

Zeitschrift:	Orion : Zeitschrift der Schweizerischen Astronomischen Gesellschaft
Herausgeber:	Schweizerische Astronomische Gesellschaft
Band:	64 (2006)
Heft:	336
Artikel:	Les premières molécules de l'univers
Autor:	Puy, Denis
DOI:	https://doi.org/10.5169/seals-897717

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: 16.01.2026

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

Les premières molécules de l'Univers*

DENIS PUY**

«Je ne puis regarder une feuille d'arbre sans être écrasé par l'Univers»

VICTOR HUGO



Fig. 1: Effigie de Démocrite d'Abdère sur le billet de 100 Drachmes de l'ancienne monnaie grecque (substituée désormais par l'euro). Sur cette coupure bancaire Démocrite est présenté comme le «père» de la vision atomiste de la matière. Le rôle de Leucippe d'Elée, dans cette conception révolutionnaire, sera très souvent omis (l'élève Démocrite surpassa le maître Leucippe dans la notoriété).

Les molécules sont omniprésentes dans notre vie quotidienne. Ce que nous mangeons, buvons, respirons, fabriquons, la revue que vous avez entre les mains, l'encre qui a permis d'imprimer cet article; tout dans notre monde est composé de molécules ou plus précisément d'atomes qui s'associent pour former de multiples molécules aux propriétés très diverses. L'origine première des molécules a été pendant très longtemps une question relativement négligée, bien que les molécules se révèlent essentielles à de nombreux mécanismes chimique, physique et dynamique en astrophysique. La formation des premières molécules était, il y a encore une vingtaine d'années, très peu étudiées. Les développements théoriques actuels ainsi que les perspectives observationnelles de l'Univers profond, dans un très proche futur, permettent désormais de reconsiderer l'astrochimie primordiale au point d'envisager un rôle central dans les grandes questions cosmologiques relatives aux processus de formation des premières structures gravitationnelles de l'Univers.

Une molécule, loin d'être un objet inerte, peut vibrer, tourner, se dissocier par collision ou s'associer à d'autres; une molécule peut par ailleurs chauffer ou refroidir son milieu environnant. Ainsi une présence moléculaire dans un quelconque milieu astrophysique peut engendrer d'importantes conséquences sur son évolution thermodynamique et dynamique. Les premières molécules de l'Univers, ou molécules primordiales, vont donc avoir de grandes incidences sur la caractérisation des premiers objets de l'Univers et plus particulièrement sur la nature de ces derniers. Comme nous le verrons il se pourrait que ces

premiers objets gravitationnels soient des étoiles massives initiées par la présence de molécules.

L'objet de cet article est de présenter les mécanismes de formation des premières molécules de l'Univers, puis de décrire les conséquences de ces dernières sur la structuration de la matière aux grandes échelles. Après un bref rappel historique, au premier paragraphe, sur le concept d'atomes et de molécules, nous décrirons, au second paragraphe, le mécanisme de synthèse des premiers atomes de l'Univers dans le cadre du paradigme d'expansion de l'Univers. Ceci nous conduira au processus de formation des premières molécules de l'Univers, décrit au troisième paragraphe, puis aux conséquences de l'existence de ces dernières sur la dynamique de formation des premières structures de l'Univers (quatrième paragraphe). Dans le dernier paragraphe nous aborderons les projets expérimentaux du futur visant à mettre en évidence une signature des premières molécules de l'Univers afin de comprendre l'origine et les caractéristiques des premiers objets apparaissant dans l'Univers.

1. Le concept d'atomes et de molécules

La volonté de compréhension de la diversité des êtres et des objets de la nature a toujours été une grande question chez les hommes à l'instar de celle de comprendre l'agencement du cosmos ou de son organisation universelle. Aussi loin que remonte les textes écrits, l'aspiration chez l'homme de posséder une description simple de la matière, qui l'environne et le compose, reste centrale.

Le concept d'atome est vraisemblablement apparu en Grèce antique il y a près de vingt-cinq siècles. Leucippe de Milet introduit pour la première fois l'idée que la matière pouvait être sous structurée en entités élémentaires, indivisibles, insécables appelées «*a-tomos*» (en grec ancien). Le plus célèbre de ses élèves Démocrite d'Abdère, voir figure 1, compléta cette notion au point d'en faire une théorie qui permit de fournir une explication de la création et de la structuration progressive de l'Univers. A la même

époque émergeait en Inde la philosophie *Vaisesika*. Selon le Nyaya-Vaisesika¹ la matière est composée par un germe originel *l'anu*, en sanskrit, invisible et intangible, qui devient *paramanu* lorsqu'il prend une forme tangible.

Toutes ces idées préfigurent le concept moderne d'atomes et de molécules que l'on connaît. Ces réflexions sont en complète opposition avec celles d'Empédocle d'Agrigente développées quelques années auparavant. Pour Empédocle l'Univers fut générée à partir de quatre substances fondamentales ou racines:

La Terre – l'Eau – l'Air – le Feu

Ces deux approches, qui ont certes la vision commune d'une discontinuité de la matière à l'échelle microscopique et d'une continuité à l'échelle macroscopique, s'opposent profondément sur la nature des constituants fondamentaux de la matière. Le dogme empédoctien des quatre substances primordiales va perdurer pendant de nombreux siècles et notamment sous l'impulsion essentielle des deux grands philosophes grecs PLATON D'ATHÈNES et ARISTOTE DE STAGIRE son élève. Aristote va jeter les premiers fondements de la physique par l'introduction de modèles, la nature n'est plus un fait contemplatif mais un lieu d'étude [2]. Aux yeux du philosophe grec les quatre éléments fondamentaux (terre, eau, air et feu) se transforment les uns dans les autres et donnent naissance à n'importe lequel d'entre eux. Aristote ne croit pas aux atomes malgré qu'il ne rejette pas la possibilité d'une décomposition des substances en des éléments très petits, cependant tout corps qui n'est pas l'un des quatre éléments forme un composé de ces derniers. La doctrine atomiste sombra peu à peu dans l'oubli pendant de longs siècles, pour laisser place au triomphe durable de la théorie aristotélicienne [3].

* Conférence principale en français tenue lors de l'assemblée générale 2005 de la SAS à Rümlang.

** Professeur à l'Université des Sciences Montpellier II (Groupe de Recherche en Astronomie et en Astrophysique du Languedoc, France), associé également à l'Observatoire de Genève.

¹ Voir l'ouvrage sur le VADAYA TANTRA d'AGIT MOOKERJEE et MADHU KHANNA [1].

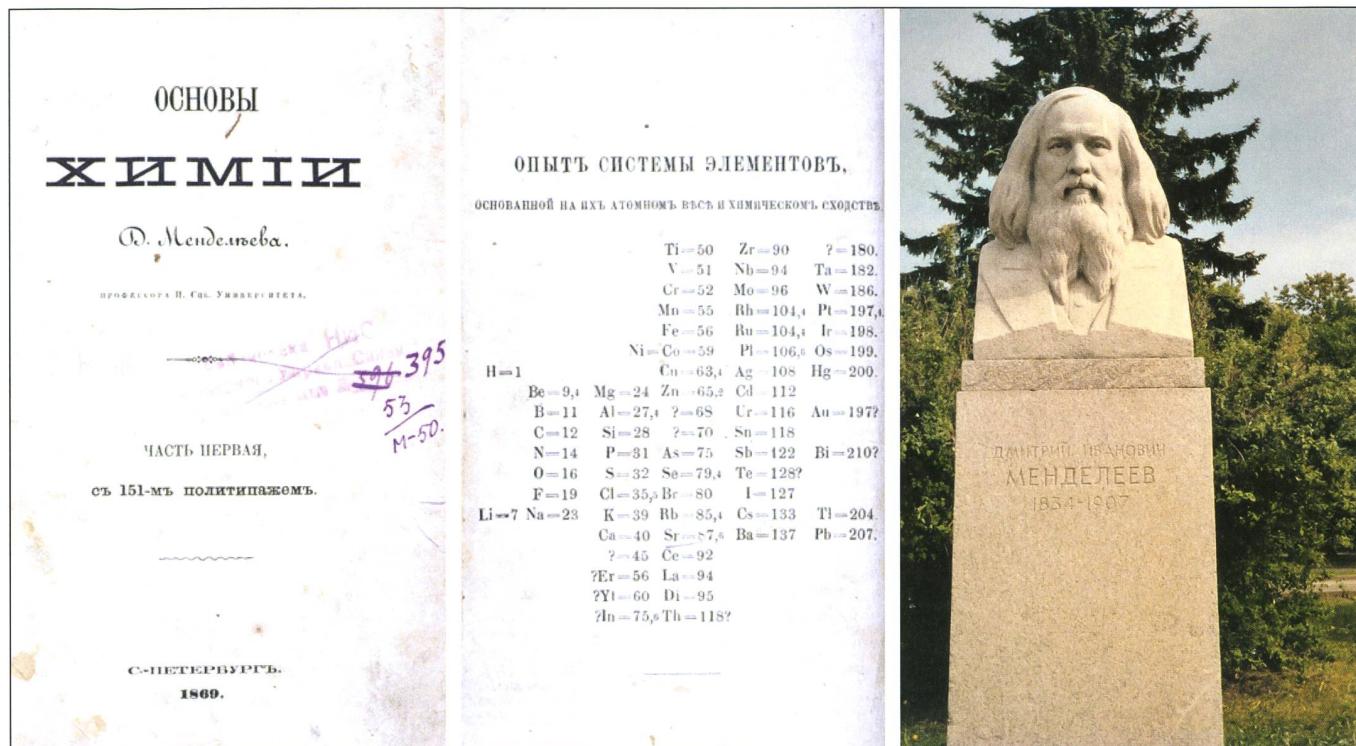


Fig. 2: Fac similé (Figs de gauche et centrale) de l'ouvrage rarissime de DMITRI IVANOVITCH MENDELEÏEV Principes de la chimie. Buste de MENDELEÏEV (photo de droite) dans le parc de l'Université Lomonossov à Moscou, photo prise par l'auteur.

