

## Inflation dans l'Univers

Françoise Combes, astronome à l'Observatoire de Paris, professeure au Collège de France

### Comment est né l'Univers ? D'où viennent les grandes structures qui nous entourent, les galaxies et amas de galaxies ?

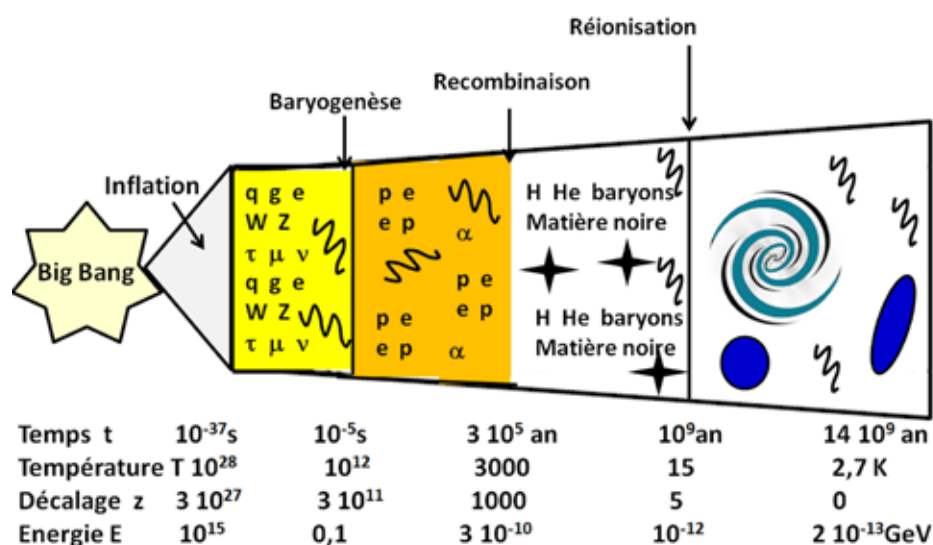
Un glossaire accompagne ce texte page 48.

Nous savons depuis bientôt un siècle que l'Univers est en expansion. Les astronomes, comme Vesto Slipher, ont d'abord remarqué que les galaxies proches avaient en majorité un spectre décalé vers le rouge, et qu'elles semblaient donc s'éloigner de nous à grande vitesse. Edwin Hubble note que ces vitesses sont proportionnelles à la distance des galaxies. L'abbé Georges Lemaître, qui faisait à l'époque un séjour aux États-Unis en revient avec l'idée que l'espace est en expansion. Il extrapole que si dans le futur, les galaxies qui nous entourent seront de plus en plus distantes, alors dans le passé, réciproquement, elles étaient très proches, et il entrevoit un Univers où tout est concentré en un point, « l'atome primitif ». Pendant longtemps la

relation vitesse-distance des galaxies s'est appelée loi de Hubble, mais depuis 2018, nous l'appelons loi de Hubble-Lemaître, pour rendre hommage à la clairvoyance de ce dernier.

La théorie du Big Bang a progressivement conquis ses lettres de noblesse, et même son nom en 1949, grâce à un des ses principaux détracteurs, Fred Hoyle, qui voulait tourner cette théorie en dérision. La découverte du fond diffus cosmologique (CMB en anglais, pour Cosmic Microwave Background) par Penzias & Wilson en 1965, l'abondance observée aujourd'hui des éléments légers (hélium, deutérium, etc.) qui ne peut s'expliquer que dans la nucléosynthèse primordiale, et l'évolution des galaxies à grand décalage vers le rouge (soit à 10 % de l'âge de l'Univers), ne permettent plus de douter que l'Univers est passé dans un état infiniment chaud et dense, il y a 13,8 milliards d'années.

Rappelons les différentes étapes de l'Univers que nous connaissons, comme il est rappelé dans le schéma de la figure 1.



