

Expansion de l'Univers

Pourquoi elle accélère

Découverte en 1998, l'accélération de l'expansion de l'Univers serait due à une mystérieuse énergie noire. Mais de celle-ci, nous ignorons tout. Voilà pourquoi des astrophysiciens avancent aujourd'hui d'autres hypothèses afin de résoudre l'une des plus embarrassantes énigmes de la cosmologie.

Stéphane Fay



→ L'énergie
sombre
qu'est-ce
que c'est ?
Écoutez notre podcast
sur cieletespaceradio.fr



J.-C. Cuillandre/CEHT

L'EXPANSION de l'Univers accélère ! Si le fait semble acquis par des observations qui remontent à 1998, sa cause demeure toujours sujette à débat. Plusieurs astrophysiciens travaillent actuellement sur une alternative à la seule explication proposée : la présence d'une mystérieuse énergie sombre qui s'opposerait aux effets de la gravitation. Thomas Buchert, de l'observatoire de Paris, et Syksy Räsänen, de l'université d'Helsinki, sont de ceux-là. Pour eux, il se pourrait que l'expansion accélérée ne résulte que de la formation de grandes structures... Sans une once d'énergie sombre ! Rappelons les faits...

Le constat initial : l'Univers est en expansion

L'Américain Edwin Hubble montre en 1929 que l'Univers est en expansion. Comment ? En observant des galaxies lointaines (qu'on appelait encore "nébuleuses"). Il réalise que plus celles-ci sont distantes, plus elles s'éloignent vite de nous. Ce fut la première preuve observationnelle d'une expansion de l'espace, déjà prédite par le Russe Alexander Friedmann en 1922 et le Belge Georges Lemaître en 1927, à partir des équations de la théorie de la relativité générale, formulée par Albert Einstein.

Pour comprendre cette interprétation des observations de Hubble, imaginez un ballon de baudruche avec des points dessinés dessus. Quand le ballon gonfle, tous les points s'éloignent les uns des autres. C'est exactement ce qu'Edwin Hubble note sur des galaxies qui semblent nous fuir. Ainsi, quel que soit l'endroit de l'Univers où l'on se trouve, si l'on observe des galaxies lointaines, on les voit s'éloigner (de même que, quel que soit le point du ballon que vous considérez, lorsque le ballon gonfle, les autres points s'écartent de lui). En mesurant les distance et vitesse d'éloignement de 46 galaxies, Hubble trouve que le rapport entre ces deux quantités est une constante valant approximativement 500 km/s/Mpc [NDLR : 1 parsec vaut 3,26 années-lumière]. Une valeur élevée due à des erreurs dans l'évaluation des

distances des galaxies. Aujourd'hui, les plus récentes mesures place la constante de Hubble aux alentours de 71 km/s/Mpc. Cela signifie que chaque cube d'espace de 1 Mpc de côté grossit à chaque seconde de 71 km...

Il est important de comprendre que, contrairement au ballon, l'espace n'est contenu *a priori* dans rien. Par conséquent, son expansion ne se fait pas dans quelque chose. Elle ne fait qu'accroître avec le temps les distances entre les objets contenus dans l'espace. L'expansion permet aussi de conceptualiser le big bang. Si l'on remonte le temps, les distances entre les différentes galaxies doivent décroître jusqu'au moment où tout l'Univers est contenu dans un point, la matière y étant infiniment dense et chaude : c'est l'instant du big bang. Autrement dit, le big bang est le moment où l'expansion de l'Univers démarre — et en aucun cas une sorte d'explosion.