Au début du 19^e siècle le chimiste anglais JOHN DALTON suggère l'idée que chaque élément est assigné d'un *poids atomique* défini comme la masse minimale de chaque élément qui entre en composition avec un autre, et fixe arbitrairement la valeur unité, prise comme référence, à l'élément hydrogène. Ainsi les corps composés résulteraient de combinaisons chimiques ou d'association d'atomes en proportions fixes, les masses de ces derniers pouvaient être alors déduites expérimentalement. Pour identifier un élément chimique, les chimistes utilisèrent ce poids atomique; toutefois la frontière entre atome et molécule restait encore très floue. Cette distinction va être établie grâce aux travaux de GAY-LUSSAC (1809) et AVOGADRO (1811), en 1814 BERZELIUS suggère alors une notation à base de lettres pour représenter les éléments et détermine avec précision la masse d'un grand nombre d'éléments.

L'année 1860, durant laquelle le premier congrès international de chimie à Karlsruhe en Allemagne va avoir lieu, est une date cruciale dans l'histoire de la

chimie moléculaire. Durant ce congrès DMITRI IVANOVITCH MENDELEÏEV, voir figure 2, présente ses premières idées d'une classification des éléments fondamentaux de la nature qui seront exposées quelques années plus tard avec détails dans l'ouvrage de référence (traduit immédiatement en plusieurs langues) *Principes de la chimie*. Dans ce livre MENDELEÏEV introduit le célèbre *tableau périodique des éléments*, et constate que les 63 éléments connus à l'époque peuvent être classés selon leur masse atomique. Il laisse des cases vides pour des éléments encore inconnus mais dont il envisage l'existence si l'on classe les éléments par masses atomiques molaires croissantes, il pensait (avec justesse) pouvoir observer une certaine périodicité dans leurs propriétés.

Malgré cet agencement théorique cohérent la grande question astrophysique à l'égard de l'origine des premières molécules de l'Univers restait en suspens. L'explication va peu à peu voir le jour suite aux conceptions cosmologique développées par ALBERT EINSTEIN au début du siècle dernier.

2. L'apparition des premiers noyaux atomiques de l'Univers

Les multiples festivités de l'année 2005 (déclarée celle de la physique) commémorant, en grande partie, les

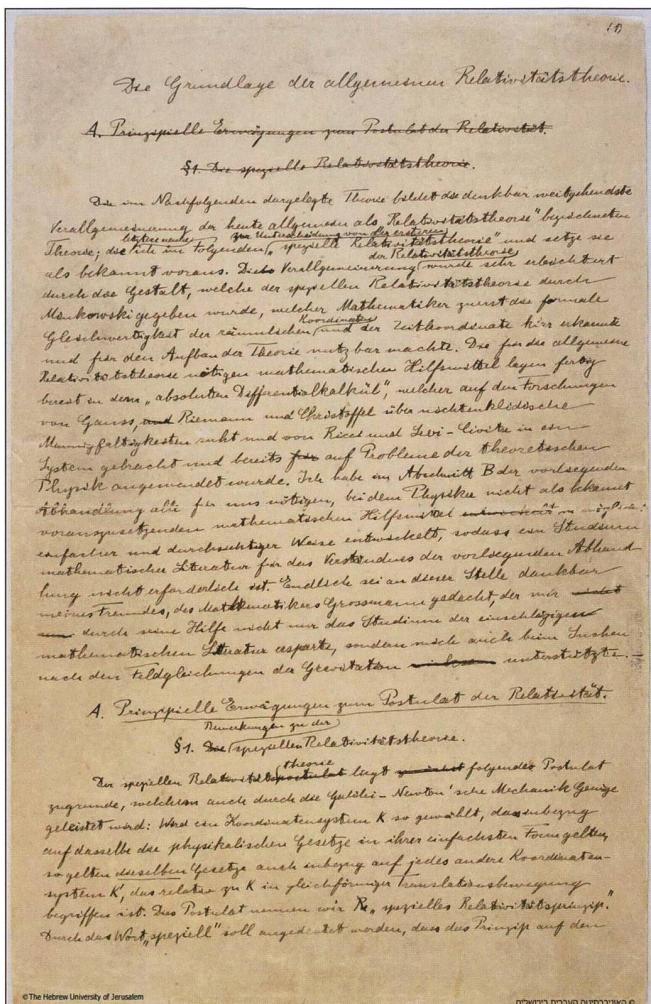
travaux d'ALBERT EINSTEIN nous rappellent, avec force, la contribution magistrale du génial physicien à la physique moderne. La cosmologie lui est redevable plus qu'aucun autre domaine de la physique fondamentale. L'acte de naissance de la cosmologie moderne coïncide précisément avec la publication de l'article fondateur [4]: *Die Grundlage der allgemeinen Relativitätstheorie*² du physicien allemand il y a presque un siècle.

Dans cet article EINSTEIN exprime sa conviction d'inscrire la théorie de la gravitation dans le cadre mathématique des espaces courbes de RIEMANN (plus généraux que les espaces *classiques* d'EUCLIDE). Il établit alors le lien intrinsèque entre l'espace géométrique et son contenu énergétique en y introduisant un nouveau concept, celui d'espace-temps. Le temps et l'espace ne sont plus postulées «à priori»: c'est la distribution de matière contenue dans l'Univers qui détermine la *structure* de l'espace³.

Cette théorie aura un retentissement immédiat car elle explique à elle seule de nombreuses observations telles que l'avance du périhélie de Mercure, et prédit la déviation des rayons lumineux, par le champ de gravitation du Soleil, qui sera observée en 1919 par EDDINGTON [6].

² Fondation de la théorie de la relativité générale en allemand, voir figure 1.

³ Voir à ce propos le monumental ouvrage [5] de MARIE-ANTOINETTE TONNELAT sur l'histoire du principe de relativité.



1916.

N° 7.

ANNALEN DER PHYSIK
VIERTE FOLGE. BAND 49.

I. Die Grundlage
der allgemeinen Relativitätstheorie;
von A. Einstein.

- Die im nachfolgenden dargelegte Theorie bildet die denkbare ^{vereinfachte} Verallgemeinerung der heute allgemein als [1] „Relativitätstheorie“ bezeichneten Theorie; die letztere nenne ich im folgenden zur Unterscheidung von der ersten „spezielle [2] Relativitätstheorie“ und setze sie als bekannt voraus. Die Verallgemeinerung der Relativitätstheorie wurde sehr erleichtert durch die Gestalt, welche der speziellen Relativitätstheorie durch Minkowski gegeben wurde, welcher Mathematiker zuerst das formale Gleichwertigkeit der räumlichen Koordinaten und der Zeitkoordinate klar erkannte und für [3] den Aufbau der Theorie nutzbar machte. Die für die allgemeine Relativitätstheorie nötigen mathematischen Hilfsmittel lagen fertig bereit in dem „absoluten Differentialkalkül“, welcher auf den Forschungen von Gauss, Riemann und Christoffel über nichteuklidische Mannigfaltigkeiten ruht und von Ricci und Levi-Civita in ein System gebracht und bereits auf Probleme der theoretischen Physik angewendet [4] wurde. Ich habe im Abschnitt B der vorliegenden Abhandlung alle für uns nötigen, bei dem Physiker nicht als bekannt vorausgesetzten mathematischen Hilfsmittel in möglichst einfacher und durchsichtiger Weise entwickelt, so daß ein Studium mathematischer Literatur für das Verständnis der [5] vorliegenden Abhandlung nicht erforderlich ist. Endlich sei an dieser Stelle dankbar meines Freundes, des Mathematikers Grossmann, gedacht, der mir durch seine Hilfe nicht nur das Studium der einschlägigen mathematischen Literatur ersparte, sondern mich auch beim Suchen nach den Feldgleichungen der Gravitation unterstützte.

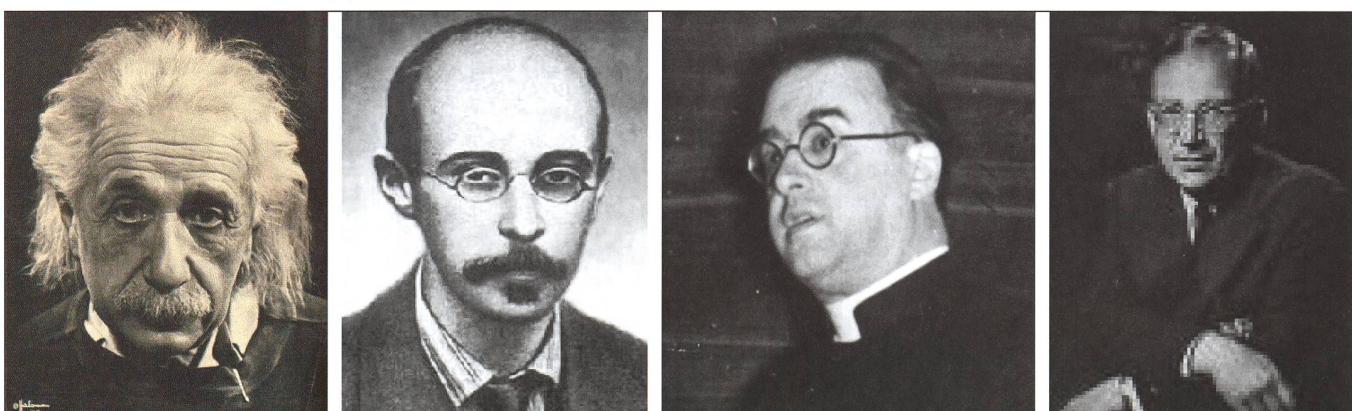
Fig. 3: Fac-similé (Fig. de gauche) des notes manuscrites d'ALBERT EINSTEIN soumis à la grande revue de physique de l'époque: Annalen der Physik [4]. Cet article, de 54 pages, publié en 1916 (Fig. de droite) pose les fondements de la cosmologie moderne (ces documents sont tirés des archives ALBERT EINSTEIN de l'Université Hébraïque de Jérusalem).