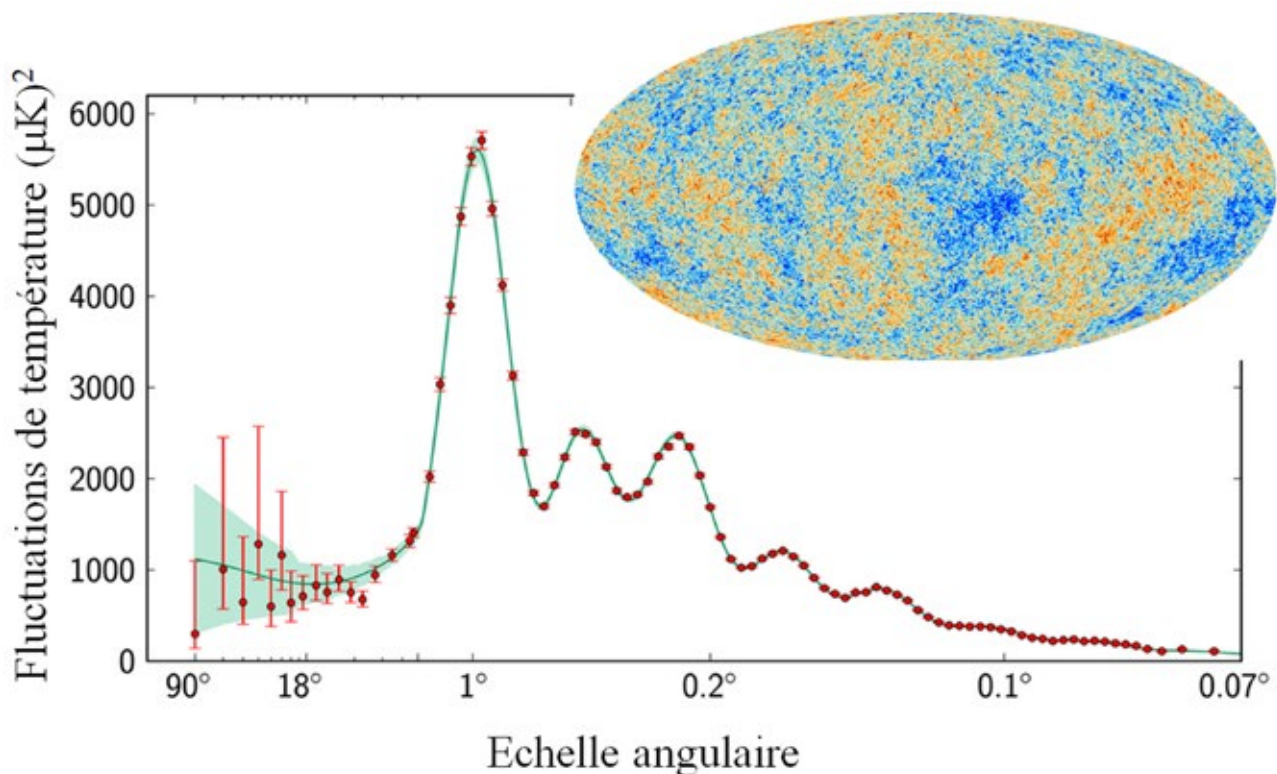
**Fig.1.** Schéma des différentes étapes de l'histoire de l'Univers. De gauche à droite, après le Big Bang, se situerait une phase d'inflation gigantesque de l'espace, où des petites fluctuations quantiques, de la taille de Planck (soit  $10^{-35} \text{ cm}$ ) sont amplifiées par un facteur  $10^{30}$  pour devenir macroscopique, soit une fraction de millimètre. Cette époque dure très peu (moins que  $10^{-32}$  seconde), et l'espace ensuite n'est qu'en lente expansion, jusqu'à aujourd'hui (13,8 milliards d'années). Chaque époque est labellisée par le temps (en seconde ou année), mais aussi la température du CMB  $T(z) = 2,73K(1+z)$ , en fonction du décalage vers le rouge  $z$ , qui croît comme l'inverse de la longueur d'onde des photons du fond cosmologique. À chaque température  $T$  correspond une énergie  $E$  de chaque photon ( $E = h\nu$ ), ici en unités nucléaires de GeV ou Giga electron-volt. Les diverses époques sont indiquées : baryogénèse ou formation des protons, neutrons qui deviennent des atomes (H, He) à la recombinaison. Puis la formation des premières étoiles et galaxies entraîne la réionisation du milieu entre les galaxies, tel qu'il est de nos jours.

Dans la première seconde, l'Univers est une soupe primitive, très dense et chaude, dominée par le rayonnement. Il existe surtout des photons, qui ont assez d'énergie pour créer particules et antiparticules, quarks et antiquarks. Mais assez vite, avec l'expansion, l'énergie tombe en-dessous de la masse du proton ( $\sim 1$  GeV), ceux-ci s'annihilent avec les anti-protons, et ne restent que l'excédent de matière sur l'antimatière. C'est la baryogénèse, qui est encore assez mystérieuse, car l'on n'a toujours pas identifié la brisure de symétrie qui favorise les baryons par rapport aux anti-baryons. Cette asymétrie est très faible, d'environ  $10^{-9}$  en abondance relative, nous le savons grâce au nombre de photons observés aujourd'hui dans le CMB.

