

Le big bang

LA NAISSANCE DE L'UNIVERS

La théorie de la relativité générale, formulée en 1915 par Albert Einstein (1879-1955), a été à l'origine d'un remaniement complet de la conception de l'Univers telle



que les physiciens l'entendaient depuis Isaac Newton (1642-1727) et sa théorie classique de la gravitation. Le savant anglais envisageait un Univers plat, immuable et au repos, où le temps s'écoule tel un fleuve tranquille depuis l'infini vers l'infini : pas de commencement, pas de fin.

UNE THÉORIE RÉVOLUTIONNAIRE

LA THÉORIE D'EINSTEIN

Einstein est très attaché à cette vision du monde. L'idée d'un Univers dynamique qui évoluerait dans le temps, c'est-à-dire qui aurait un commencement, lui est insupportable. Pourtant, sa description de la gravitation entraîne une conséquence improbable qui découle directement de la façon dont il décrit cette force.

LA RELATIVITÉ GÉNÉRALE

Dans la relativité générale, l'espace et le temps sont des données qui évoluent de concert. C'est à dire qu'elles sont dépendantes l'une de l'autre, à tel point que le temps y est décrit comme une quatrième dimension (attention : ce n'est pas une dimension de type spatial, mais bien une dimension temporelle). Ainsi, l'espace-temps est représenté par une hypersphère dont le temps représente le rayon, et l'espace, la surface. La gravité n'y est plus vue comme une force telle que Newton l'envisageait, mais comme une déformation de cet espace-temps.

Ce dernier applique une contrainte aux objets qui le parcourent, et, réciproquement, les objets le déforment. Cet effet peut être assimilé à celui d'une balle sur un filet tendu : la balle déforme le filet là où elle est posée. Si on pose sur le filet une bille, elle roulera vers la balle comme si elle était attirée par elle.

Ainsi, la relativité générale pose un sérieux problème au modèle d'Univers immobile classique. En effet, l'Univers est rempli de matière. Si l'espace-temps est déformé par cette dernière, alors il devrait en résulter une contraction générale, et l'Univers s'effondrerait sur lui-même.

Pour pouvoir éliminer ce problème sans toucher au modèle d'Univers statique, Einstein introduit dans ses équations une « constante cosmologique » qui contrecarre cet effet gravitationnel.

Il admettra plus tard que ce fut la plus grande erreur de sa vie.

GEORGES HENRI LEMAITRE

En 1927, un astrophysicien et mathématicien belge, Georges Henri Lemaître (1894-1966), applique, à partir des équations de la relativité générale, les conséquences d'un Univers non statique et en déduit un modèle dynamique.

En retranscrivant l'évolution de l'hypersphère au cours du temps, il remarque que, le rayon se dilatant, on peut, en remontant l'horloge, arriver à un instant primordial où tout l'Univers était contracté en une singularité qui, dans l'autre sens, devient une gigantesque explosion.

EDWIN HUBBLE

Parallèlement, Edwin Hubble (1889-1953), un astrophysicien



américain, découvre à partir de 1924 des systèmes gigantesques d'étoiles, extérieurs à notre Voie lactée, qui s'avèrent être des objets semblables à cette dernière.

UNE EXPRESSION VOUÉE AU SUCCÈS

L'expression « big bang », qui participe à la popularité de la théorie de l'Univers en expansion, a été ironiquement employée par un détracteur de cette dernière.

En effet, le terme a été utilisé pour la première fois – et d'une manière péjorative – en 1950 par Fred Hoyle (1915-2001) lors d'une émission sur la BBC, *The Nature of Things* (« La nature des choses ») en présence de George Gamow (1904-1968), physicien et défenseur de la théorie de l'expansion.

Longtemps, Fred Hoyle mettra toute son énergie à trouver un modèle d'Univers où le big bang n'a pas lieu d'être. Il n'a jamais accepté cette idée, qu'il considérerait comme absurde : le temps ne peut avoir de commencement.

Jusqu'à-là, les physiciens pensaient que la Voie lactée était tout l'Univers existant et prenaient ces îlots pour de petits systèmes internes.



Mais les observations réalisées par Edwin Hubble montrent que non seulement ces objets sont au moins aussi grands que la Voie lactée, mais qu'ils sont situés à des distances bien supérieures à la taille de celle-ci. Les galaxies entrent désormais dans les modèles cosmologiques de l'époque.

Cette découverte conduit Hubble à se focaliser sur le mouvement de ces objets, et il découvre en 1929 la première preuve d'un Univers en mouvement.

Il remarque que toutes les galaxies proches ou éloignées de la nôtre s'éloignent de nous, et ce d'autant plus vite qu'elles sont plus loin.

