

LE PROBLEME DE LA FORMATION DE L'HELIUM DANS L'UNIVERS ET DANS LA GALAXIE *

par P. LEDOUX,

Professeur à l'Université de Liège.

En gros, l'évidence spectroscopique directe concernant les atmosphères stellaires jointe aux résultats de la théorie de la structure interne des étoiles et de l'analyse des roches terrestres et des météorites, ont conduit à reconnaître la grande prépondérance de l'hydrogène et de l'hélium d'une part, et des régularités dans la distribution des éléments lourds d'autre part, qui suggèrent que les abondances observées sont étroitement liées aux propriétés nucléaires.

Au début, ce fut l'uniformité des résultats qui frappa le plus et l'on pensa d'abord à une origine universelle des éléments qui auraient été créés dans les premières phases à hautes température et densité de l'expansion de l'Univers. Mais ce type de théorie (Alpher, Gamov, Bethe 1948; Hayashi 1950; Alpher, Follin, Herman 1953) se heurtait à une difficulté très sérieuse liée à l'absence d'éléments stables de masse atomique 5 et 8. Ainsi, la formation des éléments à partir des neutrons et protons primitifs en équilibre avec les électrons et les positrons issus de la matérialisation des photons ne pouvait guère progresser au-delà de la formation de l'hélium.

D'autre part, la classification des étoiles de la galaxie en Population I (systèmes plats, plan galactique, amas galactiques contenant des étoiles très jeunes) et en Population II (systèmes sphériques, noyau central de la galaxie, halo galactique, amas globulaires, étoiles vieilles) révéla l'existence d'une différence systématique en ce qui concerne l'abondance des éléments plus lourds que l'hélium qui sont nettement moins abondants dans les étoiles vieilles (moins de 1 %, parfois de l'ordre de 1 ‰) que dans les étoiles jeunes (2 à 3 %). Ceci implique qu'une fraction appréciable des éléments lourds en question a dû être fabriquée, au cours de la vie de la galaxie elle-même, dans les creusets gigantesques que constituent les intérieurs d'étoiles quand, durant les phases avancées de leur évolution, les températures y atteignent des valeurs de quelques milliards de degrés. Ces phases avancées conduisent à des instabilités violentes, responsables

* Résumé de la Conférence prononcée à la Société Belge d'Astronomie.

peut-être des explosions de supernovae, au cours desquelles la matière transformée de l'étoile est éjectée dans le milieu interstellaire qu'elle enrichit en éléments lourds permettant la formation de nouvelles générations d'étoiles contenant une proportion de plus en plus grande de ces éléments.

Cette théorie de la nucléosynthèse stellaire proposée dès 1946 par Hoyle et Van Albada connut, dans la suite, aux mains des Burbidge, Hoyle et Fowler, un tel succès dans l'explication détaillée des abondances des éléments lourds que la théorie universelle fut largement délaissée.

Pendant longtemps, il parut aussi naturel d'accepter implicitement que tout l'hélium observé avait été également produit dans les étoiles. Cependant au fur et à mesure que la théorie de l'évolution stellaire progressait, un certain malaise se développait à ce sujet. En effet, dans le cadre de la théorie usuelle de l'évolution stellaire, si une grande quantité d'hélium est effectivement produite dans les premières phases de l'évolution, par contre, au moment où les étoiles deviennent instables à des phases beaucoup plus avancées, la majeure partie de cet hélium a déjà été converti en éléments plus lourds et bien peu d'hélium est éjecté dans le milieu interstellaire. Sur cette base, un calcul détaillé de Cameron, Hansen et Truran (1965) montre que ce sont les étoiles de faibles masses qui, en fait, peuvent seules contribuer considérablement à l'enrichissement en hélium du gaz interstellaire. Dans ces conditions, comme ces étoiles ont des vies très longues, on comprend aisément que l'on ne pourra atteindre les abondances considérables de l'hélium, 30 à 40 % en masse, observées dans les étoiles jeunes O et B que si l'âge de la galaxie est très élevé. De plus, il semble que lorsque le système solaire s'est formé, il y a 4,5 à 5 milliards d'années, l'abondance de l'hélium devait être déjà de l'ordre de 24 %, valeur déduite de l'étude des rayons cosmiques issus des couches superficielles du Soleil dont la composition chimique n'a guère pu être modifiée depuis cette époque. En s'efforçant de rendre compte de ces abondances de l'hélium (24 % il y a $4,5 \cdot 10^9$ a et 36 % à l'heure actuelle) ces auteurs trouvent, pour l'âge de la galaxie, une valeur de l'ordre de 22 milliards d'années, nettement plus grande que celle de l'âge de l'Univers lui-même qui, d'après nos connaissances actuelles, doit se situer entre 10 et 13 milliards d'années.