Dans les minutes qui suivent le Big Bang, la température et la densité sont encore suffisantes pour

permettre aux réactions nucléaires de fabriquer les particules  $\alpha$ , ou noyaux d'hélium (deux protons et deux neutrons), mais aussi le deutérium, qui sera ensuite détruit dans les étoiles. C'est grâce à cette nucléosynthèse primordiale, que nous avons 10 % en nombre et 25 % en masse d'hélium dans les étoiles comme le Soleil, alors que la nucléosynthèse ultérieure dans les étoiles n'en forme que très peu, en même temps que des traces d'éléments plus lourds.

Dans l'expansion, la température descend jusqu'à 3 000 K après 380 000 ans, et l'atome d'hydrogène se recombine à partir d'un proton et d'un électron. Le milieu est neutre, et ne diffuse plus les photons du CMB, qui nous parviennent ensuite directement, en ligne droite. C'est cette dernière surface de diffusion que nous percevons dans la carte du ciel en ondes millimétriques, faite par le satellite Planck (figure 2).



*Fig.2. Carte du ciel des anisotropies dans le CMB, faite avec le satellite Planck (ondes millimétriques). La carte en haut à droite montre les fluctuations de température réparties sur tout le ciel, et la courbe en fait la synthèse, en fonction de la taille angulaire de ces fluctuations (échelle en degré d'angle de l'abscisse). L'échelle des ordonnées est en micro-Kelvin<sup>2</sup>. Noter les faibles barres d'erreur (en rouge) pour des échelles inférieures à  $10^\circ$ . Crédit Planck/ESA.*

### Parmi toutes ces étapes, pourquoi l'inflation ?

L'observation des anisotropies du fonds diffus, résumées dans la figure 2, a confirmé avec une extrême précision la théorie du Big Bang, et l'histoire de l'Univers dont nous venons de brosser les grandes lignes ; les oscillations détectées avec grande précision représentent les ondes acoustiques

du plasma (protons, électrons) en équilibre avec le rayonnement. Le premier pic à  $1^\circ$ , le plus haut, correspond au chemin parcouru par le son depuis le Big Bang, c'est-à-dire 450 000 années-lumière, et nous sert de règle cosmique. Si cette règle est vue sous l'angle de  $1^\circ$ , cela permet d'affirmer que la courbure est nulle, et que les photons nous sont parvenus en ligne droite (si la courbure était négative, le pic se trouverait à un angle inférieur à  $1^\circ$ ).

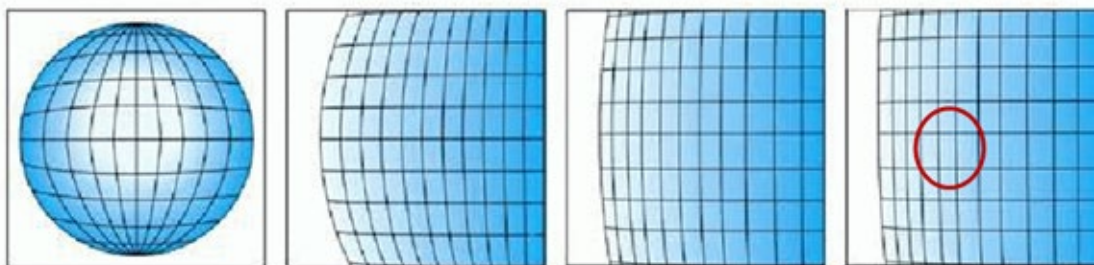
L'Univers est donc exactement plat, sans courbure, et cela pose déjà un problème. En effet, d'après les équations de la relativité générale d'Einstein, l'écart à la platitude croît depuis le début de l'Univers, depuis le temps de Planck, d'un facteur  $10^{60}$ . Comment se fait-il que les conditions initiales aient été si précises, pour que la courbure soit nulle à  $10^{-60}$  près ?

Outre ce problème de la platitude, nous avons aussi le problème de l'horizon. L'horizon est la distance au-delà de laquelle nous ne pouvons pas retrouver de l'information : la vitesse de la lumière n'est pas infinie, et elle a parcouru 13,8 milliards d'années-lumière depuis le Big Bang. Nous ne pouvons pas avoir reçu de lumière des galaxies qui sont au-delà. Chaque observateur est entouré d'une sphère correspondant à son horizon, qui délimite la part de

l'Univers qu'il pourra observer.

