

<b>Zeitschrift:</b>	Jahrbuch der Schweizerischen Naturforschenden Gesellschaft. Wissenschaftlicher und administrativer Teil = Annuaire de la Société Helvétique des Sciences Naturelles. Partie scientifique et administrative
<b>Herausgeber:</b>	Schweizerische Naturforschende Gesellschaft
<b>Band:</b>	161 (1981)
<b>Artikel:</b>	Origine des éléments chimiques et naissance du système solaire
<b>Autor:</b>	Reeves, Hubert
<b>DOI:</b>	<a href="https://doi.org/10.5169/seals-90837">https://doi.org/10.5169/seals-90837</a>

### Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. [Mehr erfahren](#)

### Conditions d'utilisation

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. [En savoir plus](#)

### Terms of use

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. [Find out more](#)

**Download PDF:** 18.02.2026

**ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, <https://www.e-periodica.ch>**

# Origine des éléments chimiques et naissance du système solaire

Hubert Reeves

Le thème de ce symposium sur «l'Origine des choses» laisse entendre que les choses – et par «choses» ici on comprend aussi bien les atomes que les galaxies, les bactéries que les êtres humains – ont une origine. Cette idée émerge de la juxtaposition des résultats obtenus par l'ensemble des sciences modernes: physique, chimie, biologie, ainsi qu'astronomie et cosmologie.

Darwin, le premier, a introduit l'historique dans le domaine scientifique. Aujourd'hui ses disciples nous dessinent un schéma d'évolution biologique qui nous mène, en quatre milliards d'années des algues bleues et des bactéries à l'ensemble extrêmement varié de tous les organismes vivants.

Les biochimistes font évoluer ces cellules primitives – ou, plus exactement, leur code génétique – à partir d'un ensemble de molécules simples de l'océan et de l'atmosphère des débuts de notre planète. Ce chapitre s'appelle l'évolution prébiotique. On peut aussi le considérer comme la seconde phase, la phase planétaire, de l'évolution chimique. Les astrophysiciens voient dans ces molécules simples le résultat d'une longue évolution nucléaire au long de laquelle les nucléons, issus du Big Bang, se sont combinés dans la chaleur des intérieurs stellaires pour engendrer l'ensemble de tous les noyaux atomiques jusqu'à l'uranium. Libérés dans l'espace par les explosions stellaires, ces noyaux s'habillent d'électrons, deviennent des atomes et commencent à se joindre les uns aux autres. Ces jonctions ont pour résultat, d'une part, la formation des grains de poussières d'où naîtront plus tard les planètes, et, d'autre part, les molécules simples qui constitueront les atmosphères et les océans de nos planètes. Ces derniers événements forment la première phase, la phase interstellaire, de l'évolution chimique, qui se poursuit ensuite à la surface des planètes.

Dans les schémas présents de la physique, les

nucléons sont eux-mêmes le résultat d'une phase plus primitive encore, qui les fait naître de la combinaison des quarks aux premières microsecondes de l'univers. On pourrait parler ici d'une évolution leptoquarkienne.

## Evolution nucléaire

Ma tâche ici est d'illustrer pour vous la phase nucléaire – responsable de l'origine des éléments chimiques – et la phase chimique interstellaire responsable de la formation des systèmes planétaires et de leurs éventuelles biosphères.

Je décrirai cette histoire comme une pièce de théâtre, avec une scène et des acteurs. Je vais tenter de démêler les intrigues enchevêtrées des quatre grandes forces de la physique sur différentes scènes cosmiques.

Prenons comme premier exemple celui de la formation de noyaux complexes par la combinaison de noyaux plus simples (figure 1). Deux forces interviennent au premier plan. La force nucléaire qui voudrait les joindre et la force électromagnétique qui, parce que tous les noyaux sont chargés positivement, tend à les tenir éloignés. La force nucléaire est très puissante, mais sa portée est courte. La force électromagnétique est bien moins puissante mais, en revanche, sa portée est beaucoup plus grande. Résultat: quand les noyaux sont loin – à plus de  $10^{-13}$  cm – ils se repoussent, mais quand ils sont près, ils s'attirent violemment et se joignent pour former des noyaux plus lourds.

Comment amener les noyaux à vaincre la répulsion électrostatique qui les sépare et à se rapprocher pour entrer en combinaison? Il faut leur donner de grandes vitesses. On y arrive soit en les accélérant avec des accélérateurs ou en les réchauffant (énergie thermique).

