

Qu'est-ce que l'inflation cosmique ?

Sébastien Renaux-Petel : Il y a 13,7 milliards d'années, l'Univers aurait connu une phase d'expansion extrême, les distances dans le cosmos ayant été multipliées par environ 10^{30} en une fraction de seconde. L'idée de cette « inflation » a été introduite dans les années 1980 pour résoudre divers problèmes liés à la théorie du Big Bang.

De quels problèmes s'agissait-il ?

La théorie du Big Bang dans sa forme moderne a été développée durant l'après-guerre, notamment par George Gamow. En partant des observations d'Edwin Hubble montrant que l'Univers est en expansion, Gamow et ses collègues ont conclu que l'Univers était plus chaud et plus dense par le passé. Ils ont alors compris que lorsque l'Univers n'avait que quelques minutes, les protons et les neutrons se sont liés pour former les noyaux atomiques des éléments les plus légers (hydrogène, hélium...). Environ 380 000 ans plus tard, les électrons et les noyaux se sont assemblés pour former des atomes neutres, ce qui a permis à la lumière de se propager. Cette lumière originale devait laisser sa trace sous la forme d'un rayonnement, le « fond diffus cosmologique ».

Les observations ont confirmé ces prédictions du modèle du Big Bang. Le fond diffus cosmologique a été observé pour la première fois par les Américains Arno Penzias et Robert Wilson en 1964. Ils ont montré qu'il est uniforme à travers tout le ciel et que son spectre correspond à celui d'un corps noir chauffé à 2,7 kelvins (Gamow et ses collègues avaient calculé une valeur de 5 kelvins).

Or cette homogénéité à grande échelle pose problème, car, compte tenu du taux d'expansion de l'Univers, on montre que des régions du fond diffus séparées de plus de deux degrés sur la voûte céleste n'ont jamais pu être en contact. Elles n'ont donc pas de raison d'être à la même température, à moins de supposer que l'état initial de l'Univers était extrêmement uniforme, ce qui n'est pas très naturel. D'où l'idée de l'inflation.

Comment l'inflation résout ce problème ?

Si l'on suppose que l'Univers a connu une gigantesque expansion avant les ères décrites par le modèle conventionnel du Big Bang, les régions du ciel qui ne sont pas causalement liées sans l'inflation le deviennent. L'inflation apporte aussi une réponse à une autre difficulté : le fait que la géométrie spatiale de l'Univers soit euclidienne à grande échelle. Une telle géométrie suppose un ajustement très fin des conditions initiales de l'Univers. Avec l'inflation, cette géométrie devient naturelle. On illustre souvent cette idée avec l'image d'un ballon de baudruche que l'on gonfle. Un petit élément de

la surface du ballon dégonflé est lissé et devient presque plat lorsque le ballon se remplit d'air.

L'idée de l'inflation conduit-elle aussi à des prédictions ?

Les premiers physiciens qui ont travaillé sur cette idée, dans les années 1980, ont montré que les fluctuations quantiques qui ont lieu pendant l'inflation seraient amplifiées. Elles formeraient des zones de surdensité, où vont naître les galaxies et les amas de galaxies. Plus important, ces fluctuations seraient aussi visibles dans le fond diffus cosmologique comme de petits écarts à la température moyenne de 2,7 kelvins, fluctuations que l'on n'avait pas encore observées.

Les chercheurs avaient aussi prédit certaines caractéristiques de ces fluctuations. Notamment, elles devaient être statistiquement corrélées et presque invariantes d'échelle (il y a presque autant de fluctuations aux petites échelles qu'aux grandes). Ces fluctuations ont été découvertes en 1992 par le satellite COBE, puis elles ont été mesurées avec une grande précision surtout par les satellites WMAP et Planck. Ces fluctuations sont de l'ordre de 10^{-5} par rapport à la température moyenne et présentent les propriétés prévues.

Quel serait le mécanisme de l'inflation ?

L'ingrédient fondamental du scénario inflationnaire est ce qu'on nomme un champ quantique scalaire. Un champ scalaire est un objet mathématique qui associe une valeur à chaque point de l'espace et à chaque instant. La carte des températures est un exemple de champ scalaire... non quantique !

