Cosmologies de la fin du XX^e siècle

Marc Lachièze-Rey*

Résumé: On retrace les tendances générales de la cosmologie scientifique à la fin de notre siècle. Son évolution a intégré l'apparition de nouvelles disciplines, physique quantique et théorie quantique des champs, physique nucléaire et physique des particules. Elle prend en compte de nombreuses découvertes observationnelles en astrophysique, permises par les progrès des instruments et des méthodes d'observation, par l'exploration de nouvelles fenêtres de rayonnement.

Prenant en compte le contenu matériel de l'univers, ses lois et son évolution, la cosmologie est devenue beaucoup plus concrète. De nouveaux concepts – masse cachée, lentilles gravitationnelles, vide quantique et son énergie, inflation, brisures de symétrie et défauts topologiques... – sont apparus. Leur étude mène vers l'ère de Planck et la cosmologie quantique. De nouveaux domaines de recherche – formation des galaxies, Univers primordial – sont très actifs.

Nous faisons le point sur le statut des modèles de big-bang, seuls candidats actuellement pour comprendre l'univers et son évolution. Ils rendent compte de l'homogénéité, de l'expansion, de l'évolution, de l'âge de l'univers, de la présence des éléments légers et du fond diffus cosmologique. Nous détaillons les progrès dans la connaissance des paramètres cosmologiques (en particulier la constante cosmologique) et du contenu de l'univers.

Abstract: We review the general tendencies of cosmology at the end of the century. Its evolution has integrated the appearance of new disciplines such as quantum physics and quantum field theory, nuclear and particle physics. It takes into account many observational discoveries in astrophysics, allowed by the progress of observational instruments and methods, by the exploration of new radiation window. Taking into account the material content of the Universe, with its laws and its evolution, cosmology has become more concrete. New concepts – dark matter, gravitational lenses, quantum vacuum and its energy, inflation, symmetry breaking and topological defects... – have appeared. Their study leads to the Planck era and to quantum cosmology. New domains – galaxy formation, the primordial Universe – are now very active.

We resume the status of the big-bang models, the only candidates to understand the universes and its evolution. They give an account of the homogeneity, the expansion, the evolution, the age of the universe, as well as of the presence of the light elements and of the cosmic microwave background. We detail the progress in the knowledge of the cosmological parameters (including the cosmological constant) and of the content of the universe.

LA COSMOLOGIE se constitue comme discipline scientifique au début de notre siècle. D'une part, la formulation de la théorie de la relativité générale permet de considérer un objet "univers", muni de propriétés conceptualisables et mesurables. D'autre part, l'expansion cosmique constitue la première de ces propriétés observées.

* Directeur de recherche, CEA, Saclay, marclr@discovery.saclay.cea.fr.

La première moitié du siècle donna lieu à une pléthore de développements formels. De nombreux modèles cosmologiques furent constitués et critiqués; des procédures observationnelles furent conçues pour les tester. Mais la mise en oeuvre de ces “tests cosmologiques” se heurta à d’énormes difficultés: limitations des instruments d’observation; présence de différents effets très complexes perturbant l’analyse des résultats de mesure: absorption et dégradation des rayonnements astrophysiques; effets d’évolution inextricablement mêlés aux effets à mesurer, et les masquant complètement.

Les premiers modèles cosmologiques étaient d’une grande abstraction: des sortes d’illustrations académiques de la théorie de la relativité générale (RG), sans prise en compte d’effets physiques. Les études se consacraient à des problèmes de nature cosmographique, où la gravitation, décrite par la RG, était seule prise en compte.

