

remontant jusqu'à une fraction de seconde après le Big Bang – à partir de quelques équations (dont celles de la relativité générale) et cinq paramètres indépendants. Ces paramètres incluent les densités de la matière ordinaire, de la matière noire et de l'énergie sombre (dont nous parlerons plus en détail plus loin), ainsi que l'amplitude et la forme des fluctuations quantiques dans l'Univers primordial. Ce modèle cosmologique décrit avec succès de nombreuses observations qui correspondent à des milliers de points de mesure, couvrant des échelles allant d'un million à dix milliards d'années-lumière, jusqu'à la limite de l'Univers observable.

Cependant, ces succès observationnels ne signifient pas que notre tâche est terminée. L'histoire de l'Univers est criblée de trous gênants. Nous sommes confrontés à des questions fondamentales sur la nature du cosmos, des problèmes auxquels jusqu'à maintenant nous n'avons pas été capables de répondre.

Par exemple, si l'on considère le contenu de l'Univers, les observations cosmologiques ont montré que la matière ordinaire ne représente que l'équivalent de 5 % de la densité totale d'énergie de l'Univers. La matière noire, une forme inconnue de matière dont on déduit l'existence à partir de ses effets gravitationnels, représente 25 %. Et les 70 % restants de l'Univers sont constitués d'énergie sombre, de nature non identifiée et qui serait à l'origine de l'accélération de l'expansion de l'Univers (alors que l'attraction gravitationnelle nous faisait initialement penser que l'expansion de l'Univers devait ralentir).

