

La théorie du Big Bang

La théorie du Big Bang

Au commencement était l'énergie. Elle donna naissance à l'espace-temps et se condensa pour devenir matière et êtres vivants capables de s'interroger. Voilà en deux lignes une version poétique et résumée du Big Bang fondée sur des acquis scientifiques sommaires. Oui, mais à part ça me direz-vous ?

Depuis l'époque de la mythologie, la cosmologie a toujours incité la réflexion des hommes religieux puis des scientifiques. A l'heure actuelle, cette genèse de l'Univers connaît un grand succès de presse et s'attache les noms de nombreux astronomes, physiciens et astrophysiciens. Richard Tolman fut le premier à faire connaître ses idées au public en 1934. Il sera suivi par George Gamow, Fred Hoyle, Stephen Hawking et tout une génération de chercheurs, jusqu'à Fang Lizhi et Alan Guth tout récemment. Les articles de presse, scientifiques ou de vulgarisation traitant ce sujet se chiffrent par milliers chaque année. De nouvelles théories apparaissent aussi pour expliquer certaines étapes singulières de cette évolution.

Ces notions complexes - le terme est faible - dépasse notre entendement et rend les physiciens mal à l'aise car ils devraient quantifier la gravitation. Dans la théorie inflationnaire, nous avons vu que cet ambitieux défi serait bientôt à leur portée.

L'échelle du temps

Dans l'échelle ordinaire, linéaire et chronologique des événements que nous allons relater, nous plaçons le début de l'Univers au temps $t=0$. Cette notion perd son sens si nous acceptons l'idée d'un Univers qui crée son propre espace "au départ" d'un phénomène de Big Bang. Chercher à savoir ce qu'il y avait "avant" devient un non sens physiquement parlant. D'un autre côté le mot se retrouve de plus en plus souvent dans la bouche des théoriciens. Pourquoi ? Parce que ce principe peut être gommé si nous alignons en parallèle une échelle logarithmique du temps.

Lorsque nous remontons dans le passé, au moment où l'espace prenait forme il y a environ 15 milliards d'années, toute une série d'événements se sont produits à un rythme toujours plus accéléré jusqu'à se multiplier à l'infini. L'échelle logarithmique nous permet de mieux saisir ces événements toujours plus accélérés dans le passé. Cette échelle facilite également la comparaison avec la notion d'Univers en équilibre thermique qui se dilate.

En bonne approximation, l'échelle du temps est multipliée par deux chaque fois que l'Univers double de volume, tandis que sa température baisse de moitié. Ainsi, par convention le temps présent vaut 0, nous comparons les temps passés à l'époque actuelle. Au temps $t=1$ l'Univers présentera un rayon deux fois plus grand qu'aujourd'hui, soit 30 milliards d'a.l. A $t=2$ il aura encore doublé (60 milliards d'a.l.) et ainsi de suite.

De l'autre côté de l'échelle, les valeurs prennent le signe négatif. A $t=-1$ l'Univers était deux fois plus petit, il faisait 7.5 milliards d'a.l. Lorsque $t=-2$, l'Univers était 4 fois plus petit qu'aujourd'hui. Le rayonnement fossile est apparu lorsque l'Univers était 1000 fois plus petit, à $t=-1000$; l'hélium apparut lorsque l'Univers était 1 milliard de fois plus petit, à $t=10^{-9}$; les quarks

ont formés les nucléons à $t = 10^{-12}$, etc. La limite inférieure du temps logarithmique vaut "moins l'infini", qui cette fois représente plus logiquement le déroulement chronologique des événements. Avec des limites posées à l'infini nous ne sommes plus tenté de savoir ce qu'il y avait "avant" et nous évitons de tomber dans un piège métaphysique.

