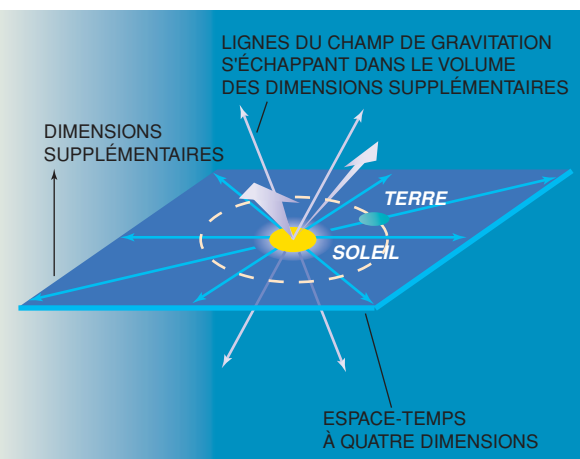


de cette constante ? La réponse demande d'étudier en détail tous les effets qui pourraient être causés d'erreurs systématiques. Leur liste est longue. Ainsi, quand on compare les spectres de différents atomes, il faut tenir compte du fait que ces atomes sont peut-être localisés dans des régions distinctes du nuage de gaz et, par conséquent, que leurs spectres subissent des décalages divers par effet Doppler. De plus, deux isotopes d'un même élément peuvent avoir des spectres très légèrement différents, aussi faut-il contrôler la composition isotopique des nuages afin de s'assurer que ce n'est pas la présence d'un isotope qui provoque les déplacements de raies observés (par exemple, en étudiant d'autres parties du spectre). L'existence d'un champ magnétique peut, elle aussi, décaler les niveaux d'énergie. Les procédés utilisés par les astronomes engendrent également des risques d'erreurs. Ainsi, pendant le temps d'acquisition des données, la vitesse de la Terre sur son orbite varie, imprimant des effets Doppler différents à des spectres enregistrés à divers instants. Signalons également que la dispersion de la lumière dans l'atmosphère peut distordre le spectre, de même qu'une variation de la température, car elle change l'indice de réfraction de l'air dans le spectrographe...



5. L'INTENSITÉ DE LA FORCE qui s'exerce entre le Soleil et la Terre correspond au nombre de lignes de champ gravitationnel issues du Soleil et interceptées par l'orbite de la Terre. Si l'espace-temps était doté de plus de quatre dimensions, une partie de ces lignes de champ pourrait échapper à notre Univers ordinaire. L'évolution du volume des dimensions supplémentaires se traduirait alors par une variation des lignes de champ disponibles dans l'espace-temps quadridimensionnel où se meuvent la Terre et le Soleil, modifiant ainsi la force qui s'exerce entre eux. Ce phénomène nous apparaîtrait comme une variation de la constante gravitationnelle.

Ainsi, les résultats annoncés doivent encore être passés au crible d'une longue critique et faire l'objet d'une vérification expérimentale par une équipe indépendante et, si possible, sur des systèmes d'absorption différents. Ces travaux sont déjà en cours, notamment au VLT, le très grand télescope européen, installé au Chili. Si l'annonce de J. Webb est prise plus au sérieux que d'autres travaux similaires publiés antérieurement, c'est à cause de l'originalité de sa méthode : elle compare des spectres différents pour lesquels une même variation de la constante de structure fine abaisserait certains niveaux d'énergie et en élèverait d'autres. Ainsi, si l'on constate une série de décalages dans des sens opposés, mais qui s'expliquent tous par une même variation de la constante de structure fine, il semble peu probable qu'ils soient le produit d'une coalition machiavélique de l'ensemble des erreurs systématiques possibles. Cependant la prudence reste de mise et le principal mérite de ce travail est d'inaugurer une méthode de mesure nouvelle et, semble-t-il, prometteuse.

