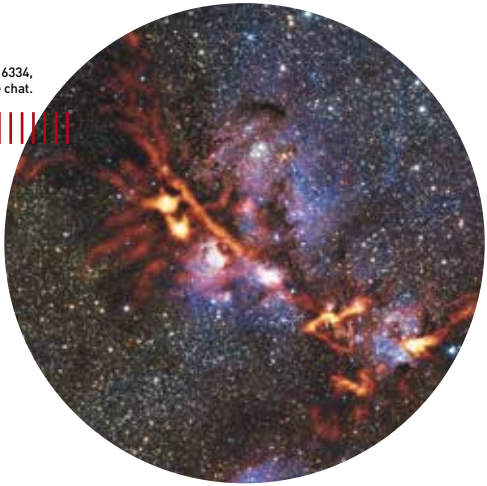
DE LA RECHERCHE À L'INDUSTRIE
cea

11

→ L'astrophysique nucléaire

GÉNÉALOGIE DE LA MATIERE
LES SUPERNOVAS
NUCLÉOSYNTHÈSE PRIMORDIALE
QU'EST-CE QU'UNE GALAXIE ?
ASTROPHYSIQUE AU LABORATOIRE

L'astrophysique nucléaire



Nébuleuse NGC 6334, dite de la Patte de chat.

© arTEMIS/ESO/VISTAA

GÉNÉALOGIE DE LA MATIÈRE 4
- Un peu de physique nucléaire 5
- Inventaire nucléaire 5
- Un exemple, le Soleil 6
- Alchimie stellaire 8
- Les étoiles, des réacteurs nucléaires 9
- La preuve par les neutrinos 10

LES SUPERNOVAS 11
- Des étoiles… 12
- … aux supernovas 13
- Enrichir l'univers 14
- Les différents types de supernovas 15

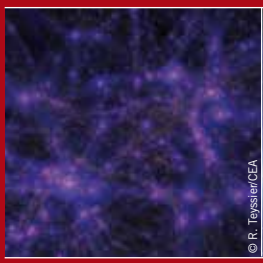
NUCLÉOSYNTHÈSE PRIMORDIALE 17
- Le chaudron cosmique 18
- Les noyaux fossiles 18
- La nucléosynthèse primordiale 20

QU'EST-CE QU'UNE GALAXIE ? 21
- Formation des galaxies 22
- Évolution des galaxies 22

ASTROPHYSIQUE AU LABORATOIRE 24
- Télescopes et satellites 25
- Au laboratoire 25
- Simulation numérique 26

Couverture : La galaxie spirale NGC 7714, à 100 millions d'années-lumière de la Terre, vue par le satellite Hubble. © A. Gal-Yam/ESA

Conseiller scientifique : Roland Lehoucq - Conception : MAYA Press - Réalisation : Grégory Klotz - Illustrations : Yuvanoé - 11 / 2015


© R. Teyssier/CEA

© D. Malin/ROE/UKS Telescope

© ESA

Comment s'est construit l'univers ? Que sont tous ces points brillants dans le ciel ?

Par le calcul et l'observation, les astrophysiciens tentent de trouver des répones.

Introduction

L'astronomie traite de l'observation et du mouvement des objets célestes : Soleil, Lune, planètes, comètes, astéroïdes, étoiles. C'est, avec les mathématiques, la plus ancienne des sciences. L'astrophysique étudie les propriétés physiques de ces objets, leur évolution et leur formation. Elle émerge à la fin du XIXe siècle.

L'astrophysique nucléaire est le mariage de l'astrophysique, science du lointain et de l'infiniment grand et de la physique nucléaire, science de laboratoire et de l'infiniment petit. Elle a pour vocation d'expliquer l'origine, l'évolution et les proportions des éléments chimiques dans l'Univers. Elle est née en 1938 avec les travaux du physicien Hans Bethe sur les réactions nucléaires qui se produisent au cœur des étoiles, à l'origine de la formidable énergie qui permet aux étoiles de briller durablement, des milliards d'années.

L'astrophysique nucléaire est une science encore en pleine expansion.

La matière qui nous entoure et nous constitue est faite de 92 éléments chimiques qui se retrouvent jusqu'aux confins de l'Univers. L'astrophysique nucléaire explique l'origine de ces éléments par la nucléosynthèse, c'est-à-dire la synthèse des noyaux d'atomes dans différents sites astrophysiques comme le cœur des étoiles.
Elle apporte des réponses à des questions fondamentales :

- Comment notre Soleil et les étoiles peuvent-ils briller des milliards d'années ?

- Quelle est l'origine des éléments indispensables à la vie comme le carbone, l'oxygène, l'azote ou le fer ?

- Comment les noyaux formés par la nucléosynthèse sont-ils diffusés dans l'espace ?

- Comment sont formés les éléments chimiques les plus lourds comme l'or, le platine ou le plomb ?

IL EXISTE UN LIEN ÉTROIT ENTRE MICROCOSME NUCLÉAIRE ET MACROCOSME ASTRONOMIQUE.

Généalogie de la matière

Filaments dans la toile cosmique.

© F.Legrand/CEA

En 1610, pointant sa lunette vers la Lune, Galilée vit des montagnes et en déduisit que la Lune était « terreuse ».
Aujourd'hui, la Terre pourrait être qualifiée de céleste, car les éléments qui la composent ont été fabriqués dans les étoiles. L'étude systématique de la structure des noyaux, de leurs comportements et des réactions qui les mettent en jeu a eu un rôle central dans le développement de la théorie de l'origine des éléments.

UN PEU DE PHYSIQUE NUCLÉAIRE

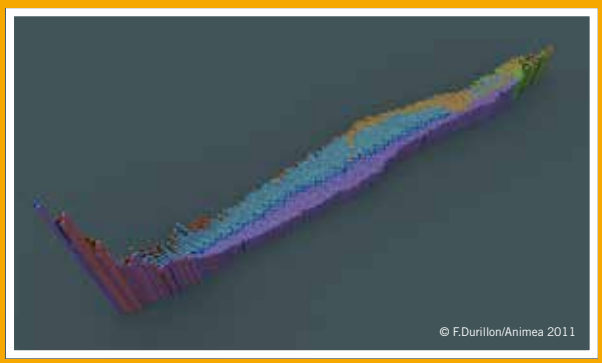
Le noyau d'un atome est formé de particules appelées « nucléons » (protons et neutrons), liées entre elles. Le nombre de protons, Z, et le nombre de neutrons, N, varient d'un noyau à l'autre, et toutes les combinaisons (Z, N) ne sont pas possibles.
Neutrons et protons sont liés entre eux par la force nucléaire forte, dont le rayon d'action, très faible, est de l'ordre du millionième de milliardième de mètre (10^{-15} m). Elle est donc maximale lorsque les nucléons sont au contact ou très proches. Cependant, les nucléons situés près de la surface extérieure du noyau sont moins entourés et donc moins liés que ceux de l'intérieur ; ce déficit d'interaction diminue leur énergie de liaison.

Les protons, dotés d'une charge électrique positive, se repoussent entre eux sous l'effet de la force électrostatique. Cela occasionne une nouvelle diminution de l'énergie de liaison du noyau. Pour limiter cet effet, les noyaux les plus lourds présentent un excès de neutrons, dont la charge électrique est nulle. Par exemple, le noyau du plomb possède 82 protons et 126 neutrons. En revanche, les noyaux plus légers que le calcium (Z = 20) contiennent à peu près autant de protons que de neutrons. La plupart des noyaux ont la propriété d'avoir un nombre pair de protons et de neutrons. Il faut égrainer la liste des noyaux jusqu'au magnésium pour en rencontrer un ayant un nombre impair de nucléons.

INVENTAIRE NUCLÉAIRE

Quels sont les noyaux que l'on trouve dans l'Univers et en quelles quantités ?
Il est possible de se faire une idée raisonnable en analysant la lumière émise par les étoiles grâce à la spectroscopie. Inventée à la fin du XIXe siècle, cette technique permet d'accéder à leurs caractéristiques intrinsèques (comme leur température, leur luminosité ou leur composition), marquant la naissance de l'astrophysique moderne.

VALLÉE DE LA STABILITÉ


© F.Durillon/Animea 2011

Les 256 noyaux stables que dénombre la physique nucléaire occupent une région bien définie appelée « vallée de stabilité ».

Dans le prolongement de cette vallée, la répulsion électrostatique entre protons devient si forte qu'aucun noyau n'est stable au-delà du plomb (Z = 82). Là se trouvent des noyaux radioactifs naturels, dont certains comme le bismuth, le thorium ou l'uranium ont des durées de vie dépassant le milliard d'années.

UN EXEMPLE, LE SOLEIL

Le Soleil est l'étoile de la Terre. Bien que distant de 150 000 000 km environ, il est facile à étudier.

Les proportions relatives des divers atomes qui le composent sont mesurées par l'analyse du spectre de sa photosphère. Cela ne donne que la composition de cette région externe, mais les chercheurs considèrent qu'elle est quasi-identique à celle du nuage à partir duquel cette étoile s'est formée, il y a 4,56 milliards d'années.