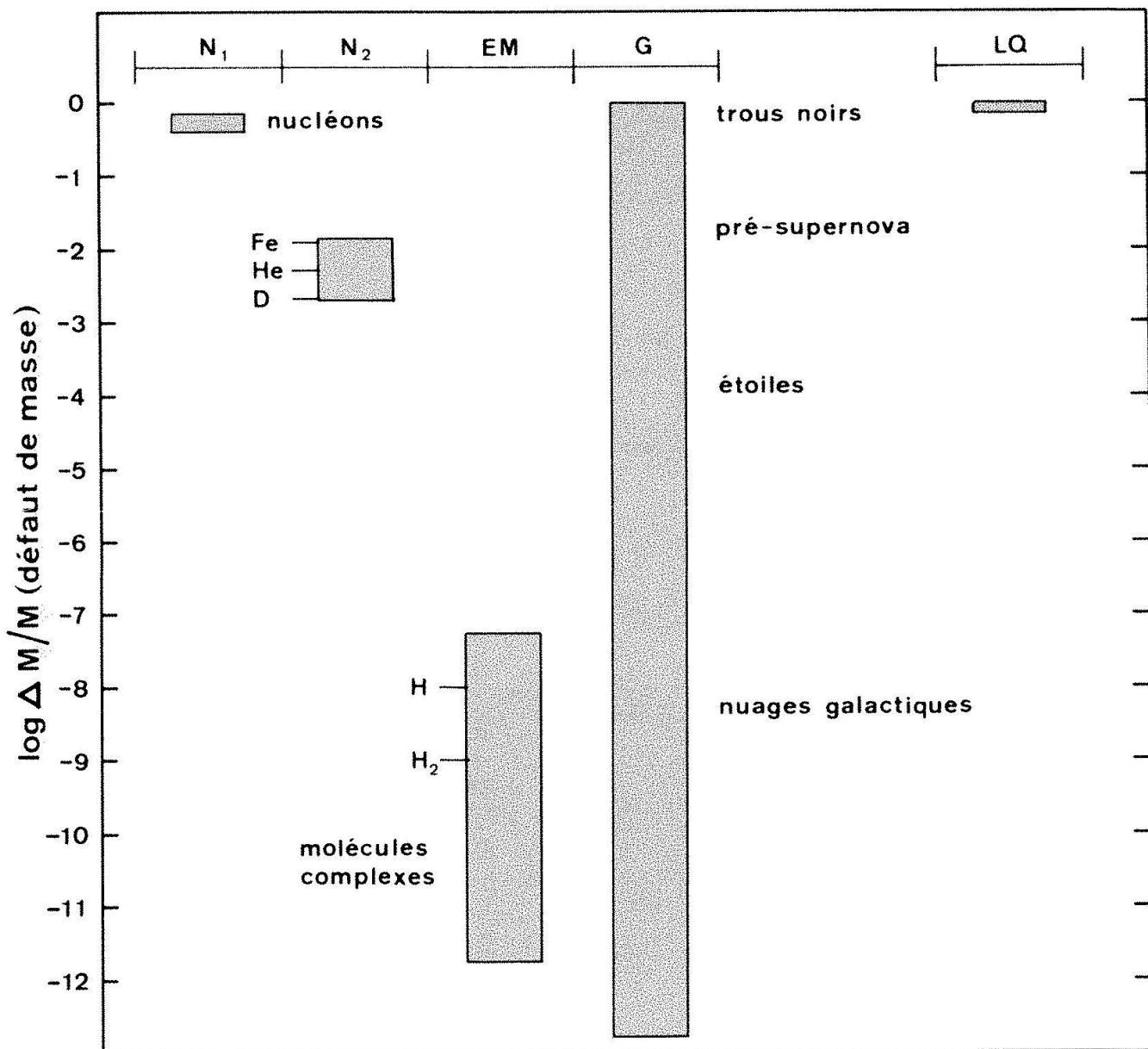
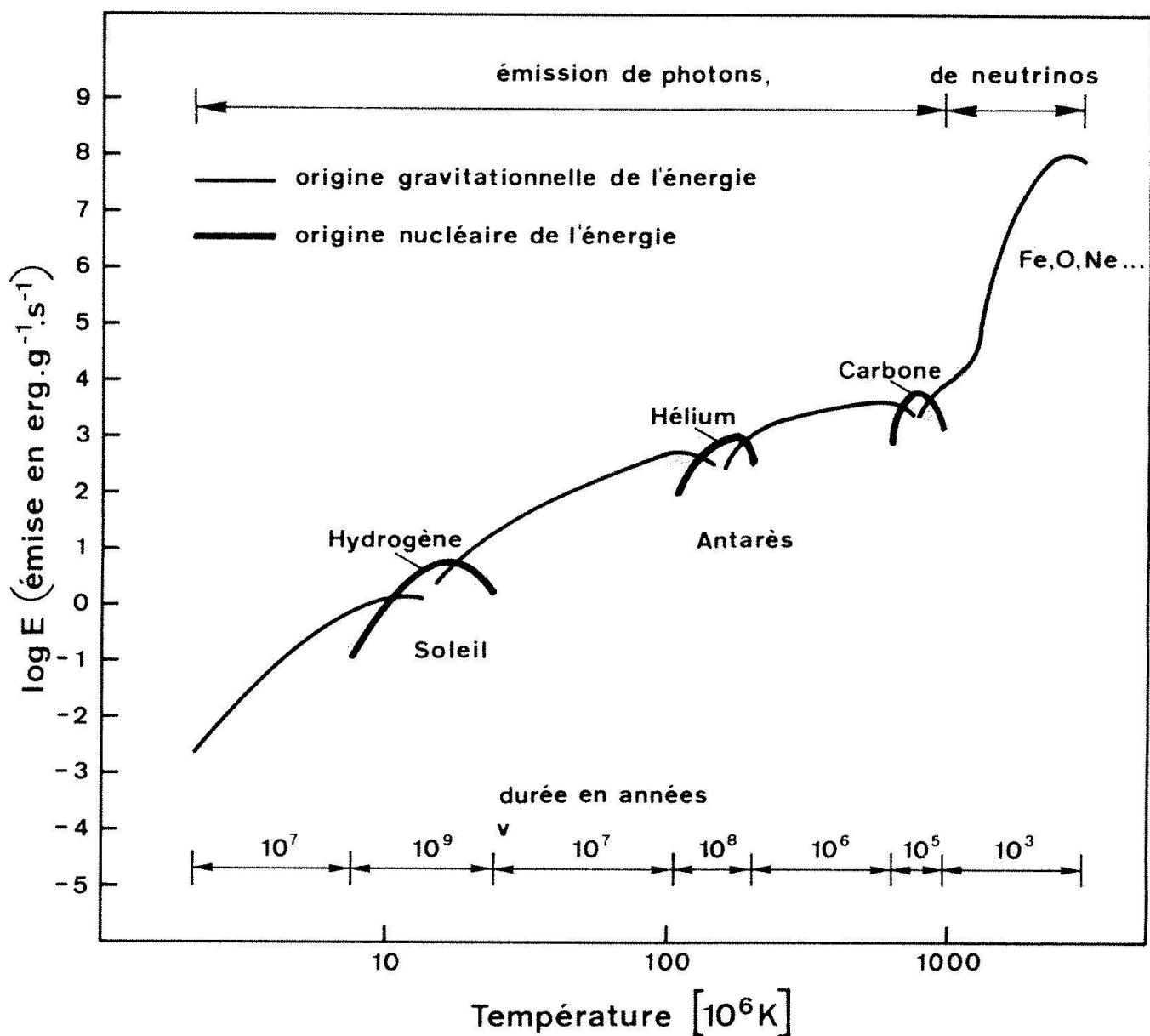


Fig. 1. Efficacité relative des différentes forces naturelles à engendré des états liés. L'ordonnée donne la fraction de masse qui est rejetée au loin au moment de la combinaison, appelée aussi le «défaut de masse» ou «énergie de stabilité». La force faible ne crée pas d'états liés. La force électromagnétique EM engendre des liaisons voisines de un électron volt. C'est-à-dire une fraction  $10^{-9}$  de la masse totale du système ( $10^{-8}$  pour l'atome d'hydrogène). La force nucléaire N<sub>2</sub> (au sens classique) engendre des systèmes (les noyaux) qui se situent entre  $10^{-3}$  (le deutérium) et  $10^{-2}$  (le fer). La force entre les quarks N<sub>1</sub> (la vraie force nucléaire) forme des systèmes encore plus liés. Le terme de «défaut de masse» ne s'applique plus très bien ici mais qualitativement on peut mettre la barre un peu en dessous de l'unité.

Contrairement aux autres forces, la gravité G n'est pas assignée à un domaine restreint dans l'échelle des défauts de masse fractionnels. Parce qu'elle est proportionnelle à la masse elle peut prendre toutes les valeurs jusqu'à l'unité (trou noir). J'ai indiqué ici les structures correspondantes.

La barre nommée «leptoquark» LQ indique ici le fait que, dans le cadre des théories de grandes unifications, les nucléons peuvent se désintégrer en lumière. Il ne s'agit naturellement pas ici d'un système lié. Le terme «défaut de masse» s'entend dans un sens élargi ...