Ce nouveau concept d'espace va permettre de décrire l'Univers dans son ensemble en offrant un cadre mathématique cohérent. Partant des équations d'évolution de cet espace riemannien

courbe (i.e. l'Univers), le physicien mathématicien russe ALEXANDRE FRIEDMANN [7] et l'abbé astrophysicien d'origine belge GEORGES LEMAÎTRE [8] vont, indépendamment l'un de l'autre, proposer

une solution non statique soulignant la possibilité théorique que l'Univers soit en expansion⁴. Au début des années trente Humason & Hubble [10] présentèrent des mesures de distances de nébula-

Fig. 4: Le Big Bang Quartet avec de gauche à droite: ALBERT EINSTEIN (1879-1955) qui concevra le cadre mathématique permettant de décrire l'Univers physique dans son ensemble, ALEXANDER FRIEDMANN (1888-1925, mort quasiment dans l'oubli on a retrouvé il y a quelques années sa tombe dans un cimetière moscovite...) le père avec GEORGES LEMAÎTRE (1894-1966) de la théorie de l'expansion de l'Univers. GEORGES GAMOW (1904-1968) sera le premier à comprendre les conséquences de la théorie expansionniste de Friedmann-Lemaître, notamment en fondant la première théorie de nucléosynthèse primordiale et en prédisant un rayonnement de fond (le fameux rayonnement de fond cosmologique mis en évidence fortuitement beaucoup plus tard, i.e. en 1965, par deux américains ARNO PENZIAS ET BOB WILSON).



leuses spirales et tirèrent une loi de proportionnalité entre la distance de ces dernières et leurs vitesses respectives déduites d'après le décalage spectral de leurs raies d'émissions. Ils montrèrent que la grande majorité de ces galaxies s'échappaient de nous, corroborant l'idée théorique d'un Univers en expansion. Malgré les réticences de quelques rares théoriciens⁵, l'expansion de l'Univers allait devenir la pierre d'achoppement de toute théorie cosmologique et offrir le cadre conceptuel à l'étude de son évolution [11].

L'Univers en dilution au cours du temps sous-tend qu'il était plus dense et donc plus chaud qu'il ne l'est actuellement. Cette remarque va constituer le paradigme de pensée de l'astrophysicien GEORGES GAMOW⁶ (voir figure 4). Cet astrophysicien naturalisé américain, venu de l'école russe de physique nucléaire, compris très vite les possibilités d'un Univers très chaud et très dense et fit une rapide analogie avec les études de formation de noyaux (dont il était le grand spécialiste de l'époque). L'Univers a du «connaître» une époque où les densités étaient telles qu'aucun objet gravitationnel n'a pu survivre. GAMOW et ses élèves ALPER et HERMANN proposèrent que l'Univers fut constitué à ces débuts de particules élémentaires⁷ couplées en-

tre elles du fait de l'extrême densité de cet Univers primordial. Partant de ce type de conditions initiales un scénario de l'évolution de l'Univers primitif va se dessiner. Au cours du temps l'expansion de l'Univers va engendrer une décroissance progressive de la densité et de la température moyenne de l'Univers. A l'image des transitions de phases thermodynamiques, nombreux changement de phases vont se mettre en action, dégageant quatre grandes étapes de l'Univers primordial:

- L'INFLATION considérée comme une première phase extrêmement brutale ayant eu lieu lorsque l'Univers a un age compris entre le temps de Planck $t_P = 10^{-43}$ s et $t = 10^{-36}$ s (pour mémoire l'age actuel de l'Univers est estimé autour de 13.5 milliards d'années). Durant cette époque l'Univers va connaître une gigantesque dilution permettant entre autre de fournir une explication à la platitude actuelle de l'Univers (voir plus loin).
- LA TRANSITION DE GRANDE UNIFICATION lorsque l'Univers avait un age de 10^{-33} s et une température d'environ 10^{28} K. C'est durant cette époque que deux interactions fondamentales de la physique se découplent: la force électrofaible et l'interaction forte.
- LA TRANSITION ELECTROFAIBLE libérant la force électromagnétique et l'interaction faible. A cette époque l'age de l'Univers est d'environ 10^{-10} s à une température proche de 10^{15} K.
- LA TRANSITION QUARKS-HADRONS provoquant le confinement des quarks en hadrons (en particulier protons et neutrons). Cette transition eut lieu lorsque l'Univers a un age d'environ 10^{-6} s et une température de 10^{13} K.

⁴ L'expansion de l'Univers est une des rares théories astrophysiques qui a précédé l'observation. DOMINIQUE PECCOUD [9] pose la question de la réalité des théories de Friedmann et Lemaître en son temps: «Qu'est-ce que le réel? Ce sont les théories mettant en évidence l'expansion qui précédaient de très loin les expériences qui en seront faites? Est-ce l'observation d'un phénomène, fait bien après que la théorie eut annoncé le phénomène?». Pour Peccoud ceci annonce une rupture épistémologique, en ce sens que la science va d'un système explicatif à un autre système explicatif par des passages qui procèdent nécessairement par rupture de continuité.

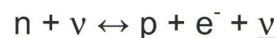
⁵ L'expansion de l'Univers amène naturellement à l'idée d'une singularité initiale de l'Univers. Ce point fut fortement critiqué dans une célèbre émission scientifique de la BBC par Fred Hoyle (un des chantres d'une théorie statique de l'Univers) au point d'en râiller l'esprit par l'introduction du néologisme devenu fort célèbre: *Le Big Bang!*

⁶ Il fut également un remarquable auteur de vulgarisation avec la série des *M'Tompkins* [12].

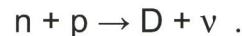
⁷ La théorie de la «soupe originelle» de Gamow comportait uniquement des protons, neutrons, électrons, photons et neutrinos. Par la suite le développement du modèle standard des particules va encore sous diviser la soupe primordiale en particules plus fondamentales telles que les quarks, les familles des bosons (les photons en partie) et des leptons (les électrons en partie).

⁸ où n désigne les neutrons, p les protons, e^- les électrons, ν les neutrinos et $\bar{\nu}$ les anti neutrinos.

plage devient de plus en plus difficile à maintenir. Les réactions de couplage proton neutron

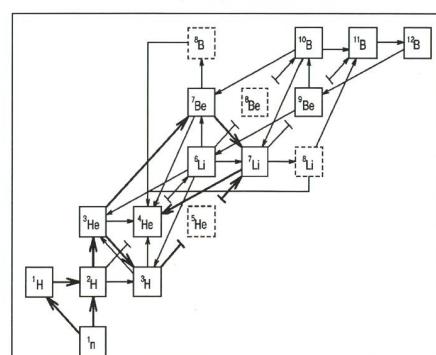


deviennent peu à peu négligeables⁸. En dessous de 10^{10} K, l'Univers devient totalement transparent aux neutrinos ν et aux anti neutrinos $\bar{\nu}$. Ce passage à la transparence va avoir des incidences particulièrement importantes sur la population des neutrons et des protons. En effet après cette *brisure* de couplage les protons et les neutrons vont pouvoir interagir et fusionner entre eux. La première réaction de fusion à entrer en action est celle du noyau D (ou 2H) de deutérium:



Rapidement un grand nombre de réactions de fusion vont conduire à la formation d'autres noyaux tels que l'hélium 3He et 4He , le lithium 6Li et 7Li , le béryllium 7Be et 9Be et le bore ^{10}B , ^{11}B et ^{12}B , le schéma de la figure 5 décrit l'ensemble des réactions nucléaires couplées. L'expansion de l'Univers, engendrant une baisse de la température et de la densité moyenne au cours du temps, ne va pas permettre de synthétiser l'ensemble des noyaux de la classification périodique de MENDELEÏEV. A mesure que l'Univers se dilate les réactions de fusion vont être de plus en plus difficile à maintenir. Les noyaux étant des particules chargés la «barrière» coulombienne agissant comme force de répulsion entre les noyaux devient dominante, la nucléosynthèse primordiale va stopper lorsque l'age de l'Univers est de l'ordre de cinq minutes, l'Univers étant trop dilué pour engendrer les réactions atomiques.

Fig. 5: Schéma de l'ensemble des réactions nucléaires de la nucléosynthèse primordiale. Seuls les éléments hydrogène H, deutérium D, hélium He, lithium Li, beryllium Be et bore B interviennent notablement dans les réactions couplées de la nucléosynthèse primordiale. Le bore B est ici un «catalyseur» intermédiaire de quelques réactions.



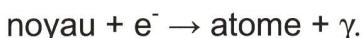
Les premiers noyaux, issus de ce réseau de réactions de fusion, seront essentiellement ceux d'hydrogène à 89% en abondance relative, d'hélium à 11%, de deutérium 0.025% et des traces de lithium et de beryllium. La figure 6 montre l'évolution des abondances des noyaux durant cette période de nucléosynthèse primordiale.