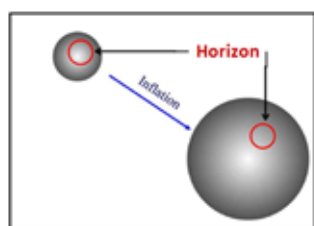
À l'époque de la recombinaison, soit 380 000 ans après le Big Bang, l'horizon ne faisait que 380 000 années-lumière, il était si petit que, vu d'aujourd'hui sur la dernière surface de diffusion, cette taille correspond environ à  $1^\circ$  d'angle. Dans la carte du ciel de la figure 2, il y a donc plus de 40 000 horizons indépendants. Ils ne peuvent pas avoir échangé de signaux, pourtant leur température de fonds est remarquablement constante, à  $10^{-5}$  près (qui est le niveau des fluctuations spatiales). C'est le problème de l'horizon.

L'inflation a donc été imaginée afin de résoudre ces problèmes. La figure 3 montre comment est résolu le problème de la platitude.



**Fig.3.** L'inflation résout le problème de la platitude de l'Univers que nous observons aujourd'hui. L'Univers n'a pas besoin de commencer avec une courbure nulle initialement. Quelle que soit sa courbure initiale, l'inflation de l'espace d'un facteur  $10^{30}$  est si énorme que notre Univers observable (le cercle rouge, à droite) apparaîtra toujours plat.

L'inflation permet aussi de résoudre le problème de l'horizon. La solution est qu'au minimum tout le volume d'Univers correspondant aux nombreux horizons que nous apercevons dans la carte du ciel du fond diffus provienne de la même région de l'espace, grâce à une soudaine expansion ultra-rapide.



**Fig.4.** Pendant l'inflation, qui dure  $10^{-32}$  seconde, la lumière n'a pratiquement pas le temps de bouger, et donc l'horizon reste à peu près de la même taille (cercles rouges). Par contre, l'espace s'étend d'un facteur  $10^{30}$ , et un volume donné peut contenir beaucoup plus d'horizons. C'est ainsi que tout le ciel de Planck de la figure 2 peut provenir de la même région de l'espace, avec la même température, même s'il contient plus de 40 000 horizons.

Cette expansion bat la lumière de vitesse, et d'un tel facteur (plus de 21 ordres de grandeur) que l'homogénéité de la température dans tout le ciel est assurée.

L'inflation, non seulement résout les principaux problèmes de la théorie du Big Bang, mais en plus, elle fournit une prédiction, l'existence de fluctuations primordiales, et elle en fixe l'amplitude, qui se révèle tout à fait en accord avec les observations.

Les ondes acoustiques détectées dans le ciel micro-onde du CMB nous indiquent quelle est l'amplitude des fluctuations pour chaque échelle de taille donnée. On peut ainsi construire le spectre de puissance des fluctuations  $P(k)$ , où  $k$  est le nombre d'onde, soit  $k=2\pi/\lambda$ , où  $\lambda$  est l'échelle considérée. La théorie de l'inflation prédit un spectre indépendant d'échelle, en loi de puissance  $P(k) \propto k^n$ , où l'exposant de la loi de puissance est tel que les perturbations entrent toujours dans l'horizon avec une égale amplitude soit  $n = 1$ . Les observations du CMB par le satellite Planck ont confirmé ce spectre. Plus précisément, on observe bien  $P(k) \propto k$  à grande échelle (petit  $k$ ) ; puis  $P(k)$  s'incline à petite échelle (ou grand  $k$ ) en  $k^{-3}$ , car les fluctuations à ces échelles sont empêchées de croître par la pression du rayonnement au tout début de l'Univers. La pression des photons ne s'exerce qu'à l'intérieur de l'horizon, qui est petit à cette époque.