Sa couche externe, lumineuse.

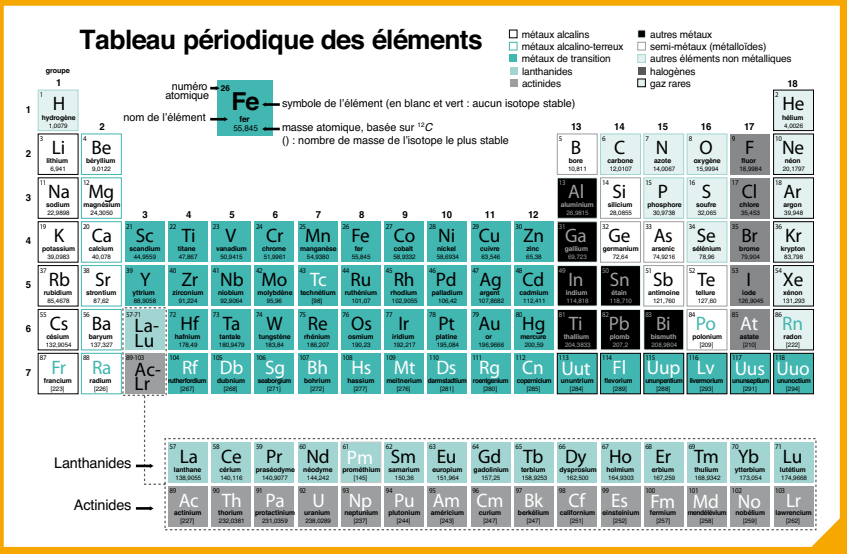
La composition de la photosphère solaire peut être comparée à celle des météorites, seconde source d'information sur la composition du nuage protosolaire, à condition de prendre en compte les éléments les plus volatils (hydrogène, hélium, azote, oxygène et néon par exemple), qui s'en sont en partie échappés depuis leur formation. De plus, l'analyse des météorites en laboratoire permet de déterminer la composition isotopique de la matière du système solaire.

Les divers isotopes d'un même élément sont des noyaux qui ne diffèrent que par leur nombre de neutrons. Par exemple, le carbone 12 (6 protons et 6 neutrons) et le carbone 14 (6 protons et 8 neutrons) sont deux isotopes du carbone.

Ces analyses complémentaires fournissent la répartition des éléments et des isotopes caractérisant notre environnement local, véritable pierre de Rosette de l'astrophysique nucléaire.

LA TABLE DE MENDELEÏEV

La table périodique des éléments de Mendeleïev permet de classer les différents éléments chimiques découverts à ce jour par nombre de protons dans le noyau, allant de 1 pour l'hydrogène à 92 pour l'uranium, et même plus pour des noyaux n'existant pas à l'état naturel et créés en laboratoire. Elle spécifie les propriétés chimiques des éléments qui dépendent de leur nombre d'électrons. Dans l'Univers, les plus abondants sont, dans l'ordre décroissant, l'hydrogène et l'hélium, puis l'oxygène, le carbone, le néon, le fer, l'azote, le silicium, le magnésium et le soufre.

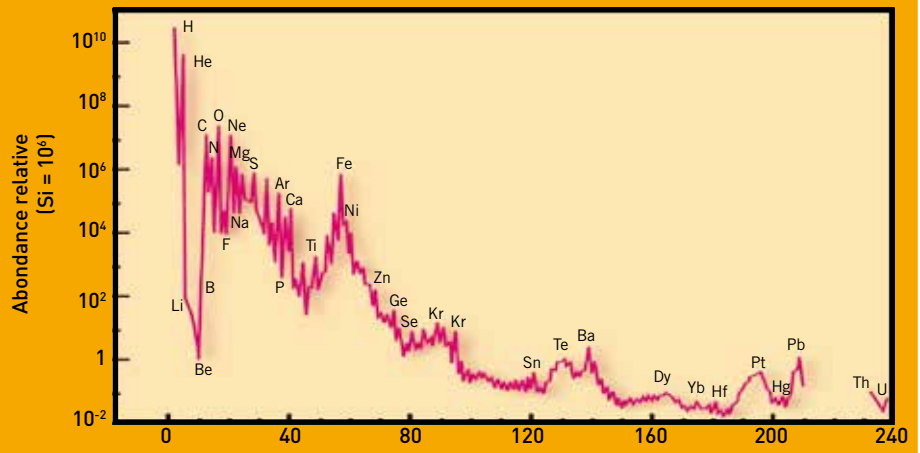


LE DIAGRAMME D'ABONDANCE

Ce diagramme indique, pour chaque élément de la table périodique, la quantité trouvée dans le système solaire. Il est élaboré à partir de mesures et d'observations et est très précieux pour les astrophysiciens. Sur cette échelle, le silicium, pris comme référence arbitraire, vaut un million.
Pour un million de noyaux de silicium, il y a dix milliards de noyaux d'hydrogène et les noyaux les plus simples, hydrogène et hélium, représentent à eux seuls 98 % de la masse du Soleil.

À partir du carbone, de l'azote et de l'oxygène, les noyaux sont de plus en plus rares, à l'exception notable du fer, dont le noyau est le plus robuste de la nature. S'il y a peu de lithium, béryllium et bore (Z = 3, 4 et 5) c'est que ces noyaux sont fragiles.

Ils ne sont pas produits par fusion thermonucléaire, mais par brisure des noyaux de carbone, d'azote et d'oxygène interstellaires sous l'impact de collisions avec les particules rapides du rayonnement cosmique galactique.



ALCHIMIE STELLAIRE

Il faut attendre le début du XXe siècle et le développement de la physique nucléaire pour que les astrophysiciens, qui cherchaient surtout à comprendre le mécanisme qui permettait à une étoile de briller durablement, répondent à la question : où se produisent les réactions nucléaires qui engendrent les noyaux ?

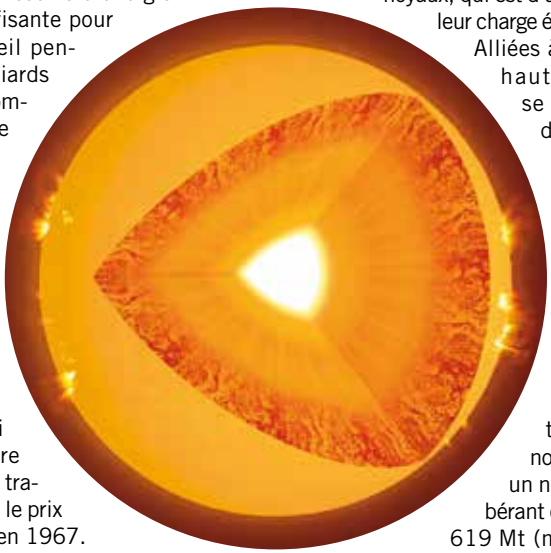
Une étoile est une sphère de gaz chaud dont la cohésion résulte de l'attraction gravitationnelle, qui tend à rapprocher le plus possible ses particules les unes des autres. L'étoile ne s'effondre pas sur elle-même, car la pression du gaz joue contre l'action de la gravité. Pour que cet équilibre soit stable, il faut que la pression augmente régulièrement avec la profondeur, de sorte que chaque couche pesante soit en équilibre entre une plus comprimée et une autre qui l'est moins. Comme un gaz comprimé s'échauffe, la matière stellaire est d'autant plus chaude qu'elle est profonde, et donc que sa pression est grande. Partant de quelques milliers de degrés en surface, la température peut atteindre, selon la masse de l'étoile, quelques dizaines à quelques centaines de millions de degrés dans les régions centrales.
Ce déséquilibre des températures entre le cœur et la surface engendre un transfert d'énergie qui prélève l'excès d'énergie thermique de la région chaude interne pour le céder à la région froide externe. En surface, ce flux d'énergie s'échappe, puis se dilue sous forme de rayonnement : l'étoile brille ; et ne peut briller durablement que si une source interne d'énergie vient compenser le rayonnement émis par la surface.

“ Une étoile s'accommode de sa perte d'énergie lumineuse en puisant dans ses ressources d'énergie nucléaire.”

Bételgeuse est une supergéante rouge, dans la constellation d'Orion. C'est l'une des plus grandes étoiles connues.

LES ÉTOILES, DES RÉACTEURS NUCLÉAIRES

A la fin du XIXe siècle, aucune source d'énergie connue (gravitationnelle ou chimique) n'était capable d'expliquer que le Soleil ait pu briller plus d'un milliard d'années – âge que les géologues donnaient à la Terre – au rythme qui était observé. La solution fut apportée en 1921 par le physicien français Jean Perrin, suivi par l'Anglais Arthur Eddington, qui proposa les réactions nucléaires entre noyaux atomiques comme source de production d'énergie. Il estima que cette réserve d'énergie nucléaire était suffisante pour faire briller le Soleil pendant plusieurs milliards d'années, durée compatible avec l'âge de la Terre alors déterminé par les géologues. Cette idée fut développée quelques années plus tard par le physicien américain Hans Bethe, qui décrivit explicitement les réactions nucléaires qui devaient se produire au cœur du Soleil, travaux qui lui valurent le prix Nobel de physique en 1967.

