

les points de la colonne vertébrale participent aux battements et l'aile allège la queue.

On ignore précisément à quelle période les baleines ont perdu leurs pattes. Lawrence Barnes, du Muséum d'histoire naturelle de Los Angeles, a récemment mis au jour dans l'état de Washington le squelette d'une baleine datant de 27 millions d'années qui avait des membres postérieurs développés : les membres ont persisté plus longtemps qu'on ne le pensait. Toujours est-il qu'aujourd'hui, 50 millions d'années après leurs ancêtres quadrupèdes, les cétacés n'ont plus que de minuscules vestiges de membres postérieurs, invisibles de l'extérieur, et que leur bassin est notablement réduit au point qu'il n'est relié qu'à quelques petits muscles qui ne servent plus à la locomotion.

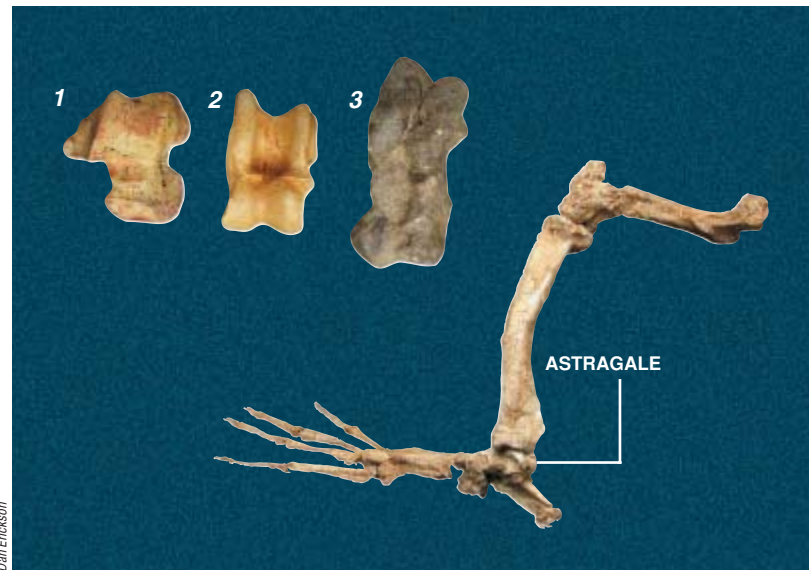
La parole à l'ADN

Dans les années 1980 et 1990, tandis que les paléontologues étudiaient la morphologie des fossiles et en déduisaient que les baleines descendent des mésonychidés, les biologistes retraçaient l'histoire évolutive des cétacés en analysant l'ADN des baleines modernes. Ces études moléculaires confirmèrent les conclusions de Boyden faite dans les années 1960 : les baleines sont plus proches des artiodactyles que de tout autre mammifère vivant, et, qui plus est, elles seraient des artiodactyles, l'un des nombreux rameaux sur cette branche de l'arbre des mammifères. De surcroît, ces études ont révélé l'existence d'un lien étroit entre les baleines et les hippopotames. Les diverses études de l'ADN, notamment celle de Norihiro Okada et de ses collègues de l'Institut de technologie de Tokyo, étaient convaincantes, mais comment pouvait-on concilier l'hypothèse de l'hippopotame, ancêtre des baleines et les conclusions des paléontologues ?

Les paléontologues décidèrent que la seule façon de le savoir était d'étudier les os de la cheville des anciennes baleines. On définit les artiodactyles sur la base d'un de ces os, l'astragale, qui favorise la mobilité. L'unique astragale des artiodactyles présente des gorges qui le font ressembler à une poulie à gorge double (voir la figure 5). L'une est reliée au tibia et l'autre à des os plus éloignés de la cheville. Si les baleines descendent des artiodactyles, leurs ancêtres encore mal adaptés à la vie aquatique devaient avoir un astragale en forme de poulie.

La dernière pièce du puzzle fut trouvée en automne 2001 par Ph. Gingerich et par H. Thewissen qui annoncèrent simultanément avoir découvert de nouveaux fossiles de baleines primitives. Dans l'Est de la province du Béloutchistan, l'équipe de Ph. Gingerich a mis au jour des squelettes articulés partiels de *Rodhocetus balochistanensis* et un nouveau genre de protocétidé, *Artiocetus*. Dans les collines Kala Chitta du Pakistan, H. Thewissen et ses collègues ont trouvé un fragment de *Pakicetus* et un autre d'un membre plus petit de la famille des pakicétidés, *Ichthyolestes*. Chacun de ces squelettes présente un astragale caractéristique des artiodactyles.

Ces découvertes ont renforcé les convictions des partisans de l'hypothèse selon laquelle les baleines descendent des artiodactyles. Bien que les hippopotames eux-mêmes soient apparus bien après les baleines, leur ancêtre présumé (l'antracothère, un animal dont la taille variait entre celle d'un chien ou celle d'un cheval et qui était inféodé aux marais) vivait au milieu de l'Éocène (peut-être même avant) et aurait un ancêtre commun avec les cétacés.



5. LES MEMBRES POSTÉRIEURS d'une baleine primitive, *Rodhocetus*, sont pourvus d'un os de la cheville nommé astragale. On a regroupé un astragale de mésonychidé (1), un astragale d'artiodactyle moderne (2) et l'astragale de *Rodhocetus* (3). Ils présentent la même forme de poulie à deux gorges qui caractérise tous les astragales d'artiodactyles. On en déduit que les baleines descendent non pas des mésonychidés, comme cela était admis, mais d'un ancien artiodactyle.

