

PAS SI SIMPLE

Bac to basics
LE BIG BANG

P. 75

La parole aux lecteurs
VOS QUESTIONS

P. 79

Comment ça marche ?
LE PEER-TO-PEER

P. 80

W^{xyz}
**AUTOMATES
CELLULAIRES**

P. 82



Chercher jouer trouver
LACETS VACHES

P. 85



BAC TO BASICS

«C'est tellement simple qu'un enfant de 5 ans le comprendrait. Qu'on aille me chercher un enfant de 5 ans!» Groucho Marx

L'espace, le temps et tout ce que contient l'Univers seraient nés il y a 13,7 milliards d'années. La plupart des cosmologistes acceptent cette idée. Sans parvenir à décrire l'instant zéro.

Le Big Bang

■ Le Big Bang a-t-il eu lieu ?

Peut-être. Sans doute. Toute l'ambiguïté de la question provient des deux sens que l'on donne au terme Big Bang. S'il s'agit de la naissance de l'Univers, la réponse est « on ne sait pas », puisque les équations de la physique ne parviennent pas à remonter au temps zéro. Par contre le Big Bang est aussi l'ensemble des modèles qui racontent l'évolution de l'Univers à partir d'un état extrêmement chaud et dense. Ce sont les équations de la relativité générale qui en sont le point de départ. Pourtant, Einstein penchait pour un Univers statique et éternel. C'est ainsi qu'on le concevait au début du XX^e siècle, puisqu'on ne connaissait de l'Univers que la Voie lactée, notre Galaxie. Pour que ses équations décrivent un Univers statique, Einstein y ajouta une constante dite cosmologique. Il n'empêche que ces équations permettaient aussi de décrire un Univers en expansion. C'est ce qu'étudièrent indépendamment le Russe Alexandre Friedmann en 1922 et l'abbé belge Georges Lemaître en 1927. L'observation concomitante de la fuite

des galaxies par Edwin Hubble à l'observatoire du mont Wilson, en Californie, permit à leurs modèles de s'ancrer dans les observations. Il fallut quand même attendre presque un demi-siècle pour que la majorité des astrophysiciens se rangent à cette idée.

■ D'où vient le terme Big Bang ?

De l'Anglais Fred Hoyle, le plus farouche opposant à cette théorie. En 1950, lors d'une émission de radio sur la BBC, l'astronome employa dédaigneusement ce qualificatif pour décrire ce qu'on appelait auparavant le « modèle d'évolution dynamique ». Le terme était assez frappant – et grand public – pour qu'il reste gravé dans les mémoires. Pourtant les modèles de Big Bang ne décrivent pas une explosion au sens strict. C'est une expansion de l'espace lui-même à partir d'un état infiniment chaud et dense.

En 1993, la revue américaine *Sky and Telescope* a lancé un appel pour modifier ce nom. Aucune des plus de 13 000 propositions n'a plu au jury composé d'astronomes vulgarisateurs comme Carl Sagan.

Jacques-Olivier Baruch, journaliste à *La Recherche*, avec la collaboration de

Pierre Binetruy, professeur à l'université Paris-VII et directeur du laboratoire astroparticule et cosmologie (CNRS/CEA/Observatoire de Paris/université Paris-VII) basé au Collège de France.

■ De quoi l'Univers est-il né ?

Mystère! Puisque l'Univers était en expansion, il était beaucoup plus concentré dans le passé. Georges Lemaître proposa même que ce début fût un « atome primitif ». Mais ce n'était que pure spéculation. Les équations ne permettent de remonter dans le temps que jusqu'à 10⁻⁴³ seconde après le Big Bang. Sauf à trouver une théorie qui marie les deux « sœurs ennemies » du XX^e siècle que sont la relativité générale et la physique quantique, rien ne peut être décrit avant ce moment, dit temps de Planck. L'Univers possédait alors une température de 10³² kelvins. Sa partie observable actuellement depuis la Terre était réduite à une sphère de 10⁻³⁵ mètre de rayon. Cela ne veut pas dire que l'Univers avait cette taille, mais c'est cet embryon qui, en s'étendant, a donné naissance à ce que nous pouvons observer, soit une sphère de 13,7 années-lumière de rayon.