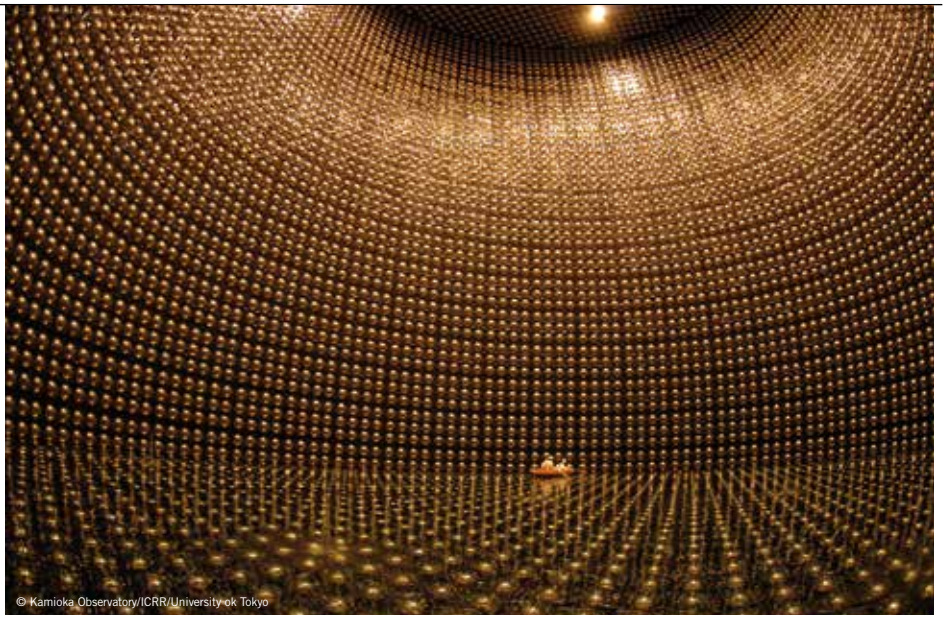


© Opixido

La fusion est l'opération élémentaire d'un jeu de construction nucléaire qui permet de fabriquer tous les éléments. Si deux noyaux légers, comme ceux de l'hydrogène ou de l'hélium, fusionnent pour en former un autre plus lourd, cela dégage de l'énergie. Cette réaction est inhibée par la répulsion électrostatique entre noyaux, qui est d'autant plus forte que leur charge électrique est grande. Alliées à l'effet tunnel, les hautes températures se trouvant au cœur des étoiles peuvent vaincre cette répulsion.

Le centre du Soleil est la seule région où la température et la pression sont suffisamment élevées pour que ces réactions soient possibles. Elles transforment quatre noyaux d'hydrogène en un noyau d'hélium en libérant de l'énergie. Ce sont 619 Mt (millions de tonnes) d'hydrogène qui, chaque seconde, réagissent pour former 614,7 Mt d'hélium, la différence (environ 0,7 % de la masse initiale) étant transformée en énergie, qui compense celle qui s'échappe par la surface.

Finalement, durant la plus grande partie de sa vie, une étoile s'accommode de sa perte d'énergie lumineuse en puisant dans ses ressources d'énergie nucléaire.



Pour l'expérience Superkamiokande, 13 000 photodétecteurs ont été installés dans une cuve d'acier de 39 mètres de diamètre et 42 mètres de haut.

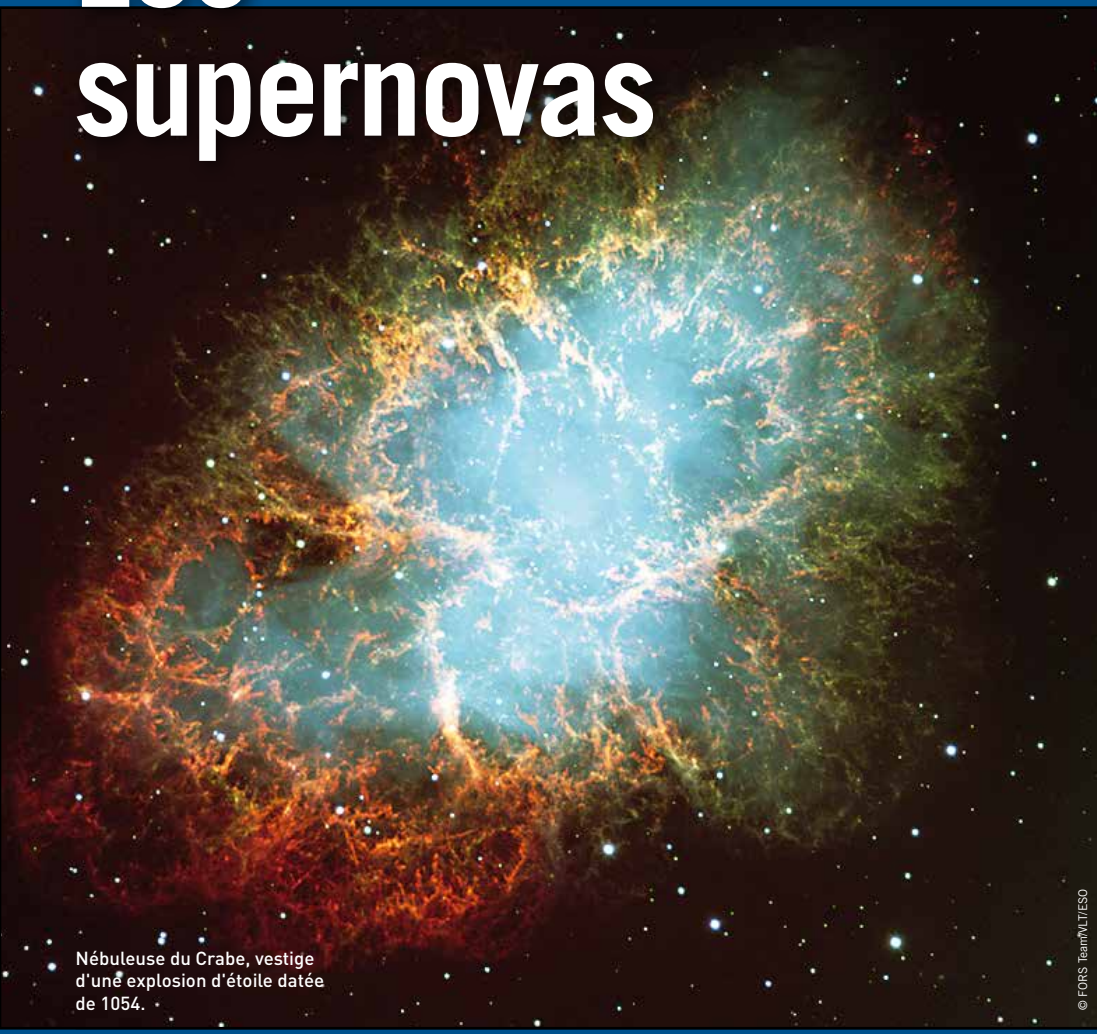
LA PREUVE PAR LES NEUTRINOS

Pendant longtemps, les réactions nucléaires n'ont été qu'une hypothèse pour expliquer pourquoi les étoiles brillaient durablement ; les preuves étaient toutes indirectes.

Depuis les années 1960, des instruments sont capables de détecter directement certaines des particules élémentaires produites lors des réactions nucléaires se déroulant au cœur des étoiles.
Ces neutrinos, particules de la même famille que l'électron, transportant de l'énergie et dont la masse est très faible, sont détectés sur Terre par les expériences souterraines Gallex en Europe, Superkamiokande au Japon, SNO au Canada et Borexino en Italie. La mesure du flux des neutrinos solaires a apporté la confirmation directe de l'existence des réactions de fusion nucléaire.

SPECTACULAIRES MAIS RARES, CE SONT DES EXPLOSIONS CATACLYSMIQUES DES ÉTOILES LES PLUS MASSIVES.

Les supernovas



Nébuleuse du Crabe, vestige d'une explosion d'étoile datée de 1054.

© FORS Team/VLT/ESO

Pour que les nouveaux éléments synthétisés au cœur de l'étoile enrichissent l'univers, encore faut-il qu'ils se répandent dans le milieu interstellaire.

DES ÉTOILES...

