

Chapitre 1

État des connaissances

L'objectif de ce chapitre est de faire un court panorama de l'état de nos connaissances sur les propriétés observées de l'Univers. Les chapitres suivants seront eux consacrés à l'élaboration des concepts et des théories qui permettent de rendre compte de ces propriétés observées.

Concernant notre connaissance des propriétés de l'Univers, elle repose souvent sur *l'interprétation d'observations au travers de théories et de modèles*. Par conséquent les propriétés décrites dans ce chapitre sont essentiellement valables dans le contexte du modèle standard de la cosmologie décrit dans les chapitres suivants. Si un changement de paradigme vient à opérer, rien n'empêche a priori que ces observations soient réinterprétées et donc conduisent à modifier ce que nous savons de l'Univers.

1.1 Observation fondamentale : le décalage vers le rouge

L'observation première de la cosmologie, à l'origine même de l'émergence de la discipline au début du XXe siècle, est la constatation que tous les objets observés à grande distance sont plus « rouges » qu'attendu. La mesure du spectre de ces objets indique que les systèmes de raies observés, parfois complexes, sont tous à des longueurs d'onde plus importantes que ce que l'observation de ces mêmes éléments aurait donné dans un laboratoire. On définit le décalage vers le rouge ou « redshift » par la quantité z

$$z \equiv \frac{\lambda - \lambda_0}{\lambda_0}, \quad (1.1)$$

où λ est la longueur d'onde¹ observée et λ_0 celle mesurée en laboratoire. En corrélant cette quantité avec la distance des objets, on observe que ce rougissement est d'autant plus grand que la source est éloignée.

Dans le cadre du modèle standard de la cosmologie, ce rougissement est de nature *cosmologique* et traduit le phénomène *d'expansion* de l'Univers. Dans ce processus d'expansion, toute distance prise entre 2 points de l'Univers est amenée à évoluer². Notons dès à présent que cette augmentation n'est pas le symptôme d'un déplacement des sources par rapport à leur espace local, mais plutôt la conséquence d'une « dilatation » de l'espace entre l'observateur et la source. Cette dilatation agit également sur la longueur d'onde des photons³ en vol et conduit au rougissement observé. Cette dilatation agit aussi sur les densités, diluant au cours du temps de telles quantités et l'on peut montrer qu'elle produit des dilatations des durées, on allongeant tout type d'intervalles temporels. Enfin, cette interprétation cosmologique permet également d'expliquer pourquoi ce décalage vers le rouge est d'autant plus important que la source est éloignée.

Notons que comme le redshift croît avec la distance, z est de façon indirecte un indicateur de *distance* et comme la lumière nous parvient avec une vitesse finie et connue, z est également un indicateur de *l'époque* à laquelle la source est observée. En cosmologie, l'action de désigner un objet ou un phénomène par son redshift z implique à la fois une information spectrale, spatiale et temporelle.

Le processus d'expansion a débuté il y a 13.8 milliards d'années : c'est le *Big-Bang*. Aux premiers instants, les distances étaient présumément courtes, l'Univers était donc de fait très dense. Régnait également une température très élevée, qui fut amenée à décroître au cours du temps⁴. De fait le modèle accepté permettant de décrire les origines de l'Univers est parfois dénommé modèle du *Big-Bang chaud*.

1.2 Propriétés générales de l'Univers

L'Univers dans lequel nous vivons peut, semble-t-il, être décrit par une poignée de paramètres. La connaissance de ceux-ci, ajoutée à la connaissance de ce que nous croyons être les bonnes lois de la physique, permet d'expliquer

1. Avec $\lambda = cT = c/\nu$ où T et ν sont respectivement les périodes et fréquences d'oscillation de l'onde électromagnétique associée.

2. En l'occurrence à augmenter dans un modèle standard d'Univers.

3. Et donc sur leur énergie donnée par $E = h\nu = hc/\lambda$.

4. Par exemple la température du « gaz de photons cosmiques », le fond diffus cosmologique, est aujourd'hui de 2.73 K, mais était environ 1000 fois plus chaude lorsqu'il a été libéré il y a 380 000 ans.

une très grande partie des propriétés globales de l'Univers et également une grande partie des processus astrophysiques qui subissent la cosmologie qui les entoure.