Ces difficultés ramenèrent l'attention sur la possibilité qu'une large fraction de l'hélium observé actuellement provienne en réalité du processus universel qui a pu se dérouler dans les premières phases d'expansion de l'Univers et qui, comme nous l'avons rappelé, ne se heurte à de réelles difficultés que pour les éléments plus lourds que l'hélium.

Presque simultanément, la découverte en 1965, par Penzias et Wilson, à 7,3 cm, d'une radiation générale de fond qui pourrait être la trace subsistant aujourd'hui de la radiation intense qui accompagna l'expansion

initiale de l'Univers ramena l'attention sur le problème cosmologique et renforça la présomption de l'origine de l'Univers dans une espèce d'explosion gigantesque (big-bang theories). Depuis cette radiation a été observée également à d'autres longueurs d'ondes (3,2; 20,7; 0,26 cm) et sa répartition spectrale semble bien correspondre à celle d'un rayonnement noir à 3°K. De plus, jusqu'ici toutes les observations concordent à attribuer à cette radiation un degré d'isotropie très élevé qui renforce l'idée d'une origine cosmique universelle.

En tout cas, c'est le point de vue qui prévaut actuellement, même si la thermalisation de la radiation globale des étoiles de la galaxie qui conduirait également à un rayonnement noir à cette température ne peut être écartée complètement. Sur cette base, et en adoptant un modèle d'Univers, il est assez facile de remonter aux conditions qui devaient exister dans les toutes premières phases d'expansion et de répéter les calculs de Hayashi, Alpher, Follin et Herman afin d'établir la quantité d'hélium produite au moment où l'expansion a procédé suffisamment loin pour que les processus nucléaires soient devenus négligeables. On trouve que l'hélium prégalactique accumulé représente une trentaine de pourcents de la masse totale. Ainsi, nous nous trouverions dotés dès le départ d'une quantité d'hélium supérieure même à celle qui caractérisait la constitution de la matière galactique à la formation du système solaire (24 %) à moins que celle-ci ne s'avère fautive et doive être réaugmentée appréciablement.

Conscients de cette difficulté, certains cosmologistes et astrophysiciens (Hawking et Taylor, 1966, Thorne, 1967) ont cherché à réduire l'abondance prégalactique de l'hélium en recourant, avec un certain succès d'ailleurs, à des modèles d'Univers anisotropes. Toutefois, tous ces modèles conduisent à des durées de vie pour l'Univers qui au maximum atteignent quelque 4 à 5 milliards d'années, ce qui paraît nettement trop court si on songe que l'évolution stellaire attribue à bien des amas globulaires des âges d'au moins 8 à 9 milliards d'années qui pourraient cependant être réduits quelque peu si l'on adoptait des abondances initiales d'hélium plus élevées que ce que l'on a admis jusqu'ici dans ces calculs.

Enfin, tout récemment, différents astrophysiciens ont signalé l'existence d'étoiles chaudes de population II (halo galactique, extrémité bleue de la branche horizontale des amas globulaires) dans l'atmosphère desquelles l'hélium est quelque cent fois moins abondant par rapport à l'hydrogène que dans les étoiles similaires de population I alors que les éléments plus lourds n'y montrent que la déficience habituelle typique de la population II.

Il paraît très difficile de concilier ces nouvelles données d'observation avec la grande abondance universelle de l'hélium suggérée par les théories cosmologiques et elles s'accorderaient mieux avec une théorie attribuant à l'hélium une origine galactique. Il est d'ailleurs certain que quel-

que hélium tout au moins est produit dans le cours normal de l'évolution stellaire au sein des galaxies et il est très important d'étudier en détail les possibilités de cette production locale. A ce point de vue, différentes indications et notamment l'existence des étoiles du type de Wolf-Rayet dont l'interprétation échappe à la théorie usuelle de l'évolution stellaire, suggèrent qu'une fraction au moins des étoiles massives pourraient bien évoluer suivant un schéma très différent, leur composition chimique étant maintenue homogène par des courants méridiens entretenus par une rotation rapide au moins au cours des premières phases de leur évolution alors que l'hydrogène est transformé en hélium. Il est alors facile de montrer que ces étoiles qui, au cours de leur évolution, traverseraient la région du diagramme de Hertzsprung-Russell occupée par les étoiles de Wolf-Rayet, deviendraient rapidement instables rejetant dans l'espace interstellaire une grande partie de leur masse déjà transformée largement en hélium. Ceci pourrait accroître appréciablement la production d'hélium galactique et des calculs détaillés destinés à évaluer cet effet sont en cours à l'Institut d'Astrophysique de Liège.

Quoi qu'il en soit, il est clair que la question de l'origine de l'hélium, cet élément découvert il y a presque exactement cent ans dans le Soleil a atteint un stade critique et que la résolution des difficultés présentes ne manquera pas d'entraîner des progrès importants soit dans nos théories cosmologiques, soit dans celles de l'évolution stellaire, soit peut-être dans les deux.