

La constante cosmologique: la plus grande erreur d'Einstein

Françoise Combes,
Collège de France et Observatoire de Paris

L'introduction de la constante cosmologique dans ses équations de relativité générale par Einstein au début du XXe siècle a été considérée comme sa plus grande erreur. Pourtant cette constante est réapparue à la fin du XXe siècle, cette fois par la grande porte, confortée par des observations. L'expansion de l'Univers s'accélère et cela ne peut être dû qu'à une énergie noire, de pression négative et d'effet répulsif, contrairement à la gravité attractive de la matière, qui ne peut que décélérer l'expansion. Énergie noire, ou constante cosmologique ? la question est encore ouverte.

C'est en 1917, peu après la publication en 1915 de sa théorie majeure, la relativité générale, qu'Einstein introduit la constante cosmologique λ dans ses équations :

$$R_{\mu\nu} - \lambda g_{\mu\nu} = -\kappa (T_{\mu\nu} - 1/2 g_{\mu\nu} T)$$

Dès 1918, Erwin Schrödinger écrit une note, pour interpréter ce terme autrement : au lieu de le considérer comme une constante dans la géométrie de l'Univers, il l'interprète comme un terme supplémentaire du côté du tenseur énergie-impulsion ! Il faut alors rajouter un composant au contenu de l'Univers.

$$R_{\mu\nu} = \lambda g_{\mu\nu} - \kappa (T_{\mu\nu} - 1/2 g_{\mu\nu} T)$$

Il remarque que dans ce cas, la constante λ est équivalente à supposer l'existence d'une pression négative. Einstein répond qu'il a bien vu cette possibilité, mais ne l'a pas considérée comme digne d'être mentionnée.

Possibilité de quintessence et boîte de Pandore

Einstein écrit dans une note de réponse à Schrödinger, que ce dernier n'a rien précisé sur la valeur de cette pression négative P , selon lui il y a 2 possibilités :

--Soit P est constante, et l'on revient à sa proposition initiale

--Soit P n'est pas constante, et il faut ajouter la loi de variation de P avec les coordonnées et les variables physiques.

Ces réflexions amènent à penser que peut-être Einstein avait le pressentiment du champ scalaire de quintessence, actuellement considéré et étudié, avec équation d'état $P = w \rho$, et w négatif, inférieur à $-1/3$. En fait, les problèmes abordés à l'époque étaient tout autres. Il s'agissait d'unifier les champs de gravitation et d'électromagnétisme, de considérer une théorie non dualiste des champs et des particules. Celles-ci étaient à cette époque seulement les protons et électrons (pas de neutrons, neutrinos, mésons, etc..).

Einstein refuse alors de considérer l'énergie noire, de peur d'ouvrir une boîte de Pandore. Et il était loin de penser à l'énergie du vide, qui avec la théorie des champs quantiques aujourd'hui est évaluée à 10^{120} fois ce qui est observé (cf Harvey, 2012).

Un peu d'histoire sur notre connaissance de l'Univers

Au début du XXe siècle, l'existence même des galaxies posait problème. Un grand débat a eu lieu parmi les astronomes en 1920, pour connaître la taille de notre Univers (cf Figure 1). Les nébuleuses étaient bien connues, comme la nébuleuse d'Orion, les amas d'étoiles aussi, où l'on pouvait distinguer les étoiles individuelles. Mais ce que nous appelons « galaxies » aujourd'hui étaient si éloignées qu'il était impossible avec les instruments d'alors de distinguer des étoiles. On les appelait aussi « nébuleuses », comme la nébuleuse d'Andromède, la galaxie spirale la plus proche de nous. C'étaient des systèmes qui pouvaient être des nuages diffus de gaz, comme la nébuleuse d'Orion, dans notre Galaxie. Comment en déterminer la distance ?



Figure 1 : Le grand débat en 1920 a opposé deux astronomes éminents, Harlow Shapley (1885-1972) à gauche, partisan d'une Voie lactée très grande, contenant toutes les nébuleuses, et Heber Curtis (1872-1942), à droite, attribuant à la Voie lactée une taille plus modeste, et faisant l'hypothèse que la nébuleuses d'Andromède et les spirales du même type, sont des galaxies extérieures à la Voie lactée, des mondes à part, ou des univers-îles comme l'avait imaginé plus d'un siècle auparavant le philosophe Emmanuel Kant.

L'astronome américain Vesto Slipher commençait à mesurer par effet Doppler sur les spectres en émission de ces « nébuleuses » les vitesses par rapport à nous, qui étaient curieusement en majorité des vitesses d'éloignement (pas celle d'Andromède toutefois).

Jacobus Kapteyn, à Groningue, avait étudié en détail la Voie lactée, le mouvement de rotation de ses étoiles, et s'accordait sur une petite taille, 8000 pc de rayon (le parsec =pc= 3,26 années-lumière). Sans doute par anthropomorphisme, et oubliant les leçons de Copernic, il positionnait le Soleil au centre de la Voie lactée ! (voir la Figure 2).

Le progrès des connaissances ne fut pas un long fleuve tranquille. Certaines erreurs peuvent provoquer des retours en arrière. Van Maanen, dont les travaux sur les mouvements propres étaient très respectés à l'époque, a prétendu mesurer la rotation des « nébuleuses » par le mouvement propre des étoiles de leurs bras spiraux, observation erronée, qui obscurcit le débat. Il lui était impossible de mesurer ces mouvements, et d'en déduire des vitesses angulaires, même pour les spirales les plus proches, comme Messier 31 ou 33. Les vitesses mesurées étaient si exagérées que si ces nébuleuses avaient été en-dehors de notre Galaxie, leur vitesse réelle de rotation aurait été plus grande que la vitesse de la lumière. Cela remettait les nébuleuses à l'intérieur de la Voie lactée, comme le proposait Shapley.

C'était aussi l'opinion de Cornelius Easton, astrophysicien d'Amsterdam, bien que ses images de notre Galaxie en 1900 ressemblaient beaucoup à celles des nébuleuses (cf Figure 2). Notons que le Soleil, et son système de planètes est toujours placé près du centre de la Galaxie, sans doute par ignorance des problèmes d'extinction des étoiles lointaines par la poussière du plan de la Voie lactée.

