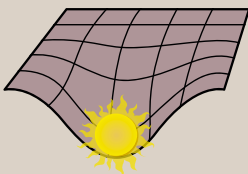


LES HYPOTHÈSES DU BIG BANG

On distingue quatre hypothèses principales sur lesquelles repose le modèle cosmologique du Big Bang. Elles ne sont pas de même nature. Les deux premières, H1 et H2, concernent les lois fondamentales de la nature ; la troisième, H3, est une classe de solutions de ces théories, tandis que la quatrième, H4, est une propriété de ces solutions. On ajoute à ces hypothèses la constante cosmologique et la matière noire, dont la nature est encore inconnue.

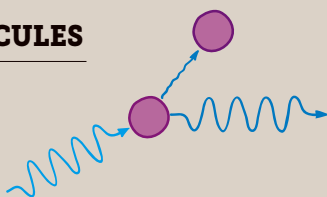
H1 : RELATIVITÉ GÉNÉRALE

Le modèle suppose que la théorie de la relativité générale d'Einstein décrit la gravitation. Cette force est alors la conséquence des déformations de l'espace-temps, qui sont déterminées par la matière et l'énergie présentes.



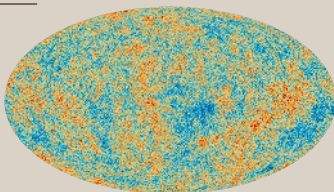
H2 : MODÈLE STANDARD DE LA PHYSIQUE DES PARTICULES

Les interactions non gravitationnelles (électromagnétique, nucléaires forte et faible) de la matière sont décrites par le modèle standard de la physique des particules, qui repose sur la physique quantique.



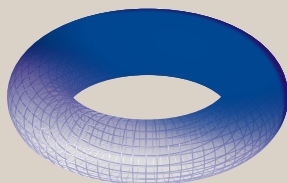
H3 : PRINCIPE COPERNICIEN

Les cosmologistes font l'hypothèse que l'Univers est homogène et isotrope à grande échelle. Ces hypothèses imposent des symétries dans les solutions qui décrivent l'Univers. Selon ce principe, nous n'occupons pas une place particulière dans le cosmos, et l'Univers que nous observons est alors représentatif de l'Univers dans sa globalité.



H4 : TOPOLOGIE TRIVIALE

La géométrie globale de l'Univers n'est pas contrainte par les hypothèses précédentes. Les observations suggèrent que l'espace est localement euclidien (c'est-à-dire de courbure nulle). Or différentes géométries globales satisfont cette contrainte, par exemple un univers infini ou un univers fini « replié » à la façon d'un tore. Dans le modèle du Big Bang, on suppose que l'Univers n'a pas de structure topologique complexe.



Les cosmologistes concluent aujourd'hui que près d'un quart du contenu matériel de l'Univers était sous la forme de matière noire. Ce constat indique déjà que l'hypothèse H2 est trop restrictive, puisque le modèle standard de la physique des particules n'inclut pas la matière noire. La cosmologie donne donc des arguments forts pour une physique dépassant le cadre standard, ce qui est stimulant. Les théoriciens ont imaginé de nombreux candidats susceptibles de constituer la matière noire, par exemple les wimps dans les théories supersymétriques, les axions, etc. La non-détection de la matière noire encourage certains chercheurs à explorer l'idée que cette matière ne serait en fait que la manifestation d'une faille dans la théorie de la relativité générale. Ils étudient ainsi des solutions de « gravitation modifiée ». Celles-ci doivent, comme nous l'avons vu, satisfaire toutes les contraintes existantes. Certaines pistes réussissent d'ailleurs à reproduire la dynamique des galaxies, mais aucune ne rend compte de toutes les observations cosmologiques.

Cette situation souligne le caractère inclusif de la cosmologie : toute avancée dans la compréhension des interactions et des constituants fondamentaux doit s'intégrer dans le modèle. Ainsi, quand les physiciens ont découvert que les neutrinos (particules qui interagissent très peu avec la matière ordinaire) ont une masse très faible (et pas nulle comme on le pensait), les cosmologistes ont dû ajuster leur description de la formation des grandes structures de l'Univers.

