

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 numérologiques 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 postula 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

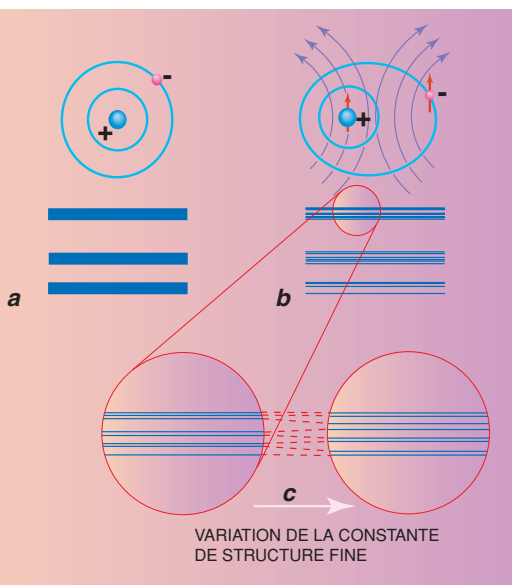
la puissance septième de la constante de gravitation si cette dernière évoluait au cours du temps. Ceci, à son tour, signifie que la température à la surface de la Terre varierait comme la puissance $5/2$ de cette même constante.

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. Avec cette définition du mètre, on ne peut donner de sens à une variation de la combinaison des constantes entrant dans l'expression de ce rayon. La définition du mètre fut ensuite fondée sur la longueur d'onde d'une raie 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

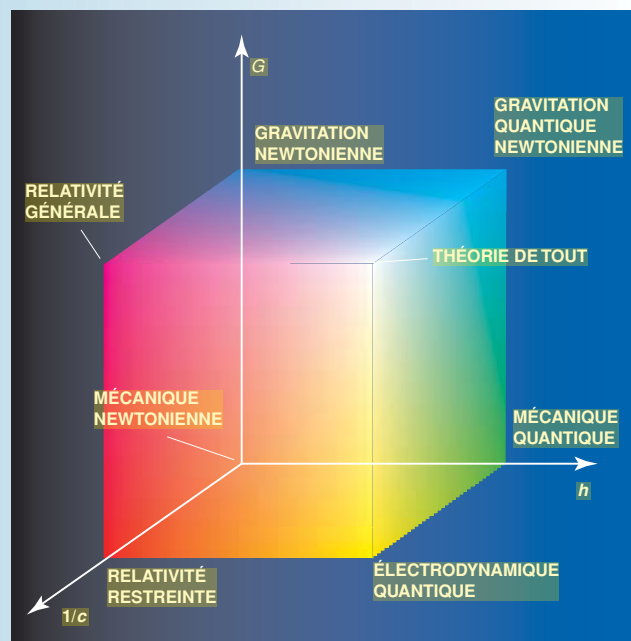
Dans le système international, les unités fondamentales sont le mètre, la seconde et le kilogramme. Considérons, par exemple, le cas de l'énergie, grandeur que l'on exprimait autrefois de diverses façons. Grâce à la thermodynamique, les physiciens du XIX^e siècle apprirent à relier l'énergie thermique 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 auraient 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

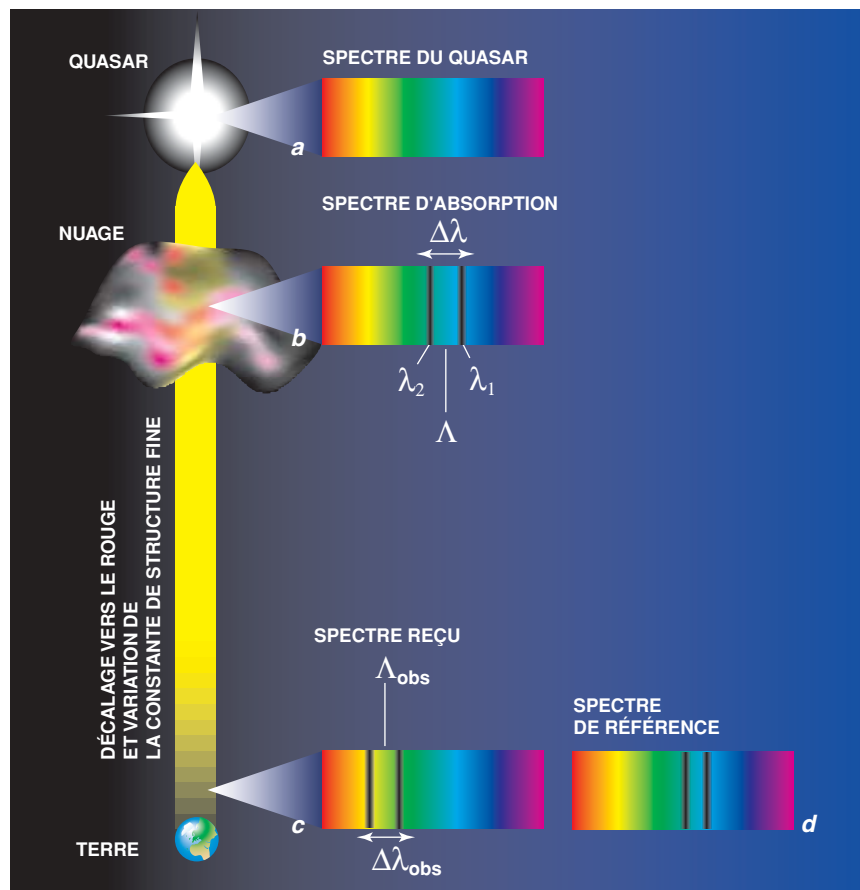
de son évolution la valeur passée de cette constante.

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.