

d'un état infiniment dense que l'on nomme une singularité. En présence d'une singularité, toutes les lois de la physique deviennent caduques. Nous n'avons pas les outils pour décrire ce qui s'y passe et nous n'avons aucune raison de penser qu'une singularité engendrerait un univers ordonné comme celui que nous voyons. On s'attendrait plutôt à l'émergence d'un univers extrêmement chaotique, dont le fond diffus cosmologique serait marqué par d'énormes fluctuations de température d'un point à un autre. L'inflation serait-elle suffisante pour lisser les fluctuations? De surcroît, si ces fluctuations sont trop grandes, l'inflation pourrait-elle s'amorcer? Les problèmes d'une singularité ne peuvent pas être résolus par la seule inflation.

Les singularités sont étranges, mais elles ne nous sont pas tout à fait incon-

Au niveau d'une singularité, les lois de la physique sont caduques. Nous n'avons pas les outils mathématiques pour décrire ce qui s'y passe.

nues. En effet, il s'en forme également au centre des trous noirs, ces vestiges d'étoiles géantes effondrées. Toutes les étoiles sont des fournaies nucléaires où fusionnent les éléments légers (principalement de l'hydrogène). Ce processus de fusion nucléaire alimente une étoile pendant la majeure partie de son existence et s'oppose à l'effondrement gravitationnel. Cependant, vers la fin de sa vie, l'astre a épuisé tout son combustible nucléaire et la gravité prend le dessus. Une étoile au moins dix fois plus massive que le Soleil s'effondre sur elle-même avant d'exploser en supernova. Si l'étoile est encore plus grosse (plus de 15 masses solaires), la supernova laisse derrière elle un cœur dense qui connaît un effondrement que rien n'arrête, se contractant jusqu'à un point de taille nulle: une singularité qui forme un trou noir.

La singularité du trou noir est cachée par une surface bidimensionnelle que l'on nomme l'horizon des événements. Ce dernier marque une limite de non-retour: toute matière qui franchit cette frontière ne peut plus s'échapper du trou noir, car il lui faudrait une vitesse supérieure à celle de la lumière. La matière est alors inexorablement attirée vers la singularité. L'intérieur de l'horizon des événements est coupé du reste de l'Univers.

Un horizon pour le Big Bang

Comme avec la singularité du Big Bang, les lois de la physique ne s'appliquent plus à la singularité du trou noir. Mais contrairement au Big Bang, un trou noir est entouré d'un horizon des événements. Cette surface se comporte comme une protection: elle empêche toute information concernant la singularité de fuir. L'horizon des événements du trou noir protège les observateurs extérieurs des effets catastrophiquement imprévisibles de la singularité (on parle de censure cosmique).

Enveloppée par un horizon des événements, la singularité ne perturbe pas les lois de la physique qui décrivent et prédisent tout ce que nous observons. Vu de loin, un trou noir est une structure très simple, lisse et uniforme, définie par sa masse, son moment cinétique et sa charge électrique. Les physiciens disent de façon imagée que «le trou noir n'a pas de cheveux»: il n'a aucun signe distinctif en dehors des trois grandeurs citées.



Notre Univers tridimensionnel correspond ici à l'enveloppe bidimensionnelle de la figure.

George Ratzek

En revanche, la singularité du Big Bang (telle qu'on la comprend) n'est pas masquée par un horizon des événements. C'est ce constat qui nous a mis sur la piste de notre modèle. Nous avons cherché un moyen de nous abriter de la singularité du Big Bang et de son imprévisibilité catastrophique, peut-être avec quelque chose qui s'apparente à un horizon des événements.

Effondrement extradimensionnel

Dans notre scénario, l'enveloppe qui entoure la singularité du Big Bang se distingue d'un horizon des événements par une caractéristique essentielle. Puisque nous percevons que notre Univers a trois dimensions spatiales et que celui-ci émerge du Big Bang, l'enveloppe de la singularité au cœur du Big Bang doit également avoir trois dimensions spatiales, et non deux comme l'horizon des événements d'un trou noir. Mais pour que l'horizon des événements soit tridimensionnel, l'objet qui s'effondre en trou noir doit avoir une dimension d'espace de plus, c'est-à-dire qu'il doit avoir quatre dimensions. Ce scénario implique donc que l'objet en question existe dans un univers doté de quatre dimensions d'espace.

L'idée de modèles à dimensions supplémentaires, où le nombre de dimensions d'espace excède les trois qui nous sont évidentes, est presque aussi ancienne que la relativité générale elle-même. Elle a été initialement proposée par le physicien allemand Theodor Kaluza en 1919, et étendue par le Suédois Oskar Klein dans les années 1920. Leur idée initiale était d'unifier dans un même formalisme l'électromagnétisme et la relativité générale. Cette piste a finalement été abandonnée et l'idée de dimensions supplémentaires n'a retrouvé un réel élan que dans les années 1980, avec le développement de la théorie des cordes. Plus récemment, les scientifiques l'ont utilisée pour construire une cosmologie des univers dits branaires.