Depuis, la physique quantique s’est mise en place, et a donné lieu à d’innombrables applications qui ont confirmé son efficacité. Mise en accord avec la relativité restreinte, elle s’exprime aujourd’hui sous le formalisme de la théorie quantique des champs. Par ailleurs, de nombreuses découvertes expérimentales ont engendré et stimulé les progrès de la physique nucléaire et de la physique des particules. Si d’un point de vue conceptuel ces théories relèvent de la théorie quantique des champs, elles sont aujourd’hui formulées dans le cadre d’un modèle phénoménologique efficace, le “modèle standard des particules et des interactions”. Celui-ci présente un classement des particules élémentaires (en fonction de la théorie des groupes), selon la manière dont elles interagissent (selon trois types d’interactions répertoriées: électromagnétique, nucléaire faible et nucléaire forte), en conformité avec le formalisme de la théorie des champs. Bien que conceptuellement mal compris et mal décrit, ce schéma fonctionne du point de vue empirique. La gravitation est “rajoutée”, non quantifiée et décrite d’une manière conceptuellement différente par la RG.

Depuis quelques décennies, la cosmologie incorpore cette description, et tente de tirer les conséquences du comportement de la matière que cela implique. Le contenu matériel de l’univers est décrit sous forme de l’assemblage d’un très grand nombre de ces particules, se combinant et interagissant

Néanmoins, la cosmologie déborde des domaines d’application des théories établies, et nécessite de les prolonger: vers des échelles spatiales et temporelles plus petites, vers des énergies plus grandes, en combinant de manière plus harmonieuse la gravitation aux autres interactions. Ces tentatives, aujourd’hui en cours, s’expriment sous des formes très diverses: théories “grand-unifiées”, supersymétrie et supergravité, cordes et supercordes, gravité ou cosmologie

quantiques, géométrie non commutative, ... Je n'entrerai pas dans leurs détails qui relèvent autant de la physique théorique que de la cosmologie, présentant des degrés divers de succès conceptuels. Quelques unes ont été appliquées à la cosmologie, avec plus ou moins de bonheur.

Nouveaux concepts

De nouveaux concepts ont été introduits en cosmologie.

- Celui de “masse cachée”, ou “matière sombre” n'est pas récent. Il relève plutôt de l'astronomie que de la cosmologie, mais ses implications dans cette discipline sont importantes. Il résulte d'un désaccord: la masse de la matière “lumineuse”, telle qu'elle est estimée d'après les observations de son rayonnement, diffère de la quantité de masse mesurée au même lieu par des arguments dynamiques. La différence – très importante – pourrait être sous forme de “masse cachée”

La nature de cette masse cachée additionnelle reste inconnue. Elle pourrait être relativement ordinaire, sous la forme de matière dite baryonique car composée de protons et de neutrons essentiellement. Elle pourrait aussi se constituer d'un type encore inconnu de particules, qui n'émettent (ni n'absorbent) aucun rayonnement. Cette possibilité nouvelle est permise, sinon suggérée, par les derniers développements de la physique des particules et de la physique théorique: en quelques décennies, les physiciens des particules ont proposé, en général de manière *ad hoc*, plus d'une centaine de “candidats” possibles. La physique des particules se révèle ainsi dépourvue de pouvoir prédictif: elle autorise l'existence de presque n'importe quelle nouvelle particule aux attributs arbitraires. La multitude de candidats proposés crée une confusion actuellement peu séduisante, même si la manière dont ils pourraient intervenir en cosmologie permet de les classer en catégories telles que matière “froide” “tiède” ou “chaude”, ...

En même temps, les astronomes tentent de mettre en évidence indirectement l'éventuelle présence d'objets massifs invisibles de dimensions importantes, comparables à celles d'une planète ou d'une étoile (MACHOs). Ils utilisent pour cela le phénomène de déviation gravitationnelle de la lumière par les masses, prévue par la RG. Du point de vue cosmologique, les analyses suggèrent une contribution totale $\Omega = 0.2 - 0.4$ à la densité de masse de l'univers (voir ci-dessous).

