

lointaines suggère une deuxième hypothèse : l'existence d'une énergie supplémentaire qui agirait comme de la matière étrange, courbant l'espace comme le fait la matière ordinaire. Elle aplattirait l'espace, et la théorie de l'inflation n'aurait rien à craindre (voir *L'antigravité*, par Lawrence Krauss, page 42). Pour l'instant, les calculs sont imprécis parce qu'on connaît mal les poussières de l'Univers et la nature des étoiles qui explosent, et ils ne permettent pas de clore (si l'on peut dire) le débat.

Une troisième approche consiste à dissocier la géométrie de l'Univers du processus d'inflation, en incluant dans la théorie la description d'étapes antérieures à l'inflation. Ces idées, explorées au début des années 1980, ont été reprises et développées récemment.

On peut trouver un potentiel associé à l'inflaton tel que l'Univers soit légèrement courbé au lieu d'être complètement plat. Supposons ainsi que la

fonction énergie potentielle possède deux minima : un minimum local et un minimum absolu (voir la figure 2, à droite). Quand l'inflaton roule le long de la pente, l'Univers se dilate en restant uniforme (comme dans la théorie exposée précédemment). Puis l'inflaton reste bloqué dans le minimum local. Les physiciens nomment cet état un « faux vide » : toute la matière et tout le rayonnement du cosmos y sont presque totalement sous la forme de l'énergie de l'inflaton. Les fluctuations inhérentes à la mécanique quantique font osciller l'inflaton et lui permettent de s'échapper du minimum local, par effet tunnel (comme on libère une bille coincée dans un flipper en secouant l'appareil).

La sortie du minimum local, ou désintégration du faux vide, ne s'est pas produite partout en même temps. Elle a d'abord eu lieu en un point quelconque, puis elle s'est propagée. Le

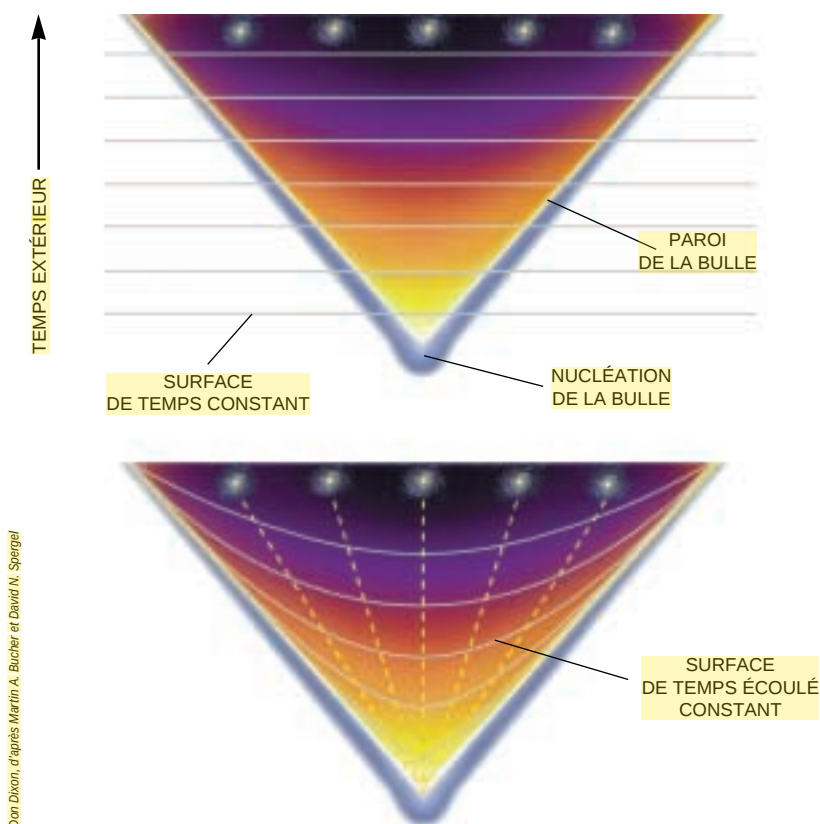
processus est comparable à l'ébullition d'une casserole d'eau : l'eau ne se transforme pas partout instantanément en vapeur. En raison du mouvement aléatoire des molécules, des bulles éparses se forment dans le liquide ; lorsque leur taille est inférieure à une taille critique, elles s'effondrent parce que la tension superficielle est supérieure à leur pression interne ; dans les bulles plus grosses, la pression à l'intérieur surmonte la tension superficielle, et ces bulles croissent.

Notre Univers est une bulle

Dans la désintégration du faux vide, les fluctuations quantiques ont joué le rôle du mouvement moléculaire aléatoire, provoquant la nucléation de bulles de vrai vide. Une force analogue à la tension superficielle a détruit la plupart des bulles, mais quelques-unes ont tant grossi que les effets quantiques sont devenus négligeables. Rien ne s'y opposant, le rayon de ces bulles a continué de croître à la vitesse de la lumière. Quand la paroi externe d'une bulle passe par un point de l'espace, l'inflaton en ce point est délogé du minimum local et il reprend sa descente vers le minimum absolu d'énergie potentielle : au sein de la bulle, l'espace se dilate comme dans la théorie de l'inflation. L'intérieur de cette bulle correspond à notre Univers. Le moment où l'inflaton a quitté le minimum local correspond au Big Bang.

Ce dernier s'est donc produit à des instants différents aux points situés à des distances différentes du centre de nucléation de la bulle. L'inflaton peut alors être utilisé comme un chronomètre : sa valeur en un point de l'espace indique le temps écoulé depuis le Big Bang en ce point. L'inflaton est maximal sur la paroi de la bulle et décroît régulièrement vers le centre. Mathématiquement, la valeur de l'inflaton reste constante sur des surfaces tridimensionnelles de forme hyperbolique (voir la figure 3).

La valeur de l'inflaton n'est pas qu'une grandeur mathématique. Elle a déterminé les propriétés fondamentales de l'Univers au sein de la bulle : sa densité moyenne et la température du rayonnement cosmologique diffus (aujourd'hui égale à 2,7 kelvins). Sur une surface hyperbolique, la densité, la température et le temps écoulé sont constants. Ces surfaces sont ce que les observateurs



Don Dixon, d'après Martin A. Bucher et David N. Spergel

3. UN UNIVERS OUVERT DANS UN ESPACE FERMÉ ? Ce serait possible si l'espace et le temps étaient perçus différemment en dehors (*en haut*) et à l'intérieur (*en bas*) d'une bulle d'Univers. Ici, le temps, mesuré par des observateurs extérieurs, augmente vers le haut de chaque ligne. Par définition, l'espace est n'importe quelle ligne ou surface qui relie des points à un certain temps (*lignes horizontales du schéma supérieur*). La bulle a une courbure sphérique et est donc fermée. Les observateurs intérieurs, toutefois, ne sont conscients que du temps écoulé, l'intervalle depuis que le bord de la bulle a atteint un point donné. Quand le temps écoulé augmente, la température diminue, ce qui entraîne un changement physique (*chaud en jaune ; froid en noir*). Les surfaces de temps écoulé constant sont des hyperboles, qui se courbent vers le haut et ne touchent jamais la paroi de la bulle. Les points internes s'éloignent mutuellement, à cause de l'expansion cosmique (*lignes pointillées*). L'Univers a une courbure hyperbolique et est donc ouvert.