Si les artiodactyles semblent bien être les ancêtres des cétacés, pourquoi s'est-on si longtemps tourné vers les mésonychidés ? Les spécialistes de l'évolution pensent aujourd'hui que les ressemblances avec les mésonychidés reflètent une évolution convergente plutôt qu'un ancêtre commun, et que l'ordre des mésonychidés a représenté un cul-de-sac évolutif. Toutefois, cette opinion ne fait pas l'unanimité. Selon Maureen O'Leary, de l'Université de Stony Brook, les données morphologiques et moléculaires n'excluent pas que les mésonychidés appartiennent à la lignée des baleines. Les mésonychidés seraient d'anciens artiodactyles dont l'évolution de la cheville se serait inversée, et resteraient les plus proches parents des cétacés ; aujourd'hui, les hippopotames seraient leurs plus proches parents vivants. Certaines critiques se sont toutefois élevées contre l'inclusion des mésonychidés dans les artiodactyles : la validation de l'hypothèse des mésonychidés nécessiterait de renoncer à l'idée bien ancrée que l'astragale définit le groupe des artiodactyles.

Paléontologues et biologistes s'accordent à dire que seuls de nouveaux fossiles préciseront le lien entre les baleines et les artiodactyles, notamment des fossiles d'artiodactyles primitifs et surtout d'hippopotames primitifs. La prochaine étape sera de préciser comment les archaécètes ont évolué vers les mysticètes et vers les odontocètes, et quand ces derniers ont acquis leurs caractères « modernes ». Si les recherches avancent au même rythme que les 20 dernières années, la famille des cétacés sera bientôt au grand complet.

Kate WONG est écrivain et journaliste à *Scientific American*.

M. BENTON, *L'épopée des mammifères*, Édimages, 1991.

The Emergence of Whales : Evolutionary Patterns in the Origin of Cetacea, sous la direction J. Thewissen, Plenum Press, 1998.

J.-L. HARTENBERGER, *Une brève histoire des mammifères*, Belin-Pour la Science, 2001.

Les constantes varient-elles?

JEAN-PHILIPPE UZAN

Deux constantes fondamentales de la physique semblent avoir varié au cours de l'histoire de l'Univers. Ces observations relancent un débat ancien sur la nature des lois physiques.

La plupart des physiciens croient que tous les électrons de l'Univers, sans exception, ont exactement la même masse, la même charge et le même spin. Ainsi formulée, cette affirmation pourrait passer pour une profession de foi. En réalité, elle est implicite dans la pratique scientifique elle-même, amplement justifiée par ses indéniables succès. Lorsque les physiciens reproduisent ou comparent des expériences pour tester les lois de la nature, ils doivent supposer que ces lois sont identiques en tout lieu et à toutes les époques. Cette hypothèse est souvent qualifiée de principe copernicien, car elle nous rappelle qu'on ne saurait justifier *a posteriori* le résultat d'une expérience en prétendant que nous occupons une place privilégiée dans l'Univers. Cette vision s'oppose à celle d'Aristote où les lois terrestres, bien qu'immuables et identiques en tout point de la Terre, diffèrent des lois célestes. Le principe copernicien est aujourd'hui au centre de nombreux débats théoriques. Les succès de la physique et de l'astrophysique modernes montrent qu'il est difficile d'envisager des lois physiques dont la structure prendrait des formes très différentes en divers points de l'Univers. En revanche, une lente variation des constantes fondamentales qui interviennent dans ces lois est envisageable sans remettre en cause l'essentiel des résultats déjà acquis. Si nous ignorons cette possibilité, nous risquons d'adopter sans le savoir une vision faussée de notre Univers. Au contraire, si nous en tenons compte, nous ouvrirons peut-être des fenêtres sur des théories physiques qui ne peuvent pas, pour le moment, être testées expérimentalement par d'autres moyens. Ainsi, cette question a fait l'objet de nombreuses études théoriques et expérimentales qui ont un point commun : elles constituent un test fondamental pour nos théories de la gravitation. Très récemment, une équipe d'astronomes a

annoncé que la constante de structure fine, une constante fondamentale, a varié au cours de la première moitié de l'histoire de l'Univers. Une autre équipe a publié des résultats indiquant une possible évolution du rapport des masses du proton et de l'électron. Avant de nous intéresser aux aspects les plus actuels de la quête d'une variation des constantes, commençons par rappeler les termes de ce débat déjà ancien.

L'ouverture de la boîte de Pandore

En 1937, le physicien et mathématicien Paul Dirac a, le premier, envisagé la possibilité que les constantes fondamentales varient, lorsqu'il proposa son hypothèse dite des grands nombres. Pour des raisons esthétiques, Dirac pensait que les lois de la nature ne devraient pas faire apparaître de constantes numériques très grandes ou très petites. Bien sûr, la valeur numérique que nous attribuons à certaines constantes, la vitesse de la lumière (299 792 458), par exemple, est due aux accidents historiques qui ont déterminé la définition de nos unités de mesure (ici la seconde et le mètre). Par conséquent, la question de Dirac n'a de sens que si l'on s'affranchit de l'arbitraire lié au choix des étalons de mesure : elle ne se pose que pour les grandeurs sans dimension, tel le rapport de la masse du proton à celle de l'électron (qui vaut environ 1836 dans tous les systèmes d'unité). Selon Dirac, certaines de ces constantes, tel le rapport de la force électrique à la force gravitationnelle entre le proton et l'électron (de l'ordre de 10^{40}), affichent des valeurs déraisonnablement élevées. En fait, cette remarque traduisait une interrogation sur le fondement de nos lois physiques. Ces lois font intervenir des constantes dont la valeur ne nous est pas donnée par la théorie, mais que



