

Enfin, pourquoi la vitesse de l'expansion cosmique est-elle juste suffisante pour équilibrer l'attraction gravitationnelle de toute la matière de l'Univers? Tout écart notable à l'équilibre se serait amplifié : si l'expansion avait été un peu plus rapide, l'Univers semblerait aujourd'hui presque vide de matière ; si l'attraction gravitationnelle avait été un peu plus forte, l'Univers se serait contracté et serait redevenu une boule dense et chaude.

Les cosmologistes décrivent cet équilibre à l'aide de la variable Ω , rapport de l'énergie gravitationnelle à l'énergie cinétique (c'est-à-dire l'énergie contenue dans le mouvement de la matière en expansion). Ω est proportionnel à la densité de matière dans l'Univers : une densité supérieure correspond à une attraction gravitationnelle plus forte, donc à un Ω plus grand. Si Ω est égal à un, sa valeur ne change jamais. Sinon, sa valeur décroît ou croît par un processus auto-amplificateur, à mesure que l'une des deux formes d'énergie, cinétique ou gravitationnelle, devient prépondérante. Après des milliards d'années, Ω devrait être soit nul, soit infini. Comme la densité actuelle de l'Univers n'est ni

nulle ni infinie, on en déduit que, originellement, Ω était égal à un, à moins d'un milliardième de milliardième près. Pourquoi? La théorie du Big Bang n'offre d'autre explication que le hasard.

L'absence de réponse à ces questions n'invalidé pas la théorie, qui explique bien plusieurs milliards d'années d'histoire cosmique ; en revanche, les cosmologistes pensent que la théorie est incomplète, et ils ont mis au point, au début des années 1980, la théorie de l'inflation.

L'inflation avant le Big Bang

La théorie de l'inflation pallie les insuffisances de la théorie du Big Bang, au prix de complications : elle postule que l'Univers, à son tout début, est passé par une période d'expansion très rapide (d'où son nom). Contrairement à l'expansion du Big Bang, qui ralentit au cours du temps, l'expansion de l'inflation est de plus en plus rapide. Elle écarte deux objets indépendants à une vitesse croissante, voire supérieure à celle de la lumière. Ce phénomène ne viole pas la théorie de la relativité, selon laquelle une masse ne peut se déplacer plus

vite que la lumière : c'est l'espace, situé entre les objets eux-mêmes au repos, qui se dilate plus vite que la lumière.

Cette rapide expansion initiale explique l'uniformité de l'Univers observé aujourd'hui. Toutes les parties de l'Univers visible ont été à un moment si proches que leur densité et leur température se sont homogénéisées. Puis, pendant l'inflation, les différentes régions de l'Univers ont cessé d'être en contact ; ce n'est qu'après la fin de l'inflation que la lumière, plus rapide que l'expansion du Big Bang, a commencé à diffuser vers l'intérieur de l'Univers. Il existe peut-être des hétérogénéités dans la partie invisible de l'Univers, mais nous devons attendre, pour les observer, que la lumière émise par ces régions parvienne jusqu'à nous.

Pour introduire une expansion rapide, la théorie de l'inflation utilise un élément emprunté à la physique des particules : le champ d'inflation, ou inflaton. En physique, les particules subatomiques, tels les protons et les électrons, sont représentées par des champs quantiques, qui ressemblent aux champs électrique, magnétique et gravitationnel familiers. Un champ est une fonction de

L'origine de l'Univers

Les lois de la physique décrivent généralement comment un système évolue à partir d'un état initial, mais les théories qui expliquent le commencement de l'Univers doivent contenir un type de loi complètement différent, qui explique l'état initial lui-même : les lois usuelles sont comme des cartes routières qui montrent comment aller de A à B, les nouvelles lois doivent expliquer pourquoi on part de A.

En 1983, James Hartle, de l'Université de Santa Barbara, et Stephen Hawking, de l'Université de Cambridge, ont appliqué la mécanique quantique à l'Univers tout entier, produisant une fonction d'onde cosmique, analogue à la fonction d'onde des atomes ou des particules élémentaires. Cette fonction d'onde (la fonction d'onde associée à une particule décrit la probabilité de présence de cette particule dans l'espace) détermine les conditions initiales de l'Univers. Selon cette approche, la distinction usuelle entre passé et futur perd son sens dans l'Univers primordial ; la direction temporelle prend les propriétés d'une direction spatiale. Tout comme l'espace n'a pas de bords, le temps n'a pas de commencement discernable. À l'Université Tufts, Alexandre Vilenkin a proposé une autre idée : l'utilisation d'une fonction d'onde «à effet tunnel» déterminée par les probabilités relatives qu'un univers de taille nulle devienne spontanément un univers de taille finie.