■ Qu'y avait-il avant ?

On ne sait pas, car les Anglais Stephen Hawking et Roger Penrose ont montré dans les années 1970 que tout modèle □

BAC TO BASICS

Le Big Bang

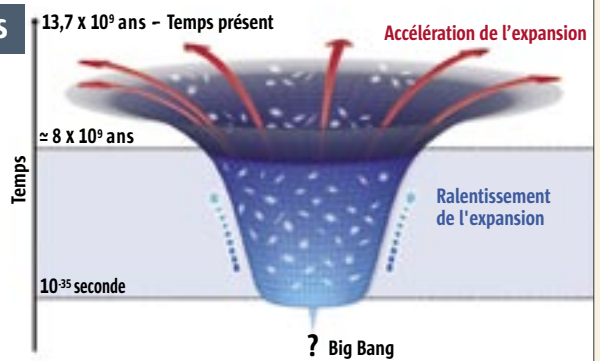
□ de Big Bang parvenait à une « singularité », un événement indescriptible par la physique actuelle, puisque les équations fourmillent alors de termes infinis dont les physiciens ne savent que faire. Il n'empêche que certains se jouent de cette singularité. On peut par exemple considérer, comme Gabriele Veneziano du Collège de France, qu'à la singularité, la notion d'espace disparaît, mais pas celle de temps. Il y a donc un « avant » Big Bang. Comme tout système physique se décrit à partir de ses conditions initiales, les physiciens se demandent alors si on peut trouver dans les données actuelles des indices sur celles qui régnaient avant la singularité.

Un exemple de cette traversée temporelle du Big Bang est donné par la théorie des cordes, dans laquelle les particules sont modélisées comme des cordes à une dimension. Y apparaît la notion de brane, sorte de surface multidimensionnelle analogue à une membrane sur laquelle s'attachent les extrémités des cordes. La partie perceptible de l'Univers serait une brane à quatre dimensions (trois d'espace et une de temps) plongées dans un Univers dont les autres dimensions ne sont accessibles qu'à la gravité. Une brane a pu entrer en collision avec une autre, ce qui a donné lieu au Big Bang. On peut décrire l'Univers avant ou après ce Big Bang, mais pas au moment de la collision !

Ce modèle implique qu'il existe des Univers multiples. C'est aussi ce que suggère, avec une approche différente, Andrei

Fig.1 L'expansion de l'Univers

SELON LES DERNIERS MODÈLES, l'Univers aurait connu plusieurs phases lors de son expansion. À 10^{-35} seconde, les dimensions de l'Univers auraient été multipliées par 10^{50} . Pendant les 8 milliards d'années qui ont suivi cette inflation, l'expansion aurait ralenti. Puis elle se serait remise à accélérer sous la pression d'une mystérieuse énergie noire. © INFOGRAPHIE/BRUNO BOURGEOIS



*un mégaparsec (Mpc) équivaut à un million de parsecs. C'est la distance de laquelle l'orbite de la Terre est vue sous un angle d'un millionième de seconde d'arc. Un Mpc vaut 3,26 millions d'années-lumière.

Linde. Ce Russe, aujourd'hui professeur à l'université Stanford, pense que l'Univers est né des fluctuations du vide quantique, c'est-à-dire de l'état fondamental de l'Univers, potentiellement très riche. L'une de ces fluctuations aurait donné naissance à une bulle qui serait notre espace-temps, comme d'autres bulles ont pu former d'autres Univers avec des constantes physiques différentes.

■ ■ Quand a-t-il eu lieu ?