Des théories aux constantes molles

Très récemment, Alexandr Ivanchik et Dmitri Varshalovich, de l'Institut Ioffe, à Saint Petersburg, ainsi qu'Esther Rodriguez et Patrick Petitjean, de l'Institut d'astrophysique de Paris, ont suggéré que certains spectres d'absorption indiquaient une variation du rapport de la masse du proton à celle de l'électron. Leurs données reposent sur les décalages spectraux de raies correspondant à différents états de vibration et de rotation de la molécule d'hydrogène dans des nuages moléculaires lointains. Selon cette étude, le rapport de la masse du proton à celle de l'électron aurait augmenté de 0,019 à 0,095 pour mille sur dix milliards d'années. Comme pour les mesures de la constante de structure fine, on est encore loin d'avoir établi la validité de ce résultat. Toutefois, s'il est confirmé, il présage d'une aubaine pour les théoriciens. En effet, le rapport de la masse du proton et de celle de l'électron dépend de constantes fondamentales autres que la constante de structure fine. Or, précisément, les théories dont nous disposons aujourd'hui et qui admettent une variation de la constante de structure fine prédisent que les constantes de couplage des autres interactions varient de façon corrélée. Ainsi,

on peut espérer tester ces théories à l'aide de mesures de ce type.

Aujourd'hui, tout comme à l'époque de Dirac, les interrogations des physiciens sur la stabilité des constantes tentent, en fait, de mettre en évidence l'existence d'une physique au-delà de nos théories. Le point d'achoppement de l'unification des lois de la physique est la théorie de la gravitation, une interaction que nous ne savons pas unifier avec les trois autres forces de la nature. Or, il se trouve qu'une variation des constantes fondamentales aurait des conséquences directes sur notre conception de la gravitation.

Ainsi, si la gravitation est vraiment décrite par la théorie de la relativité générale (en fait, c'est aussi vrai si elle était simplement décrite par la théorie de Newton), alors les constantes fondamentales devraient être parfaitement fixes. Voici pourquoi : si, par exemple, la constante de structure fine évoluait dans le temps et dans l'espace, l'énergie de liaison électromagnétique responsable de la cohésion d'un corps varierait. Selon l'équation $E = mc^2$, la masse d'un objet changerait avec sa position. En vertu du principe de conservation de l'énergie, un corps dont la masse varierait d'un point à l'autre de sa trajectoire accélérerait en se déplaçant vers une zone où sa masse diminue (ou décélérerait dans le cas inverse). De plus, comme l'énergie électromagnétique du proton est différente de celle du neutron, cette variation de masse dépendrait de la proportion de protons et de neutrons contenus dans un objet et, par conséquent, serait différente pour des corps de diverses compositions chimiques. Autrement dit, les corps en chute libre dans l'espace subiraient une nouvelle force dépendant de leur composition, un résultat qui contredirait l'universalité de la chute libre (le fait que, dans le vide, tous les objets tombent avec la même accélération). Or, le principe d'universalité de la chute libre, parfois nommé principe d'équivalence, est l'un des fondements de la relativité générale.

En conséquence, lorsque l'on réalise des expériences sur la stabilité des constantes, on teste la validité du principe d'équivalence et donc de nos théories de la gravitation. Si les variations annoncées étaient avérées, elles indiqueraient que la relativité générale et le principe d'équivalence n'étaient que des cadres théoriques provisoires, qu'il nous faudrait étendre. Pour autant, nous

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.

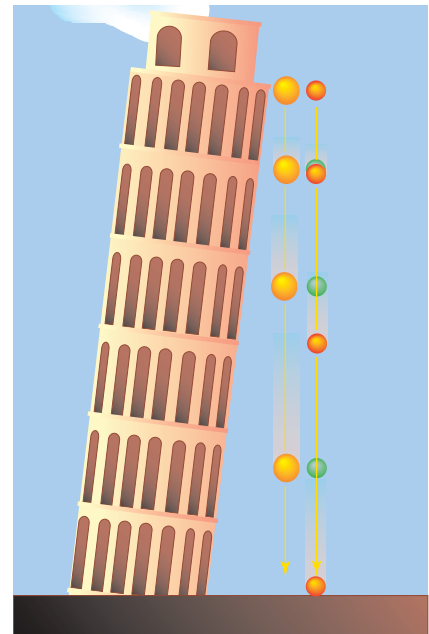
Si l'étude de la fixité des constantes constitue un test du principe d'équivalence, les mesures directes de l'universalité de la chute libre nous renseignent, à l'inverse, sur l'éventuelle variation des dites constantes. Aujourd'hui, on teste

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.