En effet, tout objet qui s'éloigne d'un observateur verra auprès de ce dernier un décalage de la longueur d'onde de son spectre électromagnétique vers le rouge et d'autant plus qu'il s'éloigne vite.

Hubble confirme ainsi les conséquences annoncées par Lemaître.

Cette découverte de l'expansion de l'Univers est primordiale. Associée à la relativité générale et à ses solutions non stationnaires, elle ouvre la voie à la théorie du big bang.

Désormais, le modèle de l'Univers en expansion permet de s'interroger sur l'histoire passée de celui-ci.

LE PRINCIPE DU BIG BANG

DE PRESQUE RIEN À TOUT

Le principe du modèle dit « big bang » considère que l'Univers est



passé de presque rien à tout, qu'une explosion d'une puissance inouïe s'est produite. Il y eut non pas une explosion de matière dans l'espace, mais une expansion de l'espace lui-même, qui donna naissance au temps et à l'espace, et à tout ce qui compose l'Univers aujourd'hui.

TOUT L'ESPACE POSSIBLE

Il faut faire attention à cette explication, qui entraîne des images fausses. En effet, l'Univers n'est pas apparu au milieu de quelque chose et ne grandit pas à travers un espace plus grand. Il est à lui seul tout l'espace possible, et donc son évolution n'existe qu'en fonction de lui-même (cette vision de l'Univers n'implique pas la possibilité qu'il ait des dimensions supérieures à celles que nous connaissons, telles celles supposées par la théorie des cordes expliquée plus loin).

La notion même de temps n'est pas adaptée pour décrire à quel « moment » le big bang a eu lieu. Mais nous pouvons tout de même introduire une échelle temporelle qui nous permettra d'étudier l'après-big bang, où l'Univers subit les changements les plus radicaux.

LE TEMPS DE PLANCK

La théorie du big bang fait débiter l'histoire de l'Univers 10⁻⁴³ seconde après l'explosion primordiale, il y a 13,7 milliards d'années. Ce moment – appelé « temps de Planck », du nom du physicien allemand Max Planck (1858-1947) qui a jeté les bases de la théorie des quanta – décrit un Univers extrêmement dépendant des effets quantiques.

À ce moment, les quatre forces qui régissent notre Univers – la gravité, pour les interactions matérielles ; la force électromagnétique, pour les interactions entre particules chargées ; la force nucléaire forte, qui assure au noyau sa cohésion ; la force nucléaire faible, responsable de la désintégration radioactive des éléments – sont réunies en une « superforce », d'après certaines théories qui restent encore à démontrer ou même à finaliser.

Ce qui s'est passé réellement avant le temps de Planck ne pourra être décrit que lorsque l'on aura établi une théorie quantique de la gravitation.

EXPANSION ET REFROIDISSEMENT EN 1 NANOSECONDE

À partir du « temps de Planck », l'Univers brûlant et dense subit une phase d'expansion inimaginable. Il passe de la taille d'une sphère des milliers de fois plus petite que le proton à celle d'un diamètre de centaines de millions de kilomètres, et ce en une nanoseconde (10⁻⁹ s, un milliardième de seconde).

Sa température chute en même temps d'une façon vertigineuse, mais reste encore extrêmement chaude : il passe de 10³² à 10¹⁰ K (Kelvin).

La température d'un corps est en effet fonction de la vitesse des particules qui le composent. Ainsi,

il existe une température ultime, appelée « zéro absolu », où plus aucune particule ne se déplace. Elle est égale à -273,15 °C et correspond à 0 K. (L'échelle de Celsius place, elle, son 0 à la température de fusion de la glace.)

LA « SOUPE » PRIMORDIALE PENDANT UNE MICROSECONDE

Pendant cette étape, appelée « ère des quarks » – environ 10⁻³² seconde après le big bang –, l'Univers étant suffisamment chaud et dense, les particules et leurs antiparticules se combinent ou s'annihilent à un rythme fou, redonnant de l'énergie.

Certaines particules émergent, dont : les quarks et antiquarks, qui permettront de former tous les noyaux des atomes que nous connaissons ; les gluons, qui formeront le ciment des futurs noyaux ; les hypothétiques « bosons de Higgs », des particules censées procurer une masse à toutes les autres, mais qui n'ont jamais été observées lors des nombreuses expériences faites au sein des accélérateurs de particules ; une particule très étrange, le « boson X » (accompagné de son antiparticule, l'« antiboson X »). Cette particule très lourde est à l'origine de l'apparition des quarks, électrons et neutrinos, et de leurs antiparticules.

