

ne pourrions pas déduire directement de ces mesures de «meilleures» lois de la gravitation, mais nous pourrions commencer à tester les différentes théories qui permettent, dès aujourd'hui, d'envisager de telles variations, notamment les théories des cordes.

Les théories des cordes, dont le but est d'unifier les quatre interactions fondamentales – et de donner une description de la gravité à très haute énergie – sont des théories définies dans des espaces-temps à 10 ou 11 dimensions. Pour les théoriciens, si notre monde ne présente que quatre dimensions, c'est que les autres sont enroulées sur de très petites distances que la résolution de nos expériences ne peut pas encore révéler. Or, le volume de ces dimensions supplémentaires devrait influencer sur la valeur observée des constantes de couplage des interactions fondamentales.

En effet, le nombre de lignes de force issue de la source d'un champ et interceptées par une particule détermine l'intensité de la force portée par ce champ (voir la figure 5). Or certaines de ces lignes de champ pourraient s'échapper dans le volume des dimensions supplémentaires. Par conséquent, l'intensité d'une interaction fondamentale dépend du volume des dimensions supplémentaires et pourrait évoluer si ce volume variait.

Par ailleurs, en plus des quatre interactions fondamentales, les théories des cordes prédisent l'existence d'une cinquième interaction transmise par une particule nommée dilaton. Le dilaton interagit de diverses façons avec les particules matérielles et cause également une variation des constantes de couplage des autres interactions.

Le volume des dimensions supplémentaires et le dilaton sont des quantités dynamiques qui peuvent varier dans le temps et dans l'espace, par conséquent, les théories des cordes prédisent une variation des constantes de couplage des interactions fondamentales, parmi lesquelles la constante de structure fine. Soulignons que si ce mécanisme est à l'œuvre dans les phénomènes que J. Webb et ses collègues pensent avoir observés, il n'est pas envisageable que seule la constante de structure fine varie, les autres restant fixes.

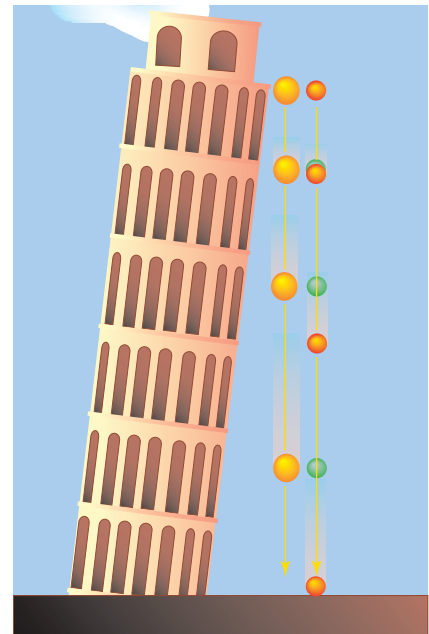
Si l'étude de la fixité des constantes constitue un test du principe d'équivalence, les mesures directes de l'universalité de la chute libre nous renseignent, à l'inverse, sur l'éventuelle variation des dites constantes. Aujourd'hui, on teste

le principe d'équivalence en laboratoire et dans l'espace avec une grande précision. L'expérience de télémétrie laser nommée *Lunar Laser Ranging* qui surveille la trajectoire de la Lune depuis plus de 30 ans avec une précision de un centimètre a permis de conclure que la Terre et la Lune tombent dans le champ de gravité du Soleil avec la même accélération (à 10^{-14} centimètre par seconde carrée près). De cette limite sur la violation du principe d'équivalence, on déduit une limite pour la variation spatiale de la constante de structure fine : sur une distance de l'ordre de l'orbite terrestre, elle ne peut varier de plus d'une partie pour 10^{32} par centimètre. En extrapolant grossièrement cette variation à la taille de l'Univers observable (environ 15 milliards d'années-lumière), on estime que, à cette échelle, la variation relative de la constante de structure fine ne peut dépasser une partie pour 10^4 , ce qui est juste un ordre de grandeur au-dessus des mesures effectuées par J. Webb et ses collègues. Cela signifie que cette mesure est compatible avec les tests du principe d'équivalence réalisés jusqu'ici dans le Système solaire.

Nouvelles expériences

Dans un proche avenir, deux laboratoires spatiaux, *Microscope* et STEP, qui seront lancés respectivement par l'Agence spatiale européenne et par la NASA, vont tester le principe d'équivalence avec une précision 100 à 100 000 fois supérieure à celle des expériences précédentes. Il est fort probable que, si la variation de la constante de structure fine est réelle, ces expériences détecteront une violation du principe d'équivalence.

D'un point de vue théorique, la détection d'une telle variation serait une preuve indiscutable de l'existence d'une nouvelle physique. Tout comme la théorie de la relativité générale a fait perdre sa structure rigide et immuable à l'espace-temps, les nouvelles théories des hautes énergies font perdre aux constantes leur fixité. Malheureusement, les théories des cordes ne nous fournissent pas, pour l'instant, le mécanisme de stabilisation des dimensions supplémentaires et du dilaton qui rendent compte de la quasi-fixité des constantes aujourd'hui. De plus, si l'on confirme la mesure d'une variation de la constante de structure fine, il faudra expliquer pourquoi la stabilisation de ces quantités fut à la fois si efficace et si tardive



6. SELON LE PRINCIPE D'ÉQUIVALENCE, l'inertie d'un corps, sa masse inerte, est égale à sa sensibilité à la gravité, sa masse grave. Dès lors, on parle simplement de la masse d'un corps pour désigner ces deux propriétés. Une des conséquences de ce principe est l'universalité de la chute libre : tous les corps tombent dans le vide de la même façon (en vert). Si la constante de structure fine variait dans le temps et dans l'espace, l'énergie électromagnétique contenue dans un objet varierait d'un point à l'autre de sa trajectoire, et, en vertu de l'équation $E = mc^2$, sa masse varierait également. En conséquence, l'universalité de la chute libre devrait être mise en défaut.

dans l'histoire de l'Univers (assez, en tout cas, pour que nous l'observions 2 milliards d'années après le Big-bang). Ainsi, l'étude de la variation des constantes fondamentales a connu des ramifications étonnantes depuis qu'elle a été postulée par Dirac. Il ne reste presque rien, aujourd'hui, de son hypothèse des grands nombres, sauf peut-être ceci : nous pensons toujours que la variation des constantes a une relation intime avec le fait que l'Univers est en expansion et évolue... même si nous ne comprenons toujours pas laquelle.

Jean-Philippe UZAN mène ses recherches à l'Institut d'astrophysique de Paris et au Laboratoire de physique théorique d'Orsay.

G. COHEN-TANOUDJI, *Les constantes universelles*, Hachette, 1995.

J.-P. UZAN, *The fundamental constants and their variation*, hep-ph/0205340.

N. ARKANI-HAMED, S. DIMOPOULOS et G. DVALI, *Les dimensions cachées de l'Univers*, in *Pour la Science*, n° 276, octobre 2000.