

# COSMOLOGIE

## ET PHYSIQUE FONDAMENTALE :

# LE MODÈLE DU BIG BANG

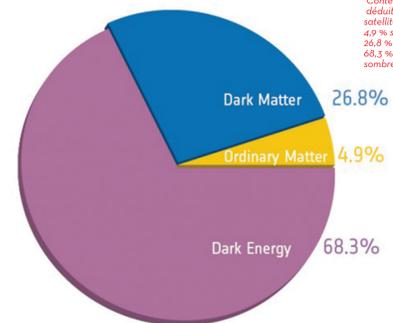


### LES 3 HYPOTHÈSES DU MODÈLE DU BIG BANG

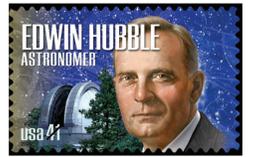
**Le modèle standard du Big Bang est une représentation théorique de la structure et de l'histoire de l'Univers. Il repose, d'une part sur notre connaissance actuelle des lois de la physique et, d'autre part sur des hypothèses spécifiques liées à notre position en tant qu'observateur.**

**Ce modèle est aujourd'hui en accord avec toutes les observations cosmologiques, depuis une seconde après le Big Bang jusqu'à aujourd'hui. Il implique seulement une dizaine de paramètres. Les observations de l'Univers s'effectuent essentiellement via la matière ordinaire (les atomes). Elles permettent de tester de nombreux modèles cosmologiques et apportent de précieuses contraintes sur l'existence potentielle des mystérieuses matière et énergie noires.**

- La gravitation est décrite par la théorie de la relativité générale d'Einstein.  
*L'Univers a une géométrie et la cosmologie vise à décrire cette géométrie, lissée à grande échelle.*
- La matière est décrite par le modèle standard de la physique des particules, testé en accélérateur.  
*Il faut cependant y ajouter deux composantes : la matière noire et une constante cosmologique.*
- Nous supposons que nous n'occupons pas une position privilégiée dans l'Univers (principe copernicien).  
*L'Univers observable est représentatif de l'Univers dans son ensemble.*



Contenu de l'Univers déduit des observations du satellite Planck : 4,9 % sous forme d'atomes, 26,8 % sous forme de matière noire, 68,3 % sous forme d'énergie sombre



### LES PILIERS OBSERVATIONNELS DU MODÈLE DU BIG BANG

**L'expansion cosmique :** l'espace se dilate au cours du temps.

Cette prédiction de George Lemaître fut vérifiée par Edwin Hubble en 1924 lorsqu'il observa que les galaxies s'éloignaient les unes des autres et cela d'autant plus vite qu'elles étaient éloignées les unes des autres. C'est la loi de Hubble. Le taux d'expansion de l'Univers nous renseigne sur le contenu matériel de l'Univers.

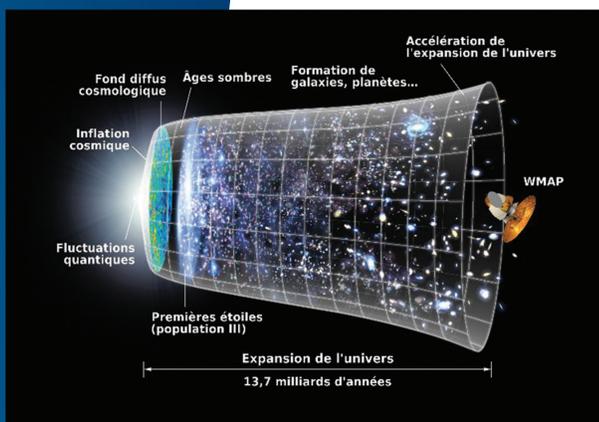
**L'histoire thermique de l'Univers :** le contenu de matière de l'Univers se refroidit au cours de l'expansion. Des phénomènes de haute énergie, effectifs dans l'Univers primordial, se gèlent au cours du temps.

**La nucléosynthèse primordiale et l'origine des premiers atomes :** l'hydrogène et l'hélium ont été synthétisés dans les premières minutes après le Big Bang. Leur abondance nous renseigne sur l'état de l'Univers jusqu'à une seconde après le Big Bang.