Il y a 13,7 milliards d'années, aux dernières nouvelles. Cette valeur a varié au cours des années et de la précision des observations, car c'est le taux d'expansion de l'Univers et sa variation qui fournissent son âge. Or ce taux, baptisé constante de Hubble et noté H_0 , dépend des vitesses et des distances des galaxies. Leur vitesse est déduite directement du décalage vers le rouge de la lumière qu'elles émettent. C'est l'effet Doppler, qu'on compare souvent au son d'une ambulance qui devient plus grave à mesure qu'elle s'éloigne de nous. La mesure de leur distance est quant à elle indirecte. Les astrophysiciens utilisent des « chandelles cosmiques », des types d'étoiles bien connues et dont la luminosité réelle est partout la même. Il suffit alors de mesurer leur luminosité apparente pour connaître leur distance. C'est le cas d'étoiles variables comme les Céphéïdes ou des supernovae de type 1a. Quand Edwin Hubble décrit sa loi d'expansion, en 1929, il évalue H_0 à 500 kilomètres par seconde et par mégaparsec*, soit un Univers vieux de moins de deux milliards d'années. L'Univers aurait été plus jeune que la Terre ! Les mesures de distances devenant plus précises, Allan Sandage

trouve, en 1956, quatre milliards d'années. Encore trop court. Puis H_0 a oscillé entre 50 et 100 kilomètres par seconde et par mégaparsec. Aujourd'hui H_0 est estimé à 70 kilomètres par seconde et par mégaparsec.

L'âge de l'Univers est aussi très dépendant de la variation du taux d'expansion. Celle-ci dépend du modèle d'Univers, en particulier de son contenu. Car la gravité (et donc la densité de matière) ralentit l'expansion, alors que des forces répulsives l'accélèrent. C'est pourquoi des efforts importants sont consacrés en ce moment à cet inventaire du contenu de l'Univers.

■ ■ Où s'est-il produit ?

Nulle part et partout à la fois. Le Big Bang étant une singularité spatio-temporelle, l'Univers devait être infiniment dense. Mais pas forcément localisé en un point. S'il est infini, il devait déjà à l'être à cet instant, ou plus exactement au seul temps accessible par la physique, le temps de Planck, 10^{-43} seconde après cet instant initial. Par ailleurs, le Big Bang est la création de l'espace-temps lui-même. Il ne se serait donc produit à aucun endroit.

■ ■ Jusqu'à quand observe-t-on le passé ?

Un mur est infranchissable aux télescopes, qu'ils soient en orbite terrestre ou au sol. C'est le rayonnement de fond cosmologique (CMB) émis lorsque l'Univers avait 380 000 ans. Ce flux de photons, aujourd'hui observable dans les micro-ondes, a été émis lorsque la température de l'Univers était de 3 000 kelvins, tem-



pérature maximale pour que les électrons puissent se combiner aux noyaux atomiques et arrêtent ainsi d'entraver la marche de la lumière. Auparavant, l'Univers était un plasma ionisé totalement opaque à la lumière.

Ce n'est donc pas par le rayonnement qu'on observera ce qui s'est passé avant 380 000 ans. Il y a deux espoirs. La soupe primordiale contenait, outre les photons, tous les types de particules élémentaires, en particulier des neutrinos. Comme ceux-ci interagissent très faiblement avec la matière, l'Univers leur était quasi transparent et certains d'entre eux, émis environ une seconde après le Big Bang, seraient parvenus jusqu'à nous. Il y en aurait environ 300 par centimètre cube, mais très peu énergétiques. Parce qu'ils interagissent encore plus faiblement avec la matière que leurs congénères actuels, personne ne sait encore comment détecter ces neutrinos primordiaux.

Il se peut aussi qu'on détecte un jour les ondes gravitationnelles, sortes de rides de l'espace-temps, qui auraient été émises 10^{-35} seconde après le Big Bang. Mais elles doivent être de très faible amplitude. Aucun instrument actuel ni envisagé n'est capable de les détecter.

C'est dans les accélérateurs de particules qu'on parvient à éviter le piège du CMB, car on y recrée presque les conditions qui régnaient jusqu'à une microseconde après le Big Bang. L'Univers était alors rempli d'un plasma de quarks et de gluons qu'on pense avoir observé au CERN, à Genève, et au RHIC, près de New York.

