

► Pour commencer, la relativité générale est testée avec une extrême précision dans le Système solaire. Cette théorie a par ailleurs conduit à des prédictions conceptuelles majeures qui ont toutes été vérifiées : l'expansion de l'Univers, l'existence des trous noirs et celle des ondes gravitationnelles. Cependant, elle est moins bien testée aux échelles astrophysiques et dans des régimes de très faibles accélérations, qui correspondent à ceux associés à la matière noire et à l'accélération de l'Univers.

Une première façon de mettre à l'épreuve la relativité générale consiste à en tester un élément clé : le principe d'équivalence, qui stipule que tout corps, quelles que soient sa

masse et sa composition chimique, tombe de la même façon dans un champ de gravité extérieur. Depuis 2017, le satellite *Microscope*, du Cnes (Centre national d'études spatiales) et de l'Onera (Office national d'études et de recherches aérospatiales), a testé ce principe avec une précision de l'ordre de 10^{-14} . L'équipe responsable espère améliorer encore la sensibilité de un ordre de grandeur.

UN PRINCIPE AU MICROSCOPE

On peut aussi montrer que le principe d'équivalence est intimement lié au fait que les constantes de la nature ne varient pas dans le temps et l'espace, ce qui est testable en dehors du Système solaire. Depuis des décennies, différentes équipes se sont attachées à mesurer, dans différents systèmes astrophysiques, la valeur de la « constante de structure fine », une constante caractérisant l'interaction électromagnétique. La nucléosynthèse primordiale ou les analyses du satellite *Planck* démontrent que cette constante n'a pas varié de plus d'un millièmme pendant l'histoire de l'Univers ; elle n'a pas varié de plus de 10^{-5} (en valeur relative) au cours des dix derniers milliards d'années, d'après l'étude des spectres d'absorption de quasars ; les analyses géophysiques amènent la contrainte à moins de 10^{-7} lors des deux derniers milliards d'années, et les comparaisons d'horloges atomiques en laboratoire montrent que la variation est inférieure à 10^{-17} par an.

L'essence de la relativité générale repose sur le fait que la matière courbe l'espace-temps et que cette courbure modifie la trajectoire de tout corps matériel et de la lumière. On doit donc observer une déflexion de la lumière passant près d'un astre massif. Les Britanniques Arthur Eddington et Andrew Crommelin, en 1919, ont été les premiers à réaliser une telle mesure lors d'une éclipse solaire : ils ont vérifié que la déflexion de la lumière émise par une étoile lointaine et frôlant le Soleil est compatible avec le champ gravitationnel créé par notre étoile, dont on connaît la masse par ailleurs grâce à la dynamique des orbites planétaires. La mesure de la déflexion de la lumière est un test de cohérence entre diverses observables (ici, deux mesures de la masse du Soleil) dont la violation indiquerait la défaillance d'une des hypothèses (ici, de la relativité générale). Tant que le test est passé avec succès, cela améliore le domaine de validité des hypothèses et des théories utilisées pour interpréter les données et contraint tout scénario qui reposerait sur une hypothèse différente.