Le seul champ quantique scalaire fondamental que l'on connaisse aujourd'hui est celui associé au boson de Higgs. Mais supposons l'existence d'un autre champ scalaire qui remplit l'Univers primordial. Comme il contient une certaine énergie, d'après les équations de la relativité générale, il participe à la dynamique de l'Univers. Cette énergie a deux formes. L'une, cinétique, est liée aux variations de la valeur du champ au cours du temps ; l'autre, potentielle, dépend de la valeur du champ suivant une certaine fonction que l'on nomme le potentiel. On montre que, pour qu'il y ait inflation, le potentiel doit être horizontal : l'énergie potentielle est alors constante et, le champ ne variant pas, l'énergie cinétique est nulle.

Si le potentiel est complètement plat, l'Univers reste en inflation. Comment en sortir ? Une solution est de supposer que le potentiel diminue d'abord légèrement quand la valeur du champ augmente (voir la figure page 38). La valeur du champ scalaire augmente alors lentement et l'énergie potentielle diminue. Lors de ce « roulement lent », l'énergie cinétique est encore négligeable, et cette phase correspond ➤

> à une expansion cosmique accélérée. Et quand la pente du potentiel augmente, l'énergie cinétique n'est plus négligeable; on sort dans ce cas du régime d'inflation.

Que se passe-t-il à la fin de l'inflation ?

L'expansion de l'Univers se poursuit, mais de manière décélérée. Le champ scalaire, lui, finit par atteindre un minimum du potentiel et y osciller. Dit autrement, les inflatons, les particules associées à ce champ, se désintègrent en particules classiques (photons, électrons, quarks, etc.). Cette phase, dite de réchauffement, est importante, puisque c'est à ce stade que l'Univers se remplit de son contenu matériel (toute matière présente avant l'inflation a été diluée dans les mêmes proportions que l'Univers a grandi !). Le problème est que nous ne savons pas encore décrire rigoureusement la phase de réchauffement.

Comment la forme du potentiel du champ scalaire est-elle déterminée ?

Si l'on opte pour une approche effective, on peut construire «à la main» le potentiel que l'on veut. De plus, on n'est pas obligé de se limiter à un seul champ scalaire: on peut en avoir deux, trois, cent... Si l'on part de théories de gravité quantique comme la théorie des cordes, le potentiel est donné par les champs scalaires de la théorie. Ces théories contiennent toujours un grand nombre de champs scalaires, ce qui laisse penser que l'inflation due à un seul champ scalaire est peu naturelle. Il découle de ces approches une grande diversité de scénarios inflationnaires, et des prédictions observationnelles variées.

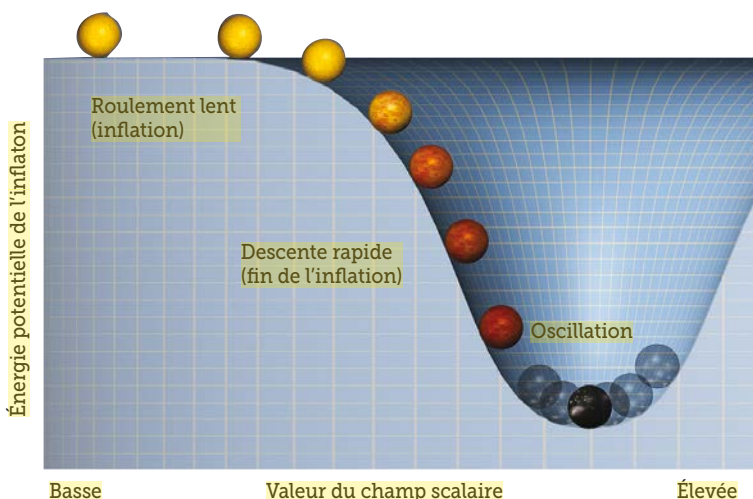
De quelles observations s'agit-il ?