3. Les premiers atomes

A la «fin» de cette période de nucléosynthèse primordiale, la matière baryonique est principalement constituée de noyaux (chargés) couplée avec les électrons libres et le rayonnement de fond. Le champ de radiation est en effet à cette époque totalement couplé avec cette matière environnante par processus diffusif sur les électrons (processus dit de diffusion Thomson). Les photons emplissant l'Univers auront ainsi un très faible libre parcours moyen, et n'auront pas le temps de se propager. A cette époque l'Univers est donc opaque au rayonnement⁹. Cette omniprésence des photons γ du fond de rayonnement conduit à un fort pouvoir photoionisant et empêche toute formation de matière neutre et notamment d'atomes. En effet la réaction de photoionisation:



est à cette époque prépondérante devant la réaction inverse dite de recombinaison:



L'expansion de l'Univers va cependant contribuer à diminuer l'efficacité des photons. Peu à peu la réaction de recombinaison va entrer en action au détriment du processus de photoionisation. Les conséquences de ce changement de mécanisme vont être très importantes et progressives. L'apparition des atomes neutres va, en effet, engendrer une perte des électrons libres (ces derniers vont se combiner avec les noyaux) et provoquer une perte dans le couplage avec le rayonnement. Le processus diffusif de Thomson va être de moins en moins efficace par manque de candidats électrons libres. Le libre parcours moyen des photons va «s'allonger», les photons vont pouvoir peu à peu se propager dans l'Univers (voir schémas de la figure 7).

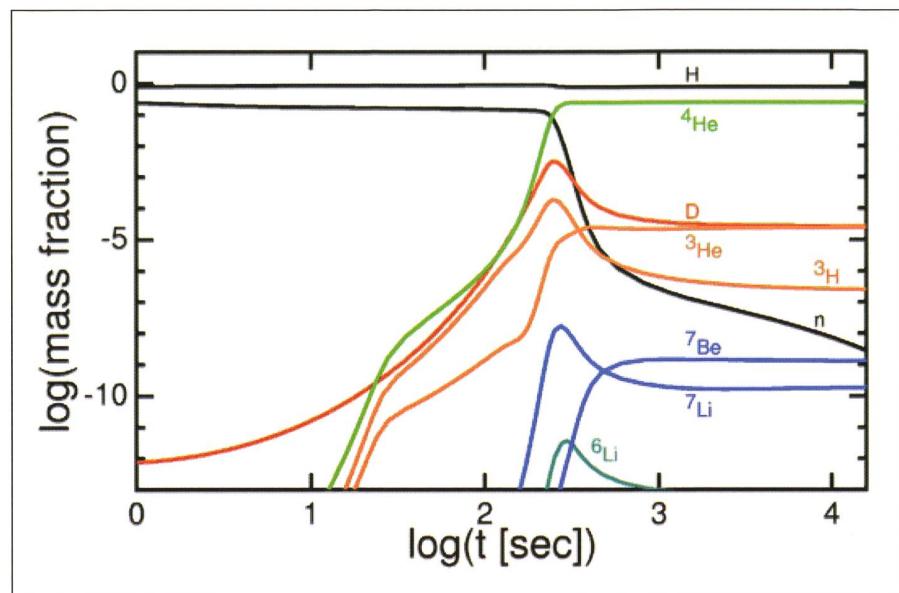
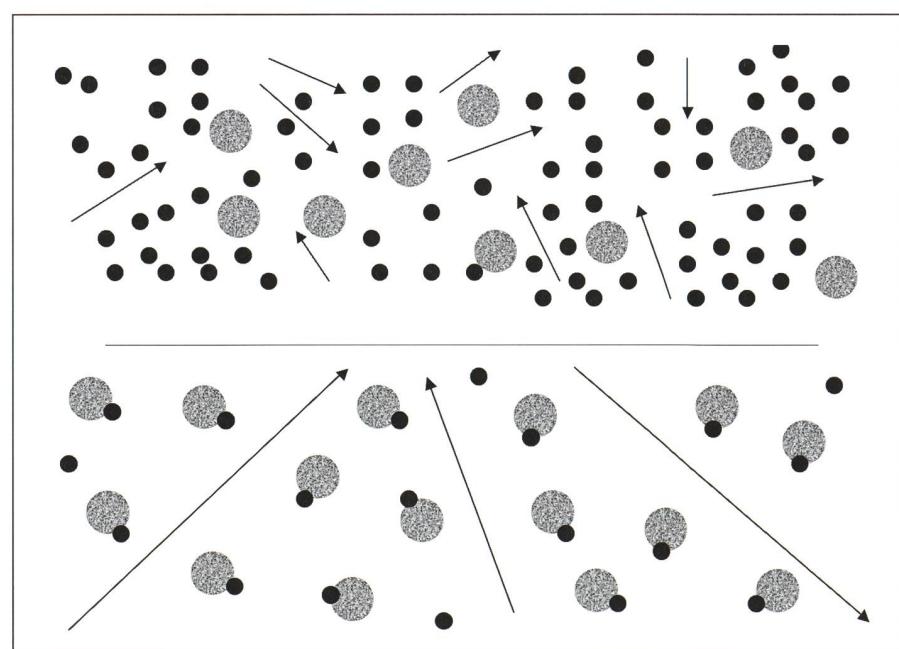


Fig. 6: Evolution des abondances atomiques (en fraction de masse, axe vertical) en fonction du logarithme décimal de l'âge de l'Univers (exprimé ici en secondes, axe horizontal). On constate qu'une fois que les premières réactions de fusion conduisant au noyau de deutérium s'initient (courbe rouge) avec la décroissance de l'abondance des neutrons n (courbe noire), rapidement d'autres formations atomiques se mettent en action pour former l'hélium ^4He (courbe verte), l'hélium ^3He et le tritium ^3H (courbes oranges), ainsi que les noyaux de beryllium ^7Be , lithium ^7Li (très peu de lithium ^6Li). Notons qu'au-delà de 5 minutes, ou $\log(t)$ ~2.5, les abondances se «figent» et n'évoluent plus (on parle quelquefois de gel): la barrière coulombienne empêche de former d'autres noyaux (ces courbes sont tirées de l'article de revue de Burles, Nollett et Turner [13]).

Fig. 7: Illustrations du mécanisme de couplage entre les électrons et le rayonnement (schéma supérieur) et des conséquences du processus de recombinaison (schéma inférieur). Initialement, schéma du haut, les photons (flèches) diffusent très efficacement sur les électrons libres chargés négativement, l'Univers est totalement opaque à la radiation. Peu à peu la dilution de l'Univers va provoquer une perte d'efficacité de la photoionisation, les électrons se recombinent avec les noyaux chargés positivement et deviennent de moins en moins efficace à diffuser les photons du rayonnement ambiant. Les photons vont pouvoir se propager librement (longues flèches, schéma du bas). L'Univers devient alors lumineux.



⁹ Le néologisme de «Big Bang» introduit par FRED HOYLE, supposant une gigantesque explosion lumineuse, est donc particulièrement inadéquat. L'Univers primordial est...sombre!

Le mécanisme de recombinaison va s'effectuer de manière progressive avec l'expansion de l'Univers et dépend de l'énergie d'ionisation des atomes en présence. L'hélium, ayant l'énergie d'ionisation la plus élevée, sera le premier noyau à se recombiner suivi du noyau d'hydrogène et de deutérium (quasi-méthode en même temps) puis partiellement le noyau de lithium. La figure 8 illustre ces processus progressifs de recombinaison atomique et ses conséquences.

4. La formation des premières molécules

La principale voie de formation des molécules dans les milieux astrophysiques froids s'effectue majoritairement à travers le mécanisme d'adsorption sur les grains de poussières interstellaires. Les atomes de ces milieux très peu chauds peuvent en effet migrer à la surface de ces grains puis engendrer quelquefois des collisions avec d'autres atomes. Il est alors possible que certaines collisions donnent des associations du type moléculaire. Les molécules ainsi formées ne migrent plus sur la surface du grain et s'éjectent (voir figure 9).

L'absence de grains dans l'univers primordial (faute d'éléments lourds) a été longtemps considérée par les astrochimistes théoriciens comme un frein au développement d'une «chimie primordiale». Des voies collisionnelles de formation, en phase gazeuse, se sont toutefois révélées possibles dans le contexte d'Univers primordial, suite aux travaux théoriques de nombreuses équipes de recherche (voir les références et les descriptions historiques dans l'article de revue de Puy & Signore [14]).

L'hydrogène moléculaire peut, en effet, se former par l'intermédiaire des ions moléculaires H_2^+ et H^- formés, respectivement, par les processus radiatifs d'association et d'attachement:



¹⁰ Cette notion de décalage spectral est une échelle couramment employée en cosmologie et permet de raisonner en proportion non en taille «réelle». Ainsi un décalage spectral $z=1000$ signifie que le «rayon moyen» de l'Univers à cette époque était mille fois plus petit que le rayon actuel, ou un milliard de fois plus dense que la densité actuelle de l'Univers. L'échelle inversée sur l'axe horizontal permet de «suivre» l'expansion, par exemple le décalage spectral $z=10'000$ correspond à un âge d'Univers d'environ 7000 ans alors qu'un décalage spectral $z=1000$ se réfère à un âge d'Univers proche de 450'000 ans, $z=100$ coïncidant à un âge d'environ 17 millions d'années (l'âge actuelle de l'univers étant de 13.5 milliards années ou $z=0$).