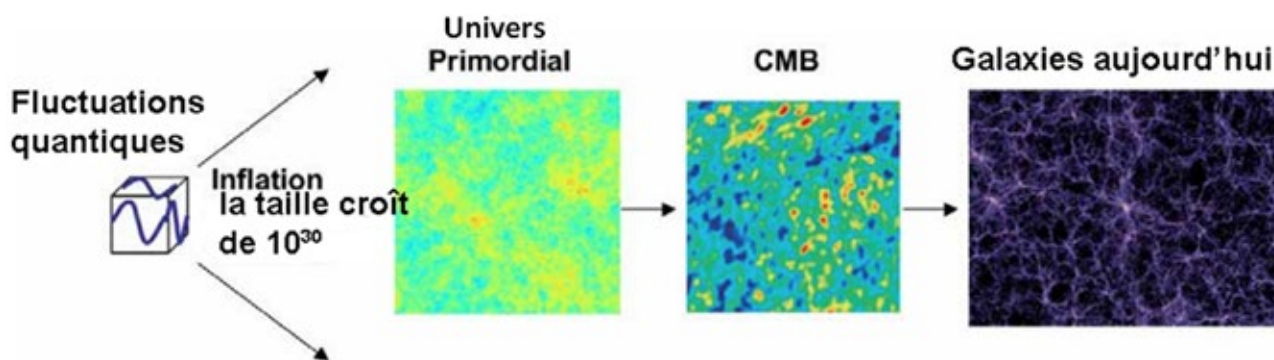


Fig.5. L'inflation apporte un bonus supplémentaire, elle permet d'expliquer l'origine des fluctuations primordiales qui vont donner lieu aux grandes structures et aux galaxies.

## Historique du modèle d'inflation

La théorie de l'inflation a d'abord été proposée par le physicien russe Alexei Starobinski en 1979-80 et par Alan Guth en 1980-81 aux USA. Mais le mécanisme de Guth demande une modification pour sortir de l'inflation. En effet, l'arrêt de l'inflation est beaucoup trop violent, et réchauffe anormalement l'Univers.

On peut se représenter le champ de l'inflation, comme le montre schématiquement la figure 6. L'état initial ne serait pas vraiment à l'équilibre stable, mais dans un minimum secondaire d'énergie, soit dans un état métastable. L'analogie avec un milieu hors équilibre comme l'eau en surfusion en dessous de zéro degré, qui a besoin de noyaux de glace pour geler globalement, ou l'eau surliquifiée au-delà de 100 degrés, qui a besoin d'impuretés pour créer des bulles et s'évaporer. Pour un champ quantique, on peut considérer l'état de faux vide métastable dans un minimum local d'énergie, qui puisse descendre ensuite par effet tunnel vers l'état d'équilibre global, ou vrai vide. Mais ce scénario est très violent, crée des bulles de vrai vide, qui collisionnent, et finit par un univers beaucoup trop granulaire et inhomogène, incompatible avec les observations.

La nouvelle inflation est alors développée par Andrei Linde, Andreas Albrecht et Paul Steinhardt indépendamment en 1982 et au-delà. Les premiers modèles d'inflation sont basés sur une transition de phase du 1<sup>er</sup> ordre, puis des transitions du 2<sup>e</sup> ordre, analogues à celles proposées des décennies plus tôt par les physiciens, pour expliquer les brisures de symétrie pour les supraconducteurs : la transition se passe pour une température inférieure à une température critique.

Enfin l'inflation peut se produire sans transition de phase du tout, comme pour l'inflation chaotique, supposée venir de conditions initiales chaotiques. Dans ces modèles, il n'y a plus de minima secondaires d'énergie, mais juste le champ inflaton

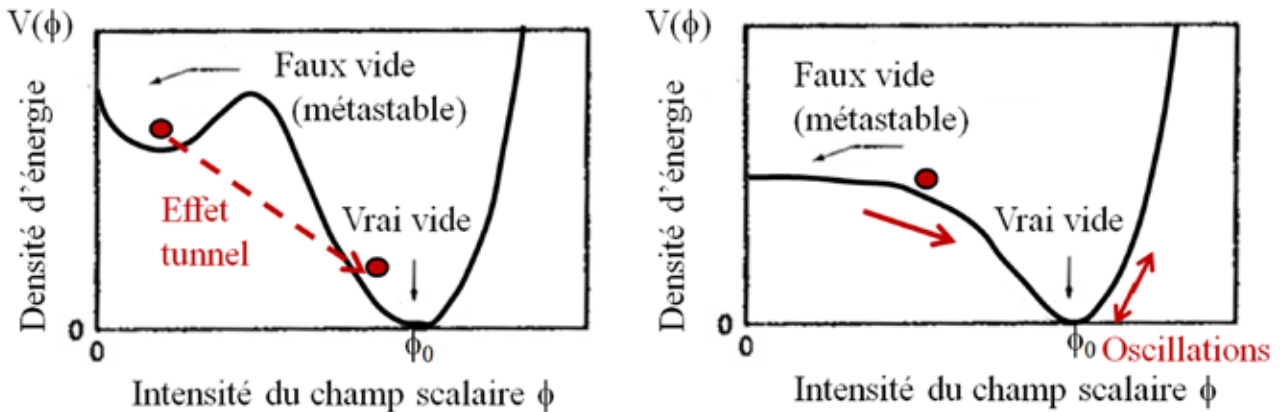
qui roule doucement d'un état d'énergie positive, en pente douce vers son minimum d'équilibre. À cause des fluctuations quantiques, il oscille dans son puits de potentiel. Arrivé à son point d'équilibre, l'inflaton se désintègre en photons et particules de matière. Les oscillations quantiques créent des perturbations initiales.