Au-delà de l'étude précise de la déviation à l'invariance d'échelle, il existe deux contraintes observationnelles principales pour les scénarios d'inflation: les ondes gravitationnelles primordiales et les non-gaussianités. Les premières sont simples à comprendre, il s'agit de fluctuations de l'espace-temps, des ondes gravitationnelles, qui sont amplifiées pendant l'inflation. Leur détection serait une preuve que l'inflation a eu lieu. Malheureusement, elles n'ont rien à voir avec les ondes gravitationnelles détectées en 2015 et 2016 par la collaboration *LIGO-Virgo*, qui sont de nature astrophysique et produites par la coalescence de paires de trous noirs.

Les ondes gravitationnelles primordiales devraient avoir laissé une trace dans le fond diffus cosmologique: une polarisation de ce rayonnement selon une configuration particulière, nommée mode B. Plus le taux d'expansion de l'Univers pendant l'inflation est important, plus le mode B serait prononcé dans le fond diffus. Le satellite *Planck* n'a pas mis en évidence ce mode de polarisation. Les cosmologistes ont

LE MOTEUR DE L'INFLATION

Dans un scénario simple, un champ scalaire, nommé inflaton, a initialement une énergie potentielle élevée et «roule» lentement vers le minimum. Les équations montrent que l'Univers subit alors une phase d'inflation. Lorsque le champ roule plus vite dans la pente, c'est la fin de l'inflation. Le comportement de ce champ est mathématiquement analogue à celui d'une bille qui roule sur la pente douce d'un plateau et dévale ensuite la pente vers le fond d'une vallée.



donc pu mettre une limite supérieure sur l'échelle d'énergie de l'inflation, ce qui a permis d'exclure de nombreux scénarios. De futurs programmes d'observation du fond diffus devraient améliorer les contraintes sur le mode B.

Et les non-gaussianités ?

Dans la plupart des modèles inflationnaires, les caractéristiques statistiques des fluctuations quantiques amplifiées suivent une distribution quasi gaussienne (une distribution statistique en forme de cloche, très courante pour décrire des processus aléatoires). Les petits écarts à cette distribution sont les «non-gaussianités». Comme les fluctuations pendant l'inflation ont donné naissance aux fluctuations de température du fond diffus et aux grandes structures de l'Univers, on cherche à mesurer les non-gaussianités dans ces deux contextes. Pour l'instant, les données de *Planck* sont en parfait accord avec une distribution gaussienne.

Le télescope spatial *Euclid*, qui sera lancé en 2020, étudiera la distribution de matière dans l'Univers et les non-gaussianités. Cette analyse est difficile: la formation des grandes structures induit beaucoup d'effets dits non linéaires qui créent des non-gaussianités, et il sera donc délicat d'extraire celles d'origine primordiale. Un autre projet est d'enregistrer le rayonnement émis par la matière 150 millions d'années environ après l'émission du fond diffus cosmologique, pendant l'ère sombre, c'est-à-dire avant la formation des premières étoiles. Les effets non

BIBLIOGRAPHIE

A. Ijjas et al., **Pop goes the universe**, *Scientific American*, vol. 316, n° 2, février 2017.

S. Renaux-Petel et K. Turzynski, **Geometrical destabilization of inflation**, *Phys. Rev. Lett.*, vol. 117, 141301, 2016.

A. Bouquet, **L'inflation de l'Univers**, *Dossier Pour la Science*, n° 45, octobre-décembre 2004.

linéaires y sont moins importants. Mais ce rayonnement est très faible (il faudrait placer des antennes sur la face cachée de la Lune pour se protéger des émissions venant de la Terre!). Un tel projet ne verra le jour que d'ici 20 à 30 ans.

Pourquoi certains physiciens sont-ils pessimistes quant à la possibilité de tester l'inflation ?

Certains considèrent que l'inflation est une idée impossible à tester par les observations, ce qui est un critère essentiel pour une théorie scientifique. Ils ajoutent que la diversité des scénarios inflationnaires et leur flexibilité face aux contraintes empêchent le paradigme inflationnaire d'être réfutable.

