

LES DESTINS DE L'UNIVERS

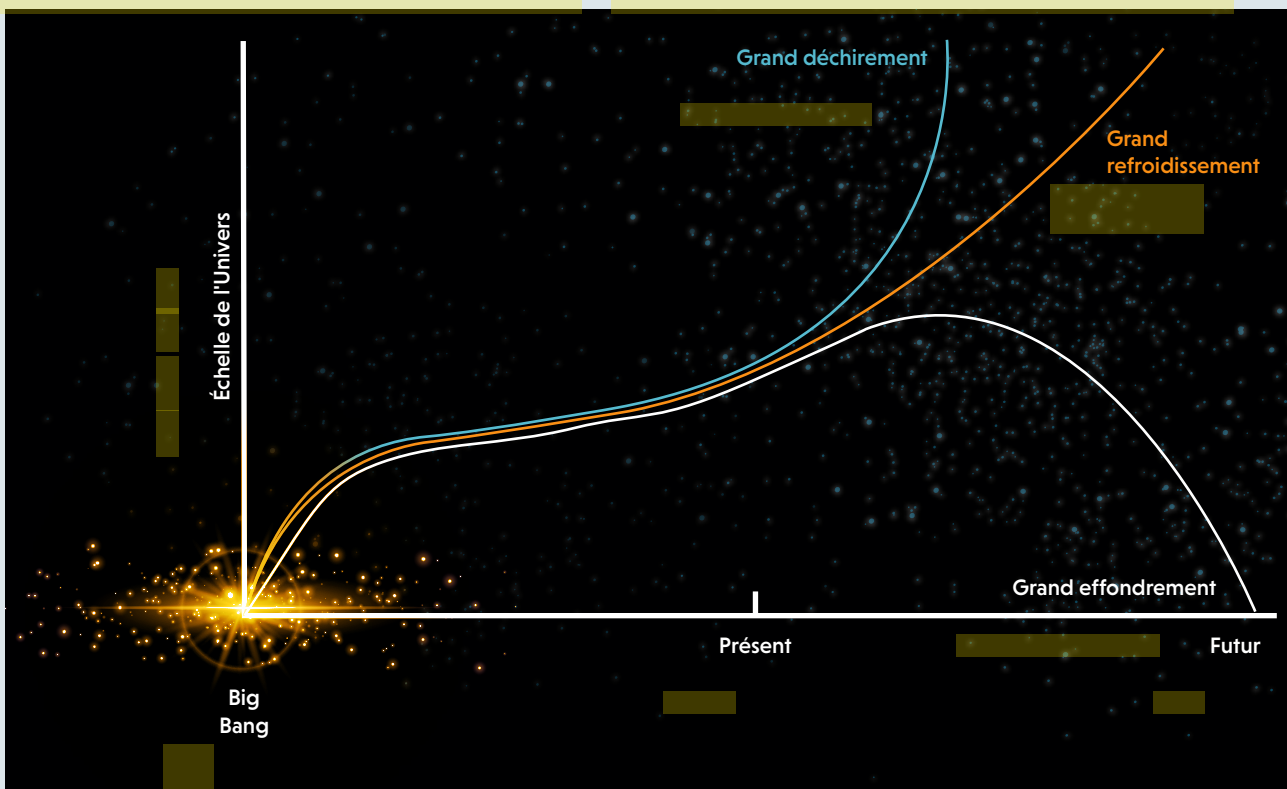
L'évolution de l'Univers dépend de façon cruciale de la densité totale de matière et d'énergie qu'il contient. Lorsque les astrophysiciens font l'inventaire de toutes les formes de matière et d'énergie, ils se heurtent à un certain nombre de complications. Différentes formes d'énergie ont en effet tour à tour dominé le cours de l'évolution cosmique et en ont imposé la dynamique, c'est-à-dire la variation au cours du temps du facteur d'échelle spatiale R , que l'on peut par exemple identifier au rayon de l'Univers observable. On distingue quatre phases. La première, encore hypothétique, est la très brève période d'inflation, où R aurait été en expansion exponentielle. C'est durant cette période que la matière aurait été créée. Dans une seconde phase, la radiation a dominé, mais comme la densité d'énergie diminue comme R^{-4} tandis que R augmente, elle a été supplantée dans une troisième phase par la matière dont la densité diminue seulement comme R^{-3} . Pour des raisons semblables, dans une quatrième phase l'énergie sombre a pris le relais voici 7 milliards d'années et domine l'Univers actuel. Son effet est d'accélérer l'expansion, moins rapidement cependant que durant l'inflation. Nul ne sait où elle nous conduira, puisqu'on ignore sa vraie nature et que l'on ne connaît pas sa loi de variation au cours du temps. On peut néanmoins esquisser trois scénarios.