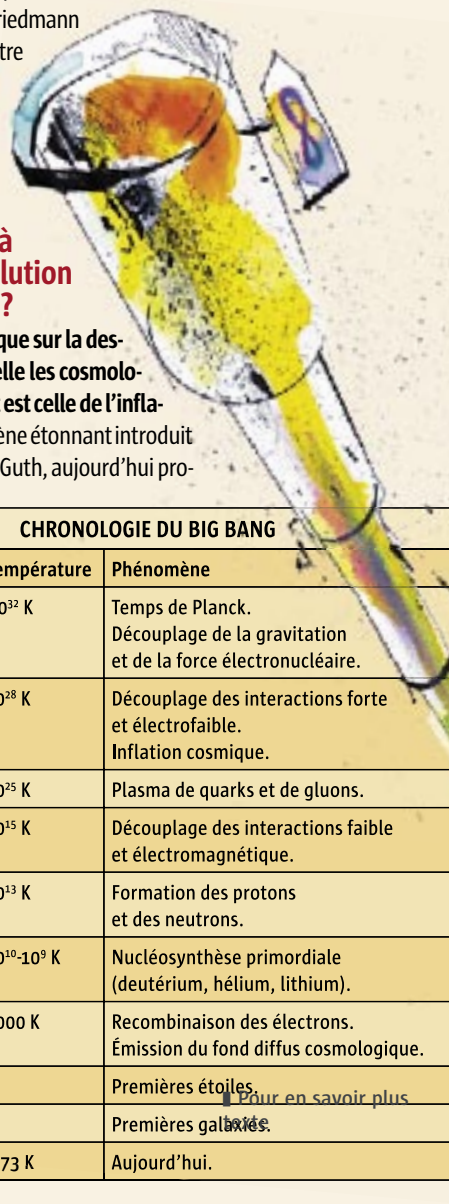
■ ■ Y a-t-il plusieurs modèles de Big Bang ?

Il y a presque autant de modèles que de cosmologistes. Avant les années 1990, tout était ouvert car chacun diffère de l'autre par le contenu de l'Univers qu'il prend en compte. Avec peu de densité de matière, l'Univers s'étendrait sans fin. Avec une densité plus grande que celle dite critique, la gravitation prendrait un jour le pas sur l'expansion. L'Univers se recontracterait jusqu'à s'effondrer en un Big Crunch. Ces propositions sont aujourd'hui abandonnées. Les analyses du fond diffus cosmologique, observé

par le satellite américain Cobe en 1992, et précisé par WMAP en 2003, montrent que la densité est voisine, sinon égale, à la densité critique. L'Univers s'étendrait alors infiniment tout en ralentissant progressivement son expansion, selon les modèles dits d'Einstein-de Sitter. Depuis 1998, les observations de supernovae lointaines de type Ia montrent que l'expansion, loin de décélérer, accélère. Les nouveaux modèles ont dû intégrer cette donnée, imputant la cause à une mystérieuse énergie noire. Celle-ci peut être une nouvelle composante dynamique ou simplement l'énergie du vide, ce qui rétablirait une sorte de constante cosmologique d'Einstein dans les équations. Ce qu'avaient fait en un sens Alexandre Friedmann et Georges Lemaître dans les années 1920.

■ ■ Avec quels outils parvient-on à décrire l'évolution de l'Univers ?

La première époque sur la description de laquelle les cosmologistes s'accordent est celle de l'inflation, un phénomène étonnant introduit en 1980 par Alan Guth, aujourd'hui pro-