Il est à noter qu'il est possible que la RG (et son approximation newtonienne) ne soit pas la bonne théorie de gravitation. Dans ce cas-là, les analyses

dynamiques modifiées pourraient faire disparaître le problème. Aucune alternative convaincante n'a cependant été proposée.

- Autre concept nouveau, le “vide quantique” résulte de tentatives d'introduction de la théorie quantique des champs en cosmologie. En théorie quantique des champs, l'énergie absolue d'un état est une grandeur mal définie. Elle apparaît d'ailleurs, *a priori*, infinie, défaut “corrigé” par une procédure de renormalisation peu satisfaisante mais au moins efficace pour de nombreuses applications pratiques. Cette procédure laisse une liberté d'interprétation qui permet d'envisager un “état de vide” (ou, plus correctement, “état fondamental”), dont la densité d'énergie est à peu près arbitraire. Les avis des physiciens divergent quant à la légitimité d'une telle procédure. Toujours est-il que le concept de “vide quantique”, et d'une “énergie du vide” associée ont été introduits en cosmologie. L'idée, proposée par les soviétiques dans les années 1960-1970, reprise et médiatisée plus tard par les américains, est devenue l'objet d'une “mode” telle que de nombreux travaux la reprennent avec un flagrant manque de rigueur. Dans un cadre relativement insatisfaisant, en sont nés des concepts néanmoins intéressants – inflation, brisures de symétrie et défauts topologiques –, dont seul l'avenir nous dira la pertinence.

- A un niveau encore plus fondamental, mais aussi plus spéculatif, les cosmologues tentent de percer les mystères de l'ère de Planck et de bâtir une cosmologie quantique.

Nouveaux moyens d'observation

L'astronomie et l'astrophysique ont énormément évolué durant le dernier demi-siècle: améliorations considérables des instruments et méthodes d'observation; meilleure compréhension des différents mécanismes conduisant à la réception du rayonnement.

Les moyens d'observation mis en service dans les dernières décennies donnent accès à un espace plus lointain, et donc à des périodes plus reculées dans le passé. Ce dernier point, fondamental en cosmologie, est à double tranchant. Certes, il dévoile certains aspects de l'évolution cosmique des objets peuplant l'univers et de l'univers lui-même. Mais ces évolutions se mêlent tant et si bien que les effets sont inextricables et l'interprétation extrêmement difficile.

Heureusement, un nombre toujours croissant d'objets deviennent observables et observés, ce qui permet de meilleures études statistiques. Les nou-

ment et surtout, récemment, dans des régions non “polluées” par des effets annexes. Globalement, ils confirment les modèles de big bang avec un excellent accord, établi sur 10 ordres de grandeur. De plus, ces calculs conduisent à une prédiction concernant la physique des particules (que le nombre de familles de neutrinos est inférieur à 4) qui, confirmée au CERN de manière spectaculaire, renforça encore la confiance dans les modèles de big bang (une controverse, qui ne remet pas cette confiance en cause, existe actuellement à propos de l’abondance du deutérium dans les régions primordiales au voisinage de quasars.)

Ces calculs permettent d’établir une limite $\Omega_b < 0.01$ à la densité de matière baryonique présente dans l’univers (pour une valeur $H_0 = 65$ de la constante de Hubble). Cette limite n’est pas suffisamment élevée pour clore à elle seule l’espace. En première analyse, il semble aujourd’hui qu’une partie de la masse cachée doit être sous forme baryonique, et une autre partie sous forme non-baryonique.