Les étoiles dont la masse est à peu près dix fois supérieure à celle du Soleil entretiennent tout d'abord la fusion de l'hydrogène en hélium pendant quelques millions d'années. À la fin de cette période, l'épuisement de l'hydrogène conduit à la contraction gravitationnelle du cœur jusqu'à ce que la température soit suffisamment élevée pour amorcer la fusion de l'hélium en carbone et en oxygène, pendant que l'hydrogène continue sa fusion dans une couche entourant le cœur. Après environ un million d'années, l'hélium s'épuise à son tour et la contraction du cœur permet la fusion du carbone en néon et en sodium, pendant dix mille ans. Suivent ensuite la fusion du néon en oxygène et en magnésium (qui dure une dizaine d'années), puis celle de l'oxygène en silicium et en soufre (pendant quelques années). Finalement, une semaine suffit à transformer le silicium en fer. L'apparition de ce dernier marque le début d'un processus qui aboutira à la destruction de l'étoile.
Le noyau du fer étant le plus lié (son énergie de liaison étant la plus forte), sa combustion ne permet pas de produire l'énergie que l'étoile rayonne inexorablement par sa surface.

Une fois le silicium épuisé et le fer formé, la contraction du cœur reprend, mais, cette fois, la température est si forte que les photons peuvent briser les noyaux de fer. La disparition d'une partie de l'énergie lumineuse diminue la pression centrale et précipite l'effondrement du cœur, attisé par la capture des électrons par les noyaux transformant les protons en neutrons.
Cette réaction nucléaire s'accompagne d'une émission de neutrinos, qui emportent la phénoménale quantité d'énergie potentielle gravitationnelle dégagée par la contraction.
En quelques dixièmes de seconde, la matière atteint l'incroyable densité d'un million de tonnes par centimètre cube, l'équivalent d'une plate-forme pétrolière compactée dans le volume d'un dé à coudre !

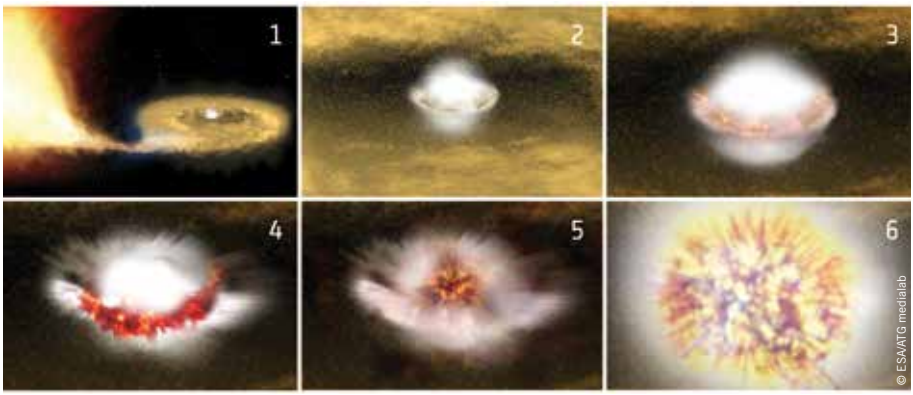
COUPE D'UNE ÉTOILE EN FIN DE VIE

Coupe de la partie centrale d'une étoile, ayant une masse 25 fois plus élevée que celle du Soleil (25 M^J), en passe d'exploser (d'après le physicien américain S. Woosley).

... AUX SUPERNOVAS

Le cœur de l'étoile, désormais constitué de neutrons, se réduit à une petite sphère d'une dizaine de kilomètres de diamètre : une étoile à neutrons vient de se former, sur la surface rigide de laquelle le reste de l'étoile en effondrement vient s'écraser. La violente compression qui en résulte produit une onde de choc qui remonte à travers les couches externes de l'étoile. Son passage chauffe la matière à des températures supérieures au milliard de degrés et provoque des réactions de fusion qui produisent des éléments lourds, notamment du nickel et du cobalt radioactifs. Quand l'onde de choc atteint la surface, la température s'élève brutalement et l'étoile entière explose, éjectant les éléments qui la composent à des vitesses pouvant atteindre plusieurs dizaines de milliers de kilomètres par seconde. Cet événement, appelé « supernova », marque la mort d'une étoile massive.

EXPLOSION DE LA SUPERNOVA SN2014J



La supernova SN2014J a explosé en 2014. Grâce aux observations du satellite Integral, de l'ESA, qui détecta les rayons gammas des éléments radioactifs synthétisés durant l'explosion, les astrophysiciens ont eu la preuve que ce type de supernova est bien dû à l'explosion d'une naine blanche accrétant de la matière d'une étoile compagnon.

Cette séquence de vues d'artiste représente ces différentes étapes. L'image 1 montre une naine blanche, étoile dont la masse est voisine de celle du Soleil mais comprimée dans un volume équivalent à celui de la Terre, qui capte la matière d'une étoile compagnon.
Les mesures du satellite Integral suggèrent qu'une ceinture de gaz entoure l'équateur de la naine blanche (image 2).
Cette ceinture gazeuse détone (image 3) et déclenche l'explosion de l'étoile en supernova (image 4).
La matière transformée par l'explosion entre en expansion rapide (image 5) et finit par devenir transparente aux rayons gammas (image 6).

ENRICHIR L'UNIVERS

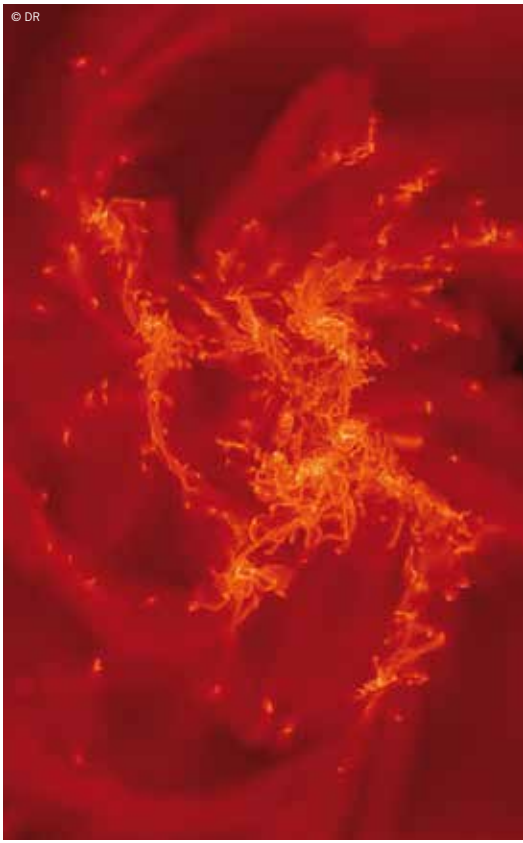
L'influence des supernovas sur le milieu interstellaire se fera sentir pendant des millions d'années, car cette explosion propulse les noyaux synthétisés durant toute la vie de l'étoile, ainsi que ceux qui furent produits lors du passage de l'onde de choc.

Petit à petit, les supernovas enrichissent ainsi le milieu interstellaire en nouveaux noyaux, qui entreront dans la composition de futures étoiles et de leurs éventuelles planètes.

Absents au début de l'Univers, ces noyaux lourds ne représentent aujourd'hui que 2 % des atomes de matière. Les noyaux rencontrés sur Terre sont quasiment tous issus de la nucléosynthèse stellaire, et le fer ne provient que des supernovas.

Les chercheurs ont longtemps cru que les supernovas offraient les bonnes conditions pour former les noyaux plus lourds que le fer, au moment de l'explosion, lorsque des noyaux lourds sont exposés à un intense flux de neutrons.
Selon la masse initiale de l'étoile, l'implosion du cœur de fer laisse subsister un objet compact nommé étoile à neutrons.
Des modèles développés ces dix dernières années suggèrent que la formation des éléments les plus lourds, comme l'or, nécessite la rencontre de deux étoiles à neutrons pour former un trou noir. Cet évènement se manifeste par l'émission d'un flash de rayonnement gamma durant une fraction de seconde, un « sursaut gamma » si puissant qu'il est observable jusqu'à des distances cosmologiques.
La formation de l'or, et plus généralement des noyaux plus lourds que le fer, passerait donc par l'évolution d'étoiles beaucoup plus massives que le Soleil dont l'explosion donne naissance à des étoiles à neutrons, puis par la coalescence explosive de ces étoiles à neutrons en un trou noir. On comprend pourquoi l'or est cher : il est rare et l'univers a beaucoup peiné pour le produire !

Phénomène par lequel deux substances identiques, mais dispersées, ont tendance à se réunir.



Modélisation de supernova.

“Nous sommes tous constitués de poussières d’étoiles.”

LES DIFFÉRENTS TYPES DE SUPERNOVAS

À la classification spectroscopique traditionnelle (avec ou sans hydrogène dans le spectre) s’est substituée récemment une distinction physique caractérisant le mode d’explosion : thermonucléaire ou gravitationnel.

Les thermonucléaires

Lorsque deux étoiles cohabitent, elles tournent autour de leur centre de gravité commun en un système binaire.
Les supernovas thermonucléaires surviennent dans les systèmes binaires formés d’une géante rouge en fin de vie et d’une naine blanche. La matière de la première peut tomber sur la seconde ; lorsque la masse de la naine blanche atteint 1,4 fois celle du Soleil, elle devient instable, s’effondre et explose.