fesseur au Massachusetts Institute of Technology. À 10^{-35} seconde, on suppose que l'Univers est dans un état tel que l'énergie du vide quantique domine, sans qu'on sache vraiment pourquoi. Ce vide a un effet répulsif foudroyant sur l'Univers, dont la taille est brusquement multipliée par 10^{50} . Toute courbure étant ainsi étirée, l'Univers devient extrêmement plat, une caractéristique confirmée par les observations du fond diffus cosmologique. Il devient, de plus, vide et froid. S'ensuit une période dite de réchauffement pendant laquelle se créent des particules chaudes. C'est une sorte de re-création de l'Univers. Heureusement, car sinon nous ne serions pas là pour le penser. Les étapes ultérieures de l'expansion et du refroidissement de l'Univers (voir la chronologie du Big Bang) sont modélisées par la physique des particules, puis nucléaire, aidée par les expériences en accélérateurs. Elles décrivent les réactions entre particules et antiparticules, en constante création et annihilation, la formation des protons et des neutrons, celle des noyaux des éléments légers, jusqu'à celle des atomes et la libération de la lumière 380 000 ans après le Big Bang. C'est alors la cosmologie observationnelle, puis la physique stellaire et galactique qui prennent le relais pour décrire la formation des grandes structures de l'Univers, des étoiles et des galaxies.

■ ■ A-t-on des indices de sa réalité ?

Non, en ce qui concerne la singularité initiale. Mais oui, pour les modèles. Trois observations sont primordiales et sont considérées comme les piliers de l'édifice Big Bang. Tout d'abord l'expansion de l'Univers fut un élément déterminant pour que les modèles de Friedmann et de Lemaître soient pris en compte. Si les galaxies s'écartaient comme à la surface d'un ballon, □

CHRONOLOGIE DU BIG BANG

| Temps | Température | Phénomène |
|-------------------------|----------------------|---|
| 10^{-43} s | 10^{32} K | Temps de Planck. Découplage de la gravitation et de la force électro nucléaire. |
| 10^{-35} s | 10^{28} K | Découplage des interactions forte et électrofaible. Inflation cosmique. |
| 10^{-33} s | 10^{25} K | Plasma de quarks et de gluons. |
| 10^{-12} s | 10^{15} K | Découplage des interactions faible et électromagnétique. |
| 10^{-6} s | 10^{13} K | Formation des protons et des neutrons. |
| 1 – 200 s | 10^{10} - 10^9 K | Nucléosynthèse primordiale (deutérium, hélium, lithium). |
| 380 000 ans | 3000 K | Recombinaison des électrons. Émission du fond diffus cosmologique. |
| 400×10^6 ans ? | | Premières étoiles. |
| 10^9 ans ? | | Premières galaxies. |
| $13,7 \times 10^9$ ans | 2,73 K | Aujourd'hui. |

Le Big Bang

elles devaient être plus proches dans le passé. L'Univers devait donc être plus dense et plus chaud. C'est ainsi que Lemaître imagina son modèle de l'atome primitif quand toutes les galaxies étaient réunies en un point.

La deuxième observation est le rayonnement de fond cosmologique émis 380 000 ans après le Big Bang. L'Univers se refroidissant à 3 000 kelvins, les photons n'avaient plus assez d'énergie pour arracher les électrons. Les atomes se formèrent, la lumière traversa sans encombre de grandes distances, jusqu'à parvenir à nos détecteurs aujourd'hui. Ce bain de photons, aujourd'hui à 2,73 kelvins, avait été prédit par Ralph Alpher et Robert Herman en 1949, mais ce n'est qu'en 1965 que Arno Penzias et Robert Wilson, des laboratoires Bell, l'ont détecté en réglant leur antenne radio. Le fait qu'il soit homogène et isotrope sur de très grandes distances prouve sa nature cosmologique. Des fluctuations très faibles (de l'ordre de 1/100 000) fournissent de précieuses informations sur la dynamique de l'Univers avant 380 000 ans.

La troisième « preuve » est la proportion d'éléments légers que l'on trouve dans l'Univers. George Gamow et Ralph Alpher montrèrent en 1948 que l'hydrogène et la majeure partie de l'hélium ont été créés lors de la nucléosynthèse primordiale, quelques secondes après le Big Bang. Les calculs qui ont suivi ont affiné la proposition. Ils arrivent à décrire les proportions observées de deutérium (un proton, un neutron), d'hélium-3 et -4 (deux protons, un ou deux neutrons) et, dans une moindre mesure, de lithium-7 (trois protons, quatre neutrons).

■ ■ Par où ces modèles pêchent-ils ?

