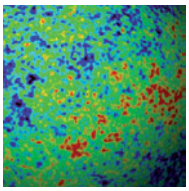

La nucléosynthèse primordiale : une fenêtre sur la physique des premières minutes de l'Univers

Aux tous premiers instants de son histoire, l'univers, extrêmement dense et chaud, est un plasma constitué de rayonnement et de particules. C'est pourquoi la physique de l'infiniment petit s'y applique admirablement. Elle constitue la clé de la compréhension d'une période cruciale de l'histoire du monde, celle qui a vu apparaître les premiers noyaux d'atomes.

Introduction

La nucléosynthèse primordiale (BBN) qui s'est déroulée dans les minutes suivant le Big-Bang a formé les éléments chimiques les plus légers : hydrogène, hélium et lithium. Elle constitue, aux côtés de l'expansion de l'Univers et du rayonnement cosmologique fossile (« *Cosmic Microwave Background* », *CMB* [1]), l'un des trois piliers de la théorie du Big-Bang. En effet, les proportions relatives des isotopes de ces éléments, couvrant 9 ordres de grandeur, de $^4He/H \approx 0{,}1$ à $^7Li/H \approx 10^{-10}$ (rapport en nombre qui correspond au rapport du nombre d'atomes de l'élément sur le nombre d'atomes de l'hydrogène) sont expliquées de manière cohérente dans le cadre du modèle cosmologique standard. La densité baryonique de l'Univers Ω_b (qui correspond à la densité d'atomes, ou de façon équivalente, le paramètre η utilisé dans cet article qui est le rapport du nombre de baryons au nombre de photons) est un paramètre de première importance pour la cosmologie. Afin de déterminer Ω_b, il convient de confronter les calculs théoriques de nucléosynthèse primordiale et les observations astronomiques des isotopes cosmologiques impliqués. Par ailleurs, le satellite WMAP (Wilkinson Microwave Anisotropy Probe) dévolu à l'étude du CMB a permis de déterminer que cette densité baryonique de l'Univers vaut 4 % de sa densité totale avec une bonne précision. Il faut aussi noter que le nombre de familles de neutrinos, qui intervient dans le calcul du taux d'expansion de l'Univers primordial, a été déterminé par les expériences de physique des particules au CERN. Enfin, les sections efficaces des réactions nucléaires, parties prenantes dans la nucléosynthèse primordiale ont, quant à elles, pour la plupart été mesurées en laboratoire. Il est désormais possible de mettre à profit cette période de l'Univers pour tester et contraindre de multiples aspects de la cosmologie primordiale, de l'astroparticule, de la physique fondamentale, ainsi que de l'astrophysique. Voici donc un domaine interdisciplinaire par excellence.

1. Voir l'article suivant de F.-X. Désert sur Archeops.

La comparaison entre théorie et observations montre que les mesures spectroscopiques des sites astrophysiques les plus primitifs, qui permettent de remonter aux abondances primordiales, confortent les déductions de WMAP concernant le deutérium (noté d, D ou ^2H) et l'hélium-4 (^4He). Mais une grande disparité apparaît s'agissant du lithium-7 (^7Li) : les abondances mesurées sont deux à trois fois inférieures à l'abondance déduite de l'expérience WMAP. Ce mystère ouvre un chapitre passionnant de l'astrophysique et de la cosmologie.

Abondances primordiales : observations comparées aux modèles

Trois modes de production des noyaux d'atomes opèrent dans l'univers, i) la nucléosynthèse primordiale, responsable de la formation des isotopes les plus légers ii) la nucléosynthèse par collision noyau-noyau à des énergies au-delà de quelques MeV par nucléon, qui engendrent trois éléments fragiles, Li, Be, B et iii) la nucléosynthèse stellaire, responsable de la formation de la plus grande partie des noyaux plus lourds, depuis le carbone jusqu'à l'uranium par le biais de la fusion thermonucléaire et la capture (lente ou rapide) de neutrons.

La modélisation du premier mode de production, celui de la BBN, permet d'obtenir les abondances de ^4He, D, ^3He et ^7Li en fonction du seul paramètre η, rapport du nombre de baryons au nombre de photons. La comparaison de ces abondances avec celles obtenues à partir d'observations astronomiques d'objets ayant peu évolué (non contaminés par la nucléosynthèse stellaire) permet alors de déterminer la valeur de ce paramètre cosmologique. Dans ce cadre, les astronomes s'efforcent de développer les observations dans les sites astrophysiques susceptibles de fournir les abondances les plus primitives possibles afin de s'approcher au plus près des valeurs primordiales.