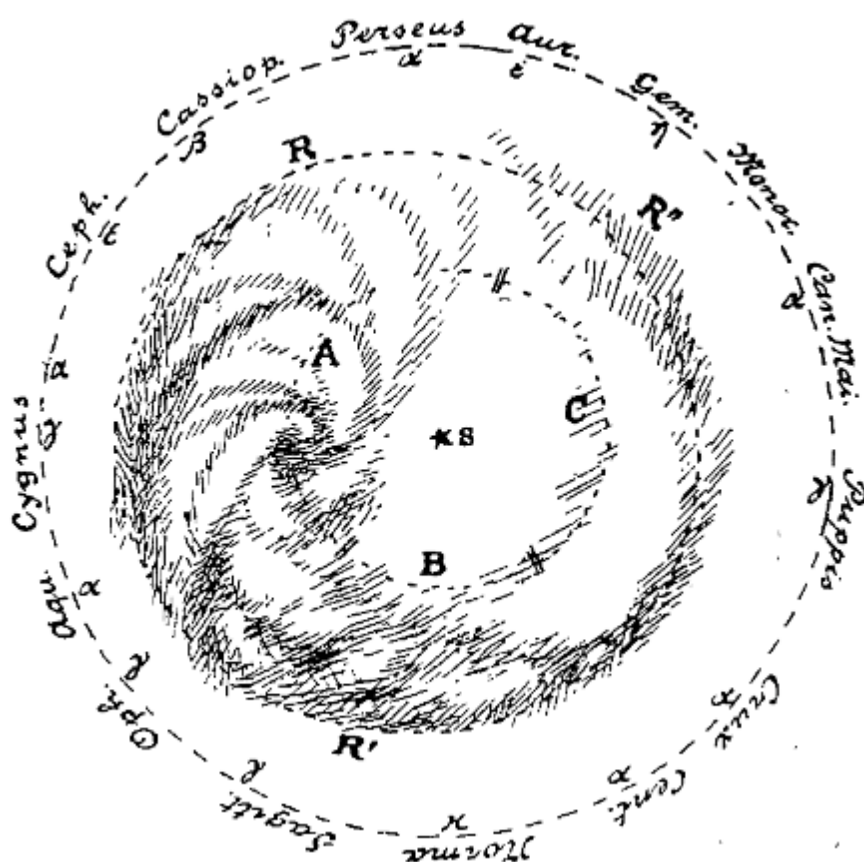
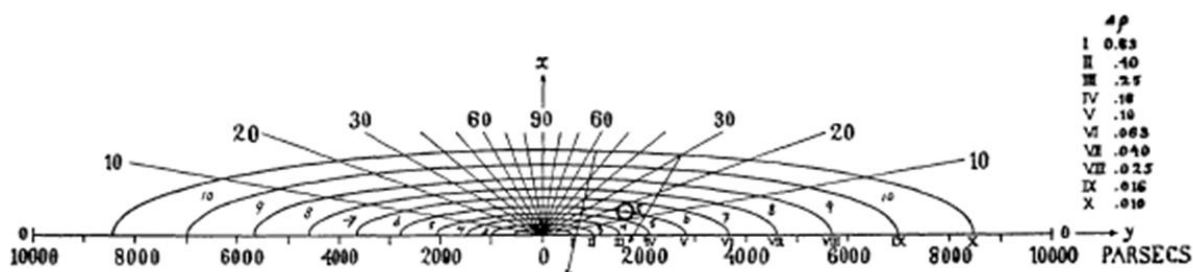


Figure 2 : Vision de notre Galaxie, la Voie lactée, au début du XXe siècle : en haut celle de Jacobus Kapteyn, astronome néerlandais, avait un rayon de 8 kpc (d'après Kapteyn, 1922) ; et en bas, celle de Cornelius Easton, son compatriote, établissant la structure spirale (d'après Easton, 1900). Dans les deux cas, le Soleil est près du centre de la Galaxie.

Les arguments du Grand Débat

Pourtant, en 1920, on connaissait la relation période-luminosité des Céphéides, un indicateur précieux de distance. Henrietta Leavitt avait publié sa découverte en 1909 : après avoir minutieusement noté les magnitudes des étoiles variables et leur période de variation, elle remarqua cette relation (cf Figure 3), qui permet d'obtenir la luminosité absolue d'une étoile à partir de la mesure de sa période. Comme l'on mesure facilement sa luminosité apparente, on peut en déduire précisément sa distance. Edwin Hubble qui se servit de cet indicateur, reconnu qu'elle méritait le prix Nobel pour cette découverte (mais Henrietta disparut prématurément de maladie).

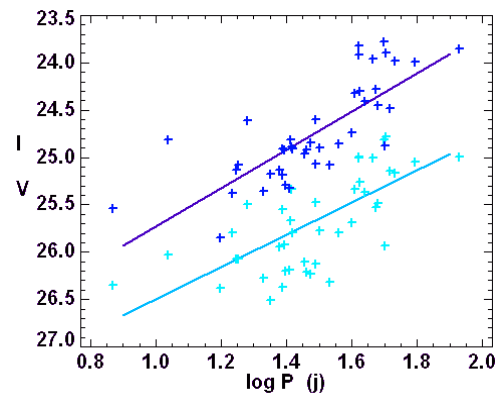


Figure 3 : Henrietta Leavitt (1868-1921) a découvert des milliers d'étoiles variables à l'Observatoire de l'Université d'Harvard, aux USA. Elle a montré qu'il existait pour certaines étoiles variables, les Céphéides, une relation entre luminosité et période P (ici magnitudes en couleurs I et V, en fonction de $\log(P)$, crédit Observatoire de Paris).

Dans le grand débat de 1920, les deux protagonistes avaient à la fois raison et tort. D'un côté, Harlow Shapley prétendait que les nébuleuses faisaient partie de notre Galaxie, de même que les amas globulaires. Pour cela la taille de sa Voie lactée était de 100 kpc (10 fois trop grande !). Mais il fut le premier à remarquer que les amas globulaires pouvaient donner une meilleure idée de la taille et de la forme de la Galaxie, comme système sphérique, moins affecté par la poussière du disque. Il établit que le Soleil n'est pas au centre. Comme les amas globulaires pour lui étaient beaucoup trop loin, les étoiles dans ces amas étaient des géantes. Il croyait à la relation période-luminosité des Céphéides, mais pensait que la vitesse d'éloignement des nébuleuses était due à la pression de radiation

Heber Curtis avait raison de penser que les nébuleuses, comme Andromède sont des galaxies externes à la Voie lactée, et sa taille était raisonnable, même si un peu petite, de diamètre de 10kpc. La vraie taille de la Galaxie, et la vraie position du Soleil ne sera déterminée qu'après 1950. Les étoiles des amas globulaires étaient alors des naines. Il ne croyait pas à la relation période-luminosité des Céphéides, qui n'était pas compatible avec sa vision. Il pensait que les

statistiques sont insuffisantes pour établir précisément cet indicateur de distance. Il n'expliquait pas la vitesse de récession des galaxies.

Epilogue – Fin du débat

Les deux astronomes avaient chacun en partie raison. Même si Shapley plaçait les nébuleuses dans une trop grande Voie lactée, il ne mettait pas le Soleil au centre, et se basait sur les Céphéides pour donner les distances, contrairement à Curtis, qui avait raison sur les galaxies extérieures, considérées comme des mondes à part. Quelques années plus tard, Hubble (1925, 1926) identifie des Céphéides dans Andromède (Messier31), et sa voisine Messier33. Ce sont des galaxies extérieures, distantes de ~1000kpc. D'autre part en 1929, il interprète les vitesses majoritairement positives, i.e. d'éloignement, des galaxies comme une expansion de l'Univers. Avec Milton Humason, il étendit le travail de Vesto Slipher, et détermina les vitesses de beaucoup plus de galaxies, et s'aperçut que non seulement elles s'éloignaient de nous, mais d'autant plus vite qu'elles étaient loin. Il put même faire passer une droite parmi tous ces points, et montrer la relation de proportionnalité entre Vitesse V et Distance D , avec une constante H qui porte son nom, $V=HD$. A l'époque la valeur de la constante était très incertaine, égale à 500 km/s/Mpc (aujourd'hui, elle vaut 70 km/s/Mpc !).