L'Univers : un système en équilibre

Pour rendre compte des différents phénomènes qui vont se produire au cours de l'expansion de l'Univers, deux autres lois doivent encore être connues :

- Rappelons qu'en bonne approximation, tant que la densité d'énergie du rayonnement est supérieure à la densité d'énergie de la matière, on peut considérer l'Univers comme un système gazeux en équilibre dans lequel la température T est une fonction du temps t :

$$T \text{ (K)} = 10^{10} \text{ K} / \sqrt{t}$$

Ainsi 1 seconde après le Big Bang la température était de 10 milliards de kelvins.

- La densité de l'énergie du rayonnement vaut :

$$\rho_e = 10^6$$

Ainsi, 1 seconde après le Big Bang, la densité de l'énergie était de l'ordre du MeV ou 10^6 gr/cm^3 .

De façon générale, rappelons que la densité d'énergie du rayonnement (des photons) s'élève comme t^4 alors que l'énergie de la matière s'élève proportionnellement à la température.

Gardons bien ces relations en mémoire. Elles nous permettront de comprendre avec plus de clarté le rôle des seuils d'énergie.

L'écho d'un grand "boum"

Introduite en 1927 par l'abbé Lemaître, nous avons vu que la théorie du Big Bang fut affinée par Gamow qui l'énonça en 1948. Comme le faisait remarquer l'abbé Lemaître, il ne faut pas considérer ce grand "boum" comme une explosion traditionnelle; elle ne s'est pas produite dans une enceinte. Le terme "Big Bang" n'est pas approprié pour décrire le phénomène physique qu'il représente car l'Univers se contenait lui-même.

Gamow propose qu'il y eut un état singulier, où tout l'Univers était concentré et dans lequel la matière n'existait pas. La relativité générale démontre que lorsque la densité d'un corps est infinie et sa taille est réduite à un point, on obtient une singularité. Einstein écrivit en 1950 que sa "théorie n'est qu'une approximation, très inadéquate lorsqu'on a affaire à de très fortes densités de matière". Cet état ne peut-être expliqué sans faire appel à la physique quantique. Mais même dans ce cas on obtient des nombres infinis.

Dans les années 1940, R.Feynman, J.Schwinger et F.Dyson apportèrent un début de solution grâce aux renormalisations. Leur théorie permet d'obtenir des résultats finis dont les valeurs sont exacts jusqu'à la dixième décimale. A ce jour seule la théorie de l'électromagnétisme accepte de telles corrections. Les autres interactions s'y opposent, soit que la loi des probabilités ne s'y applique pas (interactions fortes), soit que l'énergie en jeu est indétectable (gravitation) ou l'approximation trop peu précise (interactions faibles). Mais grâce à la théorie de supersymétrie, les physiciens ont trouvé une voie qui devrait conduire à une théorie renormalisable de la gravitation quantique.

Le concept de Big Bang impose également l'idée qu'à cette époque primordiale le rayon de courbure de l'Univers tendait vers zéro, si bien que dans cet espace-temps homogène il y avait des singularités en chaque point de l'espace-temps. Mais cela ne signifie pas que la dimension spatiale de l'Univers était nulle. Il pouvait en effet avoir une dimension spatiale infinie. De même que l'Univers peut avoir une courbure positive, nulle ou négative, être en contraction ou en expansion dans le temps, il peut malgré tout être fermé spatialement (toujours vrai dans le cas sphérique) !...

C'est Roger Penrose et Stephen Hawking qui ont démontré en 1970 que la théorie de la relativité générale imposait un phénomène de Big Bang avec une singularité à l'origine de l'Univers. Mais récemment Hawking s'est rallié à l'idée exprimée par Linde et Guth qui ont supprimé la singularité. Si l'Univers est né de "rien", les mathématiques permettraient peut-être de remonter l'échelle de Planck dans un temps imaginaire, mathématiquement parlant.

La radioastronomie vint alors supporter la conception du Big Bang, lui apportant une preuve complémentaire indiscutable. En 1965 Penzias et Wilson découvraient le rayonnement fossile à 2.7 K. Les découvertes du satellite COBE démontrèrent qu'il s'agissait bien de l'émission exacte d'un corps noir comme le prévoyait la théorie.