- Les âges des plus vieilles étoiles sont estimés aujourd’hui (réévaluation récente avec Hipparcos) autour de la dizaine de milliards d’années. Par ailleurs, les estimations (totalement indépendantes) de l’âge de l’univers à partir des paramètres cosmologiques, selon les modèles de big bang, donnent une fourchette autour des mêmes valeurs. Les modèles de big bang expliquent ainsi parfaitement ce qui apparaît autrement comme une coïncidence quasi “miraculeuse”

- Le fond diffus cosmologique fut détecté en 1965, alors que son existence avait été prédite deux décennies plus tôt dans le cadre des modèles de big bang. Son isotropie et sa nature thermique, rapidement établies, confirmèrent les prédictions des modèles de big bang. Depuis, le très grand nombre d’observations consacrées à ce rayonnement diffus (notamment par le satellite COBE) confirment, avec une précision rarement rencontrée en astrophysique, les prédictions du big bang. Par ailleurs, les astronomes se sont mis en chasse des fluctuations dans l’intensité de ce rayonnement. Après une longue période relativement décourageante, COBE puis d’autres observatoires terrestres ou spatiaux ont découvert celles aux plus grandes échelles angulaires, et ont commencé à mesurer les caractéristiques de ce rayonnement.

Ces traces, les plus anciennes observées et même observables (du moins pour une longue période) ont une importance fondamentale pour la cosmologie. Elles nous renseignent sur les paramètres cosmologiques, les processus de formation des galaxies et des structures, le contenu de l’univers, et la physique de l’univers primordial (ondes gravitationnelles, effets quantiques, ...).

Les paramètres cosmologiques

L'expansion de l'univers est la propriété cosmologique fondamentale. Depuis sa découverte (dans les années 1920), les astronomes s'attachent à en déterminer les caractéristiques. Son taux est exprimé par la constante de Hubble $H_0 = R' / R$. Sa décélération (ou accélération) est exprimée par le "paramètre de décélération" $q_0 = -R'' R / R'^2$

Autre paramètre déterminant, la constante cosmologique Λ (ou, de manière équivalente, la constante cosmologique réduite $\Omega_\Lambda = \Lambda / 3 H_0^2$) possède un statut encore controversé. Les récentes mesures suggèrent qu'elle n'est pas nulle; la valeur $\Omega_\Lambda = 0.7$ qui semble résulter des observations correspond à peu près à un univers spatialement plat ($\Omega_\Lambda + \Omega = 1$).

Le paramètre de densité $\Omega = \rho / \rho_{\text{crit}}$ mesure la densité moyenne ρ de l'univers en unités de $\rho_{\text{crit}} = 3H_0^2 / 8\pi G$. La contribution baryonique est représentée par Ω_b . ($\Omega = \Omega_b + \Omega_{\text{nb}}$).

Les dernières décennies furent relativement décourageantes car notre connaissance de ces paramètres a très peu progressé, sinon pas du tout. L'accord ne s'établissait pas entre les différentes estimations de H_0 . Et il semblait impossible de s'affranchir des effets d'évolution pour estimer les autres paramètres cosmologiques. Dans la dernière décennie, la mise en service de nouveaux télescopes et radiotélescopes, les observations des satellites Hipparcos et Hubble, les progrès dans les traitements et les analyses des résultats, ont fortement amélioré la situation et laissé place à l'optimisme.

Les étalons standard et la constante de Hubble

L'estimation de H_0 repose sur les possibilités de mesurer avec précision les distances des objets lointains. L'utilisation des grands télescopes au sol, des satellites Hipparcos et Hubble, ont non seulement amélioré la qualité des données, mais aussi permis l'utilisation de nouvelles méthodes. La diversité des inévitables incertitudes et erreurs permet des analyses plus objectives.

Dans un relatif voisinage (jusqu'à moins de 50 Mpc), les estimations de H_0 sont considérées comme fiables, grâce à un éventail d'indicateurs de distances (étoiles Céphéides, supernovae, fluctuations de brillance de surface des galaxies, nébuleuses planétaires, loi de Tully-Fischer, de Faber-Jackson,...). Elles donnent $H_0 = 60 - 70 \text{ km/sec/Mpc}$.