C'est au cours de ces mêmes années qu'Albert Einstein publie ses grandes découvertes qui vont révolutionner la physique. En ce qui concerne l'astrophysique en particulier, en 1905 la relativité restreinte établit la notion d'espace-temps, qui relativise les événements ; plus jamais on ne pourra observer la vie des étoiles dans les autres galaxies de façon contemporaine ; plus on regarde loin, plus on remonte dans le passé. L'énergie équivaut à une masse, et la masse est de l'énergie, d'après la fameuse formule $E = mc^2$. Et surtout, en 1915, la théorie de la relativité générale change notre façon de voir la gravitation. La gravité n'est plus une force comme les autres, mais c'est une déformation de l'espace. Le champ de la gravité c'est l'espace lui-même. Einstein était sûr de lui, et n'attendait rien de l'expérience de vérification menée par Arthur Eddington lors d'une éclipse de soleil en 1919. Si l'expérience n'avait pas été concluante, c'était une erreur de mesure ! Par contre, dès 1917, il commence à exploiter les équations de la relativité générale pour construire des modèles d'Univers. La principale question pour lui était de savoir si la relativité pouvait expliquer l'Univers ou si elle conduisait à des contradictions.

En 1917, on pensait l'Univers statique, stable, en équilibre. Einstein pense effectivement que les autres possibilités sont irréalistes, et propose un modèle d'univers fermé (cf Figure 4), avec courbure positive, et rajoute une constante λ dans ses équations pour forcer le caractère statique. En 1919, le rajout de la constante λ est une nécessité, au détriment de la beauté de la théorie.

Modèle de Willem de Sitter

Pendant ce temps là, Willem De Sitter aux Pays-Bas en 1917 développe à partir des équations d'Einstein où la constante a été rajoutée, un modèle d'Univers en expansion, complètement vide, sans matière. Ce modèle déplaît fortement à Einstein, car il est contraire aux idées du philosophe Ernst Mach, où la courbure de l'Univers est due à son contenu en matière. Ces idées ont beaucoup inspiré Einstein, qui parle du « principe de Mach » pour dire que l'inertie des corps provient de l'existence de la matière dans l'Univers. Einstein tourne en dérision le modèle de Willem de Sitter, objectant que son univers explose ! Ironie du sort, aujourd'hui, nous savons que notre Univers s'approche précisément de ce modèle, car l'expansion

s'accélère, et devient exponentielle, comme Willem de Sitter l'avait envisagé. Si $R(t)$ est l'échelle caractéristique de l'univers, dans le modèle de de Sitter, sans matière, $R(t) = R_0 \exp(Ht)$, avec la constante de Hubble $H = (\lambda/3)^{1/2}$.

D'autres modèles d'univers en expansion, non-statiques, sont proposés durant la décennie suivante par le russe Alexander Friedman en 1922, et le belge Lemaître en 1927. L'abbé Georges Lemaître résout les équations de Friedmann, et propose un modèle d'univers en expansion, qui a commencé par ce qu'il appelle « l'atome primitif », un état très condensé. Pour le tourner en dérision, Fred Hoyle plus tard en 1949 parle de Big-Bang dans une émission de la BBC, et le terme restera. Lemaître a été le premier à faire le lien avec les résultats de Slipher et Hubble, pour lesquels les vitesses des galaxies autour de nous étaient proportionnelles à leur distance. Il pressent aussi que le rayonnement cosmique devrait porter les traces de cette explosion initiale. Juste un an avant sa mort, Arno Penzias et Bob Wilson découvrent en 1965 ce rayonnement vestige du Big-Bang, que Lemaître avait appelé « écho disparu de la formation des mondes ».

Taille de l'Univers

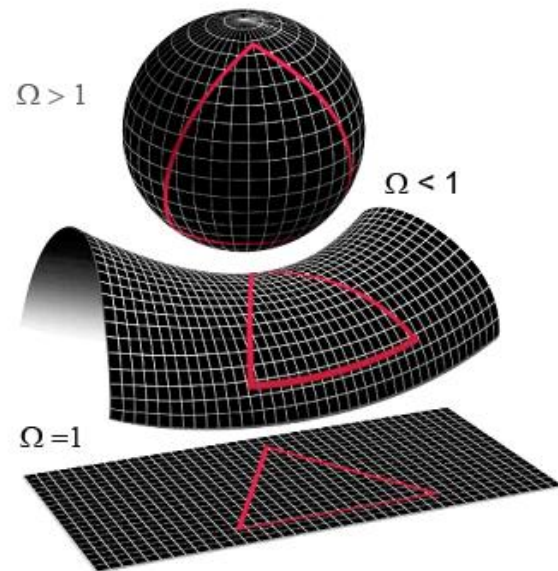
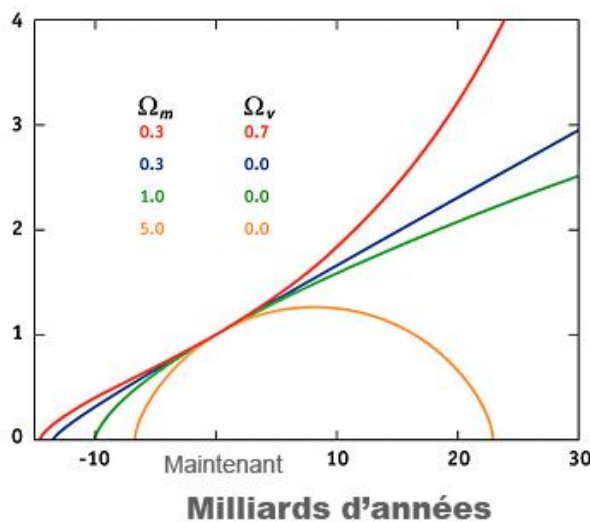


Figure 4 : Modèles d'expansion de l'Univers : à gauche, l'évolution de la taille relative de l'Univers est tracée pour quatre ensembles de valeurs de la densité de matière totale Ω_m et d'énergie noire Ω_v . Notre Univers correspond à la courbe rouge. A droite, sont représentées les diverses géométries possibles, pour un univers fermé, à courbure positive ($\Omega > 1$), ouvert hyperbolique, à courbure négative ($\Omega < 1$), et un univers plat ($\Omega = 1$). Ω est la densité normalisée à la densité critique de l'Univers, égale aujourd'hui à 10^{-29} g/cm^3 .

Einstein réalise son erreur

C'est en 1931, juste après l'observation de Hubble que l'Univers est en expansion, qu'Einstein écrit que la constante λ est inutile. Les modèles à l'époque ne sont pas encore très cohérents. Il subsiste encore une contradiction entre l'âge de l'Univers, et celui des étoiles qui le composent, et même de la Terre! Et la constante λ aurait pu être utile pour résoudre le

problème. Mais elle sera enterrée pendant de nombreuses années, jusqu'à la fin du XXe siècle.

Avec de Sitter, Einstein signe en 1932 un modèle d'Univers sans courbure, sans constante cosmologique, où le rayon de l'Univers est relié à la densité de matière. Ce modèle Einstein-de Sitter resta populaire pendant le XXe siècle, et bien que de nombreux chercheurs utilisaient encore la constante λ , Einstein ne voulut plus jamais en entendre parler!

Le témoignage de Gamow

Certains historiens se sont penchés sur la réalité de « la plus grande erreur » reconnue par Einstein (cf O'Raikeartaigh & Mitton, 2018, Harvey & Schucking, 2000). C'est George Gamow, qui a plusieurs reprises (conférences, publications) parle de « the biggest blunder » reconnue par Einstein (cf Gamow 1970). Est-ce que Einstein l'a vraiment dit? Mario Livio (2013) doute dans son livre « Brilliant Blunders, From Darwin to Einstein ».

