayon (soit à peu près quatre millièmes de sa taille), il deviendrait un trou noir. Si la Terre était compressée dans un volume de quelques millimètres cube, elle deviendrait également un trou noir.

Pour l'astrophysique, un trou noir peut être considéré comme le stade ultime d'un effondrement gravitationnel. Les deux stades de la matière qui, en termes de compacité, précèdent l'état de trou noir, sont ceux atteints par exemple par les naines blanches et les étoiles à neutrons. Dans le premier cas, c'est la pression de dégénérescence des électrons qui maintient la naine blanche dans un état d'équilibre face à la gravité. Dans le second, il ne s'agit pas de la pression de dégénérescence des nucléons, mais de l'interaction forte qui maintient l'équilibre<sup>[15]</sup>. Un trou noir ne peut se former à la suite de l'effondrement d'une naine blanche : celle-ci, en s'effondrant, initie des réactions nucléaires qui forment des noyaux plus lourds que ceux qui la composent<sup>[16]</sup>. Ce faisant, le dégagement d'énergie qui en résulte est suffisant pour disloquer complètement la naine blanche, qui explose en supernova dite thermonucléaire (ou de type Ia).

Un trou noir se forme lorsque la force de gravité est suffisamment grande pour dépasser l'effet de la pression, chose qui se produit quand l'astre progéniteur dépasse une certaine masse critique. Dans ce cas, plus aucune force connue

ne permet de maintenir l'équilibre, et l'objet en question s'effondre complètement. En pratique, plusieurs cas de figures sont possibles : soit une étoile à neutrons accrète de la matière issue d'une autre étoile, jusqu'à atteindre une masse critique, soit elle fusionne avec une autre étoile à neutron (phénomène *a priori* beaucoup plus rare), soit le cœur d'une étoile massive s'effondre directement en trou noir<sup>[17]</sup>.

L'hypothèse de l'existence d'un état plus compact que celui d'étoile à neutrons a été proposée dans le courant des années 1980 ; ce serait celui des étoiles à quarks aussi appelées étoiles étranges en raison du nom donné pour des raisons historiques à certains des quarks constituant l'objet, appelés « quarks étranges<sup>[18]</sup> ». Des indications d'une possible détection indirecte de tels astres ont été obtenues depuis le courant des années 1990, sans trancher pour autant définitivement la question<sup>[19]</sup>, mais cela ne change rien au fait qu'au-delà d'une certaine masse ce type d'astre finit par s'effondrer en trou noir, seule la valeur de la masse limite change.

En 2006, on distingue quatre grandes classes de trous noirs en fonction de leur masse : les trous noirs stellaires, super-massifs, intermédiaires et primordiaux (ou micro trous noirs). L'existence voire l'abondance de chaque type de trou noir est directement liée à la possibilité de leur formation.

## Trous noirs stellaires

Article détaillé : Trou noir stellaire.

Un trou noir de la masse du soleil aurait un diamètre de 6 kilomètres. Les trous noirs stellaires ont une masse d'au moins quelques masses solaires. Ils naissent à la suite de l'effondrement gravitationnel du résidu des étoiles massives (environ dix masses solaires et plus, initialement). En effet, lorsque la combustion par les réactions thermonucléaires dans le cœur de l'étoile massive se termine, faute de carburant, une supernova se produit. Cette dernière peut laisser derrière elle un cœur qui continue à s'effondrer rapidement.

En 1939, Robert Oppenheimer a montré que si ce cœur a une masse supérieure à une certaine limite (appelée limite d'Oppenheimer-Volkoff et égale à environ 3,3 masses solaires) la force gravitationnelle l'emporte définitivement sur toutes les autres forces et un trou noir se forme'.

L'effondrement vers un trou noir est susceptible d'émettre des ondes gravitationnelles, qui devraient être détectées dans un futur proche avec des instruments tels que le détecteur Virgo de Cascina en Italie, ou avec les deux interféromètres américains de LIGO. Les trous noirs stellaires sont aujourd'hui observés dans les binaires X et les microquasars et sont responsables parfois de l'apparition de jets tels que ceux observés dans certains noyaux actifs de galaxies.

## Trous noirs supermassifs

Article détaillé : Trou noir supermassif.

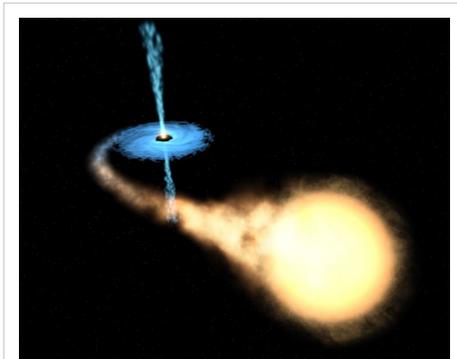
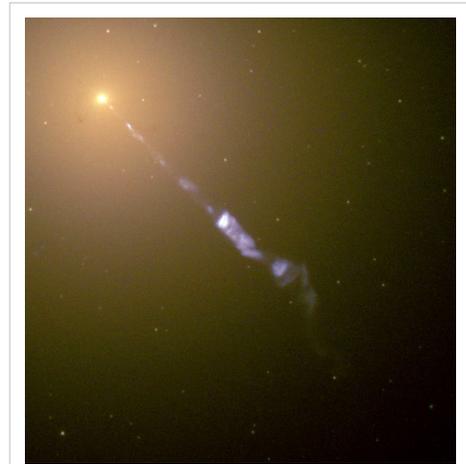


Illustration de la formation de jets. Au sein d'un système binaire composé d'un trou noir et d'une étoile, cette dernière voit son gaz arraché et aspiré vers le trou noir. En s'approchant, le gaz engendre un disque d'accrétion qui fournit lui-même la matière dont est composé le jet.

Les trous noirs super-massifs ont une masse comprise entre quelques millions et quelques milliards de masses solaires. Ils se trouvent au centre des galaxies et leur présence provoque parfois l'apparition de jets et du rayonnement X. Les noyaux de galaxies qui sont ainsi plus lumineux qu'une simple superposition d'étoiles sont alors appelés noyaux actifs de galaxies.

Notre galaxie, la Voie lactée, contient un tel trou noir (Sagittarius A), ainsi qu'il a été démontré par l'observation des mouvements extrêmement rapides des étoiles proches du trou noir<sup>[21]</sup>. En particulier, une étoile nommée S2 a pu être observée lors d'une révolution complète autour d'un objet sombre non détecté en moins de onze ans. L'orbite elliptique de cette étoile l'a amenée à moins de vingt unités astronomiques de cet objet (soit une distance de l'ordre de celle Uranus-Soleil) et la vitesse à laquelle l'orbite est parcourue permet d'assigner une masse d'environ 2,3 millions de masses solaires pour l'objet sombre autour duquel elle gravite. Aucun modèle autre que celui d'un trou noir ne permet de rendre compte d'une telle concentration de matière dans un volume aussi restreint<sup>[22]</sup>.

Le télescope Chandra a également permis d'observer au centre de la galaxie NGC 6240 deux trous noirs super-massifs en orbite l'un autour de l'autre. La formation de tels géants est encore débattue, mais certains pensent qu'ils se sont formés très rapidement au début de l'univers<sup>[23],[24]</sup>.



Le jet émis depuis le centre de la galaxie M87 est probablement formé grâce à la présence d'un trou noir supermassif dont la masse est estimée à 6,8 milliards de masses solaires<sup>[20]</sup>. Seul un côté du jet est visible, il s'agit de celui dirigé vers nous. Celui-ci apparaît bien plus brillant que le contre jet, car ayant sa luminosité considérablement augmentée par l'effet de décalage vers le bleu, alors que le contre jet subit un décalage vers le rouge qui le rend bien moins lumineux.

## Trous noirs intermédiaires

Article détaillé : Trou noir intermédiaire.

Les trous noirs intermédiaires sont des objets récemment découverts et ont une masse entre 100 et 10 000 masses solaires<sup>[25]</sup>. Dans les années 1970, les trous noirs de masse intermédiaire étaient supposés se former dans le cœur des amas globulaires mais aucune observation ne venait soutenir cette hypothèse. Des observations dans les années 2000 ont montré l'existence de sources de rayons X ultra-lumineuses (*Ultra-luminous X-ray source* en anglais, ou *ULX*)<sup>[26]</sup>. Ces sources ne sont apparemment pas associées au cœur des galaxies où l'on trouve les trous noirs super-massifs. De plus, la quantité de rayons X observée est trop importante pour être produite par un trou noir de 20 masses solaires, accrétant de la matière avec un taux égal à la limite d'Eddington (limite maximale pour un trou noir stellaire). Ces trous noirs intermédiaires pourraient aussi résulter de l'effondrement d'étoile de population III : ce sont des populations hypothétiques d'étoiles très massives (des milliers de masses solaires) qui se seraient formées au début de l'Univers, constituées des éléments les plus légers : l'hydrogène ou l'hélium.

## Trous noirs primordiaux

Articles détaillés : Trou noir primordial et Micro trou noir.

Les trous noirs primordiaux, aussi appelés *micro trous noirs* ou *trous noirs quantiques*, auraient une taille très petite. Ils se seraient formés durant le Big Bang (d'où l'appellation trou noir « primordial »), à la suite de l'effondrement gravitationnel de petites sur-densités dans l'univers primordial. Dans les années 1970, les physiciens Stephen Hawking et Bernard Carr ont étudié un mécanisme de formation des trous noirs dans l'univers primordial. Ils avancèrent l'idée d'une profusion de mini-trous noirs, minuscules par rapport à ceux envisagés par la formation stellaire. La densité et la répartition en masse de ces trous noirs ne sont pas connues et dépendent essentiellement de la façon dont se produit une phase d'expansion rapide dans l'univers primordial, l'inflation cosmique. Ces trous noirs

de faible masse émettent, s'ils existent, un rayonnement gamma qui pourrait éventuellement être détecté par des satellites comme INTEGRAL. La non détection de ce rayonnement permet de mettre des limites supérieures sur l'abondance et la répartition en masse de ces trous noirs.

Selon certains modèles de physique des hautes énergies, il serait possible de créer des mini-trous noirs similaires en laboratoire<sup>[27]</sup>, dans des accélérateurs de particules comme le LHC, installé près de Genève, en Suisse.

En 2005, Frans Pretorius est parvenu à simuler la fusion complète de deux trous noirs ; la phase finale de ce processus est plus simple qu'on l'imaginait et surtout plus courte : de l'ordre de la milliseconde<sup>[28]</sup>.

## Observation

Article détaillé : Observation et détection des trous noirs.

Les deux seules classes de trous noirs pour lesquelles on dispose d'observations nombreuses (indirectes, mais de plus en plus précises, voir paragraphe suivant) sont les trous noirs stellaires et super-massifs. Le trou noir super-massif le plus proche est celui qui se trouve au centre de notre Galaxie à environ 8 kilo-parsecs.

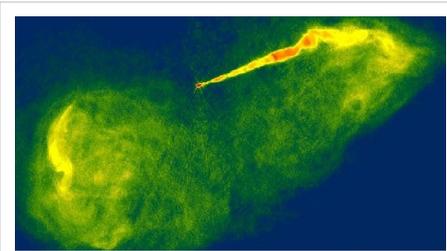
Une des premières méthodes de détection d'un trou noir est la détermination de la masse des deux composantes d'une étoile binaire, à partir des paramètres orbitaux. On a ainsi observé des étoiles de faible masse avec un mouvement orbital très prononcé (amplitude de plusieurs dizaines de km/s) mais dont le compagnon est invisible. Le compagnon massif invisible peut généralement être interprété comme une étoile à neutrons ou un trou noir, puisqu'une étoile normale avec une telle masse se verrait très facilement. La masse du compagnon (ou la fonction de masses, si l'angle d'inclinaison est inconnu) est alors comparée à la masse limite maximale des étoiles à neutrons (environ 3,3 masses solaires). Si elle dépasse cette limite, on considère que l'objet est un trou noir. Sinon, il peut être une naine blanche.

On considère également que certains trous noirs stellaires apparaissent lors des sursauts de rayons gamma (ou *GRB*, pour *gamma-ray burst* en anglais). En effet, ces derniers se formeraient via l'explosion d'une étoile massive (comme une étoile Wolf-Rayet) en supernova, et que dans certains cas (décrits par le modèle collapsar), un flash de rayons gamma est produit au moment où le trou noir se forme. Ainsi, un GRB<sup>[29]</sup> pourrait représenter le signal de la naissance d'un trou noir. Des trous noirs de plus faible masse peuvent aussi être formés par des supernovæ classiques. Le rémanent de la supernova 1987A est soupçonné d'être un trou noir, par exemple.

Un deuxième phénomène directement relié à la présence d'un trou noir, cette fois pas seulement de type stellaire, mais aussi super-massif, est la présence de jets observés principalement dans le domaine des ondes radio. Ces jets résultent des changements de champ magnétique à grande échelle se produisant dans le disque d'accrétion du trou noir.

### Observation directe

La petite taille d'un trou noir stellaire (quelques kilomètres) rend son observation directe impossible. En guise d'exemple, et même si la taille angulaire d'un trou noir est plus grande que celle d'un objet classique de même rayon, un trou noir d'une masse solaire et situé à un parsec (environ 3,26 années-lumière) aurait un diamètre angulaire de 0,1 *micro* seconde d'arc. Cependant, la situation est plus favorable pour un trou noir super-massif. En effet, la taille d'un trou noir est proportionnelle à sa masse. Le trou noir du centre galactique a une masse, bien estimée, d'environ 3,6 millions de masses solaires. Son rayon de Schwarzschild est donc d'environ 11 millions de kilomètres. La taille angulaire de ce trou noir, situé à environ 8,5 kiloparsecs est de l'ordre de 40 microsecondes d'arc. Cette résolution est inaccessible dans le domaine visible, mais est assez proche des limites actuellement atteignables en interférométrie



Jet de plasma observé en interférométrie dans la galaxie M87. L'effet est imputé au champ magnétique intense à proximité du trou noir supermassif en rotation situé au centre de la galaxie.

radio. La technique de l'interférométrie radio, avec une sensibilité suffisante, est limitée en fréquence au domaine millimétrique. Un gain d'un ordre de grandeur en fréquence permettrait une résolution meilleure que la taille angulaire du trou noir. L'imagerie directe du trou noir du centre galactique est donc envisageable dans les années qui viennent. Le trou noir super-massif situé au centre de la galaxie M87 est environ 2 000 fois plus éloigné (18,7 Mpc) mais estimé près de 1 000 fois plus massif. Ce trou noir pourrait ainsi devenir le second trou noir imagé après celui de la Voie Lactée<sup>[30],[31]</sup>.

### Exemples de trous noirs stellaires

Cygnus X-1, détecté en 1965, est le premier objet astrophysique identifié comme pouvant être la manifestation d'un trou noir. C'est un système binaire qui serait constitué d'un trou noir en rotation et d'une étoile géante.

Les systèmes binaires stellaires qui contiennent un trou noir avec un disque d'accrétion formant des jets sont appelés micro-quasars, en référence à leurs parents extragalactiques : les quasars. Les deux classes d'objets partagent en fait les mêmes processus physiques. Parmi les micro-quasars les plus étudiés, on notera GRS 1915+105, découvert en 1994 pour avoir des jets supraluminiques. Un autre cas de tels jets fut détecté dans le système GRO J1655-40. Mais sa distance est sujette à controverse et ses jets pourraient ne pas être supraluminiques. Notons aussi le micro-quasar très spécial SS 433, qui a des jets persistants en précession et où la matière se déplace par paquets à des vitesses de quelques fractions de la vitesse de la lumière.

### Exemples de trous noirs super-massifs

Les candidats aux trous noirs super-massifs ont premièrement été les noyaux actifs de galaxie et les quasars découverts par les radioastronomes dans les années 1960. Cependant, les observations les plus convaincantes de l'existence de trous noirs super-massifs sont celles des orbites des étoiles autour du centre galactique appelé Sagittarius A\*. L'orbite de ces étoiles et les vitesses atteintes ont permis aujourd'hui d'exclure tout autre type d'objet qu'un trou noir super-massif, de l'ordre de 4 millions de masses solaires à cet endroit de la galaxie. Par la suite, des trous noirs super-massifs ont été détectés dans de nombreuses autres galaxies.

En février 2005, une étoile géante bleue, appelée SDSS J090745.0+024507 fut observée quittant notre galaxie avec une vitesse deux fois supérieure à la vitesse de libération de la Voie lactée, soit 0,0022 fois la vitesse de la lumière. Quand on remonte la trajectoire de cette étoile, on voit qu'elle croise le voisinage immédiat du centre galactique. Sa vitesse et sa trajectoire confortent donc également l'idée de la présence d'un trou noir super-massif à cet endroit dont l'influence gravitationnelle aurait provoqué l'éjection de cette étoile de la Voie Lactée.

En novembre 2004, une équipe d'astronomes a rapporté la découverte du premier trou noir de masse intermédiaire dans notre galaxie et orbitant à seulement trois années-lumière du centre galactique. Ce trou noir aurait une masse d'environ 1 300 masses solaires et se trouve dans un amas de seulement sept étoiles. Cet amas est probablement le résidu d'un amas massif d'étoiles qui a été dénudé par la présence du trou noir central<sup>[32]</sup>. Cette observation conforte l'idée que les trous noirs super-massifs grandissent en absorbant des étoiles et autres trous noirs, qui pourra être confirmée par l'observation directe des ondes gravitationnelles émises par ce processus, par l'intermédiaire de l'interféromètre spatial LISA.

En juin 2004, des astronomes ont trouvé un trou noir super-massif, appelé Q0906+6930, au centre d'une galaxie lointaine d'environ 12,7 milliards d'années-lumière, c'est-à-dire lorsque l'univers était encore très jeune<sup>[33]</sup>. Cette observation montre que la formation des trous noirs super-massifs dans les galaxies est un phénomène relativement rapide.

En 2012, le plus gros trou noir de l'histoire a été découvert dans la galaxie NGC 1277 situé à 220 millions d'années-lumière dans la constellation de Persée. Il aurait une masse de 17 milliards de masses solaires et représente 14 % de la masse de sa propre galaxie (contre 0,1 pour les autres en moyenne).

## Trous noirs et physique fondamentale

### Théorèmes sur les singularités

Une question cruciale à propos des trous noirs est de savoir sous quelles conditions ils peuvent se former. Si les conditions nécessaires à leur formation sont extrêmement spécifiques, les chances que les trous noirs soient nombreux peuvent être faibles. Un ensemble de théorèmes mathématiques dus à Stephen Hawking et Roger Penrose a montré qu'il n'en était rien : la formation des trous noirs peut se produire dans une variété de conditions extrêmement génériques. Pour des raisons évidentes, ces travaux ont été nommés théorèmes sur les singularités. Ces théorèmes datent du début des années 1970, époque où il n'y avait guère de confirmation observationnelle de l'existence des trous noirs. Les observations ultérieures ont effectivement confirmé que les trous noirs étaient des objets très fréquents dans l'univers.

### Singularités nues et censure cosmique

Article détaillé : Principe de censure cosmique.

Au centre d'un trou noir se situe une singularité gravitationnelle. Pour tout type de trou noir, cette singularité est « cachée » du monde extérieur par l'horizon des événements. Cette situation s'avère très heureuse : la physique actuelle ne sait certes pas décrire une singularité gravitationnelle mais cela a peu d'importance, car celle-là étant à l'intérieur de la zone délimitée par l'horizon, elle n'influe pas sur les événements du monde extérieur. Il se trouve cependant qu'il existe des solutions mathématiques aux équations de la relativité générale dans lesquelles une singularité existe sans être entourée d'un horizon. C'est par exemple le cas pour les solutions de Kerr ou de Reissner-Nordström, quand la charge ou le moment cinétique dépasse une certaine valeur critique. Dans ce cas, on ne parle plus de trou noir (il n'y a plus d'horizon donc plus de « trou ») mais de singularité nue. De telles configurations sont extrêmement difficiles à étudier en pratique car la prédiction du comportement de la singularité reste toujours impossible ; mais cette fois, il influence l'univers dans lequel nous vivons. L'existence de singularités nues a donc pour conséquence l'impossibilité d'une évolution déterministe de l'univers dans l'état des connaissances actuelles<sup>[34]</sup>.

Pourtant, les trous noirs de Kerr ou de Reissner-Nordström (ainsi que le cas général de Kerr-Newman) ne peuvent pas arriver à leurs valeurs critiques respectives par apport externe de moment cinétique ou de charges électriques. En effet, plus on se rapprocherait de la valeur critique d'un trou noir de Kerr, moins un objet externe pourrait augmenter son moment cinétique. De façon comparable, à l'approche de la charge maximale d'un trou noir de Reissner-Nordström, les charges électriques de même signe que celle du trou noir projetées vers celui-ci y parviendraient de plus en plus difficilement en raison de la répulsion électrostatique exercée par le trou noir. Pour amener les charges à pénétrer dans le trou noir, il faudrait les y projeter à une vitesse relativiste (à cause de la répulsion électrique), ce qui contribuerait à leur conférer une énergie croissante devenant bien supérieure à leur énergie de masse (au repos). D'où une contribution à la masse du trou noir, suffisante pour compenser l'augmentation de charge du trou noir. Finalement, le rapport charge/masse du trou noir « saturerait » juste en dessous de la valeur critique<sup>[35]</sup>.

Ces éléments, ainsi que des considérations plus fondamentales, ont conduit le mathématicien anglais Roger Penrose à formuler en 1969 l'hypothèse dite de la censure cosmique, stipulant qu'aucun processus physique ne pouvait permettre l'apparition de singularités nues dans l'univers. Cette hypothèse, qui possède plusieurs formulations possibles, a été l'objet d'un pari entre Stephen Hawking d'une part et Kip Thorne et John Preskill d'autre part, ces derniers ayant parié que des singularités nues pouvaient exister. En 1991, Stuart L. Shapiro et Saul A. Teukolsky montrèrent sur foi de simulations numériques que des singularités nues pouvaient se former dans l'univers. Quelques années plus tard, Matthew Choptuik mit en évidence un ensemble important de situations à partir desquelles la formation de singularités nues était possible. Ces configurations demeurent cependant extrêmement particulières, et nécessitent un ajustement fin des conditions initiales pour mener à la formation des singularités nues. Leur formation est donc *possible*, mais en pratique extrêmement *improbable*. En 1997 Stephen Hawking reconnut qu'il avait perdu

son pari avec Kip Thorne et John Preskill. Un autre pari a depuis été lancé, où des conditions plus restrictives sur les conditions initiales pouvant mener à des singularités nues ont été rajoutées.

## Entropie

Article détaillé : Entropie des trous noirs.

En 1971, le physicien britannique Stephen Hawking montra que la surface totale des horizons des événements de n'importe quel trou noir classique ne peut jamais décroître. Cette propriété est tout à fait semblable à la deuxième loi de la thermodynamique, avec la surface jouant le rôle de l'entropie. Dans le cadre de la physique classique, on pourrait violer cette loi de la thermodynamique en envoyant de la matière dans un trou noir, ce qui la ferait disparaître de notre univers, avec la conséquence d'un décroissement de l'entropie totale de l'univers.

Pour éviter de violer cette loi, le physicien Jacob Bekenstein proposa qu'un trou noir possède une entropie (sans en préciser la nature exacte) et qu'elle soit proportionnelle à la surface de son horizon. Bekenstein pensait alors que les trous noirs n'émettent pas de radiation et que le lien avec la thermodynamique n'était qu'une simple analogie et pas une description physique des propriétés du trou noir. Néanmoins, Hawking a peu après démontré par un calcul de théorie quantique des champs que le résultat sur l'entropie des trous noirs est bien plus qu'une simple analogie et qu'il est possible de définir rigoureusement une température associée au rayonnement des trous noirs (voir ci-dessous).

Utilisant les équations de la thermodynamique des trous noirs, il apparaît que l'entropie d'un trou noir est proportionnelle à la surface de son horizon<sup>[36]</sup>. C'est un résultat universel qui peut être appliqué dans un autre contexte aux modèles cosmologiques comportant eux aussi un horizon comme l'univers de de Sitter. L'interprétation microscopique de cette entropie reste en revanche un problème ouvert, auquel la théorie des cordes a cependant réussi à apporter des éléments de réponse partiels.

Il a été ensuite montré que les trous noirs sont des objets à entropie maximale, c'est-à-dire que l'entropie maximale d'une région de l'espace délimitée par une surface donnée est égale à celle du trou noir de même surface<sup>[37],[38]</sup>. Ce constat a amené les physiciens Gerard 't Hooft et ensuite Leonard Susskind à proposer un ensemble d'idées, appelé principe holographique, basé sur le fait que la description de la surface d'une région permet de reconstituer toute l'information relative à son contenu, de la même façon qu'un hologramme code des informations relatives à un volume sur une simple surface, permettant ainsi de donner un effet de relief à partir d'une surface.

La découverte de l'entropie des trous noirs a ainsi permis le développement d'une analogie extrêmement profonde entre trous noirs et thermodynamique, la thermodynamique des trous noirs, qui pourrait aider dans la compréhension d'une théorie de la gravité quantique.

## Évaporation et radiation de Hawking

Article détaillé : Évaporation des trous noirs.

En 1974, Stephen Hawking appliqua la théorie quantique des champs à l'espace-temps courbé de la relativité générale, et découvrit que contrairement à ce que prédisait la mécanique classique, les trous noirs pouvaient effectivement émettre une radiation (proche d'une radiation thermique) aujourd'hui appelée rayonnement de Hawking<sup>[39]</sup> : les trous noirs ne sont donc pas complètement « noirs ».

La radiation de Hawking correspond en fait à un spectre de corps noir. On peut donc y associer la « température » du trou noir, qui est inversement proportionnelle à sa taille<sup>[40]</sup>. De ce fait, plus le trou noir est important, plus sa température est basse. Un trou noir de la masse de la planète Mercure aurait une température égale à celle du rayonnement de fond diffus cosmologique (à peu près 2,73 kelvins). Si le trou noir est plus massif, il sera donc plus froid que la température du fond et accroîtra son énergie plus vite qu'il n'en perdra *via* la radiation de Hawking, devenant ainsi encore plus froid. Un trou noir stellaire a ainsi une température de quelques microkelvins, ce qui rend la détection directe de son évaporation totalement impossible à envisager. Cependant, pour des trous noirs moins

massifs, la température est plus élevée et la perte d'énergie associée lui permet de voir sa masse varier sur des échelles cosmologiques. Ainsi, un trou noir de quelques millions de tonnes s'évaporerait-il en une durée inférieure à celle de l'âge de l'Univers. Alors que le trou noir s'évapore, le trou noir devient plus petit, donc plus chaud. Certains astrophysiciens ont proposé que l'évaporation complète de trous noirs produirait un flash de rayons gamma. Ceci serait une signature de l'existence de trous noirs de très faible masse. Il s'agirait alors de trous noirs primordiaux. La recherche actuelle explore cette possibilité avec les données du satellite européen INTEGRAL<sup>[41]</sup>.

## Paradoxe de l'information

Article détaillé : Paradoxe de l'information.

Une question de physique fondamentale encore irrésolue au début du XXI<sup>e</sup> siècle est le fameux paradoxe de l'information. En effet, en raison du théorème de calvitie déjà cité, il n'est pas possible de déterminer *a posteriori* ce qui est entré dans le trou noir. Cependant, vue d'un observateur éloigné, l'information n'est jamais complètement détruite puisque la matière tombant dans le trou noir ne disparaît qu'après un temps infiniment long. Alors, l'information qui a formé le trou noir est-elle perdue ou pas ?

Des considérations générales sur ce que devrait être une théorie de la gravité quantique suggèrent qu'il ne peut y avoir qu'une quantité finie et limitée d'entropie (c'est-à-dire une quantité maximale et finie d'information) associée à l'espace près de l'horizon du trou noir. Mais la variation de l'entropie de l'horizon plus celle de la radiation Hawking est toujours suffisante pour prendre en compte toute l'entropie de la matière et de l'énergie tombant dans le trou noir... Mais restent de nombreuses questions. En particulier au niveau quantique, est-ce que l'état quantique de la radiation de Hawking est déterminé de manière unique par l'histoire de ce qui est tombé dans le trou noir ? De même, est-ce que l'histoire de ce qui est tombé est déterminée de manière unique par l'état quantique du trou noir et de sa radiation ? En d'autres termes, est-ce que les trous noirs sont, ou ne sont pas, déterministes ? Cette propriété est bien sûr conservée dans la relativité générale comme dans la physique classique, mais pas dans la mécanique quantique.

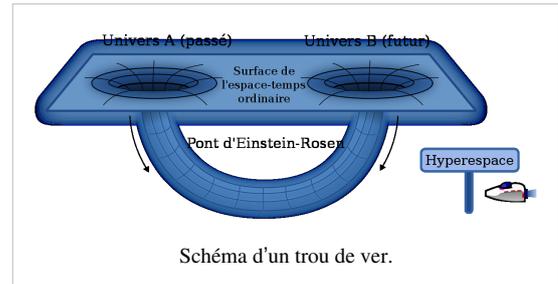
Pendant de longues années, Stephen Hawking a maintenu sa position originelle de 1975 voulant que la radiation de Hawking soit entièrement thermique, et donc complètement aléatoire, représentant ainsi une nouvelle source d'information non-déterministe. Cependant, le 21 juillet 2004, il présenta un nouvel argument, allant à l'opposé de sa première position<sup>[42],[43],[44]</sup>. Dans ses nouveaux calculs, l'entropie associée à un trou noir serait effectivement inaccessible à un observateur extérieur. De plus, dans l'absence de cette information, il est impossible de relier de manière univoque l'information de la radiation de Hawking (contenue dans ses corrélations internes) à l'état initial du système. Cependant, si le trou noir s'évapore complètement, cette identification univoque peut être faite et l'unitarité est préservée (l'information est donc conservée). Il n'est pas clair que la communauté scientifique spécialisée soit absolument convaincue par les arguments présentés par Hawking<sup>[45]</sup>. Mais Hawking lui-même fut suffisamment convaincu pour régler le pari qu'il avait fait en 1997 avec le physicien John Preskill de Caltech, provoquant ainsi un énorme intérêt des médias.

