

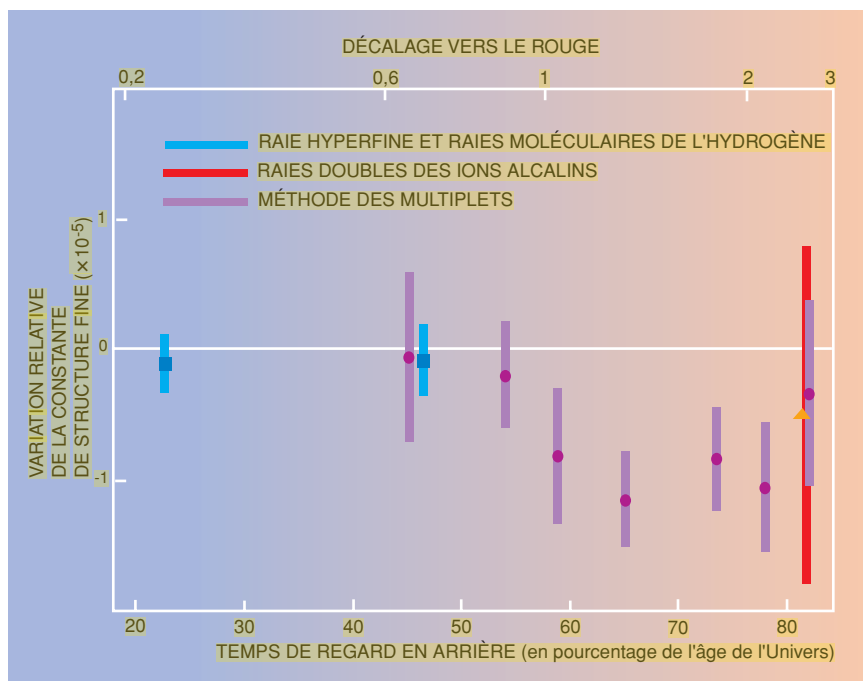
l'électron augmente ou diminue de cette énergie d'interaction. De plus, il existe un couplage entre le spin du noyau et celui de l'électron. Ces petites corrections relativistes se manifestent par la démultiplication des raies du spectre de l'atome, que l'on nomme sa structure fine et hyperfine. Comme 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 sa valeur actuelle 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

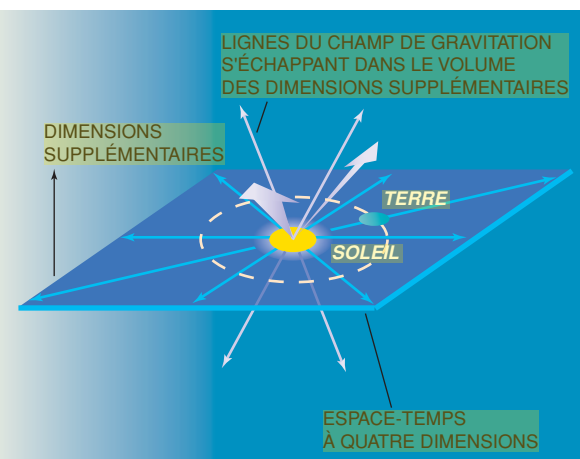
Très récemment, Alexandr Ivanchik et Dmitri Varshalovich, de l'Institut Ioffe, à Saint Petersburg, ainsi qu'Esther Rodriguez et Patrick Petitjean, de l'Institut d'astrophysique de Paris, ont suggéré que certains spectres d'absorption indiquaient une variation du rapport de la masse du proton à celle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