Gamow avait en effet un grand sens de l'humour. Par exemple, il est resté célèbre pour son article sur la nucléosynthèse primordiale, i.e. la formation dans les 3 premières minutes après le Big-Bang des éléments légers comme le deutérium, l'hélium ou le lithium, qui ne peuvent pas se former dans les étoiles avec leur abondance observée. Parmi les auteurs de cet article qu'il a écrit avec son étudiant Ralph Alpher, il a rajouté Hans Bethe, un physicien américain, pour faire une liste des auteurs « Alpher, Bethe, Gamow », ou $\alpha\beta\gamma$. L'article fut publié le 1er avril 1948 dans Physical Review.

Le modèle d'Univers d'Einstein

Revenons sur l'idée première d'Einstein, qui introduit sa constante λ en 1917 pour rendre compte d'un Univers statique. Pour se représenter cet univers, on peut prendre une analogie à deux dimensions : ce serait la surface d'une sphère (cf figure 4). Son modèle d'univers était comme une sphère de masse finie. L'univers est fermé, de courbure positive, il n'a pas de bords, si des observateurs se déplacent dans une direction donnée, ils vont finir par revenir au même endroit. Dans les équations de Friedman, découlant des équations d'Einstein:

$$2 \frac{\ddot{R}}{R} + \left(\frac{\dot{R}}{R}\right)^2 = -\frac{k c^2}{R^2} + \Lambda - \frac{8 \pi G}{c^2} P$$

$$\left(\frac{\dot{R}}{R}\right)^2 = -\frac{k c^2}{R^2} + \frac{\Lambda}{3} + \frac{8 \pi G}{3} \rho = H^2$$

où k est le paramètre de courbure (sans dimension, $=+1$ pour un modèle fermé), H la constante de Hubble, ρ la densité de matière et P la pression, la constante Λ est homogène à c^2/R^2 . Pour Einstein R est la taille caractéristique de son univers sphérique, tous les termes dépendants du temps sont nuls, et $H=0$. Ainsi, l'estimation de l'âge de l'univers, $t \sim 1/H$ est infini. L'univers a toujours existé, et continuera. Aujourd'hui nous avons établi que $H=70$ km/s/Mpc, et l'âge de l'Univers est de 13,8 milliards d'années.

Energie du vide

L'autre révolution de la physique du début du XXe siècle est la mécanique quantique. Il n'avait pas échappé aux physiciens à l'époque que celle-ci devait intervenir dans des circonstances spéciales de fort champ gravitationnel, autour des objets compacts comme les trous noirs, ou au début de l'Univers, près du Big-bang. Dès 1920, Wolfgang Pauli essaie de rapprocher l'énergie du vide connue en mécanique quantique, avec le terme Λ , proposant que l'énergie du vide ait une action gravitationnelle. Ses calculs montrèrent que le rayon de l'univers d'Einstein n'arrivait pas à la Lune!

Si on essaie en effet d'avoir l'ordre de grandeur de l'énergie du vide prévue en mécanique quantique, on doit sommer sur tous les degrés de liberté possibles, l'énergie fondamentale de chaque oscillateur harmonique, de fréquence ω , dont l'énergie est au minimum $h\omega/(4\pi)$, soit la densité d'énergie du vide ρ_V serait :

$$\rho_V = \int h\omega \, 4\pi \omega^2 \, d\omega / (2\pi)^3 \sim \omega_{\max}^4$$

Pauli propose d'arrêter la sommation jusqu'à une fréquence $\nu_{\max} = \omega_{\max}/2\pi$ correspondant au rayon de l'électron, ce qui était la plus petite taille connue à l'époque. Mais la densité d'énergie est si grande que le rayon de l'univers d'Einstein est de 31km!

(car $\Lambda = c^2/R^2$)

Composition de l'Univers aujourd'hui

Grâce à un faisceau concordant d'observations complètement indépendantes, notamment le fond cosmique micro-onde, les lentilles gravitationnelles, les supernovae lointaines comme chandelles standard (voir plus loin), nous avons une idée précise du contenu de l'Univers aujourd'hui (cf figure 5). Nous avons 5% de matière ordinaire, ou particules bien connues, protons, neutrons, que l'on appelle les baryons, faits de 3 quarks. Tous les baryons n'ont pas été identifiés dans l'Univers, seule une faible fraction (6%) sont visibles dans les galaxies, sous forme d'étoiles et de gaz interstellaire (la majorité se trouve dans les filaments cosmiques). La matière noire exotique, non-baryonique, représente 25% du total. Enfin l'énergie noire représente 70% du contenu total.

Ces proportions n'ont pas toujours été les mêmes dans le passé, et évolueront dans l'avenir, comme le montre la Figure 5. Tout près du Big-Bang, l'Univers est très chaud et le rayonnement domine. Mais sa densité d'énergie se dilue comme $1/R^4$ dans l'expansion de l'Univers. La matière, elle, voit sa densité décroître comme $1/R^3$ et finit par dominer sur la radiation. Enfin l'énergie noire est un terme quasi constant dans le temps, et ne se dilue pas dans l'expansion. Il est négligeable au début, et en commence à être sensible qu'il y a 5 milliards d'années, où il provoque l'accélération de l'expansion, seulement décélérée par la matière jusque là. Enfin l'importance de l'énergie noire ne fait que croître, et elle dominera l'Univers : l'évolution de l'Univers sera exactement comme le calculait Willem de Sitter, en expansion exponentielle, avec une « constante » de Hubble enfin vraiment constante.