En juillet 2005, l'annonce de Hawking a donné lieu à une publication dans la revue *Physical Review*<sup>[46]</sup> et fut débattue par la suite au sein de la communauté scientifique sans qu'un consensus net ne se dégage quant à la validité de l'approche proposée par Hawking<sup>[47],[48]</sup>.

## Trous noirs et trous de ver

Article détaillé : Trou de ver.

La relativité générale indique qu'il existerait des configurations dans lesquelles deux trous noirs sont reliés l'un à l'autre. Une telle configuration est habituellement appelée trou de ver ou plus rarement pont d'Einstein-Rosen. De telles configurations ont beaucoup inspiré les auteurs de science-fiction (voir par exemple les références de la section médias) car elles proposent un moyen de voyager très rapidement sur de grandes distances, voire voyager dans le temps. En pratique, de telles configurations, si elles sont autorisées par la relativité générale, semblent totalement irréalisables dans un contexte astrophysique car aucun processus connu ne semble permettre la formation de tels objets<sup>[49]</sup>.



## Propositions alternatives aux trous noirs

La démonstration de l'existence des trous noirs stellaires s'appuie sur l'existence d'une limite supérieure pour la masse des étoiles à neutrons. La valeur de cette limite dépend fortement des hypothèses faites concernant les propriétés de la matière dense. La découverte de nouvelles phases exotiques de la matière pourrait repousser cette limite. Une phase constituée de quarks libres (non liés pour former des protons et neutrons par exemple) à haute densité pourrait permettre l'existence d'étoiles à quarks tandis que des modèles de supersymétrie prévoient l'existence d'étoiles Q. Certaines extensions du modèle standard postulent l'existence de préons qui constitueraient les blocs élémentaires des quarks et des leptons, lesquels pourraient hypothétiquement former des étoiles à préons. Ces modèles hypothétiques pourraient expliquer un certain nombre d'observations de candidats trous noirs stellaires. Cependant, il peut être montré à partir d'arguments généraux en relativité générale que tous ces objets auraient une masse maximale.

Étant donné que la densité moyenne d'un trou noir à l'intérieur de son rayon de Schwarzschild est inversement proportionnelle au carré de sa masse, les trous noirs supermassifs sont beaucoup moins denses que les trous noirs stellaires (la masse volumique d'un trou noir de  $10^8$  masses solaires est comparable à celle de l'eau ; un trou noir de dix milliards ( $10^{10}$ ) de masses solaires serait moins dense que l'air). En conséquence, la physique de la matière formant un trou noir supermassif est bien mieux comprise et les explications alternatives possibles pour l'observation des trous noirs supermassifs sont beaucoup plus ordinaires. Par exemple, un trou noir supermassif pourrait être modélisé par un grand amas d'objets très sombres. Cependant, ces alternatives ne sont généralement pas assez stables pour expliquer les candidats trous noirs supermassifs.

Les éléments de preuve en faveur des trous noirs stellaires et supermassifs impliquent que, pour que les trous noirs ne se forment pas, la relativité générale doit échouer comme théorie de la gravité, peut-être à cause de l'apparition de corrections quantiques. Une caractéristique très attendue d'une théorie de la gravité quantique serait l'absence de singularités ou d'horizons des événements (et donc l'absence de trous noirs). Ces dernières années, une grande attention a été portée au modèle des « fuzzballs (en) » (littéralement « balles (ou pelotes) chevelues ») développé en théorie des cordes. Basée sur des calculs dans des situations spécifiques en théorie des cordes, la proposition suggère que de façon générale les états individuels d'une solution trou noir ne doit pas avoir d'horizon des événements ni de singularité mais que pour un observateur classique/semi-classique la moyenne statistique de ces états apparaît comme un trou noir ordinaire en relativité générale.

De nombreuses autres alternatives (étoiles noires, étoiles sombres (en), étoiles à énergie noire (en), objets en effondrement éternel (ca), étoiles exotiques (étoiles électrofaibles, étoiles à préons, étoiles à bosons), etc.) ont également été proposées, tous ces objets restant néanmoins purement théoriques en l'état actuel de nos connaissances.

## Médias

Quand on parle de « culture populaire » à propos de trou noir, on pense souvent à la science-fiction. On y trouve, au cinéma ou dans le domaine littéraire, beaucoup d'inspiration.

### Dans les séries

- Doctor Who
- Stargate SG-1
- Stargate Atlantis
- Stargate Universe
- Sliders : Les Mondes parallèles
- Farscape
- Fringe

### Films

- *Le Trou noir* (1979), de Gary Nelson, est un film des studios Disney.
- *Event Horizon* (1997), de Philip Eisner & Andrew Kevin Walker, est un film des studios Paramount Pictures, Golar Productions & Impact Pictures.

### Littérature

- Série *La Grande Porte*, de Frederik Pohl, paru en 1977.
- Une singularité nue et ses effets non déterministes sont à la base du livre *Radix*, de l'auteur américain Alfred Angelo Attanasio, paru en 1981.
- *Les chroniques de MacAndrew*, de Charles Sheffield, paru en 1983.
- *Éclats d'une poétique de l'approche de l'inconnaissable*, de Serge Venturini, paru en 2013.

### Musique

- La chanson *Supermassive Black hole* de l'album *Black Holes and Revelations* (2006) par le groupe Muse
- La chanson *Beyond The Black Hole* du groupe *Gamma Ray*
- La chanson *Into the Black Hole* de Ayreon
- La chanson *Black Hole Sun* de Soundgarden

### Bande dessinée

- Dans la série *Universal War One*, un trou de ver est au cœur de l'intrigue.
  - Dans les tomes 8 et 9 de la série *Aquablue*, un astre improbable analogue à un trou noir, appelé *voïvode*, est un des principaux éléments de l'intrigue.
-

## Médiagraphie

### Bibliographie

#### Ouvrages de vulgarisation

- Jean-Pierre Lasota, *La science des trous noirs*, Odile Jacob sciences, 2010 (ISBN 978-2-7381-2008-3) Très facile à lire et facile à comprendre.
- Kip Thorne (trad. Alain Bouquet et Jean Kaplan), *Trous noirs et distorsions du temps : l'héritage sulfureux d'Einstein*, Champs Flammarion, 1997, 654 p. (ISBN 978-2-08-211221-5) Un classique mêlant les aspects historiques et techniques du sujet. Très complet.
- Jean-Pierre Luminet, *Le destin de l'univers : Trous noirs et énergie sombre*, Fayard, coll. « Le temps des sciences », 2006 (ISBN 978-2-213-63081-6)
- Stephen Hawking et Roger Penrose (trad. Françoise Balibar et Marc Lachièze-Rey), *La nature de l'espace et du temps*, Gallimard, coll. « Nrf Essais », 1997 (ISBN 978-2-07-074465-7)
- Isaac Asimov, *Trous noirs : l'explication scientifique de l'univers en contraction*, L'étincelle, 1978, 221 p. (ISBN 0-88515-092-9 et 0-88515-092-9). Livre rare difficile à trouver.
- Stephen Hawking (trad. Isabelle Naddeo-Souriau), *Une brève histoire du temps*, Flammarion, 1989, 245 p. (ISBN 978-2-08-081238-4 et 2080812386) Un best-seller très intéressant, et où les trous noirs et les interrogations qu'ils posent sont mis dans le vaste contexte de l'Univers et de son évolution.
- (en) Jacob Bekenstein, *Of Gravity. Black Holes and Information*, Di Renzo Editore, 2006 (ISBN 88-8323-161-9).

#### Articles de magazines

- *Les trous noirs*, dossier Hors Série du magazine « Pour la Science », 1997 (ISSN 01534092 <sup>[50]</sup>). Épuisé sur le site de la revue, mais apparemment disponible sur CD.
  - Aurélien Barrau et Gaëlle Boudoul, *Où sont passés les trous noirs primordiaux*, article du magazine « La recherche », 2004 Le fichier PDF <sup>[51]</sup> est disponible sur le site web <sup>[52]</sup> personnel d'Aurélien Barrau.
- A. Barrau, A. Gorecki, J. Grain, *Les micro-trous noirs primordiaux* <sup>[53]</sup>, *Pour la Science* n° 372, octobre 2008.
- J. Laval, *Les trous noirs de masse intermédiaire* <sup>[54]</sup>, *Pour la Science* n° 372, octobre 2008.
- A. Riazuelo, *Trous noirs et trous de vers* <sup>[55]</sup>, *Pour la Science* n° 372, octobre 2008.

#### Ouvrages et articles techniques

- (en) Edwin F. Taylor & John A. Wheeler, *Exploring black holes: introduction to general relativity*, Benjamins/Cummings (2000) (ISBN 0-201-38423-X). Pour un lecteur qui connaît les principes de la relativité restreinte, Wheeler et Taylor introduisent les idées de la relativité générale à partir du concept de trou noir, en utilisant le minimum de mathématiques possible : métriques, algèbre, calcul différentiel et intégral de base (pas de géométrie différentielle, ni de tenseurs). Accessible dès le niveau premier cycle universitaire.
- (en) Subrahmanyan Chandrasekhar, *The mathematical theory of black holes*, Oxford University Press (1983) (ISBN 0-19-850370-9). La théorie mathématique des trous noirs, par le grand astrophysicien théoricien d'origine indienne. Niveau troisième cycle universitaire.
- (en) Kip Thorne, Richard H. Price & Douglas Alan Macdonald, *Black holes: the membrane paradigm*, Yale University Press, New Heaven (1986) (ISBN 0-300-03769-4)
- (en) Stuart Louis Shapiro & Saul Arno Teukolsky, *Black holes, white dwarfs and neutron stars: the physics of compact objects*, John Wiley, New York (1983). (ISBN 978-0-471-87316-7)
- (en) Robert M. Wald, *General Relativity*, University of Chicago Press, 1984, 498 p. (ISBN 0226870332).
- (en) D. Kramer, Hans Stephani, Malcolm Mac Callum et E. Herlt, *Exact solutions of Einstein's field equations*, Cambridge, Cambridge University Press, 1980, 428 p. (ISBN 0521230411).

## Aspects historiques

- (en) Brandon Carter ; *Half century of black-hole theory: from physicists' purgatory to mathematicians' paradise*, dans : L. Mornas (ed.) ; « *Encuentros Relativistas Espanoles: A Century of Relativity Theory* », Oviedo (2005). Texte complet disponible sur arXiv : gr-qc/0604064 <sup>[56]</sup>
- Michel Rival, Robert Oppenheimer, Flammarion, coll. « Grandes Biographies », juin 1995, 294 p. (ISBN 2-08-066799-8, résumé <sup>[57]</sup>) 

## Filmographie

- Alain Riazuelo, Sylvie Rouat & Patrice Desenne, *Voyage au cœur d'un trou noir*, Sciences et Avenir, 2008, France « **Voir en ligne** » <sup>[58]</sup> ( Archive <sup>[59]</sup> • Wikiwix <sup>[60]</sup> • Archive.is <sup>[61]</sup> • Google <sup>[62]</sup> • Que faire ? ). Consulté le 2013-11-04.

## Notes et références

### Notes

- [1] Jean-Pierre Luminet, « Trous noirs », *Encyclopædia Universalis* [en ligne], consulté le 22 octobre 2012. <http://www.universalis-edu.com/encyclopedie/trous-noirs/>
- [2] On parle ici de trou noir de Schwarzschild.
- [3] Karl Schwarzschild, , , **1**, 189-196 (1916).
- [4] Parmi les premières observations de Cygnus X-1 par Uhuru, on retiendra : , , **166**, L1-L7 (1971) Voir en ligne (<http://adsabs.harvard.edu/abs/1971ApJ...166L...1O>).
- [5] Les premières indications que Cygnus X-1 est un trou noir, à partir des observations de Uhuru, sont publiées dans D. M. Eardley & William H. Press, , , **13**, 381-422 (1975) Voir en ligne (<http://adsabs.harvard.edu/abs/1975ARA&A..13..381E>).
- [6] Kip S. Thorne, *Trous noirs et distorsions du temps* cité en bibliographie.
- [7] La relativité générale est une théorie relativiste de la gravitation mais qui ne peut prendre en compte les effets de mécanique quantique. Or une singularité gravitationnelle est une région dans laquelle ces effets quantiques jouent un rôle prépondérant.
- [8] Le satellite , lancé en 2004, a mis en évidence cet effet en 2011.
- [9] Selon Chris Carilli, les trous noirs géants se seraient formés avant leurs galaxies hôtes ([http://www.futura-sciences.com/fr/news/t/astronomie/d/les-trous-noirs-geants-se-seraient-formes-avant-leurs-galaxies-hotes\\_17861/](http://www.futura-sciences.com/fr/news/t/astronomie/d/les-trous-noirs-geants-se-seraient-formes-avant-leurs-galaxies-hotes_17861/)).
- [10] Voir par exemple le livre de Robert M. Wald cité en bibliographie.
- [11] Par exemple, l'entropie des trous noirs n'a à l'heure actuelle d'interprétation microscopique que pour certains types de trous noirs dans des espace-temps à cinq dimensions.
- [12] John Michell, dans une lettre à Henry Cavendish, , , **74**, 35-57 (1784) Voir en ligne (<http://www.journals.royalsoc.ac.uk/link.asp?id=g833134462w3213p>). Voir aussi Historique des trous noirs.
- [13] Il est donc faux de dire, comme on le voit souvent, que le mouvement de l'objet tombant sur le trou noir se « gèle », ou s'arrête. En pratique il est devenu invisible avant de s'arrêter complètement.
- [14] Voir Force de marée#Cas des trous noirs pour les détails.
- [15] Contrairement à une idée reçue répandue. Cependant, si l'interaction forte était moins intense, alors la pression de dégénérescence des nucléons pourrait éventuellement assurer l'équilibre de l'étoile. On pourra consulter avec profit ce polycopié (<http://elbereth.obspm.fr/DEA/enseignements/poly/objets.compacts.ps.gz>) pour plus de détails.
- [16] Une naine blanche est principalement composée d'hélium de carbone et d'oxygène, qui peuvent effectivement fusionner en des éléments plus lourds.
- [17] Selon la masse de l'étoile progénitrice, son cœur va s'effondrer en étoile à neutrons (masse de l'étoile plus faible), soit en trou noir (masse plus élevée).
- [18] Charles Alcock, Edward Fahri & Angela Olinto, , , **310**, 261-272 (1986) .
- [19] Voir par exemple Jeremy J. Drake , , , **572**, 996-1001 (2002), .
- [20] <http://www.dailymail.co.uk/sciencetech/article-1347359/Biggest-black-hole-M87-big-swallow-ENTIRE-solar-system.html?ito=feeds-newsxml>
- [21] (<http://www.eso.org/outreach/press-rel/pr-2002/pr-17-02.html#phot-23c-02>) (communiqué de presse ESO, ).
- [22] Voir le site (<http://www.mpe.mpg.de/www-ir/GC/>) du et en particulier l'animation (<http://www.mpe.mpg.de/www-ir/GC/intro.html>) montrant la trajectoire de l'étoile S2. Voir également R. Schödel , , *Nature*, **419**, 694 (), .
- [23] Volonteri M., Rees M. J., , (2005), *ApJ*, 633, 624 .
- [24] Voir aussi l' article ([http://www.universetoday.com/am/publish/early\\_black\\_holes\\_grew\\_quickly.html](http://www.universetoday.com/am/publish/early_black_holes_grew_quickly.html)) sur le site de (<http://www.universetoday.com>).

- [25] Voir la revue de M. C. Miller et E. J. M. Colbert .
- [26] J. R. Sánchez Sutil, , , , juin 2006, . .
- [27] Voir l'article du ( de mai 2005) (<http://www.sciam.com/article.cfm?chanID=sa006&articleID=000CCC72-2AED-1264-980683414B7F0000>), intitulé « ».
- [28] Philippe Pajot et Valérie Greffoz, *Trous noirs : ils sont bien les maîtres du cosmos*, Science et Vie, février 2008, .
- [29] On parle ici principalement de GRB « longs », formés par les étoiles massives. La deuxième classe de GRB, les « courts », sont considérés comme le résultat de la fusion de deux étoiles à neutrons, ce qui donne aussi un trou noir... Mais leur compréhension est plus difficile que les GRB longs. Car le phénomène de coalescence de deux objets très compacts nécessite l'utilisation de simulations numériques extrêmement complexes. Comparativement, l'explosion d'une étoile massive est plus simple.
- [30] T. P. Krichbaum , , comptes rendus du symposium européen sur les réseaux VLBI (Tolède, Espagne, 12-15 octobre 2004). .
- [31] M. Miyoshi , , .
- [32] Voir J.-P. Maillard , , , **423**, 155-167, 2004, .
- [33] Roger W. Romani , , , **610**, L9-L12 (2004), .
- [34] L'élaboration d'une théorie de la gravité quantique est la condition de résolution de ce problème.
- [35] Ce résultat peut s'interpréter autrement dans le cadre de la thermodynamique des trous noirs : dans ce cadre, il est équivalent avec le troisième principe de la thermodynamique qui indique l'inaccessibilité du zéro absolu par un nombre fini de transformations thermodynamiques.
- [36] Elle est égale au quart de la surface de l'horizon en unités de Planck, c'est-à-dire dans un système d'unités où la vitesse de la lumière  $c$ , la constante de Newton  $G$ , la constante de Planck réduite UNIQ-math-0-7b5152079f180782-QINU et la constante de Boltzmann  $k_B$  sont toutes égales à 1. Voir l'article entropie des trous noirs pour plus de détails.
- [37] Raphael Bouso (<http://arxiv.org/abs/hep-th/0203101>), , 74 825-874 (2002).
- [38] Parthasarathi Majumdar, . , Calcutta, India, avril 1998. .
- [39] S. W. Hawking, , *Commun. Math. Phys.*, **43**, 199-220 (1975) Voir en ligne (<http://projecteuclid.org/Dienst/UI/1.0/Summarize/euclid.cmp/1103899181>), Erratum, , **46**, 206-206 (1976).
- [40] En termes d'ordre de grandeur, la température d'un trou noir en unités de Planck correspond à l'inverse de sa taille en unités de Planck. Pour un trou noir stellaire, sa taille se compte en kilomètres, soit 10 fois la longueur de Planck. Sa température est donc de l'ordre de 10 fois la température de Planck, qui vaut dans les . La température d'un trou noir stellaire est donc de l'ordre de .
- [41] Voir par exemple Azar Khalatbari, *Trous noirs primordiaux : Les poids plume disparus*, Ciel & Espace, juin 2002 Voir en ligne ([http://www.obs.ujf-grenoble.fr/osug/component?option=com\\_docman/task/doc\\_download/gid,29/](http://www.obs.ujf-grenoble.fr/osug/component?option=com_docman/task/doc_download/gid,29/)).
- [42] (<http://www.slac.stanford.edu/spires/find/hep/www?irn=6536760>) , Dublin, Irlande, 18-24 juillet 2004.
- [43] Voir l' article (<http://www.nature.com/news/2004/040712/full/040712-12.html>) (payant) du magazine anglais *Nature*, intitulé « » (« Hawking a changé d'avis sur les trous noirs »).
- [44] Voir aussi l' article ([http://www.space.com/news/hawking\\_bet\\_040716.html](http://www.space.com/news/hawking_bet_040716.html)) sur le site space.com (<http://www.space.com>).
- [45] (<http://math.ucr.edu/home/baez/week207.html>), entrée dans le blog de John Baez consacrée à la conférence GR17 de Dublin 2004.
- [46] S. Hawking, , , **72**, 084013 (2005) .
- [47] Article du blog de Lubos Motl consacré à la résolution d'Hawking du paradoxe de l'information pour les trous noirs (<http://motls.blogspot.com/2005/07/hawking-and-unity.html>).
- [48] Citations scientifiques de l'article de Hawking (<http://www.slac.stanford.edu/spires/find/hep?c=PHRVA,D72,084013>) d'après la base de données SPIRES.
- [49] Voir livre de Robert M. Wald dans la section bibliographie, .
- [50] <http://worldcat.org/issn/01534092&lang=fr>
- [51] [http://lpsc.in2p3.fr/ams/aurelien/aurelien/Barrau\\_trousnoirs\\_.pdf](http://lpsc.in2p3.fr/ams/aurelien/aurelien/Barrau_trousnoirs_.pdf)
- [52] <http://lpsc.in2p3.fr/ams/aurelien/>
- [53] [http://www.pourlascience.fr/ewb\\_pages/f/fiche-article-dossier-les-microtrous-noirs-primordiaux-18466.php](http://www.pourlascience.fr/ewb_pages/f/fiche-article-dossier-les-microtrous-noirs-primordiaux-18466.php)
- [54] [http://www.pourlascience.fr/ewb\\_pages/f/fiche-article-dossier-les-trous-noirs-de-masse-intermediaire-18467.php](http://www.pourlascience.fr/ewb_pages/f/fiche-article-dossier-les-trous-noirs-de-masse-intermediaire-18467.php)
- [55] [http://www.pourlascience.fr/ewb\\_pages/f/fiche-article-dossier-trous-noirs-et-trous-de-vers-18465.php](http://www.pourlascience.fr/ewb_pages/f/fiche-article-dossier-trous-noirs-et-trous-de-vers-18465.php)
- [56] <http://arxiv.org/abs/gr-qc/0604064>
- [57] [http://books.google.ca/books/about/Robert\\_Oppenheimer.html?id=QTAgAQAIAAJ](http://books.google.ca/books/about/Robert_Oppenheimer.html?id=QTAgAQAIAAJ)
- [58] <http://www.athenaweb.org/programs/video/high/Astronomie,%20Astrophysic,%20Astrophysique,%20Black%20Hole,%20Trou%20Noir-1001090.html>
- [59] [http://web.archive.org/web/\\*/http://www.athenaweb.org/programs/video/high/Astronomie,%20Astrophysic,%20Astrophysique,%20Black%20Hole,%20Trou%20Noir-1001090.html](http://web.archive.org/web/*/http://www.athenaweb.org/programs/video/high/Astronomie,%20Astrophysic,%20Astrophysique,%20Black%20Hole,%20Trou%20Noir-1001090.html)
- [60] <http://archive.wikiwix.com/cache/?url=http://www.athenaweb.org/programs/video/high/Astronomie,%20Astrophysic,%20Astrophysique,%20Black%20Hole,%20Trou%20Noir-1001090.html>
- [61] <http://archive.is/http://www.athenaweb.org/programs/video/high/Astronomie,%20Astrophysic,%20Astrophysique,%20Black%20Hole,%20Trou%20Noir-1001090.html>
- [62] <http://webcache.googleusercontent.com/search?q=cache:http://www.athenaweb.org/programs/video/high/Astronomie,%20Astrophysic,%20Astrophysique,%20Black%20Hole,%20Trou%20Noir-1001090.html>

## Références

## Annexes

### Articles connexes

- **Articles connexes**
    - Observation et détection des trous noirs
    - Entropie des trous noirs
    - Évolution des étoiles
    - Étoile à neutrons
    - Naine blanche
    - Singularité nue
    - Trou noir acoustique
    - Trou noir extrémal
    - Principe holographique
    - Correspondance AdS/CFT
    - Corde noire
    - Évaporation des trous noirs
    - Théorème de calvitie
    - Micro trou noir
  - **Sur les trous noirs astrophysiques**
    - Trou noir stellaire
    - Trou noir supermassif
    - Trou noir intermédiaire
    - Trou noir primordial
  - **Sur les quatre types de trous noirs théoriques**
    - Trou noir de Schwarzschild
    - Trou noir de Kerr
    - Trou noir de Reissner-Nordström
    - Trou noir de Kerr-Newman
  - **Objets théoriques**
    - Trou blanc
    - Trou de ver
  - **Physiciens impliqués dans l'étude des trous noirs**
    - Albert Einstein
    - Subrahmanyan Chandrasekhar
    - Robert Oppenheimer
    - Karl Schwarzschild
    - John Wheeler
    - Kip Thorne
    - Roger Penrose
    - Stephen Hawking
    - Brandon Carter
    - Jean-Pierre Luminet
  - **Référence en fiction**
-

- Le Trou noir

### Liens externes

- Recherche de nouvelle physique avec les micro trous noirs [PDF] (<http://lpsc.in2p3.fr/ams/aurelien/aurelien/cern.pdf>) A. Barrau & J. Grain, CERN.
- ([en](http://cosmology.berkeley.edu/Education/BHfaq.html)) Foire aux questions sur les trous noirs (<http://cosmology.berkeley.edu/Education/BHfaq.html>), par Ted Bunn astrophysicien à l'université de Californie à Berkeley
- ([en](http://www.hubblesite.org/go/blackholes)) Black Holes: Gravity's Relentless Pull (<http://www.hubblesite.org/go/blackholes>) Site web multi-média du Space Telescope Science Institute à propos de la physique des trous noirs.
- ([en](http://www.mpe.mpg.de/ir/GC/index.php)) Article sur les candidats trous noirs (<http://www.mpe.mpg.de/ir/GC/index.php>), avec un film de l'orbite des étoiles les plus proches du centre de notre Galaxie, de l'Institut Max Planck
- ([en](http://www.sciencedaily.com/news/space_time/black_holes/)) Actualités de la recherche sur les trous noirs ([http://www.sciencedaily.com/news/space\\_time/black\\_holes/](http://www.sciencedaily.com/news/space_time/black_holes/)) sur le site de ScienceDaily (<http://www.sciencedaily.com/>)
- ([en](http://www.sciam.com/article.cfm?chanID=sa006&articleID=0004567B-11FB-1EDD-8E1C809EC588EF21)) *Scientific American Magazine* (n<sup>o</sup> de juillet 2003) *The Galactic Odd Couple - giant black holes and stellar baby booms* (<http://www.sciam.com/article.cfm?chanID=sa006&articleID=0004567B-11FB-1EDD-8E1C809EC588EF21>)

### Audio et vidéo-conférences

- [vidéo] *Le destin de l'Univers : trous noirs et énergie sombre* ([http://www.canal-u.tv/video/cerimes/le\\_destin\\_de\\_l\\_univers\\_trous\\_noirs\\_et\\_energie\\_sombre.9318](http://www.canal-u.tv/video/cerimes/le_destin_de_l_univers_trous_noirs_et_energie_sombre.9318)), donnée à l'IAP le 5 juin 2007 par Jean-Pierre Luminet, astrophysicien à l'Observatoire de Paris-Meudon.
-  Portail de l'astronomie
-  Portail de la cosmologie

# Fond diffus cosmologique



Cet article ne cite pas suffisamment ses sources (mai 2010).

Si vous disposez d'ouvrages ou d'articles de référence ou si vous connaissez des sites web de qualité traitant du thème abordé ici, merci de compléter l'article en donnant les références utiles à sa vérifiabilité et en les liant à la section « Notes et références » (modifier l'article [1]).

Le **fond diffus cosmologique** est le nom donné au rayonnement électromagnétique issu, selon le modèle standard de la cosmologie, de l'époque dense et chaude qu'a connue l'Univers par le passé, le Big Bang. Bien qu'issu d'une époque très chaude, ce rayonnement a été dilué et refroidi par l'expansion de l'Univers et possède désormais une température très basse de 2,728 K (-270,424 °C). Le domaine de longueur d'onde dans lequel il se situe est celui des micro-ondes, entre l'infrarouge et les ondes radio. Plus précisément, les longueurs d'onde et fréquence typiques du rayonnement sont respectivement 1,06 mm et 100 GHz.

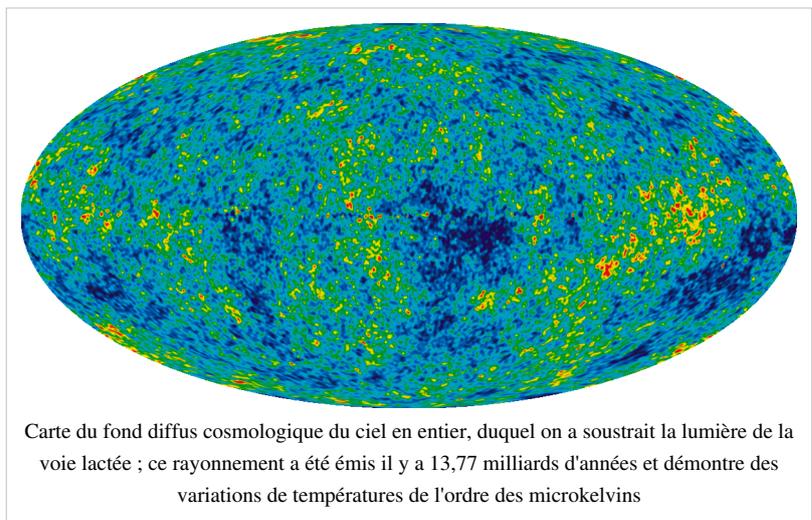
Le fond diffus cosmologique est une conséquence des scénarios des théories de Big Bang et son existence a été prédite dans ce cadre-là. Sa prédiction remonte à la fin des années 1940, par Ralph Alpher, Robert Herman et George Gamow. Sa découverte, quelque peu fortuite, a été l'œuvre de deux chercheurs des laboratoires de Bell, Arno Allan Penzias et Robert Woodrow Wilson, en 1964. Tous deux ont été récompensés du Prix Nobel de physique en 1978.

En 2010, le fond diffus cosmologique est un sujet de recherche extrêmement actif du fait qu'il donne un aperçu de l'Univers tel qu'il était très peu de temps après le Big Bang (environ 380 000 ans plus tard). En particulier, ce rayonnement présente d'infimes variations de température et d'intensité selon la direction, qui permettent d'obtenir quantité d'informations sur l'Univers jeune et sur son contenu actuel. Les premières fluctuations de température du fond diffus cosmologique ont été mises en évidence par le satellite artificiel *Cosmic Background Explorer* en 1992 et ont valu au responsable de l'instrument ayant permis cette découverte, George Fitzgerald Smoot le Prix Nobel de physique 2006, qu'il partagea avec le responsable d'un autre instrument du satellite, John C. Mather.

Ce faible rayonnement est aussi connu sous le nom de « rayonnement fossile » ou « rayonnement à 3 K » (en référence à sa température). Aucun de ces noms ne correspond exactement à sa traduction anglaise de *Cosmic Microwave Background Radiation* ou désormais *Cosmic Microwave Background* (littéralement « (rayonnement) micro-onde de fond cosmique »). En français, l'abréviation la plus couramment utilisée pour le nommer est CMB, issu de l'anglais. On trouve également les abréviations anglaise CMBR et française FDC (plus rarement).