En 1998, S. Hawking et Neil Turok, aussi à Cambridge, ont proposé la création spontanée d'une bulle d'inflation ouverte à partir du néant. Cette nouvelle version de l'inflation ouverte évite l'hypothèse d'une désintégration du faux vide, mais A. Vilenkin et Andreï Linde, de l'Université Stanford, ont contesté les hypothèses de leur calcul.

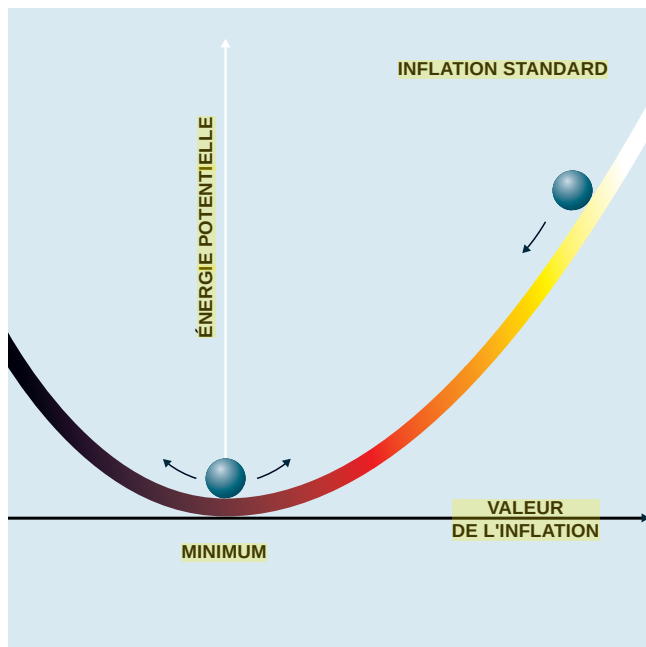
A. Linde a essayé de contourner le problème des conditions initiales en supposant que l'inflation est un processus sans

commencement. Dans la théorie la plus répandue, l'inflation prend fin quand le champ d'inflation roule en bas de sa courbe d'énergie potentielle. Cependant, en raison des fluctuations quantiques, le champ pourrait remonter le long de cette courbe. Autrement dit, il existerait en permanence des régions de l'Univers (qui forment en fait la majorité de son volume) qui sont en inflation. Elles entoureraient des poches d'espace où l'inflation a pris fin et où un univers stable s'est créé. Chaque poche serait caractérisée par des constantes physiques ; nous habiterions celle dont les constantes ont favorisé l'existence de la vie. Le reste de l'Univers continuerait de subir, et aurait toujours subi, l'inflation.

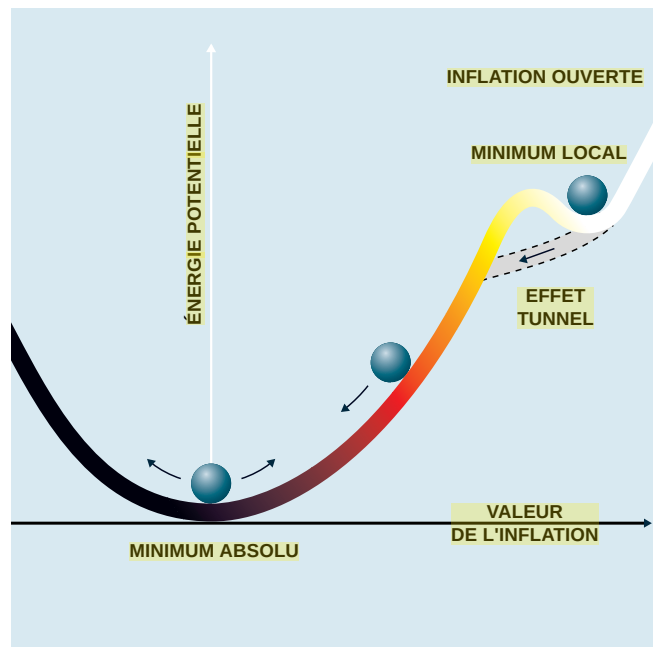
Toutefois, A. Vilenkin et Arvind Borde, aussi à Tufts, ont avancé que même cette extension de l'inflation ne décrit pas complètement l'origine de l'Univers. Bien que l'inflation puisse être éternelle dans le sens progressif du temps, elle nécessite un commencement absolu.

Richard Gott et Li-Xin Li, de l'Université de Princeton, ont récemment proposé que l'Univers soit cyclique, un peu comme si un voyageur remontait le temps et devenait son propre père. Une telle personne n'aurait pas d'arbre généalogique ; aucune explication de son origine n'est possible. Dans leur hypothèse, notre bulle s'est libérée du proto-univers cyclique ; elle n'est plus cyclique, mais en expansion et en refroidissement permanents.