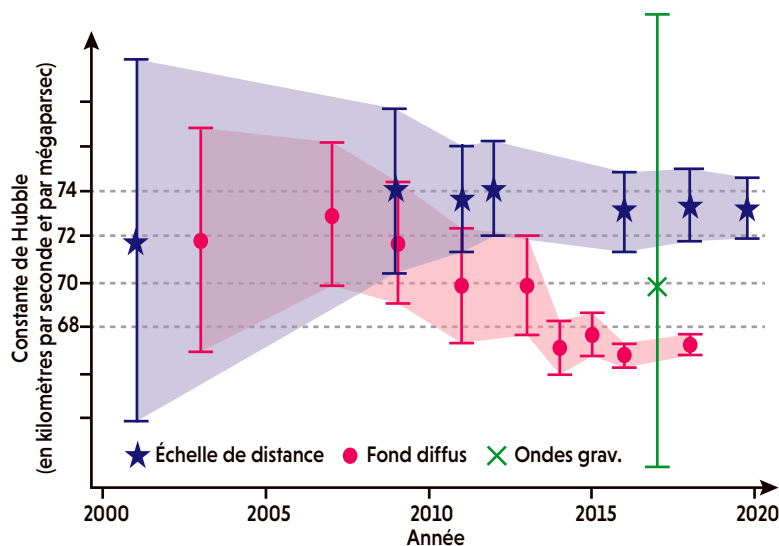
En 2001, Francis Bernardeau, du CEA, et moi avons proposé de généraliser ce test classique de la relativité générale aux échelles astrophysiques. En effet, en 2000, Yannick Mellier, de l'institut d'astrophysique de Paris, et son équipe ont détecté pour la première fois des distorsions

LA TENSION ÉMERGENTE SUR LA CONSTANTE DE HUBBLE

Plusieurs approches principales ont été utilisées pour mesurer la constante de Hubble. L'une d'elles consiste à construire une échelle de distance en utilisant en particulier les supernovæ de type Ia et les céphéides (en bleu) ; une autre utilise les décalages temporels des effets de lentilles gravitationnelles ; une troisième méthode se fonde sur l'analyse du fond diffus cosmologique (en rouge). Au cours du temps, les mesures ont gagné en précision et sont aujourd'hui incompatibles, avec des barres d'erreur qui ne se recouvrent plus. Une nouvelle méthode utilise les ondes gravitationnelles (en vert).

La tension entre les différentes déterminations peut avoir différentes origines possibles. On ne peut exclure un biais mal compris dans au moins l'une des méthodes. Il faut aussi noter le fait que le fond diffus cosmologique sonde l'Univers plus primordial, tandis que les échelles de distances et les lentilles gravitationnelles concernent l'Univers plus récent. L'Univers local pourrait ainsi ne pas être représentatif de l'Univers à grande échelle.

Autre possibilité : contrairement au fond diffus cosmologique, l'observation des supernovæ repose sur des faisceaux lumineux fins sensibles à la structure de l'espace à des échelles plus petites que celle du lissage imposé par l'hypothèse d'homogénéité du modèle du Big Bang. Dans ce cas, on ne pourrait pas interpréter les deux observables avec la même géométrie, ce qui nécessiterait de réanalyser la façon de comparer ces observations. Cette tension pourrait aussi, en dernier recours, être le signe d'une nouvelle physique : les cosmologistes évoquent déjà, par exemple, l'effet de l'énergie sombre dans l'Univers primordial, une interaction avec la matière noire, une modification de la relativité, etc. Toutes ces pistes, et d'autres, sont en cours d'exploration.

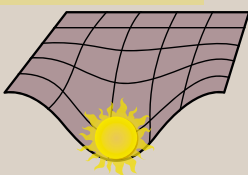


LES HYPOTHÈSES DU BIG BANG

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.

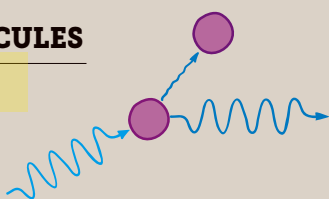
H1 : RELATIVITÉ GÉNÉRALE

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.



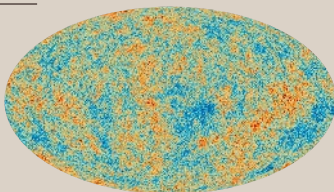
H2 : MODÈLE STANDARD DE LA PHYSIQUE DES PARTICULES

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.



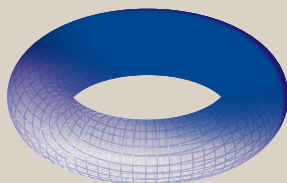
H3 : PRINCIPE COPERNICIEN

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.



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.

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).