

en débat



SUR CETTE REPRÉSENTATION
de l'expansion de l'Univers au fil du temps, l'inflation est la période de dilatation brutale qui succède immédiatement au Big Bang [point lumineux].

tion inconfortable, je vais instruire le procès de la cosmologie de l'inflation en présentant les deux points de vue extrêmes. Je vais d'abord jouer le rôle de la défense, en présentant les points forts de la théorie, puis, avec tout autant de conviction, je me glisserai dans le rôle de l'accusation, en présentant les problèmes non résolus les plus préoccupants.

Des arguments en faveur de l'inflation

L'inflation est une théorie aujourd'hui si populaire que son exposé peut être bref. Quelques détails supplémentaires sont nécessaires pour apprécier pleinement ses avantages. L'inflation repose sur un ingrédient nommé énergie inflationnaire qui, combiné à la gravité, entraîne une expansion fulgurante de l'Univers en un bref instant. L'énergie inflationnaire doit être extraordinairement dense, et cette densité doit rester presque constante au cours de toute la période d'inflation. Sa propriété la plus étonnante est qu'elle exerce une force répulsive qui s'oppose à la gravité. C'est cette répulsion qui est à l'origine de l'expansion rapide.

Si l'idée de A. Guth a séduit les théoriciens, c'est parce qu'ils avaient déjà identifié plusieurs sources possibles pour cette énergie. Le principal candidat est un « champ scalaire », une grandeur qui associe à chaque point de l'espace et à tout instant un nombre (un champ électrique est un champ vectoriel, puisqu'il associe à chaque point un vecteur). Dans le cas particulier de l'inflation, ce champ scalaire porte le nom d'inflaton. Le célèbre boson de Higgs recherché actuellement au LHC (Grand collisionneur de hadrons) du CERN, à Genève, est la particule associée à un autre champ scalaire.

Comme tout champ, l'inflaton a une certaine intensité en chaque point, qui détermine la force qu'il exerce sur lui-même et sur les autres champs. Pendant la phase d'inflation, son intensité est restée presque constante partout. Un champ est doté d'une certaine quantité d'énergie dite potentielle, qui dépend de son intensité. La relation entre l'intensité et l'énergie peut être représentée par une courbe. Pour l'inflaton, la courbe supposée ressemble à la coupe verticale d'un plateau en pente douce qui plonge dans une vallée encaissée (voir l'encadré page 55).

L'ESSENTIEL

✓ L'inflation cosmique est une théorie largement admise. Selon elle, la géométrie et l'uniformité actuelles du cosmos résultent d'une expansion fulgurante juste après le Big Bang.

✓ À mesure que la théorie de l'inflation se développait, des failles sont apparues dans ses fondements.

✓ De très improbables conditions initiales auraient été nécessaires pour enclencher l'inflation. Pire, celle-ci serait éternelle et la théorie n'aurait alors pas de pouvoir prédictif. Les théoriciens s'efforcent de lever les difficultés ou de forger d'autres théories.

Le champ est initialement sur le plateau, dans un état de haute énergie et d'intensité élevée, et va perdre progressivement à la fois de l'intensité et de l'énergie pour évoluer vers l'état d'énergie minimale, en glissant le long de la pente vers le fond de la vallée. En fait, les équations qui décrivent son évolution sont assez semblables à celles d'une bille qui dévalerait une pente de la même forme que la courbe de l'énergie potentielle.

L'énergie potentielle de l'inflaton peut entraîner l'expansion de l'Univers à un rythme accéléré. Ce processus peut lisser et aplanir l'Univers à condition que le

Les arguments en faveur de l'inflation peuvent être résumés en trois points. Premièrement, l'inflation est inévitable. Les développements de la physique théorique depuis la proposition de A. Guth n'ont fait que renforcer l'idée que l'Univers contenait à sa naissance des champs susceptibles d'entraîner l'inflation. Ils apparaissent par centaines dans les théories d'unification de la physique, telles que la théorie des cordes. Dans l'Univers primitif chaotique, il est presque certain qu'il existait une région de l'espace où l'un de ces champs remplissait les conditions pour qu'il y ait inflation.

L'INFLATION A DILATÉ L'UNIVERS D'UN FACTEUR 10^{25} en moins de 10^{-30} seconde, de quoi le rendre homogène et aplanir toute courbure.

champ reste sur le plateau suffisamment longtemps (environ 10^{-30} seconde) pour dilater l'Univers d'un facteur 10^{25} ou plus.

L'inflation s'achève quand le champ atteint la fin du plateau et se précipite vers le fond de la vallée. À ce stade, l'énergie potentielle se convertit en formes d'énergie plus familières, à savoir la matière ordinaire, le rayonnement et la matière noire, qui emplissent l'Univers actuel. L'Univers entre alors dans une période d'expansion modérée qui ralentit doucement, au cours de laquelle la matière s'aggrave pour former les structures cosmiques.

