

Que peuvent nous apprendre les constantes de la physique ?

Jean-Philippe Uzan*

Institut d'Astrophysique de Paris, GRACO, CNRS-FRE 2435, 98 bis, Bd Arago, 75014 Paris, France.

Laboratoire de Physique Théorique, CNRS-UMR 8627, Université Paris Sud, bâtiment 210, F-91405 Orsay cedex, France.

Ces notes rassemblent les points qui seront abordés dans le cours du matin du jeudi du 12ème festival d'astronomie de Fleurance. Le but de cet exposé est d'expliquer en quoi les tests de constance des constantes sont des tests de la loi de la gravité et de décrire, sur l'exemple de la constante de structure fine les méthodes mises en oeuvre dans ces études. Nous expliquerons en quoi ces tests ouvrent une fenêtre observationnelle sur des théories des hautes énergies, telle la théorie des cordes, qui ne sont par ailleurs pas encore testées mais qui pourraient avoir été à l'oeuvre lors des premiers instants de l'histoire de l'univers.

I. INTRODUCTION

La pratique scientifique repose sur le fait que l'on puisse reproduire et comparer des expériences effectuées en divers lieux et à diverses époques. Cela présuppose implicitement que les constantes de la nature telles que la masse et la charge de l'électron ne dépendent pas de sa position dans l'espace-temps.

La possibilité que les constantes pouvaient varier a été considérée pour la première fois par le physicien anglais Paul Dirac en 1937 dans son hypothèse des grands nombres. Dirac forma une série de nombres sans dimension et remarqua que parmi eux certains étaient très petits tel par exemple le rapport entre la force de gravitation et la force électromagnétique entre un proton et un électron

$$\frac{Gm_em_p}{e^2/4\pi\epsilon_0} \sim 10^{-40}. \quad (1)$$

Pour des raisons esthétiques, Dirac pensait que ces très petits nombres ne pouvaient pas être des constantes mathématiques pures mais devaient plutôt être des paramètres caractérisant l'état de l'univers.

Bien sûr, la valeur numérique des diverses constantes de la physique est dû aux aléas historiques liés à la définition de nos systèmes de mesure et à leur réalisation. Les interrogations de Dirac n'ont donc de sens que si l'on s'affranchit de l'arbitraire lié au choix d'un système d'unités et ne concernent que des rapports sans dimension. La remarque de Dirac traduit en fait une interrogation sur les lois de la physique que nous utilisons. Dans un cadre théorique donné, nous devons considérer un nombre de constantes dont la valeur n'est pas déterminée par la théorie et qui doivent être mesurées expérimentalement. Soit ces constantes sont vraiment fondamentales et alors on ne pourra que les mesurer, soit leur valeur pourra être expliquée (prédite?) par une théorie plus globale. Questionner la constance des

paramètres libres d'une théorie, c'est donc d'une certaine façon questionner la théorie elle-même.

Dirac construisit une série de rapports sans dimension incluant (1) qui est du même ordre de grandeur que l'inverse du nombre de tours qu'un électron fait (dans la théorie de Bohr) autour d'un proton pendant l'âge de l'univers. Dirac conclut sur la base de ces coïncidences numériques que tous ces grands (petits) nombres pouvaient être reconciliés si l'on supposait que la constante de gravitation G variait de façon inversement proportionnelle à l'âge de l'univers. Ceci n'est en rien une *théorie*, mais simplement un argument numérogique qui, de façon plus moderne, traduit un questionnement encore actuel : pourquoi la force de gravitation est-elle si faible comparée aux autres forces de la nature ?

Certaines coïncidences sont vraiment des coïncidences et d'autres traduisent des raisons profondes. Celles remarquées par Dirac ont été éclairées d'un jour nouveau par le principe anthropique. En effet, l'âge de l'univers telle que nous l'observons n'est pas arbitraire : il doit être supérieur au temps nécessaire pour former des noyaux lourds, des étoiles, des galaxies etc., choses sans lesquelles un observateur ne serait exister. Les coïncidences de Dirac ne reflètent qu'un effet de sélection observationnel : le fait que nous soyons là pour observer est en soit un fait observationnel à prendre en compte. D'un point de vue mathématique il s'agit de l'expression de la loi des probabilités conditionnelles de Bayes.