Jusqu'en 1998, l'expansion est en perte de vitesse

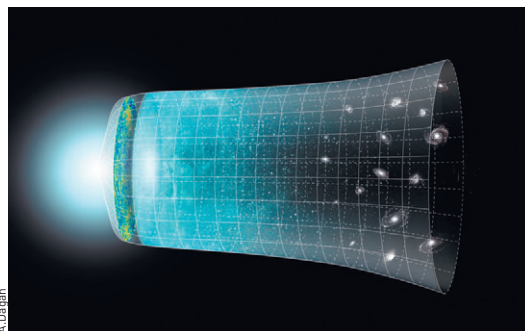
Deux ingrédients sont entre autres nécessaires à la description de l'Univers : son contenu et sa géométrie. Jusqu'en 1998, les cosmologistes pensaient que l'Univers ne contenait que deux sortes de matière : l'une ordinaire et l'autre, noire. La matière ordinaire est celle dont sont faites les pages de votre journal préféré. La matière noire a, en revanche, été inventée pour rendre compte d'une vitesse de révolution trop élevée des étoiles au sein des galaxies. En effet, de la même manière que si ces étoiles étaient sur un tourniquet, une rotation trop rapide devraient les éjecter de leurs galaxies. Or ce n'est pas le cas ! La masse visible des galaxies étant trop faible pour retenir ces étoiles par sa force de gravitation, les astronomes ont alors supposé qu'une matière noire, invisible, les empêchait de s'éparpiller dans l'espace. Ainsi, rempli de matières noire et ordinaire, l'Univers est en expansion décélérée, selon les prédictions de la relativité générale.

Maintenant qu'entend-on par géométrie de l'Univers ? Que celle-ci peut être "plate" comme une feuille de papier (c'est la géométrie d'Euclide apprise à l'école, à courbure nulle), sphérique comme un ballon (la courbure est positive) ou hyperbolique comme une selle de cheval (la courbure est négative).



Plus la distance des galaxies est grande, plus elles s'éloignent vite. Cette découverte de l'Américain Edwin Hubble, en 1929, est interprétée comme la preuve de l'expansion de l'Univers.

La géométrie influe sur le destin de l'Univers en fonction de son contenu, ici des matières ordinaire et noire. Les cosmologistes définissent la densité critique comme étant la densité de matière qui permet à l'Univers d'être "plat" (ou plus exactement à géométrie plate). Dans ce premier cas, l'expansion de l'Univers ralentit et finira par s'arrêter au bout d'un temps infini. Si la densité de matière est inférieure à la densité critique, la géométrie de l'Univers est sphérique : l'expansion ralentit aussi mais ne s'arrête jamais. Au-delà de la densité critique, la géométrie de l'Univers est hyperbolique. Dans ce

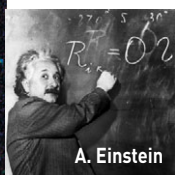


Au début (à gauche), tout l'Univers est concentré en un point infiniment dense et chaud depuis lequel son expansion commence : c'est le big bang. Puis l'Univers se refroidit sous l'effet de l'expansion, la matière se condense et donne naissance aux galaxies.

Au fur et à mesure que le temps passe, les galaxies s'éloignent de nous sous l'effet de l'expansion de l'Univers. Si celle-ci continue d'accélérer, elles quitteront un jour notre horizon, disparaissant au-delà de l'Univers observable.

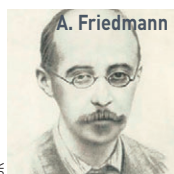
Petite histoire de l'expansion

1916 Albert Einstein publie sa théorie de la gravitation connue sous le nom de relativité générale.



1917 Einstein introduit une constante cosmologique dans ses équations afin qu'elles prédisent un Univers statique.

1922 Alexander Friedmann publie des solutions de la relativité générale décrivant un Univers en expansion.



1927 Indépendamment de Friedmann, Georges Lemaître publie aussi des solutions décrivant un Univers en expansion. Pour certaines, l'expansion est accélérée par la présence d'une constante cosmologique.



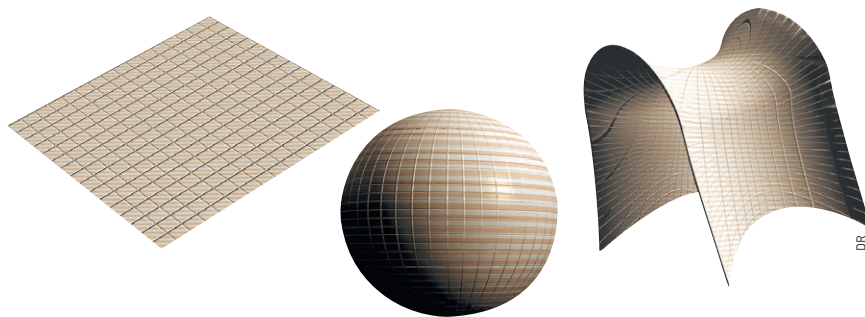
1929 Edwin Hubble montre par des observations que l'Univers est en expansion.