Fig. 2. Histoire thermique d'une étoile. En abscisse, la température au centre, en ordonnée, le flux d'énergie émis. La source d'énergie est, alternativement, gravitationnelle et nucléaire. Les périodes correspondantes sont données au bas de l'échelle. A la fin de sa vie l'étoile émet surtout des neutrinos.



La gravité est l'une des principales sources des hautes températures qui existent dans l'univers. Ici, il faut changer de cadre, passer du microscopique au macroscopique. Comme la force électromagnétique la force de gravité est à longue portée; mais elle est incomparablement plus faible. Cette faiblesse est compensée par le fait qu'elle est toujours attractive (alors que la force électromagnétique est à deux composantes). Sur de grandes quantités de matière la force de gravité finit toujours par dominer sur toutes les autres (la force faible est à courte portée). Considérons maintenant un nuage interstellaire; une masse de matière très diffuse qui contient environ  $10^{60}$  atomes. Ici, la gravité domine. Si le nuage est froid, il s'effondre sous son propre poids. Cet effondrement crée

de la chaleur. En d'autres termes, il y a libération d'énergie d'origine gravitationnelle (la chute de matière) et transformation de cette énergie en énergie thermique. La pression thermique augmente jusqu'au moment où elle équilibre la force de gravité. À ce moment, la contraction s'arrête et nous avons ... une étoile.

### Gravité, chaleur et nucléosynthèse

Ici la force électromagnétique va jouer un nouveau rôle. Elle va transformer l'énergie de l'agitation thermique en photons. L'étoile, chaude, brille. C'est-à-dire qu'elle envoie de l'énergie lumineuse dans l'espace. Pour compenser cette perte d'énergie (qui l'amènerait

à se refroidir) et pour rééquilibrer la force de gravité, l'étoile va continuer lentement à se contracter, à un rythme suffisant pour équilibrer la perte. Cette condensation va libérer encore de l'énergie gravitationnelle qui va se transformer, partiellement, en lumière émise, mais aussi, partiellement, en chaleur interne. Ainsi, loin d'amener l'étoile à se refroidir, l'émission de lumière va au contraire la porter à une température de plus en plus élevée et à un éclat de plus en plus grand.

La force électromagnétique joue ici deux rôles opposés vis-à-vis de la construction des noyaux. D'une part, par le biais de la répulsion électrostatique (c'est-à-dire par l'échange de photons dits «virtuels») elle tient les particules chargées à distance; mais, d'autre part, par le moyen des photons «réels», elle amène ces particules chargées à émettre vers l'espace, elle provoque la contraction progressive de l'étoile et donc son échauffement et, en conséquence, l'accroissement continu des vitesses entre les particules chargées. De ce fait, ces particules arrivent de plus en plus souvent à vaincre la répulsion électrostatique et à entrer en contact nucléaire, c'est-à-dire à se joindre pour former des noyaux nouveaux.

Le premier effet, répulsion électrostatique, ne change pas avec les conditions physiques; mais le second, vitesse des particules et fusion nucléaire, augmente avec la température. On atteindra donc nécessairement un point où il dominera sur le premier.

Prenons, par exemple, le cas du soleil (figure 2). Initialement, il est composé à 90% de protons (et d'électrons). Vers dix millions de degrés, les protons arrivent à se toucher. Mais ici il y a une complication supplémentaire: deux protons ne forment pas un système stable. Par contre, si au moment de la rencontre, un des protons se transforme en un neutron, ça marche: le proton et le neutron s'unissent pour former un deutéron (hydrogène lourd). Or cette transformation fait intervenir notre quatrième force, la force faible (cette même force provoque l'émission d'un neutrino qui s'échappe aussitôt du soleil).

## Fusion de l'hydrogène

Le deutéron se combinera lui-même avec un proton. Puis, après deux ou trois autres réac-

tions, nous voyons apparaître comme produit final de ces combinaisons, des noyaux d'hélium-4. Bilan net: les actions conjuguées des forces nucléaire et faible ont transformé quatre protons en un hélium. Or, la différence de masse entre ces systèmes est d'environ un pour cent de la masse totale. La fusion dégage une énergie de sept millions d'électrons volts par proton initial (dont la masse est d'un milliard d'électrons volts). Ce sont la force électromagnétique et la force faible qui se chargent de l'évacuation de ce surplus de masse. Des photons gammas et des neutrinos sont successivement émis tout au long de ces réactions.

Ces événements microscopiques vont, à leur tour, avoir une influence macroscopique. Les neutrinos s'échappent de l'étoile mais les photons gammas, non. Ils sont absorbés par la matière stellaire et leur énergie est transformée en chaleur. L'étoile, ainsi, s'est trouvée une nouvelle source d'énergie. Cette énergie va servir à compenser les pertes que provoque l'émission de sa lumière. Elle n'aura plus besoin de se contracter, c'est-à-dire de faire appel à ses ressources d'énergie gravitationnelle. Elle va se stabiliser. Désormais, son rayon, sa densité et sa température vont rester constants.

Grâce à la très grande puissance de l'énergie nucléaire, ce temps sera très long. Notre soleil vit de ces transformations nucléaires depuis près de cinq milliards d'années. Cette stabilité prolongée est vraisemblablement requise par le développement de la vie, en tout cas, si on en juge par l'exemple de notre biosphère.

Les étoiles qui vivent de la transmutation de l'hydrogène (protons) en hélium forment la grande famille dite de la «Série Principale». Quatre vingt dix pour cent des étoiles de notre galaxie appartiennent à cette famille. Dans notre ciel nocturne, notons en particulier Sirius, Véga, Arcturus et l'Etoile Polaire. Pour le Soleil, cette phase va durer encore cinq milliards d'années. À ce moment-là, il aura épousé l'hydrogène en son centre. La perte d'énergie stellaire par émission de lumière ne sera plus compensée par la libération d'énergie nucléaire. L'étoile aura de nouveau recours à ses «réserves» d'énergie gravitationnelle. Elle va recommencer à se contracter. Finie la stabilité. Sa densité et sa température vont croître à nouveau.

Paradoxalement, cette contraction va accroître le rayon stellaire. En fait, le noyau central de l'étoile – qui comprend presque toute la masse – va effectivement décroître en volume, mais les couches extérieures – une atmosphère raréfiée – vont prendre des proportions gigantesques et se refroidir, c'est-à-dire passer au rouge. L'étoile deviendra une «Géante Rouge» comme, dans notre ciel, Antarès, Bételgeuse ou Aldébaran.

Notons ici une analogie entre ces deux modes de génération d'énergie. Le gravitationnel implique la contraction d'une grande quantité de matière. Beaucoup de nucléons passent d'un volume grand à un volume plus petit. Cet événement est accompagné par l'émission d'énergie à la fois à l'intérieur du volume: les particules vont plus vite (la température s'accroît) et aussi à l'extérieur (l'étoile brille de plus en plus).