Toute la matière est dispersée dans l’espace, il ne reste rien au centre de la supernova.

Les gravitationnelles

Une supernova gravitationnelle correspond à l’explosion d’une étoile massive en fin de vie. L’implosion de son cœur, devenu instable au moment de la combustion du silicium en fer, est rapidement suivie de l’expulsion de son enveloppe. Cet effondrement gravitationnel central libère une fabuleuse énergie (des milliards de fois supérieure à la luminosité de notre Soleil !), essentiellement sous forme de neutrinos. Seul un dix millième de l’énergie totale se manifeste sous forme de lumière visible.
Ces deux variétés de supernovas ne produisent pas les éléments dans les mêmes proportions, et ne se produisent pas au même rythme (une thermonucléaire pour cinq gravitationnelles). Les supernovas gravitationnelles produisent en quantité les éléments entre le carbone et le calcium, l’oxygène étant le plus abondant, alors que les thermonucléaires fournissent le fer et les éléments voisins.

DERNIÈRES SUPERNOVAS ÉTUDIÉES

Une supernova peut être visible à l'œil nu depuis la Terre si elle explose dans le périmètre de notre galaxie ou dans les galaxies satellites. Les observatoires et les satellites du monde entier pointent alors immédiatement leurs instruments et leurs détecteurs dans sa direction.

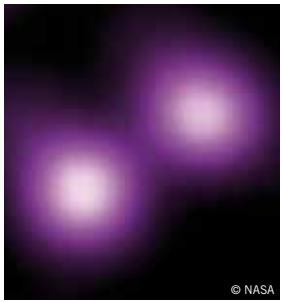
C'est arrivé en février 1987 quand la supernova, baptisée **SN1987A**, est apparue dans le Grand nuage de Magellan.

© ESA

Elle a permis, en raison de sa proximité d'effectuer une vaste moisson de résultats scientifiques.
Plusieurs rayonnements émis ont pu être observés : la lumière visible, les ondes radio, l'ultraviolet et l'infrarouge. Pour la première fois, un flux de neutrinos a pu être détecté et mesuré. C'était une supernova gravitationnelle.

En septembre 2006, la supernova **SN2006gy**, dans la galaxie NGC 1260 de la constellation de Persée, a fait sensation quand elle est apparue dans le ciel.

Son pic de luminosité était cent fois plus important que celui d'une supernova classique et cette luminosité s'est prolongée pendant plus de trois mois. Elle pourrait résulter de l'explosion d'une étoile dont la masse dépasserait 100 fois celle du Soleil.

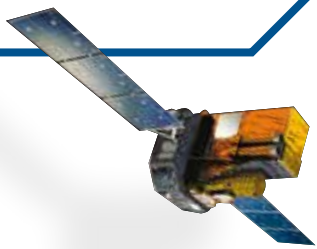


© NASA

La supernova **SN2014J** a été détectée en janvier 2014, fruit d'une explosion d'étoile dans la galaxie du Cigare, à seulement 11,5 millions d'années-lumière de la Terre.

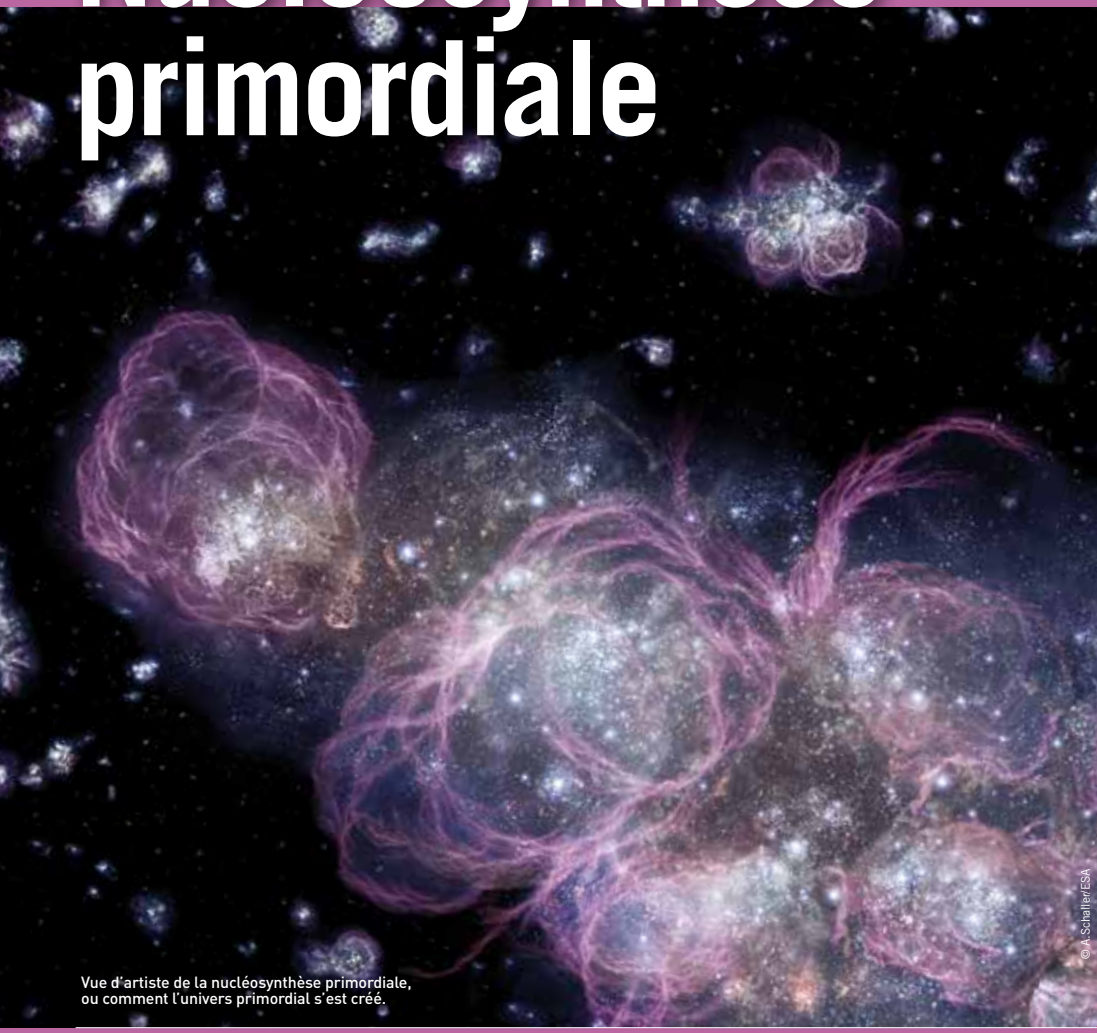
Son étude va permettre de peaufiner les modèles informatiques.

© ESA



COMMENT SE SONT FORMÉS LES PREMIERS NOYAUX ? L'ÉTUDE DES « FOSSILES NUCLÉAIRES » A FOURNI LES RÉPONSES.

Nucléosynthèse primordiale



Vue d'artiste de la nucléosynthèse primordiale, ou comment l'univers primordial s'est créé.

© A. Schaller/ESA

LE CHAUDRON COSMIQUE

Les noyaux se forment dans les étoiles. Cette idée, que l'astrophysicien américain Fred Hoyle a développée dans les années 1950, rend compte de façon satisfaisante des proportions relatives d'un grand nombre de noyaux, mais pas de tous.

Si l'univers a toujours été en expansion, il a forcément émergé d'une période pendant laquelle il était très dense et très chaud : l'observation du « fond diffus cosmologique » (voir p.27), trace de la lumière émise au moment où sont apparus les premiers atomes d'hydrogène neutre, montre qu'il est passé par une phase où la température était de l'ordre de trois mille degrés. L'analyse de la répartition des noyaux légers (hydrogène, hélium et lithium notamment) prouve qu'il y a eu un état antérieur, où la température était supérieure à dix milliards de degrés.

C'est alors que s'est jouée une grande partie du destin de la matière.

LES NOYAUX FOSSILES

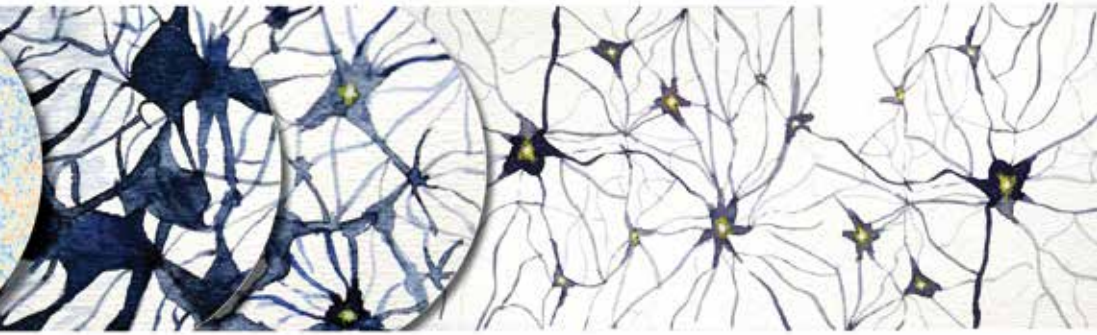
Trois noyaux résistent au modèle de la nucléosynthèse stellaire ; ce sont de véritables "fossiles nucléaires", témoins des premiers instants de l'univers.