L'hypothèse de Dirac a vite été contrainte observationnellement. À titre d'exemple, rappelons l'argument avancé par Edward Teller. Le Soleil, comme toute étoile, est une boule de gaz en équilibre entre la gravitation qui tend à la faire s'effondrer sur elle-même et l'énergie produite par les réactions thermonucléaires et qui est rayonnée vers l'extérieur. on peut montrer que l'énergie rayonnée varie comme la puissance septième de la constante de gravitation, ce qui implique que la température à la surface de la Terre varie comme la puissance 5/2 de la constante de gravitation. Si G a diminué avec le temps cosmique, la température du Soleil devait être 20% plus haute au Cambrien...et les trilobites auraient bouilli dans l'eau de mer....et il n'y aurait pas eu d'océan au Précambrien, ce qui est en contradiction avec des preuves d'origine paléontologique. De plus, comme le calcula Georges Gamow, le Soleil aurait déjà brûlé toutes ses réserves !

Ceci ne referme pourtant pas la boîte que nous avons

ouverte. L'hypothèse de Dirac peut être reformulée de telle sorte que ces arguments soient contournés, par exemple en supposant que c'est la charge de l'électron qui varie comme la racine carré du temps. De plus, la question de la constance des paramètres arbitraires de nos théories reste et on peut se demander à quel point ceci peut être contraint expérimentalement, car cela représente de fait un test des théories que nous utilisons. Pour finir, peut-on expliquer la valeur de ces paramètres, existe-t'il une théorie où ils deviennent des variables dynamiques ?

Avant d'aborder ces différents points, remarquons que pour donner sens à ce genre de questions, il faut se restreindre à l'étude de quantités sans dimension afin de s'affranchir du système d'unités utilisé. Toute mesure physique repose principalement sur des comparaisons de distances, fréquences... Si les constantes varient d'un point à l'autre de l'espace-temps alors les caractéristiques des appareils de mesures doivent aussi changer. Il s'en suit que la comparaison de deux montres utilisant des transitions atomiques différentes sera différente d'un point de l'espace-temps à l'autre. La métrologie devient donc dépendante de l'espace, du temps et des appareils de mesure ! Le choix de la réalisation de l'unité a aussi des conséquences sur le type de variation que l'on peut envisager. Par exemple, les définitions successives du mètre à partir d'une barre de platine iridié, puis d'une raie atomique du krypton 86 et finalement de la distance parcourue par la lumière en $1/299.792.458$ de seconde impliquent que certaines combinaisons des constantes sont implicitement supposées fixes. Par exemple, la vitesse de la lumière est fixée par décret et notre mode opératoire rend la mesure de sa variation impossible. Une fois la variation d'une quantité sans dimension mesurée, on peut bien sûr interpréter la mesure en terme de quantités dimensionnées, mais ceci est arbitraire.

Pour finir, nous devons déterminer le nombre de constantes que l'on doit considérer. Comme nous l'avons déjà souligné, cela dépend du cadre théorique dans lequel on se place. La description des interactions fondamentales par le modèle standard de la physique des particules et la relativité générale a 20 paramètres libres. Cela ne veut pour autant pas dire que ces 20 paramètres sont des constantes fondamentales. Le débat sur le nombre de constantes fondamentales de la nature dépasse le cadre de ce cours (voir cependant la figure 1).

Au § II, nous expliquons en détail pourquoi le test de la constance des constantes est en fait un test de la loi de la gravité que nous utilisons. Ce résultat central permet de mieux comprendre pourquoi de tels tests sont en fait fondamentaux. Au § III, nous illustrons les méthodes utilisées sur le cas de la constante de structure fine et nous finirons, au § IV, par une description de certaines théories où la variation des constantes est envisageable.