## Découverte

En 1964, les radio-astronomes Penzias et Wilson, des laboratoires de la compagnie Bell Telephone, disposent d'une antenne qui servait initialement à la communication avec les satellites Echo puis Telstar 1. Ils souhaitaient transformer cette antenne en radio-télescope pour mesurer le rayonnement dans le domaine radio de la Voie lactée. Pour ce faire, ils avaient besoin d'étalonner correctement l'antenne, et en particulier de connaître



le bruit de fond généré par celle-ci ainsi que par l'atmosphère terrestre. Ils découvrent ainsi accidentellement un bruit supplémentaire d'origine inconnue au cours d'observations faites sur la longueur d'onde 7,35 cm. Ce bruit, converti en température d'antenne, correspondait à une température du ciel de 2,7 K, ne présentait pas de variations saisonnières, et ses éventuelles fluctuations en fonction de la direction ne dépassaient pas 10 %. Il ne pouvait donc s'agir du signal émis par la Voie lactée qu'ils cherchaient à découvrir.

Penzias et Wilson ne connaissaient pas les travaux des cosmologistes de leur époque, et c'est presque par hasard qu'ils les découvrent. Penzias mentionne fortuitement sa découverte au radio-astronome Bernie Burke, qui lui dit savoir de Ken Turner que James Peebles a prédit l'existence d'un rayonnement de quelques kelvins, et qu'une équipe composée de Dicke, Roll et Wilkinson de l'université de Princeton est en train de construire une antenne pour le détecter. Penzias prend alors contact avec Dicke pour lui faire part de ses résultats. Ils décident alors de publier conjointement deux articles, l'un signé de Penzias et Wilson décrivant la découverte du fond diffus cosmologique, l'autre signé par Peebles et l'équipe de Dicke en décrivant les conséquences cosmologiques. L'histoire raconte que lorsque Dicke apprit la découverte de Penzias, il dit à ses collaborateurs une phrase restée célèbre : *Well boys, we have been scooped* (litt. « Les gars, nous nous sommes faits devancer »). On ne sait pas bien si ces derniers auraient pu effectivement détecter ce rayonnement avec les moyens dont ils disposaient mais cela semble probable. Ils ont en tout cas détecté le fond diffus cosmologique à la longueur d'onde de 3 cm<sup>[2]</sup> dans le courant de l'année 1965.

Penzias et Wilson recevront chacun 1/4 du prix Nobel de physique 1978 pour leur découverte.

Il a parfois été dit que les publications conjointes de Penzias et Wilson et de l'équipe de Dicke résultaient d'une tentative de ces derniers d'acquiescer le bénéfice de la découverte et obtenir le Prix Nobel. Cela semble peu probable, Penzias et Wilson ayant déclaré par la suite qu'ils préféreraient publier leur mesure à part, au motif « que leur mesure était exacte, alors que l'interprétation de Peebles n'était qu'une interprétation qui pourrait se révéler fautive. » En fait, Wilson était même à l'époque partisan de la théorie de l'état stationnaire, il était donc, sans doute, réticent.

C'est à George Gamow que l'on attribue la prédiction du fond diffus cosmologique. Gamow a effectivement prédit l'existence d'un rayonnement issu du Big Bang, mais n'en avait pas prédit le spectre de corps noir. C'est A. G. Dorochkevitch et I. D. Novikov qui, en 1964, sont les premiers à prédire que le spectre du rayonnement doit être celui d'un corps noir et donc situé dans le domaine micro-onde. Ces auteurs vont même jusqu'à citer l'antenne des laboratoires Bell comme le meilleur outil pour détecter ce rayonnement. En 1961, E. A. Ohm avait rédigé un rapport interne décrivant les performances de cette antenne. Mais, se basant sur ce rapport, Dorochkevitch et Novikov concluront que ce rayonnement n'a pas été observé. Il s'agissait cependant d'une erreur d'interprétation de leur part : le rapport de Ohm mentionnait une quantité  $T_{sky}$ , mesurée à 2,3 K, représentant la contribution de l'atmosphère terrestre. Dorochkevitch et Novikov semblent avoir interprété cette quantité comme la somme de la contribution atmosphérique et du fond du ciel. La température de 2,3 K correspondant à la contribution atmosphérique telle qu'elle était estimée à l'époque, ils ont alors conclu que la contribution du fond ciel devait être limitée à une fraction de 2,3 K, en désaccord avec les prédictions de Gamow.

## Sources (en anglais) de cette partie

- Site Nobel : Discours de Arno A. Penzias, *The origin of elements*, 1978 <sup>[3]</sup>
- Société brésilienne de physique, *History of 2.7 [[kelvin|K] <sup>[4]</sup> Temperature Prior to Penzias and Wilson, 1995]*
- Université de Cincinnati, Cours d'astrophysique, Ch. 23 - Cosmology Part 2 <sup>[5]</sup>
- Cambridge University Press, Cambridge University Press, *The Cosmological Background Radiation*, Marc Lachièze-Rey et Edgard Gunzid <sup>[6]</sup>
- Astrophysics and Cosmology, *Cosmic Microwave Background Timeline* <sup>[7]</sup>
- Michigan State University, Cours *Radiation from the Big Bang* <sup>[8]</sup>
- American Scientific Affiliation, *Arno A. Penzias: Astrophysicist, Nobel Laureate*, Jerry Bergman <sup>[9]</sup>
- Site non-officiel Stephen Jay Gould, Citations diverses sur le Big Bang <sup>[10]</sup>

## Caractéristiques

### Spectre

Le fond diffus cosmologique apparaît comme un corps noir parfait dans la limite de la précision des instruments de mesure. Sa température a été mesurée à la fin de 1989 par le satellite COBE à  $2,728 \pm 0,002$  K, l'incertitude venant de la difficulté de calibrer précisément un corps noir de référence embarqué sur le satellite. Le maximum d'énergie est rayonné à une fréquence proche de 160 GHz (longueur d'onde de 1,06 mm, domaine des micro-ondes et à la limite avec le domaine des infra-rouges).

Si la température absolue n'est déterminée qu'avec une précision de 0,1 %, la forme du fond, et sa concordance avec celui d'un corps noir, est déterminée avec une précision bien plus grande. C'est l'instrument FIRAS (acronyme anglais de *Far InfraRed Absolute Spectrophotometer*), monté à bord du satellite COBE qui a déterminé le plus précisément cette température et quantifié l'absence d'écart entre le spectre observé et celui d'un corps noir<sup>[11]</sup>.

### Dipôle

Du fait du déplacement de la Terre dans le Système solaire, et plus généralement du déplacement de ce dernier par rapport à la surface d'émission du fond diffus cosmologique, la température du fond diffus cosmologique présente une variation en fonction de la direction, conséquence d'un simple effet Doppler. Si l'on enlève la contribution due au mouvement de la Terre autour du Soleil, alors l'amplitude du dipôle observé est de  $3,358 \pm 0,001$  mK, correspondant à une vitesse du Soleil de 369 km/s de celui-ci par rapport à la zone d'émission du rayonnement. La direction de ce dipôle est, en coordonnées galactiques,  $l=264,31^\circ \pm 0,20^\circ$ ,  $b=48,05^\circ \pm 0,11^\circ$ , soit 11h 11min 57s  $\pm$  23s et  $-7,22^\circ \pm 0,08^\circ$  en termes d'ascension droite et de déclinaison. Cette direction est quasiment opposée à celle de l'apex solaire, c'est-à-dire à l'opposé de la direction vers laquelle se déplace le Soleil au sein de la Voie lactée. En tenant compte du déplacement du Soleil au sein de la Voie lactée, on calcule le dipôle du fond diffus cosmologique par rapport à la Voie Lactée. Sa direction est peu modifiée,  $l=276^\circ \pm 3^\circ$ ,  $b=30^\circ \pm 2^\circ$  mais son amplitude augmente significativement du fait de la vitesse du Soleil par rapport au centre galactique, pour atteindre 5,70 mK, correspondant à une vitesse de 627 km/s.

Cet ordre de grandeur de vitesse est typique de la dispersion de vitesse que l'on observe dans les amas de galaxies, ce qui renforce l'interprétation du dipôle comme étant dû à un effet cinématique local. Il reste cependant difficile d'en être certain car la zone du dipôle est très proche du plan galactique et, de ce fait, il est difficile d'y cartographier toutes les concentrations de masses qui expliqueraient pourquoi la Voie Lactée se dirige dans cette direction. Cette direction reste relativement proche ( $45^\circ$ ) du Grand Attracteur et également proche de plusieurs autres concentrations de matière proche du Groupe local (moins de 30 Mpc), en particulier les amas de l'Hydre et de la Machine Pneumatique.

### Écart au corps noir

Une question cruciale est de savoir (voir ci-dessous) si ce rayonnement est un rayonnement de corps noir ou pas. Dans l'univers primordial, les interactions entre matière baryonique et photons ont permis à ces derniers d'être thermalisés, c'est-à-dire à acquérir un spectre de corps noir. Cependant, à mesure que l'univers se dilate et se refroidit, les interactions entre matière et photons diminuent et l'équilibre thermique n'est plus assuré. Les photons peuvent donc conserver un spectre de corps noir, mais celui-ci peut être détruit en cas de phénomène qui produirait de l'énergie sous forme de rayonnement électromagnétique (du fait de la désintégration de particules instables, par exemple). La présence ou non de distorsions au corps noir dans le fond diffus cosmologique permet donc de contraindre tous les phénomènes injectant de l'énergie sous forme de rayonnement.

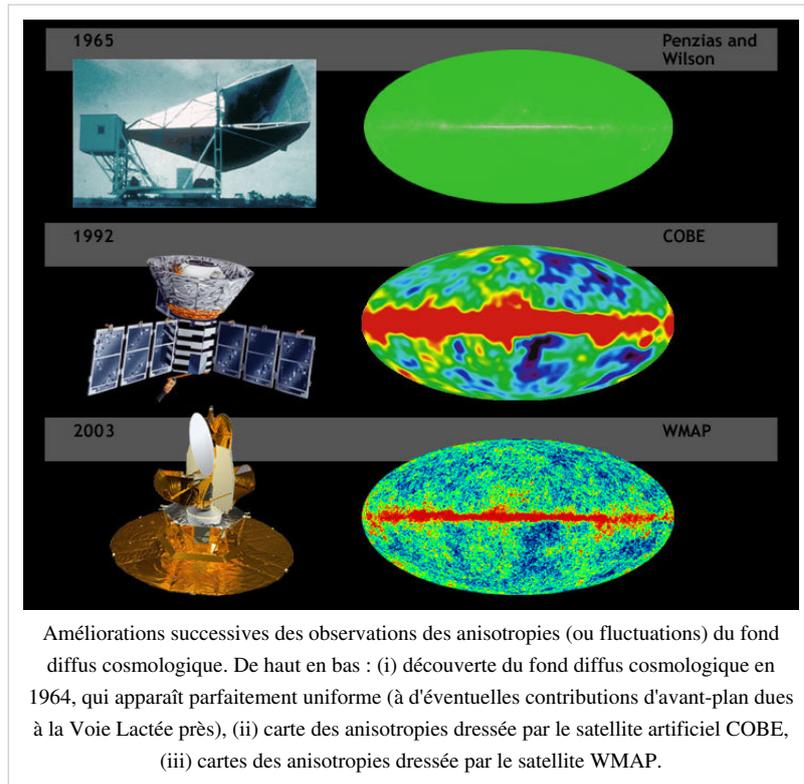
- Une injection d'énergie à une époque tardive ( $z \leq 10^5$ ) se traduit par un dépeuplement des basses fréquences au profit des hautes fréquences (effet Compton y).

- Une injection d'énergie à des époques plus anciennes ( $10^5 \leq z \leq 10^7$ ) se traduit par une transformation d'un spectre de corps noir en spectre de Bose-Einstein, c'est-à-dire un potentiel chimique non nul pour les photons.
- Des interactions entre le rayonnement et la matière chaude intergalactique à des époques beaucoup plus récentes ( $z \leq 10^3$ ) peuvent également déformer le spectre (distorsion free-free).

Aucune de ces distorsions n'a, pour l'heure, été détectée avec des limites supérieures très contraignantes sur la plupart d'entre elles.

### Autres anisotropies

Les modèles cosmologiques sont basés sur l'idée que l'Univers était par le passé extrêmement homogène et que les structures que l'on observe (galaxies, amas, superamas) se sont peu à peu formées par le mécanisme d'instabilité gravitationnelle (ou instabilité de Jeans). Pour que ce mécanisme opère, il faut cependant qu'il y ait de petites fluctuations de densité dans l'univers primordial. On prédit donc que ces fluctuations de densité se retrouvent sous la forme de fluctuation de température dans le fond diffus cosmologique. Inversement, la détection et la compréhension fine de ces fluctuations nous renseignent sur l'état de l'Univers au moment où il a émis ce rayonnement, ainsi que sur divers processus s'étant déroulés avant et après cette époque. L'étude de ces fluctuations représente à l'heure actuelle (2006) le principal outil pour la cosmologie.



Les fluctuations du fond diffus cosmologique ont été détectées pour la première fois par le satellite de la NASA COBE en 1992. Un grand nombre d'expériences au sol, dans des ballons stratosphériques, ont été effectuées depuis dans le but d'améliorer la qualité des observations. Les expériences les plus marquantes ont été BOOMERanG et Archeops. En 2001, la NASA a lancé un second satellite, WMAP qui a considérablement amélioré la qualité des observations, et distingué un point froid. Le 14 mai 2009, l'Agence spatiale européenne a lancé le satellite Planck de Kourou par une Ariane 5 ECA, en vue d'améliorer encore les données grâce à ses instruments HFI (*High Frequency Instrument*) et LFI (*Low Frequency Instrument*).

## Fond diffus cosmologique et Big Bang

Article détaillé : Big Bang.

Le Big Bang fournit une explication à l'origine des photons du FDC, ainsi qu'aux observations actuelles.

### Origine

L'univers primordial, extrêmement dense et chaud était en état d'équilibre thermique, où l'énergie moyenne des particules de matière, quelle que soit leur nature, et celle du rayonnement est comparable. Les lois de la physique sont en mesure de déterminer la distribution en énergie des particules composant la lumière, les photons. Leur distribution suit une loi qui fut pour la première fois énoncée par le physicien allemand Max Planck en 1900 et porte le nom de corps noir.

Tant que la température de l'univers était plus élevée que la température d'ionisation de l'hydrogène (soit de l'ordre de la dizaine d'électron-volts), les photons étaient continuellement en interaction avec la matière qui absorbait ou émettait de la lumière, ou la diffusait comme dans un brouillard : l'univers se comportait comme un plasma. Le libre parcours moyen des photons était alors très court et ces photons n'ont pas pu nous parvenir directement.

L'expansion de l'Univers a ensuite considérablement abaissé cette température, si bien que ces réactions sont devenues de plus en plus rares, au point que les photons n'interagissent plus avec les autres particules : c'est le découplage du rayonnement. Les photons ont alors été figés à la température de l'univers à cette époque, en suivant une distribution de corps noir. L'univers étant toujours en expansion, cette température a continué à diminuer du fait de l'allongement de la longueur d'onde de ces photons provoqué par la dilatation de l'univers, tout en conservant une distribution de corps noir. Les photons sont ainsi passés du domaine des rayons gammas hautement énergétiques vers le domaine des micro-ondes dans lequel ils sont observés aujourd'hui.

Le fond observé aujourd'hui, correspond donc à ce qui est appelé surface de dernière diffusion, au moment où l'Univers s'est suffisamment refroidi pour que la matière sorte de l'état de plasma et que le libre parcours moyen des photons devienne suffisamment grand (ce qui revient à dire que l'Univers devienne transparent), pour qu'ils puissent traverser les distances considérables nécessaires pour être observés de nos jours.

### Observation

Le scénario du Big Bang explique pourquoi nous pouvons observer le FDC aujourd'hui, alors que le passage de l'univers à la transparence est un événement temporellement ponctuel. Comment se fait-il que les photons du FDC atteignent la Terre précisément aujourd'hui afin que nous puissions les observer ?

L'explication est que les photons du FDC sont présents *en tout point* de l'Univers primordial et que celui-ci, bien que plus dense que l'Univers actuel, *était également très étendu* spatialement (la question de savoir si l'univers est ou n'est pas spatialement infini n'est pas encore résolue à l'heure actuelle). Dans ces conditions, il existe toujours, centrée autour de notre planète, une sphère où des photons FDC ont été diffusés à l'époque de la transparence. C'est pourquoi le rayonnement FDC a toujours été, et sera toujours, observable.

Une image peut être utile pour comprendre cela. Imaginons-nous au centre d'une foule immense; et que cette foule entière pousse un grand cri, en même temps à un instant donné. Il sera alors toujours possible d'entendre ce cri : à chaque instant nous entendrions le son provenant d'un cercle de personnes, de plus en plus éloignées.

## Fluctuations

La température du fond diffus cosmologique est très uniforme : elle est la même dans toutes les directions à une précision de 0,001 degré près. Cependant, si l'on observe le fond diffus cosmologique avec une très grande précision, d'infimes écarts de température apparaissent, dont l'amplitude est de l'ordre du cent-millième de degré (0,00001 degré). Ces différences de température en fonction de la direction d'observation sont appelées **fluctuations**, ou **anisotropies** du fond diffus cosmologique. L'étude de ces anisotropies est un des sujets d'étude les plus actifs de toute la cosmologie car elle révèle divers aspects de la physique à l'œuvre dans l'univers primordial. En effet, ces variations spatiales de température sont liées à des variations dans la densité de la distribution de matière. En elle-même, l'existence de telles fluctuations de densité n'est pas surprenante : la répartition de la matière dans l'univers n'est aujourd'hui pas du tout uniforme, la structure à grande échelle de l'univers révélant des zones quasiment vides de matière et d'autres, principalement en forme de filaments où se concentrent les galaxies. Or cette différenciation de la répartition de matière résulte de l'action de la gravité, qui a tendance à accentuer l'hétérogénéité de la distribution de matière via un mécanisme appelé instabilité de Jeans. Ainsi, il est normal que dès les premières centaines de milliers d'années après le Big Bang, des fluctuations de densité aient été présentes dans l'univers : sans celles-ci, l'univers n'aurait pu évoluer jusqu'à former aujourd'hui les galaxies avec leur répartition spatiale.

## Observation amatrice

En l'absence d'un canal hertzien, les téléviseurs analogiques affichent un écran blanc ponctué erratiquement de points noirs, la *neige*. Cette neige est composée dans un faible pourcentage<sup>[12]</sup> de signaux issus du fond diffus. L'appareil capte des photons de la surface de dernière diffusion et en établit une représentation visuelle<sup>[13]</sup>.

## Notes et références

- [1] [http://fr.wikipedia.org/w/index.php?title=Fond\\_diffus\\_cosmologique&action=edit](http://fr.wikipedia.org/w/index.php?title=Fond_diffus_cosmologique&action=edit)
- [2] Le fond diffus émet en spectre dont le pic est pour une longueur d'onde de 1mm environ, mais émet à une moindre puissance dans d'autres longueurs d'ondes.
- [3] <http://nobelprize.org/physics/laureates/1978/penzias-lecture.pdf>
- [4] [http://www.dfi.uem.br/~macedane/history\\_of\\_2.7k.html](http://www.dfi.uem.br/~macedane/history_of_2.7k.html)
- [5] <http://www.physics.uc.edu/~sitko/Astrophysics-I/23-Cosmology-II/23-Cosmology-II.ppt>
- [6] <http://assets.cambridge.org/052157/398X/sample/052157398Xwsc00.pdf>
- [7] <http://aether.lbl.gov/www/science/CMBTimeLine.html>
- [8] <http://www.pa.msu.edu/courses/2005fall/AST207/10-24.pdf>
- [9] <http://www.asa3.org/ASA/PSCF/1994/PSCF9-94Bergman.html>
- [10] [http://www.stephenjaygould.org/ctrl/quotes\\_bigbang.html](http://www.stephenjaygould.org/ctrl/quotes_bigbang.html)
- [11] D. J. Fixsen *et al.*, *The Cosmic Microwave Background Spectrum from the Full COBE/FIRAS Data Set*, *Astrophysical Journal*, **473**, 576-587 (1996), astro-ph/9605054 Voir en ligne ([http://adsabs.harvard.edu/cgi-bin/bib\\_query?arXiv:astro-ph/9605054](http://adsabs.harvard.edu/cgi-bin/bib_query?arXiv:astro-ph/9605054)).
- [12] Frequently Asked Questions about Cosmic Microwave Background ([http://www.astro.ubc.ca/people/scott/faq\\_basic.html](http://www.astro.ubc.ca/people/scott/faq_basic.html)) sur le site de l'Université de la Colombie-Britannique
- [13] Ep. 5: The Big Bang and Cosmic Microwave Background (<http://www.astronomycast.com/astronomy/the-big-bang-and-cosmic-microwave-background/>) entretien avec sur le site astronomycast.com

# Astrophysique

L'**astrophysique** (du grec astêr = étoile, astre et physis = science de la nature, physique) est une branche interdisciplinaire de l'astronomie qui concerne principalement la physique et l'étude des propriétés des objets de l'univers (étoiles, planètes, galaxies, milieu interstellaire par exemple), comme leur luminosité, leur densité, leur température et leur composition chimique.

Actuellement, les astronomes ont une formation en astrophysique et leurs observations sont généralement étudiées dans un contexte astrophysique, de sorte qu'il y ait moins de distinction entre ces deux disciplines qu'auparavant.



Les Pléiades sont un amas ouvert d'étoiles jeunes situées dans la constellation du Taureau.

## Disciplines de l'astrophysique

Il existe différentes disciplines en astrophysique :

- Cosmologie
- Planétologie
- Exobiologie
- Instrumentation
- Physique stellaire
- Héliosismologie et astérosismologie
- Physique du milieu interstellaire
- Plasmas astrophysiques
- Physique galactique

(Pour la hiérarchie des disciplines scientifiques voir en français la Liste des disciplines scientifiques.)

L'astrophysique étant un sujet très vaste, les astrophysiciens utilisent généralement plusieurs disciplines de la physique, dont la mécanique, l'électromagnétisme, la mécanique statistique, la thermodynamique, la mécanique quantique, la relativité, la physique nucléaire, la physique des particules, la physique atomique et moléculaire.

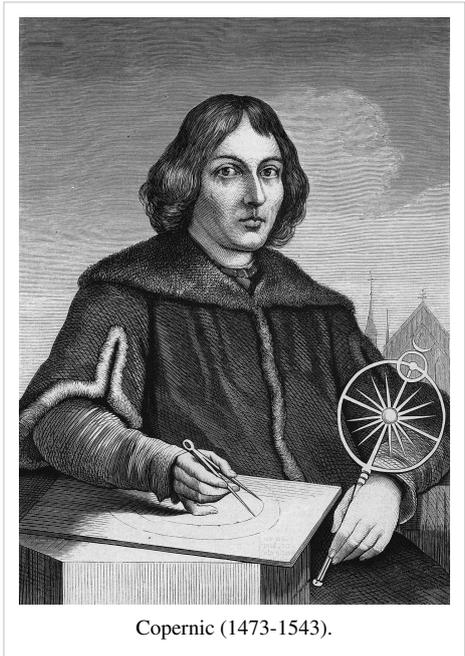
## Historique

Article détaillé : Cosmologiste.

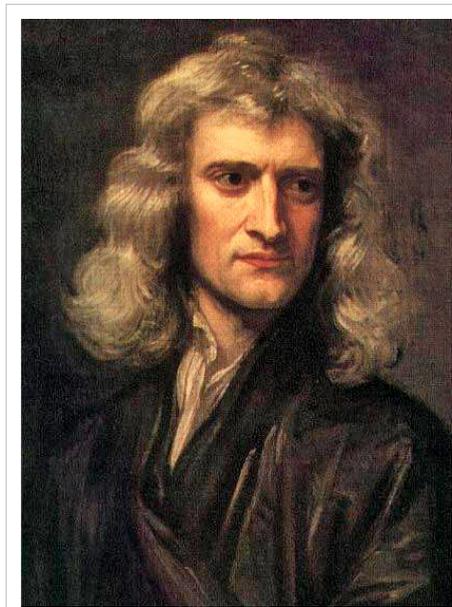
Aussi loin que remontent les données historiques, on trouve des preuves de l'existence de l'astronomie. Pendant longtemps, l'astronomie était une discipline bien distincte de la physique. Dans la pensée aristotélicienne, le monde céleste tendait à la perfection, avec les corps célestes qui semblaient être des sphères parfaites circulant sur des orbites parfaitement circulaires, alors que le monde terrestre semble condamné à l'imperfection. Ces deux mondes ne pouvaient donc pas être liés.

Aristarque de Samos (310 av. J.-C. - 250 av. J.-C.) fut le premier à mettre en avant l'idée selon laquelle le mouvement des corps célestes pouvait s'expliquer par la rotation des planètes du système solaire (dont la Terre) autour du Soleil. Malheureusement, à l'époque, la vision géocentrique de l'univers prévalait et la théorie héliocentrique d'Aristarque fut déclarée farfelue et hérétique. Cette vision resta en place jusqu'à ce qu'un astronome nommé Nicolas Copernic ressuscita le modèle héliocentrique au XVI<sup>e</sup> siècle. En 1609, grâce à la lunette astronomique qu'il avait inventé, Galilée découvrit les quatre lunes les plus brillantes de Jupiter, et démontra qu'elles tournaient toutes autour de cette planète. Cette découverte était en

complète contradiction avec le dogme de l'Église catholique de l'époque. Il n'échappa à une peine sévère qu'en prétendant que son œuvre n'était que pur travail mathématique et donc purement abstrait, contrairement à la philosophie naturelle (la physique).



Copernic (1473-1543).



Newton (1642-1727).

À partir des données précises d'observations (principalement en provenance de l'observatoire de Tycho Brahe), des recherches ont été menées pour trouver une explication théorique au comportement observé. Dans un premier temps, seules des lois empiriques ont été formulées, telles que les lois de Kepler sur le mouvement planétaire au début du XVII<sup>e</sup> siècle. Quelques années plus tard, Isaac Newton réussit à faire le lien entre les lois de Kepler et la dynamique de Galilée. Il découvrit en effet que les mêmes lois régissaient la dynamique des objets sur Terre et le mouvement des astres dans le système solaire. La mécanique céleste, application de la gravité newtonienne et des lois de Newton pour expliquer les lois de Kepler sur les mouvements des planètes, fut la première unification de l'astronomie et de la physique.

Après qu'Isaac Newton eut publié son livre, *Philosophiae Naturalis Principia Mathematica*, la navigation maritime changea radicalement. À partir de 1670, le monde entier était mesuré à partir d'instruments modernes donnant la latitude et d'horloges. Les besoins de la Marine poussaient à l'amélioration progressive des instruments et des

observations astronomiques, donnant ainsi davantage de données aux scientifiques.

À la fin du XIX<sup>e</sup> siècle, on découvrit que la lumière du Soleil pouvait se décomposer en un spectre de lignes colorées. Des expériences avec des gaz chauffés montrèrent par la suite que les mêmes lignes étaient présentes dans leur spectre. Ces lignes spécifiques correspondaient à un élément chimique unique. Ceci fut la preuve que les éléments chimiques présents dans le Soleil pouvaient être trouvés sur Terre. En effet, l'hélium fut d'abord découvert

dans le spectre du Soleil, d'où son nom, et seulement ensuite sur la Terre. Au XX<sup>e</sup> siècle, la spectroscopie (l'étude de ces lignes spectrales) se développa, notamment grâce aux avancées de la physique quantique qui pouvait expliquer les observations expérimentales et astronomiques<sup>[1]</sup>.

## Astronomie observationnelle

La majorité des observations en astrophysique sont effectuées en utilisant le spectre électromagnétique.

- La radioastronomie étudie les radiations cosmiques qui ont une longueur d'onde supérieure à quelques millimètres. Les ondes radios sont généralement émises par les objets froids, comme les gaz interstellaires ou les nuages de poussière. La radiation micro-onde du fond diffus cosmologique provient de la lumière du Big Bang qui subit un décalage vers le rouge. Les pulsars ont été détectés en premier par les fréquences micro-ondes. L'étude de ces fréquences nécessite de très gros radiotélescopes.
- L'astronomie infrarouge étudie les radiations dont la longueur d'onde est trop grande pour être visible et plus petite que les ondes radio. Les observations en infrarouge sont généralement faites avec des télescopes similaires aux télescopes optiques. Les objets astrophysiques qui émettent principalement dans l'infrarouge sont, essentiellement, plus froids que des étoiles, comme les planètes ou bien les galaxies infrarouges par exemple.
- L'astronomie optique est la forme la plus ancienne d'astronomie. Les instruments les plus courants sont les télescopes associés à un capteur à charge couplée ou des spectroscopes. Comme l'atmosphère terrestre interfère quelque peu avec les observations faites, l'optique adaptative et les télescopes spatiaux ont fait leur apparition afin d'obtenir la meilleure qualité d'image possible. À cette échelle, les étoiles sont très visibles, et beaucoup de spectres chimiques peuvent être observés dans la composition chimique d'étoiles, de galaxies ou de nébuleuses.
- L'astronomie dans l'ultraviolet, les rayons X ou les rayons gamma étudie les phénomènes très énergétiques tels que les pulsars binaires, les trous noirs ou les magnétars. Ces radiations pénètrent difficilement l'atmosphère de la Terre, il n'y a donc que deux possibilités pour les exploiter, les télescopes spatiaux et les télescopes Cherenkov atmosphériques. Le RXTE, le télescope à rayons X Chandra et l'observatoire à rayons gamma Compton sont des observatoires du premier type. Le système stéréoscopique de haute énergie (HESS) et le télescope MAGIC font partie de la deuxième catégorie.



NGC 4414, une galaxie spirale de la constellation Coma Berenices, de 56 000 années-lumière de diamètre et située à 60 millions d'années-lumière.