En outre, de nouvelles méthodes d'estimation sont apparues: à partir d'observations de supernovae, d'effets de lentilles gravitationnelles, ou de l'ob-

servation du fond diffus cosmologique (effet Sunyaev-Zeldovich). Elles devraient, dans un avenir relativement proche, permettre de préciser ces valeurs, et de confirmer (ou non) que les estimations lointaines coïncident avec celles de notre environnement cosmique.

En ce qui concerne les autres paramètres, les incertitudes demeurent mais la situation progresse. Les astronomes ont observé de très grandes quantités d'objets (galaxies, amas de galaxies, quasars, radiogalaxies, ...) à des distances cosmologiques. Ils connaissent de mieux en mieux leurs caractéristiques, leur répartition, leur évolution. L'abondance et la qualité des données rend possible leur utilisation comme étalons cosmiques. La statistique s'améliore, et l'application des tests cosmologiques (néo-classiques) est remise au goût du jour.

L'observation de supernovae, la géométrie des mirages gravitationnels, l'estimation de l'âge des étoiles les plus vieilles, les observations des fluctuations du fond diffus constituent autant de méthodes complémentaires d'estimation des paramètres cosmologiques, dont ils permettent d'encadrer de mieux en mieux les valeurs. Conclusion: les valeurs de W semblent avoisiner 0,3. La constante cosmologique semble non nulle.

Le contenu de l'univers

Une grande part des observations astronomiques d'intérêt cosmologique concerne aujourd'hui l'examen du contenu de l'univers: découvrir, caractériser, comprendre les différentes classes d'objets existants: galaxies de tous types et de tous âges, quasars, noyaux actifs, nuages intergalactiques, sursauts gamma, supernovae...

La mise en service d'instruments très puissants, ainsi que les possibilités informatiques de traitements d'image et de données, ont entraîné une révolution dans la cartographie céleste: les données astronomiques sont aujourd'hui présentées sous forme de gigantesques catalogues informatisés, bien souvent consultables en ligne et à distance: les catalogues à deux dimensions (position sur le ciel) rassemblent des millions d'objets; ceux à trois dimensions (décalage cosmologique en plus, qui représente une estimation de la profondeur) des dizaines de milliers d'objets. Ceux à "quatre dimensions" proposent les résultats des mesures, additionnelles, de distances (indépendamment des décalages) avec des erreurs relatives voisine de 20%. Ces mesures permettent d'estimer les vitesses de déplacement (en sus de l'expansion) des objets dans l'univers, et permettent donc l'analyse de la "cinématique cosmique", encore mal connue.

La cosmologie s'intéresse à évaluer en premier lieu les abondances moyennes de chacun de ces types de sources, leurs contributions à la masse et aux rayonnements de l'univers. Les catalogues permettent en outre l'étude de leurs répartitions: par exemple celle des galaxies qui se regroupent en amas, superamas, filaments et feuillets autour de grands vides cosmiques. Comment, avec quelle statistique (fonctions de corrélations, autres indicateurs statistiques, fractals?) caractériser cette répartition ? Quel est son lien avec la répartition de la masse totale (y compris la masse cachée et pas seulement visible) déduite d'autres observations ? Quelles sont les vitesses de tous ces objets ?

Elle s'intéresse également à déterminer les caractéristiques d'évolution de ces populations, qui nous renseignent sur l'évolution de l'univers lui-même. Enfin, chaque catégorie d'objet peut a priori constituer un indicateur pour la mesure des propriétés de l'univers.

L'étude la **formation des galaxies** et, plus généralement, des différentes structures cosmiques est devenu ces dernières décennies un champ de recherche très actif en cosmologie. Il s'agit tout d'abord d'imaginer, d'un point de vue théorique, quels événements ont pu être à la toute première origine des processus de formation, et quelles traces observationnelles ils ont pu laisser, par exemple dans le Fond diffus cosmologique. L'origine de ces "fluctuations primordiales", encore mal comprise, remonte très loin dans le passé cosmique, peut-être à une époque que seule pourrait décrire une cosmologie quantique encore à inventer, à une ère d'inflation ou de défauts topologiques comme les cordes cosmiques.