1. L'UNIVERS contient des nuages de gaz (*en bleu et en vert*) que nous observons tels qu'ils étaient à des époques d'autant plus reculées qu'ils sont lointains. De plus, il y a environ 14 milliards d'années, l'Univers était peuplé de quasars (*points rouges*), des noyaux actifs de galaxies si lumineux qu'ils sont visibles à des distances de l'ordre du rayon de l'Univers observable. En étudiant ces quasars,

les astronomes sondent l'espace-temps sur près de 80 pour cent de l'âge de l'Univers. En effet, la lumière des quasars est partiellement absorbée par les atomes des nuages de gaz qu'elle rencontre sur son passage. Ainsi, les spectres d'absorption correspondant nous renseignent sur une éventuelle évolution des propriétés des atomes au cours des 14 derniers milliards d'années.

nous devons mesurer. Ces constantes sont-elles vraiment fondamentales (auquel cas, on ne pourra que les mesurer expérimentalement) ou seront-elles un jour expliquées par une théorie plus générale que nous ignorons encore ? Dans ce dernier cas, l'expérience passée des physiciens les porte à croire que cette nouvelle théorie révélera des relations simples et harmonieuses entre les choses... et ils ont du mal à imaginer qu'elle puisse expliquer des rapports gigantesques entre deux aspects de la réalité qu'elle aura, par ailleurs, unifiés.

Pour chercher des indices d'une telle théorie, Dirac usait d'arguments numéro logiques un peu douteux et souligna quelques coïncidences. Ainsi, dans un atome d'hydrogène, le rapport de la force électrique à la force gravitationnelle, qui vaut 10^{40} , est approximativement égal au nombre de tours effectués par l'électron autour du proton depuis le Big Bang. D'aucuns ont aussi remarqué que c'est la racine carrée du nombre de particules contenues dans l'Univers observable... Dirac postulat que ces coïncidences n'en étaient pas, et que ces différentes grandeurs étaient reliées par une physique encore

inconnue. Ceci ouvre la possibilité d'expliquer, un jour, les valeurs arbitraires des constantes numériques : en l'occurrence, l'intensité de la force de gravitation serait très simplement proportionnelle à celle de la force électrique divisée par l'âge de l'Univers, la valeur énorme de leur rapport aujourd'hui n'étant qu'une conséquence du grand âge du cosmos. Cette hypothèse a pour conséquence que certaines quantités dimensionnées, qui interviennent dans l'expression de ces nombres sans dimension, devraient varier au cours du temps : dans l'exemple que nous avons donné, le rapport entre la force électrique et la force gravitationnelle doit grandir, à mesure que l'Univers vieillit. Ainsi, selon la « théorie » de Dirac, la constante gravitationnelle est proportionnelle à l'inverse de l'âge de l'Univers. Il aurait aussi pu postuler que la charge de l'électron est proportionnelle à l'inverse de la racine carrée de l'âge de l'Univers.

Dans les années 1960, cette problématique a été éclairée d'un jour nouveau par la formulation du principe dit « anthropique ». Robert Dicke, de l'Université de Princeton, puis Brandon Carter, de l'Observatoire de Paris-Meudon, remarquèrent que l'âge de l'Univers mesuré par un observateur ne peut pas prendre n'importe quelle valeur : il doit être supérieur au temps nécessaire pour former des galaxies, des étoiles, des noyaux lourds... toutes choses sans lesquelles aucun observateur ne pourrait exister ! Les coïncidences observées par Dirac ne refléteraient que l'effet de sélection observationnelle exprimé par le principe anthropique : l'existence d'observateurs dans l'Univers est un fait qui impose des contraintes sur les lois physiques et donc sur la valeur des constantes.

Les premières tentatives pour tester la théorie de Dirac faisaient preuve de beaucoup d'ingéniosité. Considérons, par exemple, l'argument avancé, en 1948, par Edward Teller, le père de la bombe à hydrogène. Le Soleil, remarqua-t-il, est une boule de gaz en équilibre : la gravitation tend à la faire s'effondrer sous son propre poids, tandis que s'y oppose l'énergie produite en son cœur et rayonnée vers l'extérieur. Il en résulte que l'énergie rayonnée par le Soleil doit être d'autant plus grande que la force de gravitation est intense. Plus précisément, Teller calcula que l'énergie rayonnée varierait comme

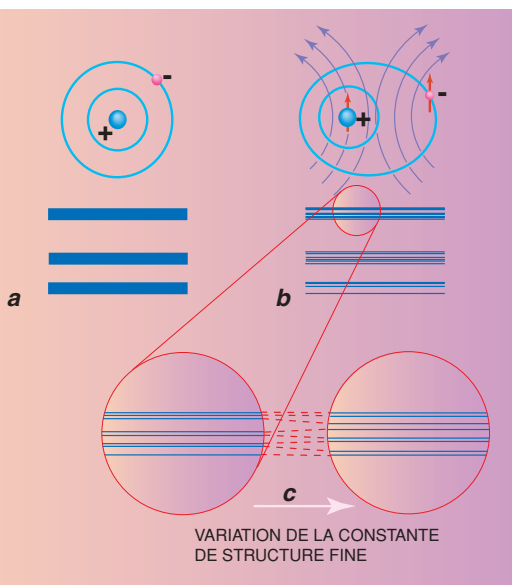
la puissance septième de la constante de gravitation si cette dernière évoluait au cours du temps. Ceci, à son tour, signifie que la température à la surface de la Terre varierait comme la puissance $5/2$ de cette même constante.

Par conséquent, si la constante de gravitation a diminué comme l'inverse de l'âge de l'Univers lors des 200 ou 300 derniers millions d'années, la température moyenne sur Terre devait être 20 pour cent plus élevée au Cambrien qu'aujourd'hui... à peine les trilobites seraient-ils apparus, qu'ils auraient été cuits dans l'eau de mer ! Pire, il n'y aurait pas eu d'océan au Précambrien, car la température de la Terre aurait dépassé le point d'ébullition de l'eau. De plus, le physicien américain d'origine russe Georges Gamow remarqua qu'avec une telle débauche d'énergie, le Soleil aurait déjà brûlé toutes ses réserves depuis longtemps ! Les physiciens firent alors feu de tout bois (la formation de la Lune, la rotation de la Terre, les datations géochimiques, etc.), et révélèrent une grande ingéniosité théorique pour contourner ces contraintes. Par exemple, Georges Gamow montra que l'on pouvait contrer son argument précédent sur le rayonnement solaire en formulant la théorie de Dirac de façon à ce que ce soit la charge de l'électron qui varie et non la constante de gravitation.

