

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

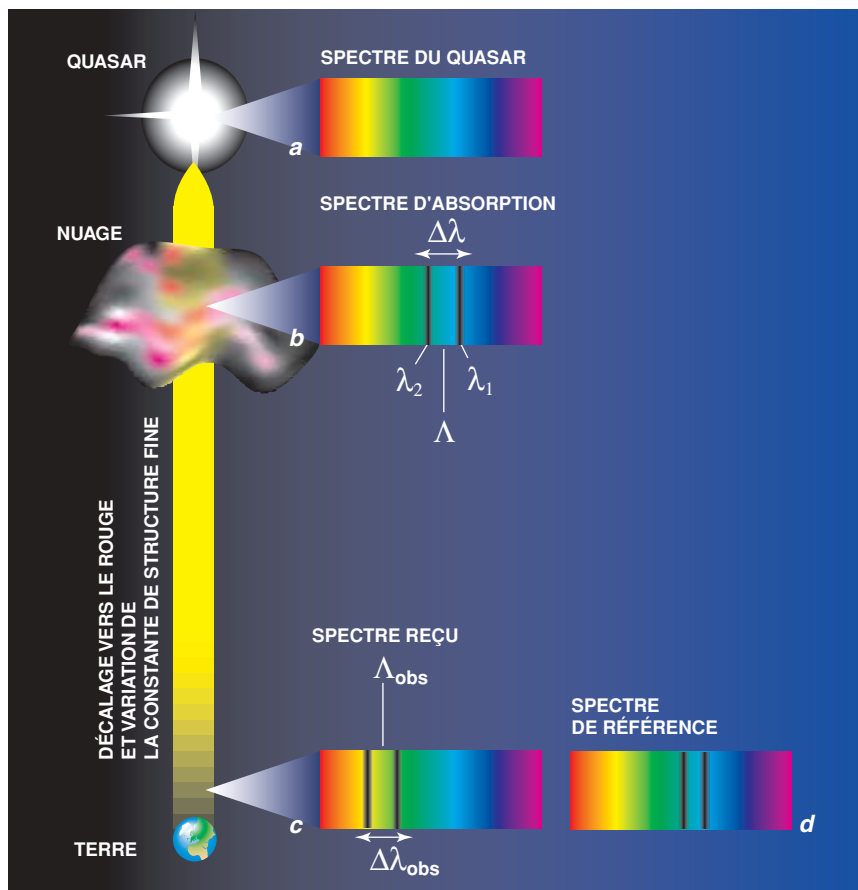
de son évolution la valeur passée de cette constante.

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  $\Lambda$ , dotée d'une structure fine dont les deux composantes sont  $\lambda_1$  et  $\lambda_2$  (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  $\Lambda$  (qui passe du bleu au jaune) et une variation de la constante de structure fine a modifié l'écart entre les deux composantes  $\lambda_1$  et  $\lambda_2$ . 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.**

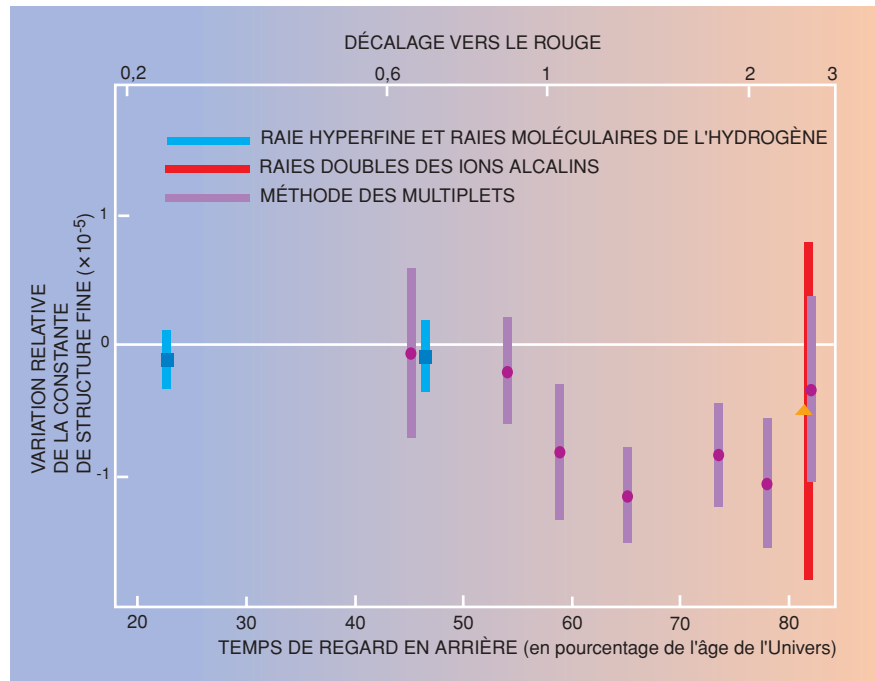
l'électron augmente ou diminue de cette énergie d'interaction. De plus, il existe un couplage entre le spin du noyau et celui de l'électron. Ces petites corrections relativistes se manifestent par la démultiplication des raies du spectre de l'atome, que l'on nomme sa structure fine et hyperfine. Comme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