Ces calculs font intervenir le spectre de puissance de ces fluctuations, la nature (chaude, tiède, froide,...) de la masse cachée, les différents paramètres cosmologiques,... Malheureusement notre connaissance du processus est limitée par notre impossibilité de résoudre les équations d'évolution du fluide (de matière) cosmique sous l'effet de sa propre gravitation, sans parler des phénomènes additionnels qui compliquent encore les choses. Les quelques résultats résultant de lourdes simulations numériques sur de gros ordinateurs n'ont guère amélioré notre compréhension générale du processus.

L'univers primordial

La caractéristique principale des modèles FL est que l'univers évolue. Les modèles de big bang décrivent une évolution qui l'a fait passer par un état dense et chaud (sans préjuger de la question des origines). Un des champs de la

cosmologie s'attache à tenter de reconstituer le passé le plus lointain possible, à la lumière d'une physique de moins en moins connue.

La possibilité d'application d'une physique connue s'arrête (vers le passé) à l'époque de la nucléosynthèse. Pour parler d'un passé plus reculé, il est nécessaire de supposer une physique nouvelle: les fortes densités et énergies exigent d'aller au-delà de la physique du modèle standard des particules (électrofaible, chromodynamique quantique), considéré aujourd'hui comme valable. Après une période d'espoir dans les théories de grande unification, règne actuellement l'incertitude. Les possibles conséquences cosmologiques des nouvelles versions de ces théories, de l'importance des champs scalaires, de la supersymétrie, des cordes ou supercordes, ... sont abondamment discutées. La formation des structures, l'influence sur la dynamique de l'univers, sur le fond diffus cosmologique, la possibilité de défauts topologiques, d'une période d'inflation, ... sont en question.

Mais tout ceci ne prend pas en compte les effets quantiques à l'échelle de l'univers. Tant que la théorie quantique ne sera pas comprise, il est difficile de dire ce que pourraient être ces derniers. A vrai dire, si la physique quantique doit être validée conceptuellement, elle ne pourra pas l'être sans que soit construite une cosmologie quantique (c'est dans ce sens que vont les idées actuelles de *décohérence*). Mais la cosmologie quantique n'est pas encore au point, même si des pistes diverses sont actuellement explorées. La prise en compte des points de vue quantiques se borne actuellement à des approximations semi-classiques dont la pertinence est très incertaine. En revanche, si une théorie de cosmologie quantique est un jour reconnue, il est permis d'espérer qu'elle nous éclairera sur des questions fondamentales qui dépassent le cadre de la cosmologie: nature de l'espace et du temps, origine des constantes fondamentales de la physique, nouvelle interprétation de la physique, ...

Conclusion

Les modèles de big bang sont de mieux en mieux confirmés par les observations, parfois avec une étonnante précision. De nombreuses problématiques anciennes restent actuelles: mesure des paramètres cosmologiques, et en particulier nature et valeur de la constante cosmologique; courbure et topologie de l'espace, dilemme entre espace fini ou infini; nature et distribution de la masse cachée; analyse de la distribution (hiérarchique?) de la matière cosmique et des structures qu'elle dessine, et compréhension de leur formation

Le paradigme d'un univers de type Einstein-de Sitter, ($\Lambda = 0$, $\Omega = 1$) semble aujourd'hui démenti; celui d'un univers dominé par de la matière non baryonique "froide" également. La plupart des nouvelles idées (inflation, défauts topologiques, ...) à la mode exigent des ajustements très exacts, ne reposent pas sur une physique confirmée, ne font l'objet d'aucun modèle précis, ne sont corroborées par aucune observation. Il semble que leur seul champ de validité concerne la cosmologie et qu'elles soient à jamais invérifiables autrement que par les traces laissées il y a des milliards d'années dans l'univers.