Constantes et métrologie

À ce stade, il faut remarquer que lorsque l'on veut donner un sens précis à la quête d'une variation des constantes, on rencontre une difficulté. La détermination expérimentale de la valeur des constantes repose sur la mesure de longueurs, de temps et de fréquences, c'est-à-dire sur la comparaison du système physique étudié à d'autres systèmes considérés comme étalons. Toute question sur la variation des constantes est directement reliée au choix d'un système d'unités, c'est-à-dire à la métrologie.

Tout d'abord, si les grandeurs dont dépend la matière qui constitue l'appareil de mesure varient en divers points de l'espace-temps, les propriétés de cet appareil vont varier. De ce fait, toute métrologie dépend à la fois de l'espace, du temps et de l'appareil de mesure utilisé. En conséquence, il n'est pas possible de mesurer directement la variation d'une constante dimensionnée, telle la masse du proton, par exemple. Nous



2. LE SPECTRE D'UN ATOME révèle les niveaux d'énergie des électrons en orbite autour du noyau (a). Ces niveaux d'énergie ont une structure fine (b) due à des effets relativistes : un électron en mouvement est soumis à un champ magnétique avec lequel il interagit par l'intermédiaire de son spin (lequel lui confère des propriétés analogues à celles d'une aiguille aimantée). À cela s'ajoute une structure hyperfine due à l'interaction entre les spins du noyau et des électrons. Une variation de la constante de structure fine produit des déplacements des niveaux d'énergie correspondants (c).

devrions comparer cette masse à un objet servant d'étalon... objet dont la masse dépend de celle du proton. Tout au plus, pouvons-nous, en principe, constater la variation d'une constante sans dimension, par exemple, le rapport des masses du proton et de l'électron.

De même que, dans l'hypothèse de Dirac, une variation du rapport de la force électrique à la force gravitationnelle indiquerait une évolution de la constante gravitationnelle ou de la charge de l'électron, la variation d'une constante sans dimension pourrait être interprétée comme la variation d'une ou de plusieurs constantes dimensionnées qui entrent dans son expression. Toutefois, le choix des systèmes physiques utilisés pour définir nos unités a également des conséquences sur les variations qu'il est, par principe, possible d'envisager.

Prenons l'exemple du mètre dans le système de mesure international. Sa définition à partir d'une barre de platine iridié dépend de l'espace interatomique des métaux utilisés pour construire la barre, espace qui est déterminé, en première approximation, par le rayon atomique du krypton 86 : dès lors, aucune variation de la combinaison des constantes entrant dans l'expression de cette longueur d'onde ne pouvait être mesurée. Depuis 1983, le mètre est défini comme la distance parcourue par la lumière en $1/299\,792\,458$ seconde. Cela signifie que la vitesse de la lumière, c , est fixée par décret.

La constante de structure fine

En résumé, si nous voulons donner un sens à notre recherche, nous devons nous tourner vers la variation des constantes sans dimension. Si nous constatons de telles variations, nous pourrions les interpréter comme une variation de constantes dimensionnées, à l'exception de certaines d'entre-elles, qui, comme la vitesse de la lumière, entrent dans la définition même de nos unités de mesure et qui doivent être considérées comme fixes. Dans son principe, ce choix arbitraire est identique à celui que nous devons faire lorsque nous décrivons le mouvement d'un objet matériel : nous fixons le référentiel par rapport auquel le mouvement sera défini.

Parmi les constantes sans dimension connues des successeurs de Dirac,

Trois unités et trois constantes fondamentales

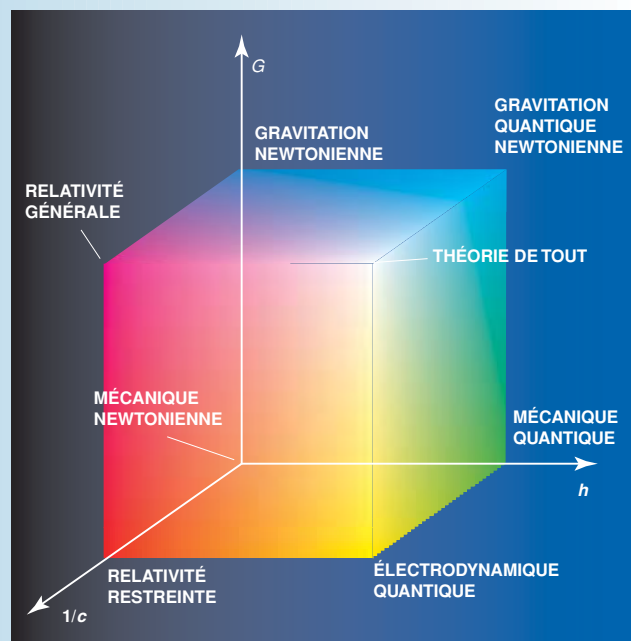
Dans le système international, les unités fondamentales sont le mètre, la seconde et le kilogramme. Considérons, par exemple, le cas de l'énergie, grandeur que l'on exprimait autrefois de diverses façons. Grâce à la thermodynamique, les physiciens du XIX^e siècle apprirent à relier l'énergie thermique telle qu'elle se manifeste dans un gaz chaud, par exemple, à une quantité de travail mécanique : c'est l'invention du concept d'énergie proprement dite. Dès lors, le joule remplaça les autres unités, nous débarrassant de coefficients de conversion inutiles ; ainsi, en vertu de l'équation $E_c = 1/2 mv^2$, une masse de un kilogramme animée d'une vitesse de un mètre par seconde a une énergie de un joule. Cela signifie que l'énergie a la dimension d'une masse, multipliée par une longueur au carré, divisée par un temps au carré, c'est-à-dire que le joule n'est autre que le kilogramme mètre carré par seconde carré.