1.2.1 Paramètres cosmologiques

Comme détaillé dans les chapitres suivants, l'Univers peut être décrit à un haut niveau de précision en considérant qu'il est homogène, isotrope et possédant une dynamique régie par les équations de la relativité générale. Toutefois, cette description nécessite la connaissance a priori de certains paramètres qui permettent d'expliquer l'Univers tel qu'il est observé. L'observation de l'état actuel du cosmos met des contraintes sur la valeur de ces paramètres et nous détaillons ci-dessous les plus importants d'entre eux.

Paramètre de Hubble Le premier paramètre est le paramètre de Hubble H_0 , qui caractérise le taux d'expansion actuel. Sa valeur est d'environ 70 km/s/Mpc et indique qu'un objet situé à 1 Mpc⁵ s'éloignerait de nous à 70 km/s s'il était soumis uniquement à l'expansion. On utilise parfois le paramètre de Hubble réduit h tel que $H_0 = 100h$ km/s/Mpc : sa valeur est proche de $h \sim 0.7$.

Paramètres de densité Les différents types d'énergies présentes dans l'Univers ont une grande influence sur ses propriétés et leurs contributions au budget énergétique total sont caractérisées par des paramètres de densité Ω_i . En pratique, Ω_i représente le rapport de la densité d'énergie de type i à une densité d'énergie de référence appelée *densité critique*. On distingue la densité de matière Ω_m , la densité de baryons (protons+neutrons(+électrons))⁶ Ω_b , la densité de rayonnement Ω_r , la densité d'énergie des neutrinos Ω_ν et la densité d'énergie noire Ω_Λ . Il faut noter que la contribution de la matière contient celle des baryons, par conséquent $\Omega_m \geq \Omega_b$: actuellement on a $\Omega_m \sim 0.3$ et $\Omega_b \sim 0.05$, la différence étant la contribution apportée par une matière *non baryonique* et invisible, appelée la matière noire. Les contributions des espèces relativistes (photons, neutrinos) sont aujourd'hui négligeables, bien que ce type de particules soit très abondant en nombres.

Spectre de fluctuations initiales L'Univers tel qu'observé actuellement n'est pas strictement homogène, en particulier sur des échelles inférieures à la

5. 1 Mégaparsec vaut environ 3.08×10^{22} m.

6. Dit autrement, les baryons constituent la matière « normale » à laquelle nous sommes habitués.

dizaine de Mpc. Les galaxies et amas qui nous entourent trouvent leur origine dans des fluctuations initiales de densité de très faible amplitude. Ces fluctuations sont caractérisées par un spectre dit « de puissance » $P(k)$ qui donne la distribution des amplitudes des fluctuations de taille $L = 2\pi/k$. On suppose actuellement que celles-ci trouvent leur origine dans la période *d’Inflation* qui prédit un spectre primordial de la forme

$$P(k) \sim k^{n_s}. \quad (1.2)$$

n_s constitue également un paramètre cosmologique et les modèles Inflationnaire lui prédisent une valeur *proche, mais différente* de l’unité⁷. L’amplitude globale du spectre doit également être paramétrée, par exemple sous la forme d’une amplitude de fluctuation sur une échelle arbitraire de 8 Mpc, notée σ_8 . Notons enfin que les modèles d’Inflation prédisent un fond d’ondes gravitationnelles, caractérisé par un spectre de fluctuations tensorielles, similaire à celui des fluctuations de densité (dites également scalaires). Le rapport d’amplitude entre fluctuations tensorielles et scalaires est noté r et sa valeur est supposée faible.