Quand on étudie l'Univers, il faut garder à l'esprit certaines spécificités. En effet, nous n'avons accès qu'à un seul univers, le nôtre, observé depuis un point unique, ici et maintenant. Nous sommes plongés dans l'expérience que nous tentons de comprendre et nous ne pouvons pas en effectuer d'autres et les comparer. Ce n'est pas tout. Nous n'observons qu'une petite partie de l'Univers, « l'univers observable », qui contient tous les objets dont la lumière a pu nous parvenir. Son existence résulte de la finitude de la vitesse de la lumière et de l'âge de l'Univers.

Dès lors, comment tester la pertinence du principe copernicien alors que nous ne pouvons pas changer de point d'observation ? Ce principe était considéré comme invérifiable, ce qui était assez gênant. En 2008, avec mes collègues George Ellis et Chris Clarkson, de l'université du Cap, en Afrique du Sud, nous avons considéré de plus près ce qui semble être une évidence : nous observons bien l'Univers depuis « ici et maintenant », mais « maintenant » change à chaque instant. Cela implique que le décalage spectral de chaque galaxie doit changer de façon imperceptible au cours du temps (voir l'encadré page 42).

faibles de la forme des galaxies. Ces effets, dits « de lentilles gravitationnelles faibles », sont induits par l'effet gravitationnel de toute la matière présente sur la ligne de visée de l'objet observé sur la lumière qui nous en parvient. Il est alors possible de déterminer la distribution de matière grâce à ces observations, mais aussi, indépendamment, à partir de la distribution des galaxies et de leurs vitesses. En comparant les résultats obtenus par les deux méthodes, on peut tester la relativité. Le satellite *Euclid*, de l'ESA (l'Agence spatiale européenne), qui sera lancé en 2022 devrait mettre en œuvre cette approche.

TESTER LE PRINCIPE COPERNICIEN

Pour construire le modèle du Big Bang, les cosmologistes ont adopté le principe copernicien qui suppose que nous ne vivons pas dans un lieu cosmique privilégié. Quelle que soit sa position dans l'Univers, l'observateur mesurera, en moyenne, les mêmes propriétés. Comment vérifier ce principe alors que nous ne pouvons pas installer un observatoire dans une autre galaxie ?

Il existe plusieurs possibilités. Il faut d'abord comprendre que, dans le vide, la

lumière se propage toujours à la même vitesse. Un observateur situé en O (figure 1) ne peut donc voir que des objets situés sur son cône de lumière (grisé sur le schéma). Plus un astre est distant, plus sa lumière met du temps à nous parvenir. Ainsi, seule une partie finie de l'Univers est observable, si bien que se pose la question de savoir si notre Univers observable est représentatif de l'Univers dans son ensemble. Par ailleurs, il est impossible d'avoir accès aux propriétés de l'Univers en dehors du cône de lumière.

En raison de l'expansion de l'Univers, le spectre de la lumière émise par une galaxie est décalé vers les grandes longueurs d'onde, le décalage étant d'autant plus important que la galaxie est distante. Ce décalage spectral vers le rouge (nommé *redshift* en anglais et noté z) est mesurable, ce qui n'est en général pas le cas de la distance galactique. On peut déduire celle-ci à partir du *redshift* et de la loi d'expansion cosmique, qui dépend du modèle dans son ensemble.