Le lithium

L'abondance de lithium est mesurée dans des étoiles vieilles du halo de notre Galaxie. Certaines se sont formées à peine un milliard d'années après le Big-Bang. Les

Article proposé par : Alain Coc, coc@csnsm.in2p3.fr, Centre de spectrométrie nucléaire et de spectrométrie de masse (CSNSM), Université Paris-Sud/CNRS. Elisabeth Vangioni, vangioni@iap.fr, Institut d'Astrophysique de Paris (IAP), Université Pierre et Marie Curie/CNRS.

mesures effectuées à l'aide de la spectroscopie à la surface de ces étoiles présentent une caractéristique étonnante : ces valeurs sont presque indépendantes de la quantité d'éléments chimiques complexes (appelée métallicité * par les astrophysiciens) dont le fer est le représentant caractéristique. Ainsi voit-on se dessiner un plateau (appelé le plateau des Spite) dans le diagramme Li/H en fonction de [Fe/H] (*figure 1*). Si le lithium avait été formé en même temps que le fer dans les étoiles, alors la croissance du lithium aurait lieu en même temps que celle du fer. Ce plateau signifie par conséquent que le lithium a dû être produit avant toute nucléosynthèse stellaire. Par ailleurs, le Li est censé être détruit à relativement basse température en raison de sa fragilité nucléaire. Malgré cela, l'existence de ce plateau montre que le rapport Li/H observé dans l'atmosphère de ces étoiles primitives n'a pas été notoirement altéré, ce qui indique son probable caractère primordial. Tous isotopes stables confondus, la valeur ainsi observée est Li/H=1 à 2.10^{-10}, nettement inférieure à l'abondance mesurée par la mission spatiale WMAP.

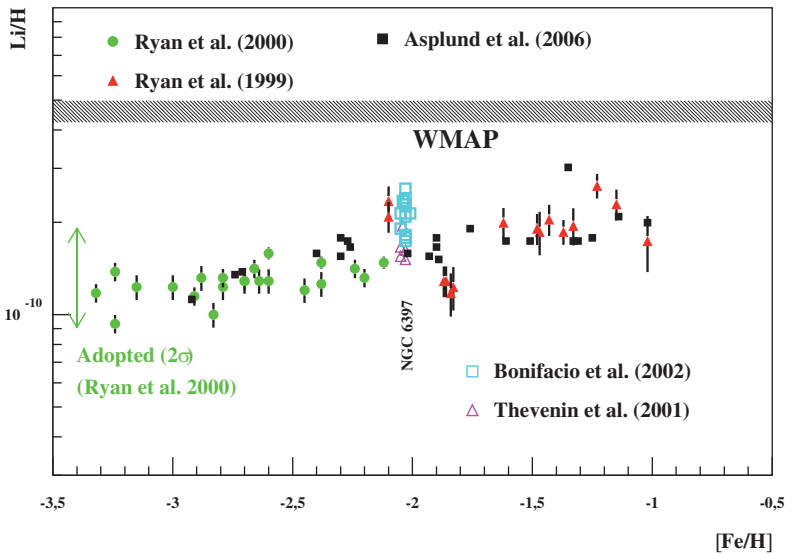

Figure 1 – Observations du rapport Li/H en fonction de la métallicité * dans les étoiles du halo de la Galaxie. Plusieurs séries de mesures sont présentées ; la valeur moyenne du rapport Li/H est nettement inférieure à celle déduite de l'expérience WMAP (bande grisée) à partir des calculs de la BBN. Cela illustre le problème du lithium.

* Ici, la métallicité, abondance des éléments lourds comme le fer, est représentée sous forme logarithmique relativement à l'hydrogène, Fe/H rapportée aux abondances solaires $Fe/H|_{\odot}$ correspondantes soit : $[Fe/H]=\log10(Fe/H)- \log10(Fe/H|_{\odot})$.