État d’ionisation de l’Univers Le dernier paramètre canonique de la cosmologie permet de décrire l’état d’ionisation de l’Univers au cours de son histoire. Cet état se mesure en contraignant le nombre moyen de diffusions des photons sur les électrons libres du cosmos. Cette quantité est notée τ avec une valeur typique $\tau \sim 0.07$. L’essentiel de ces électrons libres sont produits au cours de la Réionisation de l’Univers au redshift $z_{\text{reion}} \sim 8 - 6$ ⁸ : dans les modèles les plus simples τ et z_{reion} sont directement liés.

Modèle minimal L’ensemble des paramètres décrits précédemment permet de rendre compte d’une grande variété de propriétés observables. D’autre part, certaines hypothèses permettent encore de réduire le nombre de paramètres libres. Par exemple, l’Inflation prédit une courbure intrinsèque nulle qui se traduit en pratique par $\sum_i \Omega_i = 1$. D’autre part l’amplitude des modes tensoriels (c.-à-d. les ondes gravitationnelles issues de l’Inflation) étant attendue comme très faible, on peut aisément poser $r = 0$. Enfin, le paramètre de densité de rayonnement Ω_r est très précisément connu, par la mesure précise de la température du fond diffus ($T = 2.7255 \pm 0.0006$ K) et ne permet donc plus de latitude significative sur sa valeur. Enfin, en l’absence de physique exotique la densité d’énergie des neutrinos Ω_ν est directement liée à celle des photons⁹.

7. Le satellite Planck mesure ainsi une valeur proche de 0.96.

8. Environ 1 milliard d’années après le Big-Bang.

9. Tout en étant quasi nulle aujourd’hui.

Au final, un modèle extrêmement solide peut être construit avec seulement 6 paramètres libres. Un choix typique de « sextet » est $(\Omega_b, \Omega_m, H_0, \sigma_8, n_s, \tau)$. Bien sûr, d'autres combinaisons de paramètres libres sont possibles.

1.2.2 Principales sondes observationnelles

Les paramètres précédents sont contraints par l'observation croisée de différentes sondes observationnelles. La convergence de ces valeurs conduit à ce qui est communément nommé *le modèle de concordance* ou *modèle standard*. Voici une liste (non exhaustive) de ces sondes cosmologiques.

Mesure directe de H_0 Cette mesure s'effectue à l'aide de chandelles standards qui permettent de mesurer indépendamment la distance d'un objet extragalactique et son redshift z . La chandelle de référence est la relation période-luminosité des étoiles variables de type céphéides : la mesure de la période de variation de leur flux apparent permet de déterminer leur luminosité intrinsèque¹⁰ et la connaissance de ce flux et cette luminosité permet d'obtenir la distance¹¹. Les céphéides sont des indicateurs primaires et permettent de calibrer des indicateurs secondaires : courbes de lumières des supernovæ, relation de Tully-Fisher¹², etc. Ce type d'indicateurs donne une valeur de $H_0 \sim 73$ km/s/Mpc. Le fond diffus cosmologique permet également une mesure indépendante de $H_0 \sim 67$ km/s/Mpc en légère tension avec les estimateurs précédents.

Supernovæ et cosmologie La grande luminosité des supernovæ permet leur détection à des distances cosmologiques : ce terme désigne les stades finaux des étoiles les plus massives incapables de maintenir des réactions de fusion nucléaire en leur sein, conduisant à leur explosion. De plus certains types de supernovæ, celles dites de type « SN1A », ont un caractère quasi standard, car elles résultent d'explosions de naines blanches dans des systèmes binaires pour lesquelles il existe une forte corrélation entre luminosité et paramètres de la courbe de luminosité. L'accélération¹³ de l'expansion de l'Univers a été mise en évidence pour la première fois à l'aide de ce type d'indicateurs, en proposant pour la première fois la combinaison $\Omega_m \sim 0.3$ et $\Omega_\Lambda \sim 0.7$. De plus

10. Une céphéide intrinsèquement brillante varie lentement, une céphéide faible varie rapidement.

11. Via $\text{Flux} = \text{Lum}/4\pi(\text{dist})^2$.

12. Qui relie la luminosité d'une galaxie à sa vitesse de rotation.

13. C'est-à-dire le fait que les distances augmentent de plus en plus rapidement aujourd'hui.

ces mêmes indicateurs indiquent que la densité d'énergie noire est probablement une constante en temps et en espace, donc équivalente à une constante cosmologique¹⁴.