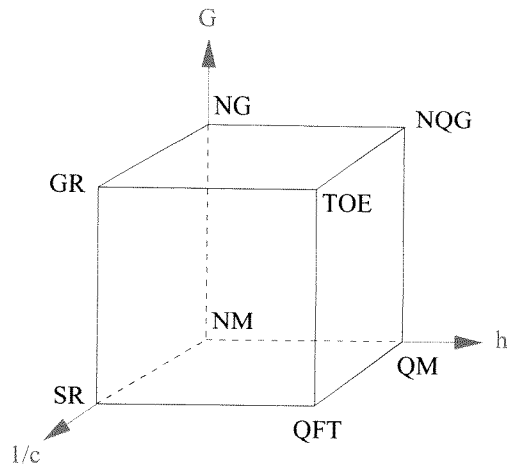


FIG. 1. Le cube des théories illustre le rôle des trois constantes "les plus" fondamentales. Les physiciens ont commencé par découvrir la mécanique newtonienne (NM), qui décrit bien le monde dans tous les cas où l'on peut considérer que la vitesse de la lumière est infinie. Lorsque ce n'est plus le cas, il faut recourir à la relativité restreinte (SR). Si l'on introduit le champ de gravitation dans la mécanique relativiste, on entre dans le domaine d'une nouvelle théorie : la relativité générale (GR). Par ailleurs, la prise en compte de la valeur non nulle de la constante de Planck introduit une quantification dans ces diverses théories. Ainsi, c , h et G semblent définir des frontières réelles dans le monde physique, qui délimitent les différents comportements exhibés par la nature.

II. UN TEST DE LA GRAVITÉ

La théorie de la relativité générale donne une description de la gravitation qui n'a toujours pas été mise en défaut. Un de ces fondements est le *Principe d'équivalence d'Einstein* qui suppose (1) que tous les corps tombent de la même façon indépendamment de leur masse et de leur composition chimique ; c'est l'universalité de la chute libre qui a été initialement postulée par Galilée et qui est un des fondements de la théorie newtonienne (2) que le résultat de toute expérience non gravitationnelle est indépendant du lieu où elle est effectuée ; c'est le principe d'invariance locale, et (3) qu'il est indépendant du référentiel où elle est faite ; c'est l'invariance de Lorentz locale.

Selon la théorie de la relativité générale, toutes les constantes doivent donc être constantes. Ceci est aussi vrai dans la théorie de Newton. En testant la fixité des constantes, on effectue donc indirectement un test de la théorie de la gravitation.

Pour mieux comprendre cela, rappelons nous que la masse d'un corps est reliée à son énergie par la célèbre formule $E = mc^2$. La masse d'un corps est donc "constituée" de la masse des protons, neutrons et électrons qu'il contient mais aussi de leur énergie de liaison. Dans

le cas d'un atome de charge Z et de numéro atomique A , on peut montrer (ce résultat est dû à Bethe et Weitzäker et son origine peut être comprise en considérant l'énergie électromagnétique qu'auraient Z protons de charge e confinés dans un sac de rayon atomique) que l'énergie de liaison électromagnétique est donnée¹ par

$$E_{\text{Liason}} = 98,25 \frac{Z(Z-1)}{A^{1/3}} \alpha \text{ MeV} \quad (2)$$

De façon analogue, le proton et le neutron sont formés de quarks up et down, leur masse dépend aussi de la constante de structure fine par l'intermédiaire de l'énergie de liaison des quarks. On peut montrer que la contribution de cette énergie de liaison à la masse du proton et du neutron sont

$$\delta m_p \simeq 0.092 \alpha m_p \quad \delta m_n \simeq -0.019 \alpha m_n. \quad (3)$$

Nous déduisons de cela que si la constante de structure fine dépend de l'espace et du temps alors la masse de tout atome dépend aussi de l'espace et du temps. La dépendance dans la constante de structure fine étant de la forme

$$\frac{\delta m(Z, N)}{1 \text{ MeV}} \simeq \left[86,31Z - 17,8N + 98,25 \frac{Z(Z-1)}{A^{1/3}} \right] \alpha. \quad (4)$$

