

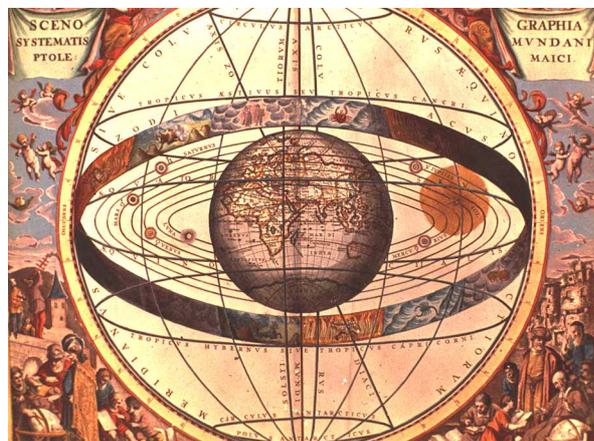
Comprendre notre Univers

Curieux de nature, l'Homme a toujours essayé d'appréhender ce qu'il observait, de découvrir et de comprendre l'envers du décor cosmique. Comment peut-on comprendre l'Univers, sa singularité, son état ? A l'origine, ces questions étaient débattues d'un strict point de vue métaphysique et étaient du ressort de la mythologie ou de la théologie. L'Univers était à l'image de Dieu, éternel et immuable, hors d'atteinte de notre entendement.

Cette conception mystique fut imprégnée dans l'esprit des savants jusqu'à la Renaissance. Mais les "artefacts" du ciel et l'incohérence des théories alliés au scepticisme scientifique tiraillaient les chercheurs et les philosophes entre la doctrine et la foi en leur libre examen.

Le développement des sciences et de la physique en particulier allait bouleverser notre vision de l'Univers et à partir du XVIII^{ème} siècle, mathématiciens et physiciens rassemblèrent leurs théories et leurs observations pour donner un sens concret à l'Univers. Grâce à Newton le monde devint dynamique, entièrement régi par les lois du mouvement. Au tournant du XX^{ème} siècle la thermodynamique imposa une flèche temporelle, la mort thermique de l'Univers, que bon nombre de chercheurs jugèrent non réaliste.

En 1965 pourtant, la découverte du rayonnement fossile transforma définitivement le concept d'Univers. Devant une génération de physiciens conservateurs, le phénomène du Big Bang quittait les conjonctures théoriques pour devenir une entité concrète, mesurable. L'Univers devenait un objet d'étude.



Aujourd'hui l'homme de sciences a dompté la métaphysique en prenant soin de la cultiver là, où la science affiche son impuissance. Il n'est donc pas étonnant qu'à la limite du savoir, la philosophie est souvent dans l'ombre du chercheur. Rien n'empêche en effet le physicien idéaliste de croire que l'Univers est le fruit du Divin où que nous soyons là par Sa volonté. Certains jugeront cette idée non scientifique. Libre à eux de croire que l'Univers existerait même si nous n'existions pas. Illusion ou réalité, l'Univers est intrinsèquement lié à notre évolution, les lois de la thermodynamique nous proposant quelques indices allant dans cette direction. Reconnaître l'utilité de la philosophie permet au chercheur de poursuivre sa quête de connaissance. Nous demandons seulement à la philosophie de ne pas exiger que nous définissions tous les termes de notre savoir.

La véritable cosmologie date du XX^{ème} siècle. Toutes les conceptions antérieures, malgré un bon sens évident étaient empiriques. Les astronomes se basaient tout au plus sur des observations trop imprécises ou à la limite de la résolution de leurs instruments que pour réellement poser les jalons d'une étude scientifique.

En travaillant sur les spectres de celle qu'on dénommait encore la "nébuleuse d'Andromède" M31, en 1912 l'astronome américain Vesto Slipher nota un léger décalage de ses raies d'absorption par rapport à l'état stationnaire d'un élément équivalent mesuré en laboratoire. En deux ans il déterminera les décalages Doppler d'une quinzaine de "nébuleuses spirales". Mais il n'exploita pas ses observations. Pourtant ces "redshift" ou décalages vers le rouge des systèmes de raies indiquaient que certaines galaxies s'éloignaient de nous - de la Voie Lactée - à plus de 1800 km/s.