Mis à part les radiations électromagnétiques, seulement très peu de choses situées à grande distance peuvent être observées depuis la Terre. Quelques observatoires d'ondes gravitationnelles ont été construits mais ces ondes sont très difficiles à détecter. On trouve également quelques observatoires de neutrinos pour l'étude du Soleil (astronomie neutrino), principalement. Les rayons cosmiques sont des particules de haute énergie qui sont observées lorsqu'elles heurtent l'atmosphère terrestre.

Les observations diffèrent également sur l'échelle de temps qu'elles considèrent. La plupart des observations optiques s'étalent sur plusieurs minutes, voire sur plusieurs heures, de sorte que les phénomènes qui évoluent plus rapidement que cet intervalle de temps ne sont pas visibles. Cependant, les données historiques de quelques objets s'étendent sur

des siècles ou des millénaires. D'autre part, les observations radio se focalisent sur des événements à l'échelle de la milliseconde (pulsar milliseconde) ou combine les données de plusieurs années (études de la décélération des pulsars). Les informations obtenues à ces différentes échelles permettent d'accéder à des résultats différents.

L'étude de notre propre Soleil tient une place particulière dans l'astrophysique observationnelle. Du fait de l'énorme distance à laquelle se trouvent les autres étoiles, les détails que l'on peut acquérir sur le Soleil sont sans commune mesure avec ce que l'on pourrait observer sur les autres étoiles. La compréhension du Soleil sert ainsi de guide à notre connaissance des autres étoiles.

L'évolution stellaire, le sujet qui étudie comment changent les étoiles, est souvent modélisée en plaçant les différents types d'étoiles à leur position sur le diagramme de Hertzsprung-Russell. Ce diagramme représente l'état d'un objet stellaire, de sa naissance à sa disparition. La composition matérielle des objets astronomiques peut souvent être étudiée en utilisant :

- la spectroscopie
- la radioastronomie
- l'astronomie neutrino

## Astrophysique théorique

Les astrophysiciens utilisent une grande variété d'outils comme les modèles analytiques (tels que les polytropes pour obtenir le comportement approximatif d'une étoile) ou la simulation numérique sur ordinateur. Chaque outil a ses avantages. Les modèles analytiques d'un processus sont généralement meilleurs pour obtenir le fonctionnement interne. Les modèles numériques, eux, peuvent révéler l'existence de phénomènes et d'effets qui ne pourraient être vus autrement<sup>[2],[3]</sup>.

Les théoriciens en astrophysique essayent de créer des modèles théoriques et de comprendre les conséquences observables de ces modèles. Ceci aide les observateurs à rechercher les données qui peuvent réfuter un modèle ou aider dans le choix entre plusieurs alternatives ou modèles contradictoires.

Les théoriciens essayent également de produire ou modifier des modèles pour tenir compte de nouvelles données. En cas de contradiction, la tendance générale est d'essayer de faire des modifications minimales du modèle pour l'adapter aux données. Dans certains cas, une grande quantité de données incohérentes à répétition peut mener à l'abandon total d'un modèle.

Les sujets étudiés par les théoriciens en astrophysique incluent l'évolution et la dynamique stellaire, la formation des galaxies, les structures matérielles à grande échelle de l'Univers, l'origine des rayons cosmiques, la relativité générale et la cosmologie physique, avec l'aide de la théorie des cordes et la physique des particules. L'astrophysique relativiste sert d'outil pour évaluer les propriétés des structures à grande échelle. Pour ces structures, la gravitation joue un rôle important dans les phénomènes physiques étudiés et sert de base pour la physique des trous noirs et l'étude des ondes gravitationnelles.

Parmi les théories étudiées et les modèles reconnus en astrophysique, on peut trouver le modèle lambda-CDM qui inclut le Big Bang, l'inflation cosmique, la matière noire et les théories fondamentales de la physique.

Quelques exemples de processus :



Radiotélescope d'Effelsberg, en Allemagne.

Processus Physique	Outil Expérimental	Modèle Théorique	Explique / Prédit
Gravitation	Radiotélescopes	Effet Nordtvedt	Émergence d'un système planétaire
Fusion nucléaire	Spectroscopie	Évolution des étoiles	Comment brillent les étoiles et comment se forment les métaux
Big Bang	Télescope spatial Hubble, COBE	Expansion de l'Univers	Âge de l'Univers
Fluctuations quantiques		Inflation cosmique	Problème de planéité
Effondrement gravitationnel	Astronomie des rayons X	Relativité générale	Trous noirs au centre de la galaxie d'Andromède
Cycle carbone-azote-oxygène des étoiles			

L'énergie sombre et la matière noire sont actuellement les principaux sujets de recherche en astrophysique, étant donnée que leur découverte et la controverse sur leur existence est issue de l'étude des galaxies.

## Notes et références

- [1] Frontiers of Astrophysics : Workshop Summary (<http://www.arxiv.org/abs/astro-ph/9711066>), H. Falcke, P. L. Biermann
- [2] H. Roth, *A Slowly Contracting or Expanding Fluid Sphere and its Stability*, *Phys. Rev.* (39, p:525–529, 1932)
- [3] A.S. Eddington, *Internal Constitution of the Stars*

- (en) Cet article est partiellement ou en totalité issu de l’article de Wikipédia en anglais intitulé « Astrophysics » (<http://en.wikipedia.org/wiki/Astrophysics?oldid=118089455>) » ( voir la liste des auteurs (<http://en.wikipedia.org/wiki/Astrophysics?action=history>))

# Univers

Pour les articles homonymes, voir Univers (homonymie).

L'**Univers** est l'ensemble de tout ce qui existe, régi par un certain nombre de lois.

La cosmologie cherche à appréhender l'Univers d'un point de vue scientifique, comme l'ensemble de la matière distribuée dans le temps et dans l'espace. Pour sa part, la cosmogonie vise à établir une théorie de la création de l'Univers sur des bases philosophiques ou religieuses. La différence entre ces deux définitions n'empêche pas nombre de physiciens d'avoir une conception finaliste de l'univers : voir à ce sujet le Principe anthropique.

Selon le modèle standard, on ne connaît au plus que 5 % de la matière de l'Univers ; le reste se composerait de 25 % de matière noire et de 70 % d'énergie noire. Selon le modèle alternatif avec antimatière soutenu notamment par Gabriel Chardin et Stephen Hawking, la quantité de matière présente dans l'Univers est quinze fois plus abondante que dans le modèle conventionnel<sup>[1]</sup>.



Gravure sur bois dite « de Flammarrion », auteur inconnu, gravure sur bois, Paris 1888.  
Colorisation : Heikenwaelder Hugo, Wien 1998.

## Découverte dans l'Histoire

Articles détaillés : Monde (univers) et Révolution copernicienne.

Les sciences grecques tentèrent de comprendre le monde et de l'expliquer :

- les philosophes Parménide, Platon, et Aristote avaient intégré l'idée d'une Terre sphérique, mais ils la voyaient au centre de l'Univers physique, alors que l'école de Milet se représentait la Terre plate ;
- Ératosthène tenta de réaliser des calculs précis, notamment la mesure de la circonférence d'un méridien terrestre ;
- Aristarque de Samos est le premier à envisager un modèle de système planétaire héliocentrique. Cette découverte ne fut alors pas suivie<sup>[2]</sup>, pour des raisons philosophiques surtout parce qu'une telle cosmologie est en désaccord avec la conception géocentrique du monde qui était retenue par de grands philosophes comme Parménide, Platon, et Aristote. Il calcule aussi la distance Terre-Lune pour laquelle il trouve une valeur discutée, mais qui se situe en tout état de cause dans un ordre de grandeur acceptable<sup>[3]</sup>, ainsi qu'une distance Terre-Soleil<sup>[4]</sup> ;
- Hipparque poursuit ce travail : il recalcule, selon des méthodes nouvelles, la distance Terre-Soleil ainsi que la distance Terre-Lune (pour laquelle il retient la valeur de 67 1/3 rayons terrestres, contre 60,2 en réalité<sup>[5]</sup>), recense 1 500 étoiles<sup>[réf. nécessaire]</sup>, retrouve approximativement la période de précession des équinoxes, qui était déjà connue des Babyloniens.<sup>[réf. nécessaire]</sup>
- Ptolémée poursuit le travail d'Hipparque. Son *Almageste* sera la référence astronomique essentielle pendant treize siècles.

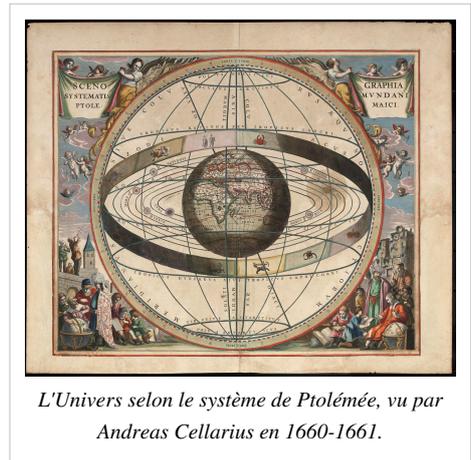
Ces connaissances du monde grec perdureront et influenceront les sciences arabes après l'effondrement de l'Empire romain d'Occident. Elles resteront présentes en Orient (particulièrement, avec des hauts et des bas, à Byzance<sup>[6]</sup>), même si Cosmas d'Alexandrie tente, sans succès, de restaurer le modèle d'un monde plat.

La Renaissance porte à son apogée cette représentation du monde, grâce aux explorations et aux grandes découvertes qui eurent lieu du XIII<sup>e</sup> au XVI<sup>e</sup> siècles, à partir de systèmes géographiques et cosmologiques très élaborés (projection de Mercator).

La révolution copernicienne bouleverse cette cosmologie en trois étapes :

1. Copernic redécouvre l'héliocentrisme. Toutefois, cette redécouverte n'est que partiellement révolutionnaire : en effet, Copernic reste attaché aux sphères transparentes du modèle d'Aristote (pourtant délaissé par Ptolémée) censées soutenir les planètes et leur imprimer leur mouvement ; il présente son système comme un simple artifice destiné à simplifier les calculs.
2. Le dominicain Giordano Bruno défend la réalité du modèle héliocentrique et l'étend à toutes les étoiles, ouvrant la dimension de l'Univers physique à l'infini. Il sera brûlé au bûcher en tant qu'hérétique non pour des raisons scientifiques, mais religieuses.
3. Kepler, Galilée et Newton posent les bases fondamentales de la mécanique à partir du mouvement des planètes, grâce à leurs études respectivement du mouvement elliptique des planètes autour du Soleil, l'affinement des observations astronomiques avec la définition du mouvement uniformément accéléré, et la formalisation mathématique de la force de gravité. *L'Univers*, toutefois, reste confiné dans le système solaire.

Des modèles physiques tels que la sphère armillaire ou l'astrolabe ont été élaborés. Ils permettent d'enseigner et de calculer la position des astres dans le ciel visible. Aujourd'hui encore, la carte du ciel mobile aide les astronomes amateurs à se repérer dans le ciel, c'est une ré-incarnation de l'astrolabe.



*L'Univers selon le système de Ptolémée, vu par Andreas Cellarius en 1660-1661.*

## Naissance

### Expansion, âge et Big Bang

Articles détaillés : Frise chronologique du Big Bang, Expansion de l'Univers et Big Bang.

Les observations du décalage vers le rouge des rayonnements électromagnétiques en provenance d'autres galaxies suggèrent que celles-ci s'éloignent de notre galaxie, à une vitesse radiale d'éloignement proportionnelle à ce décalage (effet Doppler).

En étudiant les galaxies proches, Edwin Hubble s'est aperçu que la vitesse d'éloignement d'une galaxie était proportionnelle à sa distance par rapport à l'observateur (loi de Hubble) ; une telle loi est explicable par un Univers visible en expansion.

Bien que la constante de Hubble ait été révisée par le passé dans d'importantes proportions (dans un rapport de 10 à 1), la loi de Hubble a été extrapolée aux galaxies éloignées, pour lesquelles la distance ne peut être calculée au moyen de la parallaxe ; cette loi est ainsi utilisée pour déterminer la distance des galaxies les plus éloignées.

En extrapolant l'expansion de l'Univers dans le passé, on arrive à une époque où celui-ci a dû être beaucoup plus chaud et beaucoup plus dense qu'aujourd'hui. C'est le modèle du Big Bang , conçu par Georges Lemaître prêtre catholique belge, qui est un ingrédient essentiel du modèle standard de la cosmologie actuel et possède aujourd'hui un grand nombre de confirmations expérimentales<sup>[réf. nécessaire]</sup>. La description du début de l'histoire de l'Univers par ce modèle ne commence cependant qu'après qu'il fût sorti d'une période appelée ère de Planck durant laquelle l'échelle d'énergie de l'Univers était si grande que le modèle standard n'est pas en mesure de décrire les phénomènes quantiques qui s'y sont déroulés. Durant cette époque, seule une théorie de la gravitation quantique pourrait expliquer le comportement microscopique de la matière sous l'influence importante de la gravité. Mais les physiciens ne disposent pas encore (en 2013) d'une telle théorie. Pour des raisons de cohérence avec les observations, après l'ère de Planck le modèle du Big Bang privilégie aujourd'hui l'existence d'une phase d'inflation cosmique très brève mais durant laquelle l'Univers aurait grandi de façon extrêmement rapide. C'est suite à cette phase que l'essentiel des particules de l'Univers auraient été créées avec une haute température, enclenchant un grand nombre de processus importants<sup>[7]</sup> qui ont finalement abouti à l'émission d'une grande quantité de lumière, appelé fond diffus cosmologique, qui peut être aujourd'hui observé avec une grande précision par toute une série d'instruments (ballons-sondes, sondes spatiales).

C'est l'observation de ce rayonnement fossile micro-onde, remarquablement uniforme dans toutes les directions qui constitue aujourd'hui l'élément capital qui assoit le modèle du Big Bang comme description correcte de l'Univers dans son passé lointain. De nombreux éléments du modèles restent encore à déterminer (par exemple le modèle décrivant la phase d'inflation), mais il y a aujourd'hui consensus de la communauté scientifique autour du modèle du Big Bang.

Dans le cadre du modèle  $\Lambda$ CDM, les contraintes issues des observations de la sonde WMAP<sup>[8]</sup> sur les paramètres cosmologiques indiquent une valeur la plus probable pour l'âge de l'Univers à environ 13,82 milliards d'années<sup>[9]</sup> avec une incertitude de 0,02 milliard d'années, ce qui est en accord avec les données indépendantes issues de l'observation des amas globulaires<sup>[10]</sup> ainsi que celle des naines blanches. Cet âge a été confirmé en 2013 par les observations du satellite Planck.

## Taille et Univers observable

Article détaillé : Univers observable.

À ce jour, aucune donnée scientifique ne permet de dire si l'Univers est fini ou infini. Certains théoriciens penchent pour un Univers infini, d'autres pour un Univers fini mais non borné. Un exemple d'Univers fini et non borné serait l'espace se refermant sur lui-même. Si on partait tout droit dans cet Univers, après un trajet, très long certes, il serait possible de repasser à proximité de son point de départ.

Les articles populaires et professionnels de recherche en cosmologie emploient souvent le terme « Univers » dans le sens d'« Univers observable »<sup>[réf. nécessaire]</sup>. L'être humain vit au centre de l'Univers observable, ce qui est en contradiction apparente avec le principe de Copernic qui dit que l'Univers est plus ou moins uniforme et ne possède aucun centre en particulier. Le paradoxe se résout simplement en tenant compte du fait que la lumière se déplace à la même vitesse dans toutes les directions et que sa vitesse n'est pas infinie : regarder au loin revient à regarder un événement décalé dans le passé du temps qu'il a fallu à la lumière pour parcourir la distance séparant l'observateur du phénomène observé. Or il ne nous est pas possible de voir de phénomène issu d'avant le Big Bang. Ainsi, les limites de l'Univers observable correspondent au lieu le plus lointain de l'Univers pour lesquelles la lumière a mis moins de 13,7 milliards d'années à parvenir à l'observateur, ce qui le place inmanquablement au centre de son Univers observable. On appelle « horizon cosmologique » la première lumière émise par le Big Bang il y a 13,7 milliards d'années.

On estime que le diamètre de cet Univers observable est de 100 milliards d'années lumière<sup>[11]</sup>. Celui-ci contient environ  $7 \times 10^{22}$  étoiles, réparties dans environ  $10^{11}$  galaxies, elles-mêmes organisées en amas et superamas de galaxies. Mais le nombre de galaxies pourrait être encore plus grand, selon le champ profond observé avec le télescope spatial Hubble.

Il est cependant possible que l'Univers observable ne soit qu'une infime partie d'un Univers réel beaucoup plus grand.

La définition de l'Univers choisie par cet article (« ensemble de tout ce qui existe ») soulève par ailleurs différents problèmes. Tout d'abord, il ne peut pas posséder de « bord » au sens intuitif du terme. En effet, l'existence de bord impliquerait l'existence d'un extérieur à l'Univers. Or par définition l'Univers est l'ensemble de tout ce qui existe, il ne peut donc rien exister à l'extérieur. Toutefois cela ne signifie pas que l'Univers est infini, il peut être fini sans avoir de « bord », sans avoir en fait d'extérieur. Cela soulève une autre interrogation : que signifie pour l'Univers d'être en expansion s'il n'a ni bord ni extérieur ?

## Forme

Articles détaillés : Forme de l'Univers et Courbure spatiale.

Une importante question de cosmologie est de connaître la forme de l'Univers.

1. Est-ce que l'Univers est « plat » ? C'est-à-dire : est-ce que le théorème de Pythagore pour les triangles droits est valide à de plus grandes échelles ? Actuellement, la plupart des cosmologues pensent que l'Univers observable est (presque) plat, juste comme la Terre est (presque) plate.
2. Est-ce que l'Univers est *simplement connexe* ? Selon le modèle standard du Big Bang, l'Univers n'a aucune frontière spatiale, mais peut néanmoins être de taille finie.

Ceci peut être compris par une analogie bidimensionnelle : la surface de la Terre n'a aucun bord, mais possède une aire bien déterminée.

Vous pouvez également penser à un cylindre et imaginer de coller les deux extrémités du cylindre ensemble, mais sans plier le cylindre.

C'est aussi un espace bidimensionnel avec une surface finie, mais au contraire de la surface de la Terre, il est plat, et peut ainsi servir de meilleur modèle.

Par conséquent, à proprement parler, nous devrions appeler les étoiles et les galaxies mentionnées ci-dessus « images » d'étoiles et de galaxies, puisqu'il est possible que l'Univers soit fini et si petit que nous pouvons voir une ou plusieurs fois autour de lui, et le vrai nombre d'étoiles et de galaxies physiquement distinctes pourrait être plus petit. Des hypothèses d'Univers multiconnexes ont été proposées et sont en cours d'étude<sup>[réf. nécessaire]</sup>.

## Modèle dimensionnel

L'Univers a-t-il trois, six, dix dimensions ou plus ?

La théorie des cordes prédit qu'espace et matière sont consubstantiels. Il n'y a pas de « contenant » (l'espace) mais un fond d'espace-temps qui interagit avec la matière. Dans certains cas particuliers, la notion de « nombre de dimensions de l'espace » dépend de l'intensité avec laquelle les cordes réagissent entre elles. Si cette interaction est faible, elles semblent se propager dans un espace à neuf dimensions - auxquelles il faut rajouter celle du temps. Si cette interaction croît, cela développe une dimension de plus (ou plus en fonction de l'intensité de l'interaction) à laquelle il faut toujours rajouter celle du temps. Supposons maintenant qu'on enferme l'Univers dans un espace « fini » (une boîte pour être concret) et que cet espace rapetisse jusqu'à  $10^{-32}$  centimètre de côté, la théorie des cordes le prédit équivalent à un Univers très grand. La conception d'espace est fondamentalement bouleversée. La mise en route du grand collisionneur de hadrons de Genève, *Large Hadron Collider* (plus communément appelé LHC), viendra peut-être confirmer cette théorie. Elle ne pourra en revanche pas l'infirmier, car aucun ordre de grandeur n'a été prédit par la théorie des cordes. Ainsi, si le phénomène n'est pas détecté, cela pourrait signifier que trop peu d'énergie a été générée pour rendre le phénomène observable, sans impliquer pour autant que la théorie soit nécessairement erronée.

## Avenir

Selon les prédictions du modèle cosmologique le plus couramment admis de nos jours, les « objets galactiques » auront une fin : c'est la mort thermique de l'Univers. Le Soleil, par exemple, s'éteindra dans 5 (à 7) milliards d'années, lorsqu'il aura consumé tout son combustible. À terme, les autres étoiles évolueront elles aussi dans des cataclysmes cosmologiques (explosions, effondrements). Déjà les naissances d'étoiles ralentissent<sup>[12]</sup> faute de matière, qui se raréfie au fil du temps. Dans 20 milliards d'années environ, aucun astre ne s'allumera plus. L'Univers sera peuplé d'étoiles éteintes (étoiles à neutrons, naines blanches, trous noirs) et des naines rouges résiduelles. À bien plus longues échéances, les galaxies se désagrégeront dans des collisions géantes par leurs interactions gravitationnelles internes et externes<sup>[13]</sup>.

En ce qui concerne le contenant (« l'espace »), certains physiciens<sup>[Qui ?]</sup> pensent que le processus d'expansion sera gravitationnellement ralenti et s'inversera selon le scénario du *Big Crunch*<sup>[14]</sup>. Pour d'autres<sup>[Qui ?]</sup>, l'expansion, qui semble à présent accélérée par la présence d'une énergie répulsive de nature inconnue (l'énergie sombre), continuera à jamais. Peu à peu, les astres éteints s'agglutineront en trous noirs. L'Univers, sans aucune structure, ne sera plus qu'un bain de photons de plus en plus froids<sup>[15]</sup>. Toute activité dans l'Univers s'éteindra ainsi à jamais : c'est le *Big Chill*. Si au contraire la quantité d'énergie sombre croît, l'Univers continuera son expansion à une vitesse toujours plus grande pour exploser à toutes les échelles : toute la matière qui le compose (y compris les atomes) se déchirera par dilatation de l'espace. C'est le *Big Rip* (littéralement : « grand déchirement »). Certains modèles prévoient une telle fin dans 22 milliards d'années.

Chacun de ces scénarios dépend donc de la quantité d'énergie sombre que contiendra l'Univers à un moment donné. Actuellement, l'état des connaissances suggère non seulement qu'il y a insuffisamment de masse et d'énergie pour provoquer ce *Big Rip*, mais que l'expansion de l'Univers semble s'accélérer et continuera donc pour toujours.

## Notes et références

- [1] Antimatière : est-elle la clé de l'Univers ?, Science et Vie, octobre 2009, . .
- [2] À notre connaissance, un seul autre savant de l'Antiquité fut de cet avis, Séleucos de Séleucie.
- [3] Otto Neugebauer, , Berlin ; New York : , 1975, Aristarque ne donne pas le résultat de ses calculs, mais de ses données (diamètre apparent angulaire de la Lune : 2° ; diamètre de la Lune : de diamètre lunaire), on peut déduire une distance Terre-Lune de terrestres environ, contre 60,2 en réalité. Mais Neugebauer estime que c'est un angle de ° et non de 2° qu'Aristarque tenait pour correct, ce qui aboutirait à terrestres pour la distance Terre-Lune. Voir Aristarque.
- [4] Neugebauer,
- [5] Des grandeurs et des distances du Soleil et de la Lune.
- [6] sciences grecques.
- [7] Comme la nucléosynthèse primordiale par exemple ou encore la baryogénèse.
- [8] Lancée par la NASA.
- [9] D.N. Spergel *et al.*, (<http://arxiv.org/abs/astro-ph/0603449>) soumis à Astrophys. J., prépublication disponible sur la base de données arXiv.
- [10] Chaboyer, B. & Krauss, (<http://arxiv.org/abs/astro-ph/0201443>) L. M. 2002, ApJ, 567, L45.
- [11] Science-et-Vie Hors-Série , mars 2008. *L'Univers en chiffres*.
- [12] Actuellement, l'observation de notre galaxie dénombre la naissance d'une ou deux étoiles par an.
- [13] Jean-Pierre Luminet, Astrophysicien, CNRS, Observatoire de Paris-Meudon, in Sciences & Avenir , novembre 2007.
- [14] Littéralement : « grand écrasement ».
- [15] D'après une théorie de Stephen Hawking (dans son livre *Une brève histoire du temps*), si l'Univers continue indéfiniment à s'étendre, les particules issues d'explosions successives ne seront plus assez proches les unes des autres pour recréer des étoiles après leur explosion.

## Destin de l'Univers

---

Le **destin de l'Univers** fait partie des questions fondamentales de la cosmologie. Elle a trait à l'évolution future de l'expansion de l'Univers. Pendant longtemps elle a été focalisée sur la question de savoir si l'expansion observée actuellement se poursuivrait indéfiniment ou s'interromprait pour laisser place à une phase de contraction menant au Big Crunch, un effondrement général de l'Univers, analogiquement inverse du Big bang. Aujourd'hui cette première question paraît essentiellement résolue en ce sens que toutes les observations indiquent que l'expansion ne s'arrêtera pas. Cependant, le devenir exact de l'Univers est susceptible d'être décrit par plusieurs scénarios assez différents, allant de la mort thermique de l'Univers (en anglais *Big Chill*, c'est-à-dire un refroidissement indéfini résultant de l'expansion), au Big Rip, un scénario catastrophique où l'Univers est détruit en un temps fini.

### Problématique

La description de l'évolution de l'Univers, en tant que système physique, se fait par la donnée d'un modèle cosmologique et le biais de la théorie de la Relativité générale. Celle-ci est en effet à même de décrire l'évolution d'un univers homogène et isotrope, par l'intermédiaire des équations de Friedmann. Ces dernières indiquent la valeur du taux d'expansion de l'Univers (dont la valeur actuelle est la constante de Hubble) en fonction de la densité d'énergie moyenne de l'Univers ainsi qu'une de ses propriétés géométriques, sa courbure spatiale. Interviennent aussi certaines propriétés des différentes formes de matière qui emplissent l'Univers, en particulier leur pression.

---

## Équation fondamentale

L'équation dictant la valeur du taux d'expansion de l'Univers, noté  $H$ , est une des deux équations de Friedmann. Elle s'écrit :

$$3 \left( \frac{H^2}{c^2} + \frac{K}{a^2} \right) = \frac{8\pi G}{c^4} \rho,$$

où  $c$  est la vitesse de la lumière,  $K/a^2$  la courbure spatiale,  $G$  la constante de gravitation et  $\rho$  l'ensemble des densités d'énergie des différentes formes de matière qui emplissent l'univers. La courbure spatiale représente la forme géométrique de l'espace :

- si elle est nulle, l'espace correspond à l'espace euclidien usuel, dans lequel le théorème de Pythagore est valable.
- si elle est positive, l'espace est dit sphérique, car ayant une structure correspondant à l'analogue tridimensionnel d'une sphère usuelle. En particulier, il est de volume fini, et un observateur se déplaçant en ligne droite revient toujours à son point de départ.
- enfin si la courbure spatiale est négative, l'espace est dit hyperbolique. Il est infini, et, d'une certaine façon, plus « grand » que l'espace euclidien au sens où le volume d'une sphère de rayon donné est plus grand dans un espace hyperbolique que dans un espace euclidien.

L'équation de Friedmann peut se réécrire sous la forme :

$$H^2 = -\frac{Kc^2}{a^2} + \frac{8\pi G}{3c^2} \rho.$$

L'expansion s'arrête par définition quand le taux d'expansion  $H$  est nul. Cela ne peut se produire que si la courbure spatiale est positive ou éventuellement si la densité d'énergie totale devient négative. Cette dernière hypothèse étant a priori peu réaliste, seul le cas d'une courbure spatiale positive est susceptible d'être à l'origine d'un arrêt de l'expansion de l'Univers. Cependant, même si la courbure spatiale est positive, il n'y a pas nécessairement d'arrêt de l'expansion : il faut pour cela que la densité d'énergie totale décroisse suffisamment vite pour que le membre de droite de l'équation ci-dessus s'annule.

## Lire à ce sujet

- Le numéro 448 de Septembre 2007 de la revue *Ciel et Espace* : Un article est consacré au Big Rip, la grande Déchirure.
- Jean-Pierre Luminet, « Le destin de l'univers : Trous noirs et énergie sombre », Fayard (2006) / ISBN 978-2-213-63081-6
-  Portail de la cosmologie
-  Portail de l'astronomie

# Âge de l'univers

---

L'**âge de l'univers** représente la durée écoulée depuis le Big Bang, c'est-à-dire la phase dense et chaude de l'histoire de l'univers. Ce terme ne préjuge pas que l'univers soit d'un âge fini, son état antérieur au Big Bang (s'il existe) étant à l'heure actuelle hors de portée de l'observation directe.

L'âge de l'univers peut s'évaluer par plusieurs méthodes plus ou moins directes, qui convergent toutes vers une valeur de l'ordre de 15 milliards d'années. L'estimation aujourd'hui la plus précise est déduite des données du satellite artificiel Planck. En combinant ces mesures avec d'autres (WMAP par exemple), la meilleure estimation à ce jour donne un âge de  $(13,798 \pm 0,037)$  milliards d'années (c'est-à-dire  $(13,798 \pm 0,037) \times 10^9$  années ou  $(4,354 \pm 0,012) \times 10^{17}$  secondes).

## Définition et ordre de grandeur

La relativité restreinte indique que la mesure d'une durée dépend de la trajectoire suivie par la personne mesurant cette durée. Pour préciser ce que l'on entend par âge de l'Univers, il faut donc préciser le type de mesure utilisé. L'Univers est un milieu relativement homogène et isotrope. Cela signifie qu'en un point donné, il est toujours possible d'avoir une trajectoire pour laquelle l'Univers apparaisse (à grande échelle) identique dans toutes les directions. Avec une relativement bonne approximation, une galaxie peut être considérée comme suivant une telle trajectoire. L'âge de l'Univers est donc la quantité qui aurait été mesurée par une horloge dont le mouvement suit celui d'une galaxie ou de la matière qui a contribué à sa formation.