De la même façon, à l'échelle microscopique, le nucléaire implique que quatre nucléons, auparavant libres, se trouvent maintenant confinés dans le volume d'un noyau. Leur distance relative moyenne a considérablement décrue. En même temps, leur énergie interne s'est accrue (mouvements orbitaux des nucléons dans le noyau) et ils ont émis vers l'extérieur des photons gammas.

Ici intervient un événement important en relation avec la quantification des charges électriques. Elles apparaissent toujours par nombre entier: l'hydrogène a une charge positive, l'hélium en a deux, etc. La répulsion est elle-même quantifiée. En conséquence nous aurons une série de phases du fusion nucléaire bien distinctes. Je m'explique.

## Fusion de l'hélium

Nous avons vu l'étoile, sous l'effet de la force gravitationnelle, augmenter sa température jusqu'au moment où elle pouvait vaincre la répulsion entre les protons (une charge positive) et fusionner l'hydrogène en hélium à température constante. Après l'épuisement de l'hydrogène, le centre de l'étoile est composé d'hélium (deux charges électriques positives). La répulsion électrostatique entre ces particules est plus grande que celle des protons. En conséquence, il faut atteindre des températures plus élevées pour amener les héliums à se joindre et engendrer des noyaux

nouveaux. Au lieu de dix ou vingt millions de degrés il faudra cent ou deux cents millions de degrés. Ce sont là les températures caractéristiques des géantes rouges. En leur centre elles brûlent de l'hélium et engendrent du carbone et de l'oxygène. Sur des couches plus éloignées du centre, elles transforment du carbone et de l'oxygène, préexistant, en azote. Carbone, azote, oxygène, on ne peut trop insister sur l'importance des géantes rouges vis-à-vis de l'évolution prébiotique et biologique ...

Le même scénario se produit après l'épuisement de l'hélium. L'étoile, à nouveau, reprend sa contraction et son ascension thermique. Le carbone possède six charges électriques. Pour en amorcer la fusion, il faut atteindre pratiquement le millard de degrés. Peu après démarre la fusion de l'hydrogène (huit charges électriques). Ces deux fusions sont responsables de la production du sodium, magnésium, aluminium, silicium et soufre. Voilà maintenant les principaux constituants de notre planète (avec l'oxygène et le fer) préparés par des réactions nucléaires à l'intérieur d'étoiles évoluées.

D'autres phases de fusion vont ensuite se succéder rapidement et engendrer, dans la foulée, tous les autres éléments de la table de Mendeleieff jusqu'au plomb et à l'uranium. L'abondance des éléments dans l'univers est montrées à la figure 3.

Vers cette période s'amorce une série de processus physiques qui vont amener l'étoile vers sa fin. Ils ont en commun de soustraire à l'étoile une partie de sa chaleur et donc de l'obliger à accélérer sa contraction pour compenser ces pertes. C'est cette accélération qui va l'amener à la catastrophe.

## Ejection des noyaux dans l'espace

Il y a d'abord un accroissement prodigieux du rôle de la force faible. Des quantités de réactions se produisent qui ont pour résultat l'émission d'un flux intense de neutrinos. Ces particules deviennent maintenant le principal agent de l'émission de l'énergie stellaire. Elles transportent beaucoup plus d'énergie que les photons. Or, contrairement à ces derniers, les neutrinos ne sont pas absorbés par la matière stellaire. Ils sortent rapidement et, de ce fait, exigent une réaction

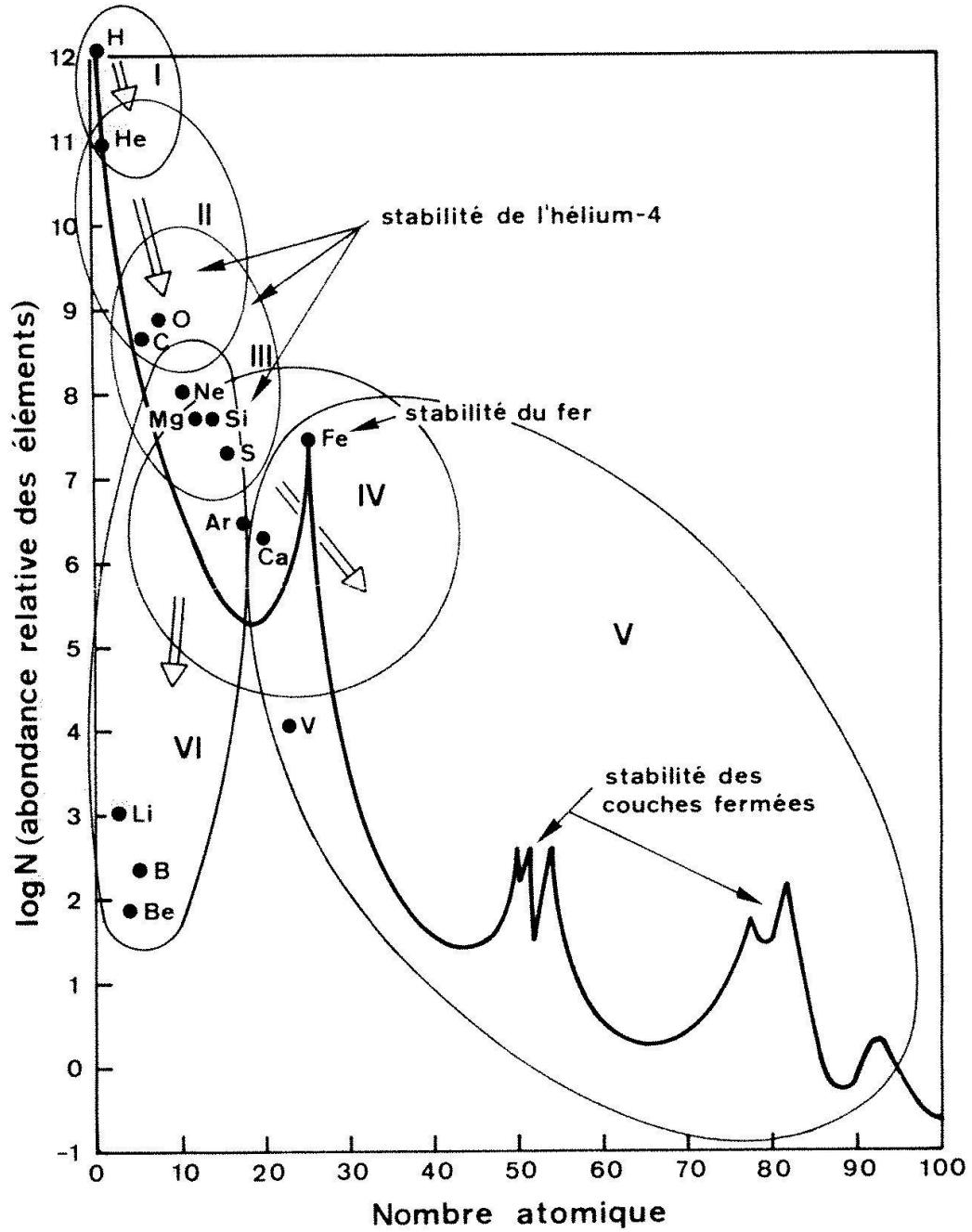


Fig. 3. Abondance des éléments dans l'univers. L'ensemble des points forme une courbe relativement régulière, avec quelques exceptions. Les chiffres romains indiquent les phases stellaires associées à l'évolution des éléments responsable des abondances observées:

- I Explosion initiale et étoiles de la «série principale»
- II Géantes rouges
- III Phase stellaire plus tardive
- IV Supernovae
- V Supernovae
- VI Evolution des éléments dans l'espace interstellaire

immédiate de l'étoile, sous forme de contraction accélérée. Il y a ensuite le fait que au-delà d'une certaine température (quelques milliards de degrés) des noyaux commencent à se photo-désintégrer, c'est-à-dire à se casser sous l'effet des photons du rayonnement thermique. Ces désintégrations absorbent de l'énergie qu'elles enlèvent à l'étoile.

A l'appel pressant de ces effets variés, l'étoile se contracte de plus en plus vite. Bientôt, il s'agit d'une avalanche, d'une implosion. Le cœur de l'étoile atteint des densités énormes, des dizaines de milliers de tonnes par centimètre cube.

Par un mécanisme encore mal compris, la partie la plus centrale de l'étoile continue à se contracter jusqu'à devenir une étoile à

neutrons. La gravité, ici, est équilibrée par la force nucléaire devenue répulsive tandis que la partie extérieure est rejetée vers l'espace par des phénomènes qui font intervenir à la fois la force électromagnétique et la force faible. C'est une supernova. Les noyaux engendrés par l'étoile se dispersent au loin sous forme d'un rémanent de supernova qui s'étend sur des distances de dizaines d'années-lumière.

### Evolution chimique: phase spatiale

Maintenant cette matière chaude se refroidit en se déployant dans l'espace. A mesure que les vitesses thermiques décroissent, les forces électromagnétiques deviennent en mesure de



Fig. 4. La Dentelle du Cygne. Détail des filaments issus d'une explosion stellaire. Ici, les noyaux s'habillent d'électrons et forment des atomes et des molécules. Des poussières s'y constituent qui donneront plus tard naissance aux planètes. C'est un des hauts lieux de l'évolution chimique.

fixer les électrons en orbite autour des noyaux. D'abord se remplissent les orbites les plus internes - les orbites K - puis, successivement, tous les autres. Quand les atomes atteignent la neutralité, ils commencent à se combiner en molécules. L'hydrogène se joint au carbone, à l'azote et à l'oxygène pour donner le méthane, l'ammoniac et l'eau (appelés souvent les «glaces»). L'oxygène se combine au fer, au silicium au magnésium etc. pour donner les premiers solides: des grains de poussières interstellaires qui incorporent des trillions d'atomes. Dans les grands froids de l'espace, les glaces se déposent sur ces grains comme des océans figés sur des planètes en miniature.

Ici, c'est le début de l'architecture électromagnétique. Après la gravité qui a construit les étoiles, après la force nucléaire qui a construit les noyaux, l'organisation de la matière est maintenant prise en charge par la force électromagnétique. C'est elle qui sera responsable de tous les solides, ainsi que de tous les organismes vivants.

Nous sommes maintenant amenés au problème de l'origine des planètes et des cortèges planétaires tels que notre système solaire. Tout se joue entre deux forces réelles: la gravité et l'électromagnétisme, auxquelles s'ajoute une troisième «fausse» force: la force «centrifuge» (qui est en fait reliée à l'inertie des corps). Les nuages interstellaires contiennent de larges quantités de poussières engendrées dans les rémanents de supernovae des étoiles révolues. Dans certaines régions du ciel, on voit très bien les lueurs bleues que provoque la réflexion de la lumière stellaire sur ces poussières. Quand l'effondrement d'un nuage amène la formation d'une étoile, ces poussières sont entraînées dans l'avalanche. Certaines d'entre elles sont vaporisées par la chaleur stellaire, mais d'autres sont épargnées grâce, en particulier, au fait que les nuages tournent sur eux-mêmes. A cause de cette rotation il se forme alors dans le plan équatorial de l'étoile une sorte de disque, semblable aux anneaux de Saturne, où se retrouvent de vastes quantités