Les études sur les spectres s'étalèrent sur dix années si bien qu'avant la découverte de la "récession des galaxies", une première théorie cosmologique fut proposée en 1917 par Willem De Sitter : le modèle stationnaire. En fait l'Univers mathématique de De Sitter ne contient pas de matière, il n'y a pas de mouvement. Mais il suffit d'y incorporer quelques particules pour créer des perturbations; le modèle s'anime, devient instable suite à l'effet gravitationnel, imposant le rapprochement ou la fuite des éléments proportionnellement à leur distance.

La création de l'Univers

L'atome primitif

Arthur Eddington reconnu le sérieux des modèles d'univers d'Einstein et De Sitter et développa de son côté une autre variante dans les années 1920. Son modèle prévoit que pendant une très longue période de temps l'Univers est statique, permettant à la matière de se former puis survint l'expansion de l'Univers proprement dite avec la formation des galaxies. Mais ce modèle ne correspondait pas exactement à la réalité, car nous savons aujourd'hui que la phase statique n'a jamais existé

A la même époque le chanoine belge Georges Lemaître, mathématicien de l'Université de Louvain venait de terminer deux années d'études aux Etats-Unis. Il avait suivi une année de formation à Cambridge. Il suivait les cours d'astrophysique d'Eddington lorsqu'il entendit l'exposé de Hubble sur le phénomène de récession des galaxies. De retour en Belgique il s'intéressa à l'état initial concentré de l'Univers et réalisa la synthèse de la théorie d'Einstein et de De Sitter. S'intéressant beaucoup au monde des atomes qu'il comprenait enfin, pour expliquer l'expansion de l'Univers, l'abbé Lemaître trouva une idée géniale : l'atome primitif. Il imaginait que l'Univers était né d'une gigantesque explosion, à l'origine de l'expansion que nous observons actuellement.



Dans le principe son idée était effectivement géniale mais erronée dans les faits. Nous savons aujourd'hui qu'il est impossible que l'Univers ait pu se former à partir d'une boule solide et froide.

Ne sachant pas encore très bien de quoi se composait l'atome, l'abbé Lemaître imaginait que son "atome primitif" avait la taille du système solaire et qu'il s'était brisé de façon successive pour donner naissance à toute la matière de l'Univers. Mais cette réaction de fission n'expliquait en rien l'abondance de l'hydrogène et de l'hélium.

Malgré cette difficulté et sans avoir lu les travaux de Friedmann, Lemaître conclut en 1927 que l'Univers était ouvert et s'étendait à l'infini avec une variation continue des distances entre les objets. Il considéra que l'Univers était constitué de "nébuleuses extragalactiques", une idée qui était très en avance sur son temps. Einstein refusa catégoriquement cette idée car dans son esprit l'univers ne pouvait pas être en perpétuel changement.

L'article de Lemaître resta méconnu jusqu'en janvier 1930, lorsque Hubble présenta ses résultats devant la Royal Astronomical Society de Londres. Lemaître lu ce compte-rendu et envoya une copie de son article de 1927 à Eddington. Quelques mois plus tard Eddington rédigea un commentaire dans les "Monthly Notices of the Royal Astronomical Society" et l'article de Lemaître sera publié dans le même magazine en 1931.

Quoi qu'en disait Einstein, les mesures et les calculs de Hubble et Lemaître démontraient que les galaxies s'évadaient dans l'espace avec une accélération constante. Leur vitesse était d'autant plus élevée qu'elles étaient éloignées. De Sitter reconnut à son tour la validité de la théorie de Lemaître et abandonna son modèle d'univers vide de matière.

C'est dans les années 1930 que prit forme la théorie de l'univers en expansion. Mais jusqu'à sa mort en 1953, Hubble resta réticent à l'idée d'admettre que l'univers soit en évolution. Dans son esprit, comme dans celui de Fred Hoyle, l'univers était statique, les décalages spectraux ne représentant que des vitesses relatives. Aujourd'hui, les astronomes ont un point de vue plus nuancé. Ils considèrent que l'univers est bel et bien en expansion mais que les galaxies ne s'évadent pas dans l'espace - sauf exceptionnellement au sein de certains superamas - mais elles sont en mouvement du fait de l'expansion de l'Univers. Le décalage Doppler ne peut certainement pas être interprété comme la "vitesse de récession" des galaxies.



Le modèle Einstein-De Sitter

En 1932, Einstein et De Sitter collaborent à un nouveau modèle : le modèle Einstein-De Sitter.