L'idée essentielle d'un univers branaire est que notre Univers tridimensionnel est un sous-univers qui s'inscrit dans un univers plus vaste, ayant quatre dimensions spatiales ou plus. L'Univers tridimensionnel est ce qu'on nomme une brane, et l'univers de dimensionnalité supérieure est l'espace complet, ou *bulk* en anglais. Toutes les formes connues de matière et d'énergie

Les modèles cosmologiques originaux enrichissent la

L'Univers pourrait avoir plus de trois dimensions d'espace. L'idée n'est pas nouvelle : elle remonte aux années 1920. Ce n'est que plus récemment que pléthore de modèles cosmologiques à dimensions supplémentaires ont été imaginés.

Le scénario envisagé par les auteurs de l'article s'inscrit dans cette lignée, tout en présentant son lot d'idées originales. L'un des points forts est sa façon de traiter la singularité primordiale. Comme les lois physiques sont incapables de rendre compte du comportement d'une singularité, il est souhaitable d'éviter que celle-ci influe sur la structure actuelle de l'Univers. Dans la cosmologie standard, cet écueil est contourné par une phase d'inflation, qui n'a besoin que d'une petite portion d'espace

assez régulière pour opérer et qui va grossir considérablement pour donner naissance à la vaste région qui englobe notre Univers observable. Il est en général admis que ces conditions favorables à l'émergence d'une phase d'inflation ne préjugent pas de façon critique de la physique de la singularité, mais on peut tout de même considérer cette singularité comme problématique.

Ici, on suppose que la singularité du Big Bang résulte d'un effondrement gravitationnel dans un espace-temps à cinq

dimensions. Cela ne résout pas notre incapacité à décrire une singularité, mais, au moins, cette singularité-là ne peut influencer sur le devenir de l'Univers.

Qu'en est-il du point de vue observationnel ? Technique-ment, les fluctuations de densité issues du modèle des auteurs sont invariantes d'échelle, c'est-à-dire que leur amplitude typique ne dépend pas de leur longueur d'onde. Or les données du satellite *Planck* indiquent que les fluctuations présentes dans l'Univers sont presque, mais pas tout à fait, invariantes d'échelle. Si l'écart à l'invariance d'échelle est effectivement faible (les 4 % mentionnés par les auteurs), il

sont emprisonnées dans notre brane à trois dimensions. L'exception est la gravité, qui qui se propage dans l'ensemble du bulk.

Dans notre scénario, le bulk est notre univers à quatre dimensions. Il est rempli d'objets tels que des étoiles, des galaxies quadridimensionnelles, etc. Une de ces étoiles en fin de vie pourrait alors s'effondrer et former un trou noir, suivant le même mécanisme qui est à l'œuvre dans notre Univers à trois dimensions.

À quoi ressemblerait un trou noir quadridimensionnel ? Il serait lui aussi doté

CE MODÈLE N'A PLUS BESOIN de l'inflation, car l'univers à quatre dimensions d'espace qu'il suppose est antérieur au Big Bang.

d'un horizon des événements, une surface de non-retour ne laissant s'échapper aucune matière ou lumière. Mais au lieu d'être une surface bidimensionnelle comme pour les trous noirs ordinaires, cet horizon des événements serait une région tridimensionnelle.

Plus intéressant, en modélisant l'effondrement d'une étoile quadridimensionnelle à l'aide du principe holographique, nous avons remarqué que, dans des circonstances très diverses, la matière éjectée lors de l'effondrement stellaire peut former une

brane à trois dimensions spatiales sur cet horizon des événements tridimensionnel. Et cette brane est en expansion lente. Notre Univers serait cette brane à trois dimensions spatiales, et correspondrait à un hologramme d'un astre quadridimensionnel s'effondrant en trou noir. La singularité du Big Bang cosmique nous est alors cachée, enfermée pour toujours derrière un horizon des événements tridimensionnel.

Notre modèle a un certain nombre d'arguments en sa faveur, à commencer par le fait qu'il élimine la singularité nue qui a donné naissance à l'Univers. Mais qu'en est-il des autres problèmes cosmologiques, tels que la géométrie presque plate et la grande uniformité du cosmos ? Notre scénario n'a plus besoin de l'inflation : l'univers quadridimensionnel étant

plus ancien que ne l'impose le modèle du Big Bang pour notre Univers, tous les points de l'univers ont pu être en contact et auraient eu le temps d'atteindre l'équilibre (voir l'encadré page 28). Si l'univers complet était homogène, alors notre Univers à trois dimensions spatiales a pu hériter de cette homogénéité. Par ailleurs, plus la masse de l'étoile quadridimensionnelle est importante, plus la brane qu'elle engendre a une géométrie plate, d'où l'on peut conclure que notre Univers est