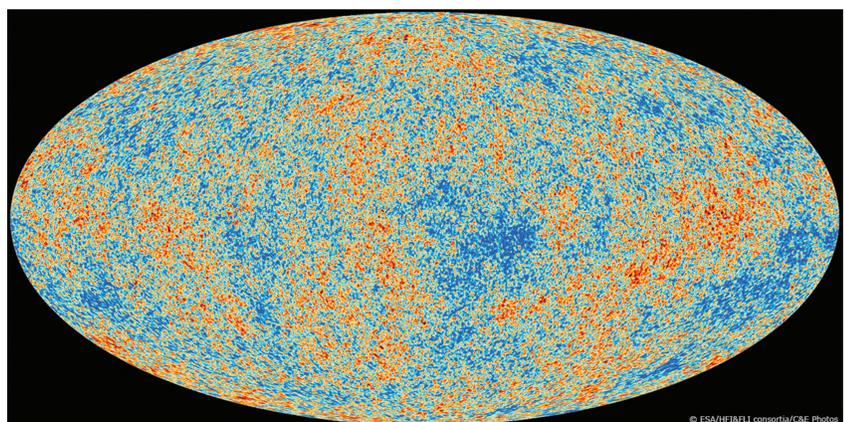
**Le fond diffus cosmologique :** ce rayonnement émis 370 000 ans après le Big Bang (époque à laquelle les noyaux et les électrons se sont combinés en atomes) a aujourd'hui un spectre de corps noir à une température de 2,725 Kelvin. Les anisotropies de température de l'ordre du micro Kelvin sont l'empreinte des fluctuations de densité primordiales des tout premiers instants de l'Univers.

*L'Univers émerge d'une phase chaude et dense. Certains phénomènes de haute énergie se sont gelés au cours de son histoire*

**Les grandes structures de l'Univers :** les fluctuations de densité croissent sous l'effet de la gravité pour former des grandes structures de l'Univers, à savoir les galaxies, les amas et superamas de galaxies et les filaments à très grande échelle. Le taux de croissance des grandes structures de l'Univers nous renseigne sur son contenu matériel.



L'expansion de l'Univers



La carte du fond diffus cosmologique du satellite Planck. Crédit : ESA/HFI&FLI consortia/C&E Photos

### LE LIEN AVEC LA PHYSIQUE FONDAMENTALE

**La nucléosynthèse primordiale, le mouvement d'expansion de l'Univers dans son ensemble et le rayonnement cosmologique fossile sont les preuves les plus tangibles du Big-Bang. Les paramètres physiques sont bien établis.**

- Le nombre de familles de neutrinos intervenant dans le calcul du taux d'expansion de l'Univers primordial a été déterminé par les expériences de physique des particules au CERN ainsi que la durée de vie du neutron.
- Les sections efficaces des réactions nucléaires, intervenant dans la nucléosynthèse primordiale, ont pour la plupart été mesurées au laboratoire.
- La densité d'atomes dans l'Univers est maintenant bien connue grâce à la cosmologie observationnelle. La matière ordinaire de l'Univers ne constitue que 5 pour cent de sa substance totale.
- Il est intéressant de comparer la densité d'atomes à la « densité critique de l'Univers ». Dans le cadre de la Relativité Générale d'Einstein, la courbure de l'espace est directement liée à la densité de matière/énergie.
- Les derniers résultats des satellites WMAP/Planck montrent que la densité totale est très proche de la densité critique ( $1,02 \pm 0,02$ ).
- Les modèles d'inflation, qui postulent une phase exponentielle d'expansion violente et très courte permettent d'expliquer cette valeur : la géométrie de l'Univers serait donc euclidienne à grande échelle.
- Dans ce bilan global, la densité de matière compte pour environ 5 % d'atomes et 26,8 % de matière noire/68,3 % d'énergie sombre (soit 95 % de la substance de l'Univers).
- Le calcul de la nucléosynthèse du Big-Bang est suffisamment bien maîtrisé et solide pour l'utiliser désormais dans les tests de la physique fondamentale.
- Les lois physiques sont-elles immuables ? Ont-elles changé au cours de l'évolution ? Telles sont les questions que se posent les scientifiques.