Le fond diffus cosmologique Le fond diffus cosmologique (Cosmic Microwave Background, CMB) est constitué des photons produits lors de la Recombinaison, 380 000 ans après le Big-Bang. Il constitue le plus grand réservoir de photons du cosmos et présente une brillance homogène à des niveaux de 1 pour 100 000. En deçà de ces niveaux, le CMB présente néanmoins de faibles inhomogénéités qui tracent les inhomogénéités de matière à cette époque. Leur structure spatiale (en fait angulaire sur le ciel) comprend des informations sur toute l'histoire de croissance des structures depuis le Big-Bang jusqu'à 380 000 ans plus tard et sur les processus de couplage entre le rayonnement et la matière. L'étude de ces fluctuations permet par exemple d'établir la platitude de la géométrie de l'Univers, fournit une mesure de la quantité de baryons Ω_b , confirme la nécessité d'une matière non baryonique et l'absence d'évolution de l'énergie noire. Le CMB indique également que le spectre de fluctuation initial est compatible avec les modèles d'Inflation et pour l'instant les modes tensoriels restent indétectables. Enfin le nombre de diffusions des photons sur les électrons est de l'ordre de $\tau \sim 0.07$ correspondant à une Réionisation vers un redshift de $z \sim 8$. Le CMB constitue à l'heure actuelle la sonde la plus précise et la plus complète d'informations cosmologiques. C'est l'objet d'étude de missions spatiales et sol de très grande ampleur, dont par exemple le satellite européen *Planck*.

Grands relevés de galaxies Les galaxies constituent des traceurs (biaisés) de la distribution de matière dans le cosmos. Par conséquent des efforts importants sont réalisés pour collecter de façon homogène, les positions dans le ciel et les propriétés de millions de galaxies, sous forme de grands relevés : parmi les plus connus on citera le *Sloane Digital Sky Survey*, SDSS, ou bien le futur relevé du satellite européen *Euclid*¹⁵. En théorie, l'étude de la distribution spatiale de ces objets dans de grands relevés doit permettre de contraindre le déroulé du processus de croissance des structures de l'Univers et par extension la cosmologie. Parmi les mesures les plus spectaculaires autorisées par ce type de relevés est la détection des oscillations baryoniques acoustiques (BAOs) à bas redshift. Les BAOs sont déclenchés dans l'Univers pré-Recombinaison et consistent en des ondes acoustiques dans le gaz baryonique entretenues par la compétition entre la pression de rayonnement et la gravitation produite par

14. On rencontrera aussi parfois le terme d'énergie du vide.

15. Prévu pour voler en 2021.

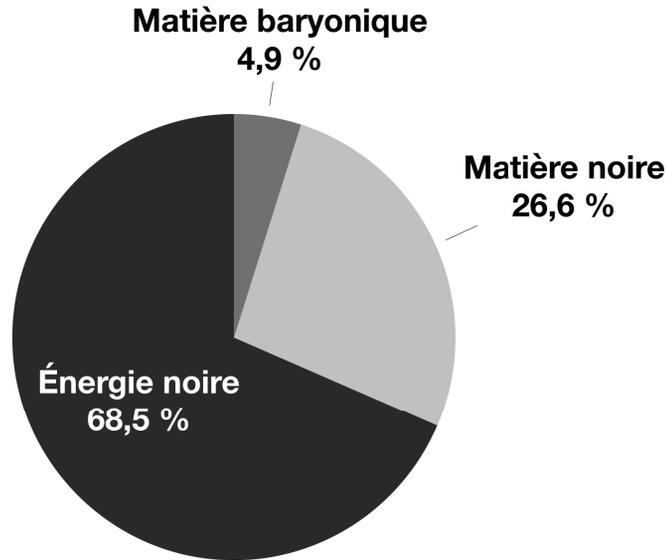


FIGURE 1.1 – La répartition des différentes formes d'énergie au bilan énergétique total de l'Univers, d'après les mesures du satellite *Planck*. On note l'absence de contribution du rayonnement et des neutrinos, dont le poids énergétique est trop faible pour pouvoir être représenté ici. La matière « normale », désignée comme « baryonique » et composée de protons, neutrons et électrons ne représente que $\sim 5\%$ du total. Le reste constitue le *secteur sombre*.