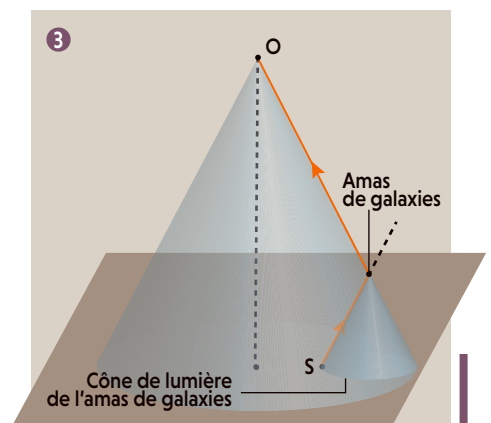
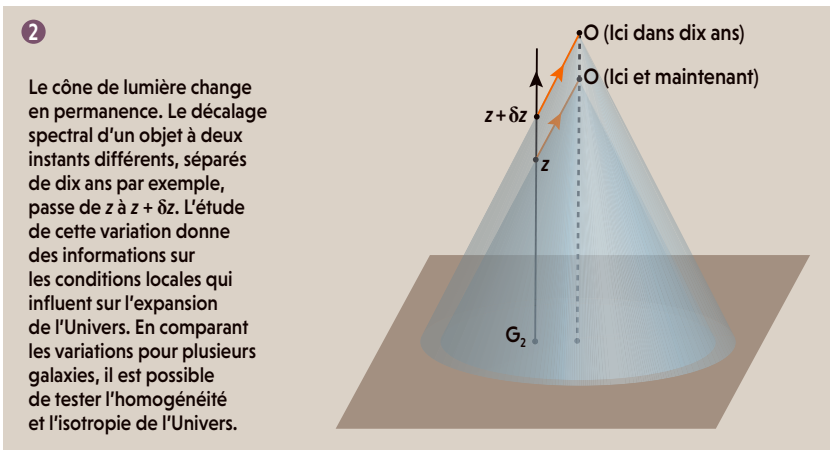
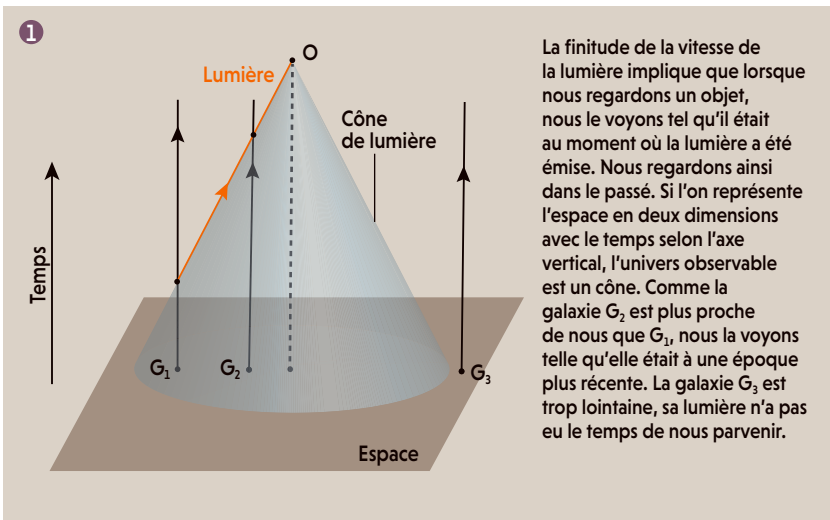
Dès lors, en observant l'Univers à dix ans d'intervalle, on a accès à deux cônes de lumière (figure 2). Durant cet intervalle, le décalage spectral de chaque galaxie change légèrement. Cette variation (δz) donne des informations sur la structure de l'espace en dehors du cône de lumière. En comparant

différents astres le long du cône de lumière, on peut tester le principe copernicien, en mettant à profit le fait que l'Univers n'est pas vu depuis le même point d'observation.

Un autre test du principe copernicien repose sur le fond diffus cosmologique. Ce rayonnement se propage principalement de façon libre depuis son émission 380 000 ans après le Big Bang. Nous l'observons dans

Nous ne pouvons pas installer un observatoire dans une autre galaxie

toutes les directions, telle une sphère qui nous entoure. Son analyse permet de tester l'isotropie de sa température, mais, *a priori*, elle ne fournit aucune information sur l'intérieur de l'Univers observable. Il existe cependant une façon d'accéder à cette information. Une infime partie des photons du fond diffus cosmologique interagissent sur leur trajet avec le gaz chaud des amas de galaxies qu'ils traversent (figure 3). Grâce à cette diffusion, l'« effet Sunyaev-Zeldovich » (du nom des deux physiciens russes qui l'ont proposé, Rashid Sunyaev et Yakov Zeldovich), il est possible de reconstruire certaines propriétés du fond diffus cosmologique tel qu'il serait vu depuis cet amas de galaxies, et donc d'avoir des informations à l'intérieur de notre cône de lumière.



Le fond diffus cosmologique a été émis quand l'Univers avait 380 000 ans. Nous en voyons aujourd'hui la partie qui se trouve sur le cône de lumière, et pas celle à l'extérieur ou celle à l'intérieur. Pour cette dernière cependant, la diffusion par le gaz d'amas de galaxies sur son parcours peut la mettre sur notre cône de lumière. On a alors accès à des informations sur l'aspect du fond diffus cosmologique vu depuis l'amas.