Ceci a une conséquence immédiate. Considerons un corps de masse m se déplaçant sous l'effet d'une force \vec{f} à une vitesse \vec{v} par rapport à un référentiel dans lequel la constante de structure fine varie avec le temps t . D'après ce qui précède, la masse du corps va aussi dépendre de t par l'intermédiaire de α . L'équation du mouvement est donnée par

$$\vec{f} = \frac{dm\vec{v}}{dt} = m\vec{a} + \dot{m}\vec{v}. \quad (5)$$

Le corps subit donc une accélération additionnelle

$$\delta\vec{a} = - \left(\frac{\alpha}{m} \frac{\delta m c^2}{\delta \alpha} \right) \frac{\dot{\alpha}}{\alpha} \frac{\vec{v}}{c^2}, \quad (6)$$

ce qui implique un écart à la loi de la gravitation universelle. Une façon de modéliser une telle déviation est de supposer que le potentiel gravitationnel prend la forme

$$V(r) = -G \frac{m_1 m_2}{r} \left[1 + \alpha_{12} e^{-r/\lambda} \right] \quad (7)$$

qui décrit une déviation d'amplitude α_{12} sur une échelle spatiale inférieure à λ . On peut alors contraindre les

écarts à la loi de Newton expérimentalement entre 1 millimètre et la taille du système solaire. La figure 2 donne une idée du statut expérimental actuel.

D'autre part comme, d'après la discussion précédente [Eq. (4)], la dépendance $m(\alpha)$ pour chaque atome est différente, deux corps tombant dans le même champ de gravitation extérieur subiront des accélérations différentes ; ce qui implique une violation de l'universalité de la chute libre. Le facteur α_{12} est donc différent pour chaque couple de corps. On caractérise l'écart à l'universalité de la chute libre par le paramètre

$$\eta_{12} = 2 \frac{|\vec{a}_1 - \vec{a}_2|}{|\vec{a}_1 + \vec{a}_2|}. \quad (8)$$

Des expériences de laboratoire et dans le système solaire permettent de déduire que

$$\eta_{12} < 5 \times 10^{-13}. \quad (9)$$

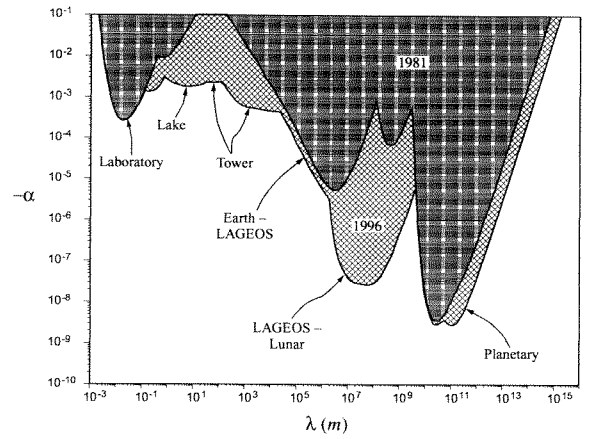


FIG. 2. Les contraintes expérimentales sur le paramètre α_{12} caractérisant l'écart à la loi de Newton [Eq. (7)] en fonction de l'échelle de longueur λ en mètre. Ces contraintes sont obtenues en laboratoire par des expériences de type Cavendish, par des vérifications de la chute libre à des échelles terrestres et par des expériences telles que la télémétrie laser lunaire et la mesure des orbites des planètes aux échelles de l'ordre de celle du système solaire.

En conclusion, nous venons d'établir un point très important :

1. la variation des constantes,
2. les écarts à la théorie de la relativité d'Einstein (ou plus simplement à la loi de la gravitation universelle de Newton),
3. la violation de l'universalité de la chute libre

¹On rappelle que $1 \text{ eV} \simeq 1.6 \times 10^{-19} \text{ J}$.

sont des phénomènes liés. En étudiant la fixité des constantes, on effectue donc un test de la théorie de la gravité. Ceci est une conclusion importante qui ouvre les horizons à l'étude des constantes. Entre autre, cela permet d'étendre aux échelles astrophysiques les tests de la gravité effectués dans le système solaire.