1933 Einstein qualifie la constante cosmologique de plus grande erreur qu'il ait faite dans sa vie.

1998 Les cosmologistes pensent que l'expansion de l'Univers décélère, jusqu'à ce que deux équipes indépendantes, conduites respectivement par Adam Riess et Saul Perlmutter, prouvent le contraire à l'aide de supernovae.



2006 Prenant en compte les effets de la formation des structures, Syksy Räsänen montre que ce phénomène pourrait éventuellement expliquer l'accélération de l'expansion.



La géométrie de l'Univers peut être plate, sphérique ou hyperbolique. Dans la théorie de la relativité générale, quand l'Univers est rempli de matière ordinaire et de matière noire, la géométrie dépend de la densité de ces matières, relativement à la densité critique définissant un Univers plat.

cas, l'expansion connaîtra un maximum puis l'Univers commencera à se contracter, jusqu'à concentrer toute sa matière en un point : c'est ce que l'on appelle le *big crunch*. Les observations semblent montrer que notre Univers est quasiment plat. Ainsi, jusqu'en 1998, pour les cosmologistes, l'Univers est plat et ne contient qu'un mélange de matières ordinaire et noire ralentissant son expansion : c'est le modèle dit d'Einstein-De Sitter.

1998 : les observations qui jettent le trouble

En 1998, c'est une révolution : des observations montrent que, contrairement aux idées bien établies, l'expansion de l'Univers est en train d'accélérer.

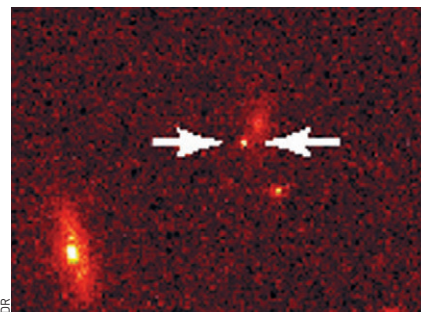
Tout part d'explosions stellaires d'un genre particulier : les supernovae de type Ia. Celles-ci sont produites par des couples d'étoiles, généralement une naine blanche et une géante rouge. La naine attire la matière de la géante et accroît sa masse. Lorsque celle-ci approche ou atteint 1,44 fois la masse du Soleil (limite appelée "masse de Chandrasekhar"), l'étoile explose en supernova. Or, quelle qu'elle soit, cette supernova brille toujours avec à peu près la même intensité : 5 milliards de fois plus que le Soleil. Connaissant cette luminosité absolue, il est alors possible d'évaluer la distance de n'importe quelle supernova de type Ia en la comparant avec son éclat observé. C'est un peu comme de connaître la luminosité d'une ampoule : plus on l'éloigne, plus son éclat faiblit et vous pouvez ainsi évaluer sa distance.

Or, en mesurant les distances de ces supernovae, les astronomes s'aperçoivent que celles-ci sont plus loin que prévu par l'hypothèse d'une expansion qui décélère.

En effet, l'expansion éloigne de nous ces explosions stellaires apparues dans des galaxies lointaines. Or, si elles sont plus loin que prévu, l'expansion les a donc éloignées plus vite. Elle est donc plus rapide que prévu et, concluent les cosmologistes, elle accélère.

La solution : l'invention de l'énergie sombre

Mais qu'est-ce qui accélère l'expansion ? Pas la matière ordinaire ni la matière noire puisque toutes deux tendent au contraire



Voici à quoi ressemble une supernova dans un télescope : un gros point lumineux dont l'éclat surpasse parfois celui de sa galaxie hôte.

à la décélérer. En revanche, selon la relativité générale, si l'Univers contenait une troisième composante sous la forme d'une énergie ayant une pression négative, l'expansion serait alors accélérée. Ainsi naît l'hypothèse d'une énergie sombre. À présent, le terme "énergie sombre" regroupe un vaste ensemble de théories. Mais la mieux acceptée de toutes — car la plus simple — est une énergie sombre sous la forme d'une *constante cosmologique*. Cette idée n'est pas nouvelle. En 1927, le Belge Georges Lemaître fut le premier à se servir d'une telle constante pour élaborer un Univers à l'expansion

accélérée. En 1934, il l'interprète comme une énergie du vide, intuition confirmée en 1967 par le Russe Yakov Zel'dovich.