Grâce à cette dernière, l'Univers présente un déficit en antiparticules, permettant par là même l'émergence de la matière sur l'antimatière, et donc l'émergence du monde tel que nous le connaissons.

Toutes ces particules apparaissent et disparaissent en des temps extrêmement courts. À ce stade, aucune structure stable ne peut être envisagée.

LA VICTOIRE DE LA MATIÈRE

C'est alors que le combat décisif pour la matière se joue. Pour 1 milliard d'antiparticules, il y a 1 milliard et 1 particules. C'est peu, mais suffisant pour que se créent tous les objets matériels de l'Univers.

LES PARTICULES

La physique des particules engendrées par la théorie des hautes énergies qui prédit ce qui se passe aux tout premiers instants, expose un modèle standard des particules. Elles y sont répertoriées selon leurs particularités. On distingue deux grands groupes :

- les fermions, qui regroupent les quarks et les électrons ;
- les bosons, médiateurs des forces, tels le photon pour la force électromagnétique et les gluons qui relient les quarks.

Selon cette théorie, il y aurait aussi le graviton, un médiateur de la force de gravitation.

Des chiffres astronomiques

13,7 milliards d'années
Âge estimé de l'Univers

10²⁷ °C

soit 1 milliard de milliards de milliards de degrés, c'est la température au moment du big bang

10⁻⁴³ secondes

Le temps de Planck

2,7 K

soit -270 °C

Température actuelle du rayonnement fossile

70 %

de l'énergie sont d'origine inconnue

Edwin Hubble



1889-1953

Fred Hoyle



1915-2001

George Anthony Gamow



1904-1968

• Cette perte de matière se traduit par la création de couples photon-électron ou son antiparticule. Toutes les particules que nous connaissons sont désormais présentes.

L'ÈRE DES STRUCTURES,

1 MILLISECONDE APRÈS LE BIG BANG

- À partir de 10^{-6} seconde, l'Univers a une température suffisamment basse (10^9 K) pour que les forces électromagnétiques et faibles se séparent.
- Les lois fondamentales qui régissent l'Univers sont désormais celles que nous connaissons. La matière peut dès lors commencer à se combiner.
- Vers 10^4 seconde, les quarks ou les antiquarks s'associent pour former les particules de la famille des hadrons, futurs composants fondamentaux des noyaux atomiques.
- Apparaissent donc les baryons (neutrons et protons) et les mésons, qui sont des particules formées d'un quark et d'un antiquark (particule devenue minoritaire).
- Pendant cette période, l'abondance de leptons (électrons et positrons, leurs antiparticules), permet l'annihilation à grande échelle des particules et par là le processus de prédominance de la matière.

1 SECONDE APRÈS LE BIG BANG

Lorsque l'Univers est âgé de 1 seconde, sa température a encore baissé : elle est de 10^9 K. Les conditions sont désormais réunies pour que la force nucléaire fasse son travail de dégradation des neutrons en protons.

- Lorsque la proportion a atteint 1 neutron pour 7 protons, les combinaisons de nucléons (neutrons et protons) commencent.

LA «NUCLÉOSYNTÈSE PRIMORDIALE», PENDANT 3 MINUTES

- Peut alors commencer la «nucléosynthèse primordiale», qui dure 3 minutes. Les neutrons s'associent aux protons pour former des noyaux de deutérium (1 proton, 1 neutron), de tritium (1 proton, 2 neutrons) et d'hélium (2 protons, 2 neutrons).
- Le deutérium et le tritium étant très réactifs, ils se dégradent assez vite, d'où leur quasi-inexistence aujourd'hui. Cette période de combinaison des protons et neutrons ne dure qu'un quart d'heure, d'où l'inexistence d'éléments plus lourds.
- Les protons restés seuls seront les futurs atomes d'hydrogène que nous connaissons.
- À la fin de ce processus, environ 1 noyau d'hélium est formé pour 9 noyaux d'hydrogène, d'où la proportion de 90% d'hydrogène et 10% d'hélium que l'on trouve à présent dans l'Univers.

UNE «ÈRE OPAQUE» DE 300 000 ANS

• Cette période d'environ 300 000 ans est appelée «ère opaque» car, pendant celle-ci, l'Univers ne laisse pas passer la lumière. En effet, il est suffisamment chaud pour que les électrons empêchent les photons de se mouvoir librement, laissant l'espace dans une sorte de brouillard.

LES PREMIERS ATOMES

• À la fin de l'ère opaque, l'Univers a atteint la température de 3 000 K (2 700 °C). Désormais, il est

suffisamment refroidi pour permettre aux atomes de se former.