Écho d'une "explosion" primordiale qui se répandit dans tout l'Univers, cette lumière s'est détendue au rythme de l'expansion de l'Univers. Cette énergie fossile s'est refroidie, se dégradant graduellement d'une fréquence lumineuse en un faible rayonnement radio et isotrope, mais il prouve que l'Univers fut autrefois très chaud. Une autre observation confirme cette fournaise : l'abondance de l'hélium. Entre 20 et 28% de la matière visible est composée d'hélium (~10% calculé en nombre d'atomes), dont 4% seulement ont pu être produits par les étoiles. Selon l'idée la plus répandue, la majeure partie de cet hélium dut apparaître lorsque l'Univers était très chaud (plusieurs milliards de degrés), environ trois minutes après le Big Bang.

Il en est de même pour le deutérium et le lithium qui sont tous deux des éléments fossiles abondants qui témoignent de l'existence d'une phase initiale très chaude de l'Univers. Cela dit les récents développements des théories inflationnaires n'imposent pas que le Big Bang lui-même soit chaud. Selon les calculs d'Andrei Linde et son collègue Jun'ichi Yokoyama dans ce cas le scénario inflationnaire ne fonctionnerait pas conformément aux observations (régime adiabatique incompatible avec les hautes températures, etc). Ces mises au point étant faites, emboîtons le pas de Weinberg et retraçons la genèse de l'Univers en gardant bien à l'esprit que nos lois ne sont que des approximations.

La théorie du Big Bang

L'avenir de l'Univers

Nous savons déjà que dans 3.7 milliards d'années, la galaxie Messier 31 et la Voie Lactée fusionneront, M31 se rapprochant actuellement de notre Galaxie à la vitesse de 115 km/s. En étudiant l'évolution dynamique de ce système nous pouvons d'ores et déjà dire que les risques futurs pour notre survie seront négligeables; peut-être nos descendants assisteront-ils à quelques tremblements de terre mais en général les effets gravitationnels seront insignifiants; dans notre proche voisinage le vide s'étendra en moyenne sur 3 années-lumière entre chaque étoile.

L'Univers peut durer encore une centaine de milliards d'années (10^{11} ans) sans grand changement. A ce moment là nous assisterons à l'épuisement lent des réserves d'énergie nécessaires à la

nucléosynthèse stellaire, avec la transformation progressive du noyau des étoiles en fer, la structure atomique la plus stable.

Au bout de 10^{12} années, toutes les étoiles de la galaxie seront transformées en corps sombres, naines noires, étoiles à neutrons et trous noirs. Quelques traces de gaz interstellaires subsisteront, mais ils seront trop lourds et trop dilués que pour former de nouvelles étoiles. A côté de ces corps, nous retrouverons les planètes devenues stériles et la poussière interstellaire dont les composants seront devenus stables et neutres.

Vers 10^{14} ans, les atomes de fer vont se transformer en neutrons, transmutés suite à la pression de Fermi. Les électrons en orbite en dehors du noyau s'affranchiront des forces d'interaction qui lient les atomes et se combineront avec les protons en libérant des neutrinos. Ceux-ci continueront de transporter 30% de l'énergie de décroissance de la matière. Si la pression que les neutrons exercent pour s'opposer à la gravité n'est pas assez élevée, les étoiles les plus massives deviendront des trous noirs.

Les étoiles naines blanches se refroidiront durant 10^{17} ans jusqu'à 5 K, où leur température interne sera libérée dans la décroissance de leurs nucléons. Les étoiles neutrons atteindront 100 K au bout de 10^{19} ans. Et de façon similaire, la décroissance de leurs noyaux entretiendra cette température.