Le premier est le deutérium (D), aussi nommé « hydrogène lourd ». Son noyau est constitué d'un proton et d'un neutron. On en dénombre un pour cent mille atomes d'hydrogène. Le deutérium est le plus fragile des noyaux, il ne résiste pas à la fournaise stellaire. Dans les étoiles, il réagit dès que la température dépasse un million de degrés. D'où peut bien venir le deutérium encore observable ?

Le second fossile se nomme hélium 4 (^{4}He). Les étoiles en fabriquent couramment à partir de quatre noyaux d'hydrogène. Mais pas assez : l'activité cumulée de toutes les étoiles ne suffit pas à rendre compte de sa grande proportion relative, qui est d'un atome d'hélium pour dix atomes d'hydrogène. Dans un certain nombre d'étoiles, on a mesuré la proportion d'hélium et de trois éléments lourds (carbone, azote et oxygène, noyaux qui ont été choisis car ce sont de purs produits de la nucléosynthèse stellaire). On a constaté que les étoiles qui ont le plus d'éléments lourds sont aussi celles qui ont le plus d'hélium.
Mais les étoiles les plus pauvres en éléments lourds en contiennent néanmoins une bonne quantité : aucune qui ait moins de sept noyaux d'hélium pour cent atomes d'hydrogène. Une interprétation s'impose : à leur naissance, les étoiles et les galaxies contiennent déjà 7 % d'hélium. D'où provient cet hélium primordial ? Enfin, le troisième fossile nucléaire est le lithium 7 (^{7}Li). La proportion de lithium a été mesurée dans de nombreuses étoiles de notre galaxie. Quoique faible, elle est quasiment la même dans les étoiles les plus vieilles et elle augmente dans les plus jeunes. Cette remontée indique donc que les étoiles fabriquent du lithium, mais la présence de ce noyau en quantité constante dans les plus anciennes d'entre elles indique qu'il y eut, comme pour l'hélium, une contribution préalable à celle des étoiles.

D'où viennent le deutérium, l'hélium et le lithium ? L'étude de ces fossiles nucléaires a permis d'élaborer un scénario raisonnable selon lequel l'univers a connu une température supérieure à dix milliards de degrés.

300-500 millions d'années | Milliards d'années | 13,8 milliards d'années



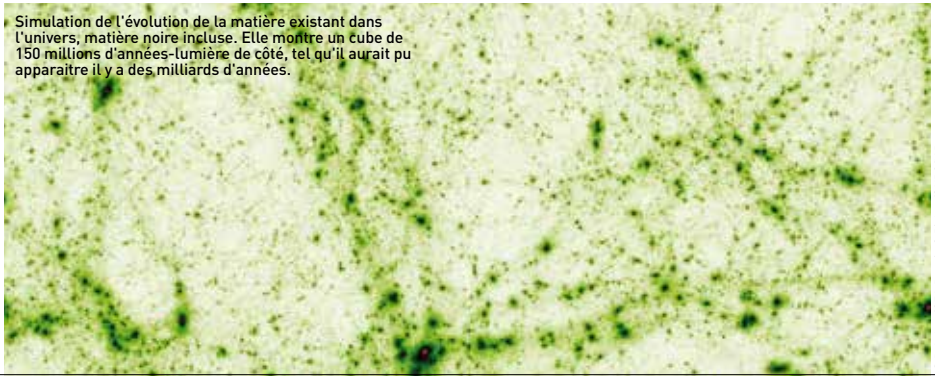
Âges sombres | Formation des premières étoiles | Évolution des galaxies | Présent

LA NUCLÉOSYNTHÈSE PRIMORDIALE

À dix milliards de degrés, l'agitation thermique est telle que l'interaction nucléaire forte est incapable d'assurer la stabilité des noyaux, qui se décomposent alors en protons et en neutrons. Le fluide cosmique est constitué d'un mélange de ces nucléons, au milieu desquels foisonnent électrons, photons et neutrinos. Les neutrinos jouent un rôle important : absorbés et émis sans cesse par les nucléons, ils transforment les protons en neutrons et vice versa. Ces réactions maintiennent un équilibre entre les nombres de neutrons et de protons dont le rapport dépend de la température.

L'expansion aidant, la température décroît, et vient un moment où les neutrinos ne peuvent plus interagir avec les nucléons, ce qui rompt l'équilibre qui prévalait jusqu'alors. Le neutron libre est une particule instable qui, en un peu moins d'un quart d'heure, se désintègre en un proton, un électron et un neutrino. Sa seule voie de conservation est son assemblage avec un proton pour former un noyau de deutérium. Or il faut de la chaleur pour engendrer le deutérium et, après fabrication, il faut le refroidir pour le conserver. L'expansion se charge de ces deux opérations : le deutérium est produit quand la température est voisine d'un milliard de degrés, et il est sauvé de la destruction prématurée par le refroidissement dû à l'expansion.
Pendant leur période de formation, les noyaux de deutérium peuvent aussi se joindre à d'autres nucléons pour engendrer successivement des noyaux d'hélium 3, d'hélium 4 et, en proportion moindre, de lithium 7.

Le refroidissement de l'univers sous la température minimale de fusion met fin à cette activité nucléaire primordiale, qui n'a eu que trois minutes pour se réaliser ! Quand la température est trop basse, la composition de l'univers est figée : on retrouve le deutérium dans l'espace interstellaire, l'hélium 4 primordial s'observe dans les étoiles et les galaxies anciennes et le lithium 7 à la surface des plus vieilles étoiles. Finalement, la nucléosynthèse primordiale n'a guère pu fabriquer que des éléments légers. Ce sont les étoiles, plus froides que le milieu primordial de l'univers, mais disposant de densités élevées et, surtout, de beaucoup plus de temps, qui synthétisent les éléments plus lourds.



Simulation de l'évolution de la matière existant dans l'univers, matière noire incluse. Elle montre un cube de 150 millions d'années-lumière de côté, tel qu'il aurait pu apparaître il y a des milliards d'années.

© D.Aubert/CEA-Dapnia-C.Pichon/CNRS/IAP

UNE GALAXIE EST COMPOSÉE DE PLUS DE 300 MILLIARDS D'ÉTOILES, DE POUSSIÈRES ET DE GAZ INTERSTELLAIRES.

Qu'est-ce qu'une galaxie ?

Carte de densité des étoiles de la Voie lactée. Le plan galactique est une projection du disque galactique, qui mesure de 100 000 années-lumière de diamètre pour 1 000 de haut.

© E.Serpell/ESA/Gaia–CC BY-SA 3.0 IGO

Les ondes qui parcouraient le gaz primordial ont créé des zones où la matière s'est plus ou moins accumulée. Sous l'effet de la gravité, ces grumeaux vont s'amplifier et former un réseau de filaments cosmiques au sein desquels se forment les premières galaxies. En quelques centaines de millions d'années, celles-ci se concentrent par centaines à la croisée des filaments et forment de grands amas. Au sein de l'amas, les galaxies interagissent par leur gravité mutuelle ; entre elles se trouve un gaz ténu très chaud qui brille dans la gamme des rayons X. Chacune compte des centaines de milliards d'étoiles, ainsi que des poussières et des gaz interstellaires dont la cohésion est assurée par la gravitation.

FORMATION DES GALAXIES

Les premières données sur la formation des galaxies remontent à 1914 ; mais elles ont été mises en évidence dans le courant des années 1920, principalement par l'astronome américain Edwin Hubble.

Les galaxies sont de trois types morphologiques principaux : elliptiques, spirales ou irrégulières (auxquels s'ajoute les lenticulaires).

Des observations plus modernes ont fourni des informations complémentaires :

- les galaxies elliptiques sont pauvres en gaz et en poussières et se composent la plupart du temps d'étoiles âgées ;
- les galaxies spirales sont généralement riches en gaz et en poussières et possèdent un mélange d'étoiles jeunes et plus âgées ;
- les galaxies irrégulières sont assez riches en gaz, poussière et en étoiles jeunes.

ÉVOLUTION DES GALAXIES

À partir de ces informations, les chercheurs ont construit une théorie de l'évolution des galaxies qui suggère que les galaxies elliptiques sont, en fait, le résultat de collisions entre galaxies spirales et/ou irrégulières. Ces collisions les dépouillent d'une grande partie du gaz et des poussières et distribuent de façon aléatoire les orbites des étoiles.