Un ordre de grandeur de l'âge de l'Univers peut se déduire à partir de la mesure de son expansion. On observe en effet que les galaxies lointaines semblent animées d'un mouvement de récession par rapport à notre galaxie (la Voie lactée), et ce avec une vitesse d'autant plus grande que leur distance est importante. La spectroscopie permet de mesurer par effet Doppler la vitesse d'éloignement des galaxies. Par diverses méthodes, il est également possible de mesurer leur distance. L'observation révèle que la vitesse d'éloignement des galaxies est proportionnelle à leur distance. La constante de proportionnalité ainsi trouvée est appelée constante de Hubble, traditionnellement notée  $H$  ou  $H_0$ . Celle-ci est estimée par diverses méthodes qui donnent la valeur approchée de  $71 \text{ km}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{Mpc}^{-1}$  à 1 % près (mesures<sup>[1]</sup> du 26 janvier 2010), revue à  $67,9 \text{ km}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{Mpc}^{-1}$  (mars 2013). Si l'on considère que la vitesse de récession des galaxies est constante au cours du temps, alors il est possible d'estimer quand la matière qui a formé une galaxie donnée était dans notre voisinage immédiat. Cette durée  $t$  peut se calculer et vaut :

$$t = \frac{1}{H_0}.$$

Avec la valeur numérique donnée ci-dessus, on obtient :

$$t \sim 13,819 \times 10^9 \text{ ans.}$$

En réalité, la vitesse de récession des galaxies n'est pas constante au cours du temps. En particulier, elle était par le passé bien plus importante qu'aujourd'hui et a diminué pendant plusieurs milliards d'années. Par la suite s'est produit le phénomène de l'accélération de l'expansion de l'Univers, qui a vu la vitesse de récession des galaxies se mettre à augmenter. Les calculs précis, utilisant les équations de Friedmann et le modèle standard de la cosmologie, indiquent que ces deux effets se compensent à peu près, et que l'âge réel de l'Univers est très proche de la valeur de 14 milliards d'années donnée ci-dessus.

## Notes et références

[1] Publiées par la NASA, Dans la lueur primordiale de l'Univers ([http://www.cidehom.com/science\\_at\\_nasa.php?\\_a\\_id=119](http://www.cidehom.com/science_at_nasa.php?_a_id=119)), traduction de Didier Jamet

# Énergie sombre

En cosmologie, l'**énergie sombre** ou *énergie noire* (*dark energy* en anglais) est une forme d'énergie hypothétique emplissant uniformément tout l'Univers et dotée d'une pression négative, qui la fait se comporter comme une force gravitationnelle répulsive. L'existence de l'énergie sombre est nécessaire pour expliquer diverses observations astrophysiques, notamment l'accélération de l'expansion de l'Univers détectée au tournant du XXI<sup>e</sup> siècle.

Malgré une densité très faible (de l'ordre de  $10^{-29}$  g/cm<sup>3</sup>), l'énergie sombre est une composante majeure de l'Univers, représentant environ 68% de la densité d'énergie totale de l'Univers. Sa nature reste aujourd'hui encore inconnue. Il peut s'agir simplement de la constante cosmologique induite par la relativité générale qui aurait une valeur non nulle. Il existe d'autres hypothèses, menant soit à une modélisation différente de la matière (quintessence, k-essence, modèles unifiés de matière et d'énergie sombre), soit à une modélisation différente de la gravitation (gravité f(R), champs scalaires, cosmologie branaria). Le choix entre ces différentes hypothèses dépend essentiellement des contraintes apportées par l'observation, notamment des supernovae de type Ia, de fond diffus cosmologique ou des oscillations acoustiques des baryons.

L'énergie sombre ne doit pas être confondue avec la matière sombre qui, contrairement à l'énergie sombre, ne remplit pas uniformément l'univers et qui interagit normalement (forces attractives) avec la gravitation.

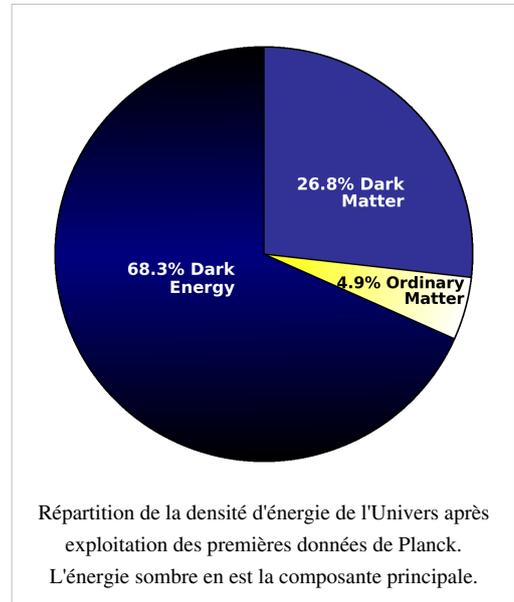
## Naissance de la notion d'énergie sombre

L'expression *dark energy* (énergie sombre) a été citée pour la première fois dans un article de Huterer et Turner<sup>[1]</sup> en 1998, quelques mois après la découverte de l'accélération de l'expansion de l'Univers<sup>[2]</sup>. En effet, à la fin des années 1990, les satellites et les télescopes ont permis des mesures très précises des supernovæ distantes et du rayonnement fossile micro-onde. Plusieurs caractéristiques observées, notamment l'accélération de l'expansion de l'Univers, conduisent à supposer qu'il existe effectivement une sorte d'énergie (baptisée *sombre*), dont une des caractéristiques principales serait d'avoir une pression négative, qui la fait se comporter comme une force gravitationnelle répulsive.

Du fait de sa nature répulsive, l'énergie sombre a tendance à accélérer l'expansion de l'Univers, plutôt que la ralentir, comme le fait la matière « normale ». Un Univers accélérant est exactement ce que l'on constate en observant les supernovas les plus lointaines. D'une manière remarquable, ces observations semblent indiquer que l'énergie sombre doit représenter environ 70 % de la densité d'énergie totale de l'Univers<sup>[3]</sup>.

Mais l'idée d'une composante accélératrice, invisible et diffuse, de l'univers est plus ancienne.

Historiquement, la seule forme d'énergie (hypothétique) se comportant comme de l'énergie sombre était la constante cosmologique, proposée dans un autre contexte par Albert Einstein en 1916, et les seuls modèles faisant appel à de l'énergie sombre utilisaient en réalité une constante cosmologique. La motivation initiale d'Einstein restait cependant fort éloignée de celles qui motivent l'intérêt actuel pour l'énergie sombre. En effet, en 1916, date à laquelle



l'expansion de l'Univers n'était pas connue, Albert Einstein considérait que l'Univers devait être statique, aussi lui fallait-il introduire une nouvelle force s'opposant à l'attraction gravitationnelle. Le candidat idéal fut trouvé avec la constante cosmologique, qui permettait, dans certaines conditions très particulières de contrebalancer exactement l'effet attractif de la force gravitationnelle.

Ce n'est que bien plus tard, en 1988, que fut proposé par les astrophysiciens Jim Peebles et Bharat Ratra un autre modèle d'énergie sombre, qui fut plus tard appelée quintessence. L'intérêt pour l'énergie sombre ne prit son essor qu'à partir de la fin des années 1990, époque où fut mise en évidence la réalité de l'énergie sombre par le phénomène d'accélération de l'expansion de l'Univers. Par la suite, d'autres modèles furent proposés, parmi lesquels l'énergie fantôme, la k-essence, et le gaz de Chaplygin. Tous possèdent la même caractéristique essentielle, celle de posséder une pression suffisamment négative pour permettre d'expliquer, au moins qualitativement, l'accélération de l'expansion de l'Univers.

Les recherches astrophysiques actuelles sur le sujet ont pour but principal de mesurer avec précision l'histoire de l'expansion de l'Univers afin de déterminer la manière dont l'expansion varie avec le temps et en déduire les propriétés de l'énergie sombre, en particulier son équation d'état.

## Nature de l'énergie sombre

La nature exacte de l'énergie sombre fait largement partie du domaine de la spéculation. Certains estiment que l'énergie sombre serait l'énergie du vide quantique, modélisée par la *constante cosmologique* de la relativité générale. C'est l'explication la plus simple et poser une *constante cosmologique* signifie que la densité de l'énergie sombre est uniforme, et constante dans tout l'Univers, invariable en fonction du temps. C'est la forme introduite par Einstein, et cette forme est cohérente avec nos observations actuelles de l'Univers. Si l'*énergie sombre* prend effectivement cette forme, cela signifie qu'il s'agit d'une propriété fondamentale de l'Univers.

D'autres hypothèses ont été avancées. Ainsi, l'*énergie sombre* pourrait-elle être induite par l'existence de particules inconnues. Ces modèles sont appelés quintessence. Certaines théories affirment que ces particules ont été créées en quantité suffisante lors du big bang pour remplir tout l'espace. Néanmoins, si cela était le cas, on s'attendrait à ce qu'elles se regroupent, de la même manière que la matière ordinaire, et on observerait des variations de densité en fonction du temps. Aucune preuve n'en a été observée, mais la précision des observations ne permet pas d'exclure cette hypothèse. Toutefois, ce genre d'hypothèse se rapproche fortement des théories obsolètes de l'éther, précisément abandonnées car elles présupposaient l'existence d'une substance masquée emplissant tout l'Univers.

## Constante cosmologique

L'énergie sombre peut être une notion directement reliée à la constante cosmologique  $\Lambda$ . Cette dernière apparaît dans le second membre de l'équation d'Einstein « modifiée » :  $G_{\alpha\beta} = 8\pi T_{\alpha\beta} + \Lambda g_{\alpha\beta}$ .

Cette constante a été ajoutée par Albert Einstein à son équation primitive afin qu'elle puisse modéliser un univers statique (il sera prouvé par la suite que l'Univers statique d'Einstein est instable). Elle introduit une sorte d'énergie (un champ scalaire constant) présente en tout point du continuum spatio-temporel, qui, avec un choix convenable de signe et de valeur, peut s'opposer à la gravité et modifier le profil d'évolution de la « taille de l'Univers » (facteur d'échelle dans la métrique FLRW).

Lors de la découverte de l'expansion de l'Univers (cf. Edwin Hubble), Einstein renia cette verrue (« *l'erreur la plus patente de ma vie* ») au profit de l'équation originelle (où  $\Lambda$  ne figure pas), jugée plus « esthétique » et conforme avec les observations de l'époque. Jusque dans les années 1980, la constante cosmologique a été plus ou moins ignorée en cosmologie « conventionnelle ».

En fait, cette "erreur" n'en est peut-être pas une, car la constante cosmologique apparaît une des solutions les plus simples et naturelles au problème de l'énergie noire<sup>[4]</sup>. Un modèle cosmologique intégrant la constante cosmologique en tant qu'énergie noire existe : le modèle  $\Lambda$ CDM, qui est de plus en plus utilisé comme modèle de travail pour les

cosmologistes.

Toutefois, cette solution ne s'impose pas (tout en restant toujours possible) pour les raisons suivantes :

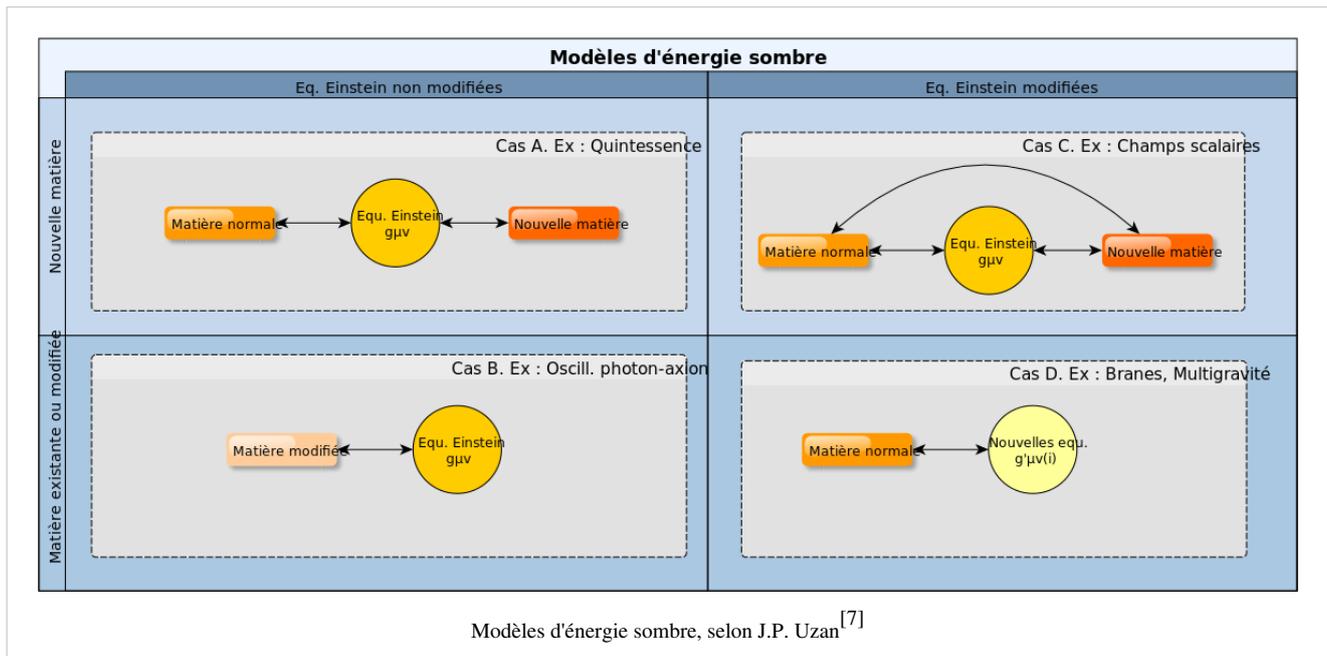
- L'histoire de la constante cosmologique est jusqu'ici toujours la même, depuis Einstein : une constante ad hoc ajoutée artificiellement pour expliquer des observations ou un état supposé de l'univers, et qui a finalement été abandonnée<sup>[5]</sup>.
- Du point de vue de la physique des particules, la constante cosmologique apparaît comme la densité d'énergie du vide. Or, les calculs de cette densité d'énergie à l'aide du modèle standard donne une valeur gigantesque de l'ordre de  $\rho_{vide} = 10^{74} GEv^4$ , alors que la valeur attendue de la constante cosmologique est extrêmement faible, de l'ordre de  $\rho_{\Lambda} = 10^{-47} GEv^4$ . Cette différence de plus de 120 ordres de grandeur entre la valeur théorique et mesurée n'est pas comprise. Il n'existe aucune explication ou théorie physique des champs donnant une valeur faible et non nulle pour l'énergie du vide<sup>[6]</sup>.

Si on fait intervenir une supersymétrie totale de la physique des particules, la densité d'énergie du vide est alors précisément zéro, la contribution de chaque boson étant annulée par son fermion supersymétrique et réciproquement. Cependant, l'état actuel de l'univers correspond à un état "brisé" de la supersymétrie, qui donne alors de nouveau pour le calcul de l'énergie du vide une valeur bien plus grande que celle attendue, bien que plus faible que celle du modèle standard (un rapport de l'ordre de  $10^{41}$  au lieu de  $10^{120}$ ).

- Cette différence d'ordre de grandeur implique également un ajustement fin de la constante cosmologique. Celle-ci a dû être égale à une certaine valeur, à  $10^{-123}$  près, pour que l'évolution de l'univers puisse donner son état actuel. Fixer arbitrairement un paramètre cosmologique avec une telle précision, sans base théorique, est scientifiquement difficilement acceptable.
- Il faut que la valeur de l'énergie noire reste rigoureusement constante au cours du temps. Ce point n'est pas encore établi. Les observations impliquent une densité d'énergie noire de l'ordre de  $\rho_{\Lambda} \approx a^{-n}$ , avec  $a$  le facteur d'échelle de l'expansion de l'univers, et  $n$  proche de zéro, et peut-être égal à zéro (donnant alors une constante). De plus, l'énergie du vide est soumise à des fluctuations quantiques alors que la constante cosmologique est fondamentalement et rigoureusement une constante.

Ces raisons poussent les scientifiques à rechercher d'autres modèles d'énergie noire, qui laissent une valeur nulle à la constante cosmologique.

## Autres modèles



Les modèles d'énergie noire, en dehors de la constante cosmologique, peuvent être classés en quatre classes principales. Les deux premières classes font l'hypothèse que la gravitation est correctement décrite par la relativité générale et introduisent de nouveaux degrés de liberté par rapport au modèle standard.

- Classe A : les modèles où l'accélération est influencée par les effets de nouveaux champs physiques, ou - ce qui revient au même - de nouvelles particules. Ces nouveaux champs ne sont pas couplés et n'interagissent pas avec la matière normale ou noire, ou avec les photons. Les modèles de cette catégorie comprennent notamment la quintessence, la k-essence et le gaz de Chaplyng.
- Classe B : ces modèles introduisent également de nouveaux champs, très faibles de manière à ne pas changer notablement le taux d'expansion de l'univers, mais qui peuvent être couplés aux photons. Ces modèles visent à expliquer l'affaiblissement de la lumière des supernovæ non par une accélération de l'expansion de l'univers, mais par un couplage d'un champ affectant les observations. Par exemple, la théorie de l'oscillation photon-axion<sup>[8]</sup>, qui suppose que la lumière s'affaiblit avec la distance par des oscillations des photons en axions invisibles.

Les deux autres classes modifient la relativité générale :

- Classe C : ces modèles introduisent de nouveaux champs, fortement couplés aux champs du modèle standard jusqu'à dominer la matière normale. Ce couplage fort implique de modifier les équations de la relativité générale et/ou changer les valeurs de certaines constantes fondamentales pour décrire les effets de la gravitation. Ces modèles incluent la gravité  $f(R)$  ou des modèles de quintessence étendue, et toutes celles impliquant des champs scalaires fortement couplés.
- Classe D : ces modèles introduisent des modifications drastiques de la relativité générale, avec plusieurs types, jusqu'à une infinité, de gravitons. Ces modèles incluent les modèles branaires avec dimensions supplémentaires, la multigravité, ou gravité simulée.

## Implications sur le destin de l'Univers

Si l'énergie sombre continue de dominer la balance énergétique de l'Univers, l'expansion observée de l'espace va continuer à accélérer. Les structures qui ne sont pas liées gravitationnellement finiront par s'éloigner les unes des autres à des vitesses apparentes supérieures à celle de la lumière. Ainsi, cette accélération nous empêchera finalement d'observer des portions importantes de l'Univers qui sont aujourd'hui visibles ; notre horizon cosmologique, plutôt que de reculer, finira par se rapprocher de nous.

Si la densité de l'énergie sombre n'augmente pas, l'existence des systèmes liés par la gravitation, tels les galaxies ou les systèmes planétaires, n'est pas menacée. Ainsi le système solaire ou la Voie lactée demeureront essentiellement identiques à ce qu'ils sont aujourd'hui, alors que le reste de l'Univers, au-delà de notre super-amas local, semblera s'éloigner constamment.

En revanche, si l'énergie sombre augmente avec le temps, on se retrouve dans un scénario de type Big Rip, où toute la matière de l'Univers, jusque dans ses atomes mêmes, se désintégrerait, laissant un Univers infini et totalement vide.

Finalement, l'énergie sombre pourrait se diluer avec le temps, voire s'inverser. Les incertitudes sur les observations laissent la porte ouverte sur le fait que la gravité puisse un jour dominer un Univers, qui se contracterait alors sur lui-même et disparaîtrait dans un Big Crunch. Ce scénario est néanmoins considéré comme le moins probable.

En mai 2004, la publication de travaux réalisés avec le satellite Chandra et consistant à mesurer les distances de 26 amas de galaxies lointains semblent confirmer que l'expansion a commencé à accélérer il y a 6 milliards d'années, et que l'énergie sombre semble rester constante, ou alors varie très lentement. Ces résultats sont toutefois en désaccord avec ceux obtenus par le satellite européen XMM-Newton.

Cela est compatible avec l'existence d'une constante cosmologique et rend le scénario du Big Crunch très improbable.

## Notes et références

- [1] D. Huterer, M.S. Turner *Prospects for probing Dark Energy via supernova distance measurements* Phys. rev. D 60 (1999)
- [2] p. 427
- [3] p. 1
- [4] p. 3
- [5] L. Patantonopoulos *The Invisible Universe, Dark Matter and Dark Energy* Springer (2007) p. 236-238
- [6] J.F Hawley, K.A. Holcomb *Foundations of Modern Cosmology* Oxford University Press, 2005, pp. 472-473
- [7] J.P. Uzan *Dark Energy, gravitation and Copernican principle*, in *Dark Energy Observational and Theoretical Approaches*, Cambridge University Press, 2010
- [8] Cskasi (2002) *Phys. rev. Lett.* **88**, 161302, Deffayet et al. (2002) *Phys Rev. D* **66**, 0435172002

# Matière noire

En astrophysique, la **matière noire** (ou **matière sombre**), traduction de l'anglais *dark matter*, désigne une catégorie de matière hypothétique jusqu'à présent non détectée, invoquée pour rendre compte d'observations, notamment les estimations de masse des galaxies, des amas de galaxies et les propriétés des fluctuations du fond cosmologique.

Différentes hypothèses sont émises et explorées sur la composition de cette hypothétique matière noire : gaz moléculaire, étoiles mortes, naines brunes en grand nombre, trous noirs, etc. Cependant, les estimations de la densité de l'univers et l'estimation de sa densité sous forme d'atomes, la matière baryonique donc, impliquent plutôt une nature non-baryonique, et donc encore inconnue, encore que l'on suppose fortement des particules, peut-être des super-partenaires tels que le neutralino (voir la page sur la supersymétrie). Ces particules exotiques sont regroupées sous le nom générique de WIMP, acronyme de l'anglais *Weakly interacting massive particles* (particules massives à interaction faible), traduction de « mauviettes », d'où l'appellation parfois rencontrée en français<sup>[1]</sup>.

La matière noire aurait pourtant une abondance au moins cinq fois plus importante que la matière baryonique, pour constituer environ 24 %<sup>[2]</sup> de la densité d'énergie totale de l'Univers observable<sup>[3]</sup>, selon les modèles de formation et d'évolution des galaxies, ainsi que les modèles cosmologiques.

## Détection indirecte de la matière noire

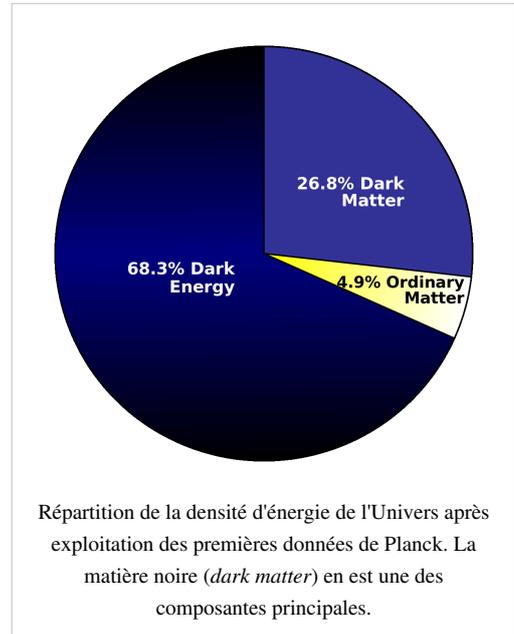
### Premiers indices

En 1933, l'astronome suisse Fritz Zwicky décide d'étudier un petit groupe de sept galaxies dans l'amas de la Chevelure de Bérénice. Son objectif était de calculer la masse totale de cet amas en étudiant la vitesse (ou plutôt la dispersion des vitesses) de ces sept galaxies. Il pouvait ainsi — à l'aide des lois de Newton — en déduire la masse dite « masse dynamique », puis la comparer avec la masse dite « masse lumineuse », qui est la masse déduite de la quantité de lumière émise par l'amas (en faisant l'hypothèse d'une distribution raisonnable des populations d'étoiles dans les galaxies).

La dispersion des vitesses (ou autrement dit, comment les vitesses de ces sept galaxies diffèrent les unes des autres) est directement liée à la masse présente dans l'amas par une formule semblable à la troisième loi de Kepler. En fait, un amas d'étoiles peut être comparé à un gaz, dont les particules seraient des étoiles. Si le gaz est chaud, la dispersion des vitesses des particules est élevée. Dans le cas extrême, les particules ayant une vitesse suffisante quittent le gaz (évaporation). Si le gaz est froid (et donc lourd), la dispersion des vitesses est faible.

Zwicky fut surpris de constater que les vitesses observées dans l'amas de Coma étaient très élevées. La masse dynamique était 400 fois plus grande que la masse lumineuse. À l'époque, les méthodes et la précision des mesures n'étaient pas assez bonnes pour exclure des erreurs de mesure. De plus, des objets massifs tels que les naines brunes, les naines blanches, les étoiles à neutrons et les trous noirs, tous des objets très peu rayonnants, étaient mal connus, tout comme leur distribution. De même pour la poussière interstellaire et le gaz moléculaire.

Zwicky fit part de ses observations à ses confrères, mais ceux-ci ne semblaient pas s'y intéresser. De fait Zwicky n'avait pas très bonne réputation à cause de son fort caractère et, d'autre part, ses mesures étaient critiquables en



raison des grandes incertitudes de mesure.

Ce même phénomène a été observé à nouveau en 1936 par Sinclair Smith lors du calcul de la masse dynamique totale de l'amas de la Vierge. Celle-ci était 200 fois plus importante que l'estimation donnée par Edwin Hubble, mais elle pouvait, d'après Smith, s'expliquer par la présence de matière entre les galaxies de l'amas. En outre, les amas de galaxies étaient encore considérés par un grand nombre d'astronomes comme des structures temporaires dont les galaxies pouvaient s'échapper, plutôt que des structures stables. Cette explication suffisait pour justifier les vitesses excessives.

La question de la différence entre la masse dynamique et la masse lumineuse n'intéresse pas et sombre dans l'oubli pour plusieurs décennies. À l'époque, les astronomes avaient d'autres questions jugées plus importantes, comme celle de l'expansion de l'Univers.

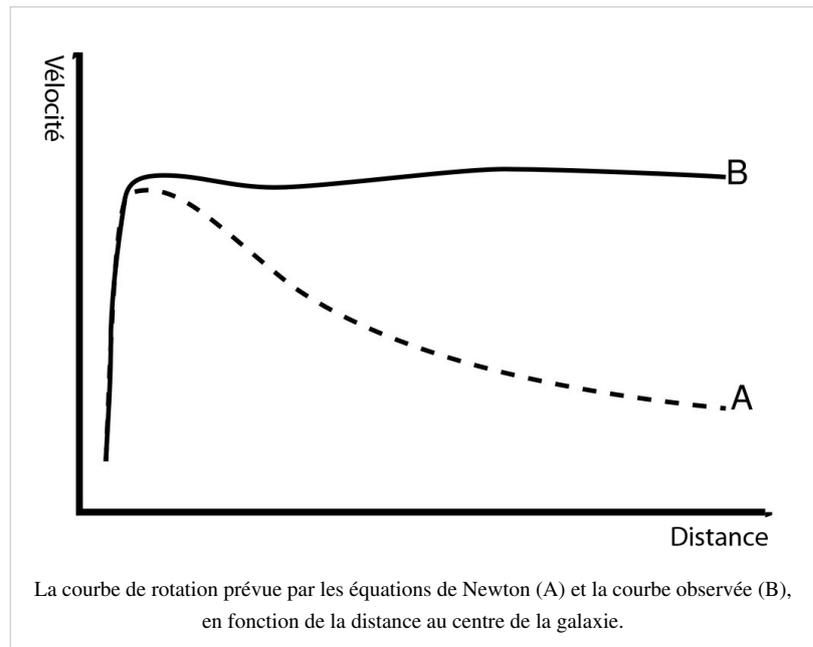
### **Les courbes de rotation plate des galaxies spirales**

Ce n'est qu'une quarantaine d'années plus tard, dans les années 1970, que la question de l'existence de cette matière manquante — que l'on nommera « matière noire » (*Dark Matter* en anglais) — refait surface. À partir de l'analyse des spectres des galaxies, l'astronome américaine Vera Rubin étudia la rotation des galaxies spirales. Le problème est le même que la comparaison entre la masse dynamique et la masse lumineuse des amas de galaxies. Il s'agit de savoir si la « masse lumineuse », c'est-à-dire la masse qui est déduite de la présence des étoiles, est bien égale (à quelques corrections près) à la masse dynamique.

La masse dynamique est normalement la seule masse véritable, puisqu'il s'agit d'une mesure de la masse déduite de son influence gravitationnelle. Toute masse étant soumise à la force de gravitation, il n'y a aucune raison de penser que la masse dynamique observée soit fautive. Ce n'est pas aussi simple pour la masse lumineuse. Pour mesurer cette dernière, on fait l'hypothèse que toute la masse de la galaxie (ou de l'amas de galaxies) est constituée d'étoiles. Ces étoiles rayonnent, et si l'on connaît (mais c'est très difficile) leur distribution (masse, nombre, âge, etc.), l'infrarouge proche est donc un bon « traceur » de masse (il est peu sensible au fort rayonnement des étoiles massives et permet de détecter l'émission des étoiles moins massives qui piquent dans l'optique et dans l'infrarouge).

En analysant le spectre des galaxies spirales vues par la tranche, comme la galaxie d'Andromède, il est possible d'en déduire la courbe de rotation. La courbe de rotation décrit la vitesse de rotation de la galaxie en fonction de la distance au centre. Cette courbe de rotation est une mesure directe de la distribution globale de matière dans la galaxie. La vitesse maximale de rotation d'une galaxie spirale se trouve à quelques kilo-parsecs du centre, puis elle est censée décroître, en suivant une décroissance képlérienne. En effet, les étoiles à la périphérie de la galaxie sont en orbite autour du centre, de la même manière que les planètes sont en orbite autour du Soleil. Les étoiles en périphérie de la galaxie tournent donc moins vite que celles plus près du centre. La courbe de rotation, après un maximum, se met à redescendre.