Pour les modèles avec transition de phase, il faut un ajustement fin du mécanisme pour sortir du faux vide, en surfusion. Une fois l'ajustement fait, pour être en accord avec le CMB, les bulles collisionnent trop souvent. Les modèles à transition de phase utilisent l'effet tunnel pour ralentir le passage du faux vide métastable à l'état d'équilibre. Sans changement de phase, on peut utiliser un champ en pente douce (« slow roll » en anglais) au lieu de l'effet tunnel. De plus cela permet d'utiliser les fluctuations quantiques comme conditions initiales (cf. schéma de la figure 6 à droite).

Mais d'où vient toute l'énergie libérée à la fin de l'inflation, pour créer les particules, photons et matière ? On ne crée rien à partir de rien ! Le champ scalaire a la propriété d'être à l'équilibre dans un faux vide, un état d'énergie positive au début de l'Univers. Le champ a tendance à descendre lentement, et rouler vers le vrai vide, d'énergie nulle, qui est l'état d'équilibre. Ce faux vide est un composant qui a une pression  $P$  négative  $P = -\rho c^2$ , en fonction de sa densité  $\rho$  d'énergie positive. Il exerce ainsi une force répulsive, et agit comme de la gravité négative. L'univers démarre tout petit  $\sim 10^{-25}$  cm, Sa taille s'accroît de  $10^{30}$ , et son énergie de  $10^{90}$  (volume) ; mais son énergie gravitationnelle est très négative, et compense exactement. L'énergie de toute la matière qui est créée est prise sur l'énergie gravitationnelle. Dans les équations de relativité générale, un composant à pression négative produit une expansion exponentielle de l'espace. C'est aussi le phénomène que nous observons aujourd'hui avec l'énergie noire, bien que dans des proportions bien

inférieures. L'expansion de l'Univers s'accélère, ce qui a pu être observé la première fois en 1998 grâce aux chandelles standard que sont les supernovæ de

type Ia. Cette découverte a donné lieu au prix Nobel de physique en 2011.



**Fig.6.** Un des premiers modèles d'inflation (à gauche) : un champ scalaire (inflaton) a pour condition initiale une densité positive, correspondant à un faux vide, métastable. Par effet tunnel, le champ peut traverser la barrière, et rejoindre l'équilibre correspondant au « vrai vide ». Pour éviter cette fin brutale de l'inflation, et la dissipation trop rapide de l'énergie, la nouvelle inflation (à droite), n'a plus de transition de phase. Le champ va rouler lentement (sans beaucoup d'énergie cinétique) vers l'état d'équilibre stable, correspondant au vrai vide (selon la flèche rouge), et va osciller dans le puits de potentiel.

Le champ scalaire de l'inflaton est toujours une hypothèse, et la particule correspondante, ou boson de spin 0, n'a pas encore été détectée. La seule particule scalaire détectée à ce jour dans le modèle standard de particules est le boson de Higgs. Certains ont essayé de construire un modèle à partir de ce boson, mais cela ne fait pas consensus.

L'inflation est une période d'expansion exponentielle, d'un état du vide métastable, et l'expansion refroidit très vite l'Univers : la température baisse d'un facteur 100 000 environ. Cette température relativement basse est maintenue pendant la phase d'inflation. Lorsque l'inflation se termine, la température revient à la température initiale ; c'est ce qu'on appelle le réchauffement ou la thermalisation car la grande énergie potentielle du champ d'inflaton se désintègre en particules et remplit l'Univers de particules du modèle standard, y compris les photons, commençant la phase de l'Univers dominée par le rayonnement.

## Inflation éternelle

Il est difficile d'arrêter l'inflation partout. On peut l'arrêter dans une bulle en particulier, avoir un réchauffement, et la création de particules dans un univers, mais l'espace continue son expansion ailleurs. Comme le montre la figure 7, le faux vide poursuit sa folle inflation et remplit la plupart du volume. Les univers qui se sont formés n'en occupent qu'une infime fraction.

Chaque univers évolue indépendamment, selon les valeurs initiales des paramètres quantiques. La fraction de matière, de rayonnement, d'énergie noire, ou la constante cosmologique sont aléatoires dans chaque univers, qui ont des destins tous différents, expansion indéfinie, ou qui se retournent en Big Crunch. L'inflation s'auto-entretient, d'une façon chaotique, et indéfinie. Il n'y a plus de début ni de fin, c'est l'inflation éternelle, qu'a décrite Andrei Linde dès 1986.