**Ainsi les voies pour l'exploration d'une physique nouvelle non standard sont à notre portée. Toutes les disciplines : cosmologie primordiale, physique fondamentale, physique des particules, physique nucléaire et astrophysique se servent désormais de cette étape cruciale de l'évolution de l'Univers pour en tester et contraindre les multiples aspects.**



# COSMOLOGIE

## ET PHYSIQUE FONDAMENTALE :

# LA NUCLÉOSYNTÈSE PRIMORDIALE



### LE RÉSEAU DE RÉACTIONS NUCLÉAIRES : TROIS ÉTAPES :

#### • Les tout premiers instants

Température : 100 milliards de degrés (un âge inférieur à 1 seconde) Composition : électrons, positons (antiparticules des électrons), photons, neutrinos et antineutrinos, une pincée de protons et de neutrons. Equilibre thermique. Puis la température chute : 10 milliards de degrés (1 seconde), en raison de l'expansion de l'Univers.

#### • Ere de la nucléosynthèse primordiale

La physique nucléaire en jeu : non spéculative car elle est bien maîtrisée, les principales réactions nucléaires impliquées peuvent être mesurées dans le laboratoire aux énergies concernées. Réactions nucléaires activées : protons et les neutrons issus de la soupe primordiale se rassemblent pour former des noyaux plus lourds.

#### • Le gel des neutrinos

L'interaction nucléaire faible n'a plus d'effet sur les neutrinos. Ils se « découplent » du reste de la matière. Ils traversent l'espace sans interaction avec électrons, protons et neutrons. Les réactions inverses dans lesquelles ils sont impliqués cessent.

#### • Le goulot d'étranglement du deutérium

A 1 milliard de degrés (cent secondes) fusion entre un proton et un neutron → noyau de deutérium. La formation du deutérium est essentielle à la chaîne nucléaire. C'est un passage obligé : on l'appelle le « goulot du deutérium ».

#### • Synthèse de l'hélium

He-4 indestructible à 10 milliards de degrés. Noyau très stable. Presque tous les neutrons disponibles se retrouvent inclus dans les noyaux d'hélium (2p+2n).

#### • Fin de « l'Ere de la Nucléosynthèse Primordiale »

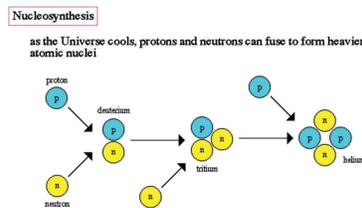
A 400 millions de degrés (1000 secondes), la nucléosynthèse cesse et sa composition se fige. L'Univers est sous forme de protons libres (noyaux d'hydrogène) et de noyaux d'hélium, le reste à l'état de traces.

#### • La recombinaison

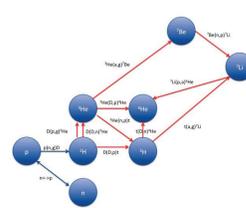
Au bout de 370 000 ans, l'expansion a considérablement refroidi le milieu, les électrons libres se lient aux noyaux primordiaux et forment les atomes.

C'est la phase de la recombinaison, l'Univers devient transparent car les photons peuvent désormais le traverser en ayant une très faible probabilité d'être absorbés par la matière cosmique, c'est le rayonnement cosmologique fossile.

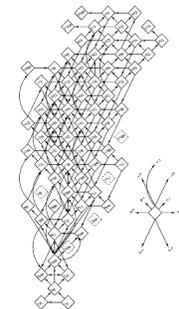
- 1- **Abondance de l'hélium.** Cette prédiction historique (1966) peut être estimée avec une bonne précision analytiquement en ne considérant que 3 réactions nucléaires.
- 2- **Prédictions cosmologiques.** Une prédiction fine de l'abondance des noyaux comme le deutérium ou le lithium requiert une analyse numérique impliquant une douzaine de réactions nucléaires.
- 3- **Traces des atomes plus lourds :** un réseau nucléaire complet (plus de 400 réactions) permet de calculer l'abondance des premiers atomes de carbone, azote, oxygène ; cela est déterminant pour comprendre l'évolution des premières étoiles.



La formation de l'hélium avec trois réactions nucléaires.

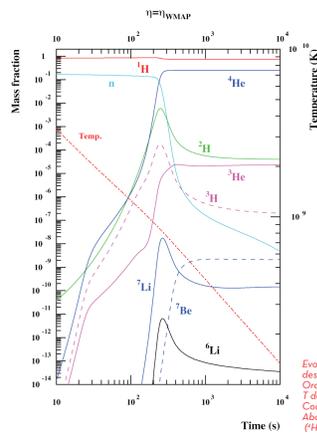


Les 12 réactions nucléaires les plus importantes pour la nucléosynthèse primordiale. Noyaux impliqués : hydrogène (H), deutérium (D), hélium-3 et 4 (<sup>3</sup>He, <sup>4</sup>He), lithium (<sup>6</sup>Li, <sup>7</sup>Li) et béryllium (<sup>9</sup>Be). Les flèches représentent les réactions nucléaires. Deux d'entre elles sont évaluées par la théorie (en bleu), les dix autres mesurées en laboratoire (en rouge). Sigles, g = photon gamma, n = neutron et α = <sup>4</sup>He ou noyau alpha.