III. LA CONSTANTE DE STRUCTURE FINE

Pour illustrer les méthodes expérimentales et observationnelles mises en oeuvre pour contraindre la variation des constantes, nous allons considérer la constante de structure fine. Cette constante est définie par

$$\alpha = \frac{e^2}{4\pi\epsilon_0\hbar c} \quad (10)$$

avec e la charge de l'électron, \hbar la constante de Planck réduite, c la vitesse de la lumière et ϵ_0 la constante de permittivité du vide. Sa valeur numérique est

$$\alpha = 1/137,03599976(50). \quad (11)$$

Cette constante, aussi nommée constante de couplage électromagnétique, caractérise l'amplitude des phénomènes électromagnétiques. Elle intervient dans tous les phénomènes physiques où l'électromagnétisme joue un rôle. En considérant de tels systèmes physiques qui ont pu enregistrer la valeur de la constante de structure fine au cours du temps on peut contraindre sa variation temporelle. Les principaux systèmes vont maintenant être décrits brièvement.

La stabilité des noyaux lourds résulte principalement de l'équilibre entre la répulsion électromagnétique entre les protons et la force nucléaire attractive. Les phénomènes de désintégration α ou β peuvent s'expliquer par l'échappement par effet tunnel d'une particule α (2 protons + 2 neutrons) ou d'un électron et d'un anti-neutrino. On peut montrer que cela implique que la durée de vie d'un tel noyau dépend exponentiellement de la constante de structure fine et donc

$$\frac{\Delta\lambda}{\lambda} = s \frac{\Delta\alpha}{\alpha} \quad (12)$$

où la sensibilité s est une caractéristique de l'atome considéré. Par exemple, $s = 540$ pour l'uranium 238, $s = 770$ pour le samarium 147 qui tous deux se désintègrent par désintégration α ; $s = -180$ pour le rubidium, $s = -30$ pour le potassium et $s = -18.000$ pour le rhénium qui se désintègrent par désintégration β . On déduit de ces valeurs que si on arrive à démontrer que la durée de vie de ces noyaux n'a pas varié de plus de 1% alors on obtiendra une contrainte de l'ordre de 0,01% sur la variation relative de la constante de structure fine.

Pour obtenir des contraintes sur la variation de la durée de vie, on peut se baser sur la comparaison de mesure de datation par différentes méthodes (uranium-plomb, potassium-argon, rubidium-strontium etc...) et utiliser des données géochimiques. On arrive par de telles méthodes à montrer que ces durées de vie n'ont pas variées de plus de 1% lors des 3 à 4 derniers milliards d'années. Ce qui donne la contrainte

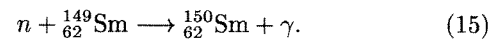
$$|\Delta\alpha/\alpha| < 10^{-4} \quad \text{sur } 3-4 \cdot 10^9 \text{ ans.} \quad (13)$$

Un noyau très intéressant est celui de rhénium qui a une sensibilité de -18.000. En comparant des données géochimiques, des météorites et des mesures en laboratoire, on peut déduire que sa durée de vie n'a pas varié de plus de 0,5% lors des 4,5 derniers milliards d'années. Ce qui donne la contrainte

$$|\Delta\alpha/\alpha| < 3 \times 10^{-7} \quad \text{sur } 4.6 \cdot 10^9 \text{ ans.} \quad (14)$$

Le phénomène d'Oklo est un phénomène naturel exceptionnel qui a été découvert en 1972 par le Commissariat à l'Énergie Atomique. Oklo est une mine d'Uranium du Gabon où l'on a pu prouver qu'un réacteur nucléaire naturel a fonctionné pendant 200 millions d'années et y a deux milliards d'années. Aujourd'hui l'uranium naturel ne contient que 0,72% d'uranium 235. De ce fait, il ne saurait entretenir une réaction en chaîne. Mais, comme la durée de vie de l'uranium 235 est plus courte que celle de l'uranium 238, le minerai était naturellement enrichi en isotope 235 dans le passé. Il y a deux milliards d'années, le minerai naturel contenait 3,68% d'uranium 235, ce qui est supérieur au taux de 3% nécessaire au fonctionnement d'un réacteur nucléaire. D'autres conditions telles que la présence d'un modérateur (de l'eau dans ce cas précis) capable de ralentir les neutrons rapides, la faible quantité d'éléments absorbant fortement les neutrons étaient aussi satisfaites.