Une énergie sombre constante (*en orange*) dominera de plus en plus la balance énergétique de l'Univers, et l'expansion observée de l'espace continuera à accélérer jusqu'à devenir exponentielle. Les structures qui ne sont pas déjà reliées gravitationnellement vont se briser et leurs parties vont s'éloigner les unes des autres à des vitesses apparentes supérieures à celle de la lumière. L'accélération nous empêchera finalement d'observer des portions importantes de l'Univers qui est aujourd'hui visible. Néanmoins, les structures liées gravitationnellement, comme les galaxies et les systèmes

planétaires, le resteront. Ainsi, le système solaire ou la Voie lactée demeureront essentiellement identiques à ce qu'ils sont maintenant, alors que le reste de l'Univers semblera s'enfuir loin de nous. Ce scénario dit du « Big Chill » (« Grand Refroidissement ») est, dans l'état actuel de nos connaissances, le plus plausible.

Avec une densité d'énergie sombre diminuant (*en blanc*) dans le futur (c'est le modèle de quintessence), la matière peut redevenir dominante. L'horizon cosmique grandira, nous révélant une part toujours plus grande de l'Univers. La gravité attractive l'emportera à nouveau et l'expansion non seulement cessera d'accélérer, mais s'inversera et l'Univers se contractera dans son ensemble pour disparaître dans un « Big Crunch » (« Grand Effondrement ») pouvant survenir dans 18 milliards d'années.

Si l'énergie sombre augmente (*en bleu*) au cours du temps, ou si elle est dominée par l'énergie fantôme fortement répulsive, l'espace se dilatera à un rythme sans cesse accru, et l'accélération sera elle-même accélérée. En ce cas, l'issue sera un « Big Rip » (« Grand Déchirement »), advenant lorsque l'accélération deviendra infinie au bout d'un temps fini. Toute la matière de l'Univers, même les atomes, sera déchirée par la dilatation de l'espace. D'après le scénario le plus extrême, cet événement se produira dans « à peine » 22 milliards d'années. D'abord les galaxies seront séparées les unes des autres et les amas se dissoudront. Environ 60 millions d'années avant le Big Rip, la gravité sera trop faible pour maintenir la cohésion de notre galaxie, qui se dispersera ; trois mois avant, le système solaire sera déchiré ; dans les dernières minutes, étoiles et planètes seront déchiquetées, et 10^{-19} seconde avant, les atomes et les noyaux seront eux-mêmes détruits, laissant un Univers vide et sans aucune structure.



➤ récurrentes que l'on oppose à l'identification de l'énergie noire à la constante cosmologique, quelques éclaircissements.

En 1917, Albert Einstein souhaite logiquement utiliser sa nouvelle théorie de la relativité générale pour décrire la structure de l'Univers dans son ensemble. La conception qui prévaut alors est que l'Univers doit être statique, c'est-à-dire invariable dans le temps. Einstein s'attend à ce que sa théorie appuie cette opinion. Ce n'est pas le cas. Le modèle d'Univers qu'il élabore en premier lieu n'a pas un rayon de courbure constant : la force attractive inexorable de la gravité, agissant sur chaque corps céleste, a tendance à le déstabiliser et à le faire s'effondrer sur lui-même. Or notre Univers ne s'effondre pas.

LA PLUS GROSSE BÉVUE D'EINSTEIN ?