Tous deux savaient à présent que l'Univers était en expansion, on ne pouvait y inclure de "constante cosmologique". D'un autre côté, puisque sa courbure n'était pas directement mesurable, l'Univers devait donc être plat. L'Univers d'Einstein-De Sitter est donc une solution très simple des équations d'Einstein, en fait le premier modèle que l'on étudie en cosmologie. Il obéit aux principes de la relativité, il est homogène et isotrope. Cet Univers n'est ni ouvert, ni fermé, mais plat. En remontant l'horloge du temps, ce modèle impose une création originelle à un moment défini qui remonterait à plusieurs milliards d'années.

Fred Hoyle ne crut pas en cette "histoire" de création de l'Univers et appellera ce phénomène le "Big Bang" en 1948 lors d'une émission à la BBC, faisant allusion au bruit que fait une explosion dans les bandes dessinées pour dire combien il se moquait de cette théorie. Il supportait en effet à la théorie de l'état stationnaire.

Le modèle mathématique d'Einstein-De Sitter qui sera par la suite baptisé le "modèle FRW" implique une singularité à l'origine, une condition différente de "l'atome primitif" de Lemaître. Tout l'Univers est condensé dans un point de densité et de courbure infinie à l'échelle de Planck. Même si ce modèle ne correspond pas exactement à la réalité, il a le mérite d'être clair, rendant compte simplement des solutions de Friedmann aux équations de la relativité générale. Pour la première fois les chercheurs disposaient d'un modèle d'univers établi à partir d'observations et régi par des lois physiques.

Mais tous ces modèles ont éludé le problème de la création de la matière. Quel processus permettait de créer les éléments légers présents dans l'Univers et toute la matière à la base de l'édifice cosmique ?

Les éléments chimiques dans l'Univers

Comment expliquer l'abondance relative des éléments légers, tel l'hydrogène, l'hélium, le carbone ou le néon dans l'univers ? En 1928 George Gamow, un brillant élève ukrainien de Friedmann fut envoyé à Copenhague, à l'Institut de physique théorique que dirigeait le célèbre Niels Bohr.

Il y poursuivit des recherches sur la radioactivité α et l'effet tunnel en compagnie de Fritz Houtermans et Robert Atkinson. Ce dernier était un émule d'Eddington qui avait suivi à

Cambridge ses cours sur la constitution interne des étoiles. Nos trois amis publieront ensemble un article traitant des réactions thermonucléaires entre nucléons et protons. Ils conclurent leur article en considérant que seules les réactions entre des noyaux légers (Li-Ne) et des protons aux alentours de 10 ou 20 millions de degrés permettaient de rendre compte de l'énergie du Soleil.

Mais leur théorie sera bouleversée en 1932 par la découverte du neutron par Chadwick et les travaux de Fermi sur les réactions nucléaires induites par cette nouvelle particule. Gamow constata alors avec émerveillement que l'on retrouvait la même abondance isotopique relative des différents noyaux dans l'univers et sur la Terre. En 1936 il sera le premier à faire l'hypothèse que la matière est uniquement constituée de protons, de neutrons et d'électrons. Il pensait également que le cœur des étoiles produisait une quantité considérable de neutrons qui, une fois capturés par les noyaux pouvaient les alourdir et donner naissance à de nouveaux éléments du tableau de Mendéléev.

L'année suivante Gamow, qui enseignait à présent à l'Université George Washington et Edward Teller, le père de la bombe H, étudièrent la façon dont l'hydrogène pouvait donner les autres éléments du tableau périodique. Mais Gamow ne parvint pas à dissocier la nucléosynthèse de la production d'énergie.

Il parvint bien à élaborer une théorie qui permettait de créer du deutérium et de l'hélium à partir d'un noyau d'hydrogène, mais il ne parvint pas à expliquer la formation des autres éléments. Il pouvait expliquer la composition globale de l'Univers, composé pour $2/3$ d'hydrogène et d' $1/3$ d'hélium, mais quoi qu'il fasse, l'hélium-4 se recombinaient en libérant des noyaux d'hélium (particules α). Comme il le disait lui-même, sa théorie "*expliquait 99% de la matière visible dans les étoiles et les galaxies*". Restait un petit pourcent, mais tel un grain de sable dans l'horloge cosmique de haute précision, il représentait tout de même l'ensemble des éléments lourds présents sur Terre et dans la banlieue stellaire.

Se rappelant les idées de Lemaître, Gamow imagina que la matière était née dans une gigantesque explosion qui donna naissance à ce qu'il dénomma une "soupe primordiale" formée de neutrons et de photons qu'il baptisa "ylem".

