

► 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 millièème 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 céphéïdes (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.

