

➤ 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.

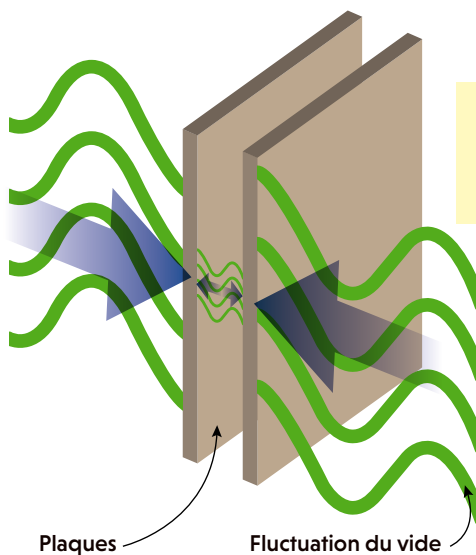
Peu après, les observations astronomiques effectuées aux États-Unis par Vesto Slipher et mises en forme en 1929 par Edwin Hubble (qui en tirera seul toute la gloire) confirment que les galaxies ont effectivement tendance à se séparer au cours du temps. De façon concomitante, le théoricien britannique 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 ➤



Deux surfaces parfaitement conductrices séparées par du vide s'attirent. Cet « effet Casimir » résulte des fluctuations quantiques spontanées du champ électromagnétique dans le vide.

> 1 milliard d'années après le Big Bang. Enfin, l'énergie contenue dans l'Univers n'est définie qu'à une constante additive près, car la relativité générale ne fournit pas de méthode d'ajustement lors d'un changement arbitraire du niveau zéro de l'énergie. Selon Lemaître, la constante cosmologique permet de faire cet ajustement. Dès 1934 il entrevoit ainsi le lien entre la constante cosmologique et la mécanique quantique.

Aux yeux de Lemaître, la constante cosmologique est donc parée de toutes les vertus. Il ne parviendra pourtant jamais à convaincre Einstein, lequel ira jusqu'à dire qu'avec l'introduction de la constante cosmologique il avait commis la plus grosse bêtise de sa vie.

On interprète souvent cette curieuse déclaration par le fait que le père de la relativité générale aurait été mécontent d'avoir gâché la beauté de sa théorie en introduisant un terme superflu. C'est faux, car dès 1916 Einstein avait envisagé l'existence de ce terme hors du contexte cosmologique. Dans une note de bas de page, il remarquait que ses équations du champ gravitationnel n'étaient pas les plus générales possible et qu'il existait un terme additionnel compatible avec la structure de sa théorie. Par ailleurs, le mathématicien français Élie Cartan a démontré en 1922 que la forme la plus générale des équations de la relativité générale doit nécessairement comprendre une constante d'intégration identique à la constante cosmologique, et Einstein connaissait ce résultat. Non, la vraie bêtise commise par Einstein a été de donner au terme cosmologique une valeur très particulière pour forcer son modèle d'Univers à demeurer statique. Ce faisant, il est passé à côté de la découverte capitale de la cosmologie du xx^e siècle : l'expansion de l'Univers. Einstein en était parfaitement conscient, et l'on peut interpréter sa surprenante décision

d'abandonner toute recherche en cosmologie à partir de 1933 comme la conséquence d'une blessure d'amour-propre !

Toujours est-il que le désaveu du père de la relativité pèsera de tout son poids, et le reste de la communauté des cosmologistes le suivra : malgré les puissants arguments de Lemaître en sa faveur, la constante cosmologique va rester au placard pendant soixante ans, d'autant qu'avant 1998 aucune observation astronomique directe n'est venue appuyer son existence.

LES VERTUS DE L'ÉNERGIE DU VIDE

L'idée de constante cosmologique a aussi pâti de son interprétation en termes d'énergie du vide. En 1934, à une époque où la théorie quantique est encore balbutiante, Lemaître est le premier à prendre en compte l'énergie du vide et à lui associer une pression négative pour interpréter la constante cosmologique. Mais sa contribution va rester complètement ignorée.

Il faut attendre la fin des années 1940, époque où la majorité des astronomes rejette l'idée d'une constante cosmologique, pour que des physiciens théoriciens commencent à explorer les propriétés du vide. Ils commencent à comprendre que la notion d'espace vide est plus subtile qu'ils ne le pensaient. L'espace n'est pas un réceptacle passif empli de matière et de rayonnement, c'est une entité physique et dynamique qui a une « chair ». Et cette chair, c'est l'énergie du vide. Des physiciens comme Paul Dirac, Enrico Fermi et Richard Feynman font l'hypothèse que ce que nous appelons « espace vide » est, en vertu du principe de Heisenberg, empli de « particules virtuelles », ne se manifestant en tant que réalité matérielle que de façon éphémère. Le vide quantique joue le rôle d'une banque auprès de laquelle on peut emprunter de l'énergie pour créer pendant un temps très court une particule et une antiparticule (de telle sorte qu'elles sont inobservables). La quantité d'énergie que l'on peut emprunter est inversement proportionnelle à la durée de l'emprunt.

Les fluctuations quantiques du vide électromagnétique ont même des manifestations macroscopiques, prévues en 1948 par le physicien néerlandais Hendrik Casimir, qui montra qu'elles induisaient une force d'attraction entre deux plaques conductrices parallèles (voir la figure ci-contre).

Le vide n'est donc pas le néant, il est potentiellement bourré d'énergie. Appliquant ce concept à la cosmologie, le Russe Iakov Zeldovitch redémontre en 1967, sans jamais avoir lu Lemaître, que le terme Λ équivaut à un champ d'énergie latent dans l'espace vide. La constante cosmologique est en quelque sorte une « dynamite » du vide.