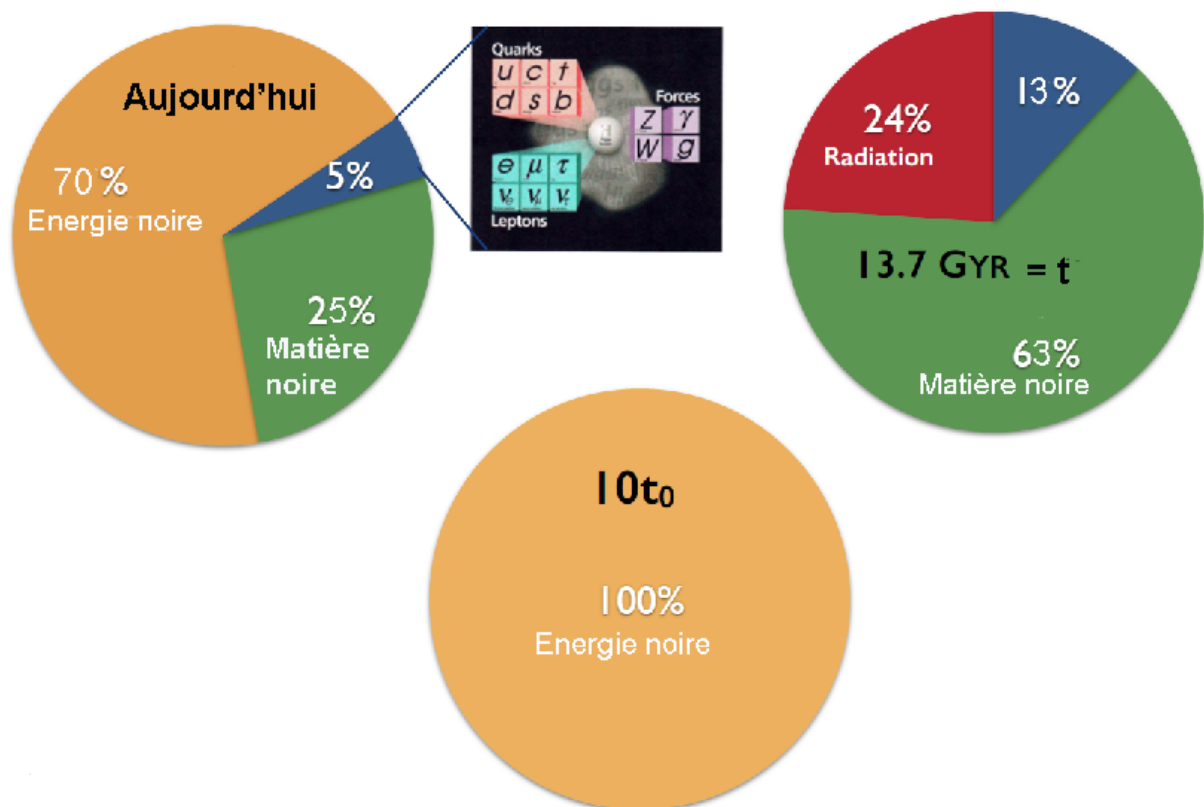


Figure 5 : Composition de l’Univers aujourd’hui (en haut à gauche) : la matière ordinaire (les protons, neutrons, les baryons du modèle standard, faits de quarks) ne représentent que 5% du total, le reste est la matière noire exotique (non-baryonique) pour 25%, et l’énergie noire pour 70%. Ces deux dernières sont encore complètement inconnues. La proportion change en fonction du temps, car l’énergie noire se comporte comme une constante, tandis que la matière se dilue dans l’expansion de l’Univers. La fraction d’énergie noire était négligeable au début de l’Univers (en haut à droite), et par contre dominera complètement, à 10 fois son âge actuel.

Le fonds cosmique micro-onde : une mine d’informations

Revenons sur les progrès récents des observations qui ont fait de la cosmologie une science de précision. Comment sait-on que l’Univers est plat, i.e. a une courbure nulle ? Une grande mine d’informations provient de l’étude du fonds cosmique micro-onde. Durant les premiers 400 000 ans après le Big-Bang, les baryons ionisés et les photons sont en équilibre et oscillent dans des ondes sonores, qui produisent des fluctuations observées dans le rayonnement de corps noir à 2,7 degrés Kelvin aujourd’hui. La plus grande taille possible est l’horizon sonore, c’est-à-dire le chemin parcouru par le son pendant ces 400 000 ans. Ensuite, les oscillations sont gelées, les protons et les électrons se recombinent en atomes d’hydrogène, et la matière neutre se découple des photons. Cette taille bien connue (150kpc, ou 1 degré environ sur le ciel) sert de règle standard, et l’angle sous laquelle nous la voyons aujourd’hui, nous dit si le chemin des photons était en ligne droite ou courbe, comme le montre la Figure 6. Le fonds micro-onde a été observé successivement par les satellites COBE (années 1990), WMAP (années 2000) et récemment Planck (années 2010), avec des sensibilités et des précisions croissantes. L’ensemble des observations nous donne le contenu de l’Univers, l’amplitude des fluctuations qui ont donné naissance aux galaxies et aux grandes structures, l’âge de

l'Univers, etc. Ces paramètres sont aussi étayés par les lentilles gravitationnelles, qui sont sensibles à toute la matière et peuvent cartographier la matière noire, et les supernovae lointaines (voir plus loin).

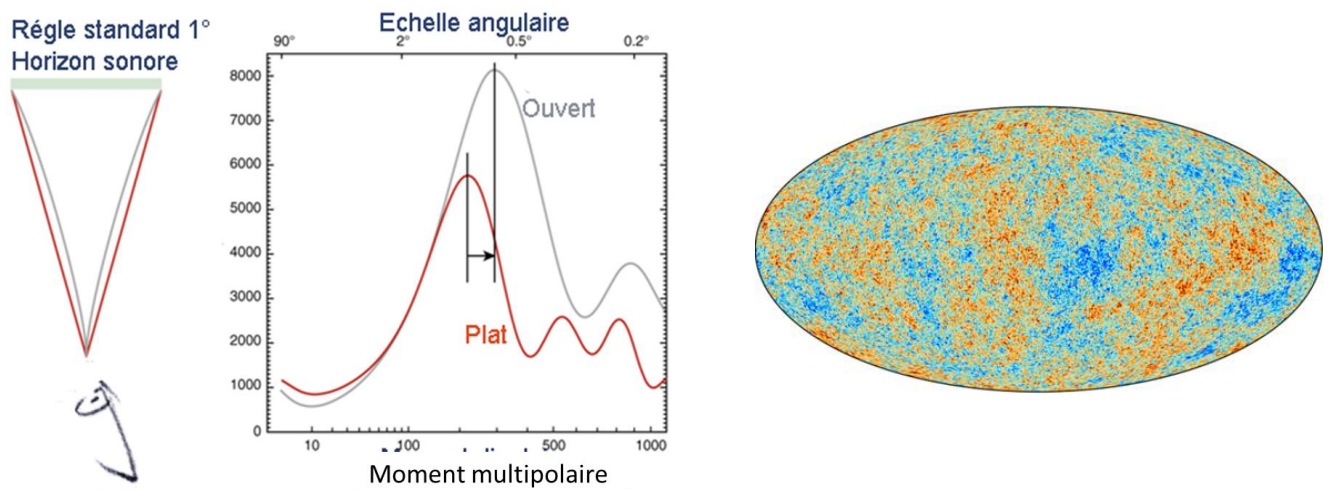


Figure 6 : L'étude du fond cosmique micro-onde nous apporte de nombreuses informations sur notre Univers (cf carte du ciel du satellite Planck, **à droite**). Les ondes sonores qui se développent dans le milieu (entre la matière et le rayonnement), ont une taille maximum caractéristique (l'horizon sonore) connue avec précision. L'observation de leur taille angulaire aujourd'hui nous renseigne sur la courbure de l'Univers. Si l'univers était ouvert (courbe grise, **panneau de gauche**), avec une géométrie hyperbolique et une courbure négative, le premier pic des ondes sonores serait observé à de plus petits angles. L'observation avec grande précision de la courbe rouge nous dit que l'Univers est plat.

Le vide quantique

En parallèle, la mécanique quantique, et la théorie des champs a beaucoup progressé dans la deuxième moitié du XXe siècle. Dans les années 1960-70, les particules élémentaires du modèle standard et les champs se rapprochent, la théorie des champs et la chromodynamique quantique (QCD), décrit les interactions nucléaires fortes et faibles. Il est alors possible de poursuivre de manière plus réaliste le calcul de Pauli sur l'énergie du vide.

La densité du vide de l'univers ($\Omega_\Lambda=0.7$) est proche de la densité critique, soit $\sim 10^{-29}$ g/cm³ aujourd'hui. En unités d'énergie, en postulant dans ce système pour simplifier que $\hbar/(2\pi) = c = 1$, cette densité vaut 10^{-47} GeV⁴. Le calcul de l'énergie du vide revient à sommer tous les degrés de liberté de tous les champs quantiques possibles. Le résultat final dépend de l'échelle de coupure, et on trouve :

-- $2 \cdot 10^9$ GeV⁴, si la coupure est l'échelle de l'interaction électrofaible (soit 10^{56} fois l'énergie observée)

-- 10^{72} GeV⁴, si la coupure est l'échelle de Planck (soit 10^{119} fois l'énergie observée).

Une autre possibilité serait l'échelle de renormalisation de la chromodynamique quantique, Λ_{QCD} , le résultat est alors 10^{-6} GeV⁴, encore 41 ordres de grandeur supérieur à l'énergie noire observée!

Problème de coïncidence

Une autre façon de voir est que l'énergie du vide quantique, qui serait bien calculée, devrait être compensée pour presque s'annuler, par un autre terme d'énergie Λ_E ou une constante cosmologique.

