

Origine, migration et évolution

Thierry Stolarczyk*

Document écrit dans le cadre de la journée d'étude « Migrations disciplinaires » au Frac Centre-Val de Loire le 17 mars 2016.

La migration, plus communément appelée *diffusion* en science, est à l'œuvre dans de nombreux phénomènes naturels. Engendrée par des déséquilibres locaux, elle propage leurs effets à distance. Ainsi, une goutte d'encre bleue déposée à la surface de l'eau contenue dans un verre finit par colorer la totalité de l'eau du verre. Une température plus élevée au sol qu'en altitude crée un mouvement de convection qui emporte les aérosols, particules légères de matière, dans l'atmosphère. Comme nous allons le voir maintenant, les explosions d'étoiles signent le début des longues migrations de noyaux atomiques qui constituent l'être humain.



Les molécules d'une goutte d'encre déposée à la surface de l'eau finissent par migrer dans la totalité du volume.

Origine

Trois cent soixante-dix mille ans après le big-bang, l'expansion de l'Univers a permis la création des trois éléments chimiques les plus légers: l'hydrogène, pour trois-quarts du total, l'hélium pour un quart et une petite quantité de lithium. Quelques centaines de millions d'années plus tard, de grands nuages de cette matière originelle se condensent sous l'effet de la gravitation. Soumis à la pression de leur propre poids, les noyaux d'hydrogène se transforment en hélium par fusion thermonucléaire, émettant une énergie s'opposant à l'effondrement : les premières étoiles brillent.

Lorsqu'une bonne partie de l'hydrogène a été consommé, l'énergie libérée par la fusion diminue et l'étoile se contracte. La pression de son cœur augmente et l'hélium peut alors fusionner en donnant du carbone. Au fil de combustions successives, pourvu que sa masse initiale soit suffisante, l'astre devient une matriochka de différents noyaux atomiques : l'hydrogène imbrulé est à la surface, puis vient l'hélium, le carbone, l'azote, l'oxygène, et tous les éléments chimiques de la table de Mendeleïev jusqu'au cœur de fer. Le fer ne peut pas fusionner dans une étoile. Au bout de quelques centaines de millions d'années l'effondrement est donc inéluctable : le cœur de l'étoile devient immédiatement dense au-delà de l'imaginable, formant une étoile à neutron ou un trou noir ; Les couches externes y rebondissent violemment ; elles rejettent dans l'espace interstellaire, s'entrechoquent, percutent la matière environnante, et produisent par réactions



La Nébuleuse du Crabe observée en optique par le télescope spatial Hubble – © NASA, ESA, J. Hester and A. Loll (Arizona State University)

nucléaires tous les autres éléments chimiques connus jusqu'à l'uranium.

Migration

Le 4 juillet 1054 des astronomes chinois remarquèrent la lumière d'un nouvel astre dans la constellation du Taureau, plus brillant que toutes les autres étoiles du ciel. Trois mois durant l'étoile fut visible à l'œil nu, même de jour. Aujourd'hui il reste une magnifique nébuleuse, la nébuleuse du Crabe, située à 6300 années-lumière de la Terre, arborant une structure filamentaire en expansion où l'on détecte principalement de l'hydrogène et de l'hélium, mais aussi du carbone, de l'oxygène, de l'azote, du fer, du néon et du soufre, se déplaçant à plusieurs milliers de kilomètres par seconde.

Deux à trois explosions de ce type, appelées supernovæ, surviennent dans la Galaxie chaque siècle. Une centaine de restes de supernova y sont aujourd'hui visibles. Avec le temps la matière éjectée se dilue complètement dans le milieu interstellaire. En juillet 1054 les astronomes chinois observaient le début d'une lente migration d'atomes au travers de l'espace.

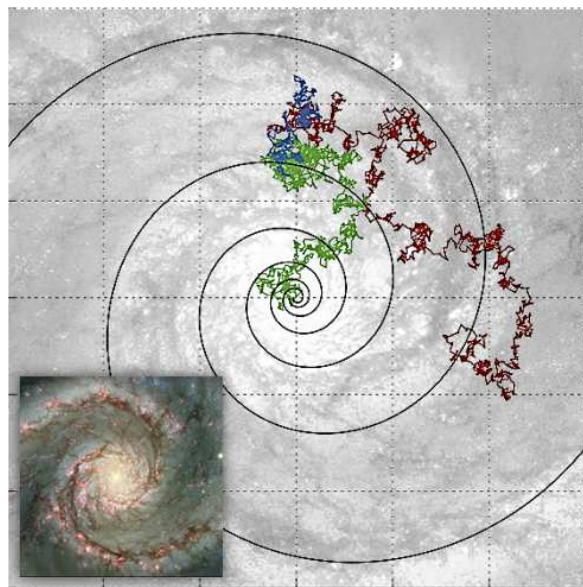
Le Soleil présente une composition certes dominée par l'hydrogène et l'hélium, mais qui est également riche de tous les noyaux engendrés par l'explosion des premières étoiles. L'oxyde de silicium est la composante principale de l'écorce terrestre, le fer celle du noyau. Notre corps comporte beaucoup d'hydrogène, reliquat des premières minutes de l'Univers, mais aussi du carbone, de l'azote, de l'oxygène et deux douzaines d'espèces d'atomes plus lourds nécessaires au fonctionnement de la machinerie humaine.