D'une densité extrême l'ylem fut le siège de réactions diverses et très rapides tandis que le rayonnement évoluait selon la courbe de Planck. Les particules se formèrent ensuite en dehors de cette soupe dans des réactions nucléaires. Les neutrons, instables, finirent par se désintégrer, donnant naissance aux protons, électrons et neutrinos. Les protons se combinèrent avec les neutrons pour donner naissance aux premiers noyaux lourds d'hydrogène avec l'émission de rayonnement. Deux noyaux d'hydrogène lourds se combinèrent ensuite pour former de l'hélium-3. Ce processus s'auto-entretenait : l'hélium s'alourdissait en capturant un neutron et produisait un élément plus lourd, et ainsi de suite.

Dans les années qui suivirent, Gamow et Ralph A. Alpher tentèrent d'expliquer l'abondance des différents éléments sur base expérimentale, à partir des mesures de sections efficaces de captures des neutrons par les atomes. Grâce à la collaboration de D. Hughes, ils disposèrent des premiers réacteurs nucléaires ce qui leur permit d'analyser systématiquement les réactions en chaîne. Ce fastidieux travail sera terminé en 1948.

Avec une arrière pensée humoristique en tête Gamow soumit son article à Hans Bethe pour qu'il accepte de le cosigner. Dans cette article, Gamow décrivait la formulation quasi actuelle de la théorie de la "nucléosynthèse du Big Bang chaud" ou modèle BBN en abrégé. Tout à fait involontairement ce numéro parut le 1^{er} avril 1948.

Son article cosigné par Alpher et Bethe est connu sous le titre "Alpha, Bêta, Gamma". Il résume à la fois la genèse de l'Univers, la création des particules, tout en insistant au travers de l'alphabet grec sur la portée métaphysique de cette découverte.

Le chaudron cosmique

Mais pourquoi n'y avait-il pas d'éléments stables ayant une masse atomique égale à 5 ou 8 ? Gamow constata que les réactions nucléaires étaient instables en vertu de l'expansion de l'univers. En fonction de la densité de l'énergie, les photons avaient une influence plus ou moins dominante mais il ne précisait pas ce que devenait ce rayonnement. A 1 milliard de degrés par exemple, il avait calculé qu'il existait 10^{18} protons par cm^3 , une valeur plus faible que la densité de matière estimée à 10^{23} particules par cm^3 .

Grâce aux calculs antérieurs de Richard Tolman, Ralph Alpher et R.Hermann comprirent que le rapport des densités entre le rayonnement et la matière obtenu par Gamow restait constant au cours du temps. Mais vers 3000 K, lorsque la matière se découpla du rayonnement et forma les premiers atomes neutres, les deux courbes se sont dissociés pour évoluer librement. Alpher et Hermann prédirent que si la densité actuelle de la matière était celle calculée par Hubble, soit 1 molécule/ cm^3 , la température actuelle du rayonnement devait être de 5 K.

En 1965, en essayant de localiser les parasites qui brouillaient les émissions du satellite ECHO, Arno Penzias et Robert Wilson des Bell Telephone Laboratories découvrirent le rayonnement fossile à... 3.5 K, valeur qui sera affinée à 2.726 K par le satellite COBE en 1990 et plus précisément encore par les satellites MAP et Planck en 2001 et 2007.

La découverte du rayonnement fossile était si extraordinaire que plusieurs astronomes revendiquèrent la paternité de cette découverte. Lors d'un symposium d'astrophysique qui se déroula au Texas en 1988, face aux propos indélicats de quelques astrophysiciens, un cosmologiste de renom se leva et s'adressa à Alpher pour lui dire toute son estime au nom de la communauté scientifique : "*c'est vous qui avez tout fait*". Aux yeux de la majorité des astronomes la question était entendue. La même année, vexés par l'attitude de leurs adversaires, Alpher et Hermann publièrent un long article apportant la preuve de leur prédiction.

L'abondance des éléments

A l'époque de l'article sur la nucléosynthèse, les astrophysiciens savaient grâce à la spectroscopie que l'hélium contenu dans les étoiles ne reflétait pas le taux d'abondance cosmique. Il y en avait en effet dix fois plus dans l'univers que dans les étoiles.

Par ailleurs, les vieilles étoiles contenaient jusqu'à 28% d'hélium, ce qui était en contradiction avec la nucléosynthèse qui stipulait que l'abondance des éléments devait décroître jusqu'à disparaître.