La Voie lactée

Notre système solaire appartient à la Voie lactée. Parmi ses nombreuses galaxies satellites, deux sont particulièrement remarquables : le grand et le petit nuage de Magellan, visibles à l'œil nu dans l'hémisphère sud. La galaxie la plus

© L.Limatola/ESA/Hubble

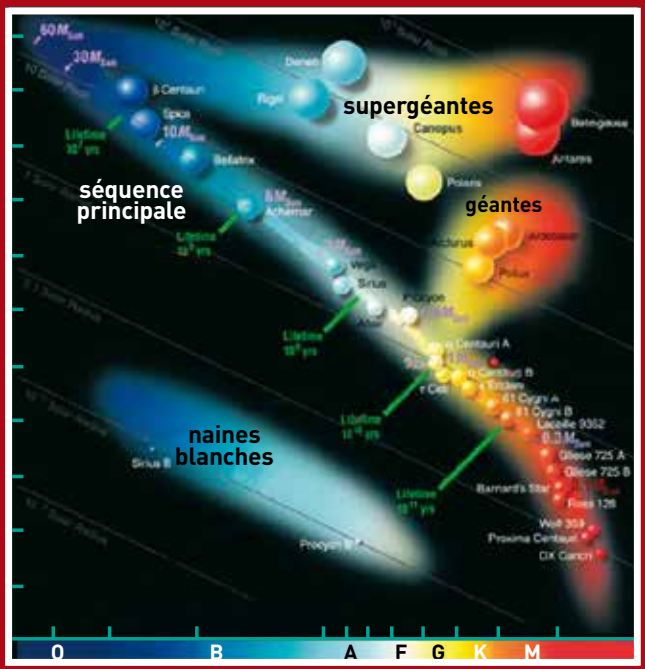
La galaxie naine ESO 540-31 est située à 11 millions d'années-lumière de la Terre, dans la constellation de la Baleine.

proche est celle d'Andromède, distante de 2,3 millions d'années-lumière. Notre galaxie est encore en pleine évolution. Des indices de nucléosynthèse récente sont apportés par l'observation de la radioactivité de son disque et la détection de la désintégration de l'aluminium 26 dans différentes directions. Il s'agit d'un noyau radioactif dont la durée de vie est d'environ un million d'années (alors que le disque galactique, lui, est âgé de 10 milliards d'années environ). Ces études mettent en évidence avec précision les mécanismes qui aboutissent à la formation de l'aluminium 26. Le but est de comprendre comment cet isotope peut être produit par les étoiles et éjecté dans le milieu interstellaire avant qu'il ne se désintègre, c'est-à-dire en moins d'un million d'années. Il apparaît que ses sources essentielles sont les étoiles massives dites de Wolf-Rayet ainsi que les supernovas.

Distance que parcourt la lumière dans le vide en une année, soit environ 10 000 milliards de km.

ÉVOLUTION DES ÉTOILES DANS NOTRE GALAXIE

Ce diagramme représente la luminosité d'une étoile en fonction de sa température de surface (la luminosité a pour base de référence la luminosité du Soleil = 1). On voit que les étoiles se regroupent en plusieurs régions :



- La bande centrale appelée séquence principale qui correspond aux étoiles dans la phase la plus longue de leur vie, celle où elles transforment l'hydrogène en hélium en leur centre.

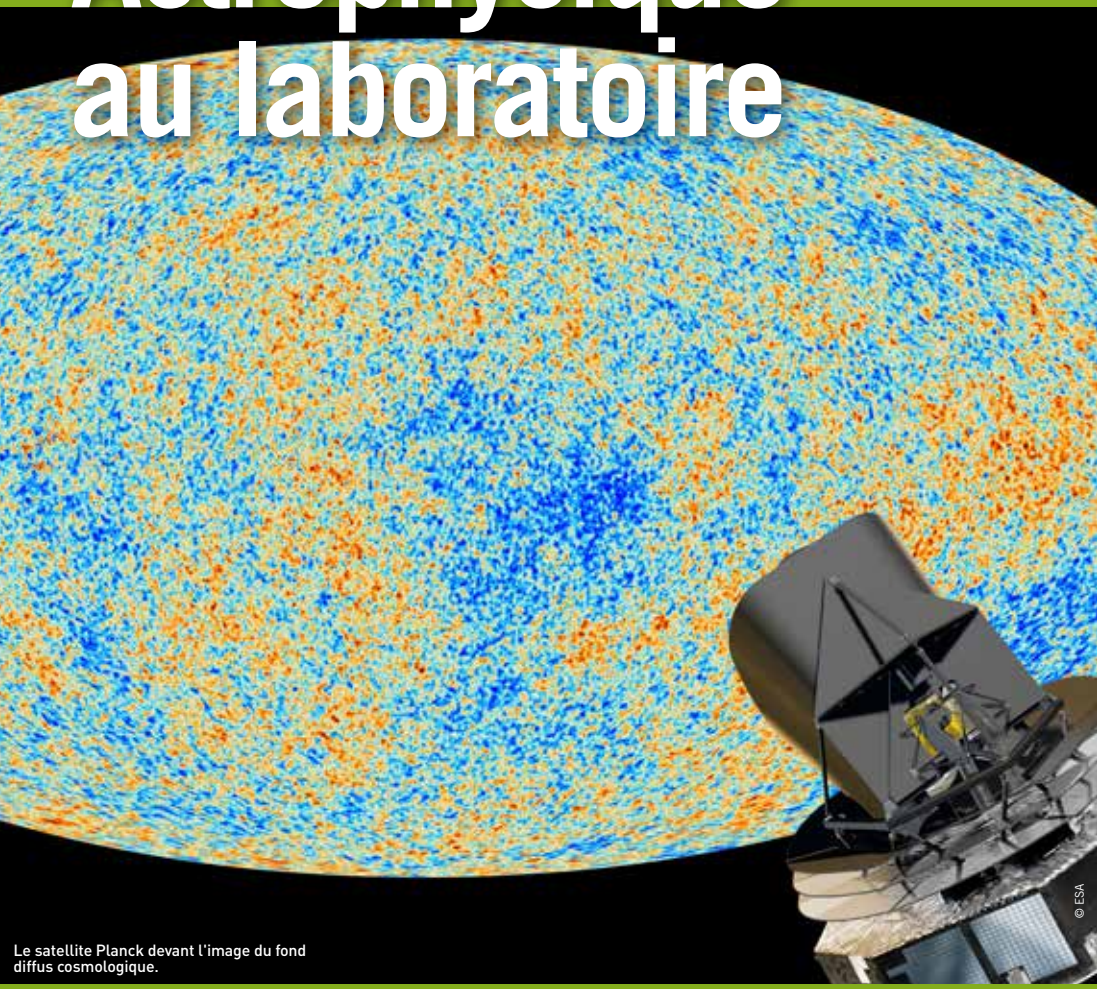
- En haut, à droite, on trouve les étoiles dans les phases de combustion nucléaire plus avancées : fusion de l'hélium en carbone et oxygène, et fusion du carbone en éléments plus lourds, néon, magnésium et silicium.
Ce sont les géantes rouges et les supergéantes rouges.

- En bas, à gauche, les naines blanches, phase finale des étoiles de petite masse comme notre Soleil.

Au cours de sa vie, le point figuratif d'une étoile se déplace dans le diagramme d'Herzsprung-Russell.

A L'OBSERVATION ET LA THÉORIE SE SONT AJOUTÉES LA SIMULATION NUMÉRIQUE ET MÊME L'EXPÉRIENCE.

Astrophysique au laboratoire



© ESA

Le satellite Planck devant l'image du fond diffus cosmologique.

TÉLESCOPES ET SATELLITES

En astrophysique, les découvertes sont essentiellement faites grâce à des télescopes au sol ou embarqués à bord de satellites.

L'ensemble des rayonnements forme le spectre électromagnétique ; qui est utilisé depuis les ondes radio jusqu'aux rayons X ou gamma, chaque domaine spectral apportant des informations spécifiques. Par exemple :

- les rayons infrarouges nous apprennent où et comment les étoiles et les planètes se forment ;
- la lumière visible renseigne sur les propriétés du gaz de la photosphère des étoiles ;
- les rayons X et gamma révèlent les phénomènes parfois très violents qui adviennent à la fin de la vie d'une étoile : supernovas, pulsars, étoiles à neutrons, trous noirs.