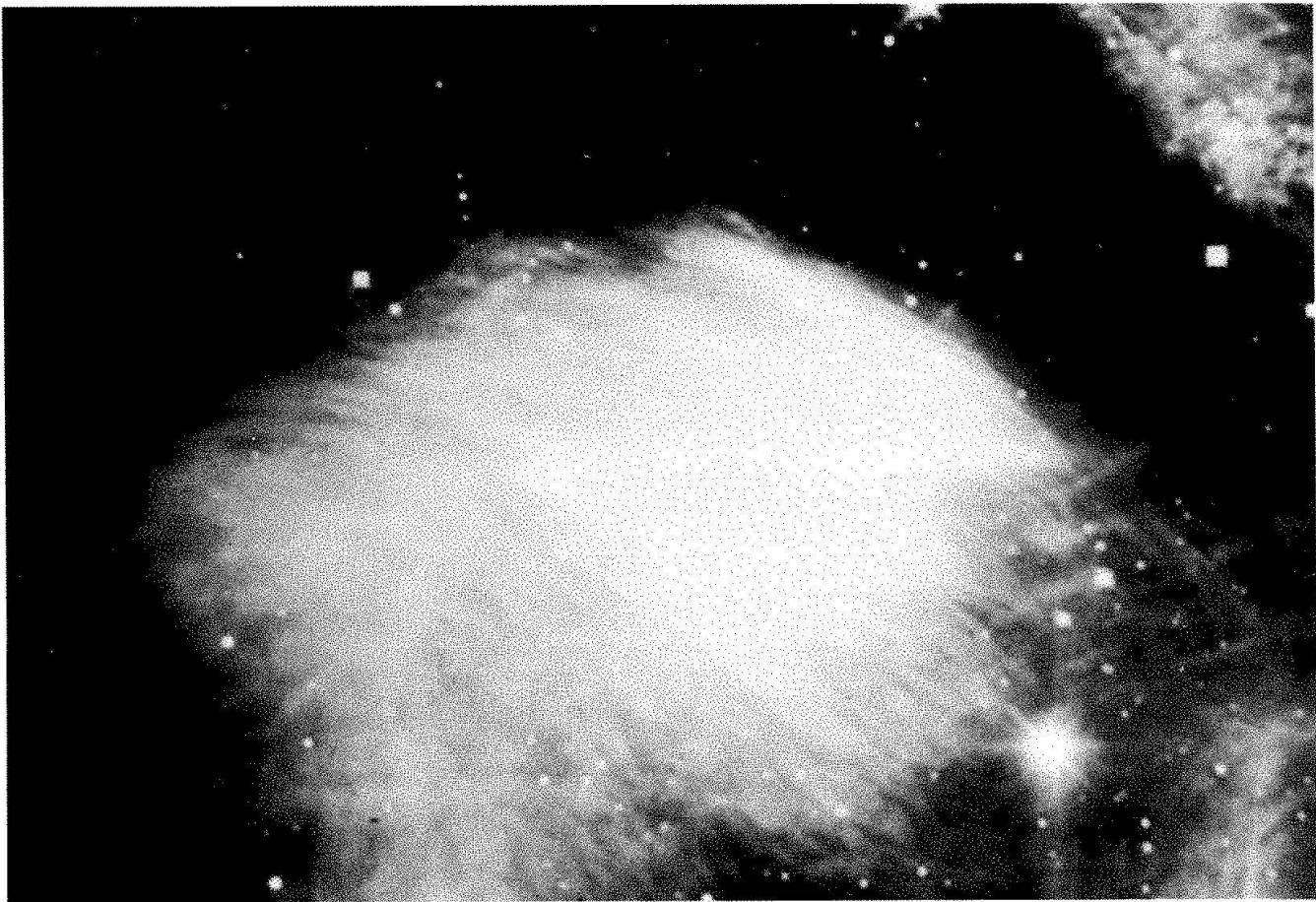


Fig. 5. Cette photo montre l'étoile Mérope dans les Pléiades nimbée de luminosités filamentueuses. Les étoiles des Pléiades sont nées toutes ensemble à partir d'un nuage interstellaire il y a environ cent millions d'années. Les filaments sont composés de myriades de «poussières interstellaires». Ils rappellent les cirrus de notre atmosphère, formés de minicristaux de glaces. Ces poussières, éclairées ici par la lumière stellaire, s'assemblent pour former des planètes autour des embryons d'étoiles.

de poussières interstellaires, ainsi maintenues à distance prudente du foyer central. Là commence un processus d'agglomération, dont les mécanismes sont mal connus, par lequel ces grains se juxtaposent et se transforment en corps de plus en plus massifs: astéroïdes et planètes. Ici, la gravité sert de «filet». Elle permet aux proto-planètes de capturer les bolides interstellaires qui s'approchent et ainsi d'accroître leur masse.

Les planètes de type terrestre sont des structures physiques où la gravité est équilibrée par la force électromagnétique (rigidité des structures cristallines). Cet assemblage permet la construction de grandes plateformes solides où l'eau liquide peut s'accumuler: c'est le lieu de la soupe océanique primitive. Les molécules d'eau de cet océan, comme d'ailleurs les molécules de méthane et d'ammoniac, nous sont parvenues par le biais des poussières interstellaires dont elles formaient la couche extérieure.

Les propriétés des corps du système solaire sont dominées par deux facteurs importants: leur masse et leur distance au soleil. Et il y a tout lieu de penser que la masse des planètes est elle-même largement influencée par la distance au soleil.

### La chaleur des planètes

La distance au Soleil détermine la quantité de chaleur qui parvient (rayonnement ou conduction) au lieu de formation d'une planète, et donc les conditions de température dans lesquelles elle se formera. Ces conditions de température, à leur tour, détermineront quels composés physicochimiques pourront s'y condenser. La grande densité de Mercure nous montre que seuls les composés les plus réfractaires s'y trouvent. Par opposition, l'eau qui apparaît à la distance de la Terre, devient très importante au niveau des

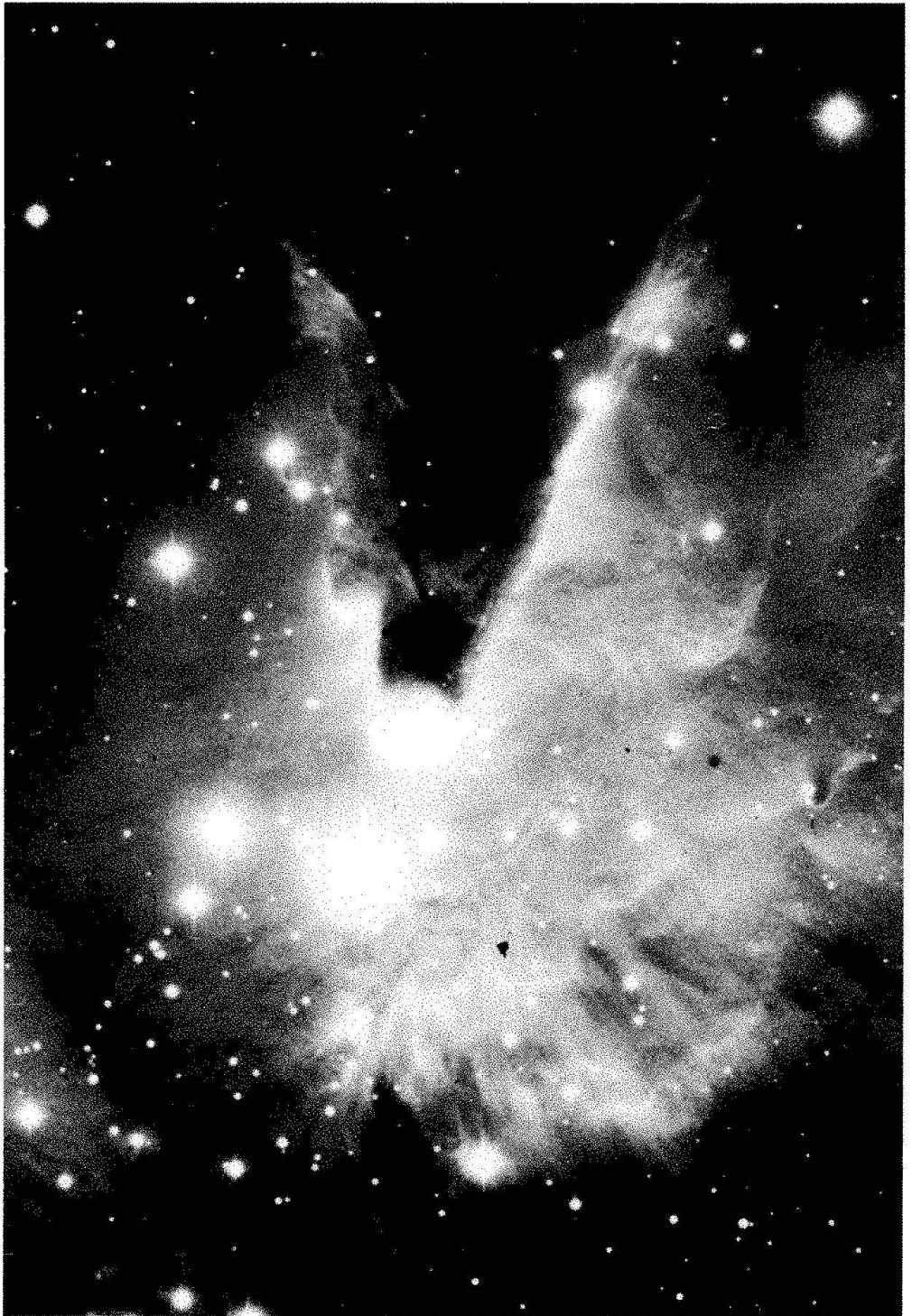


Fig. 6. La nébuleuse de la Quille, dans la Licorne. Au-dessus de l'énorme masse opaque, panachée de lumière, on identifie une vingtaine d'étoiles nées il y a moins d'un million d'années, c'est-à-dire après la naissance des premiers hommes sur la Terre.