En 1964 Fred Hoyle et Roger Tayler réexaminèrent les premiers travaux de Gamow sur la nucléosynthèse et proposèrent dans le magazine Nature l'idée que l'hélium fut produit lors du Big Bang. Deux ans plus tard, P.J.Peebles envisagea que le deutérium fut également synthétisé au cours de cet événement, car très fragile, s'il avait été synthétisé par les étoiles il aurait directement été transformé par les réactions nucléaires. C'est alors que Hoyle, Fowler et Wagoner eurent l'idée d'analyser les possibilités de synthèse des éléments légers au cours du Big Bang.

Partant des principes de la relativité générale et des propriétés de l'univers primordial, ils devaient trouver une relation entre la température et la densité de l'univers en fonction du temps.

Laisant l'univers se refroidir à son rythme propre, Hoyle et ses collègues découvrirent que de l'hélium était effectivement produit en quantité dix fois plus faible que l'hydrogène. Ce rapport était identique aux valeurs observées. L'hélium pouvait donc avoir été fabriqué au cours du Big Bang. Mais qu'en était-il du deutérium, de l'hélium-3, du lithium ou du béryllium?...

Fred Hoyle pensait que ces éléments avaient été fabriqués lors de la formation du système solaire, suite aux bombardements des noyaux lourds par des photons. Les réactions de fissions auraient libéré un grand nombre de neutrons qui, par réactions en chaînes, auraient formé le deutérium et l'hélium-3. Or, des chercheurs rassemblés autour de Jean Audouze, René Bernas et Hubert Reeves démontrèrent en laboratoire que ces collisions entre des noyaux légers et des noyaux lourds n'avaient pu engendrer les éléments tant espérés.

Restait donc les protons issus des rayons cosmiques, seules particules capables de briser les noyaux lourds. Ils n'étaient pas seulement issus du Soleil mais on en trouvait les traces dans toute la Galaxie. Ainsi il s'avéra que la probabilité d'obtenir du lithium-6, du béryllium ou du bore-10 rendait compte de l'abondance relative de ces éléments. Seule difficulté, ce mécanisme de fission - également appelé mécanisme de spallation - n'expliquait pas l'abondance du lithium-7, douze fois plus grande que celle du lithium-6, alors que la théorie prédisait un rapport sept fois plus élevé seulement. Ces 4 éléments avaient donc été formés d'une autre façon.

Grâce aux missions Apollo et la capture des particules du vent solaire sur de grands films d'aluminium, les physiciens purent mesurer l'abondance relative des isotopes de l'hélium, principalement ceux issus du Soleil. Ils découvrirent que l'hélium-4 était environ 2000 fois plus abondant que son isotope l'hélium-3 formé beaucoup plus tôt.

Les astrophysiciens savaient aussi que le deutérium s'était transformé en hélium-3 suite aux réactions nucléaires dans l'enceinte du Soleil dans la réaction $D + n \rightarrow {}^3\text{He}$. D'un autre côté, les physiciens supposaient que l'abondance du deutérium contenu dans l'eau devait être la même que celle du système solaire.

Pendant ce temps en Suisse, Johannes Geiss, inventeur de la voile solaire déployée sur la Lune, avait déjà mesuré l'abondance relative de l'hélium-3 dans le rayonnement cosmique. Mais elle était dix fois trop élevée comparativement à la quantité de deutérium contenue dans l'eau. La question était donc de savoir si on pouvait alourdir l'eau en deutérium (eau lourde) et retrouver les mesures de Geiss.

La création continue et l'état stationnaire

La théorie du Big Bang imaginée par les émules de l'abbé Lemaître ne pouvait expliquer l'origine de la singularité initiale, ni la formation des galaxies ou la distribution de matière dans les étoiles. A cette époque, l'âge de l'Univers, basé sur l'extrapolation vers le début des temps du phénomène de récession des galaxies, était d'environ 2 milliards d'années. Or les géologues étaient parvenus à dater certaines roches terrestres de quelque 3.5 milliards d'années. Plus tard, les astronomes découvrirent que la nucléosynthèse stellaire pouvait durer au moins dix milliards d'années. Certaines étoiles devaient donc être aussi âgées. Les calculs des astronomes conduisaient ainsi à un paradoxe : la Terre était plus âgée que l'Univers !

Bien que le modèle du Big Bang ralliait à sa cause une majorité d'astronomes, en quelques années les partisans de la théorie "de l'état stationnaire" dépassèrent la communauté des cercles privés et portèrent le débat au grand jour.