Par ailleurs, très récemment, grâce au Very Large Telescope (VLT) de l'ESO situé au Chili, il est devenu possible par l'analyse des profils des raies spectroscopiques de déterminer le rapport entre les deux *isotopes* stables de lithium, $^6Li/^7Li$, dans les étoiles les plus primitives de la Galaxie. L'abondance du $^6Li/H$ a pu ainsi être déterminée et vaut environ 5.10^{-12}. Cette mesure est environ 1 000 fois supérieure au calcul de l'abondance calculée dans le cadre de la BBN (environ 7.10^{-15}). Ces nouvelles mesures méritent d'être confirmées, mais elles ouvrent d'ores et déjà un nouveau champ d'investigation pour les astrophysiciens qui doivent désormais comprendre cette observation, soit en reprenant l'analyse des données nucléaires de la BBN, soit dans le cadre de modèles de l'évolution cosmique.

Le deutérium

En raison de sa fragilité nucléaire, le deutérium est irrémédiablement détruit dans les étoiles, ce qui conduit son abondance à décliner continûment au fil de l'évolution. Les nuages de gaz situés à des distances cosmologiques sont les sites astrophysiques les mieux à même de représenter le deutérium primordial car, situés à très grande distance, ils sont très primitifs. Si par chance, ils se trouvent sur la ligne de visée d'un quasar encore plus lointain, des raies d'absorption peuvent être observées ce qui permet de mesurer le rapport D/H. Les mesures effectuées sont encore peu nombreuses et se situent entre 2 et 3.10^{-5}.

L'hélium

Contrairement au deutérium, l'abondance de ^4He croît continûment au cours de l'évolution car cet isotope, outre sa production notable au cours de la nucléosynthèse du Big-Bang, est aussi synthétisé par les étoiles. La mesure de son abondance s'effectue dans des régions très chaudes, les régions HII (par définition des nuages de gaz où l'hydrogène est ionisé) des galaxies bleues compactes (galaxies peu évoluées). En effet, l'hélium est observé de façon optimale à travers son état ionisé, qui requiert donc une température élevée. La méthode d'évaluation s'avère délicate car de nombreuses erreurs statistiques et systématiques viennent entacher les mesures effectuées. La valeur moyenne vaut en fraction de masse 0,245 [2]. Par ailleurs, le cas de ^3He est encore plus complexe car certaines étoiles le produisent et d'autres le détruisent tout au long de l'évolution, de sorte que l'évaluation de son abondance primitive à partir de ces observations est hautement tributaire des modèles stellaires.

La *figure 2* représente le calcul de nucléosynthèse primordiale (courbes bleues). Les abondances de ^4He (en fraction de masse) et de D, ^3He et ^7Li (en nombre d'atomes par rapport à l'hydrogène) sont ainsi exprimées en fonction de η, rapport baryons/photons. Les

2. On peut exprimer les abondances des éléments de deux façons : en nombre (voir définition dans l'introduction) et en fraction de masse qui représente le rapport entre la masse de l'élément et la masse totale considérée.

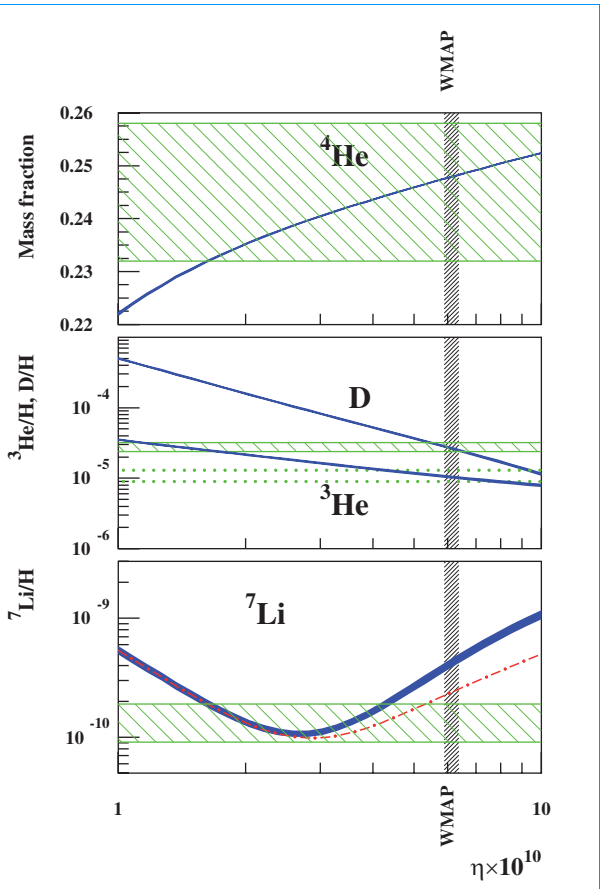

Figure 2 – Calcul des abondances primordiales des noyaux ^{3,4}He, D, ^{7}Li (courbes bleues) dans le cadre de la BBN en fonction du paramètre η (nombre de baryons sur nombre de photons). Ces calculs sont confrontés aux observations spectroscopiques (bandes horizontales vertes) et à celles du CMB (bande verticale grisée). La courbe rouge indique la modification requise dans l'évolution du lithium qui permettrait de réconcilier l'ensemble des contraintes observationnelles (***voir texte***).