L'énergie du vide quantique doit apparaître dans l'équation d'Einstein ou Friedman comme un terme de densité $\Lambda_q = 8\pi G \rho_q$. Dans la réalité, on mesure $\Lambda = \Lambda_E + \Lambda_q$, une valeur quasi-nulle. Il faut donc un réglage extrêmement fin entre ces deux quantités à 60 ou 120 ordres de grandeur près!

Comment annuler cette constante? Les fermions contribuent une énergie positive à l'énergie du vide quantique, et les bosons une énergie négative, mais ils sont en minorité! Dans l'hypothèse de la super-symétrie, il y aurait toute une famille de particules correspondant comme dans un « miroir », et tous les fermions auraient des super-symétriques bosons. Mais il faudrait garder une parfaite symétrie, ce qui n'a lieu qu'au début de l'Univers. Aujourd'hui la symétrie est brisée.

Réalité de cette énergie du vide

Bien sûr, il est possible que l'intégration et l'extrapolation dans le calcul de l'énergie du vide quantique soit erronée. Pourtant, il est possible de mesurer ces effets quantiques, et de donner un ordre de grandeur à l'énergie du vide, par l'expérience. La force de Casimir, découverte par le chercheur hollandais Hendrick Casimir en 1948, a été mesurée entre deux plaques conductrices non chargées. L'énergie du vide est partout, mais quantifiée. Il existe des photons virtuels, qui produisent un champ électromagnétique, et son énergie correspondante.

Entre les plaques, il faut que la longueur d'onde soit un sous-multiple de l'espacement, par réflexion sur les plaques. Le nombre de photons est alors limité, par rapport à ceux qui existent en dehors. Il y a donc moins d'énergie, et les plaques tendent à se rapprocher. Il existe une force attractive entre les plaques, mesurée dans plusieurs expériences, depuis plus de 30 ans.

Découverte stupéfiante en 1998

Jusque vers la fin du siècle dernier, la constante cosmologique rajoutée par Einstein, était supposée nulle par les astronomes, par le principe de simplicité du rasoir d'Occam. Aucune observation directe n'était venue nous renseigner sur sa valeur. Tout a changé en 1998, lorsque Adam Riess et ses collaborateurs publient leurs observations de 10 supernovae de type Ia, assez lointaines, de décalages vers le rouge z compris entre 0.16 et 0.62, i.e. remontant dans le passé de 6 milliards d'années. Ils avaient aussi 16 de ces supernovae encore plus distantes, et 34 locales pour calibrer. Ces supernovae Ia sont des calibreurs de distance, des chandelles standard, qui permettent d'aller bien plus loin que les Céphéides. Pendant l'explosion de la supernova, l'étoile est bien plus brillante qu'une étoile ordinaire, et même plus brillante qu'une galaxie. Il est possible de suivre sa courbe de lumière pendant un mois ou deux mois environ. Le maximum de brillance est reliée à la durée de l'évènement, ainsi il est possible de déduire la luminosité absolue, et la distance en la comparant à la luminosité apparente. Cette distance est obtenue indépendamment de l'expansion de l'Univers, donc du décalage vers le rouge. Mais la mesure du spectre permet aussi de comparer la distance à laquelle on les attendrait si l'expansion suivait sa décélération, due à la gravité. La grande surprise a été que les supernovae se trouvaient 10-15% plus lointaines que prévu, pour une constante cosmologique nulle (cf Figure 7). Une deuxième équipe est venue confirmer ce résultat, et avec plus de statistiques ; le résultat ressortait à 7 sigma au-dessus du bruit.

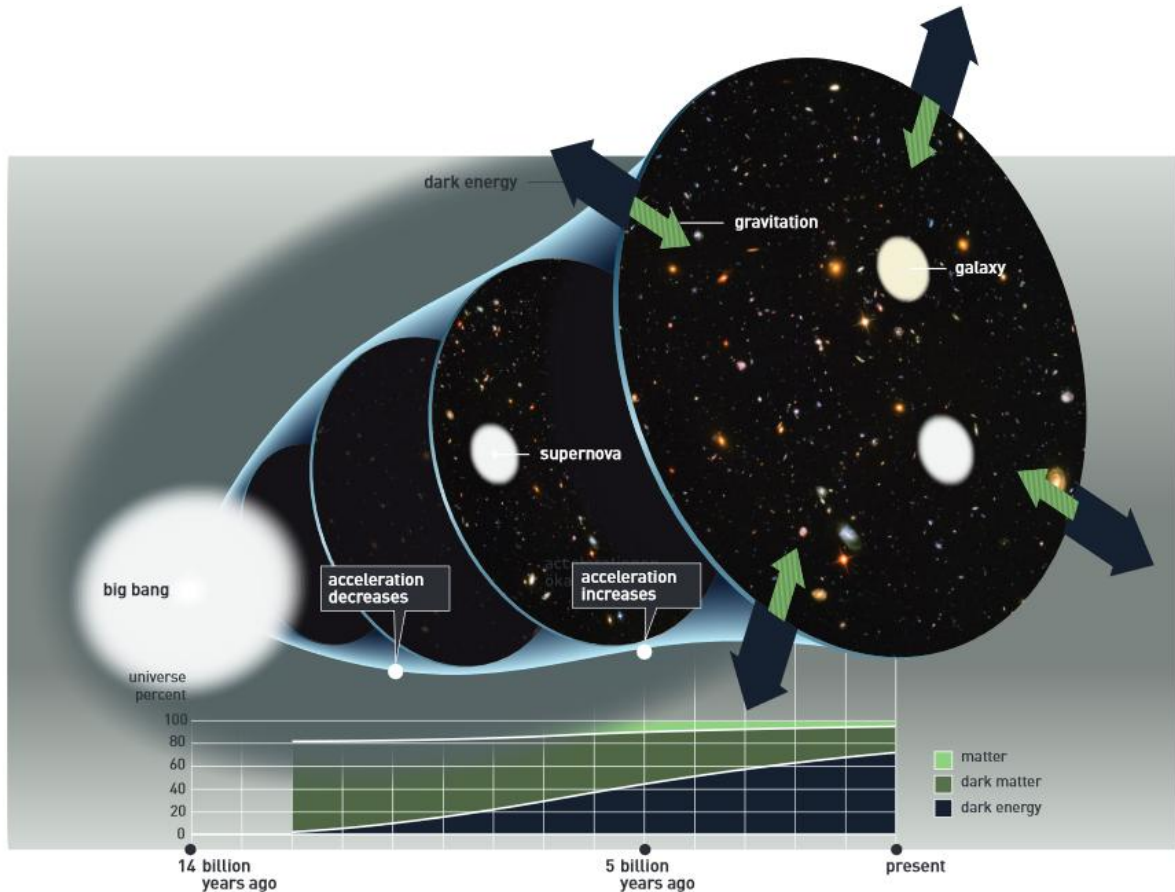


Figure 7 : Représentation schématique de l'évolution des divers composants au cours de l'expansion de l'Univers. Le Big-Bang a eu lieu il y a 13,8 milliards d'années. L'accélération de l'expansion (l'énergie noire) ne se fait sentir que depuis 5 milliards d'années. Alors que la gravité tend à décélérer l'expansion, l'énergie noire et sa force répulsive, tend à l'accélérer. La composition relative de l'Univers est indiquée en bas : vert clair, les baryons ; vert foncé, la matière noire, et en noir, l'énergie noire.