Il en va de même pour la température. Son unité légale est le kelvin. Toutefois, la mécanique statistique nous enseigne que la température d'un corps représente l'énergie moyenne d'agitation de ses constituants. Dans ce cadre, le coefficient de proportionnalité qui permet de passer des joules aux kelvins, la constante de Boltzmann k_B (environ 10^{-23} joules par kelvin), n'a pas plus de signification que le coefficient 6,56 permettant de convertir les francs français en euros. On pourrait exprimer la température en joules, c'est-à-dire à l'aide d'une masse, d'une longueur et d'un temps étalons.

Cette réduction se poursuit pour toutes les autres unités du système international. Chaque progrès de la physique a unifié des domaines qui semblaient disjoints. À chaque fois, des grandeurs que l'on pouvait croire de nature différente se sont révélées commensurables et les nombres qui les reliaient ont déchu du statut de constantes fondamentales pour devenir de simples coefficients de conversion. Cette tendance va-t-elle se poursuivre ? Nous l'ignorons. À l'heure actuelle, il subsiste trois grandeurs fondamentales (longueur, durée et masse), c'est-à-dire trois unités. Il subsiste également trois constantes qui semblent jouer un rôle plus fondamental que les autres : la vitesse de la lumière, c , la constante de Planck, h , et la constante de gravitation, G . Si une théorie des cordes constitue l'étape suivante dans l'unification des lois de la physique, le nombre de constantes fondamentales serait

réduit à deux. En effet, dans cette théorie, seules interviennent la taille des cordes (de l'ordre de 10^{-35} mètre) et la vitesse de la lumière. Certains physiciens entretiennent l'espoir que l'on pourra aller plus loin : dans une future théorie ultime, toutes les constantes fondamentales auront été réduites à de simples coefficients de conversion.

Toutefois, il convient de rester prudent. Suivant que l'on néglige, c , h ou G , on obtient des lois physiques qui correspondent effectivement à des pans entiers de la réalité. Cela semble signifier que la nature est réellement organisée autour de ces trois constantes, ce qui exclut que l'on puisse un jour les ignorer.



Le cube des théories illustre le rôle des trois constantes «les plus» fondamentales. Suivant que l'on tient ou non compte de leur valeur non nulle, on obtient les théories découvertes par les physiciens et qui décrivent très bien des pans entiers de la nature.

la constante «de structure fine» fit l'objet de nombreuses attentions. C'est un nombre sans dimension formé à partir du rapport entre le carré de la charge de l'électron et le produit de la constante de Planck, de la vitesse de la lumière et d'une constante dimensionnée, nommée permittivité du vide. Sa valeur numérique expérimentale est $1/137,0359895$. La constante de structure fine, aussi nommée constante de couplage électromagnétique, caractérise l'amplitude des phénomènes électromagnétiques.

De ce fait, elle intervient dans de nombreux phénomènes physiques, tels les niveaux d'énergie des électrons dans un atome. Afin de détecter une éventuelle variation de la constante de structure fine, il nous faut étudier un système physique où ces phénomènes ont lieu et qui a, d'une façon ou d'une autre, «enregistré» au cours

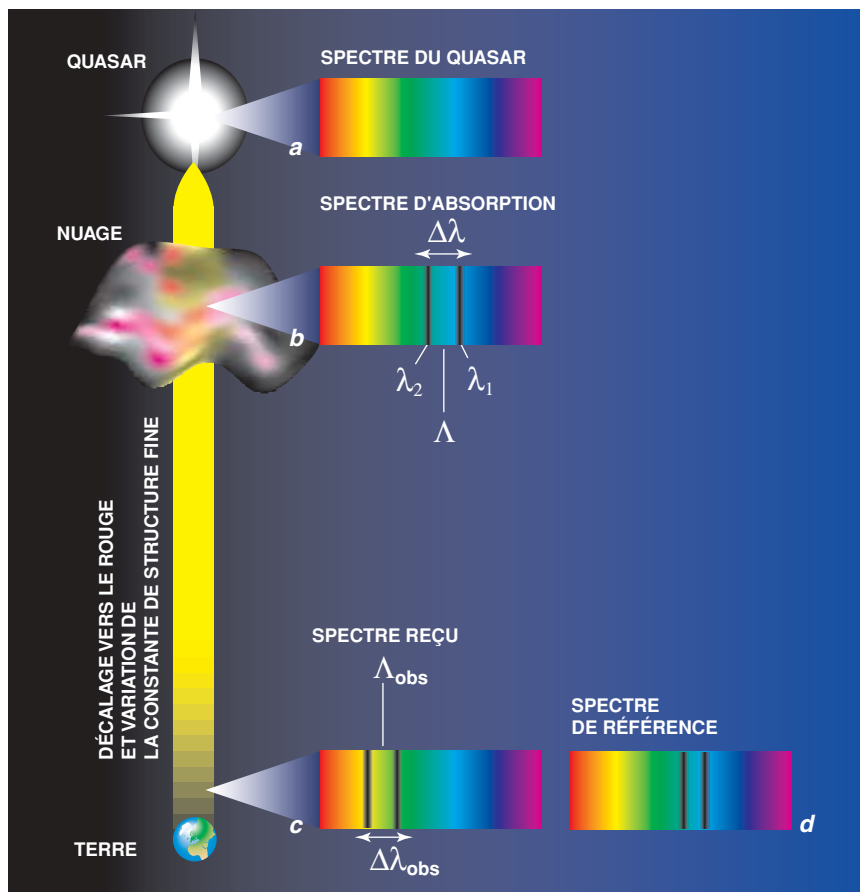
de son évolution la valeur passée de cette constante.