bandes horizontales (en vert) représentent les abondances des mêmes isotopes déduites des observations spectroscopiques effectuées dans les sites astrophysiques appropriés décrits ci-dessus. La forme en « U » de la courbe du ^{7}Li s'explique par les deux modes de production : sous forme de ^{7}Li effectif lorsque η est petit et indirectement sous forme de ^{7}Be (qui décroît ensuite en ^{7}Li) lorsque η est élevé. L'^{4}He est, quant à lui, peu sensible à la densité baryonique. L'épaisseur des courbes représente les incertitudes provenant de l'imprécision des mesures de sections efficaces nucléaires ; elles ne sont appréciables que pour le lithium.

La bande verticale représente la valeur du paramètre η déduite des observations du satellite WMAP. On constate une très bonne concordance entre l'abondance primordiale de deutérium et l'abondance calculée pour la valeur de η donnée par WMAP. L'accord est bon aussi pour l' ^{4}He, cela en raison des grandes incertitudes liées aux observations. En revanche, il existe un désaccord flagrant pour le ^{7}Li d'un facteur 2 à 3. Ceci constitue le problème du lithium. La courbe rouge indique l'infléchissement du lithium qui permettrait cette réconciliation en modifiant par exemple certaines données nucléaires (voir ci-après).

Nucléosynthèse primordiale et physique nucléaire

La physique nucléaire appliquée à la BBN est *a priori* bien maîtrisée car les réactions nucléaires impliquées peuvent être mesurées dans le laboratoire aux énergies concernées. La *figure 3* représente le « réseau » des principales réactions. Outre les isotopes stables, il faut aussi considérer les noyaux radioactifs de tritium (^{3}H) et de béryllium-7 (^{7}Be) qui décroissent bien après la BBN. Les flèches représentent les réactions nucléaires avec la notation habituelle « (x,y) » pour capture de la particule « x » suivie de l'émission de la particule « y », x et y correspondant à des photons, neutrons, protons, deutons, tritons (t ou ^{3}H) ou ^{3}He. D'autres réactions nucléaires relient ces isotopes, mais leurs sections efficaces et/ou les abondances des isotopes impliqués sont si petites que leur contribution est négligeable. Seules 12 réactions sont importantes pour la nucléosynthèse de ^{4}He, D, ^{3}He et ^{7}Li (en bleu ou noir). Onze de ces réactions sont accessibles aux mesures directes auprès d'accélérateurs. Seul le taux de réaction correspondant à l'ensemble des réactions d'interaction faible induisant les transformations $n \leftrightarrow p$ ($\nu_e + n \leftrightarrow e^- + p$; $\bar{\nu}_e + p \leftrightarrow e^+ + n$) provient essentiellement de la théorie nucléaire. Enfin des mesures récentes de deux réactions nucléaires ont été effectuées (flèches rouges), l'une concerne la production du ^{6}Li (la flèche verte correspondant au canal de destruction de cet isotope), l'autre la destruction du ^{7}Be (voir ci-après).

Avant de poursuivre, déroulons brièvement les stades qui précèdent le scénario de la nucléosynthèse primordiale proprement dite. L'Univers est alors composé de neutrons, protons, électrons, positrons, neutrinos et antineutrinos des trois familles connues. Au-dessus d'une température de 10^{10} K, ces particules sont en équilibre thermodynamique et toutes, sauf les baryons, sont ultra-relativistes ($E >> mc^2$). Le rapport entre neutrons et protons est alors simplement donné par la thermodynamique : $n/p = \exp(-\Delta M_{np}/k_B T)$ où $\Delta M_{np} = 1{,}29$ MeV est la différence de masse entre neutron et proton. A cette époque, ce sont les particules relativistes (photons et neutrinos) qui contribuent essentiellement à la densité d'énergie de l'Univers [3]. Au fil de l'expansion de l'Univers, la densité et la température décroissent. Le taux des réactions $n \leftrightarrow p$ qui maintient neutrons et protons à l'équilibre décroît plus vite que le