**Fig.7.** L'inflation peut s'arrêter pour former un univers. Mais des régions de notre espace-temps continuent d'être remplies de faux vide, en expansion exponentielle. Dans cette figure, on a supprimé l'expansion de l'espace, pour permettre de voir les univers. Il est ainsi possible que plusieurs univers se forment, mais l'espace entre eux s'étend, et ils s'éloignent inexorablement. À droite, une vue d'artiste de ces multivers.

## Contraintes observationnelles

L'inflation n'est encore qu'une hypothèse, qui permet de résoudre plusieurs problèmes en cosmologie, mais demande à être vérifiée. Une prédiction de l'inflation est l'existence d'ondes gravitationnelles primordiales. Cette signature n'existerait pas dans les modèles alternatifs. Plusieurs groupes ont essayé de trouver cette signature dans l'observation du fond diffus cosmologique. La polarisation de ce rayonnement dans les ondes millimétriques, et surtout la polarisation de symétrie B (similaire à la symétrie d'un champ magnétique), serait un indicateur certain. Mais il existe des avant-plans, comme la poussière de notre galaxie la Voie lactée, ou même les lentilles gravitationnelles sur la ligne de visée, qui viennent brouiller le signal. À ce jour, la signature des ondes gravitationnelles primordiales n'a pas encore pu être mise en évidence, bien que les observations du satellite Planck soient tout à fait compatibles avec la théorie de l'inflation. Dans un futur proche, cette signature sera peut-être détectée.

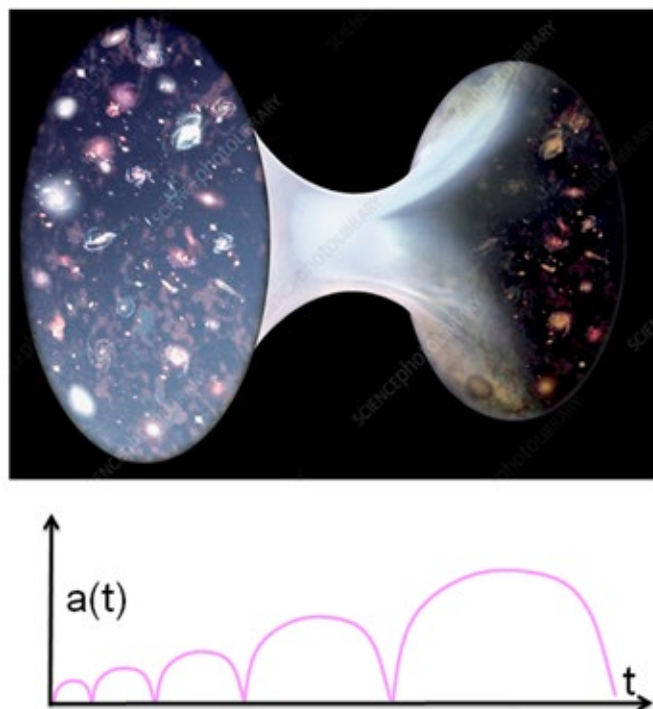
## Alternatives à la théorie de l'inflation

Bien que l'inflation soit l'hypothèse la plus admise par les spécialistes, elle a aussi ses détracteurs, et surtout il faut reconnaître que nous ignorons encore la physique de l'Univers à l'échelle de Planck, lorsque la mécanique quantique devrait se marier avec la gravité. Ces deux théories souffrent de contradictions et d'incompatibilités, et la gravité quantique est un

chantier où plusieurs théories s'affrontent. Il est certain que la singularité du Big Bang ne doit pas exister, et la solution doit se trouver dans la future théorie de gravité quantique.

Dans certains modèles, notamment ceux de la gravité quantique à boucle, la singularité du Big Bang est résolue par un rebond ou un « Big Bounce ». L'univers serait cyclique, alternant expansion et contraction (cf. figure 8). Nous serions dans une de ces phases d'expansion. Un de ces modèles cycliques est développé par Paul Steinhardt, autrefois un des promoteurs de la théorie de l'inflation. Dans la théorie des cordes, il suppose que chaque Big Bang correspond à la collision entre deux branes. Notre Univers est restreint alors à un nombre limité de dimensions de l'espace-temps (les branes), alors que l'espace pourrait contenir 11 ou 26 dimensions au total.