toute la matière. Ces BAOs sont gelés après la Recombinaison et se manifestent sur des échelles d'environ 150 Mpc dans toute distribution de matière qui échantillonnent ces distances, dont le CMB et les grands relevés de galaxies. La cosmologie issue des relevés de galaxies permet généralement de lever les dégénérescences entre paramètres¹⁶, par exemple pour les estimations issues du CMB, et sont donc d'une importance essentielle. De plus les relevés opèrent à différents redshifts z et offrent des vues à différents instants d'une même sonde cosmologique (par exemple sur les BAOs) et sont donc des outils extrêmement puissants.

Amas de galaxies Les amas de galaxies constituent les plus grands objets qui se sont effondrés gravitationnellement aujourd'hui. Ils peuvent comprendre plusieurs milliers de galaxies et atteindre des masses allant jusqu'à $10^{15} M_{\odot}$. Le

16. On parle de dégénérescences quand plusieurs combinaisons de paramètres permettent de reproduire une même observation. Impossible alors de distinguer laquelle est la meilleure.

décompte de ces objets et leur fonction de masse permet ainsi de contraindre le champ de matière aux échelles qui viennent seulement de s'effondrer, sous l'action de la gravité¹⁷. Généralement on extrait de l'étude des amas les quantités $\sigma_8 \sim 0.8$ et $\Omega_m \sim 0.3$. Ces amas sont généralement des émetteurs X, dont l'émissivité permet de déterminer la masse. On les détecte également dans le signal du CMB comme des distorsions locales du spectre via l'effet Sunyaev-Zeldovich.

Milieu intergalactique La structure du gaz dans le milieu intergalactique (IGM) nous renseigne également sur la distribution spatiale de la matière à différents redshifts, via la mesure du spectre de puissance de la matière $P(k)$. La sonde la plus commune de l'IGM est la *forêt Lyman-alpha*, qui se manifeste dans les spectres de quasars distants comme un ensemble de raies d'absorption qui tracent la distribution de nuages absorbants le long de la ligne de visée. Dans le meilleur de cas, les BAOs peuvent même être retrouvés (c'est le cas par exemple vers $z \sim 2$) grâce à de multiples spectres pris le long de multiples directions vers des quasars différents. Une autre application de l'étude de l'IGM pour la cosmologie consiste à observer les tunnels d'absorptions dans les spectres de quasars à très grand redshift $z > 5.5$: l'Univers y est jeune ($t < 1$ milliard d'années) et encore neutre. La mesure de ces tunnels permet de contraindre l'histoire de la Réionisation de l'Univers et le paramètre cosmologique τ .

Lentilles gravitationnelles Les lentilles gravitationnelles traduisent la déformation de l'espace-temps à proximité d'objets massifs, ce qui conduit également à une déformation de la trajectoire des rayons lumineux entre une source et un observateur. Dans les cas les plus spectaculaires (lentillage fort ou *strong lensing*) à proximité d'amas de galaxies cela conduit à la production d'images multiples et à de fortes déformations de types arcs gravitationnels. Sur de grandes portions du ciel, le signal est beaucoup plus modéré bien que l'on s'attende à ce que par exemple le CMB ou bien la distribution de galaxies à un certain z soient déformés par la distribution de matière entre eux et nous observateurs (lentillage faible ou *weak lensing*). Ces faibles déformations peuvent toutefois être analysées statistiquement pour conduire à des contraintes sur la distribution de la matière déformante via $P(k)$ et à l'amplitude des fluctuations associées σ_8 .

17. On parle aussi de passage au régime non linéaire pour l'effondrement, en référence à la nature non linéaire des équations qui permettent de décrire ce processus.