3. On peut en effet montrer que le rapport de la densité d'énergie des baryons (neutrons et protons) sur celle des radiations (photons, électrons et neutrinos) est de l'ordre de 0,0001. (Voir P. Peter et J.P. Uzan)

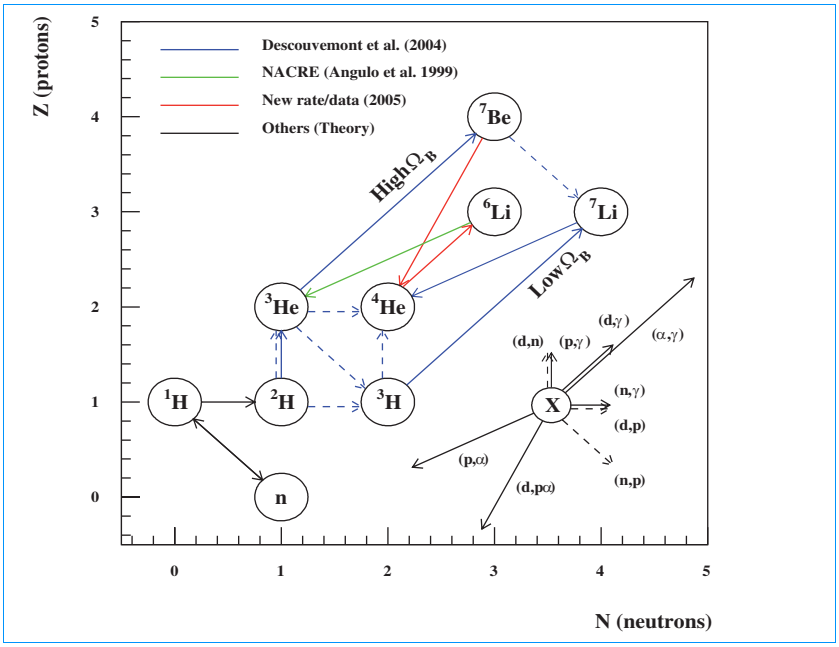

Figure 3 – Le réseau des réactions nucléaires les plus importantes pour la nucléosynthèse primordiale. Le détail des réactions est expliqué en bas à droite. A titre d'exemple, la réaction indiquée pour le nucléide X par la flèche qui part sur la gauche se lit : $X_Z^N + p \rightarrow Y_{Z-1}^{N-2} + \alpha$. Deux voies de production du ^{7}Li existent : directement via le tritium et indirectement via le ^{7}Be qui se transforme ensuite en ^{7}Li par désintégration bêta. Les flèches rouges indiquent des réactions mesurées récemment, l'une produisant le ^{6}Li, l'autre détruisant le ^{7}Be. La flèche verte indique la voie de destruction du ^{6}Li.

taux d'expansion de sorte que vers 10^{10} K, l'équilibre est rompu et le rapport n/p est figé à ≈ 0,2.

C'est alors que la nucléosynthèse primordiale débute, par la formation du deutérium via la réaction n + p → D + γ (voir la *figure 4*, courbe verte). Le deutérium étant très fragile (son énergie de liaison n'est que de 2,2 MeV) il est efficacement détruit par la réaction inverse (photodésintégration) dans le bain de photons thermiques. C'est seulement lorsque la température devient inférieure à 10^{9} K que la formation du deutérium l'emporte sur sa destruction. Dans l'intervalle, la proportion de neutrons a diminué du fait de sa décroissance bêta et n/p vaut ≈ 0,1. La nucléosynthèse se poursuit dans le cadre du réseau nucléaire (*figure 3*) et produit finalement presque exclusivement de l'^{4}He. Ceci est dû à la stabilité exceptionnelle de ce noyau et à l'absence de noyaux de masse A = 5 (pas de réaction ^{4}He + p ou ^{4}He + n possible) et A = 8 (pas de ^{4}He + ^{4}He). La *figure 4* illustre la façon dont les noyaux évoluent au gré des réactions de production/destruction pour aboutir à des abondances figées dès que la température descend au-dessous d'environ 2.10^{8} K. On remarque notamment que la synthèse de ^{4}He se fait aux dépens de la diminution des neutrons, n (courbes bleues).