L'inflation lisse l'Univers, mais, de la même façon que l'étirement d'un morceau de caoutchouc laisse de petites irrégularités, ce lissage n'est pas parfait. De petites irrégularités subsistent à cause d'effets quantiques. Les lois de la physique quantique imposent que l'intensité d'un champ ne peut avoir exactement la même valeur partout dans l'espace : elle subit des fluctuations aléatoires. En raison de ces fluctuations quantiques, l'inflation prend fin à des instants légèrement différents selon les régions de l'espace, qui se retrouvent donc à des énergies légèrement différentes. Ces variations spatiales sont les germes qui donneront à terme les étoiles et les galaxies. L'une des prédictions de la théorie de l'inflation est que ces fluctuations de température sont pratiquement invariantes d'échelle, c'est-à-dire que leur amplitude ne dépend pas de la taille de la région considérée ; elle est comparable à toutes les échelles.

Deuxièmement, l'inflation explique pourquoi l'Univers est si homogène et plat aujourd'hui. Personne ne sait dans quelle mesure cela était le cas au moment du Big Bang, mais avec l'inflation, on n'a pas besoin de le savoir, car la période d'expansion accélérée l'a étiré, lui conférant son homogénéité et sa courbure nulle.

Troisièmement, et ce point est certainement le plus convaincant, la théorie de l'inflation a une grande portée prédictive. De nombreuses observations du rayonnement de fond diffus cosmologique (le fossile de la première lumière émise après le Big Bang) ou de la distribution des galaxies ont ainsi confirmé que les fluctuations de la distribution d'énergie dans l'Univers primitif étaient presque invariantes d'échelle.

Des arguments à charge

Passons maintenant en revue les arguments en défaveur de la théorie de l'inflation. Les premiers signes qu'une théorie est vouée à l'échec sont en général de petits désaccords entre les observations et les prédictions. Ce n'est pas le cas ici : les données observationnelles concordent parfaitement avec les prédictions de la théorie de l'inflation formulées au début des années 1980. Les arguments contre l'inflation remettent plutôt en cause les fondements logiques de la théorie. Cette dernière fonctionne-t-elle vraiment aussi bien qu'on l'a présentée ? Les prédictions faites au début des années 1980 sont-elles encore

celles du modèle inflationnaire tel que nous le comprenons aujourd'hui ? Il y a de bonnes raisons de penser que la réponse à ces deux questions est non.

Reprenons le premier point : l'inflation est-elle vraiment inévitable ? Peut-être, mais si c'est le cas, il y a un corollaire embarrassant : une « mauvaise » inflation est plus probable que la « bonne ». Par mauvaise inflation, on entend une période d'expansion accélérée dont le résultat est en contradiction avec les observations, par exemple qui engendre des fluctuations de température trop grandes. La différence entre la bonne et la mauvaise inflation dépend de la forme précise de la courbe de l'énergie potentielle, qui est contrôlée par un paramètre numérique susceptible en principe de prendre n'importe quelle valeur entre zéro et un. Mais seul un intervalle très étroit de valeurs conduit aux variations de température observées. Dans un modèle inflationnaire typique, cette valeur doit être proche de 10^{-15} . Une valeur un peu moins proche de zéro, par exemple 10^{-8} ou 10^{-10} , engendre une mauvaise inflation, ayant un même facteur d'accélération de l'expansion, mais accompagnée de fortes variations des températures.

Nous pourrions être tentés d'ignorer simplement la mauvaise inflation si elle était incompatible avec la vie. Dans ce cas, même si de fortes variations de température survenaient, personne ne serait là pour les observer. Ce type de raisonnement relève du « principe anthropique ». Mais il ne s'applique pas ici. Des hétérogénéités primordiales plus importantes conduiraient à un nombre plus élevé d'étoiles et de galaxies, et l'Univers serait sans doute plus habitable qu'il ne l'est aujourd'hui.

Non seulement la mauvaise inflation est plus probable que la bonne, mais il est encore plus vraisemblable qu'il n'y ait pas d'inflation du tout ! Le théoricien britannique Roger Penrose a soulevé ce point dès les années 1980. Il a appliqué des principes thermodynamiques, semblables à ceux qui servent à décrire les configurations des molécules dans un gaz, pour dénombrer les configurations initiales possibles de l'inflaton et du champ gravitationnel. Certaines de ces configurations conduisent à de l'inflation et donc à une distribution homogène de la matière et à une courbure nulle. D'autres configurations aboutissent directement à un univers homogène et plat, mais sans inflation. Les deux jeux de configurations sont rares,