Le terme "énergie du vide" peut paraître un brin contradictoire. De quoi s'agit-il ? De même qu'une droite parfaite n'existe pas mais n'est qu'un concept mathématique, le vide parfait n'existe pas non plus. À chaque instant, des paires de particules et d'antiparticules surgissent du vide avant de disparaître. Le vide possède donc une énergie non nulle, que l'on peut représenter à l'aide d'une constante cosmologique, ou encore d'un gaz dont la densité serait constante dans le temps et l'espace.

Mais, problème, la valeur de la densité d'énergie du vide calculée par les physiciens des particules au début de l'Univers est complètement différente de celle dont les cosmologistes ont besoin pour expliquer l'accélération de l'expansion : 10^{91} g/cm³ pour les premiers contre 10^{-29} g/cm³ pour les seconds. Un désaccord plutôt embarrassant, s'agissant d'une constante... Aussi des voies alternatives sont envisagées, comme par exemple une énergie sombre dont la densité varierait avec le temps et qui serait

ainsi capable de simuler une constante cosmologique... variable !

L'autre solution : un Univers sans énergie sombre

Et si l'accélération de l'expansion s'expliquait tout bêtement par une simplification abusive de notre vision de l'Univers plutôt que par l'existence d'une mystérieuse énergie sombre ? C'est l'idée développée par Thomas Buchert, professeur invité à l'observatoire de Paris. Au lieu de postuler un Univers aujourd'hui parfaitement homogène, comme le font habituellement les cosmologistes, Thomas Buchert prend en compte les effets des inhomogénéités de la distribution de matière dans l'Univers. Celle-ci se répartit en effet en longs filaments et amas enveloppés d'immenses vides. En moyenne, pour de grands volumes, la répartition de la matière dans l'Univers paraît homogène. Mais d'habitude, les chercheurs vont plus loin en supposant un Univers parfaitement homogène. Une perfection dont s'abolit Thomas Buchert. "On retrouve alors les équations de la relativité générale avec des fluctua-



TROIS QUESTIONS À...

Syksy Räsänen

Syksy Räsänen a obtenu son doctorat en 2002 à l'université d'Helsinki. Après un postdoc de trois ans à Oxford, il travaille actuellement



DR

au Cern. Il est l'auteur d'un nouveau modèle pour décrire l'expansion de l'Univers.

Ciel & Espace :
Chaque semaine,
une nouvelle théorie

d'énergie sombre est inventée. Ne trouvez-vous pas que la cosmologie marche sur la tête ?

Syksy Räsänen : On ne peut pas expliquer la prolifération des modèles d'énergie sombre sans tenir compte de facteurs sociologiques. Afin d'obtenir un poste ou des crédits, les chercheurs doivent publier beaucoup et rapidement des articles qu'ils sont sûrs de voir accepter. La conséquence de cette pression est une tendance à être moins créatif, à suivre les courants déjà établis sans chercher à en faire une critique.

C&E : Votre explication de l'accélération de l'expansion par la formation des structures a-t-elle été difficile à faire accepter ?

S. R. : Non, si vous expliquez les choses raisonnablement, précautionneusement, la communauté scientifique est plutôt ouverte d'esprit. Mais faire quelque chose d'original prend du temps et peut ne pas aboutir à grand-chose de publiable — un risque difficile à courir, tant la concurrence entre chercheurs est forte. De plus, certains sont dogmatiques : si une idée nouvelle n'entre pas dans leur cadre de pensée, ils la rejettent parfois de manière assez agressive.

C&E : Pour vous, quel est le meilleur modèle expliquant l'accélération de l'expansion ?

S. R. : Celui utilisant une constante cosmologique. Il est physiquement motivé : du point de vue des équations de la relativité, la constante correspond à une énergie du vide connue et bien étudiée en physique des particules. Le fait qu'il y ait un désaccord sur sa valeur obtenue dans l'interprétation cosmologique ou dans l'interprétation de la physique des particules pourrait tout simplement provenir de ce que l'on ne sait pas exactement comment la calculer.



Quelle est la nature de l'énergie sombre ? Pour l'instant, l'observation des galaxies (ici, les Antennes) n'a pas permis aux astronomes d'apporter un début de réponse. L'énergie sombre, malgré ses effets mesurables, demeure totalement théorique.