Comme on l'a vu précédemment, les résultats présentent un désaccord important sur le lithium. Nous nous sommes demandés si l'origine de ce désaccord était nucléaire et nous avons donc entrepris une analyse approfondie des données nucléaires.

Le taux de transformation n ↔ p est calculé dans le cadre de la théorie de l'interaction faible et des distributions de Fermi des neutrinos, électrons et positrons avec comme normalisation la durée de vie du neutron mesurée expérimentalement. Le taux de la première réaction n + p → D + γ peut aussi être calculé théoriquement, mais de façon moins fondamentale, dans le cadre de la « Théorie des Champs Effective ». La section efficace ainsi calculée est en bon accord avec les quelques résultats expérimentaux disponibles. Pour les dix autres réactions, la théorie est impuissante à prédire les sections efficaces, mais de nombreuses mesures ont été effectuées, y compris aux énergies mises en jeu lors de la BBN (~ 100 keV).

Certaines de ces mesures sont récentes et, dédiées spécifiquement à la BBN, elles ont été conduites de sorte que toutes les sources d'incertitude soient maîtrisées. D'autres mesures datent de plusieurs décennies, à une époque où ces réactions étaient étudiées pour leur intérêt purement nucléaire. Les domaines d'énergie ainsi que les précisions afférentes ne sont pas alors forcément adaptés. La cosmologie entre dans une ère de précision, aussi convient-il de tenir compte des incertitudes nucléaires de façon détaillée. C'est pourquoi une compilation des données expérimentales suivie d'une analyse des sections efficaces dans le cadre du modèle nucléaire de la « Matrice-R » (théorie phénoménologique permettant l'ajustement des paramètres décrivant les sections efficaces sur les données expérimentales) a été effectuée. Un calcul de type Monte-Carlo a été mené à bien afin de déterminer les différentes incertitudes qui correspondent à l'épaisseur des courbes sur la *figure 2*. Elles sont surtout importantes pour ^{7}Li mais ne suffisent pas pour envisager une solution au problème identifié précédemment.

En revanche la destruction du ^{7}Be (qui se transforme en ^{7}Li par désintégration bêta) intervient dans le calcul de nucléosynthèse primordiale dans la mesure où il participe à la synthèse des noyaux de masse 7 et fait appel à la réaction ^{7}Be(d,p)2α qui n'est pas comprise dans les douze réactions de la *figure 3*. Comme on l'a mentionné, il existe en effet de nombreuses autres réactions possibles entre les noyaux considérés. Il arrive que des taux de réactions soient très mal connus car uniquement estimés sans données expérimentales. Par exemple, la présence d'une résonance insoupçonnée dans une section efficace peut induire une modification du taux de *plusieurs ordres de grandeur*. Dans ce contexte, la réaction ^{7}Be(d,p)2α, très mal connue, pourrait permettre de détruire notablement le ^{7}Be si son taux était environ 100 fois plus élevé que la valeur publiée dans la littérature. Une telle variation pourrait conduire à la réconci-