Pour expliquer l'abondance des éléments dans l'Univers, les astrophysiciens Hermann Bondi, Thomas Gold et Fred Hoyle considérèrent que l'Univers avait toujours existé, qu'il avait toujours été semblable à aujourd'hui et le serait toujours. Hoyle et ses collègues savaient qu'il était impossible que la matière naisse de rien. Nous savons que suite au phénomène de Big Bang l'éparpillement des galaxies dans tout l'Univers a provoqué une dilution de la matière. Pour contrebalancer cet effet, ils suggérèrent avec beaucoup d'imagination que les champs quantiques imposèrent un équilibre entre la matière et l'expansion de l'univers : l'énergie positive devait équilibrer l'énergie négative. Pour ce faire, de la matière se créait en permanence entre les galaxies à partir du vide. Pour maintenir la densité de l'Univers constante, il suffisait de créer un atome d'hydrogène par mètre cube d'espace tous les 5 milliards d'années.

Pour rendre compte de ce phénomène, Hoyle et ses collègues imaginèrent également que dans leurs mouvements de fuite effrénée, les galaxies laissaient derrière elles un sillage d'atomes d'hydrogène qui, par effets gravitationnels finissaient par former de nouvelles protogalaxies. La densité moyenne de l'Univers restait ainsi constante, le rapport matière/ rayonnement étant égal à 2. Leur théorie était celle de la création continue, mais elle ne pouvait pas expliquer la création de cette matière... Malgré la publicité faite par Hoyle autour de sa théorie, celle-ci eut du mal à se maintenir dans les années qui suivirent suite à la découverte des radiosources.

L'intervention de l'astronome soviétique Victor Ambartsumian allait contredire cette si belle hypothèse. En 1958, Ambartsumian suggéra que les intenses émissions détectées dans les radiosources provenaient de phénoménales explosions dont on devait trouver l'origine dans leur noyau. En généralisant son hypothèse aux galaxies, il imagina que même les amas pouvaient se former suite à de violentes explosions. Son hypothèse se trouva confirmée en 1965 avec la découverte du rayonnement à 2.7 K. Or la théorie de l'état stationnaire prédisait que l'Univers avait toujours été froid, semblable à aujourd'hui. Il y avait là un paradoxe, car l'existence d'un rayonnement fossile et l'abondance de l'hélium par exemple témoignaient qu'à une époque très reculée, la température de l'Univers avait été bien supérieure à ce qu'elle est aujourd'hui.

Malgré le fait que les théories de l'état stationnaire et de la création continue ne sont plus capables d'expliquer le rapport rayonnement/matière observée ni le rayonnement fossile, Fred Hoyle et ses collègues Halton Arp, Geoffrey Burbidge, Narlikar et Wickramasinghe considèrent toujours que nous interprétons mal la réalité. Depuis 1990 en effet, ils ont proposé à plusieurs reprises une théorie "quasi stationnaire" sous l'acronyme HBN, mais qui s'avère être une théorie a posteriori. La théorie HBN s'accorde avec le fond de rayonnement à 2.7 K de manière *ad hoc*; le physicien P.J.Peebles et ses amis de l'Université de Princeton l'ont ouvertement critiqué dans le magazine *Nature*.

Cela dit, la théorie du Big Bang s'en trouva consolidée et devint ce que l'on dénomma dorénavant le *modèle Standard*

Ce modèle d'Univers est qualifié de "Standard", car tous les concepts qu'il exprime furent dans leur majorité confirmés par des découvertes ultérieures. Seulement, comme ce qu'il advient de toute théorie, celle-ci sera tôt ou tard invalidée. On découvrira une entrave à sa généralisation ou une expérience plus poussée qui l'infirmiera et on devra remplacer ce concept par un nouveau modèle qui fera consensus dans la communauté scientifique.

Il est donc prudent de considérer le modèle Standard comme un simple outil de travail. Aucun astronome ne peut considérer ce modèle d'Univers comme étant meilleur qu'un autre. Jusqu'à ce jour, le modèle Standard explique correctement la plupart des événements qui sont survenus dans l'Univers, jusqu'à un centième de seconde après le Big Bang. Il doit néanmoins être complété par des théories plus complexes pour expliquer certaines étapes de cette évolution (matière sombre, énergie du vide, particules exotiques, etc). Cette théorie reste le modèle de base que toutes les autres hypothèses doivent rencontrer une fraction de seconde après le Big Bang

Source : <http://www.astrosurf.com/lombry>