Les astronomes testeront difficilement ces idées, car l'inflation efface presque toutes les caractéristiques observables de ce qui l'a précédée. De nombreux physiciens soupçonnent qu'une explication plus complète de l'Univers avant l'inflation, et de l'origine des lois de la physique, devra attendre une théorie vraiment fondamentale de la physique, peut-être la théorie des cordes.



2. LE CHAMP D'INFLATION, OU INFLATON, serait à l'origine de la force qui aurait provoqué l'expansion de l'espace. Ce champ se comporterait comme une bille roulant sur une pente : il tendrait à minimiser son énergie potentielle (axe vertical) en changeant sa valeur (axe horizontal). Les processus quantiques à l'aube du temps auraient communiqué à l'Univers une forte énergie potentielle. Selon la théorie de l'inflation (à gauche), l'inflaton roulerait vers sa valeur minimale, mais, selon la théorie de l'inflation ouverte (à droite), il se



serait arrêté dans un minimum local. Dans la plus grande partie de l'Univers, l'inflaton serait toujours dans ce minimum local, et l'inflation n'aurait jamais cessé. Dans quelques régions, le champ serait sorti du minimum local par «effet tunnel», et il aurait continué sa descente. L'une de ces régions serait la bulle d'Univers où nous vivons. Dans les deux modèles d'inflation, l'inflaton oscille dès qu'il approche de son point final, emplissant l'espace de matière et de rayonnement : c'est le Big Bang.

l'espace et du temps dont les oscillations sont interprétées comme des particules. Les champs sont responsables de la transmission des forces. L'inflaton est associé à une force «anti-gravitationnelle» qui étire l'espace.

À une certaine valeur de l'inflaton correspond une énergie potentielle. Comme une bille roulant le long d'une colline, l'inflaton roule vers le fond de son puits de potentiel (voir la figure 2, à gauche), mais l'expansion de l'Univers introduit ce que l'on peut décrire comme un frottement cosmique, qui s'oppose à la décroissance de l'énergie potentielle. Tant que ce frottement domine, l'énergie potentielle diminue très lentement, et la valeur de l'inflaton aussi : l'intensité de la force d'antigravitation augmente par rapport à celle de la gravitation, car la densité de l'Univers décroît. L'expansion de l'Univers est alors de plus en plus rapide. Finalement l'inflaton faiblit, et son énergie résiduelle se transforme en rayonnement et en particules (la matière que nous connaissons aujourd'hui). Ensuite l'expansion de l'Univers se poursuit conformément à la théorie du Big Bang.

Les cosmologistes étudient les conséquences des différentes théories sur la forme de l'Univers. Selon la

théorie de la relativité générale, la gravitation est en effet un phénomène géométrique : la matière et l'énergie déforment le tissu de l'espace-temps, tordant les trajectoires des objets qui se déplacent. L'expansion de l'Univers, qui est elle-même une forme de courbure de l'espace-temps, est commandée par la valeur de Ω (voir l'encadré page 55). Si Ω est plus grand que un, l'Univers a une courbure positive, comme la surface d'une orange, mais en trois dimensions spatiales : c'est la géométrie sphérique, ou «fermée». Si Ω est inférieur à un, la courbure de l'Univers est négative, comme une selle : c'est la géométrie hyperbolique, ou «ouverte». Si Ω est égal à un, l'Univers est plat, comme une crêpe : c'est la géométrie euclidienne habituelle.

L'inflation aplatit l'Univers observable. Quelle que soit la forme initiale de l'Univers, ce dernier se dilate si vite que nous n'en voyons plus qu'une petite partie, qui peut paraître plate pour les mêmes raisons que la surface terrestre qui nous entoure nous semble plate. L'inflation rapproche donc de un la valeur observée de Ω , tandis que les irrégularités initiales, dans les densités de matière et de rayonnement, sont effacées.

Ainsi, la théorie de l'inflation standard associe la géométrie euclidienne de l'espace et son homogénéité. Pour que l'Univers ait l'homogénéité actuelle, la théorie prévoit qu'il doit être très, très plat, avec Ω égal à un, à un cent millièmes près. Tout écart de Ω par rapport à un doit être indécidable par les astronomes. Depuis 20 ans, la planéité effectivement observée a été considérée comme une prévision bien vérifiée de la théorie.

L'Univers hyperbolique

Là est aujourd'hui le problème. De nombreuses observations astronomiques d'amas de galaxies et de supernovae lointaines montrent que la gravitation est trop faible pour vaincre l'expansion. La densité de matière doit être inférieure aux prévisions, et Ω semble être égal à environ 0,3 : l'Univers serait courbé et ouvert. Ce résultat peut s'interpréter de trois manières. Premièrement, la théorie de l'inflation pourrait être complètement fautive. Dans cette hypothèse, les cosmologistes devraient trouver une autre théorie qui résoudrait la question de l'homogénéité et qui expliquerait la valeur de Ω .

L'expansion accélérée que l'on déduit des observations des supernovae