Aujourd'hui les chercheurs de l'IAP utilisent dans leurs modèles un réseau de 400 réactions nucléaires, évaluées théoriquement pour la plupart. Il est alors possible de calculer l'abondance primordiale des éléments comme le Carbone, l'Azote et l'Oxygène.

### LES RÉSULTATS DE LA NUCLÉOSYNTÈSE PRIMORDIALE

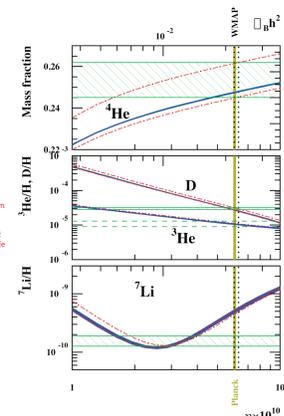


Evolution de la température T de l'Univers et des abondances des éléments cosmologiques. Ordonnées (à gauche) : fraction de masse des isotopes, (à droite) : T des photons. Courbe rouge décroissante : évolution de la température. Abondances finales : (H), 75% de la masse totale, (90% en nombre), (<sup>4</sup>He), 25%, (0% en nombre). Les autres isotopes sont à l'état de traces.

Abondances primordiales et confrontation aux observations. Calcul de la nucléosynthèse primordiale (courbes bleues) en fonction de la densité baryonique de l'Univers multipliée par le carré du paramètre de Hubble  $D_H^2$  (échelle supérieure de la figure). <sup>4</sup>He est exprimé en fraction de masse, environ 25%. D, <sup>3</sup>He et <sup>7</sup>Li sont exprimés en nombre d'atomes par rapport à l'hydrogène. Bandes horizontales vertes : abondances déduites des observations astronomiques. Bandes verticales : densités baryoniques déduites des observations du rayonnement cosmologique fossile WMAP et Planck.

L'abscisse inférieure, h, représente le rapport nombre d'atomes / nombre de photons. Il y a environ un atome pour un milliard de photons.

$H_0$  : constante de Hubble, exprime le taux d'expansion de l'Univers : 0,72 (en unités de 100 km par seconde et par Mpc, 1 Mpc = 1 Mega parsec = 3,262 10<sup>6</sup> années lumière).  $D_H^2$  : proportion d'atomes relativement à la densité critique. En cosmologie, la densité critique correspond à la densité d'énergie telle que dans un Univers homogène et isotrope en expansion sa courbure spatiale soit nulle, c'est-à-dire que les lois de la géométrie euclidienne usuelle s'appliquent ; elle vaut environ 10<sup>-26</sup> gramme par centimètre cube.



### LES OBSERVATIONS COMPARÉES AUX MODÈLES ET LE PROBLÈME DU LITHIUM

Les prédictions du modèle sont confrontées aux abondances observées dans les différents sites astrophysiques ainsi qu'à l'analyse du rayonnement cosmologique fossile, on déduit la quantité totale de matière atomique de l'Univers.

Les observations astrophysiques donnent :

- D/H de l'ordre de 3 10<sup>-5</sup>, la fraction de masse d'hélium de l'ordre de 0,25, cela est en bonne cohérence avec les calculs de nucléosynthèse primordiale et les observations du rayonnement cosmologique fossile.
- Li/H = 1 à 2 10<sup>-10</sup>. La confrontation avec les observations des satellites WMAP et Planck présente ici un écart de 3 à 4.

Comment réconcilier ces résultats apparemment incohérents ? Autrement dit, comment modifier l'abondance du lithium sans entraver l'ensemble du calcul ? Plusieurs voies ont été explorées, en physique nucléaire, en physique des particules, en astrophysique, en cosmologie ou en physique fondamentale. A ce jour, cette différence reste inexpiquée. La physique au delà du modèle standard est peut être requise pour expliquer ce désaccord.