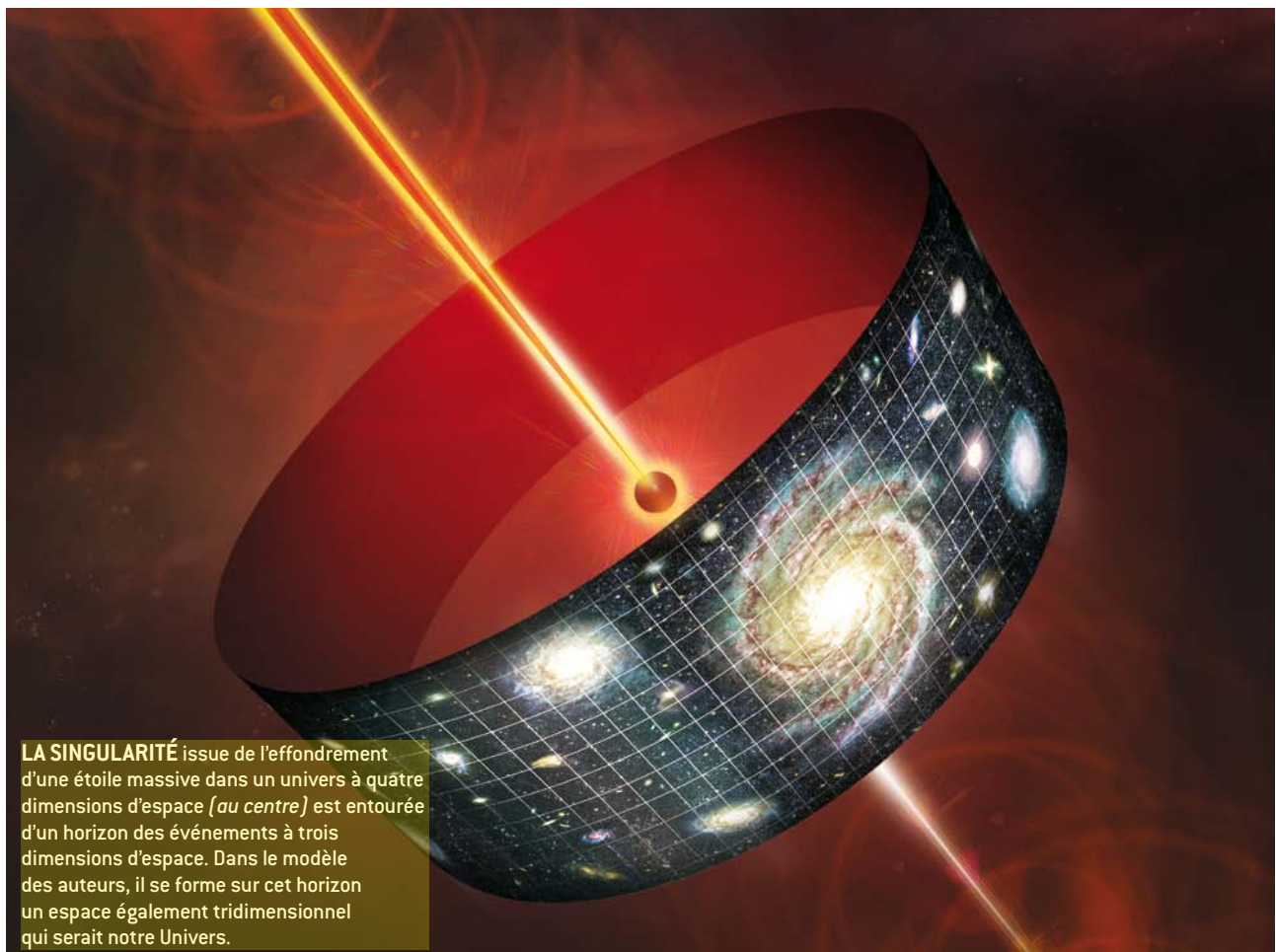
Le Big Bang : beaucoup de questions

Que sont exactement la matière noire et l'énergie sombre, et pourquoi représentent-elles respectivement 25 % et 70 % de l'Univers ? Il existe diverses hypothèses quant à leur nature, mais cela n'explique pas pourquoi leurs caractéristiques doivent être

si finement ajustées pour être en accord avec les observations.

Le contenu de l'Univers n'est pas la seule source de questions. Depuis des décennies, les cosmologistes étudient le rayonnement du fond diffus cosmologique, rayonnement émis alors que l'Univers était âgé de 370 000 ans et qui garde l'empreinte des fluctuations de densité de l'Univers primordial. Les observations récentes du fond diffus par le satellite *Planck* de l'Agence spatiale européenne montrent que la température correspondant à ce rayonnement est uniforme dans tout le ciel ; les variations sont de faible amplitude, de l'ordre d'une partie pour 60 000. En considérant les distances qui séparent les différentes régions et la vitesse d'expansion de l'Univers, certaines de ces régions n'ont été à aucun moment en contact ; comment alors expliquer cette uniformité ?

L'étude du fond diffus cosmologique montre aussi que l'Univers a une courbure spatiale plate à grande échelle (géométrie



LA SINGULARITÉ issue de l'effondrement d'une étoile massive dans un univers à quatre dimensions d'espace [au centre] est entourée d'un horizon des événements à trois dimensions d'espace. Dans le modèle des auteurs, il se forme sur cet horizon un espace également tridimensionnel qui serait notre Univers.

Kerri Brown, Mandelbrot Studios

où la somme des angles d'un triangle vaut 180 degrés). Pourquoi l'Univers est-il dans cette configuration si particulière ? Pourquoi sa géométrie ne serait-elle pas sphérique ou hyperbolique (configurations où la somme des angles d'un triangle est, respectivement, supérieure ou inférieure à 180 degrés) ?

Inflation énigmatique

Peut-être pourrions-nous espérer des réponses si nous comprenions mieux le Big Bang. Il est très difficile en particulier d'imaginer comment l'Univers des premiers instants après le Big Bang a pu donner lieu à celui que nous observons aujourd'hui – un cosmos à la température presque uniforme et dont l'espace est euclidien, c'est-à-dire de courbure nulle.

L'inflation cosmique, cette phase d'expansion rapide dans les premiers instants de l'Univers, est une approche efficace pour expliquer la structure à grande échelle de l'Univers. L'inflation aurait tendance à «aplatir» l'Univers, lissant toutes les régions incurvées de l'espace-temps ; en raison de cette expansion rapide, certaines régions de l'Univers, qui semblaient trop éloignées pour avoir été en contact, ont pu l'être, ce qui explique l'homogénéité de température du fond diffus cosmologique. Et, telle une loupe cosmique, l'inflation a amplifié les minuscules fluctuations quantiques de densité jusqu'à des tailles cosmiques. Ces fluctuations sont devenues les germes à partir desquels des structures telles que les galaxies et les étoiles ont émergé.

On considère généralement l'inflation comme un paradigme très fructueux. Mais

comment l'inflation s'est-elle déclenchée ? Beaucoup d'énergie était nécessaire. Selon le modèle standard, l'Univers primordial aurait pu contenir cette énergie sous la forme d'inflatons, des particules hypothétiques. Mais l'inflaton ne résout pas pour autant nos problèmes ; il les repousse juste d'un cran.

Il nous manque aussi une description satisfaisante de l'histoire de notre cosmos avant l'époque inflationnaire, ces premiers 10^{-36} seconde après le Big Bang. Ici, les phénomènes quantiques deviennent si importants que les équations de la relativité générale ne sont plus appropriées. Une théorie quantique de la gravitation est requise, et elle manque encore.

Le plus grand défi de la cosmologie est de comprendre le Big Bang lui-même, l'émergence subite et violente de l'espace, du temps et de toute la matière à partir

AVANT LE BIG BANG

Dans la théorie standard, le Big Bang est parti d'une singularité, un état de densité infinie qui a donné naissance à l'Univers tout entier. Mais les singularités sont imprévisibles ; les lois de la physique ne s'y appliquent plus, et il n'y a pas de raison de penser qu'une singularité engendre l'Univers que l'on connaît plutôt qu'un autre. Les auteurs postulent donc plutôt que l'Univers a vu le jour quand une étoile d'un univers quadridimensionnel s'est effondrée en trou noir. Notre Univers serait protégé de la singularité au cœur de ce trou noir par un horizon des événements tridimensionnel.