Or, Vera Rubin observa que les étoiles situées à la périphérie de la galaxie d'Andromède — comme pour d'autres galaxies spirales — semblent tourner trop vite (les vitesses restaient pratiquement constantes au fur et à mesure que l'on s'éloignait du centre). La courbe de rotation des galaxies spirales, ou en tous cas de certaines d'entre elles, était plate. La vitesse ne décroissait pas alors que l'on s'éloignait du centre. De nombreuses autres observations similaires sont effectuées dans les années 1980, venant renforcer celles de Vera Rubin. Cette observation pose de profondes questions, car la courbe de rotation



mesure bien la masse dynamique. Aucune hypothèse au sujet de l'âge, de la distribution de masse des étoiles n'est nécessaire. La seule supposition est que les étoiles qui sont la source de la lumière qui forme le spectre analysé sont bien des traceurs de la masse de la galaxie. Comment imaginer alors que les étoiles, principales composantes de matière dans les galaxies spirales, tournent de manière non képlérienne, c'est-à-dire ne suivent tout simplement plus les lois de la gravitation ?

Une explication possible est d'imaginer l'existence d'un gigantesque halo de matière non visible entourant les galaxies ; un halo qui représenterait jusqu'à près de 90 % de la masse totale de la galaxie, voire plus dans certaines galaxies naines. Dans les 2 000 galaxies qu'ont cartographiées l'astronome canadienne Catherine Heymans et sa partenaire, Megan Gray de Halifax, seulement 10 % était composé de gaz surchauffés et 3 % seulement de matière visible. Le reste était de la matière noire<sup>[4]</sup>. Ainsi toutes les étoiles se trouvent presque au centre de l'extension véritable de la « galaxie » (cette fois-ci composée de la galaxie visible et du halo de matière sombre), et tournent donc normalement. Cela revient à dire que les étoiles, même celles à la périphérie visible de la galaxie, ne sont pas « assez loin » du centre pour être dans la partie descendante de la courbe de rotation. Il reste à observer directement cette fameuse matière pour confirmer que c'est la bonne explication. Personne n'y est encore parvenu jusqu'à aujourd'hui.

La présence de matière noire est l'une des explications possibles, et aujourd'hui la plus convaincante. Elle a l'immense avantage d'être simple et d'aller dans le bon sens. En effet, les astronomes se doutaient bien que les galaxies contiennent des astres très peu lumineux (comme les naines brunes, naines blanches, trous noirs, étoiles à neutrons) qui peuvent constituer une partie importante de la masse totale de la galaxie, mais qui ne sont pas visibles avec les instruments optiques habituels. Avec la mesure de la courbe de rotation plate le plus loin possible du centre, l'observation des galaxies spirales dans d'autres longueurs d'onde (afin de mieux caractériser la présence d'objets peu lumineux dans le domaine visible) fut un des efforts majeurs de l'astronomie pour étudier le problème.

### Observations récentes

D'après des résultats publiés en août 2006, de la matière noire aurait été observée distinctement de la matière ordinaire grâce à l'observation de l'amas du Boulet constitué en fait de deux amas voisins qui sont entrés en collision il y a environ 150 millions d'années. Les astronomes ont analysé l'effet de mirage gravitationnel afin de déterminer la distribution totale de masse dans la paire d'amas et ont comparé cette distribution avec celle de la matière ordinaire telle que donnée par l'observation directe des émissions de rayons X en provenance du gaz extrêmement chaud des

amas, dont on pense qu'il constitue la majorité de la matière ordinaire des amas (les galaxies y contribuant en fait très peu). La température très élevée du gaz est due précisément à la collision au cours de laquelle la matière ordinaire interagit entre les deux amas et est ralentie dans son mouvement. La matière noire quant à elle n'aurait pas interagi, ou très peu, ce qui explique sa position différente dans les amas après la collision.

La preuve de l'existence de la matière noire viendrait cependant d'une observation véritablement directe, c'est-à-dire de l'interaction entre des particules de matière noire avec des détecteurs terrestres, tels CDMS, XENON ou WARP, ou de la création de telles particules dans un accélérateur (comme le LHC par exemple). Ce type de mise en évidence aurait l'avantage de déterminer précisément la masse de telles particules et d'analyser en profondeur la forme de leurs interactions.

Toutefois, le 17 décembre 2009<sup>[5],[6]</sup>, deux conférences tenues à l'université Stanford et au Fermilab laissent entendre que la détection présumée de deux particules de matière noire, encore appelées « Wimps », par le détecteur du CDMS n'est pas significative. Plus récemment, l'expérience européenne EDELWEISS du laboratoire souterrain de Modane a annoncé que deux sur cinq signaux observés pourraient marquer le passage de particules de matière noire à travers ses détecteurs : « bien qu'aussi lourde que 10 à 10 000 protons, la matière noire traverse la matière aussi discrètement qu'un neutrino de masse quasi nulle. »<sup>[7]</sup>.

Le spectromètre AMS, installé sur la Station spatiale internationale, a fourni ses premiers résultats sur la question de la matière noire en 2013.

En novembre 2013, l'expérience LUX<sup>[8]</sup> (en) (Large Underground Xenon) s'est terminée sans avoir pu détecter de matière noire. Si les résultats de cette expérience n'invalident pas l'existence de la matière noire, la sensibilité de ses détecteurs pose une limite supérieure plus basse que les autres sur la section efficace de la matière noire.

## Répartition de la matière noire dans l'Univers

### Au sein des galaxies

À partir des vitesses de rotation des étoiles et des galaxies (au niveau des amas), il a été possible de mesurer la masse de cette matière noire, et d'en déduire également sa répartition. Une grande quantité de cette matière devrait se trouver au sein même des galaxies, non pas dans le disque galactique mais sous forme d'un halo englobant la galaxie. Cette configuration permet une stabilité du disque galactique. De plus, certaines galaxies possèdent des anneaux perpendiculaires au disque et composés de gaz, de poussières et d'étoiles. Là encore, le halo de matière expliquerait la formation et la stabilité de tels anneaux nécessitent. Par contre, il est impossible que la matière noire se trouve dans le disque galactique, car on devrait alors observer dans le mouvement des étoiles une oscillation perpendiculaire au disque ; oscillation que nous ne voyons pas.

À l'instar de la matière lumineuse, elle décroîtrait également au fur et à mesure que l'on s'éloigne du centre de la galaxie, mais de façon beaucoup moins prononcée. Ainsi, la proportion de matière lumineuse varierait de dominante au cœur des galaxies à négligeable à la périphérie. L'étude de galaxies satellites (petites galaxies tournant autour d'autres galaxies) oblige à imaginer des halos très étendus : environ 200 ou 300 kpc. Par comparaison, le Soleil est situé à environ 8,7 kpc du centre de notre Galaxie. La galaxie d'Andromède — galaxie la plus proche de nous — se situe à 760 kpc, soit un peu plus du double du rayon du halo de matière noire de notre galaxie. Du coup, ces halos devraient être communs entre galaxies voisines (comme des pépins dans une même pomme).

## Entre les galaxies, à l'échelle des amas

Les mouvements de galaxies au sein des amas ont révélé le même problème que l'étude des mouvements des étoiles dans les galaxies et suggèrent donc la présence de matière noire entre les galaxies ; bien que rien ne prouve encore que ces deux problèmes soient liés. À l'échelle des galaxies, le taux de matière noire serait jusqu'à dix fois celui de la matière lumineuse, mais au niveau des amas, il serait bien plus important : jusqu'à trente fois la masse « visible » de ces amas.

En 1996, l'astrophysicien Yannick Mellier a entrepris avec son équipe de mesurer la quantité de matière noire dans tout l'Univers et de dresser une carte de sa distribution entre les amas de galaxies à l'aide du cisaillement gravitationnel. L'idée est de faire une étude statistique à grande échelle de la déformation des images des galaxies due à l'interaction gravitationnelle de la matière noire présente entre la Terre et ces structures, déviant les rayons lumineux envoyés par celles-ci (leur image nous arrive donc déformée). Une étude *statistique* à très grande échelle (la région du ciel étudiée était de la taille apparente de la lune et sur une profondeur de cinq milliards d'années-lumière) permet de négliger les déformations locales dues aux autres amas de galaxies.

Cette étude a abouti en mars 2000 à une première cartographie (encore<sup>[Quand ?]</sup> sous forme d'ébauche). La matière noire devrait prendre la forme de longs filaments qui s'entre-croisent, la quantité de matière de l'univers devrait représenter un tiers de celle permettant d'atteindre la densité critique, le reste étant constitué d'énergie noire.

Une nouvelle étude similaire est en cours<sup>[Quand ?]</sup>, toujours par l'équipe de Yannick Mellier, avec cette fois une caméra CCD plus grande, permettant d'étudier une surface vingt fois plus grande que lors de la première étude. Celle-ci permettra d'obtenir une carte plus détaillée de la matière noire à grande échelle.<sup>[réf. souhaitée]</sup>

## Formation des grandes structures de l'Univers

La matière noire pose de nombreux problèmes, mais peut en résoudre certains autres. On peut la faire intervenir pour expliquer la formation des grandes structures de l'univers (galaxies, amas de galaxies, superamas, etc.).

Le problème est le suivant : on suppose que peu de temps après le Big Bang, l'Univers, composé de protons, de neutrons, d'électrons, de photons et autres particules est à peu près homogène, c'est-à-dire uniforme en tout point, car sa température est trop élevée pour permettre aux particules qui forment les atomes de se regrouper. Aujourd'hui, lorsque l'on observe la répartition des objets dans l'Univers, on remarque qu'ils ne sont pas distribués de manière uniforme ; on suppose donc qu'il a fallu que de la matière se concentre un peu plus en certains endroits, formant des fluctuations que l'on appelle « fluctuations primordiales ».

Et pour repérer ces fluctuations de densité sur le fond diffus cosmologique, il suffit de repérer les différences de températures provenant de ce rayonnement fossile. La température moyenne relevée est d'environ 2,7 K. Des zones légèrement plus chaudes indiqueraient une densité de matière un peu plus forte. Il suffisait que ces fluctuations soient de l'ordre du millième de degré pour expliquer la formation des galaxies à partir de ces regroupements de matière.

Malheureusement pour cette théorie, le satellite COBE lancé en 1992 ne révéla que des variations de température de l'ordre du cent millième de degré, ce qui est bien trop faible pour que les grandes structures de l'Univers puissent s'être formées à partir de ces fluctuations primordiales en seulement 13,7 milliards d'années.

C'est là qu'on fait intervenir la matière noire pour sauver la théorie. Les protons, neutrons et électrons ne pouvaient se regrouper pour former les atomes à cause de la pression des photons. En revanche, la matière noire n'interagit pas avec les photons et n'aurait donc pas subi cette pression, ce qui lui aurait permis de créer des fluctuations de densité (invisibles) bien avant la matière ordinaire. Ces fluctuations auraient ainsi pu attirer, par gravitation, la matière ordinaire lors du découplage matière-rayonnement de la nucléosynthèse primordiale (découplage qui a libéré les photons et rendu l'Univers transparent).

Dans cette hypothèse, ce sont donc ces fluctuations de densité de la matière noire qui seraient à l'origine de la formation des galaxies et des amas de galaxies, répartis de façon non uniforme dans l'Univers.

## Nature de cette matière sombre

### Matière noire chaude et matière noire froide

Deux grandes théories s'affrontent quant à la nature de cette matière noire : la matière noire chaude et la matière noire froide. Celles-ci reposent sur la masse des particules composant la matière noire et par conséquent, à leur vitesse. Dans le cas de matière noire dite « chaude », les particules ont des vitesses proches de celle de la lumière, tandis que celles composant une matière noire dite « froide » seraient plus massives et donc plus lentes.

La vitesse de déplacement de ces particules intervient dans l'ordre de formation des grandes structures de l'Univers. Si l'Univers était dominé par de la matière noire chaude, la très grande vitesse des particules la constituant empêcherait dans un premier temps la formation d'une structure plus petite que le superamas de galaxies qui ensuite se fragmente en amas de galaxies, puis en galaxies, etc. C'est le scénario dit « du haut vers le bas », puisque les plus grosses structures se forment d'abord, pour ensuite se diviser. Le meilleur candidat pour constituer la matière noire chaude est le neutrino. En revanche, si la matière noire froide dominait l'Univers, les particules vont parcourir une distance plus petite et donc effacer les fluctuations de densité sur des étendues plus petites que dans le cas de matière noire chaude. La matière ordinaire va alors se regrouper pour former d'abord des galaxies (à partir de nuages de gaz), qui elles-mêmes se regrouperont en amas, puis superamas. C'est le scénario dit « du bas vers le haut ». Les candidats à la matière noire froide sont les WIMP et les MACHO.

Ces deux théories étaient défendues par Iakov Zeldovitch pour la matière noire chaude, et James Peebles pour la matière noire froide. Actuellement, c'est le modèle de matière noire froide qui semble l'emporter. En effet, les galaxies sont en équilibre dynamique, ce qui laisse penser qu'elles se sont créées avant les amas — dont tous ne semblent pas encore stables — à qui il faut plus de temps pour atteindre cet équilibre. Cependant, les théories introduisent aujourd'hui un peu de matière noire chaude. Celle-ci est nécessaire pour expliquer la formation des amas ; la matière froide seule ne pouvant la permettre en si peu de temps.

### Recherches du côté de la matière ordinaire

Les scientifiques se sont dans un premier temps tournés vers la matière ordinaire (ou baryonique) pour effectuer leurs recherches et ont passé en revue tous les types d'objets qui pourraient contribuer à ce champ gravitationnel, tels les nuages de gaz, les astres morts ou les trous noirs.

#### Les nuages de gaz

Dans les années 1990, des cartographies précises des sources d'émission de rayons X dans l'univers — obtenues grâce au satellite Rosat — ont mis en évidence la présence de gigantesques nuages de gaz ionisé au sein des amas de galaxies ; des nuages de plusieurs millions de degrés n'émettant pas de lumière visible. De plus, ces nuages semblaient contenir dix fois plus de matière (du moins, lumineuse) que les galaxies de ces amas, peut-être était-ce enfin la matière manquante recherchée ? Malheureusement non. Au contraire même, ces nuages sont la preuve de la présence de matière noire autour des galaxies. En effet, pour atteindre de telles températures, les particules constituant le nuage doivent être accélérées à des vitesses très élevées (environ 300 km/s), et cette accélération provient de la force de gravitation. Or la quantité de gaz est insuffisante pour générer un tel champ de gravité. De même, les étoiles ne peuvent à elles seules empêcher le nuage de gaz de s'échapper. L'influence gravitationnelle de la matière sombre est ici aussi nécessaire pour expliquer le confinement de ces nuages à proximité des galaxies. D'ailleurs, la forme de ces nuages peut aider les astronomes à étudier la distribution de la matière noire aux alentours.

### Conclusions des programmes MACHO, EROS et AGAPE

On estime que les trois quarts de la matière baryonique de l'Univers sont constitués d'hydrogène. Les nuages d'hydrogène atomique dans lesquels sont présentes les étoiles sont insuffisants pour expliquer cette forte interaction gravitationnelle qui fait tourner les étoiles en périphérie de galaxie plus vite que prévu, et ne multiplie qu'au mieux par deux la masse de la galaxie ; il manque encore au moins cinq fois la masse de la galaxie. Les astronomes se sont alors intéressés aux objets plus compacts et n'émettant pas de lumière (ou trop peu pour être détectés), tels les naines brunes (astres qui n'atteignent pas le stade d'étoile car pas assez massifs) ou les naines blanches (étoiles mortes composées d'éléments lourds). Ces objets sont appelés « MACHO », pour *Massive Compact Halo Objects* (objets compacts massifs du halo).

La théorie des naines blanches a été confortée par les travaux de B.R. Oppenheimer<sup>[9]</sup> (2001), mais fut contestée par la suite (notamment par Pierre Bergeron, 2001, 2003, 2005). Cette hypothèse reste en suspens faute de mesure de parallaxe trigonométrique et donc de distance sur les naines blanches de leur étude. D'après les travaux d'Oppenheimer, la limite inférieure de la contribution de la masse des naines blanches du halo à la masse manquante de la galaxie est de 3 %, à comparer à la limite supérieure fournie par EROS qui est de 35 %. Il existe néanmoins des problèmes avec cette hypothèse : la masse manquante des galaxies est importante et il faudrait donc dix fois plus d'étoiles mortes que d'étoiles vivantes. Or en observant dans l'espace lointain, on devrait voir des galaxies peuplées de ces étoiles encore vivantes (leur lumière nous venant d'une époque bien plus ancienne), donc des galaxies beaucoup plus lumineuses ; mais ce n'est pas le cas. De plus, la proportion de supernovæ devrait également être plus importante dans ces galaxies lointaines. Les supernovæ libérant des éléments lourds, la proportion de ces éléments devrait aussi être dix fois plus importante que celle détectée actuellement.

Pour les naines brunes, le problème était de les détecter. En 1986, l'astronome Bohdan Paczyński explique comment détecter ces objets massifs mais n'émettant pas de lumière, à l'aide de l'effet de lentille gravitationnelle. Un objet massif passant devant une étoile dévie les rayons lumineux émis par cette étoile. Concrètement, l'effet de lentille va créer une seconde image de cette étoile et la superposer à celle de l'étoile ; la luminosité devient à ce moment (lorsque l'objet passe juste devant l'étoile) plus importante. Le problème était cependant la rareté du phénomène : le nombre de chances d'observer à un instant un effet de lentille gravitationnelle dû à une naine brune (en supposant que la matière noire en est essentiellement composée) est de un sur un million.

Bénéficiant de caméras CCD à grand champ (récupérées de programmes militaires), les astronomes ont pu au début des années 1990 étudier un grand nombre d'étoiles à la fois, augmentant les chances d'observer des effets de lentille gravitationnelle. Deux programmes d'observation sont nés : EROS (Expérience pour la Recherche d'Objets Sombres) en 1990 et MACHO en 1992 ; le premier se concentrant sur la recherche d'objets moins massifs et plus petits. Ces programmes se sont arrêtés en 2003 et 2001, avec un bilan peu convaincant. Peu d'effets de lentille gravitationnelle ont été observés et les scientifiques ont dû conclure que moins de 10 % du halo de notre galaxie pourrait être formé de naines brunes, ce qui est encore une fois insuffisant.

Le programme AGAPE (*Andromeda Galaxy Amplified Pixel Experiment*) a débuté vers 1994 et avait pour but de détecter des effets de lentille gravitationnelle en observant cette fois non plus le Grand Nuage de Magellan comme MACHO et EROS, mais la galaxie d'Andromède. La distance étant plus grande, la probabilité que la lumière soit déviée par un objet compact l'est aussi. Ici aussi, peu d'effets de lentille sont observés.

### Les trous noirs

Beaucoup plus massifs que les MACHO ou les étoiles, les trous noirs auraient pu être de bons candidats. Certains d'entre eux pourraient atteindre une masse de plusieurs millions, voire de plusieurs milliards de masses solaires (notamment les trous noirs supermassifs, au centre des galaxies). Cependant, il faudrait, dans une galaxie, près d'un million de trous noirs d'une telle masse pour combler ce manque de matière ; un nombre trop important au vu des conséquences sur les étoiles à proximité d'un trou noir. En effet, les trous noirs traversent par moment le disque galactique et perturbent le mouvement des étoiles. Avec un tel nombre de trous noirs, les mouvements de ces étoiles

seraient fortement amplifiés, ce qui rendrait le disque galactique bien plus épais que ce qui est observé actuellement. Restent les trous noirs stellaires (de l'ordre de quelques masses solaires), difficilement détectables, et les trous noirs de quelques dizaines ou centaines de masses solaires, dont la nature de la formation reste encore mystérieuse. Dans tous les cas, la piste des trous noirs comme étant la fameuse matière noire a été délaissée, et les astronomes se sont penchés sur une autre forme de matière, non baryonique.

## De la matière non baryonique

La théorie du Big Bang permet de calculer le nombre de baryons de tout l'Univers, c'est-à-dire le nombre d'atomes d'hélium 4 et d'hydrogène, formés lors de la nucléosynthèse primordiale. Les astronomes en sont arrivés à un taux de matière baryonique d'environ 4 % de la densité critique. Or, pour expliquer la géométrie plate de l'Univers, la matière totale de l'Univers doit représenter 30 % de la densité critique (les 70 % restants étant de l'énergie sombre). Il manque donc 26 % de la densité critique sous forme de matière non baryonique ; c'est-à-dire constituée par d'autres particules que les baryons.

### Le neutrino

Le neutrino est une particule postulée pour la première fois en 1930 par Wolfgang Pauli, avant même la découverte du neutron (un an plus tard), et qui fut détectée en 1956 par Frederick Reines et Clyde Cowan. Cette particule — insensible aux forces électromagnétiques et à la force nucléaire forte — est émise lors d'une désintégration bêta, accompagnée d'un anti-électron, également appelé positron. Le neutrino interagit donc très peu avec les autres particules, ce qui en fait un bon candidat pour la matière noire.

La masse du neutrino était estimée très faible, voire nulle, jusqu'à la fin des années 1990. Avec le problème de la masse manquante de l'Univers, les physiciens se sont demandé si le neutrino n'avait peut-être pas une masse, faible, mais non nulle qui pourrait expliquer cette masse manquante. D'autant plus que le neutrino est la particule la plus abondante dans l'univers, après le photon. Cependant, les expériences Super-Kamiokande et SNO (*Sudbury Neutrino Observatory*) ont révélé une masse beaucoup trop faible pour que cette particule puisse constituer l'essentiel de la matière noire. Les neutrinos peuvent représenter, au mieux, 18 % de la masse totale de l'Univers.

Une nouvelle hypothèse ressurgit<sup>[10],[11],[12]</sup>, suite à l'observation d'une anomalie sur les flux de neutrinos de réacteurs, sous la forme de nouvelles saveurs de neutrinos, s'ajoutant aux trois saveurs connues. Ces nouveaux neutrinos, des neutrinos stériles, auraient une masse beaucoup plus importante que les neutrinos classiques, et aucune interaction physique (hormis la gravitation) avec la matière ordinaire. En outre, ces neutrinos stériles pourraient osciller avec les saveurs e, mu et tau.

### Les WIMP

Les WIMP (*Weakly interactive massive particles*) forment une classe de particules lourdes, interagissant faiblement avec la matière, et constituent d'excellents candidats à la matière sombre non-baryonique. Parmi celles-ci on trouve, le neutralino postulé par les extensions supersymétrique du modèle standard de la physique des particules. L'idée de la supersymétrie est d'associer à chaque boson un fermion et vice versa. Chaque particule se voit donc attribuer un super-partenaire, ayant des propriétés identiques (masse, charge), mais avec un spin différent de 1/2. Ainsi, le nombre de particules est doublé. Par exemple, le photon se retrouve accompagné d'un photino, le graviton d'un gravitino, le neutrino d'un sneutrino, l'électron d'un sélectron, etc. À la suite de l'impossibilité de détecter un boson de 511 keV (partenaire de l'électron), les physiciens ont dû revoir l'idée d'une symétrie exacte. La symétrie est dite brisée et les superpartenaires se retrouvent avec une masse très importante. L'une de ces superparticules appelée LSP (*Lightest Supersymmetric Particle*) est la plus légère de toutes. Dans la plupart des théories supersymétriques, dites sans violation de la R-parité, la LSP est une particule stable car elle ne peut se désintégrer en un élément plus léger. Elle est de plus neutre de couleur et de charge électrique et donc uniquement sensible à l'interaction faible ; elle constitue à ce titre un excellent candidat à la matière sombre non-baryonique.

Cette particule supersymétrique la plus légère est en général (en fonction des modèles), le neutralino, une combinaison de ces superparticules : le photino (partenaire du photon), du zino (partenaire du boson  $Z_0$ ) ou des higgsinos (partenaires des bosons de Higgs). Les mesures récentes au CERN indiquent que sa masse est supérieure à  $46 \text{ GeV}/c^2$  [13]. La LSP peut également être un sneutrino ou un gravitino (dans le cadre de certaines théories pour lesquelles la brisure de supersymétrie se fait par médiation de jauge). La LSP est stable (sans violation de la R-parité) donc très abondante au point de représenter l'essentiel de la matière de l'Univers. Elle fait à ce titre l'objet de nombreuses recherches. La détection de matière noire peut être directe, par interaction dans le détecteur, ou indirecte, via la recherche des produits d'annihilation.

La détection de matière sombre supersymétrique est un domaine de la physique extrêmement dynamique, en particulier du point de vue des techniques. La localisation des détecteurs est à l'image de cette diversité : en orbite terrestre (AMS, PAMELA), sous la glace du pôle Sud (AMANDA, IceCube), en milieu marin (ANTARES), ou encore dans les laboratoires souterrains (EDELWEISS, MIMAC, PICASSO (en)).

## Notes et références

- [1] Particules et Univers : observation, données, information (<http://www.cnrs.fr/prg/PIR/programmes/PetU/descrprogr.htm>), site du CNRS - Note : le lien vers le site du CRNS est brisé, il faut donc passer par le lien d'archive.
- [2] site de la NASA 2 ([http://map.gsfc.nasa.gov/m\\_mm/mr\\_limits.html](http://map.gsfc.nasa.gov/m_mm/mr_limits.html)).
- [3] consultable également sur table des constantes astrophysiques.
- [4] Les astronomes tracent une nouvelle carte de la « matière noire » de l'univers, par Terry Theodore, La Presse Canadienne (<http://web.iffrance.com/actu/science/170864>).
- [5] CDMS : la matière noire reste dans l'ombre ([http://www.futura-sciences.com/fr/news/t/physique-1/d/cdms-la-matiere-noire-reste-dans-lombre\\_21907/](http://www.futura-sciences.com/fr/news/t/physique-1/d/cdms-la-matiere-noire-reste-dans-lombre_21907/)).
- [6] (<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0370269309013525>), sciencedirect.com, mis en ligne le 12 novembre 2009.
- [7] David Larousserie, *Deux pas de plus vers la matière noire*, Sciences et avenir, .
- [8] Pas de matière noire pour LUX ([http://www.pourlascience.fr/ewb\\_pages/a/actu-pas-de-matiere-noire-pour-lux-32369.php](http://www.pourlascience.fr/ewb_pages/a/actu-pas-de-matiere-noire-pour-lux-32369.php))
- [9] (<http://www.sciencemag.org/content/292/5517/698.abstract>) - B. R. Oppenheimer , Science - Avril 2001.
- [10] Louis W.C., Nature 478, 328–329 (20 October 2011)
- [11] Kopp, J., Maltoni, M. & Schwetz, T. Phys. Rev. Lett. 107, 091801 (2011)
- [12] Mention, G. et al. Phys. Rev. D 83, 073006 (2011)
- [13] "Particule Data Group" live 2007, <http://pdglive.lbl.gov/Rsummary.br?nodein=S046&exp=Y&fsizein=1>

-  Portail de l'astronomie
-  Portail de la cosmologie

# Accélération de l'expansion de l'Univers

---

L'**accélération de l'expansion de l'Univers** est le nom donné au phénomène qui voit la vitesse de récession des galaxies par rapport à la Voie lactée augmenter au cours du temps. Ce phénomène a été mis en évidence en 1998 par deux équipes internationales, le Supernova Cosmology Project, mené par Saul Perlmutter<sup>[1]</sup>, et le High-Z supernovae search team, mené par Adam Riess<sup>[2]</sup>, ce qui leur vaut le Prix Nobel de Physique 2011<sup>[3]</sup>.

## Découverte

Cette découverte a été faite en mesurant ce que l'on appelle la distance de luminosité d'astres dont la magnitude absolue est supposée connue : les supernovas de type a. La relation entre distance de luminosité et décalage vers le rouge de ces objets permet de reconstituer l'histoire de l'expansion de l'Univers sur plusieurs milliards d'années, et de voir de la sorte si l'expansion de l'Univers accélère ou décélère avec le temps. Par accélération ou décélération de l'expansion, on entend ici l'évolution de la vitesse d'augmentation de la distance relative entre deux galaxies lointaines.

## Hypothèses explicatives

L'interprétation la plus simple de la découverte de l'accélération de l'expansion de l'Univers est qu'il existe dans l'Univers une forme d'énergie, traditionnellement appelée énergie noire (ou énergie sombre, traduction dans un cas comme dans l'autre du terme anglais *dark energy*) aux propriétés atypiques, puisque sa pression doit être négative. La nature exacte de cette énergie noire n'est pas connue à ce jour, mais plusieurs candidats possibles existent. Le plus simple d'entre eux est la constante cosmologique, mais il en existe d'autres comme la quintessence. Cependant, aucune détection directe de cette énergie ne semble envisageable à l'heure actuelle, seule son influence gravitationnelle à très grande échelle étant mesurable.

## Conséquences

Ce phénomène d'accélération indique que le destin de l'Univers sera probablement un univers éternellement en expansion, de plus en plus froid et de plus en plus vide, par opposition au Big Crunch. Cependant, parmi les candidats possibles à l'énergie noire, l'un d'eux, appelé énergie fantôme, pourrait mener à un scénario cosmologique dans lequel l'accélération de l'expansion de l'Univers s'accompagnerait d'une augmentation de sa densité, laquelle atteindrait en un temps fini une valeur infinie, signant à ce moment-là la fin de l'Univers. Ce curieux modèle est communément appelé Big Rip.

Malgré la quasi unanimité actuelle apparente des cosmologistes autour de l'idée de l'accélération de l'expansion, la réalité de cette accélération ne sera établie que lorsque le phénomène pourra être inclus dans un cadre théorique solide, lequel fait encore défaut.