Tous ces éléments, sauf l'hydrogène, ont été produits par les étoiles, et se sont accumulés sous l'effet de la gravitation au moment de la formation du système solaire, après avoir lentement migré pendant des millions d'années.

Evolution

Les atomes produits dans les creusets stellaires, et plus tard lors de leur explosion, s'assemblent en molécules complexes, puis en cellules, pour donner naissance au vivant. Si le vivant se distingue de la matière inerte par sa capacité à se dupliquer, aucune évolution n'est possible, et l'être humain n'existerait pas, si la recopie était parfaite. La sélection du mieux adapté à l'environnement fait participer les réplifications imparfaites aux nouvelles générations. Les mutations génétiques semblent spontanées et aléatoires, elles relèvent pourtant d'interaction avec le milieu extérieur. Parmi celles-ci les émissions radioactives des atomes de l'écorce terrestre sont des plus avérées car, en traversant la matière vivante, elles peuvent endommager les molécules complexes comme l'ADN.

Mais il est une source plus marquante encore de cette évolution: le rayonnement cosmique, une pluie incessante de particules qui nous atteint à raison d'une centaine par seconde, et qui produit les mêmes effets que la radioactivité. Cette pluie cosmique est engendrée par la collision avec l'atmosphère de noyaux atomiques accélérés à des vitesses proches de celle de la lumière. Ils présentent une composition similaire à celle observée dans



Simulation de la trajectoire de trois rayons cosmiques dans la galaxie, chahutés par les champs magnétiques interstellaires. L'image est un carré de 100 000 années-lumière de côté – © Galaxie M51, NASA and The Hubble Heritage Team (STScI/AURA) et F. Effenberger et al. A&A 547, A120 (2012) pour le graphique.

le système solaire. Les quelques différences observables montrent qu'avant de nous parvenir ils ont migré, chahutés par les champs magnétiques interstellaires pendant des centaines de milliers ou des millions d'années, en interagissant avec les nuages de gaz et de poussières. On sait aujourd'hui que les rayons cosmiques sont accélérés dans la déferlante de matière créée lorsque l'éjecta des supernovæ rencontre les atomes du milieu interstellaire.

Les éclats célestes sont comme des gouttes d'encre dans un océan cosmique

Tous les éléments, sauf l'hydrogène issus du big-bang, ont été produits par les premières étoiles et les générations qui ont suivi. Ejectés par le dernier souffle des étoiles dans la violence d'une supernova, ils ont migré pendant des millions d'années avant de s'accumuler dans les grumeaux de la nébuleuse protoplanétaire, formant la Terre et constituant les briques du vivant. D'autres étoiles en mourant accélèrent ces mêmes noyaux qui, après avoir migré vers l'atmosphère terrestre, sont peut-être à l'origine de l'explosion du Cambrien ou du moment où nos ancêtres sont devenus bipèdes.

Dans la nature, la migration est synonyme de mouvement, donc du temps qui passe ; Dans le cosmos c'est un synonyme de la vie.

**Astrophysicien au CEA Saclay, à l'Institut de recherche sur les lois fondamentales de l'Univers (Irfu). Après avoir traqué les neutrinos solaires sous une montagne en Italie, puis étudié leurs propriétés au CERN à Genève, Thierry Stolarczyk a recherché les neutrinos cosmiques avec Antares, un télescope dans les abysses Méditerranéennes. Il est aujourd'hui au service d'astrophysique du CEA de Saclay, à la tête de l'équipe CTA, une nouvelle génération d'observatoire de rayons gamma destiné à élucider le mystère de l'origine du rayonnement cosmique. Épris depuis toujours de la diffusion de la Science, il participe à de nombreuses actions de popularisation et publie plusieurs ouvrages à destination du grand public.*