

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

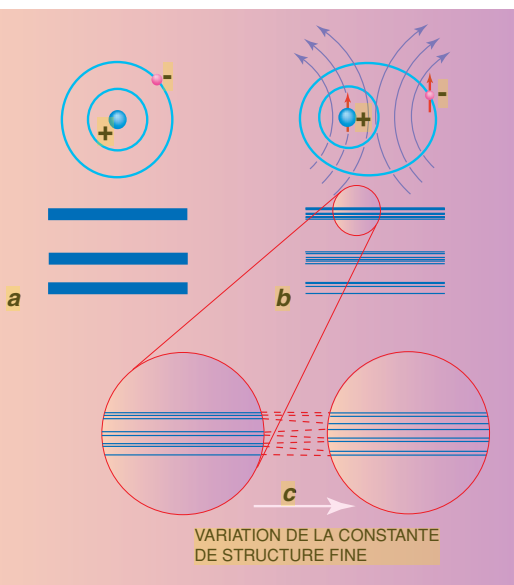
la puissance septième de la constante de gravitation si cette dernière évoluait au cours du temps. Ceci, à son tour, signifie que la température à la surface de la Terre varierait comme la puissance $5/2$ de cette même constante.

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).