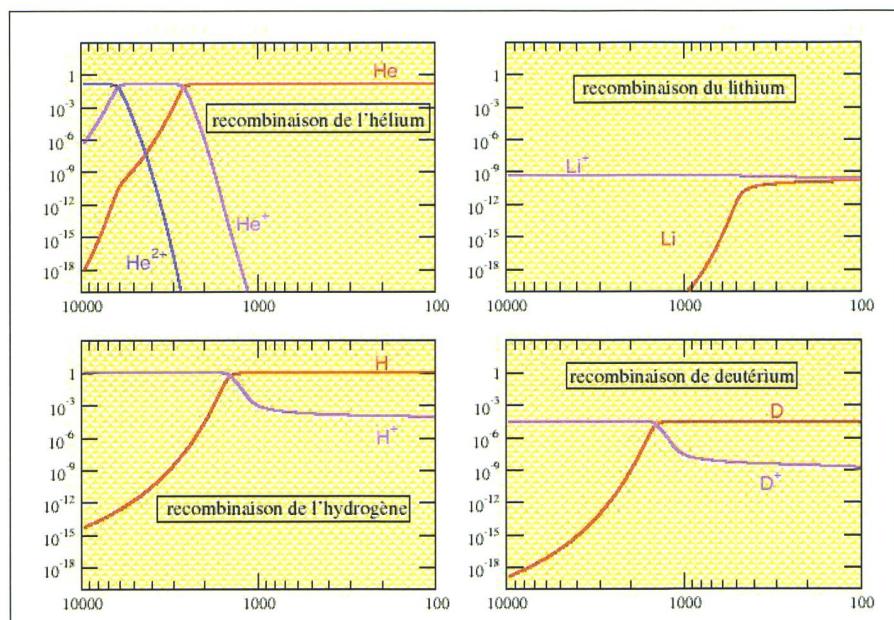
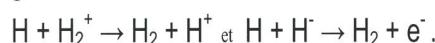


Fig. 8: Evolution des abundances relatives, axe vertical, des noyaux et atomes durant les processus de recombinaison en fonction du décalage spectral¹⁰ en échelle inversée (axe horizontal). La figure, en haut à gauche, représente le mécanisme de recombinaison de l'hélium, celle-ci s'effectue en deux étapes. Dans un premier temps les noyaux d'hélium, ionisé deux fois He^{2+} , se recombinent avec les électrons libres ce qui conduit à l'apparition des ions d'hélium ionisé une fois He^+ . Ces derniers vont alors se recombiner et engendrer la formation des premiers atomes, ceux d'hélium He . La figure, en haut à droite, illustre la recombinaison des noyaux de lithium (nous avons ici omis les recombinaisons intermédiaires des espèces Li^{3+} à Li^+). La conversion du lithium ionisé Li^+ en atome de lithium Li n'est pas «complète», compte tenu du faible potentiel d'ionisation du lithium (le champ de radiation de fond est longtemps efficace à photoioniser les atomes lithium susceptible d'être formés). La figure, en bas à gauche, décrit le mécanisme de recombinaison de l'hydrogène. Finalement nous remarquons qu'une fois apparaît l'atome d'hélium neutre, par échange avec les ions présents la recombinaison des autres éléments s'initie. Après le décalage spectral $z=1000$ l'hydrogène est sous forme atomique avec un résiduel de H^+ proche de 10^{-4} (en abondance relative). Ce comportement est identique pour le deutérium, figure en bas à droite. On peut constater qu'au-delà du décalage spectral $z=300$, les courbes sont «plates»: l'Univers étant trop dilué les réactions de recombinaison deviennent négligeables. Rappelons que ces quatre mécanismes de recombinaison sont couplés entre eux.

L'échange de charge et le mécanisme de détachement associatif permettent alors d'engendrer la formation d'hydrogène moléculaire:



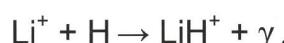
La molécule d'hydrure de deutérium HD peut être formé par le même type de réseau de réactions (i.e. via HD^+ ou via D^- ou H^-), néanmoins une fois que la molécule d'hydrogène moléculaire H_2 est formée, la réaction dissociative



est la voie prépondérante de formation de l'hydrure de deutérium. La très faible abondance relative d'atomes de lithium (quelques 10^{-10} , voir figure 8) va provoquer une très faible formation d'hydrure de lithium LiH , celle-ci s'effectue principalement par des réactions d'échange de charge entre l'hydrure de lithium (ionisé une fois) et l'atome neutre d'hydrogène:



l'ion LiH^+ étant formé par mécanisme d'association radiatif entre Li et H^+ ou Li^+ et H



La chimie de l'hélium sera, quant à elle, peu «réactive» compte tenu de la complétude des couches électroniques de l'atome d'hélium, seul l'ion moléculaire HeH^+ émergera.

5. Molécules et formation des premiers objets

Au début du 20^e siècle l'étude des orbitales atomiques et moléculaires effectuée par PETER DEBYE et son assistant ERICH HUECKEL [15] va permettre de mieux comprendre les mécanismes de liaison et d'excitation moléculaire. Ces travaux conduisirent à l'idée que les molécules «répartissaient» leurs électrons sous forme de couches caractéristiques de leurs états énergétiques; l'apport énergétique pouvant se faire soit par l'intermédiaire d'un champ de rayonne-

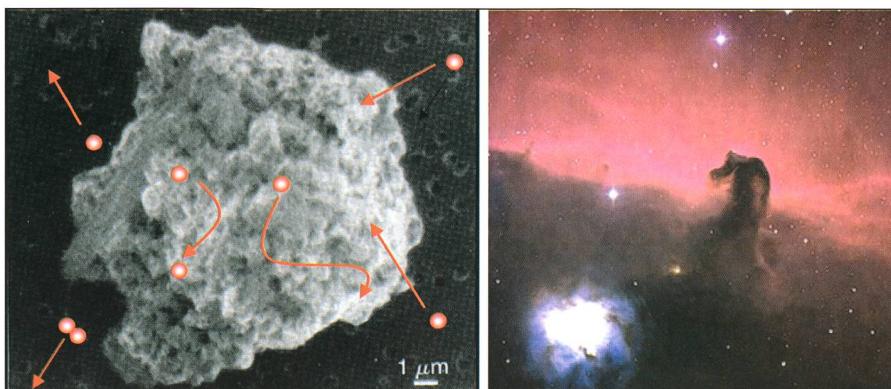


Fig. 9: Schéma de formation moléculaire à la surface de grains, une fois que les atomes sont adsorbés à la surface des grains, ceux-ci migrent pour quelque fois se rencontrer et interagir pour former par association radiative une molécule. Cette dernière est alors éjecter du grain. Ce processus radiatif est très efficace dans les nuages atomiques et moléculaires du milieu interstellaire local, par exemple la nébuleuse à tête de cheval de la constellation d'Orion (Figure de gauche, photo tirée des bases de données photographiques de la NASA) mais hélas inapplicable dans le contexte cosmologique.

ment extérieur soit par pure collision avec des atomes ou molécules. Afin d'illustrer ces mécanismes d'excitation, prenons le cas de la molécule la plus abondante dans l'Univers la molécule diatomique d'hydrogène moléculaire

Fig. 10: Evolution des abondances relatives des quatre espèces fondamentales de l'Univers primordial (hydrogène, hélium, deutérium et lithium). Les axes verticaux caractérisent les abondances relatives à l'ensemble et les axes horizontaux les décalages spectraux (toujours en échelles inversées). Le graphe, en haut à gauche, est relatif à la chimie de l'hélium, On voit nettement apparaître au cours du temps (ou à mesure que le décalage spectral diminue, i.e. l'Univers se dilue) l'ion HeH^+ (courbe verte). Les courbes, en haut à droite, caractérisent la chimie de l'hydrogène primordial. On constate que peu à peu la molécule d'hydrogène moléculaire H_2 se forme à mesure que le décalage spectral diminue. On remarque par ailleurs deux sursauts de formation (courbe verte), le premier se situant au décalage spectral $z \approx 450$. Cette première croissance est causée par la formation de H_2 via l'ion H_2^+ , alors que le second sursaut se réfère à la formation via H^- ($z \approx 100$). Une fois que l'hydrogène moléculaire H_2 se forme, l'hydrure de deutérium HD peut se créer (voir graphe en bas à gauche, courbe verte). Pour la chimie du lithium (courbes en bas à droite) on constate que l'hydrure de lithium LiH apparaît marginalement (l'abondance relative est de quelques 10^{-21} au décalage spectral $z \approx 10$, courbe verte). On constate également le «gel» des abondances relatives au décalage spectral $z < 100$ (les réactions collisionnelles deviennent de moins en moins efficaces) l'Univers étant trop «dilué».

H_2 . Cette molécule parfaitement symétrique va répartir son «nuage électronique» de manière équitable autour des deux noyaux d'hydrogène (voir figure 11).

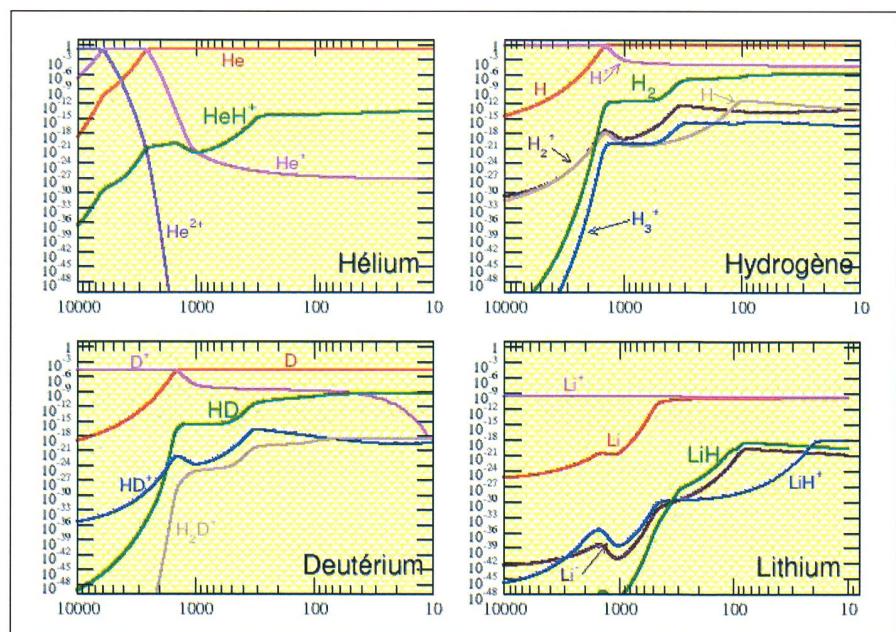
Un champ de rayonnement environnant ou une collision produit un apport énergétique au nuage électronique de la molécule, celui-ci va alors «grossir» par excitation énergétique. Le système électronique est dans une situation d'écart avec son état fondamental, il va alors «cherché» toutes les voies possibles pour retourner dans son état original stable et ainsi expulser l'excédent d'énergie acquis. Trois voies vont alors se présenter: la voie collisionnelle (une collision avec un atome ou une autre

molécule), la voie radiative spontanée (la molécule se désexcite d'elle-même) ou induite (un radiation extérieure peut provoquer l'éjection de l'excédent énergétique).