- Les électrons s'associent aux noyaux d'hydrogène et d'hélium, et ainsi libèrent les photons de leur emprise. Les photons peuvent enfin se mouvoir librement dans les 10 millions de kilomètres que mesure alors l'Univers.
- La luminosité de cet événement est tellement forte que son existence est encore visible aujourd'hui à travers



le rayonnement fossile découvert en 1965 par **Arno Penzias** et **Robert Wilson**. Depuis ce temps, les vestiges de ce rayonnement ont refroidi jusqu'à atteindre de nos jours la température de 2,7 K.

DE 200 À 500 MILLIONS D'ANNÉES

L'Univers ressemble désormais à ce que nous connaissons, mais aucun objet stellaire ne s'est encore formé. Il faut attendre près de 200 millions d'années avant de voir apparaître les premières structures cosmologiques, et 300 autres millions d'années pour que des mâches d'hydrogène et d'hélium forment les premières galaxies, puis, au sein de celles-ci, les premières étoiles.

GALAXIES ET ÉTOILES

- L'existence des galaxies et des étoiles n'est pas évidente dans le cadre de la théorie du big bang.
- À partir d'une inflation théoriquement uniformément répartie, l'énergie et la matière se répandraient d'une façon tout aussi uniforme. Mais la création de galaxies, autrement dit de «grumeaux» de matière, nécessite que la densité du plasma primordial ne soit pas parfaitement homogène.
- Cette légère différence de densité fut observée pour la première fois par le satellite **COBE** en 1992 directement



sur le fond diffus cosmologique, vestige de la jeunesse de l'Univers.

UN PROBLÈME DE DATE

• Paradoxalement, la théorie du big bang permet d'étudier très précisément les premiers instants de l'Univers, mais ne permet pas de définir précisément quand ces événements ont eu lieu.

L'ANTIMATIÈRE

La plupart des particules possèdent une sorte de particule jumelle. Cette dernière lui est en tout point semblable, sauf pour une seule chose. Toutes les rotations associées à la particule sont inversées pour l'antiparticule, ce qui entraîne aussi une inversion de la charge. Une particule de matière et d'antimatière ne peuvent cohabiter. Leur rencontre se traduit par une gigantesque explosion et par leur annihilation en énergie pure. La détection de

l'observation de plus en plus poussée de l'Univers révèle certains



objets lointains, tels les quasars, dont l'étude permet aux astrophysiciens de faire remonter la naissance de l'Univers à quelque 13,7 milliards d'années.

QUEL AVENIR POUR L'UNIVERS ?

La théorie du big bang, selon la proportion de matière dans l'Univers, débouche sur trois scénarios possibles.

LE BIG CRUNCH

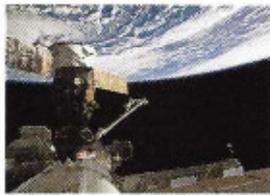
- Soit la matière serait en de telles quantités que la force de gravitation contrecarrerait l'expansion et qu'il s'ensuivrait une contraction : toute la matière finirait par se condenser en une singularité où la température retrouverait son niveau connu lors des premiers instants.
- Cette théorie est appelée big crunch, par opposition au big bang.
- En arrivant à une contraction ultime, l'énergie redeviendrait suffisamment élevée dans cette singularité pour relancer un big bang, et ainsi de suite.

L'UNIVERS EN ÉQUILIBRE

Soit les deux se compenseraient parfaitement pour aboutir à un Univers en équilibre, où ni expansion ni contraction n'aurait plus lieu.

UN INFINI SOMBRE ET FROID

- Soit l'expansion ne serait jamais contrecarrée par la gravité et continuerait de façon continue jusqu'à l'infini.
- L'Univers finirait par être **sombre** et



très froid, puisque toute son énergie se diluerait dans cet espace immense.

L'ÉNERGIE SOMBRE

Les observations cosmologiques de ces dernières années montrent une structure d'Univers en grumeaux et en expansion. Et, fait étrange, cette expansion va en s'accroissant, ce qui contredit tous les modèles. En effet, le

l'antimatière n'est pas chose aisée, vu sa disparition relativement tôt dans l'Univers. Mais sa présence est encore détectable vers le cœur de notre Galaxie, grâce au rayonnement gamma produit par la rencontre d'électrons et de positrons (antiélectrons). On a même réussi récemment, en laboratoire, à créer des atomes d'antihydrogène (un antiproton de charge négative autour d'un quark gravité un positron de charge positive).

rapport de masse dans l'Univers ne permet pas un Univers qui grandirait de plus en plus vite. C'est comme si une force inconnue de nature répulsive inversait les effets de la gravitation sur l'espace. Ce phénomène est d'autant plus étrange que la source de cette énergie se trouve dans des proportions bien plus grandes que la matière et qu'elle n'interagit que de cette manière avec elle. Aucune interaction électromagnétique ne nous permet d'observer cette énergie, nommée «énergie sombre». Elle représenterait 70% de l'énergie totale de notre Univers, soit bien plus que la matière. Certaines théories expliquent en partie cette nouvelle donnée.