Les supernovae Ia ne sont pas à proprement parler des chandelles standard, mais des chandelles standardisables, c'est-à-dire que leur maximum du pic de lumière n'est pas une constante, mais dépend de paramètres qu'il est possible de connaître, en mesurant précisément leur courbe de lumière en fonction du temps. La largeur à mi-hauteur dépend de la luminosité intrinsèque. On effectue aussi une correction de couleur. Ce genre de supernovae ne correspond pas à la fin de vie d'une étoile massive, qui va se transformer en étoile à neutrons ou en trou noir (il s'agit là de supernovae de type II, comme celle du Crabe). Mais il s'agit d'une étoile binaire, composée d'une naine blanche, étoile dégénérée, dont la pression de Pauli des électrons compense la gravité. L'étoile compagnon continue de vivre sa vie, et à consommer son combustible nucléaire. Son enveloppe peut dépasser le lobe de Roche et tomber sur la naine blanche. C'est l'explosion. La courbe d'énergie produite a toujours la même forme, due à la radioactivité du nickel essentiellement.

Les Prix Nobel de physique 2011 a été attribué aux deux équipes ayant découvert l'accélération de l'expansion de l'Univers : d'un côté, Saul Perlmutter, et l'équipe du « The Supernova Cosmology Project », de Berkeley, et de l'autre côté, Adam Riess (Baltimore) et Brian Schmidt (Australie), avec leur équipe, du « The High-z Supernova Search Team ». Au

total, environ 50 supernovae Ia avec une courbe de lumière bien calibrée, ont permis de démontrer l'accélération de l'expansion de l'Univers avec certitude.

Dans le diagramme de Hubble, portant la distance des supernovae en fonction de leur décalage vers le rouge, la solution $\Omega_m=0.3$, $\Omega_\Lambda=0.7$ est nettement privilégiée par rapport à toutes les autres valeurs possibles, et notamment $\Omega_\Lambda=0$.

Divers modèles d'Univers possibles

La découverte de l'accélération de l'expansion, et de l'existence d'une valeur non-nulle de Ω_Λ a résolu bien des problèmes. Il faut savoir que la taille caractéristique de l'Univers ne dépend que du décalage vers le rouge (ou redshift z). A une taille donnée, $R(t)$, correspond un redshift donné z , $R = R_0 / (1+z)$. La taille aujourd'hui R_0 correspond à $z=0$. Si les supernovae apparaissent plus faibles dans un univers en accélération, c'est que l'âge de l'Univers est plus grand. C'est la solution au problème posé par certaines étoiles de la Galaxie, qui semblaient plus vieilles que l'univers.

Les avancées récentes des observations, que ce soit d'autres supernovae, avec une plus grande valeur statistique, l'étude du fonds cosmique avec le satellite Planck, ou les observations des oscillations acoustiques baryoniques à plusieurs époques, qui sont gelées dans la matière, ont confirmé la valeur de Ω_Λ et permettent d'aller plus loin. Aujourd'hui, nous connaissons la valeur de la densité d'énergie noire, mais nous ne savons pas encore si ce composant est dynamique, s'il varie avec le temps, ou bien s'il est compatible avec une constante cosmologique. Toutes les expériences tentent de déterminer l'équation d'état de l'énergie noire en fonction du temps. Aujourd'hui sa pression P s'écrit $P = w \rho$, en fonction de sa densité ρ , avec $w=-1$, comme valeur la plus probable (i.e. compatible avec une constante). Mais on cherche à connaître le développement $w = w_0 + w_a a(t)$, avec $a(t) = R(t)/R_0$. Le comportement de l'énergie noire en fonction du temps va déterminer le destin de notre Univers, et sélectionner parmi les divers modèles possibles, cf Figure 8.

Problèmes d'ajustement fin

Bien que la cosmologie ait fait d'immenses progrès ces dernières années, nous sommes encore loin d'avoir compris l'essentiel, au vu de l'énorme secteur noir (95%) de l'Univers. D'autre part, comme le soulignent nombre d'astrophysiciens, le modèle standard actuel, comprenant 70% d'énergie noire, semble provenir de coïncidences extraordinaires. Si le rapport entre matière noire et matière baryonique reste constant et égal à 5 au cours du temps, le terme d'énergie noire, qui était négligeable, devient dominant à notre époque. Pourquoi juste maintenant ? Sommes-nous à nouveau dans un moment/point privilégié de l'Univers ? Bien que ce modèle fasse la course en tête, il ne semble pas très naturel. D'autres possibilités seraient de penser que l'existence d'un secteur noir aussi développé n'est que le reflet d'un changement de la loi de la gravité : il faudrait à nouveau étendre la relativité générale, et peut-être introduire un champ scalaire, une cinquième force ? Les modèles de gravité modifiée seront testés dans les prochaines années, grâce à des expériences menées sur des nouveaux télescopes en construction, le satellite Euclid (cf plus loin), le télescope grand champ LSST, l'interféromètre SKA (Square Kilometer Array), etc.

Déjà une autre possibilité a été explorée et ne semble pas résoudre le problème : l'Univers serait-il très inhomogène ? L'hypothèse que nous vivons dans une bulle sous-dense en expansion accélérée, par rapport au reste de l'Univers ne s'est pas vérifiée. Par contre, il se

pourrait que l'hypothèse d'écrire les équations de l'expansion de l'Univers dans une métrique régulière, et homogène, ne soit plus valable, dès que des structures très non-linéaires se développent, justement il y a environ 5 milliards d'années. Les inhomogénéités pourraient-elles produire un effet appelé « back-reaction »? Qualitativement, l'effet à $z=0$ va dans le bon sens, quantitativement cela reste à prouver. Plusieurs chercheurs s'y emploient, et effectuent des simulations. Des résultats contradictoires ont été publiés, mais il semble se dégager un consensus que l'effet en serait pas suffisant.