Le processus global (excitation suivie d'une désexcitation) peut conduire à chauffer le milieu ou au contraire à le refroidir suivant que la matière (atomique et moléculaire) est respectivement plus chaude ou plus froide que le rayonnement. Nous savons en effet en thermodynamique qu'un corps chaud mis en contact avec un corps froid aura tendance d'une part à se refroidir, et d'autre part à chauffer le corps froid. Cette «recherche» d'équilibre thermodynamique dans un milieu se fait par l'intermédiaire des molécules via les processus d'excitation et désexcitation.

Si un corps astrophysique contenant des molécules est baigné dans un bain de photons chaud ces derniers chauffent le corps par l'intermédiaire des molécules, en revanche si les photons de cette radiation de fond sont plus froid que le corps astrophysique celui-ci se mettra à refroidir via les molécules qui le constituent. Ces mécanismes thermodynamiques vont donc avoir une grande influence sur la dynamique d'un système et plus particulièrement lorsque ce dernier est dans une situation d'effondrement gravitationnel.

Considérons un nuage de matière, renfermant des molécules, s'effondrant par sa propre gravité. La température de cette structure va peu à peu croître via les collisions entre ses constituants, au



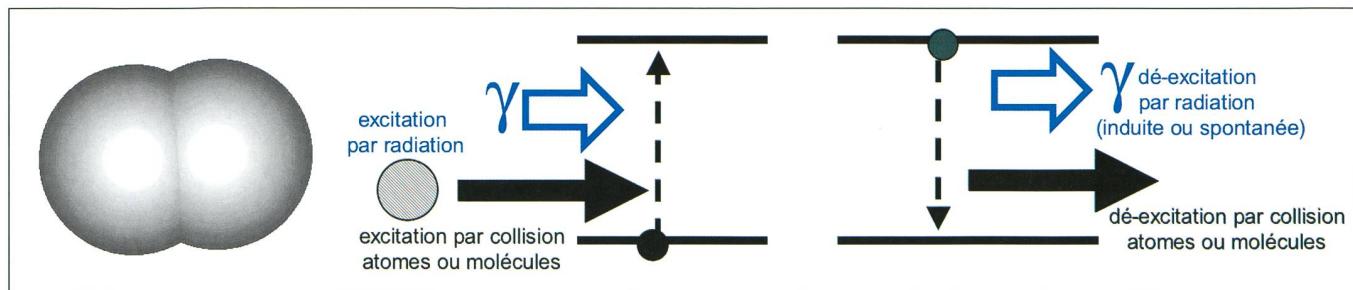


Fig. 11: Schéma, à gauche, de répartition du nuage électronique de la molécule d'hydrogène moléculaire. A droite, illustration des différents mécanismes d'excitation des niveaux électroniques d'une molécule.

point d'être beaucoup plus chaud que le champ de radiation environnant. Nous sommes alors dans une situation thermodynamique typique où nous avons un corps chaud «immergé» dans un «bain» de photons froids. Les molécules omniprésentes, dans cette structure en effondrement, vont jouer alors leur rôle d'intermédiaire thermodynamique, et vont donc refroidir le nuage en effondrement. A supposer que ce dernier n'est pas parfaitement homogène (comme tout système «réaliste»), les zones de surabondance moléculaire auront tendance à refroidir plus vite que les zones sous abondantes en molécules. Dans les régions de refroidissement la pression cinétique sera moindre et ainsi offrir moins de «résistance» à l'effondrement gravitationnel, conduisant alors à fragmenter le nuage en effondrement.

La figure 12 nous aide à mieux comprendre ces multiples processus. En l'absence de molécules (encadré de gauche), un nuage en effondrement conduira à la formation d'un disque du fait d'une rotation initiale résiduelle¹¹. En revanche en considérant les molécules dans la structure en effondrement, celles-ci vont engendrer un refroidissement différentiel et conduire à fragmenter le nuage en effondrement puis le disque (l'effondrement devenant plus efficace dans les sous régions froides, voir encadré de droite de la figure 12).

Ce scénario conduit naturellement à penser que les premières structures apparues dans l'histoire de l'Univers, et initiées par l'effondrement gravitationnel de proto nuages moléculaires, seraient du type étoiles massives (issues du processus de fragmentation) et non (comme on l'a pensé pendant très longtemps) du type galactique. Cette idée nouvelle semble par ailleurs confirmée par les récentes mesures des caractéristiques du rayonnement de fond cosmologique.

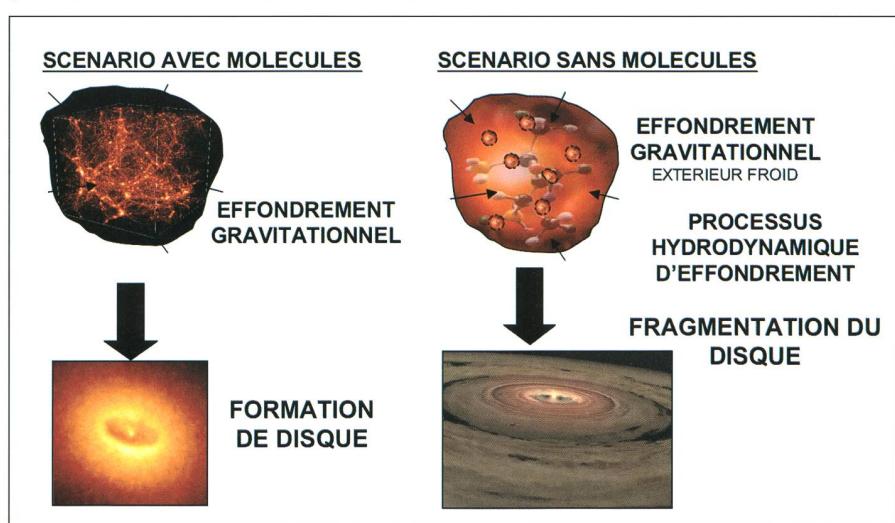
En 2000 le ballon atmosphérique nommé *Boomerang* (mis en œuvre par l'équipe de cosmologie expérimentale de l'université de Rome dirigée par FRANCESCO MELCHIORRI et PAOLO DE BERNARDIS) établit une carte partielle de ce fond de rayonnement (25° de ciel, voir figure 13). La carte de distribution de ce fond de rayonnement primitif permit de montrer que la géométrie de l'Univers était de nature euclidienne (i.e. courbure globale nulle).

Ce résultat de très grande importance fut «définitivement» confirmé, en 2004, par une carte complète de ce fond de ciel primitif obtenu par le satellite américain *WMAP* (voir figure 14). Ce satellite mit de plus en évidence l'existence d'une polarisation (homogène et isotrope) de ce rayonnement cosmologique de fond.

Un rayonnement n'est autre que la propagation d'une onde électromagnétique constitué par deux vibrations (l'une d'un champ électrique, l'autre d'un champ magnétique) couplées perpendiculairement (voir schéma de la figure 15).

La lumière émise par une source conventionnelle est produite par un très grand nombre d'atomes. Ces émissions spontanées sont aléatoires dans le temps et dans l'espace (il n'y a aucune «concertation» entre les différents atomes). Les trains d'onde émis par chaque atome n'ont aucune corrélation: ni en phase ni

Fig. 12: Schéma du mécanisme d'effondrement gravitationnel sans molécules (cadre de gauche) et avec molécules (cadre de droite).



¹¹ On peut toujours imaginer que le nuage n'a pas une densité parfaitement homogène. Les régions denses auront donc tendance à «attirer» par gravité les régions moins denses, une rotation peut alors s'initier. Celle-ci va peu à peu devenir de plus en plus importante, du fait de la conservation du moment cinétique, et se coupler avec l'effondrement général pour provoquer un aplatissement du nuage suivant l'axe de rotation (ce mécanisme nous aide à comprendre, entre autres, l'existence du plan de l'écliptique pour le système solaire).