Une polémique à ce sujet est récemment née d'un article paru dans *Scientific American* et cosigné par Paul Steinhardt. Ce chercheur de l'université de Princeton est l'un des pères de la théorie de l'inflation, mais il se montre aujourd'hui très critique. Il est sain que des scientifiques mettent le doigt sur des difficultés que les autres n'ont pas vues, cela fait partie du processus normal de la recherche. C'est en essayant de répondre à ce genre de critiques que l'on améliore une théorie ou, au contraire, que l'on se rend

Paul Steinhardt, c'est qu'à chaque « univers-bulle » correspondront des conditions initiales arbitraires, puisque les fluctuations ayant conduit à la formation de cet univers bulle sont aléatoires. Il est alors impossible de prédire les propriétés de notre propre univers.

C'est un cadre qui se prête à de nombreuses réflexions théoriques. Par exemple, Yasunori Nomura utilise cette idée d'inflation éternelle et de multivers pour dresser un parallèle avec l'interprétation de la mécanique quantique proposée par Hugh Everett en 1957 (voir l'article page 26 à 34). La plupart des cosmologistes pensent que la question de l'inflation éternelle est probablement importante sur le plan conceptuel, mais que ses conséquences pratiques sont limitées. C'est peut-être une erreur, mais au quotidien, on n'utilise pas cette notion d'inflation éternelle lorsqu'on cherche à résoudre les problèmes de l'inflation dans notre univers.

Le problème du réchauffement, par exemple ?

Oui, mais pas seulement. J'ai récemment publié un article qui, je pense, sera important pour étudier des scénarios inflationnaires réalistes. Jusqu'à présent, nous nous sommes uniquement concentrés sur la forme du potentiel. Mais j'ai montré que nous avons omis une autre propriété importante. Dans une théorie à plusieurs champs scalaires, la dynamique de ces derniers est soumise à la géométrie de l'espace interne dans lequel vivent ces champs et ne dépend donc pas uniquement du potentiel. L'une des conséquences de ce nouveau facteur est que l'inflation peut s'interrompre de façon prématurée. Pour chaque modèle donné, les limites de compatibilité des données observationnelles sont alors modifiées. On le voit, il y a encore beaucoup de chemin à faire pour comprendre vraiment l'inflation.

Existe-t-il des alternatives à l'idée d'inflation ?

Il y en a quelques-unes. Je n'en suis pas spécialiste, mais le consensus scientifique est qu'elles présentent toutes des problèmes plus importants que l'inflation. L'univers avec rebond, par exemple, décrit un univers qui se contracte puis repart en expansion. L'idée est séduisante dans la mesure où elle évite la singularité initiale du Big Bang. Selon Paul Steinhardt, ce modèle ne présente pas certains problèmes de conditions initiales de l'inflation. Mais aucune théorie physique ne permet à l'heure actuelle de réaliser de manière satisfaisante un tel rebond.

L'inflation cosmique reste aujourd'hui le scénario le plus satisfaisant sur les plans théorique et observationnel. Mais les physiciens adorent les surprises et guettent la nouvelle idée qui fera progresser notre compréhension du monde – même si elle doit détrôner l'inflation! ■

Propos recueillis par Sean Bailly

Il y a encore beaucoup de chemin à faire pour comprendre vraiment l'inflation

compte qu'elle n'est pas satisfaisante. L'article virulent de Paul Steinhardt a été mal accueilli par la communauté et une trentaine de scientifiques lui ont répondu dans une lettre ouverte. Les critiques de Paul Steinhardt sont multiples; il évoque notamment la non-testabilité de l'inflation et le problème de l'inflation éternelle.

De quoi s'agit-il ?

L'inflation éternelle est l'idée que si un champ scalaire provoque l'inflation, cette phase d'expansion ne peut pas prendre fin, parce qu'elle est alimentée par des fluctuations quantiques. Cela avait été découvert en 1983 par Paul Steinhardt et d'autres. L'expansion exponentielle ne s'interromprait que dans des régions limitées, où se formeraient des univers analogues au nôtre. Ces bulles forment un multivers. Le problème, pour