Certains physiciens ont étudié les données géochimiques. Ainsi, en 1972, le Commissariat à l'énergie atomique a découvert un site exceptionnel dans la mine d'Oklo, au Gabon. Il s'agit d'un réacteur nucléaire préhistorique qui a fonctionné de façon naturelle pendant environ 200 000 ans, il y a deux milliards d'années. Aujourd'hui, l'uranium naturel ne contient que 0,72 pour cent d'uranium 235 (l'isotope le plus instable) contre 99,28 pour cent d'uranium 238. De ce fait, il ne saurait entretenir de réactions en chaînes. Toutefois, la durée de vie de l'uranium 235 étant plus courte que celle de l'uranium 238, il y a deux milliards d'années, le minerai naturel contenait 3,68 pour cent d'uranium 235, ce qui est supérieur au taux critique de 3 pour cent nécessaire au fonctionnement d'un réacteur. La mesure des

concentrations relatives des divers nucléides produits lorsque le site d'Oklo était actif permet de reconstruire les conditions de fonctionnement de ce réacteur naturel. Ainsi, le rapport isotopique entre le samarium 149 et le samarium 147 est 45 fois plus faible que dans les conditions normales. Cette anomalie est due au fait que le samarium 149 a été détruit en absorbant les neutrons lents auxquels il était exposé pendant que le réacteur était actif. À partir de la mesure des abondances des divers isotopes du samarium, de l'uranium, de l'indium et du gadolinium, on établit la valeur de la probabilité de capture d'un neutron par un noyau de samarium 149. À l'aide d'un modèle du noyau de samarium, on peut relier cette probabilité de capture à la valeur de la constante de structure fine. Ayant établi les limites au-delà de laquelle la probabilité de capture d'un neutron par un noyau de samarium 149 n'a pas pu varier, on peut estimer les limites correspondantes pour les variations possibles de la constante de structure fine. La reconstruction de ce puzzle complexe a montré qu'elle n'a pas varié de plus de 10^{-5} pour cent lors des deux derniers milliards d'années, soit un taux de variation inférieur à 10^{-14} par an (en supposant que cette variation est linéaire). Ceci semble établir que la constante de structure fine n'évolue pas. Toutefois, ces résultats dépendent de notre compréhension des mécanismes à l'œuvre dans les noyaux atomiques.

Le spectre des atomes

On évite cette difficulté, lorsque l'on étudie le spectre des atomes dont les caractéristiques dépendent surtout des lois bien connues de l'électromagnétisme. Lorsque l'on introduit les corrections imposées par la relativité restreinte au comportement des électrons autour du noyau, on prend en compte des effets électromagnétiques qui modifient très légèrement les valeurs des niveaux d'énergie. Il existe, tout d'abord, un couplage entre le spin de l'électron et son moment orbital. En physique classique, ce couplage serait décrit ainsi : dans le référentiel de l'électron en tournant autour du noyau, le proton en mouvement engendre un champ magnétique. Or l'électron, particule chargée tournant sur elle-même, se comporte comme une petite aiguille aimantée qui interagit avec ce champ magnétique ambiant. Suivant son orientation, l'énergie de



3. LA LUMIÈRE D'UN QUASAR (a) passe parfois à travers des nuages de gaz intergalactiques avant de nous parvenir. Dans ces nuages, les atomes absorbent certaines longueurs d'onde correspondant à leurs niveaux d'énergie. On a représenté ici le cas d'une raie de longueur d'onde Λ , dotée d'une structure fine dont les deux composantes sont λ_1 et λ_2 (b). Le spectre reçu sur Terre (c) est différent du spectre produit en laboratoire par un atome semblable (d) pour deux raisons : le décalage vers le rouge dû à l'expansion de l'Univers a dilaté la longueur d'onde moyenne Λ (qui passe du bleu au jaune) et une variation de la constante de structure fine a modifié l'écart entre les deux composantes λ_1 et λ_2 . Un tel spectre nous apprendrait que la valeur de la constante de structure à l'époque où la lumière a traversé le nuage est différente de celle qu'elle affiche aujourd'hui.

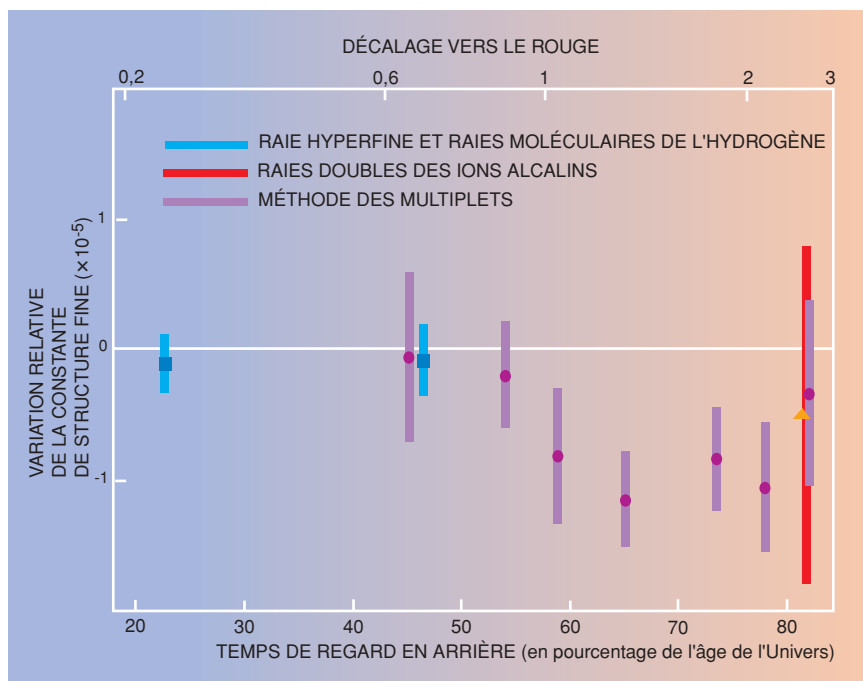
l'électron augmente ou diminue de cette énergie d'interaction. De plus, il existe un couplage entre le spin du noyau et celui de l'électron. Ces petites corrections relativistes se manifestent par la démultiplication des raies du spectre de l'atome, que l'on nomme sa structure fine et hyperfine. Comme leur nom l'indique, l'amplitude de ces corrections relativistes dépend de la constante qui nous intéresse.