## Notes et références

- [1] Saul Perlmutter *et al.*, *Measurements of Omega and Lambda from 42 High-Redshift Supernovae*, *Astrophysical Journal*, **517**, 565-586 (1999), astro-ph/9812133 Voir en ligne (<http://fr.arxiv.org/abs/astro-ph/9812133>).
- [2] Adam G. Riess *et al.*, *Observational Evidence from Supernovae for an Accelerating Universe and a Cosmological Constant*, *Astronomical Journal*, **116**, 1009-1038 (1998), astro-ph/9805201 Voir en ligne (<http://fr.arxiv.org/abs/astro-ph/9805201>)
- [3] The Nobel Prize in Physics 2011 awarded to Saul Perlmutter, Brian P. Schmidt, Adam G. Riess ([http://www.nobelprize.org/nobel\\_prizes/physics/laureates/2011](http://www.nobelprize.org/nobel_prizes/physics/laureates/2011)) nobelprize.org

# Sources et contributeurs de l'article

**Astronomie** *Source*: http://fr.wikipedia.org/w/index.php?oldid=103818175 *Contributeurs*: (anonyme2), 120, Achiille, Acélan, Aioxy, Alain r, Alecs y, Alkashi, Alno, Alphos, Alvaro, AméliorationsModestes, Anarchimede, Anne Bauval, Anthere, Archeos, Arnaud713, Astronomie02, Astronomie18, Astronomie22, Astrée, Aymeric78, Banditdenuit, Baronnet, Biem, Bilou, Bisoud, Bob Saint Clar, Bob08, Bub's, Canal Académie, Cantons-de-l'Est, Cfoellmi, Chico062, ChtiTux, Ci-gît le sage, Clavius, Clemastronomie, Cmagnan, CommonsDelinker, Courouve, Crochet.david, Céphide, Céréales Killer, Dandevost, Darkonek, David Berardan, David Latapie, De-Eve, Derkleinebaueraufdemriesigenschachbrett, Dfeldmann, Dhenry, DocteurCosmos, Dr Eric Simon, Draky, EDUCA33E, Ediacara, Edmond Wells, Ektoplastor, Emirix, Emmanuel legrand, Enzo, Estonius, EyOne, FIOCRET, Fafnir, Felix Gagnon, Felixlambert8, Fisto, Flic, Florian, Flying Jer, FoeNyx, Foudebassans, Frakir, Francis, FredA, FripOuille69, GL, GLec, GaMip, Gede, Gemini1980, Gemme, Gene.arboit, Goban, Graffity, Grecha, Gribeco, Grigg Skjellerup, Grimlock, Guaka, Guillaume70, Guillom, H.G ANTON, HB, Haltopub, Hemmer, Ioonos, Iznogood, JKHST65RE23, JLM, JLTB34, Jarfe, Jd, Jean-Louis Lascoux, JohnD, Jrmgtc, Jyp, JzG, Kanabiz, Kelson, Kepler69, Khadijatou2, Kicom, Kneiphof, Korg, Kosame, Kummuk, LRnet, Laddo, Lamiot, Laurent Nguyen, Le Père Odin, Le pro du 94 ), LeMorvandiau, LeYaYa, Leag, Like tears in rain, Linguiste, Litlok, Lmaltier, Loison, Lol612, Lomita, Looxix, Loveless, Lyondif02, MALPAS, MG, MIMATA, Maloq, Marc Mongenet, Martinwilke1980, MatP, Mattho69, Mazinga, Med, Medium69, Meodudlye, Meszigues, Michele, Mimi3131, Mir, Mizalcor, Mro, NCG6543, Nataraja, Nebula38, NeptuneGalaxy, Ngc891, Nias, NicoV, Noritaka666, Notafish, Néfermaât, O. Morand, Oblic, Oliviermarco, Orthodoxe, Orthogaffe, Oxam Hartog, P-e, Pabix, Pautard, Peter17, Phe, Pixeltoo, Pld, Poildoiseau, Pok148, Poleta33, Poppy, Pseudomoi, Pulsar, Pumba-xx, R. Raou89, Ratigan, Restefond, Reviens Léon !, Rhadamante, Rmax59, Robin Hood, Rominandreu, Roymail, Ryo, RémiH, STYx, Salsero35, Sam Hocevar, Sebleouf, Semnoz, Shaikulud, Simon Villeneuve, Simorg, Skippy le Grand Gourou, Smirtar, Speculos, St Malo, Stanlekub, Sting, Suisui, Sum, Suprememangaka, Sval, Theoliane, Thesupermat, Tibo, Ton1, Traroth, Treanna, Turb, TwoWings, Universstower, Ursus, VIGNERON, Vache, Valérie75, Valéry Beaud, Veilleur, Verber, Vero89, Vivarés, Vlaam, VonTasha, Warinhari, Weft, Woww, XaVieR, Yannk, Yolanc, Youssefsan, Yukito, Yves, Zar2, Zetud, Zubro, script de conversion, 444 modifications anonymes

**Big Bang** *Source*: http://fr.wikipedia.org/w/index.php?oldid=104957983 *Contributeurs*: (:Julien:), A455bcd9, ACGT, Abu Hamzah, Abu mohamed59, Aeleftherios, Agrafian Hem Rarko, Alain r, Alvaro, Anby, Aoineko, Aquabon, Archibald, Argon1234, Arnaudus, ArnoLagrange, Arria Belli, ArsenePlus, ArséniureDeGallium, Aruspice, Asram, Balougador, Barbebleutee, Barraki, Baruch, Benjism89, Bernardilt, Bibi Saint-Pol, Bob kennedy, Bob08, Bonjour c'est moi, Borensztejn, Boréal, Boud1, Bouligab, Bserin, CHEFALAIN, Camion, Carlo denis, Castafior, Cdag, Cfoellmi, Chaps le idol, Chevreuilobservateur, Chouchouette, Chris93, Christophe Dioux, Christophe Marcheux, Christophe cagé, Chtit draco, Cjp24, Clar, Clatourre, Cln-id, Cm8, Cmagnan, Coloch, Copyleft, Coyote du 86, Creasy, Critias, Croquant, Cutter, Cyberugo, DainDwarf, Daniel\*D, David Berardan, Ddardenne, Deep silence, Dfeldmann, Dhenry, Didierv, DocteurCosmos, Dodop05, Dodot, Dom, DominiqueM, Dr Brains, Duch, Déliurus, EDUCA33E, Emeripro, Emmanuel legrand, En passant, EoWinn, Erasoft24, Erwan7791, Escaladix, Esprit Fugace, EyOne, Farren, Fm790, Fr sabourin, Frakir, Frange, Mutatis mutandis, Mutichou, Mwarf, N0osphr, NVar, Naden, Naevus, Nairoo.brain, Nakor, Nanoxeye, Nataraja, Neitsa, Neuceu, Neuroancien, Nguyenld, Nias, Nicnac25, NicolasDelerue, Nk, Nodulation, Nohky, Nonof64, Olivier d'ALLIVY KELLY, Orlodrim, Orthogaffe, Overmac, Ovnize, Oxag, Oxo, Pabix, Padawane, Papier K, Patrine, Pautard, Phe, Phido, Pichasso, Pierrot Lunaire, Pinpin, Pioneer6014, PivWan, Pld, Ploum's, Poleta33, Poppy, Ptrf, Pérez, R. Rama, Recyclage, Reelax, Reichsthan, Rhizome, Rigux, Rogilbert, Romanc19s, Rominandreu, Roudoule, Régis B., RémiH, STYx, Saimonn, Sakharov, Sam Hocevar, Samm, Sammyday, Schiste, Schlum, Scribere, Sebleouf, Sebmeyral, Serged, Shaikulud, Sidoine, Sismarinho, Ske, Smash-Fan, Snake3838, Solensean, Sophocle, Stanlekub, Stephane.lacorne, Strologoff, Stélias, Suprememangaka, Sylvia Defelis, Symac, Tabulation, Tavernier, Tejgad, The Titou, Thorondor, Titenaggie, Toan0, Tognopop, Touriste, Tpa2067, Trassiorf, Trusty, Tython, Ududrudu, Ugte, Ukulele, Username9, Utl, Vazkor, Vincnet, Vlaam, Wanderer999, Warinhari, WarmUp, Wart Dark, Webkid, Wictorya, Wiki7791, Wikig, Wku2m5rr, Xavier Combelle, Xic667, Xiglofre, Xmaxx, Ysidlo, Yugiz, Zakke, Zanolxis, Zeld, Zieme, 449 modifications anonymes

**Galaxie** *Source*: http://fr.wikipedia.org/w/index.php?oldid=103773105 *Contributeurs*: A3 nm, Abracadabra, Alain r, Alain0, Alchemica, Alibaba, Anarchimede, Anthere, ArchangelOneWolf, Archimèa, ArséniureDeGallium, Astronomie de Meudon, Astronomie05, Astronomie21, Bschaefter, Bastien Sens-Méyé, Bataulian, Bernardilt, Bibi Saint-Pol, Bob Saint Clar, Caton, Chatsam, Citizen59, Cjp24, Clara-galaxie, Clatourre, CommonsDelinker, Copyleft, Coyau, Coyote du 86, Curry, Cutter, Cyberprout, Célestin Moreau, Céréales Killer, DEER1234, Darkoneko, Defnael, Denis Dordoigne, Derkleinebaueraufdemriesigenschachbrett, Dhatier, Dhenry, DocteurCosmos, Domsau2, Dricokit, Emmanuel, Emmanuel legrand, Esprit Fugace, Excesilior, Fcombes, Flakir23, Flying jectet, Frakir, GLec, Gemme, Ginosal, Gonioul, Goodshort, Graffity, Grigg Skjellerup, Grim Reaper, Guillaume70, Haltopub, Henriparisien, Herr Satz, Hibisco-da-Ilha, Huns, IAP Astro, ImhotepJ, Internetive, JLM, Jarfe, Jerome66, Jeromelap56, Jmc, Jmp48, Joker-x, Jotun, Jpchevreau, Jules78120, Jusjih, Jyp, Kekelenul, Kelson, Kikuyu3, Korrigan, Kosame, Lamio, Le sourcier de la colline, LeYaYa, Leag, Lemon5, Lenaic, Lithium57, Loccus, Lomita, Looxix, Loulou09012001, Loveless, MG, Malta, Manuguf, Marc Mongenet, Martinwilke1980, Matcomps, Maxouruis, Med, Medium69, Meodudlye, Mescalain, MetalGearLiquid, Mimi46, Moala, MohamedSaheed, Mondorcet, Morphygnos, NeptuneGalaxy, Ngc224, Nguyenld, Nias, Ninjaxyaya, Okki, Olivier Hammam, Orthogaffe, Ours Polaire, P. S. F. Freitas, Paf92, Patreides, Patrine, Pautard, Phe, Pinocchio007, Pinpin, Pld, Pline, Plyd, Pontauxchats, Pseudomoi, Ratatoks, Restefond, Romanc19s, Rominandreu, Ryo, RémiH, Sam Hocevar, Sanao, Sardur, Sbrunner, Semnoz, SenseiAC, Serva80, Settimo, Simon Villeneuve, Sisyph, Smish0111, Stanlekub, Stéphane33, Taguelmoust, Teofilo, The RedBurn, Thierry Caro, Topel, Traroth, Urhixidur, Vincent Ramos, Vincent.vaquin, Vol de nuit, Zandr4, Zaver, Zeld, Zetud, Zubro, 181 modifications anonymes

**Évolution stellaire** *Source*: http://fr.wikipedia.org/w/index.php?oldid=102005283 *Contributeurs*: Alain r, Anarchimede, BenduKiwi, BenoitMosser, Bruce gendre, CD, Cantons-de-l'Est, ComputerHotline, Copyleft, Coyote du 86, Céréales Killer, David Berardan, Dfeldmann, Dhatier, Dhenry, Enogael, FoeNyx, GaMip, Gemme, Guillaume70, Gzen92, JB, JeanClem, Ji-Elle, JohnD, Kambei, Kervagen, Kikuyu3, Kokin, Kropotkine 113, LeYaYa, Litlok, Maitre obi-wan kenobi, Mathieuw, Med, Medium69, MetalGearLiquid, Metroglaf, Narsh, Nataraja, Orholam, Passoa15, Phe, Pld, Popolito, Porche, Poulpy, Rinjin, Romanc19s, Rominandreu, Ryo, Sanao, SenseiAC, Simon Villeneuve, Spooky, Stanlekub, StarObs, Tikaw, Traroth, Trassiorf, Vglenny, Yolanc, 60 modifications anonymes

**Amas globulaire** *Source*: http://fr.wikipedia.org/w/index.php?oldid=101478684 *Contributeurs*: Archimèa, Ash Crow, Boro72, Cantons-de-l'Est, Chaoborus, Clatourre, CommonsDelinker, Dfeldmann, Eric.LEWIN, Franki88, Gadjou, Gauss, Gemme, Guillaume70, JB, Jean-François Clet, Jean-Paul Scandariato, Jef-Infojef, Jistrum, Kosame, Lib75, Looxix, Loveless, Maitre So, Marc Mongenet, Mathieuw, Med, MohamedSaheed, MuDavid, Natchouf, Necrid Master, Nonof64, Orthogaffe, Pino, Pld, Riba, Sbrunner, Simon Villeneuve, Sonusfaber, Stanlekub, Tamtam, Tarap, Thewayforward, Zepolak, 10 modifications anonymes

**Étoile à neutrons** *Source*: http://fr.wikipedia.org/w/index.php?oldid=105324429 *Contributeurs*: Aboumael, Aither, Alain r, Anarchimede, Andre Engels, Andre315, Ange Gabriel, Artvill, Bastien Sens-Méyé, Cantons-de-l'Est, Cham, Chaoborus, Clashman, Coyau, David Berardan, Dhatier, Dhenry, DominiqueM, Domsau2, Droung, Enogael, Francois Trazzi, Gene.arboit, Graffity, Gribeco, Grimlock, Grum, Gzen92, Héman, Iafss, Iznogood, Jean tiberghien, Jerome66, Kelson, Klemen Kocjancic, Le Père Odin, Leandrod, Litleur JL, Litlok, Looxix, Masrab, Med, Medium69, Melkor73, MetalGearLiquid, Mnémosyne, NeptuneGalaxy, Neuceu, Orthogaffe, Palica, Pamputt, Panoramax, Papier K, Paskalo, Pld, Poulpy, Remike, Rhadamante, Rominandreu, Régis B., RémiH, Saint-martin, Sguillot, Skiff, Stanlekub, Sum, Tavernier, Tikaw, ToutSavoir, Vincen, VonTasha, Wku2m5rr, Xiglofre, Xmlizer, Zeld, 52 modifications anonymes

**Quasar** *Source*: http://fr.wikipedia.org/w/index.php?oldid=105416609 *Contributeurs*: 12.28.55.xxx, Aboumael, Aeterna, Alain r, Alain843, Anarchimede, Andre Engels, Arrakis, Bharati, Bob Saint Clar, Bunrop, CielProfond, Clatourre, Desiderius Severus, Desirebeast, Didier Misson, EDUCA33E, Fdfdfdfd, Fmt, Frifrou, FvdP, GLec, GaMip, Grandtort, Haltopub, Hdnoel, Hercule, Herr Satz, Iafss, JB, Jean-Christophe BENOIST, Jef-Infojef, Jmax, Kelson, Kropotkine 113, Lachaume, Lithium57, Lolxldol123, Lomita, Looxix, Lucquessoy, Marcus Magus, MathsPoetry, Med, Medium69, Meodudlye, MohamedSaheed, Nguyenld, Numbo3, Orthogaffe, Pamputt, Paulo892, Pautard, Penangol, Pic-Sou, Pld, Plus-que-parfait, Qr189, Rogilbert, RémiH, Sam Hocevar, SenseiAC, Settimo, Sirthie, Titan dweevil, Titulutin, Tokerboy, Tonymainaki, Warinhari, Weft, XaVieR, Xmaxx, Zibou2, script de conversion, 59 modifications anonymes

**Expansion de l'Univers** *Source*: http://fr.wikipedia.org/w/index.php?oldid=103725496 *Contributeurs*: A2, Alain r, Aleph0, ArchCarrier, Arnaudus, BasEI, Bibi Saint-Pol, Borensztejn, Boud1, Bschalck, Ceedjee, Cehagenmerk, Cham, Chris a liege, Cmagnan, Céphide, David Berardan, Dfeldmann, Dhenry, Elfix, Feldo, GLec, Grum, Gz260, IAlex, JLM, JMO, Jean-Christophe BENOIST, Jyp, Kirill, Kyro, LeYaYa, Leszek Jańczuk, Letartean, LilyKitty, Lithium57, Lomita, Looxix, Lylyvic, MIRROR, Marianne.messineo, Medium69, Michel421, Mimi3131, Mr. Mojo, Neef, Neitsa, Nias, Nicombo, Niral, Orthogaffe, OXTaz, Phe, Pierre-Alain Gouanvic, Pld, Ploovo, Quentin57, Rogilbert, Romanc19s, Rominandreu, Ryo, SenseiAC, Sergelucas, Serthbrooke, Vazkor, Xavoux, Zejames, 57 modifications anonymes

**Trou noir** *Source*: http://fr.wikipedia.org/w/index.php?oldid=105468277 *Contributeurs*: 3pi14, 5847, A.Schneider83, Abracadabra, Adevin, Alain r, Albinflo, Alchemica, Alex-83, Aliasin, Alno, Alonso, Anarchimede, Antares, Antoinesubit, Antoinou2958, Aoineko, Archibald, Archimède, Arglanir, Arkestra, Arnaud.Serander, ArséniureDeGallium, Astronomie10, Astronomie21, Azer1234, Banzai, Bap, Bastien Sens-Méyé, Bdec, Bibi Saint-Pol, Bigomar, Bloody-libu, Bob kennedy, Bob08, Boretti, Boud, Bouette, Bourrichon, Bradipus, Bublegun, C Patrick, Calo, Cam-Ann, Cantons-de-l'Est, Carbone14, Cbigorgne, Ceedjee, Celette, Cfoellmi, Chacal65, Cham, Chaps the idol, Chphe, Chris93, Christophe Dioux, Christophe cagé, Clashman, Clatourre, CommonsDelinker, Copyleft, Coyau, Cri minal, Croquant, Crouchineki, Cutter, Cyberugo, Céréales Killer, D4m1en, DENIS 48, DSCH, Daehan, David Latapie, De Wikischim, Deep silence, Denis Dordoigne, Denys, Dfeldmann, Dhenry, DocteurCosmos, Eden2004, Ektoplastor, Elfix, Emmanuel legrand, En passant, Erasoft24, Escaladix, Esnico30, Esprit Fugace, Etiennckd, EyOne, Fabelle Ferrer, Farfur, FitzSai, Frakir, Freefater, GaMip, Gem, Gnarg, Graffity, Gribeco, Gremuou3000, Grimlock, Gronico, Grum, Guidark, Guillaume70, Guillom, Géoudde, HAF 932, HERMAPHRODITE, Hemmer, Herr Satz, Hiici, Holycharly, Hompe, Héman, ILJR, Ico, Indeed, Inisheer, Isaac Sanolnacov, Ixnay, J-Luc, JB, JLM, Jamin389, JayMark24, Jaylowblow, Jd, Jean tiberghien, Jean-Christophe BENOIST, Jef-Infojef, Jerome66, Jibi44, Jmc, Jo phh, Jo222, JohnD, Jotun, Jplm, Jules78120, Julz42, Karlyne, Kelson, Kelthro, Kewal07, Kilith, Koko90, Kyle the

hacker, La Menaz, Lachaume, Laocian, Lapinplayboy, Laroche, Last Universal Common Ancestor, Laurent Nguyen, Laurent75005, Le Fanatique Supraluminique, Le Galéanthrope, Le Grizzly, Le sotré, LeYaYa, Leag, LeonardoRob0t, Letartean, Leuzay, Lithium57, Litlok, Lmaltier, Lomita, Looxix, Lotaki, Luc7418, Ludo29, Lycanthrope, Lylvic, MIRROR, Madysse, Maggic, Maitre So, Malost, Malta, Marc Mongenet, Marcv7, Maurilbert, Mazeppa, Med, Medium69, Melkor73, Meodudlye, MetalGearLiquid, Mfarad, Mith, Moez, Moyogo, Mustachok, Mutatis mutandis, Naddy, Naevus, Nataraja, Nebula38, Necrid Master, Neef, Nehau21, Neosis, NeptuneGalaxy, Neuceu, Nguyenld, Nias, NicoRay, Nicolas Lardot, Nicolas.le-guen, Nicolas998, Nk, Nono64, NucleoS, Nykozof, OdIn, Old Fred Hunter, Orthogaffe, Ourartou, PV250X, Padawane, Paf92, Papatt, Parmentier, Patreides, Patrick Wautier Bruxelles Belgique, Pautard, Pem, Penegal, Penjo, Perditax, Peter 111, Ph.lalanne, Phe, Phido, Phil.croix, Pichoone, Pld, Poppy, PourlaScience, Puceturvitaminee, Punx, Pymouss, R, Raude, Reclame, Rege, Rene1596, Restefond, Rical, Rober230802, Rogilbert, Romanceor, Rome2, Rominandreu, Roudoule, Ryo, RémiH, Salsero35, Sam Hocevar, Samuel Jourdain, Sbrunner, SenseiAC, Settimo, Sherbrooke, Sierion Hazza, Simon Villeneuve, Sirthie, Skull33, Sorw, Stanlekub, Strato, Super Bazooka, Symbolium, Tboop, Thierry-1, TigH, Titlutin, Topeil, Tornad, Treanna, Udufruduh, Unkky, VIGNERON, Vajrallan, Vargenau, Vincent Ramos, Wagaf-d, Wart Dark, Weft, Wictorya, Wikinade, Woww, Xavier Armendaritz, Xmanu, Yann, Zeld, Zertrin, Zogdar, Zweistein, <sup>29100</sup>, Émi07, 492 modifications anonymes

**Fond diffus cosmologique** *Source*: <http://fr.wikipedia.org/w/index.php?oldid=104348405> *Contributeurs*: Abracadabra, Alain r, Arnaud.Serander, BadGoliath42, Barraki, Cantons-de-l'Est, Coyote du 86, Deep silence, Denis Dordoigne, Dhenry, Diraison, Drbogdan, Démocrite, Eirinna, Esprit Fugace, Feldo, Frédéric Mahé, GaMip, Gemme, Gene.arboit, Grigg Skjellerup, Gzen92, HERMAPHRODITE, JSDX, Jautro, Jean-Christophe BENOIST, JeanClem, Jef-Infojef, Jerome66, JmCor, Le Père Odin, LeYaYa, Leag, Litlok, MIRROR, Manu285, Med, Mschindwein, Olivier Hammam, Overmac, Papier K, Pautard, Phe, Piku, Pld, Ploum's, Poulos, Psaxl, Quark67, Rogilbert, Rominandreu, RémiHendrix, RémiH, Sherbrooke, Skippy le Grand Gourou, Smeett666, Stanlekub, THF, Tieno, Ulysse2000, Xofc, ZeJames, Zivi, -Pyb, 74 modifications anonymes

**Astrophysique** *Source*: <http://fr.wikipedia.org/w/index.php?oldid=99149820> *Contributeurs*: Adrien59cadri, Alain r, Alibaba, Anarchimede, Arnaud Lapointe, Astrophysique, Bastien Sens-Méyé, Bob08, Borensztein, Borus, Cantons-de-l'Est, Casiro, Chaps the idol, Chatsam, Clemastronomie, CommonsDelinker, Crochet.david, Crom1, David Berardan, E Bernal, Erasmus, Farcena01, Florentziva, Asecgy, Astroman95, Bdc43, Bertol, Bifri, Bob kennedy, Bobodu63, Boud1, Burgundavia, Byrd, CR, Cantons-de-l'Est, Captain Waters, Carbone14, Carlotto, Castafior, Caton, Cchantep, Cfoellmi, Chelin, Chocho229, Christophe95, Chtfn, Cjp24, Claus Ableiter, Copyleft, Crom1, Curry, Cyberugo, Céréales Killer, Darkoneko, Darksadow, Deuxtroy, Dhatier, Dhenry, DocteurCosmos, Du431, Dubble, Edmond Wells, Emeripro, Enogaël, Esprit Fugace, Eufupion, Euwefep9, Fafnir, Fransoua69, Franz53sda, François-Karim, Gem, Gemme, Ggl3x, Gordjazz, Greguar, Gribecco, Grondin, Grook Da Oger, Guiguidu60, Guillaume70, Guillom, Guix77, Guérin Nicolas, Gz260, G6T6, HB, HacKFr0t, Harmonia Amanda, Hello Camille, Hercule, Hégésippe Cormier, Imboloss, Ion.sotiroopoulos, Itemquite, Iznogood, JLM, Jarfe, Jastrow, JeanClem, Jurik42, Keanur, Kelson, Kikuyu3, Kiliti, Kilom691, Kirill, Koyuki, Kropotkine 113, Kyro, Laurent75005, Le Père Odin, Le pro du 94 :, LeMorvandiau, LeYaYa, Leag, Leszek Jaficzuk, Letartean, Leuviah, Lilyu, Lomita, Looxix, Ludopedia, Lysosome, M63, Macdav fr, Madelgarius, Maggic, Mainiou, Malecki, Malta, Mandrak, Marc Girod, Marc Mongenet, Markadet, Markov, Martinwilke1980, Mat956, Med, Medium69, Mehdtamel, Mekong Bluesman, Meodudlye, MetalGearLiquid, Michel421, Michelet, MicroCitron, Mightymights, MohamedSaheed, Moumouss13, Myos, Mysterius, Nanoxyde, Neoxelle, NeptuneGalaxy, Neuceu, Nguyenld, Nicolas Lardot, Nina Gerlach, Nodulation, Noritaka666, Néfermaît, Oblic, Olivier411, Olmec, Orlodrim, Orthogaffe, OuechTonton, Patrice Icard, Paulokoko, Pautard, Pemelet, Phe, Phitu, Pichgru, Pld, Ploum's, Pmiize, Polylepsis, Psychoslave, Quentinv57, Rabadala, RamiK, Remy34, Rhadamante, Roby, Romanm, Rominandreu, Roymail, Rudzaw, RémiH, Sadik69, Sam Hocevar, Sanao, Schiste, Scribere, Sebleouf, SenseiAC, SenseiSam, Settimo, Sevenstones, Sherbrooke, Shidorian, Speculos, Spoirier, Stanlekub, Stéphane33, Suprememangaka, Tatoute, Teeppix, Thémistocle, Tiiliskivi, Treanna, Tulipe-qui-pagaie, Universume, Yk, Warinhari, Wart Dark, Wictorya, Woww, X-or, Xfigpower, Xofc, Yolanc, Yves, Zhonghuo, Zoldik, Éric Messel, Ω, 266 modifications anonymes

**Univers** *Source*: <http://fr.wikipedia.org/w/index.php?oldid=102341655> *Contributeurs*: A3 nm, Abracadabra, Akeron, Aladin34, Alain r, Alexdestroy, Alterac, Anarchimede, Angela, Arnaudus, Aruspice, Asabengurtza, Asecgy, Astroman95, Bdc43, Bertol, Bifri, Bob kennedy, Bobodu63, Boud1, Burgundavia, Byrd, CR, Cantons-de-l'Est, Captain Waters, Carbone14, Carlotto, Castafior, Caton, Cchantep, Cfoellmi, Chelin, Chocho229, Christophe95, Chtfn, Cjp24, Claus Ableiter, Copyleft, Crom1, Curry, Cyberugo, Céréales Killer, Darkoneko, Darksadow, Deuxtroy, Dhatier, Dhenry, DocteurCosmos, Du431, Dubble, Edmond Wells, Emeripro, Enogaël, Esprit Fugace, Eufupion, Euwefep9, Fafnir, Fransoua69, Franz53sda, François-Karim, Gem, Gemme, Ggl3x, Gordjazz, Greguar, Gribecco, Grondin, Grook Da Oger, Guiguidu60, Guillaume70, Guillom, Guix77, Guérin Nicolas, Gz260, G6T6, HB, HacKFr0t, Harmonia Amanda, Hello Camille, Hercule, Hégésippe Cormier, Imboloss, Ion.sotiroopoulos, Itemquite, Iznogood, JLM, Jarfe, Jastrow, JeanClem, Jurik42, Keanur, Kelson, Kikuyu3, Kiliti, Kilom691, Kirill, Koyuki, Kropotkine 113, Kyro, Laurent75005, Le Père Odin, Le pro du 94 :, LeMorvandiau, LeYaYa, Leag, Leszek Jaficzuk, Letartean, Leuviah, Lilyu, Lomita, Looxix, Ludopedia, Lysosome, M63, Macdav fr, Madelgarius, Maggic, Mainiou, Malecki, Malta, Mandrak, Marc Girod, Marc Mongenet, Markadet, Markov, Martinwilke1980, Mat956, Med, Medium69, Mehdtamel, Mekong Bluesman, Meodudlye, MetalGearLiquid, Michel421, Michelet, MicroCitron, Mightymights, MohamedSaheed, Moumouss13, Myos, Mysterius, Nanoxyde, Neoxelle, NeptuneGalaxy, Neuceu, Nguyenld, Nicolas Lardot, Nina Gerlach, Nodulation, Noritaka666, Néfermaît, Oblic, Olivier411, Olmec, Orlodrim, Orthogaffe, OuechTonton, Patrice Icard, Paulokoko, Pautard, Pemelet, Phe, Phitu, Pichgru, Pld, Ploum's, Pmiize, Polylepsis, Psychoslave, Quentinv57, Rabadala, RamiK, Remy34, Rhadamante, Roby, Romanm, Rominandreu, Roymail, Rudzaw, RémiH, Sadik69, Sam Hocevar, Sanao, Schiste, Scribere, Sebleouf, SenseiAC, SenseiSam, Settimo, Sevenstones, Sherbrooke, Shidorian, Speculos, Spoirier, Stanlekub, Stéphane33, Suprememangaka, Tatoute, Teeppix, Thémistocle, Tiiliskivi, Treanna, Tulipe-qui-pagaie, Universume, Yk, Warinhari, Wart Dark, Wictorya, Woww, X-or, Xfigpower, Xofc, Yolanc, Yves, Zhonghuo, Zoldik, Éric Messel, Ω, 266 modifications anonymes

**Destin de l'Univers** *Source*: <http://fr.wikipedia.org/w/index.php?oldid=101529646> *Contributeurs*: A3 nm, Abracadabra, Alain r, Aproche, Arnsy, BasEI, Boogie Boy, Christophe Dioux, Cmagnan, Eunosot, Grook Da Oger, Guillaume70, Hégésippe Cormier, Jef-Infojef, Jeje54sp, Kikuyu3, Le sotré, LeYaYa, Lin Dan4, Manu1400, NVar, Necrid Master, Nodulation, Overmac, Phe, Pld, Raphke, Rocky.raccoon, Rogilbert, Rominandreu, Ske, Stanlekub, Van Rijn, 19 modifications anonymes