Pour Einstein, le seul remède à ce problème consiste à ajouter un terme *ad hoc* mais mathématiquement cohérent dans ses équations d'origine. Cet ajout correspond à une sorte d'«antigravité», qui agit comme une force de répulsion ne se faisant sentir qu'à l'échelle cosmique. Grâce à cette astuce mathématique, le modèle d'Einstein reste permanent et invariable (voir la figure 97). Einstein représente ce terme par la lettre grecque Λ et le nomme «constante cosmologique». Il s'agit bien d'une constante, puisqu'elle doit garder exactement la même valeur dans l'espace et dans le temps. Formellement, elle peut prendre *a priori* n'importe quelle valeur, mais celle qui est sélectionnée par Einstein aboutit à un modèle d'Univers statique.

La même année, l'astrophysicien néerlandais Willem de Sitter bâtit un autre modèle d'Univers relativiste statique, très différent de celui d'Einstein (il suppose que la densité de matière reste nulle au cours du temps), mais incluant lui aussi une constante cosmologique, dont l'effet ici est d'induire, en l'absence de matière et donc de gravité, une courbure de l'espace-temps. Le rôle de la constante s'éclaire alors d'un jour nouveau. Dans le modèle de Sitter, les lignes d'Univers (les trajectoires d'espace-temps) suivies par les galaxies se séparent rapidement les unes des autres au cours du temps, comme si l'espace était en dilatation générale : cela signifie qu'en l'absence de matière la constante cosmologique a une influence certaine sur la structure de l'Univers. Aux yeux d'Einstein, la solution de Sitter se réduit toutefois à une simple curiosité mathématique, dans la mesure où l'Univers réel contient bel et bien de la matière.

Un premier coup de théâtre se produit en 1922, lorsque le mathématicien russe Alexandre Friedmann étudie les modèles

cosmologiques relativistes sans préjuger du caractère statique de l'Univers. Il découvre des solutions simples et exactes faisant des modèles statiques d'Einstein et de Sitter des cas très particuliers de solutions plus générales, lesquelles sont dynamiques.

Peu après, les observations astronomiques effectuées aux États-Unis par Vesto Slipher et mises en forme en 1929 par Edwin Hubble (qui en tirera seul toute la gloire) confirment que les galaxies ont effectivement tendance à se séparer au cours du temps. De façon concomitante, le théoricien britannique Arthur Eddington réexamine le modèle statique d'Einstein et démontre que, tel un stylo posé sur sa pointe, il est instable : à la moindre perturbation, il devrait entrer en expansion ou en contraction.

Ces faits nouveaux concourent à faire admettre que le modèle cosmologique d'Einstein n'est pas un bon modèle d'Univers et, concomitamment, à remettre en cause la constante cosmologique. Puisqu'elle ne remplit plus sa fonction première, à savoir stabiliser le rayon d'Univers, à quoi bon la garder ? Einstein est le premier à faire son autocritique. Après quelques réticences, il finit par admettre la pertinence des solutions dynamiques de Friedmann et dans la nouvelle solution qu'il élabore en 1932 avec de Sitter, la constante cosmologique a disparu !

L'HOMME QUI A DIT NON

À première vue, le débat paraît clos. Pourtant, un homme n'est pas d'accord. Il s'appelle Georges Lemaître. Il a commencé ses recherches cosmologiques en 1925 et il a compris le rôle dynamique joué par la constante cosmologique dans le modèle de Sitter. En 1927, il retrouve les solutions plus générales découvertes par Friedmann et fait pour la première fois le lien entre l'expansion de l'espace et la fuite apparente des galaxies. C'est lui le véritable père de la cosmologie moderne et des fameux modèles de Big Bang !

Pour Lemaître, la constante cosmologique est un ingrédient essentiel de la théorie relativiste, une nécessité à la fois logique et observationnelle. Il développe une argumentation prémonitoire en trois points. D'abord, la constante cosmologique est nécessaire pour obtenir une échelle de temps d'évolution largement supérieure à la durée des âges géologiques. Les modèles de Big Bang sans constante cosmologique prédisent en effet que l'âge théorique de l'Univers, calculé à partir de son taux d'expansion, est plus court que celui des étoiles, voire celui de notre planète... Ensuite, l'instabilité de l'équilibre entre l'attraction gravitationnelle et la répulsion cosmique est une façon de comprendre comment les étoiles et les galaxies ont pu se former durant un laps de temps d'environ ➤