Horloges atomiques et quasars

En principe, on peut détecter les variations de la constante de structure fine en étudiant le spectre de certains atomes. Les mesures les plus précises sont fondées sur l'utilisation d'horloges atomiques. Pour construire une telle horloge, on choisit un élément chimique, du césium, par exemple, et on étudie l'onde électromagnétique produite par une raie fine ou hyperfine de son spectre. La fréquence de cette onde donne la fréquence de l'horloge. Or, une variation de la constante de structure fine provoquerait un changement de cette fréquence. Bien sûr, pour la mesurer, il faut disposer d'une autre horloge. Ceci est possible en utilisant une horloge atomique construite à partir d'un atome différent et dont la fréquence sera certes modifiée par l'évolution de la constante de structure fine, mais de façon différente. Dès lors, la variation de la constante de structure fine au cours de l'expérience se manifestera par un décalage progressif des deux horloges atomiques.

Cette méthode de laboratoire peut être reproduite et permet un très bon contrôle des erreurs possibles. Récemment, Christophe Salomon et ses collègues du Laboratoire Kastler-Brossel de l'École normale supérieure ont comparé pendant deux ans les fréquences d'horloges atomiques au césium et au rubidium. Ils en ont déduit que la valeur de la constante de structure fine n'a pas varié de plus de 10^{-13} pour cent sur cette période...

Cependant, ces mesures, tout comme les études du réacteur naturel d'Oklo, ne nous renseignent pas sur les variations de la constante de structure fine il y a une dizaine de milliards d'années. Il est possible qu'elle ait varié dans un passé plus lointain avant de se stabiliser à sa valeur actuelle. Pour le savoir, il faut nous tourner vers des mesures astrophysiques. Il existe des méthodes



4. LES ÉVALUATIONS RÉCENTES de la constante de structure fine reposent sur trois méthodes différentes. On déduit sa valeur de la comparaison de la raie à 21 centimètres, correspondant à la transition entre deux niveaux d'énergie hyperfins de l'atome d'hydrogène, avec des raies correspondant aux différents états de la molécule de dihydrogène (en bleu). Elle est également mesurée à l'aide de raies doubles des ions alcalins (en rouge). La troisième méthode consiste à comparer deux à deux les spectres de différents ions dont les niveaux fins et hyperfins sont décalés dans des sens opposés par une même variation de la constante de structure fine (en mauve). Selon ces mesures, au cours de la première moitié de l'histoire cosmique, elle était moins élevée qu'aujourd'hui.

fondées sur l'observation du fond diffus cosmologique et sur l'abondance des éléments légers, synthétisés au cours des trois premières minutes de l'Univers, qui permettent d'établir la valeur de la constante de structure fine au tout début de l'histoire cosmique. Cependant, les résultats sont encore assez imprécis : sa valeur entre la première seconde et les 300 000 premières années ne différerait pas de plus de un pour cent.

En 1956, l'astrophysicien Malcolm Savedoff proposa une autre méthode d'étude de la constante de structure fine fondée sur l'analyse spectrale. Au cours de son premier milliard d'années d'existence, l'Univers s'est peuplé de noyaux de galaxie actifs extrêmement énergétiques : les quasars. Ces quasars constituent des sources très intenses approximativement réparties autour de nous sur une sphère de quelque 14 milliards d'années-lumière de rayon. Les nuages de gaz intergalactiques qui existaient à des époques ultérieures nous apparaissent à l'avant-plan des quasars dont ils absorbent partiellement la lumière. Ainsi, dans les spectres des quasars, nous observons des raies sombres qui nous renseignent sur les propriétés

des atomes de ces nuages du passé. Il devient possible de comparer le spectre d'un atome ici et maintenant à celui d'un de ses homologues ailleurs et autrefois. Ainsi, on vérifiera si la constante de structure fine a varié au cours du temps. Plus le nuage est lointain, et plus le spectre que l'on y étudie correspond à une époque reculée. En fait, il est théoriquement possible d'étudier l'évolution de la constante de structure fine sur des durées de l'ordre de 80 pour cent de l'âge de l'Univers.

En 2001, John Webb, de l'Université de Nouvelles Galles du Sud, et ses collègues ont amélioré le principe de cette méthode. Leurs données étaient constituées de 28 spectres d'absorption observés en direction de 13 quasars différents et concernant les ions magnésium I et II, aluminium II et III, silicium II, chrome II, fer II, nickel II et zinc II dont ils ont comparé les déplacements des raies. Ils ont également étudié 21 autres spectres d'absorption du silicium IV, issus de 13 quasars. L'ensemble de ces données leur a permis d'affirmer que la constante de structure fine a diminué de $5 \text{ à } 10 \times 10^{-3}$ pour cent pendant les 6 à 11 derniers milliards d'années. A-t-on vraiment détecté une variation

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...