satellites de Jupiter et de Saturne. De surcroît, les planètes géantes possèdent suffisamment de masse pour retenir dans leur atmosphère la composante normale d'hydrogène et d'hélium de la nébuleuse primitive. L'accumulation de la masse d'une planète produit de la chaleur (énergie gravitationnelle transformée en énergie cinétique). Plus la masse est grande, plus la température initiale est élevée. L'évacuation de cette chaleur, dans les ères qui suivent, est le moteur

de l'évolution de la planète et l'élément dominant de sa constitution physique. La Lune, Mercure, de petites masses, ont évacué leurs chaleurs initiales en quelques centaines de millions d'années. Par la suite, pétrifiées pour l'éternité, elles se sont contentées d'enregistrer l'arrivée des météorites à leur surface. C'est ce qui explique leur relief criblé de cratères météoritiques. Mars est un cas intermédiaire: quelques volcans, quelques canyons révèlent une activité

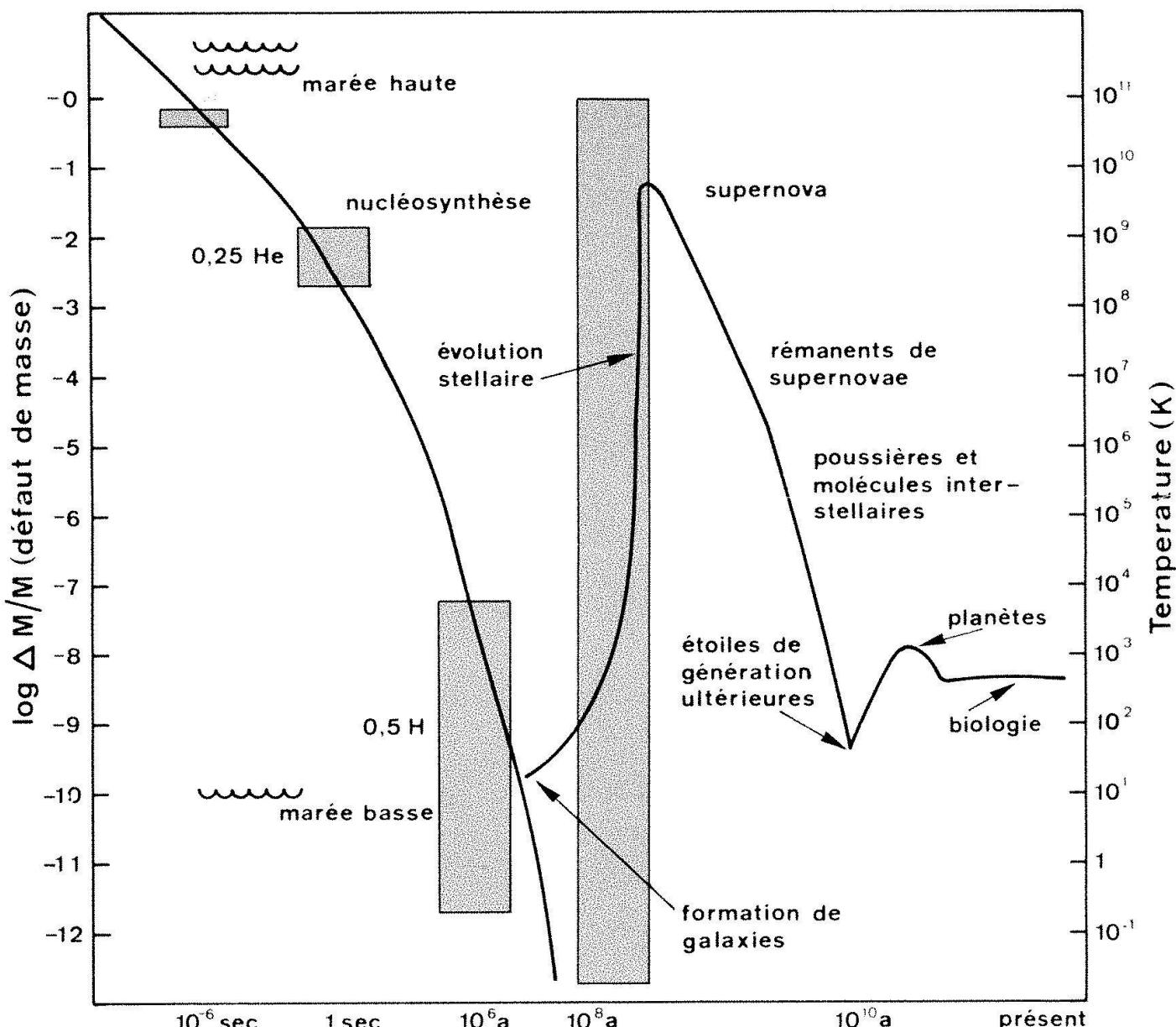


Fig. 7. Evolution de l'univers: Semblable à la Fig. 1. En ordonnée à droite est ajoutée une échelle de température, et, en bas, une échelle de temps. La courbe continue décrit d'abord la chute de la température universelle (Big Bang) qui permet la formation des nucléons, des noyaux (H et He) (nucléosynthèse primordiale) et des premiers atomes d'hydrogène et d'hélium. On peut considérer cette première phase comme un échec sur le plan de la complexité croissante: aucun noyau lourd n'a été formée. Grâce à la force de gravité la croissance de la complexité reprend dans les galaxies et les étoiles. La gravité sert d'ascenseur. Par le théorème du viriel elle permet aux étoiles de remonter l'échelle des énergies (thermiques) et de retrouver successivement les domaines électromagnétiques et nucléaires – avec nouvelle nucléosynthèse et formation des éléments lourds. Puis, après l'explosion de l'étoile, la température redescend (dans les rémanents de supernovae) et la force électromagnétique engendre les poussières et les molécules interstellaires.