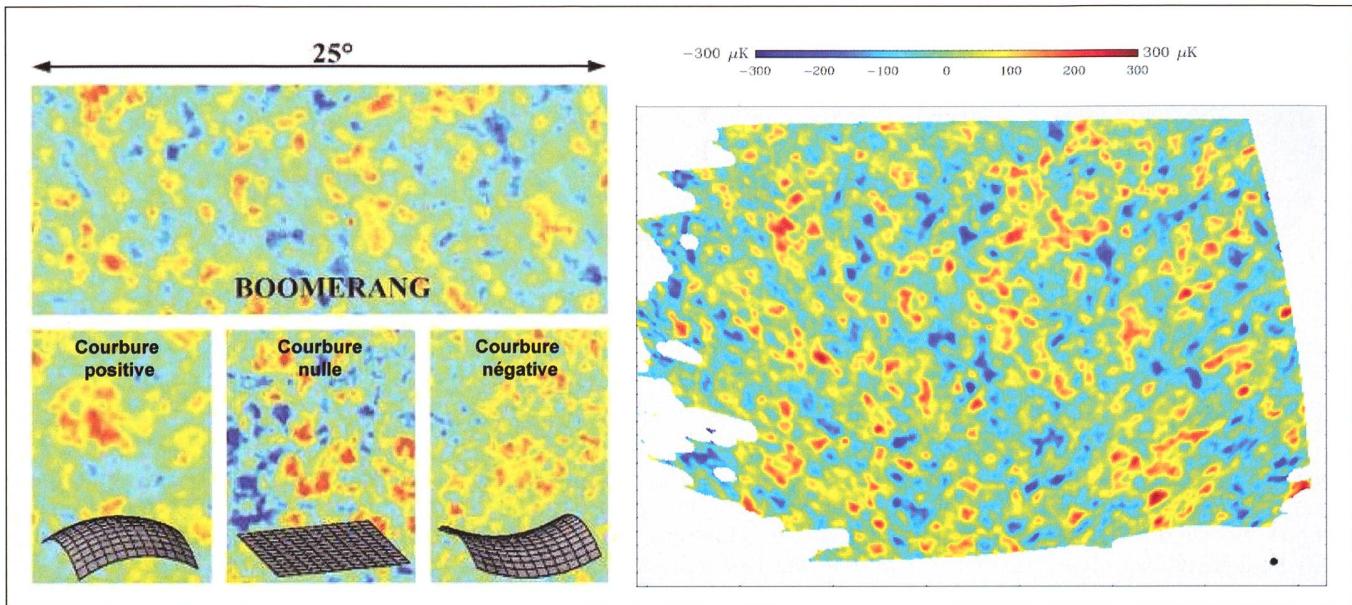


Fig. 13: L'analyse de la distribution du rayonnement primitif, c'est-à-dire l'alternance des zones chaudes (rouges), froides (bleues) et intermédiaires (vertes et jaunes) permet de tirer une estimation de la densité d'énergie de l'Univers et conduire ainsi à connaître la géométrie globale de l'Univers comme l'illustre la figure de gauche. La carte de répartition des zones chaudes et froides du rayonnement primitif (Figure de droite) obtenue par le ballon atmosphérique Boomerang, permet d'établir pour la première fois que l'Univers était de géométrie euclidienne.

en orientation. Le champ électrique résultant est alors la somme vectorielle de tous les champs électriques associés à ces trains d'onde. L'onde résultante possède une polarisation pour chaque instant; mais cet état de polarisation change à chaque instant. On parle d'une onde *non polarisée ou naturelle*.

Un rayonnement polarisé souligne l'existence d'un angle entre le champ électrique et le champ magnétique. Cette polarisation ne peut qu'être expliquer par la diffusion de photons sur des électrons libres du milieu. Le satellite *WMAP* mit en évidence l'existence d'une polarisation du rayonnement cosmologique de fond. Cette polarisation signifie que l'Univers, une fois devenu transparent aux photons (voir figure 7), a subit une nouvelle phase d'ionisation qui a engendré une diffusion des photons du fond sur les électrons redevenus «libres» et ainsi une polarisation des photons. Suite à l'analyse des données fournies par *WMAP* l'époque de cette polarisation est estimée il y a environ 10 milliards d'années.

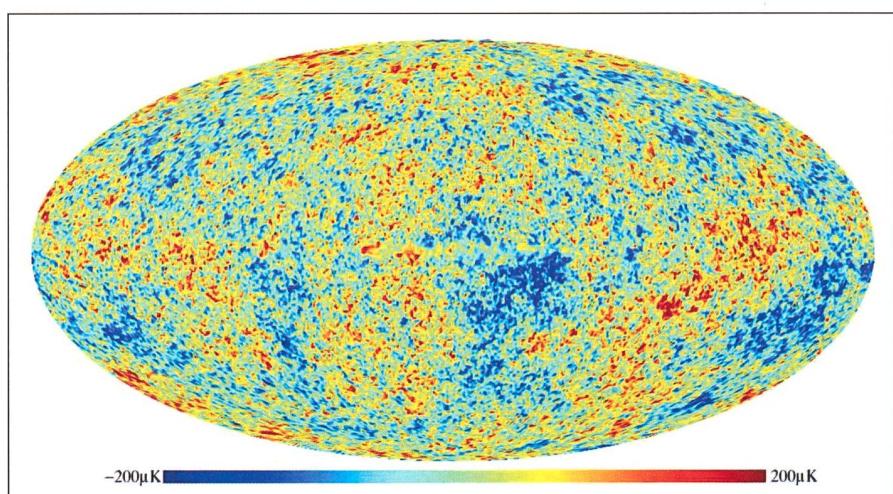


Fig. 14: Carte complète du fond de rayonnement primitif obtenu en 2004 par le satellite *WMAP* de la NASA. Cette carte confirme la nature euclidienne de la géométrie de l'Univers.

Deux scénarios sont actuellement en compétition afin d'expliquer cette réionisation¹². L'un, soutenu par les physiciens des particules, argumentant l'existence

de particules supersymétriques qui par désintégration spontanée conduit à un fond de rayonnement ionisant; le second, plus «astrophysique» sur la base d'étoiles massives primordiales. Les théories stellaires d'évolution nous montrent qu'une étoile massive évolue beaucoup plus vite qu'une étoile «classique» telle que le soleil. Une étoile massive peut évoluer en

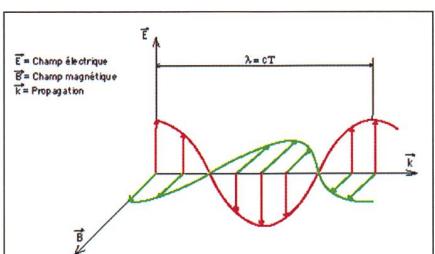


Fig. 15: La lumière est de nature électromagnétique. Elle est constituée d'un champ électrique E et d'un champ magnétique B orthogonaux, vibrant en phase perpendiculairement à la direction de propagation donnée par le vecteur k . La longueur λ de cette onde est le produit de la vitesse de la lumière c et de la période T de la vibration.

¹² On parle en effet de réionisation compte tenu que l'Univers primordial était entièrement ionisé et devint peu à peu neutre suite à la recombinaison cosmologique (voir figure 7).

quelques dizaines de millions d'années et finir son évolution par l'explosion d'une gigantesque supernova. Cette dernière produisant alors un front d'ionisation conduisant à polariser le fond de rayonnement. Actuellement ces deux scénarios restent en compétition, néanmoins la mise en évidence par *WMAP* d'une grande homogénéité spatiale dans le processus de réionisation semble plus en faveur d'un scénario type étoiles massives que celui soutenant une désintégration de particules élémentaires. On peut en effet logiquement penser que la formation des premières étoiles massives fut d'un même type (i.e. même échelle de masses) et ainsi évoluer, dans le temps, de la même façon. Ainsi à une époque l'Univers a connu de magnifiques «feux d'artifices stellaires» qui ont produit le fond de réionisation homogène.

Le mécanisme «étoiles primordiales massives» prend alors tout son sens à travers le processus de fragmentation, provoquée par les molécules primordiales, décrit précédemment. On tire alors un scénario cohérent de formation des premières structures de l'Univers (voir figure 16) initiée par les fluctuations de densité post-recombinaison cosmologique qui, sous l'action couplée de la gravitation et des molécules primordiales, engendre la formation des premières étoiles puis la réionisation de l'Univers par l'explosion des supernovas inhérentes aux premières étoiles. Par la suite d'autres étoiles apparaîtront et se structureront, avec la matière environnante, et conduiront à la formation des premières galaxies.

6. Perspectives observationnelles

Les projets observationnels des années futures, tant dans l'espace qu'au sol, vont offrir un nouvel éclairage à cette quête du graal cosmologique qu'est la compréhension des mécanismes de formation des premières structures de l'Univers. L'astrochimie va donc jouer un rôle central dans ces recherches, compte tenu que nous avons vu que les molécules sont importantes dans la dynamique de formation des premiers objets astrophysiques.

Beaucoup d'instruments actuellement en cours de développement ou de construction ont pour objet la recherche de molécules dans l'Univers profond.

Le satellite HERSCHEL (voir figure 17), dont le lancement est prévu pour 2007, sera le satellite le plus imposant lancé jusqu'à ce jour par l'agence spatiale européenne (le miroir, de 3.5 m, est le plus gros miroir monolithique jamais réalisé pour une application spatiale). Observant à la fois dans l'infrarouge proche

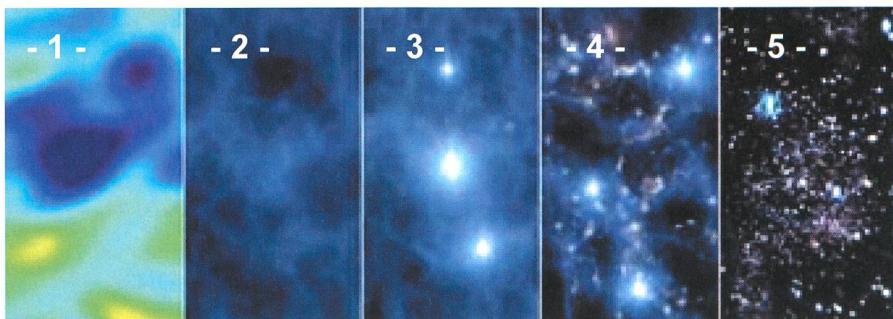


Fig. 16: Scénario de formation de premières structures gravitationnelles de l'Univers. Après la recombinaison des noyaux primordiaux, le rayonnement se découpe peu à peu de la matière et des fluctuations de densité de matière apparaissent (zones claires et foncées, voir encadré 1). Ces surdensités, constituées d'atomes et molécules, vont peu à peu se rassembler sous l'action de la gravitation et former de gigantesques nuages moléculaires (encadré 2). L'effondrement gravitationnel de ces protostructures va se fragmenter sous l'effet du refroidissement moléculaire et engendrer la formation d'étoiles massives (encadré 3). Ces étoiles vont évoluer relativement vite (quelques millions d'années) et «finir» en supernovas explosives et produire un front d'ionisation qui va peu à peu engendrer une polarisation du rayonnement de fond cosmologique (encadré 4). De nouvelles étoiles vont ensuite se constituer et se rassembler sous l'action du champ gravitationnel pour produire les premières galaxies (encadré 5).

que dans les bandes submillimétriques, ce satellite explorera l'univers froid (photométrique et spectroscopique) en vue d'étudier la formation et l'évolution des galaxies, le milieu interstellaire et ses poussières, la formation des étoiles et les disques protoplanétaires. Il cherchera également des traces d'eau dans les autres systèmes stellaires.