Au bout de 10^{18} à 10^{24} années, tous les corps agencés sous forme de systèmes multiples seront perturbés par la gravitation. En étudiant l'interaction gravitationnelle de deux particules sur une très longue période de temps et son extrapolation à "n corps", on peut supposer que la plupart des étoiles seront expulsées hors des galaxies. Le petit pourcentage restant, qu'il est impossible de déterminer se tassera progressivement au centre des galaxies et la gravitation finira par n'en former qu'une immense étoile. Tandis que sa densité augmentera, son noyau finira par s'effondrer pour former un gigantesque trou noir galactique d'une masse équivalente à des centaines de milliards de soleils. Le centre de ces galaxies fera l'objet de forces de répulsions gravitationnelles très importantes et sera le spectacle de gigantesques explosions de matière et de rayonnement, à l'instar de ce que nous observons actuellement au sein des galaxies actives ou des quasars.

Dans les amas de galaxies une réaction équivalente se produira. Au bout de 10^{27} années, 10% à 99% des galaxies seront expulsées et deviendront des trous noirs galactiques, la matière restant formant des trous noirs supergalactiques. Leur masse est estimée à 1000 milliards de soleils (si 10% des galaxies ne sont pas éjectés) condensés dans un espace de 0.3 a.l., environ 3000 milliards de km. Mais il se peut aussi, suite aux perturbations gravitationnelles, que les galaxies d'un amas se fondent en une seule, qui finira également par se transformer en un trou noir.

Finalement, au bout d'un milliard de milliard de milliard d'années (10^{27} ans), seuls les trous noirs situés au sein des superamas de galaxies subsisteront, entourés de près par un disque d'accrétion dispensateur d'énergie. La température descendra graduellement vers le zéro absolu.

En tenant compte des premières esquisses de la gravitation quantique, rappelons que Hawking a prédit que lorsque ces trous noirs seront plus chauds que le rayonnement fossile (quelques millièmes de degrés au-dessus du zéro absolu) ils rayonneront davantage d'énergie qu'ils en absorberont. Les trous noirs galactiques les plus massifs, d'une température de l'ordre de 10^{-15} K, devraient survivre environ 10^{90} ans avant de s'évaporer dans l'espace, tandis que les trous noirs supergalactiques (10^{-18} K) persisteront 10^{100} ans. A cette époque la température de l'Univers sera tombée à 0 K, le premier chiffre significatif étant placé à la 60e position derrière la virgule !

Mais les théories de Grande Unification qui décrivent l'asymétrie matière-antimatière stipulent que le proton, sur lequel toute la physique a fondé son édifice, n'est pas éternel et a une demi-vie supérieure à 10^{31} ans. Cela signifie que tous les corps se dissocieront au bout de cette période pour se décomposer en électrons, positrons, neutrinos et photons. C'est-à-dire que tous les dix ans, chaque tonne de matière devrait perdre un proton qui se transformera en énergie.

Toute la matière, y compris les cirrus galactiques et le plasma qui baigne l'espace, devraient disparaître au bout de 10^{32} ans. Cependant, les électrons créés pendant les décroissances ne pourront être annihilés par les positrons étant donné l'extrême raréfaction du milieu.

Dans tous les cas la gravitation quantique prévoit que le proton doit se désintégrer avant 10^{50} ans. Elle prédit également que l'espace est instable, rempli de trous noirs "virtuels", c'est-à-dire qu'ils sont détectables indirectement. Selon Hawking si un proton est abandonné à lui-même, il a de fortes chances d'être absorbé par l'un d'entre eux en libérant une particule de matière ou des photons. Cela peut se faire sur une longue période de temps, dans une fourchette comprise entre 10^{45} et 10^{50} ans. Mais dans un trou noir l'état de la matière est différent. Tout ce qu'il ingère perd son identité : le proton perd la faculté de se désintégrer par exemple. Le trou noir ne garde pas la mémoire des particules qu'il ingère, par contre il conserve la charge électrique.

Sans matière, au bout de 10^{50} ans, il ne subsistera dans l'Univers que des photons, des neutrinos et des trous noirs. Le rayonnement dominera à nouveau. Les neutrinos étant insensibles à l'interaction faible et à la gravité, ils n'interagiront en général qu'avec eux-mêmes. Mais l'effet tunnel de la physique quantique nous rappelle qu'au bout d'un certain temps, spontanément la matière peut se transformer sans aide extérieure, les particules pouvant franchir des barrières infranchissables pour la physique classique.