Autour d'étoiles de générations ultérieures, ces poussières vont s'agglutiner pour engendrer des planètes. A nouveau la température va remonter. Dans les océans primitifs reprendra avec vigueur la poursuite de la complexité cosmique.

interne passée, vraisemblablement largement éteinte aujourd'hui. La Terre est le prototype de la planète vivante. Elle est loin d'avoir évacué toute sa chaleur «initiale». Volcans en éruption, séismes, mouvements orogéniques et dérive des continents en font foi. Il est intéressant de noter, dans ce cadre,

que les jeux de la sélection naturelle dépendent en partie des variations des conditions physiques dans lesquelles les races animales évoluent. Les changements de climat, amenés par exemple par le mouvement des plaques terrestres, sont de puissants moteurs de l'évolution ...

On a mis récemment en évidence la présence dans certaines météorites de traces «fossiliées» de matières radioactives, de courte durée (moins d'un million d'années). Cette découverte nous rappelle que les étoiles naissent en groupe et qu'à sa naissance notre Soleil était entouré de jeunes étoiles plus ou moins massives. Les plus massives (géantes bleues) vivent toute leur existence en quelques millions d'années. A leur mort, elles ont dispersé sur leur consœurs encore en formation une partie de leur cuisson interne. De là proviennent ces fossiles.

Après avoir revu rapidement les phénomènes physiques qui président à la formation des éléments chimiques et des cortèges planétaires (voir aussi figure 7) je voudrais terminer sur deux points d'une portée plus générale vis-à-vis du problème de «l'origine des choses». Le premier s'adresse à l'évolution des constantes de la physique, le second au rôle de l'expansion universelle.

### Evolution des «constantes» de la physique

On a vu dans les pages qui précèdent le rôle des quatre forces de la nature dans l'élaboration des choses. Chacune de ces forces est caractérisée par une *constante de couplage* et par une portée, qui décrivent l'intensité de son interaction dans l'univers. Pour déterminer une échelle relative, on va donner la valeur unité à la constante de la plus puissante force: la nucléaire. Sa portée est d'environ  $10^{-13}$  cm. L'électromagnétique vient en second avec une valeur environ cent fois plus faible ( $1/137$ ), elle a une portée infinie ( $a r^{-2}$ ). Puis la force faible, avec  $10^{-5}$ , sa portée est de  $10^{-15}$  cm. Et finalement, la gravité, avec la valeur extrêmement basse de  $10^{-40}$ , mais aussi de portée infinie. On peut montrer assez facilement (cela a été fait par Carr and Rees, en particulier) que ces valeurs relatives suffisent, à elles seules, à fixer la structure des atomes, des organismes vivants, des planètes, des étoiles, des galaxies et même de l'univers tout entier. La réponse à la question: Pourquoi les constantes de couplage ont-elles ces valeurs? nous amènerait donc très loin dans la compréhension de l'origine des choses.

La physique moderne nous offre déjà les éléments d'une réponse partielle. Cela s'appelle le programme de la «grande unification».

Selon ce programme, toutes les «constantes» se seraient différenciées à partir d'une seule constante universelle caractérisant une force de portée infinie qui aurait régné sans rivale au tout début de l'univers. D'importants progrès ont été réalisés vis-à-vis de l'unification de trois des quatre forces: la nucléaire, l'électromagnétique, et la faible. Les essais d'intégrer aussi la gravité semblent jusqu'ici n'avoir donné aucun résultat. Affaire à suivre ...

Le schéma le plus populaire aujourd'hui est le suivant. Jusqu'au temps  $10^{-35}$  secondes, les forces nucléaire, électromagnétique et faible sont réunies en une seule force, de portée infinie, avec une constante de couplage dont la valeur est d'environ 2%. Cette force s'exerce sur une seule particule, laquelle peut exister dans de multiples états différents: électrons, neutrinos et quarks variés.

La température à cette époque était de  $10^{24}$  eV ( $10^{28}$  K). Chaque particule possédait assez d'énergie cinétique pour monter un piano du sol jusqu'au dixième étage ... Il se passe alors une quantité de réactions importantes qui pourraient expliquer l'absence d'anti-matière dans notre univers. Avec le refroidissement, les constantes de couplage commencent à diverger. L'électromagnétique et la faible varient lentement tandis que la nucléaire croît jusqu'à la valeur unité. Les portées de ces deux dernières se raccourcissent.

La théorie permet de comprendre le mécanisme de ces variations. Elles font intervenir un ensemble de particules nouvelles dont le rôle est de transporter les forces - au même titre que les photons transportent la force électromagnétique. Le tout est intégré dans une théorie de jauge à transformations locales et à symétries spontanément brisées. Il n'est pas dans le cadre de cet article d'expliquer en détail le sens de ces mots. La chose à retenir c'est que la physique moderne nous ouvre la possibilité de comprendre les mécanismes par lesquels les constantes ont pris leur valeur présente et que ces mécanismes sont liés à la baisse de température et de densité dans l'univers en expansion.

### Expansion et compléxité de la matière

Dans l'organisation du monde, l'expansion joue encore un rôle fondamental à un tout

autre niveau. Considérons l'événement par lequel un proton et un électron se combinent pour donner un atome d'hydrogène. C'est un exemple typique d'organisation de la matière.

A ce moment un photon est émis. Ce photon, qui s'en va au loin, transporte à la fois l'excès d'énergie dont la perte va permettre au système de se lier, et l'excès d'entropie dont la perte va permettre au système de rencontrer les exigences de la deuxième loi de la thermodynamique. Si ce photon est réabsorbé par un autre atome d'hydrogène, tout se défait et aucune organisation nette n'a été acquise par l'univers. Il est donc indispensable que les photons émis soient «neutralisés», c'est-à-dire mis dans l'impossibilité d'agir à nouveau. Dans un univers stable, sans expansion, cela serait impossible: le photon finirait toujours par interagir à nouveau ... C'est l'expansion qui fait que la très grande majorité des photons émis n'interagira plus jamais (du moins jusqu'au prochain chapitre de contraction universelle, s'il y en a un ...) puisqu'ils se propagent dans un univers de plus en plus vide, où ils ont de moins en moins de chance d'être absorbés et puisque, à cause de l'expansion, ils perdent pro-

gressivement leur énergie, ce qui les rend doublement incapables de revenir sur la scène ...

Chaque étape d'organisation naturelle: nucléons en noyaux, noyaux en atomes, atomes en molécules, molécules en organismes, se passe dans des conditions analogues et exige la neutralisation de photons. Ce phénomène d'expansion qui semble n'intéresser que des entités très éloignées de nous paraît donc jouer un rôle fondamental dans l'organisation des choses, tant par son effet sur les constantes de couplage que par son rôle décisif sur l'organisation du monde à tous les niveaux.

## Littérature

Reeves, H. 1981. Patience dans l'azur. L'évolution cosmique. Editions du Seuil, 27, rue Jacob, Paris VI, France.

## Adresse de l'auteur:

Prof. Dr. H. Reeves  
Centre d'Etudes Nucléaires  
de Saclay  
F-91190 Gif-sur-Yvette (France)