Le satellite PLANCK SURVEYOR, embarqué sur le même lanceur que le satellite HERSCHEL (voir figure 17), vise à mesurer les infimes anisotropies du rayonnement de fond diffus cosmologique ainsi que la polarisation de ce dernier. L'étude de la polarisation est cruciale pour contraindre les scénarios de fragmentation initiés par les molécules primordiales, car elle nous indique à quel moment les premières étoiles ont explosé. Ce dernier point permet alors de contraindre les masses des étoiles primitives. Une des grandes questions, dans l'élaboration théorique de la fragmentation d'un effondrement gravitationnel, est précisément la taille et la masse des fragments produits. L'étude couplée de la polarisation avec celle des anisotropies aux petites échelles aidera les théoriciens à mieux estimer les caractéristiques des fragments conduisant aux premières étoiles de l'Univers.

Le futur télescope optique JAMES WEBB de la NASA, prévu d'être lancé en 2013 en remplacement de l'actuel télescope spatial HUBBLE, est particulièrement indiqué pour l'observation des premières étoiles de l'Univers. Un des objectifs majeurs de cet instrument est précisément l'observation des premières générations d'étoiles et de situer l'époque de la réionisation.

De vastes projets au sol sont également soit en cours de réalisation comme le réseau ALMA d'antennes (voir figure 17). Ce vaste réseau d'antennes millimétriques d'Atacama (ALMA) sera l'un des plus puissants instruments astronomiques. Sa capacité d'imagerie sans précédent et sa sensibilité seront plusieurs ordres de grandeur supérieurs à ce qui existe actuellement. ALMA constitué de 64 antennes de 12 m permettra d'étudier le rayonnement aux longueurs d'ondes millimétrique et submillimétrique. Par sa capacité à détecter de très faibles émissions et à donner une image extrêmement précise des sources d'émission, le réseau d'antennes ALMA disposera d'une puissance inégalée, et permettra d'observer des phénomènes cosmologique tels que la formation des premières galaxies, la naissance d'étoiles dans les nuages de gaz moléculaire et les nuages interstellaires de gaz et de poussière («usines» de molécules complexes).

Récemment l'organisation européenne des recherches astronomiques dans l'hémisphère austral (i.e. l'ESO) a lancé des études de faisabilité pour une classe de télescopes de 60 m de diamètre (voir figure 18). Ce type de grands instruments sera d'une grande utilité pour l'observation optique de l'univers profond et plus particulièrement pour l'étude de la formation des premiers objets de l'Univers.

Les molécules primordiales sont appelées à jouer un rôle important dans de nombreuses recherches en cosmologie et aider au diagnostic de paramètres théoriques. C'est ainsi, à l'aide du télescope KUYEN de 8 m installé au Chili, il y

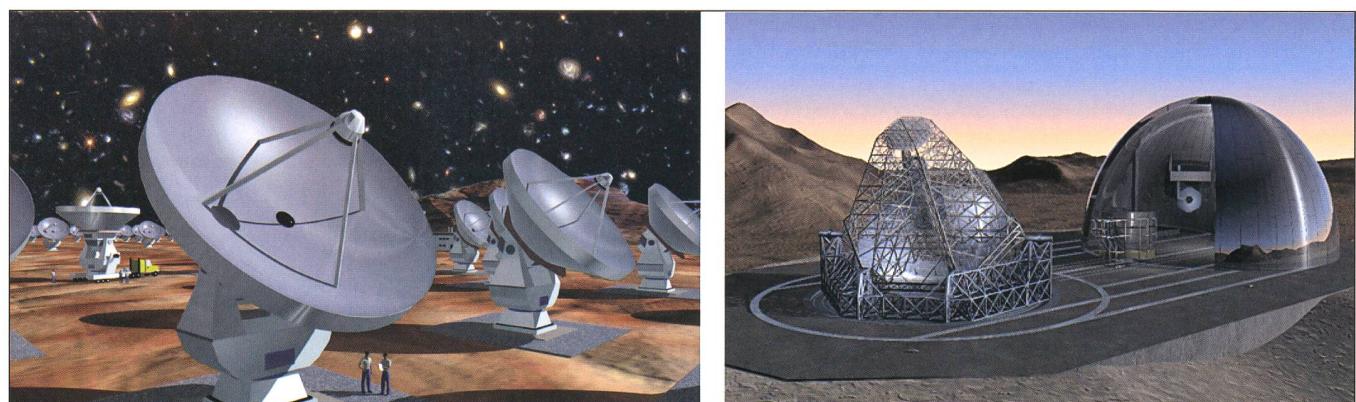


Fig. 17: Les trois grands instruments spatiaux dédiés à l'étude de la formation cosmologique des objets astrophysiques. De gauche à droite le satellite infrarouge HERCHEL, le satellite PLANCK SURVEYOR et le télescope de nouvelle génération JAMES WEBB.

a quelques années une équipe franco-indienne conduite par P. PETITJEAN et R. SRIANAND ont mesuré le rayonnement de fond cosmologique profond grâce aux propriétés d'un gaz moléculaire se trouvant à douze milliards années lumière de la terre [16]. Ils ont tiré la température du gaz moléculaire (environ 25°C) à partir des mesures du niveau d'excitation du carbone neutre et de l'hydrogène moléculaire dans le nuage, estimant ainsi la température du fond diffus autour de -264°C il y a douze milliards d'années (c'est-à-dire lorsque l'Univers avait un age d'environ 500'000 ans). Ce résultat était en accord, aux incertitudes de mesure près, avec le modèle cosmologique de Friedmann et Lemaître.

De nombreux instruments futurs vont offrir une place de choix à l'astrochimie dans les futurs recherches astrophysiques, au point que nous pouvons sérieusement envisager un nouveau de champ de recherche en astrophysique: la cosmologie moléculaire.

Fig. 18: Les futurs grands projets au sol, de gauche à droite, les 64 antennes de 12 m du projet ALMA dans le désert chilien d'Atacama, et le grand télescope de 60 m de diamètre (en cours d'étude).



Remerciements

L'idée de cet article fut initiée par la présentation invitée effectuée par l'auteur lors du congrès annuel de la société astronomique suisse à Rumlang-ZH en mai 2005, et par les nombreuses

discussions qui ont suivis. L'auteur remercie chaleureusement Dr NOËL CRAMER pour cette opportunité.

PROF. DENIS PUY
Université des Sciences Montpellier II
GRAAL CC72 - F-34095 Montpellier cedex 09
Denis.Puy@graal.univ-montp2.fr

Bibliographie

- [1] MOOKERJEE A., KHANNA M. 2004 *La Voie du Tantra: Art – Science – Rituel*, Collection Points Saïesse, Éditions Seuil, Paris
- [2] ARISTOTE 2002 *Physique tome 1 & tome 2*, Collection des universités de France, Éditions Belles Lettres, Paris
- [3] SALEM J. 1997 *L'atomisme antique: Démocrite, Epicure, Lucrèce*, Le livre de Poche, Paris
- [4] EINSTEIN A. 1916 *Die Grundlage der allgemeinen Relativitätstheorie* Annalen der Physik 7, 49
- [5] TONNELAT M.-A. 1971 *Histoire du principe de relativité*, Nouvelle Bibliothèque Scientifique, Éditions Flammarion, Paris
- [6] EDDINGTON A. 1919 *Joint eclipse meeting of the Royal Society and the Royal Astronomical Society*, The Observatory 42, 38
- [7] FRIEDMANN A. 1922 *Über die Krümmung der Raumes*, Zeitschrift für Physik 10, 377
- [8] LEMAÎTRE G. 1925 *Note on De Sitter's Univers*, Physical Review 25, 903
- [9] PECCOURD D. 1995 *Trois ruptures épistémologiques de la science moderne*, Sciences 95, 1
- [10] HUBBLE E., HUMASON M. 1931 *The velocity-distance among extra-galactic nebulae*, Astrophysical Journal 74, 43
- [11] LEMAÎTRE G. 1927 *Un Univers homogène de masse constante et de rayon croissant, rendant compte de la vitesse radiale des nébuleuses extragalactiques*, Annales de la Société Scientifique de Bruxelles 47, 29
- [12] GAMOW G. 1955 *Mr Tompkins s'explique lui-même*, Editions Dunod, Paris
- [13] BURLES S., NOLLETT K., TURNER M. 1999 *Big-Bang Nucleosynthesis: Linking Inner Space and Outer Space*, meeting centennial de la société d'américaine de physique, astro-ph/9903300
- [14] PUY D., SIGNORE M. 2002 *From nuclei to atoms and molecules: the chemical history of the early Universe*, New Astronomy Reviews 46, 209
- [15] DEBYE P. 1998 *The collected papers of Peter J. W. Debye*, Ow Bow Pr Editor
- [16] SRIANAND D., PETITJEAN P., LEDOUX C. 2000 *The cosmic microwave background radiation temperature at a redshift of 2.34*, Nature 408, 931