Si la matière ne se désintégrait pas, le diamant pourrait se transformer en fer, le polygone le plus régulier deviendrait sphérique. Mais l'évolution ne sera pas achevée pour autant. Dans ces conditions mais bien plus tard encore, les forces de la nature transformeront les boules de fer en neutrons et les étoiles massives en trous noirs. Selon la théorie d'Hawking, l'effondrement continu de la matière entraînera une élévation de la température de quelques milliards à plus de 10^{24} degrés, provoquant un processus quantique d'évaporation qui libérera un flot intense de rayonnement gamma.

La densité du rayonnement dans cet Univers en éternelle expansion diminuera plus rapidement que la densité du plasma d'électron/positron car la densité des particules et l'énergie de chaque quantum continueront à décroître ensembles. En fait, la densité moyenne de la matière ordinaire décroît uniquement parce que sa concentration diminue en vertu de l'expansion de l'Univers. La densité de ce type de matière diminuera donc mais à un rythme inférieur à celui du rayonnement. A cette époque chaque particule occupera un volume égale à 10^{185} fois le volume actuel de l'univers visible. Si l'univers visible occupe aujourd'hui un volume grosso modo égal à 15 milliards d'année-lumière de rayon, à cette époque il mesurera un multiple de 10^{72} années-lumière !

Les calculs prédisent que les mini trous noirs de $10 M_{\odot}$ s'évaporeront au bout de 10^{69} ans, libérant des photons, des neutrinos et des gravitons. Les trous noirs hypermassifs subsisteront 10^{96} ans avant de disparaître. Cette échéance ultime fonction de la masse des trous noirs a été fixée par Freeman Dyson à condition que les trous noirs virtuels ou de très petites dimensions puissent exister, ce qui n'est pas démontré. Ce temps de Dyson est la plus longue durée que l'esprit humain puisse concevoir.

La perte de masse des trous noirs par évaporation sera finalement supérieure à la force de la gravitation qui ne pourra plus contenir la matière sous l'horizon des événements. A terme, le ciel sans étoiles, devenu noir d'encre, s'illuminera de flashes intenses provoqués par l'explosion des trous noirs. Dans ce grandiose feu d'artifice final, la matière recyclée retournera à l'espace avec une nouvelle identité, neutrinos, rayons X et photons. Le rayonnement continuera d'exister dans un Univers en perpétuelle expansion. Sa densité diminuera mais sera toujours supérieure à celle du corps noir. La température tendra vers le zéro absolu sans jamais l'atteindre.

Mais ce ne sera pas pour autant la fin de tous les processus physiques. Les fluctuations du vide lui-même peuvent perdurer encore longtemps, alors même que tous les processus astronomiques auront pris fin. Dans l'Univers d'après-demain, dans lequel l'échelle des distances sera très différent de celle que nous manipulons aujourd'hui, dans lequel les processus seront ralentis par le froid intense et l'isolement des particules, J.D.Bernal et F.Dyson pensent que des systèmes vivants pourront encore exister.

Finalement, lorsque la matière atteindra 0 K, elle deviendra "transparente", les électrons par exemple, s'ils existaient encore, pourront la traverser sans être dispersés. Même le diamant perdrait ses qualités. Mais puisqu'il n'y aura plus d'énergie, le mouvement brownien sera interrompu. Dommage car cela nous aurait permis quelques libéralités vis-à-vis des lois traditionnelles; rappelez-vous les propriétés étonnantes des corps supraconducteurs par exemple. Tout ceci bien sûr n'est que spéculation car ces idées reposent sur des lois d'une physique encore mal maîtrisée.

Cette théorie du Big Bang peut expliquer avec plus ou moins de cohérence les décalages spectraux des galaxies, la formation des éléments ou des superamas. Alliée à la physique quantique et à la relativité générale, cette théorie cosmologique a de fortes chances, rationnellement parlant, de gagner à sa cause tous les cosmologistes, faute de modèles plus appropriés.