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

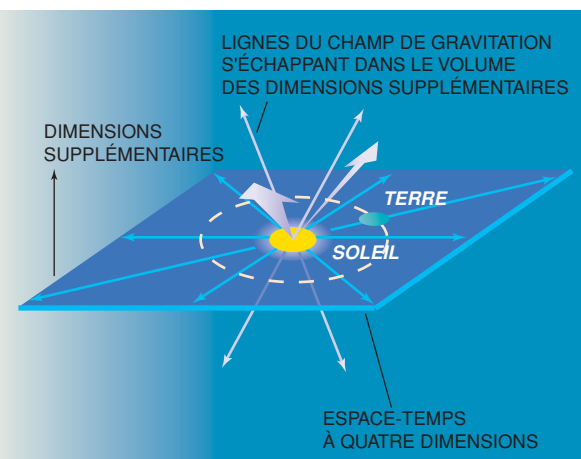
Très récemment, Alexandr Ivanchik et Dmitri Varshalovich, de l'Institut Ioffe, à Saint Petersburg, ainsi qu'Esther Rodriguez et Patrick Petitjean, de l'Institut d'astrophysique de Paris, ont suggéré que certains spectres d'absorption indiquaient une variation du rapport de la masse du proton à celle 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



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.

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.

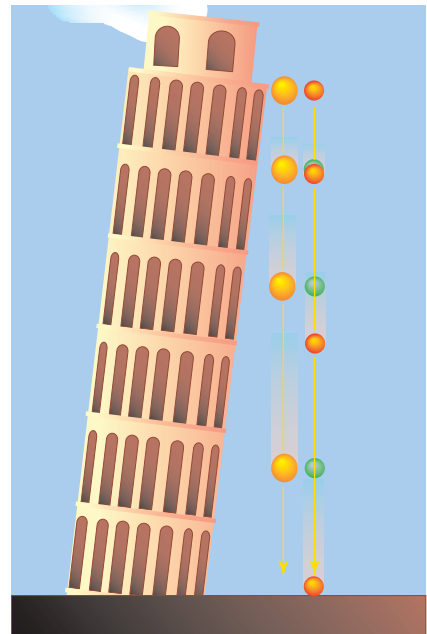
Si l'étude de la fixité des constantes constitue un test du principe d'équivalence, les mesures directes de l'universalité de la chute libre nous renseignent, à l'inverse, sur l'éventuelle variation des dites constantes. Aujourd'hui, on teste

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.

Le voyage des globules rouges

JACQUES DUFAUX • PATRICK SNABRE • GÉRARD GUIFFANT

Pour faciliter l'écoulement du sang et réduire les frottements, les globules rouges se déforment et s'alignent dans les capillaires. Dans les vaisseaux de diamètre supérieur, ils forment des agrégats qui se font et se défont au fil du réseau. Des anomalies dans la formation de ces agrégats perturbent la circulation sanguine.

Le 23 octobre 2000, dans la salle d'attente de l'aéroport de Londres-Heathrow, une femme s'écroule, victime d'une embolie pulmonaire. Un caillot de sang s'est formé dans son artère pulmonaire et l'a obstruée. Elle vient de faire un voyage qui a duré 20 heures, durant lequel ses jambes ont été immobilisées, de sorte que les petites pompes qui aident le sang à circuler ont cessé de refouler efficacement le sang vers le cœur. Des gros agrégats de globules rouges se sont formés, épaississant le sang et aboutissant à la formation de caillots qui ont obstrué certains vaisseaux.

Chaque année, le « syndrome de la classe économique » tue environ 100 personnes de par le monde, démontrant combien la fluidité du sang représente un équilibre à la fois vital et fragile. La victime de Londres ne fumait pas, était en bonne condition physique et avait déjà effectué plusieurs longs voyages en avion. Les modifications de la fluidité du sang sont intervenues en raison d'une dérégulation des écoulements sanguins dans le réseau circulatoire.

Comment le sang circule-t-il ? Le cœur est-il secondé par quelques auxiliaires efficaces ? Comment les globules rouges se faufilent-ils dans les minuscules capillaires qui irriguent les recoins les plus retirés de l'organisme ? Les globules rouges, ou érythrocytes, qui délivrent l'oxygène à tous les tissus, sont parmi les principaux acteurs de cette ronde ininterrompue. Remarquablement souples, ils se faufilent dans tous

les vaisseaux sanguins (voir la figure 1). Leur forme d'outre partiellement remplie les autorise à se déformer en tout sens, et à gagner les plus petits capillaires pour y délivrer leur bouffée d'oxygène. Ils ont également la propriété de former des agrégats réversibles (ce qui est différent de la coagulation, phénomène irréversible). Ces agrégats facilitent l'écoulement du sang dans les vaisseaux, mais peuvent aussi les obstruer quand l'agrégation est excessive. Nous examinerons ces deux propriétés des globules rouges – leur déformabilité et leur faculté naturelle à s'agréger – ainsi que leur rôle dans la circulation du sang.

Un réseau extrêmement ramifié

L'irrigation des tissus d'un organisme est une tâche ardue, la longueur totale des vaisseaux sanguins atteignant 90 000 kilomètres ! Pourtant, les puissances cumulées de 30 cœurs humains suffiraient tout juste à faire briller une lampe de chevet : le cœur est une pompe qui sacrifie plus à la longévité qu'à la puissance. Les ventricules expulsent, en 24 heures, quelque 10 000 litres de sang. Au XVII^e siècle, le médecin

1. LE RÉSEAU SANGUIN, très ramifié, est le siège de différents types d'écoulements. Dans les vaisseaux sanguins larges, telles les grosses artères, les globules rouges tournoient et se déforment au gré des tourbillons et des collisions incessantes. Dans les vaisseaux plus étroits, les écoulements lents favorisent l'association des globules sous la forme de « piles d'assiettes » ; cette agrégation est réversible. Devant une bifurcation, les empilements de globules se défont et chacun emprunte son propre chemin. Dans les plus petits capillaires, les globules rouges se déforment et adoptent une forme d'« aile de parachute ».