**Âge de l'univers** *Source*: <http://fr.wikipedia.org/w/index.php?oldid=104835750> *Contributeurs*: Alain r, Cjp24, Guillaume70, Partner, Pautard, Phe, Phitu, Pld, Romanc19s, Rominandreu, SenseiAC, Serged, Sherbrooke, Universimedia, Wku2m5rr, X-or, Xavoux, 14 modifications anonymes

**Énergie sombre** *Source*: <http://fr.wikipedia.org/w/index.php?oldid=104490738> *Contributeurs*: Abracadabra, AgatheD, Alain r, Amqui, Barraki, Caroube, Cfoellmi, Clar, CoolCubix, Copyleft, Cymbella, Dfeldmann, Dhenry, Elfix, Et caetera, Grook Da Oger, Grum, Guillaume70, Guérin Nicolas, HERMAPHRODITE, Herman, Jarillon, Jean-Christophe BENOIST, Jef-Infojef, Jeychenne, Jpchevreau, Jyp, Kerellec, Knifewaldo, Lamiot, Le Père Odin, LeYaYa, Lebronj23, Letartean, Looxix, Lylvic, MIRROR, Marcv7, Markov, MathsPoetry, Matrix76, Mboulado, Medium69, MetalGearLiquid, Mr. Mojo, Neef, Nicolas Lardot, Obondu, Orthogaffe, Pautard, Pld, Pline, Poppi Pocketo, Poulos, Pshunter, Rhadamante, Richard.drapeau, Rogilbert, Romanc19s, Rominandreu, Ryo, Sam Hocevar, Serenity, Sergelucas, Tu5ex, Turb, <sup>29100</sup>, 51 modifications anonymes

**Matière noire** *Source*: <http://fr.wikipedia.org/w/index.php?oldid=105453286> *Contributeurs*: ABACA, Adesib, Alain r, Alibaba, Alno, Antivolt, Aquatikelfik, Arkestra, Ash Crow, Barraki, Blood Destructor, Bob Saint Clar, Cfoellmi, Chaoborus, Charlie Pinard, Christophe Dioux, Cjeanlou, Clawegale, ClemsK6, Cm8, Colas R, CommonsDelinker, Copyleft, Cris746, Céphide, Darkoneko, David Berardan, David Latapie, Deep turtle, Denys, Dfeldmann, Dhenry, Didierv, Dr Eric Simon, Dr Eric Simon, Dragonaetar2, Duckysmokton, EDUCA33E, Eutvakerre, Franz53sda, Gavos, Gem, Gemme, Ggal, Givet, Glützenbaum, Grondin, Grum, Guillaume pignol, Guillaume70, Guillom, Gyrostat, Huygens 25, Innomable, JB, Jean-Christophe BENOIST, Jean-Pierre Petit, JeanClem, JeanPhir, Jereck, JmCor, Jmax, Julian78, Jusjih, Kelson, Kikuyu3, Knifewaldo, Laurent Nguyen, LeYaYa, Lithium57, Litlok, Lmaltier, Lomita, Looxix, Loveless, Lylvic, Maggic, Marcus Magus, Mathieuw, Med, Medium69, MetalGearLiquid, Moala, Mr. Mojo, Mustapha Abdellaoui, Mutatis mutandis, NVar, Narsh, Necrid Master, Nicomag, Noritaka666, Orthogaffe, Patreides, Pautard, Perky, Peter17, Phe, Pld, Pline, Ploum's, Pmiize, Popo le Chien, Poppi Pocketo, Pouply, Quark67, R, Rhadamante, Rical, Romanc19s, Ryo, Sam Hocevar, Sanao, Sbrunner, SenseiSam, Sharayanan, Sherbrooke, Skiff, Spoirier, Stanlekub, Superstep29, SylvainPr, Tarap, The RedBurn, Toryshama, Trassiorf, Vazkor, Volsonges, Wikoz, Éric Messel, 123 modifications anonymes

**Accélération de l'expansion de l'Univers** *Source*: <http://fr.wikipedia.org/w/index.php?oldid=101126595> *Contributeurs*: Alain r, Asram, Barnett, Bastien Sens-Méyé, BimKif, Borensztein, Boud1, Boustrophédon, Cantons-de-l'Est, Clatourre, Cmagnan, Eorlingas, François-Dominique, FredA, Frederic bulckaen, Guest guest, Guillaume70, JLM, Jyp, LeYaYa, Litlok, Looxix, MIRROR, Neef, Nodulation, Orthogaffe, Papatt, Pld, Rominandreu, Ryo, Sergelucas, Sherbrooke, Song Of Snakes, Stanlekub, Wku2m5rr, Yheyman, 11 modifications anonymes

# Source des images, licences et contributeurs

**Fichier:Omega Nebula.jpg** *Source:* [http://fr.wikipedia.org/w/index.php?title=Fichier:Omega\\_Nebula.jpg](http://fr.wikipedia.org/w/index.php?title=Fichier:Omega_Nebula.jpg) *License:* Public domain *Contributeurs:* NASA, ESA and J. Hester (ASU)

**Fichier:Codex Duran, page 1.jpg** *Source:* [http://fr.wikipedia.org/w/index.php?title=Fichier:Codex\\_Duran,\\_page\\_1.jpg](http://fr.wikipedia.org/w/index.php?title=Fichier:Codex_Duran,_page_1.jpg) *License:* Public Domain *Contributeurs:* El Comandante, Kilom691, Odder

**Fichier:Stonehenge front half.jpg** *Source:* [http://fr.wikipedia.org/w/index.php?title=Fichier:Stonehenge\\_front\\_half.jpg](http://fr.wikipedia.org/w/index.php?title=Fichier:Stonehenge_front_half.jpg) *License:* Creative Commons Attribution-Sharealike 2.0 *Contributeurs:* Frédéric Vincent

**Fichier:Utagawa Kuniyoshi, Portrait of Chicasei Goyô (Wu Yong) (1827–1830).jpg** *Source:* [http://fr.wikipedia.org/w/index.php?title=Fichier:Utagawa\\_Kuniyoshi,\\_Portrait\\_of\\_Chicasei\\_Goyô\\_\(Wu\\_Yong\)\\_\\_\(1827–1830\).jpg](http://fr.wikipedia.org/w/index.php?title=Fichier:Utagawa_Kuniyoshi,_Portrait_of_Chicasei_Goyô_(Wu_Yong)__(1827–1830).jpg) *License:* Public Domain *Contributeurs:* Andres rojas22, Berrucomons, Foena, Jacklee, Jon Harald Soby, Kaba, Laurascudder, Lotse, Neukoln, PeterJewell, Pierpao, Roger McLassus, Sumple, Sushiya, Tmizuk, YolanC, とある白い猫, 5 modifications anonymes

**Fichier:Hw-newton.jpg** *Source:* <http://fr.wikipedia.org/w/index.php?title=Fichier:Hw-newton.jpg> *License:* inconnu *Contributeurs:* David.Monniaux, Jmabel, Makthorpe, Saperaud, Wst

**Fichier:CD009-Richer Guyane.jpg** *Source:* [http://fr.wikipedia.org/w/index.php?title=Fichier:CD009-Richer\\_Guyane.jpg](http://fr.wikipedia.org/w/index.php?title=Fichier:CD009-Richer_Guyane.jpg) *License:* Public Domain *Contributeurs:* User:Phe

**Fichier:Uvsun trace big.jpg** *Source:* [http://fr.wikipedia.org/w/index.php?title=Fichier:Uvsun\\_trace\\_big.jpg](http://fr.wikipedia.org/w/index.php?title=Fichier:Uvsun_trace_big.jpg) *License:* Public Domain *Contributeurs:* (supposed to be NASA due to this rather similar image; see e.g. File:PIA03150.png; thus the material will be under the well known PD licensing terms)

**Fichier:Solar sys.jpg** *Source:* [http://fr.wikipedia.org/w/index.php?title=Fichier:Solar\\_sys.jpg](http://fr.wikipedia.org/w/index.php?title=Fichier:Solar_sys.jpg) *License:* Public Domain *Contributeurs:* Harman Smith and Laura Generosa (nee Berwin), graphic artists and contractors to NASA's Jet Propulsion Laboratory.

**Fichier:Ant Nebula.jpg** *Source:* [http://fr.wikipedia.org/w/index.php?title=Fichier:Ant\\_Nebula.jpg](http://fr.wikipedia.org/w/index.php?title=Fichier:Ant_Nebula.jpg) *License:* Public Domain *Contributeurs:* NASA, ESA & the Hubble Heritage Team (STScI/AURA). Acknowledgment: R. Sahai (Jet Propulsion Lab), B. Balick (University of Washington)

**Fichier:Milky Way 2005.jpg** *Source:* [http://fr.wikipedia.org/w/index.php?title=Fichier:Milky\\_Way\\_2005.jpg](http://fr.wikipedia.org/w/index.php?title=Fichier:Milky_Way_2005.jpg) *License:* Public Domain *Contributeurs:* R. Hurt

**Fichier:Grav.lens1.arp.750pix.jpg** *Source:* <http://fr.wikipedia.org/w/index.php?title=Fichier:Grav.lens1.arp.750pix.jpg> *License:* Public domain *Contributeurs:* STScI/NASA

**Fichier:WMAP.jpg** *Source:* <http://fr.wikipedia.org/w/index.php?title=Fichier:WMAP.jpg> *License:* Public Domain *Contributeurs:* Bricktop, Chetvorno, DieBuche, Fastfission, GDK, Mike Peel, Nachcommonsverschieber, Nk, Pieter Kuiper, Shizhao, 2 modifications anonymes

**Fichier:USA.NM.VeryLargeArray.02.jpg** *Source:* <http://fr.wikipedia.org/w/index.php?title=Fichier:USA.NM.VeryLargeArray.02.jpg> *License:* GNU General Public License *Contributeurs:* user:Hajor

**Fichier:Hubble 01.jpg** *Source:* [http://fr.wikipedia.org/w/index.php?title=Fichier:Hubble\\_01.jpg](http://fr.wikipedia.org/w/index.php?title=Fichier:Hubble_01.jpg) *License:* Public Domain *Contributeurs:* NASA

**Fichier:Chandra X-ray Observatory.jpg** *Source:* [http://fr.wikipedia.org/w/index.php?title=Fichier:Chandra\\_X-ray\\_Observatory.jpg](http://fr.wikipedia.org/w/index.php?title=Fichier:Chandra_X-ray_Observatory.jpg) *License:* Public Domain *Contributeurs:* GDK, 2 modifications anonymes

**Fichier:Dobson class.jpg** *Source:* [http://fr.wikipedia.org/w/index.php?title=Fichier:Dobson\\_class.jpg](http://fr.wikipedia.org/w/index.php?title=Fichier:Dobson_class.jpg) *License:* Creative Commons Attribution-ShareAlike 3.0 Unported *Contributeurs:* user:ECeDee

**Image:Disambig colour.svg** *Source:* [http://fr.wikipedia.org/w/index.php?title=Fichier:Disambig\\_colour.svg](http://fr.wikipedia.org/w/index.php?title=Fichier:Disambig_colour.svg) *License:* Public Domain *Contributeurs:* Bub's

**Fichier:Question book-4.svg** *Source:* [http://fr.wikipedia.org/w/index.php?title=Fichier:Question\\_book-4.svg](http://fr.wikipedia.org/w/index.php?title=Fichier:Question_book-4.svg) *License:* GNU Free Documentation License *Contributeurs:* Tkgd2007

**Image:Universe expansion (fr).PNG** *Source:* [http://fr.wikipedia.org/w/index.php?title=Fichier:Universe\\_expansion\\_\(fr\).PNG](http://fr.wikipedia.org/w/index.php?title=Fichier:Universe_expansion_(fr).PNG) *License:* Public Domain *Contributeurs:* User:Kyle\_the\_hacker 17:26, 9 November 2006 (UTC)

**Image:WMAP2.jpg** *Source:* <http://fr.wikipedia.org/w/index.php?title=Fichier:WMAP2.jpg> *License:* Public Domain *Contributeurs:* Tempshill

**Image:BigBangNoise.jpg** *Source:* <http://fr.wikipedia.org/w/index.php?title=Fichier:BigBangNoise.jpg> *License:* Public Domain *Contributeurs:* NASA

**Image:Universe Expansion Timeline (fr).png** *Source:* [http://fr.wikipedia.org/w/index.php?title=Fichier:Universe\\_Expansion\\_Timeline\\_\(fr\).png](http://fr.wikipedia.org/w/index.php?title=Fichier:Universe_Expansion_Timeline_(fr).png) *License:* Public Domain *Contributeurs:* User:Kyle\_the\_hacker

**Fichier:Inflation.PNG** *Source:* <http://fr.wikipedia.org/w/index.php?title=Fichier:Inflation.PNG> *License:* Public Domain *Contributeurs:* Rogilbert

**Image:End of universe.jpg** *Source:* [http://fr.wikipedia.org/w/index.php?title=Fichier:End\\_of\\_universe.jpg](http://fr.wikipedia.org/w/index.php?title=Fichier:End_of_universe.jpg) *License:* Public Domain *Contributeurs:* Dgies, Maksim, Olaf Davis, Shyam, 4 modifications anonymes

**Fichier:WMAP 2008.png** *Source:* [http://fr.wikipedia.org/w/index.php?title=Fichier:WMAP\\_2008.png](http://fr.wikipedia.org/w/index.php?title=Fichier:WMAP_2008.png) *License:* Public Domain *Contributeurs:* NASA / WMAP Science Team

**Fichier:Celestia.png** *Source:* <http://fr.wikipedia.org/w/index.php?title=Fichier:Celestia.png> *License:* GNU General Public License *Contributeurs:* 555, Bourrichon, Cody escadron delta, ComputerHotline, CyberSkull, Czeror, Gildemax, Go for it!, Nnemo, Rocket000, Rursus, Tony Wills, XBrain130

**Fichier:Logo physics.svg** *Source:* [http://fr.wikipedia.org/w/index.php?title=Fichier:Logo\\_physics.svg](http://fr.wikipedia.org/w/index.php?title=Fichier:Logo_physics.svg) *License:* Creative Commons Attribution-ShareAlike 3.0 Unported *Contributeurs:* Guillom, Karelj, Liquid 2003, Rocket000, 1 modification anonymes

**Fichier:Whirlpool Galaxy.jpg** *Source:* [http://fr.wikipedia.org/w/index.php?title=Fichier:Whirlpool\\_Galaxy.jpg](http://fr.wikipedia.org/w/index.php?title=Fichier:Whirlpool_Galaxy.jpg) *License:* Public domain *Contributeurs:* NASA and The Hubble Heritage Team (STScI/AURA)

**Fichier:Herschel-Galaxy.png** *Source:* <http://fr.wikipedia.org/w/index.php?title=Fichier:Herschel-Galaxy.png> *License:* Public Domain *Contributeurs:* BRUTE, FredA, H.Seldon, Jianhui67, Mu301, Torsch, 5 modifications anonymes

**Fichier:Milky Way IR Spitzer.jpg** *Source:* [http://fr.wikipedia.org/w/index.php?title=Fichier:Milky\\_Way\\_IR\\_Spitzer.jpg](http://fr.wikipedia.org/w/index.php?title=Fichier:Milky_Way_IR_Spitzer.jpg) *License:* Public Domain *Contributeurs:* Credit: NASA/JPL-Caltech/S. Stolovy (SSC/Caltech)

**Fichier:M51Sketch.jpg** *Source:* <http://fr.wikipedia.org/w/index.php?title=Fichier:M51Sketch.jpg> *License:* Public Domain *Contributeurs:* William Parsons, 3rd Earl of Rosse (Lord Rosse)

**Fichier:Pic roberts1.jpg** *Source:* [http://fr.wikipedia.org/w/index.php?title=Fichier:Pic\\_roberts1.jpg](http://fr.wikipedia.org/w/index.php?title=Fichier:Pic_roberts1.jpg) *License:* Public Domain *Contributeurs:* Isaac Roberts (d. 1904)

**Fichier:Hubble sequence photo.png** *Source:* [http://fr.wikipedia.org/w/index.php?title=Fichier:Hubble\\_sequence\\_photo.png](http://fr.wikipedia.org/w/index.php?title=Fichier:Hubble_sequence_photo.png) *License:* GNU Free Documentation License *Contributeurs:* Cekli829, Harp, KGyST, Mdd, Wikiborg, 2 modifications anonymes

**Fichier:Abell S740, cropped to ESO 325-G004.jpg** *Source:* [http://fr.wikipedia.org/w/index.php?title=Fichier:Abell\\_S740,\\_cropped\\_to\\_ESO\\_325-G004.jpg](http://fr.wikipedia.org/w/index.php?title=Fichier:Abell_S740,_cropped_to_ESO_325-G004.jpg) *License:* Public Domain *Contributeurs:* J. Blakeslee (Washington State University)

**Fichier:M63.jpg** *Source:* <http://fr.wikipedia.org/w/index.php?title=Fichier:M63.jpg> *License:* inconnu *Contributeurs:* Abestrobi, Cäsium137, Emijrp, Ilmari Karonen, Juiced lemon, KGyST, Martin H., Ruslik0, Spacebirdy, Winair, 3 modifications anonymes

**Fichier:Hubble2005-01-barred-spiral-galaxy-NGC1300.jpg** *Source:* <http://fr.wikipedia.org/w/index.php?title=Fichier:Hubble2005-01-barred-spiral-galaxy-NGC1300.jpg> *License:* Public domain *Contributeurs:* NASA, ESA, and The Hubble Heritage Team STScI/AURA)

**Fichier:Hoag's object.jpg** *Source:* [http://fr.wikipedia.org/w/index.php?title=Fichier:Hoag's\\_object.jpg](http://fr.wikipedia.org/w/index.php?title=Fichier:Hoag's_object.jpg) *License:* Public domain *Contributeurs:* NASA

**Fichier:Ngc5866 hst big.jpg** *Source:* [http://fr.wikipedia.org/w/index.php?title=Fichier:Ngc5866\\_hst\\_big.jpg](http://fr.wikipedia.org/w/index.php?title=Fichier:Ngc5866_hst_big.jpg) *License:* Public domain *Contributeurs:* NASA, ESA, and The Hubble Heritage Team (STScI/AURA)

**Fichier:GalacticRotation (french).png** *Source:* [http://fr.wikipedia.org/w/index.php?title=Fichier:GalacticRotation\\_\(french\).png](http://fr.wikipedia.org/w/index.php?title=Fichier:GalacticRotation_(french).png) *License:* Creative Commons Attribution-Sharealike 2.0 *Contributeurs:* KGyST, Leyo, Medium69, Pieter Kuiper

**Fichier:Antennae galaxies xl.jpg** *Source:* [http://fr.wikipedia.org/w/index.php?title=Fichier:Antennae\\_galaxies\\_xl.jpg](http://fr.wikipedia.org/w/index.php?title=Fichier:Antennae_galaxies_xl.jpg) *License:* Public domain *Contributeurs:* NASA, ESA, and the Hubble Heritage Team (STScI/AURA)-ESA/Hubble Collaboration

**Fichier:M82 HST ACS 2006-14-a-large web.jpg** *Source:* [http://fr.wikipedia.org/w/index.php?title=Fichier:M82\\_HST\\_ACS\\_2006-14-a-large\\_web.jpg](http://fr.wikipedia.org/w/index.php?title=Fichier:M82_HST_ACS_2006-14-a-large_web.jpg) *License:* Public domain *Contributeurs:* NASA, ESA, and The Hubble Heritage Team (STScI/AURA)

**Fichier:M87 jet.jpg** *Source:* [http://fr.wikipedia.org/w/index.php?title=Fichier:M87\\_jet.jpg](http://fr.wikipedia.org/w/index.php?title=Fichier:M87_jet.jpg) *License:* Public domain *Contributeurs:* NASA and The Hubble Heritage Team (STScI/AURA)

**Fichier:Hubble - infant galaxy.jpg** *Source:* [http://fr.wikipedia.org/w/index.php?title=Fichier:Hubble\\_-\\_infant\\_galaxy.jpg](http://fr.wikipedia.org/w/index.php?title=Fichier:Hubble_-_infant_galaxy.jpg) *License:* Public domain *Contributeurs:* NASA, ESA, Y. Izotov (Main Astronomical Observatory, Kyiv, UA) and T. Thuan (University of Virginia)

**Fichier:Seyfert Sextet full.jpg** *Source:* [http://fr.wikipedia.org/w/index.php?title=Fichier:Seyfert\\_Sextet\\_full.jpg](http://fr.wikipedia.org/w/index.php?title=Fichier:Seyfert_Sextet_full.jpg) *License:* Public domain *Contributeurs:* NASA

**Image:Caustiche.jpg** *Source:* <http://fr.wikipedia.org/w/index.php?title=Fichier:Caustiche.jpg> *License:* Public Domain *Contributeurs:* Rbrausse, Tomasmazon

**Image:Vie du soleil.jpg** *Source:* [http://fr.wikipedia.org/w/index.php?title=Fichier:Vie\\_du\\_soleil.jpg](http://fr.wikipedia.org/w/index.php?title=Fichier:Vie_du_soleil.jpg) *Licence:* GNU Free Documentation License *Contributeurs:* Tablizer traduit par Kokin

**Image:Ring Nebula.jpg** *Source:* [http://fr.wikipedia.org/w/index.php?title=Fichier:Ring\\_Nebula.jpg](http://fr.wikipedia.org/w/index.php?title=Fichier:Ring_Nebula.jpg) *Licence:* Public domain *Contributeurs:* The Hubble Heritage Team (AURA/STScI/NASA)

**Image:A Swarm of Ancient Stars - GPN-2000-000930.jpg** *Source:* [http://fr.wikipedia.org/w/index.php?title=Fichier:A\\_Swarm\\_of\\_Ancient\\_Stars\\_-\\_GPN-2000-000930.jpg](http://fr.wikipedia.org/w/index.php?title=Fichier:A_Swarm_of_Ancient_Stars_-_GPN-2000-000930.jpg) *Licence:* Public domain *Contributeurs:* NASA, The Hubble Heritage Team, STScI, AURA

**Image:Messier75.jpg** *Source:* <http://fr.wikipedia.org/w/index.php?title=Fichier:Messier75.jpg> *Licence:* inconnu *Contributeurs:* CWitte, Common Good, Juiced lemon, Sanbec, Vedran V, Zscout370

**Fichier:1997NeutronStar.jpg** *Source:* <http://fr.wikipedia.org/w/index.php?title=Fichier:1997NeutronStar.jpg> *Licence:* Public Domain *Contributeurs:* Angeleleithold, Glenn

**Fichier:Neutron star cross section.svg** *Source:* [http://fr.wikipedia.org/w/index.php?title=Fichier:Neutron\\_star\\_cross\\_section.svg](http://fr.wikipedia.org/w/index.php?title=Fichier:Neutron_star_cross_section.svg) *Licence:* Creative Commons Attribution-Sharealike 3.0 *Contributeurs:* Robert Schulze

**Fichier:Gb1508 illustration.jpg** *Source:* [http://fr.wikipedia.org/w/index.php?title=Fichier:Gb1508\\_illustration.jpg](http://fr.wikipedia.org/w/index.php?title=Fichier:Gb1508_illustration.jpg) *Licence:* Public Domain *Contributeurs:* NASA

**Fichier:Quasar 3C 273.jpg** *Source:* [http://fr.wikipedia.org/w/index.php?title=Fichier:Quasar\\_3C\\_273.jpg](http://fr.wikipedia.org/w/index.php?title=Fichier:Quasar_3C_273.jpg) *Licence:* Public domain *Contributeurs:* NASA, A. Martel (JHU), H. Ford (JHU), M. Clampin (STScI), G. Hartig (STScI), G. Illingworth (UCO/Lick Observatory), the ACS Science Team and ESA

**Fichier:QuasarStarburst.jpg** *Source:* <http://fr.wikipedia.org/w/index.php?title=Fichier:QuasarStarburst.jpg> *Licence:* Public Domain *Contributeurs:* Jodo, Mattes, Schimmelreiter

**Fichier:Expansioncake.svg** *Source:* <http://fr.wikipedia.org/w/index.php?title=Fichier:Expansioncake.svg> *Licence:* Creative Commons Attribution-Sharealike 3.0,2.5,2.0,1.0 *Contributeurs:* Raude

**Fichier:BH LMC.png** *Source:* [http://fr.wikipedia.org/w/index.php?title=Fichier:BH\\_LMC.png](http://fr.wikipedia.org/w/index.php?title=Fichier:BH_LMC.png) *Licence:* Creative Commons Attribution-Sharealike 2.5 *Contributeurs:* User:Alain r

**Fichier:Accretion disk.jpg** *Source:* [http://fr.wikipedia.org/w/index.php?title=Fichier:Accretion\\_disk.jpg](http://fr.wikipedia.org/w/index.php?title=Fichier:Accretion_disk.jpg) *Licence:* Public domain *Contributeurs:* 84user, Bebenko, Dcljr, Saperaud, 6 modifications anonymes

**Fichier:Onde-radioM87.jpg** *Source:* <http://fr.wikipedia.org/w/index.php?title=Fichier:Onde-radioM87.jpg> *Licence:* Public Domain *Contributeurs:* Glenn, KGyST, Loveless, Rama

**Fichier:Trou de ver.svg** *Source:* [http://fr.wikipedia.org/w/index.php?title=Fichier:Trou\\_de\\_ver.svg](http://fr.wikipedia.org/w/index.php?title=Fichier:Trou_de_ver.svg) *Licence:* GNU Free Documentation License *Contributeurs:* Raude

**Image:Nuvola apps ksig horizonta.png** *Source:* [http://fr.wikipedia.org/w/index.php?title=Fichier:Nuvola\\_apps\\_ksig\\_horizonta.png](http://fr.wikipedia.org/w/index.php?title=Fichier:Nuvola_apps_ksig_horizonta.png) *Licence:* GNU Lesser General Public License *Contributeurs:* David Vignoni

**Fichier:Ilc 9yr moll4096.png** *Source:* [http://fr.wikipedia.org/w/index.php?title=Fichier:Ilc\\_9yr\\_moll4096.png](http://fr.wikipedia.org/w/index.php?title=Fichier:Ilc_9yr_moll4096.png) *Licence:* Public Domain *Contributeurs:* Drbogdan, Hobbema, JMCC1, Nagualdesign, Paradoctor, Quibik, 1 modifications anonymes

**Image:Pleiades large.jpg** *Source:* [http://fr.wikipedia.org/w/index.php?title=Fichier:Pleiades\\_large.jpg](http://fr.wikipedia.org/w/index.php?title=Fichier:Pleiades_large.jpg) *Licence:* Public Domain *Contributeurs:* NASA, ESA, AURA/Caltech, Palomar Observatory The science team consists of: D. Soderblom and E. Nelan (STScI), F. Benedict and B. Arthur (U. Texas), and B. Jones (Lick Obs.)

**Image:copernicus.jpg** *Source:* <http://fr.wikipedia.org/w/index.php?title=Fichier:Copernicus.jpg> *Licence:* Public Domain *Contributeurs:* Ausir, Dirk Hünninger, Garrondo, Kjetil r, Kürschner, Matthead, 1 modifications anonymes

**Image:GodfreyKneller-IsaacNewton-1689.jpg** *Source:* <http://fr.wikipedia.org/w/index.php?title=Fichier:GodfreyKneller-IsaacNewton-1689.jpg> *Licence:* Public Domain *Contributeurs:* Algorithm, Ankry, Beyond My Ken, Bjankuloski06en, Ecummenic, Grenavitar, Infrogmaton, Kelson, Kilom691, Leyo, Porao, Saperaud, Semnoz, Siebrand, Soerfm, Sparkit, Thomas Gun, Trijnstel, Vonvon, Wikiklaas, Wknight94, Wst, Zaphod, 9 modifications anonymes

**Image:NGC 4414 (NASA-med).jpg** *Source:* [http://fr.wikipedia.org/w/index.php?title=Fichier:NGC\\_4414\\_\(NASA-med\).jpg](http://fr.wikipedia.org/w/index.php?title=Fichier:NGC_4414_(NASA-med).jpg) *Licence:* Public domain *Contributeurs:* NASA Headquarters - Greatest Images of NASA (NASA-HQ-GRIN)

**Image:Effelsberg total2.jpg** *Source:* [http://fr.wikipedia.org/w/index.php?title=Fichier:Effelsberg\\_total2.jpg](http://fr.wikipedia.org/w/index.php?title=Fichier:Effelsberg_total2.jpg) *Licence:* Creative Commons Attribution-ShareAlike 3.0 Unported *Contributeurs:* Dr. Schorsch

**Fichier:Universum.jpg** *Source:* <http://fr.wikipedia.org/w/index.php?title=Fichier:Universum.jpg> *Licence:* Creative Commons Attribution-Sharealike 2.5 *Contributeurs:* Heikenwaelder Hugo, Austria, Email : heikenwaelder@aon.at, www.heikenwaelder.at

**Fichier:Cellarius ptolemaic system.jpg** *Source:* [http://fr.wikipedia.org/w/index.php?title=Fichier:Cellarius\\_ptolemaic\\_system.jpg](http://fr.wikipedia.org/w/index.php?title=Fichier:Cellarius_ptolemaic_system.jpg) *Licence:* Public Domain *Contributeurs:* Loon, J. van (Johannes), ca. 1611–1686.

**File:DMPie 2013.svg** *Source:* [http://fr.wikipedia.org/w/index.php?title=Fichier:DMPie\\_2013.svg](http://fr.wikipedia.org/w/index.php?title=Fichier:DMPie_2013.svg) *Licence:* Creative Commons Attribution-Sharealike 3.0 *Contributeurs:* User:Szczureq

**File:Energie sombre - modèles.svg** *Source:* [http://fr.wikipedia.org/w/index.php?title=Fichier:Energie\\_sombre\\_-\\_modèles.svg](http://fr.wikipedia.org/w/index.php?title=Fichier:Energie_sombre_-_modèles.svg) *Licence:* Creative Commons Attribution-Sharealike 3.0 *Contributeurs:* User:Jean-Christophe BENOIST

---

# Licence

---

Creative Commons Attribution-Share Alike 3.0  
[//creativecommons.org/licenses/by-sa/3.0/](https://creativecommons.org/licenses/by-sa/3.0/)

---