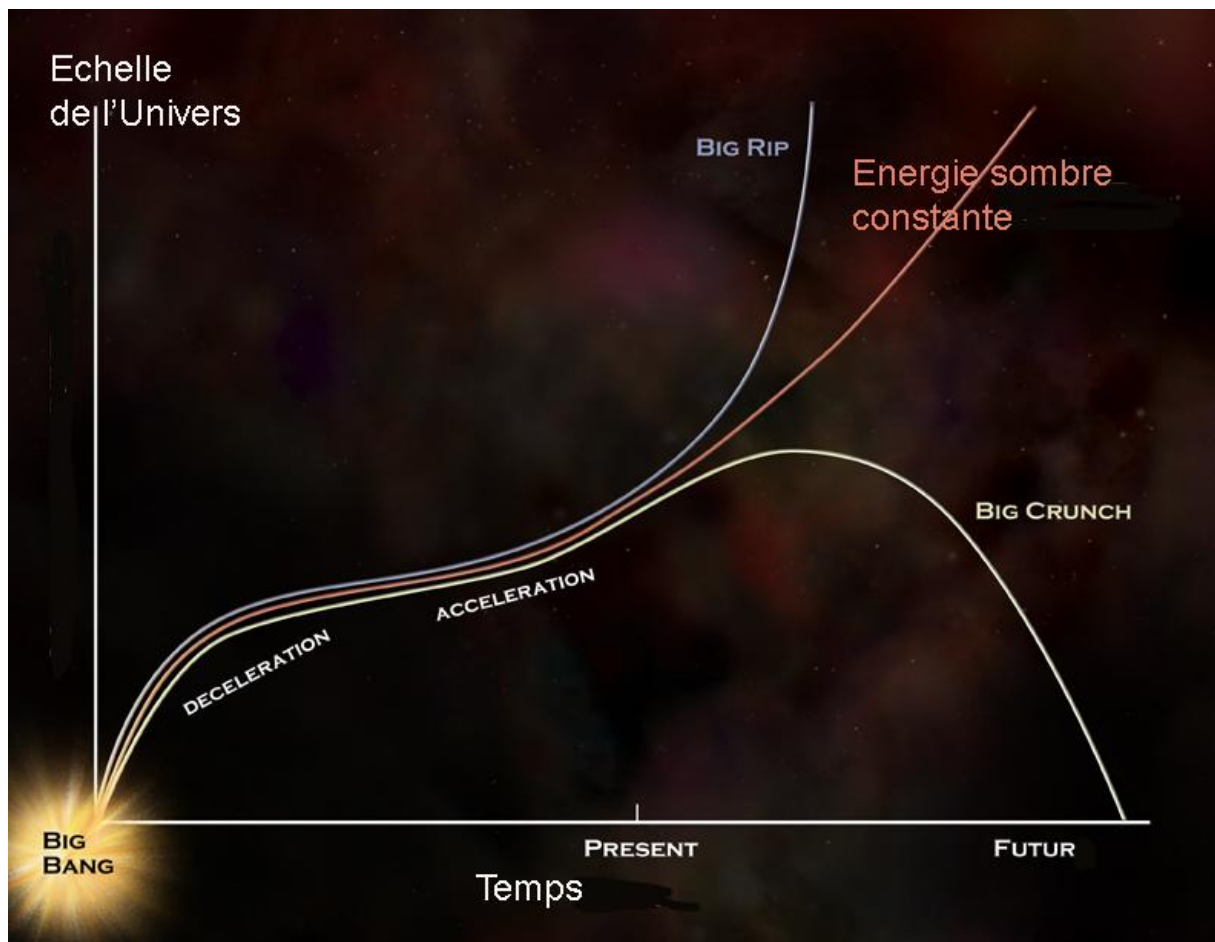


Figure 8 : Les destins possibles de l'Univers. Les diverses courbes montrent l'évolution de la taille caractéristique $R(t)$ de l'Univers en fonction du temps. L'accélération de l'expansion a débuté il y a 5 milliards d'années, et se prolongerait selon la courbe rouge, si l'énergie noire se comportait comme une constante cosmologique. Par contre, elle pourrait avoir un comportement dynamique, et soit provoquer un effondrement (Big Crunch), ou une dilution destructrice (Big Rip) de l'Univers.

Le satellite européen Euclid : observations ciblées sur l'époque de transition entre matière et énergie noire dominante, vers $z=0.5$

L'énergie sombre ne devient significative que récemment $z \sim 0.5$. La transition est très proche et on peut la voir en optique (dans le visible) et proche infrarouge, vu que le décalage vers le rouge est très léger. C'est justement le domaine de longueurs d'onde choisi pour Euclid. Plusieurs outils seront utilisés pour tester l'équation d'état de l'énergie noire : l'observation

des oscillations acoustiques baryoniques, les lentilles gravitationnelles, les amas de galaxies et plusieurs effets théoriques de distorsions entre espace et décalage vers le rouge.

Les pics acoustiques baryoniques sont des ondes déjà détectées aujourd'hui dans la distribution des baryons, avec seulement 50 000 galaxies du relevé Sloan. Mais il faut aller au-delà de la détection, pour atteindre une grande précision, et pouvoir mesurer en fonction du temps cette règle standard de l'Univers. L'observation des amas de galaxies et des grandes structures de l'univers peuvent apporter des tests complémentaires de l'énergie noire. Celle-ci s'oppose à la gravité, et limite la croissance des structures. La vitesse de croissance des amas teste les modèles de gravité modifiée, aux très grandes échelles.

Le taux de croissance des structures sera mesuré comme test de la gravité par la technique des lentilles faibles et du cisaillement cosmique, et leur tomographie, et par la mesure de l'abondance des amas de galaxies et des distorsions entre dimension d'espace et décalage vers le rouge (temps). L'effet Sachs-Wolf intégré (ISW) détecte la présence d'énergie noire, lorsque les photons sortant d'une grande structure sont observés plus bleus qu'ils n'y sont rentrés.

EUCLID est une mission de l'ESA, l'agence spatiale européenne, prévue pour un lancement vers 2022. Il est constitué d'un télescope de 1.2m de diamètre. Deux instruments sont construits, dans le visible et l'infrarouge. Le satellite sera lancé au point de Lagrange L2 (pour éviter les émissions infrarouges de la Terre). La durée de la mission est prévue de 6 ans. Pendant ce temps, il sera possible d'observer 15 000 degrés carrés du ciel, et de détecter 12 milliards de sources, et de produire 50 millions de spectres.

Conclusion et perspectives

La cosmologie est aujourd'hui une science de précision. Malgré les énormes progrès de ces dernières années, il reste d'énormes incertitudes, notamment sur le secteur noir de l'Univers, qui représente 95% de son contenu. Nous savons aujourd'hui qu'Einstein avait finalement raison d'introduire une constante cosmologique dans ses équations, puisqu'une valeur non-nulle a été mesurée avec certitude. Pourtant, une solution pour expliquer la présence de matière et d'énergie noire est peut-être de modifier la relativité générale, et rajouter encore des éléments physiques, une cinquième force ou quintessence, qui va généraliser la théorie d'Einstein dans un ensemble plus vaste. Cette nouvelle physique devra sans doute inclure de façon cohérente la mécanique quantique, afin que l'énergie du vide n'apparaisse plus comme ridiculement surdimensionnée.

De nombreuses missions et télescopes se préparent à observer le ciel sur des grands champs, afin de récolter la physique des galaxies avec grande précision statistique. Le satellite Euclid sera lancé en ~2022 par l'ESA. Son principal but est de déterminer la nature de l'énergie noire et son évolution dans le temps, à partir de 5 tests cosmologiques: lentilles gravitationnelles, distorsions de l'espace, ondes acoustiques baryoniques, amas de galaxies, effet Sachs-Wolf intégré. Ces tests sont basés sur deux méthodes indépendantes, la géométrie de l'univers et le taux de croissance des structures. A côté du but principal, l'héritage de la mission Euclid sera une immense base de données pour l'étude de la formation des galaxies (12 milliards de sources, 50 millions de redshifts), une mine d'images et de spectres pour la communauté, un réservoir de cibles pour les instruments futurs dans l'espace (futur James Web Space Telescope), au sol E-ELT (Extremely Large telescope de 39m, européen), etc.

Quelques Références :

--Easton, C : 1900, A New Theory of the Milky way ApJ 12, 136

--Gamow, G : 1970, dans son auto- biographie posthume, « My World line », et dans un article en 1956 du Scientific American

--Harvey, A, Schucking, E. : 2000, « Einstein's mistake and the cosmological constant », Am. J. of Phys. 68, 723

--Harvey, A.: 2012, "How Einstein Discovered Dark Energy", History and Philosophy of Physics, arXiv1211.6338

--Kapteyn, J.: 1922, 'First Attempt at a Theory of the Arrangement and Motion of the Sidereal System,' , ApJ 55, 302

--Livio, M.: 2017, Fabuleuses erreurs. De Darwin à Einstein, traduit par Jean Audouze, pour CNRS Editions

--O'Raiheartaigh, C., Mitton, S. : 2018, « Einstein's biggest blunder – interrogating the legend », European Phys. J. , arXiv1804.06768