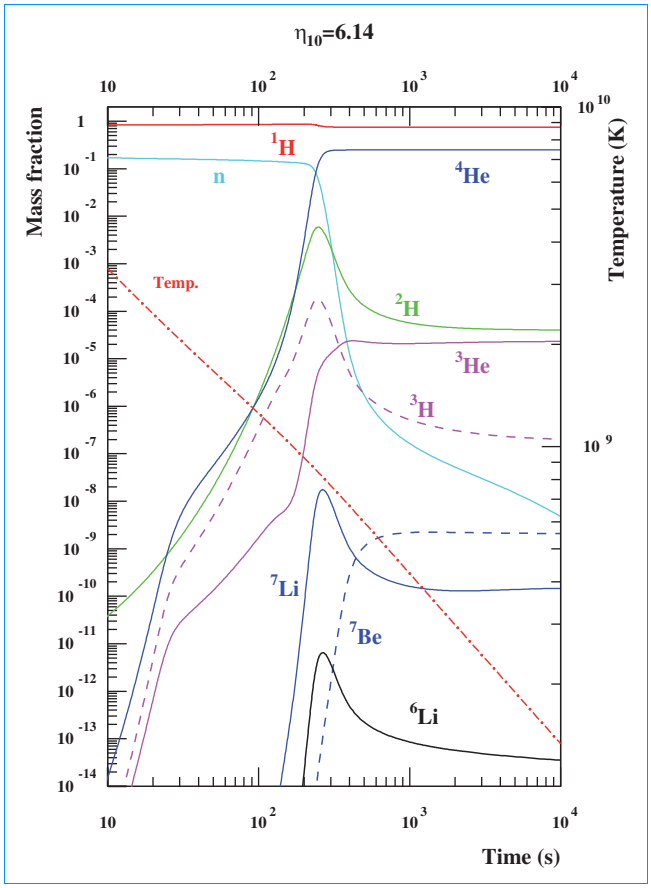

Figure 4 – Evolution de l'abondance des noyaux (exprimée en fraction de masse sur l'ordonnée de gauche) en fonction du temps, au cours de la nucléosynthèse primordiale, des protons jusqu'au béryllium-7. La courbe rouge décroissante en pointillés représente l'évolution de la température (ordonnée de droite). Dès que cette température chute en dessous de 2.10^8 K la nucléosynthèse se fige pour donner les abondances finales, au sortir de la BBN. ^{1}H est le plus abondant (environ 0,75) suivi de ^{4}He (environ 0,25). Les autres isotopes sont à l'état de trace. On remarque la double contribution à la masse 7 : ^{7}Li est formé dans un premier temps, suivi par la synthèse de ^{7}Be ; cela explique la forme en U déjà mentionnée dans la ***figure 2***. A noter que ^{6}Li est extrêmement peu synthétisé au cours de la BBN (inférieur à 10^{-13} en fraction de masse, soit ^{6}Li/H = 7.10^{-15}).

liation recherchée entre les résultats obtenus par WMAP et les observations spectroscopiques du ^{7}Li comme l'indique la courbe rouge de la *figure 2* où ce taux a justement été modifié dans ces proportions (simplement dans le but d'en évaluer l'impact). Les seules données expérimentales disponibles de cette réaction couvraient une région extérieure à la zone d'intérêt pour la BBN. Au vu du manque de ces données expérimentales (les dernières dataient de 1960) et de l'éventuelle importance cosmologique de cette réaction, il a été décidé de la mesurer aux énergies de la BBN auprès du Cyclotron du CRC de Louvain la Neuve. Les résultats de cette expérience ont montré que la section efficace aux énergies de la BBN était en fait inférieure aux estimations précédentes de 30 %. On est loin du facteur 100 espéré ! Cette nouvelle mesure ne permet donc pas de réconcilier le désaccord existant sur ^{7}Li entre les calculs de la BBN, les résultats de WMAP et les observations dans les étoiles du halo galactique.

Concernant le ^{6}Li, les nouvelles mesures spectroscopiques de cet isotope, mentionnées dans le paragraphe II sur les observations, nous ont conduits à nous demander si la nucléosynthèse primordiale du lithium-6 était correctement évaluée. En fait, le ^{6}Li est produit par la réaction ^{4}He(d,γ)^{6}Li et détruit par la réaction ^{6}Li(p,α)^{3}He (voir *figure 3*). Les sections efficaces correspondantes sont disponibles dans la littérature. Alors que le dernier taux est bien connu, le premier est entaché d'une incertitude de plus d'un ordre de grandeur aux énergies de la BBN dû à la différence entre les prédictions théoriques et une unique mesure. Cela se traduit par une incertitude d'un facteur 20 sur la production de ^{6}Li dans la BBN. Une nouvelle expérience a donc été proposée au GSI (Gesellschaft für Schwerionenforschung, Darmstadt) afin d'en améliorer la connaissance. Les résultats de cette expérience sont en cours d'analyse mais montrent d'ores et déjà que l'abondance primordiale du ^{6}Li n'excède pas ^{6}Li/H = 7.10^{-15}. Cela confirme bien le désaccord avec les mesures effectuées dans les étoiles du halo galactique (plus élevées d'un facteur 1 000). Une nouvelle source de lithium-6 est requise après la nucléosynthèse du Big-Bang pour réconcilier les deux valeurs.

Recherche de solutions physiques et astrophysiques aux problèmes du lithium

L'analyse très approfondie de la physique nucléaire impliquée dans la nucléosynthèse du Big-Bang et l'amélioration récente des données n'ont pas réussi à résoudre le problème du lithium révélé par les derniers résultats de l'expérience WMAP. Il convient d'en rechercher les solutions ailleurs. Les différents champs d'investigation possibles sont d'ores et déjà explorés tant en astrophysique qu'en physique des particules et en physique fondamentale.