En conclusion toute provisoire, le modèle inflationnaire est aujourd'hui privilégié par les observations. Il résout les problèmes de platitude, d'horizon, d'homogénéité, et il fournit des fluctuations quantiques initiales, capables de développer les structures, avec le spectre de puissance observé. Il existe toutefois des problèmes d'ajustement fin, de non-prédictibilité, à ce modèle qui conduit à l'inflation éternelle, et à l'existence possible de multiples univers. L'observation d'ondes gravitationnelles primordiales pourrait trancher dans un proche avenir.



*Fig.8. Le modèle d'univers cyclique. Vue d'artiste du passage par le Big Crunch et un rebond. L'échelle caractéristique de l'Univers pourrait comporter une suite de rebonds.*

## GLOSSAIRE

**Brane** : dans la théorie des cordes, les particules sont représentées par des cordes à une dimension. Il existe aussi des membranes à deux dimensions, et par généralisation des « branes », à plusieurs dimensions. Nous vivons ainsi dans un sous-espace (appelé « 3-brane »).

**Brisure de symétrie** : un système peut posséder à un moment donné une symétrie, qui se brise lorsqu'une variable de son environnement change. Par exemple un système ferromagnétique n'est pas aimanté au-dessus de sa température critique  $T_c$ . Puis en dessous de  $T_c$ , les moments magnétiques au niveau atomique s'alignent, le matériau devient aimanté, avec une direction d'aimantation privilégiée. Il y a brisure spontanée de symétrie.

**Champ scalaire** : un champ scalaire est un champ dont les particules sont de spin zéro. C'est le cas du champ de Higgs, associé au boson de Higgs (ou Brout-Englert-Higgs, BEH).

**CMB** : acronyme de **Cosmic Microwave Background** ou, en français, fond diffus cosmologique.

**Effet tunnel** : en mécanique quantique, une particule, décrite par sa fonction d'onde, a une probabilité non nulle de traverser une barrière de potentiel. L'exemple le plus connu d'effet tunnel est celui de l'émission de particules  $\alpha$  par un noyau radioactif. Un tel effet est inconnu en physique classique.

**Fluctuation quantique** : en physique classique l'espace-temps « vide » (absence de matière) est totalement dépourvu de caractéristiques. En mécanique quantique le vide est l'état dans lequel aucun quanta de champ n'est excité, c'est-à-dire qu'aucune particule n'est présente. C'est « l'état fondamental » d'énergie minimale. Cependant ces champs ne conservent pas une valeur constante mais fluctuent incessamment autour de zéro.

**Inflaton** : la particule du champ scalaire présent lors de la période d'inflation de la même façon que le photon est la particule du champ électromagnétique.

**Dimension de Planck** : la combinaison des trois constantes fondamentales  $\hbar = 1,05 \cdot 10^{-34}$  USI (constante réduite de Planck),  $c = 3 \cdot 10^8$  m/s (vitesse de la lumière) et  $G = 6,67 \cdot 10^{-11}$  USI (constante gravitationnelle) permet de construire une longueur caractérisant le monde subatomique.

$$\text{Longueur de Planck} : l_p = \sqrt{\frac{G \cdot \hbar}{c^3}} = 1,62 \cdot 10^{-35} \text{ m}$$

**Nucléosynthèse primordiale** : dans le premier quart d'heure après le Big Bang, la température et la densité de l'Univers permettent la synthèse des éléments légers : l'hydrogène (un proton) et ses isotopes deutérium (un proton, un neutron) et tritium (un proton, deux neutrons), l'hélium-4 (deux neutrons et deux protons) et son isotope l'hélium-3 (deux protons, un neutron).

**Quarks** : constituants élémentaires des protons et neutrons.

**Spectre de puissance** : on peut décomposer un signal dans ses diverses composantes de fréquence spatiale. Le spectre de puissance décrit le poids des diverses composantes : si le signal a beaucoup de petites structures, le spectre de puissance sera très élevé dans ces hautes fréquences spatiales.

**Supernova de type Ia** : explosion dans une étoile binaire, composée d'une naine blanche (fin de vie d'une étoile comme le Soleil), et d'un compagnon dont une partie de l'enveloppe de gaz tombe brusquement sur la naine blanche.



### École d'été 2020

La 37<sup>e</sup> école d'été d'astronomie « Le temps en astronomie » est reportée à 2021.

En raison des nombreuses incertitudes liées au contexte épidémique actuel, il nous a semblé préférable de reporter à l'année prochaine notre école d'été, initialement prévue du 18 au 25 août.