Des fluctuations du même type que celles qui apparaissent dans le fond cosmologique doivent être à l'origine de la formation des galaxies et des amas. Les simulations numériques permettent de reproduire assez finement cette formation en tenant compte de la présence de la matière noire, mais ce n'est pas le cas aux petites échelles où une meilleure



compréhension est nécessaire. Un deuxième problème a longtemps été le fait que l'âge des plus vieilles étoiles semblait supérieur à celui de l'Univers. Par exemple, l'âge de l'étoile CS 22892, dont on a mesuré le contenu en thorium, était évalué à 15,2 milliards d'années, alors que l'Univers ne devait alors qu'en avoir 12. La détermination plus précise de la constante de Hubble et un affinement de la physique stellaire a réglé la question.

Mais le plus gros hiatus est très récent : 95 % du contenu de l'Univers nous est inconnu ! Les données du fond diffus cosmologique et l'observation de l'accélération de l'Univers indiquent que 73 % de l'énergie de l'Univers est sous la forme d'une énergie noire, de nature énigmatique, mais que certains comparent à l'énergie du vide. Avec 23 % de matière noire, elle aussi de nature inconnue, il ne reste que 4 % de matière ordinaire, celle qui constitue les étoiles et toute la matière observable. C'est peu pour un modèle qui a la prétention de décrire l'Univers dans son ensemble et son évolution. Même si ces composantes noires existent réellement, des questions se posent quant à l'Univers primordial. Par exemple, l'inflation a-t-elle réellement eu lieu ou est-ce une idée *ad hoc*, comme elle fut qualifiée en 1980 quand Alan Guth l'a proposée ? Il faut dire que les conditions initiales nécessaires à la survenue d'un tel événement sont très peu naturelles.

■ ■ Y a-t-il des modèles concurrents ?

Il y en a eu. Tout d'abord Einstein lui-même arrangea ses équations pour qu'elles décrivent un Univers statique

et éternel. L'observation de la fuite des galaxies lui donna tort. Mais l'idée d'un Univers surgi de nulle part sinon de l'énergie (le « et la lumière fut » de la Bible) dérangea plus d'un astrophysicien athée. Le modèle concurrent le plus célèbre est le modèle stationnaire que les Anglais Fred Hoyle, Thomas Gold et Hermann Bondy publièrent en 1948. Ils soutenaient que l'expansion observée se produisait à densité de matière constante. Il n'y avait pas eu de phase chaude, pas de Big Bang, mais création continue de matière. Le modèle perdit nombre de ses partisans après la découverte du fond diffus cosmologique qu'il n'arrivait pas à expliquer. Il en reste toujours : l'Indien Jayant Narlikar, le Français Jean-Claude Pecker ou l'Américain Halton Arp. Même s'ils défendent une variante du modèle stationnaire, leur démarche vise plus à questionner les scientifiques, afin de déboulonner le dogme qu'est devenu le modèle du Big Bang.

Dans les années 1970, les Suédois Hannes Alfvén, David Bohm et Oskar Klein imaginèrent le modèle de l'Univers-plasma. L'Univers serait né de l'énergie d'annihilation de la matière et l'antimatière dans un nuage en contraction. La force électromagnétique y remplace la gravitation dans la formation des grandes structures de l'Univers.

Depuis 2001 a émergé le modèle ekpyrotique. Ses plus ardents défenseurs sont l'Américain Paul Steinhardt, de Princeton, et Neil Turok, de l'université de Cambridge, en Angleterre. Ils imaginent que l'Univers est branaire et multidimensionnel. La phase d'inflation y est remplacée par la collision de deux Univers, un phénomène qui doit être cyclique. ■

POUR EN SAVOIR PLUS

- S. Singh, *Le Roman du Big Bang*, JC Lattès, 2005.
- J. Silk, *Le Big Bang*, Le Livre de Poche, coll. « biblio-essais », 1999.
- J.-P. Luminet, *L'Invention du Big Bang*, Seuil coll. « Points-Sciences », 2004.
- www.cnrs.fr/cw/dossiers/dosbig/accueil.htm
Le dossier du CNRS sur le Big Bang.