LA THÉORIE DES CORDES

- Difficile à interpréter du fait de ses exigences mathématiques, cette théorie imagine que toutes les particules sont en fait des cordes en vibration entre des «branes» d'Univers, la vibration définissant à quelle particule on a affaire.
- La vérification expérimentale de la théorie des cordes est impossible pour l'instant, car elle nécessite jusqu'à sept dimensions.
- Les théories de gravité quantique permettent d'expliquer la présence de cette énergie sous forme d'«énergie du vide». Elles suggèrent que le «vide» est en fait de l'énergie pure. Ce serait ce vide qui accélérerait l'expansion de l'Univers. D'autres y voient une autre forme de matière, similaire à la nôtre par un principe de «supersymétrie». Les fonctions des particules y seraient inversées, ainsi l'électron serait associé au sélectron, qui serait un boson, et le photon au photino, qui, lui, serait un fermion.
- Le problème est que la non-manifestation de ces particules au sein des accélérateurs remet considérablement cette théorie en cause.

LES PILIERS DE LA THÉORIE DU BIG BANG

LE RAYONNEMENT COSMIQUE

• C'est en 1965 que l'une des plus grandes preuves de la théorie du big bang apparaît. Deux jeunes radioastronomes américains, Arno Penzias (né en 1933) et Robert Wilson (né en 1936), remarquent un **rayonnement électromagnétique**



très faible mais constant, quelle que soit la direction dans laquelle ils pointent leur radiotélescope. Ils viennent, sans le savoir, de mettre en

évidence le fait que l'Univers a été, par le passé, dense et chaud. Ce rayonnement n'est rien d'autre que le reste de l'événement qui rendit l'Univers transparent, 300 000 ans après sa «naissance», c'est-à-dire au moment où les photons ont pu se déplacer librement, n'étant plus liés aux électrons.

GEORGE ANTHONY GAMOW

Physicien américain d'origine russe, **George Anthony Gamow** naît à



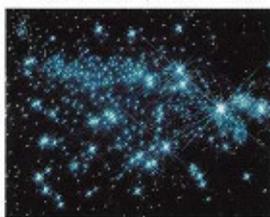
Odesse en 1904 et meurt en 1968 à Boulder, dans le Colorado. L'un des plus grands acteurs et défenseurs de la théorie du big

bang, il reprend en 1946 à la suite du Belge Georges Henri Lemaitre, les travaux sur le modèle de big bang et prédit, dès 1948, la présence d'un rayonnement diffus cosmologique, conséquence de l'instant où les premiers photons purent parcourir l'espace environnant.

plus éminents défenseurs du big bang : George Gamow, Arno Penzias et Robert Wilson reçoivent le prix Nobel de physique en 1978.

LA PROPORTION DES ÉLÉMENTS

Nous observons dans l'Univers une présence majoritaire d'atomes d'hydrogène et d'hélium, les deux atomes les plus simples que nous connaissons. En effet, les **étoiles** sont



composées quasi uniquement de ces deux éléments. Les atomes plus lourds sont créés au cœur même de ces étoiles. La théorie du big bang explique justement cela en démontrant leur formation massive lors des premières années de notre Univers.

L'EXPANSION

- Découverte par Edwin Hubble en 1929, l'expansion est en accord avec le modèle du big bang, car un Univers en expansion et qui refroidit devait être par conséquent plus dense et plus chaud dans son passé, et cela jusqu'à une singularité qui, en inversant le processus, devient une explosion gigantesque.
- Mais certaines observations remettent tout de même en cause cette généralisation sur les galaxies. On a remarqué des galaxies reliées par des arcs de matière mais qui ont pourtant des décalages spectraux singulièrement différents, ce qui laisse supposer qu'elles devraient être en fait très éloignées l'une de l'autre.

NOIR COMME DE L'ENCRE

Si l'Univers était infini, il posséderait une infinité d'étoiles et de galaxies, et cela dans toutes les directions. De plus il existerait depuis un temps infini, et la lumière de toutes ces étoiles et galaxies



aurait eu le temps de nous atteindre. Si c'était le cas, alors notre ciel serait en permanence plus brillant que le **Soleil**. Or nous observons la nuit un ciel noir, et le Soleil seul éclaire nos journées.