Astrophysique

La destruction du lithium par les étoiles est un problème de physique stellaire aigu. D'une part, des modèles afférents prenant en compte l'ensemble des processus physiques en jeu sont activement développés. D'autre part des mesures d'abondance toujours plus fines dans les vieilles étoiles du halo galactique sont effectuées grâce aux derniers instruments, notamment le VLT situé au Chili. Ces deux démarches sont menées en parallèle afin d'expliquer la divergence persistante entre l'observation du plateau de lithium-7 et la valeur théorique déduite de l'expérience WMAP.

Par ailleurs, afin d'expliquer l'écart important (le facteur 1 000 mentionné plus haut) entre les observations du lithium-6 dans les étoiles du halo galactique et sa synthèse dans la BBN, un scénario de production du lithium-6 a été proposé via les processus de collision

noyau-noyau dans le milieu intergalactique, cela dans le cadre d'un modèle cosmologique. Il a été montré que le lithium-6 peut être produit dans les proportions requises sans engendrer par ailleurs un excès de lithium-7, ceci à partir d'un rayonnement cosmique qui pourrait être accéléré par le biais d'explosions d'étoiles massives de toute première génération. D'autres scénarios astrophysiques sont actuellement explorés.

Physique des particules

Une autre façon de modifier l'abondance du lithium sans toucher aux autres contraintes consiste par ailleurs à reconsidérer l'évolution des baryons juste après la nucléosynthèse primordiale. En effet, afin de réconcilier observations et calcul de la BBN, les effets de la décroissance des particules supersymétriques instables sur la production et destruction des éléments cosmologiques ont été étudiés mais n'apportent à ce jour aucune réponse satisfaisante.

Au-delà du modèle cosmologique standard

Au-delà des études décrites plus haut qui pourraient s'avérer vaines pour résoudre les problèmes du lithium, il est tentant d'explorer la physique fondamentale au-delà de ses frontières actuelles en utilisant à nouveau la nucléosynthèse primordiale comme sonde. Ainsi de nouvelles théories de la gravitation ou encore l'effet de la variation des constantes fondamentales sont en cours d'étude. Nous touchons là aux limites de la connaissance et la prudence est requise mais cette exploration pourrait être fructueuse.

Conclusion

La nucléosynthèse primordiale a été et demeure, au même titre que le rayonnement cosmologique fossile, l'une des preuves les plus tangibles du Big-Bang. La densité baryonique que l'on extrait au moyen de l'un et de l'autre sont en bon accord, à une anicroche près, celle du lithium. Comment modifier l'abondance du ^{7}Li sans affecter les autres isotopes ? Les observations spectroscopiques dans les étoiles sont-elles à revoir ? Les modèles d'évolution stellaires sont-ils la clé du problème ? Serait-ce enfin un effet d'un écart au modèle standard de la physique des particules ou encore d'un écart de la gravitation par rapport à celle que l'on connaît ? Les chercheurs sont perplexes et continuent d'explorer toutes les voies tant physiques qu'astrophysiques. La BBN n'a pas livré tous ses secrets. Quant au lithium-6 précisément, il ouvre la porte à une astrophysique nouvelle liée aux premières étoiles et à la formation des premières structures ainsi qu'à la physique du rayonnement cosmique à ces époques. Aussi peut-on considérer que l'étude des noyaux légers reste une priorité de l'astrophysique nucléaire.

POUR EN SAVOIR PLUS

P. Peter et J.-Ph. Uzan, *Cosmologie Primordiale*, collection Echelles, éditions Belin, 2005.

P.J.E. Peebles, *Principles of Physical Cosmology*, Princeton Series in Physics, Princeton University Press.

E. Rollinde, E. Vangioni, K. Olive, *The Astrophysical Journal*, 2005, Volume 627, Issue 2, pp. 666-673.

A. Coc *et al.*, *The Astrophysical Journal*, 2004, Volume 600, Issue 2, pp. 544-552.

C. Angulo *et al.*, *The Astrophysical Journal*, 2005, Volume 630, Issue 2, pp. L105-L108.

P. Descouvemont *et al.*, *Atomic Data and Nuclear Data Tables*, 2004, Volume 88, Issue 1, p. 203-236.