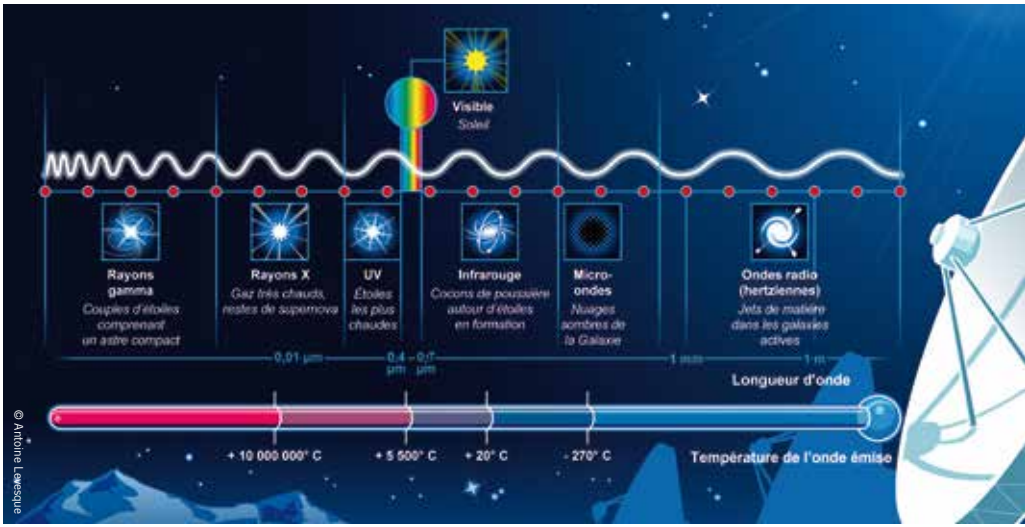
Ces rayonnements se distinguent par leur longueur d'onde, mesure de l'énergie qu'ils transportent. Plus la longueur d'onde est courte, plus le rayonnement transporte d'énergie et plus le gaz qui l'a produit est chaud. A l'inverse, les grandes longueurs d'onde sont caractéristiques de rayonnements moins énergétiques et issus de milieux plus froids.

L'interprétation des données recueillies permet de déterminer la luminosité de l'étoile, sa température de surface, sa vitesse radiale ou sa composition chimique.

AU LABORATOIRE

Recréer sur Terre ces phénomènes violents, qui agitent les astres et le milieu interstellaire, a longtemps été impensable, car cela nécessite de fournir des quantités phénoménales d'énergie pour chauffer et comprimer la matière et obtenir un plasma qui ressemble à ceux que l'on observe en astrophysique.

Les progrès réalisés sur les lasers permettent désormais cette astrophysique de laboratoire. Les échantillons étudiés grâce à des lasers à haute énergie, comme la Ligne d'intégration laser (et bientôt le Laser Mégajoule) du centre CEA du Cesta, mesurent quelques centimètres cubes. Ces expériences permettent d'acquérir des données de physique fondamentale et d'analyser des phénomènes astrophysiques dynamiques où se mélangent instabilités, rayonnement et champ magnétique.



© Antoine Lewescque

© H.Raguet/Sciences&Avenir/CEA

Chambre d'expérience de la LIL.

© P.Stoppa/GANIL

Ligne du faisceau d'ions produits par le cyclotron CIME au Ganil.

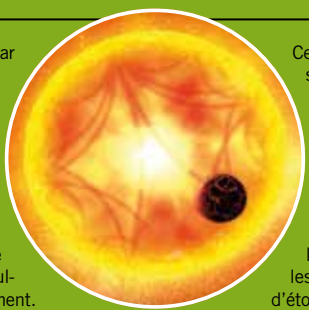
On déduit ce qui pourrait se passer dans un plasma de taille astrophysique en utilisant des lois d'échelle.
Grâce aux accélérateurs d'ions lourds du Ganil, les physiciens explorent l'infiniment petit : la structure des noyaux, leurs propriétés thermiques et mécaniques…
Ils créent des noyaux exotiques, qui n'existent pas sur Terre mais peuplent le cœur des étoiles, et recréent de minuscules « étoiles » au sein de leurs installations.

SIMULATION NUMÉRIQUE

Après l'observation et l'instrumentation, la simulation est la troisième voie de recherche en astrophysique. Les principales études concernent la cosmologie, la physique stellaire, l'étude des disques protoplanétaires et celle du milieu interstellaire.
Grâce au développement de supercalculateurs, reconstituer l'évolution de la matière dans l'Univers est désormais possible. A charge pour les ordinateurs de résoudre les équations de la gravité, de la mécanique des fluides et de la physique des gaz qui régissent ces mouvements, en partant de données initiales connues.
Pour valider leurs théories, les chercheurs découpent l'Univers en cubes, plus ou moins petits en fonction de la densité de la matière. La plus grande simulation a été réalisée par le projet Horizon : elle a reconstitué l'évolution de 70 milliards de particules de matière noire dans un cube de 6 milliards d'années-lumière de côté (la moitié de l'Univers observable !), divisé en 140 milliards de mailles.

ASTÉROSISMOLOGIE

La surface d'une étoile est animée par les mouvements turbulents qui agitent sa zone convective et engendrent des ondes acoustiques qui se propagent en son sein. Puisque le vide règne dans l'espace, les chercheurs ne peuvent pas les écouter directement ; ils enregistrent les mouvements de dilatation et de compression en analysant les mouvements de surface. Chacune de ces millions de pulsations doit être étudiée individuellement.



Cela permet de déterminer la vitesse du son et donc la densité et la température au sein de l'étoile, couche par couche. La sismologie stellaire a pris son essor avec le satellite SOHO, observant le Soleil, mais aussi avec le satellite Kepler pour les autres étoiles. L'aventure va continuer avec le lancement de la mission Plato de l'ESA, prévu vers 2025, qui étudiera les vibrations de centaines de milliers d'étoiles de la Voie lactée.

© G.Perez/IAC

OBSERVATION EN RAYONS X ET GAMMA

INTEGRAL

Les vestiges chauds et radioactifs des explosions d'étoiles émettent des rayonnements X et gamma. Ce sont eux que les astrophysiciens observent, car cette partie la plus énergétique du spectre électromagnétique apporte les indices les plus nets de la synthèse des noyaux d'atomes dans l'Univers.

Le satellite Integral (*International Gamma-Ray Astrophysics laboratory*), lancé en octobre 2002, étudie la radioactivité de la Voie lactée et des galaxies voisines, permettant de préciser les modèles d'étoiles et de mieux comprendre les processus dynamiques qui président à leur explosion. Le but de ce télescope spatial est de détecter le rayonnement gamma émis par les éléments radioactifs à vie longue tels que l'aluminium 26, à vie moyenne comme le titane 44 et à vie courte tel le cobalt 56. Il permet également de repérer où se situe l'action de la nucléosynthèse dans la galaxie.

HESS

Installé en Namibie, le réseau de télescopes Hess observe les gerbes de particules provoquées par les particules ou les rayons gamma de haute énergie entrant dans l'atmosphère terrestre. Il en déduit l'origine, ce qui permet de mieux comprendre des sources comme la nébuleuse du Crabe, reste d'une supernova qui explosa en 1054. Plus d'une centaine de sources ont été recensées, certaines sont des restes de supernova ou des pulsars, d'autres sont de nature encore inconnue.

OBSERVATION EN INFRAROUGE

HERSCHEL

Le satellite Herschel, lancé en avril 2009, a fourni des images de l'Univers dans l'infrarouge lointain et submillimétrique. Celles-ci servent à une quarantaine de programmes d'observation qui portent sur l'origine de la masse des étoiles, la formation des étoiles massives, l'évolution du milieu interstellaire des galaxies et l'histoire de l'évolution des galaxies.

ALMA

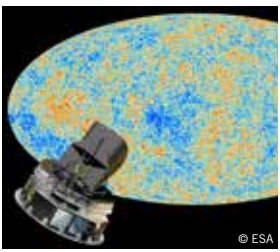
Sur Terre, au Chili, les 66 antennes de l'observatoire Alma analysent le rayonnement émis par les nuages de gaz et de poussières très froids dans lesquels les étoiles sont en train de naître.

© DR

Le téléscope Apex détecte de nombreux objets célestes, qui seront ensuite étudiés plus précisément par Alma

PLANCK

Entre 2009 et 2012, le télescope spatial Planck a cartographié l'intégralité de la voute céleste dans 9 longueurs d'onde du domaine infrarouge, provenant de sources différentes : étoiles, poussières interstellaires, galaxies, amas galactiques... En ôtant de l'image complète les rayonnements émis par chaque source, il a fourni en 2013 l'image du plus ancien rayonnement de l'Univers, le fond diffus cosmologique, émis il y a 13,8 milliards d'années !


© ESA

L'analyse de ce fond diffus cosmologique a permis de valider le modèle cosmologique standard d'un Univers en expansion accélérée, probablement issu d'une phase d'expansion exponentielle appelée inflation.

1 → L'atome
2 → La radioactivité
3 → L'homme et les rayonnements
4 → L'énergie
5 → L'énergie nucléaire : fusion et fission
6 → Le fonctionnement d'un réacteur nucléaire
7 → Le cycle du combustible nucléaire
8 → La microélectronique
9 → Le laser
10 → L'imagerie médicale
11 → L'astrophysique nucléaire
12 → L'hydrogène
13 → Le soleil
14 → Les déchets radioactifs
15 → Le climat
16 → La simulation numérique
17 → Les séismes
18 → Le nanomonde
19 → Energies du XXIe siècle
20 → La chimie pour l'énergie

© Commissariat à l'énergie atomique et aux énergies alternatives, 2015
Direction de la communication

Bâtiment Siège
91191 Gif sur Yvette cedex - www.cea.fr

ISSN 1637-5408.