S. Numazawa/APB

tions dues aux effets des inhomogénéités", explique le chercheur. Utilisant les équations de Buchert, Syksy Räsänen, du Cern, parvient à démontrer qu'en moyenne l'expansion de l'Univers peut accélérer (c'est cette moyenne que l'on considère lorsqu'on mesure la luminosité et la distance des supernovae, dont la lumière peut traverser la moitié de l'Univers observable), bien qu'elle soit décélérée localement. *"Du travail reste à faire pour vérifier si cette accélération moyenne due aux inhomogénéités est bien en accord avec l'accélération observée"*, tempère Räsänen.

Pour comprendre ce paradoxe, Räsänen a imaginé un modèle d'Univers très simplifié, composé d'une région vide et d'une région pleine de matières noire et ordinaire, dite "surdense". Aucune énergie sombre n'est présente. Par conséquent, la première région subit une expansion décélérée entraînant la formation d'un grand vide. Quant à la seconde, elle est d'abord en expansion décélérée puis se contracte sous l'effet de la matière qu'elle contient pour former une structure, tel un amas de galaxies. Donc, au sein de chaque région, c'est-à-dire localement, l'expansion est toujours décélérée. Maintenant, qu'en est-il de l'expansion moyenne de l'Univers ? Elle n'est pas la somme des

Contrairement à ce qui est habituellement supposé en cosmologie, l'Univers n'est pas parfaitement homogène mais structuré en amas et en filaments de matière. Les équations dérivées par Thomas Buchert tiennent compte de ces imperfections.

expansions de chaque région car ces régions diffèrent en taille. C'est un peu comme de prendre un grand verre d'eau à 10°C et un petit à 20°C. La température moyenne de l'ensemble n'est pas de 15°C, mais dépend du volume d'eau de chaque verre. Quand les deux régions sont en expansion décélérée, le taux moyen d'expansion ralentit. Mais lorsque la région surdense entre en contraction, le taux moyen d'expansion accélère puisque, dans le même temps, la taille de la région surdense diminue, influençant de moins en moins le ralentissement du taux moyen d'expansion.

Pour reprendre l'image des verres d'eau, imaginez que vous commenciez à mélanger deux verres d'eau de même taille, l'un avec une eau à 20°C et l'autre avec une eau à 10°C. Vous obtenez un mélange à 15°C. Maintenant, recommencez l'expérience avec deux autres verres, le second étant plus petit que le premier, vous obtiendrez un mélange dont la température est supérieure à 15°C. C'est pareil pour

l'expansion. La région surdense diminue au cours du temps (comme la taille du second verre), et le taux d'expansion moyen augmente (comme la température du mélange). C'est ainsi que Räsänen explique le paradoxe d'un Univers dont l'expansion accélère en moyenne, bien qu'elle décélère localement.

Appliqué à l'ensemble de l'Univers, où des vides et des structures se forment en permanence, cela signifie que le volume des régions de l'espace dont l'expansion (décélérée) est rapide vient à dominer le volume des régions de l'espace dont l'expansion (décélérée) est lente. Par conséquent, en moyenne, le taux d'expansion de l'Univers augmente avec le temps, impliquant une accélération. Reste à savoir si celle-ci est compatible avec l'accélération déterminée avec les supernovae.

La vérification : l'éternel problème

L'une des surprises de la théorie défendue par Räsänen est qu'elle prévoit un Univers possédant une forte courbure négative. Or les observations du rayonnement de fond cosmologique (la première lumière émise librement dans l'Univers 380 000 ans après sa naissance), prédisent un Univers plutôt plat. Comment réconcilier ces deux points de vue ? En fait, les interprétations du rayonnement de fond cosmologique supposent que le rapport de la pression sur la densité de l'énergie sombre varie faiblement. Et la courbure de l'Univers déduite de ces observations dépend fortement de cet *a priori*. Dans la théorie de Räsänen, il n'y a pas d'énergie sombre et ce postulat ne s'applique pas, offrant la possibilité d'avoir une courbure non plate pour l'Univers. Cependant, une comparaison entre les prédictions de la théorie de Räsänen avec les observations du rayonnement de fond reste pour le moment techniquement hors de portée, au vu de la complexité mathématique de la tâche. ■

CE SUJET VOUS INTÉRESSE ?

Retrouvez Philippe Henarejos, rédacteur en chef de *Ciel & Espace* avec Christian Sotty et Jean-Yves Casgha



dans l'émission **MICROMÉGA** sur RFI (89 FM) le 6 mai à 15 h 10 TU.