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, et entre autre de "mesurer" les valeurs que les sections efficaces des réactions nucléaires avaient il y a deux milliards d'années. Une des observations clef est le rapport isotopique entre le samarium 149 et le samarium 147 qui est 45 fois plus faible que dans des conditions normales. Le samarium 149 a en effet absorbé les neutrons thermiques auxquels il était exposé pendant que le réacteur était actif



A partir de la mesure des abondances des divers isotopes du samarium, de l'uranium, du niobium et du gadolinium, on peut reconstruire la valeur de la section efficace de capture d'un neutron par le samarium 149. Cette section

efficace dépend fortement de l'énergie d'une résonance à 97.3 meV ; on peut traduire la contrainte sur sa variation en une contrainte sur la variation de l'énergie de la résonance puis sur la variation de constantes dont la constante de structure fine. Cette dernière étape demande d'effectuer une modélisation fine du noyau de samarium, ce que nous ne pouvons pas détailler ici. La reconstruction de ce puzzle complexe a permis de montrer que la constante de structure fine n'avait pas variée de plus de

$$|\Delta\alpha/\alpha| < 10^{-5}\% \quad (16)$$

lors des deux derniers milliards d'années.

Les spectres atomiques sont les systèmes qui dépendent le plus de la valeur de la constante de structure fine. Les niveaux d'énergie d'un atome sont quantifiés. Si l'on néglige les effets relativistes, le spectre d'énergie d'un atome simple comme l'hydrogène est donné par le rapport entre l'énergie d'ionisation, $-E_I \simeq 13.6$ eV, nécessaire pour arracher un électron, et le carré d'un nombre entier caractérisant le niveau d'énergie

$$E_n = -\frac{E_I}{n^2} \left(1 + \frac{m_e}{m_p}\right)^{-1}. \quad (17)$$

Les effets relativistes induisent des corrections dépendant de la puissance quatrième de la constante de structure fine et peuvent avoir un signe positif ou négatif ; il s'agit de la structure fine et hyper-fine. La structure fine prend en compte les effets relativistes liés à la vitesse de l'électron et l'interaction entre le spin de l'électron et son moment orbital : dans le référentiel propre de l'électron, le champ électrique du proton est "ressenti" comme un champ magnétique. Au spin de l'électron est associé un moment magnétique qui interagit avec ce champ magnétique ambiant, ce qui change l'énergie de l'électron. La structure hyperfine prend en compte le fait que le noyau a lui aussi un moment magnétique qui interagit avec celui de l'électron. À titre d'exemple, les niveaux d'énergie de la structure fine de l'atome d'hydrogène prennent la forme

$$E_{nIJ} = \frac{-2E_I\alpha^{-2}}{\left[1 + \alpha^2 \left(n - J - 1/2 + \sqrt{(J + 1/2)^2 - \alpha^2}\right)^{-2}\right]^{1/2}}. \quad (18)$$

Ainsi en comparant différentes transitions, on peut éliminer la seule quantité dimensionnée (E_I) afin de contraindre des combinaisons impliquant la constante de structure fine, m_e/m_p et le moment gyromagnétique du proton (g_p).

La première méthode est de comparer des horloges atomiques construites à partir d'atomes différents. Cette méthode de laboratoire a l'avantage de pouvoir être

reproduite et permet un meilleur contrôle des effets systématiques mais elle ne permet de tester la variation des constantes que sur des échelles de temps allant du mois à l'année. La meilleure contrainte a été obtenue par l'équipe du laboratoire Kasler-Brossel dirigée par Christophe Salomon à l'École Normale Supérieure. En comparant pendant près de deux ans des montres atomiques au césium et au rubidium, cette équipe a déduit que la valeur relative de la constante de structure fine n'avait pas varié de plus de

$$|\Delta\alpha/\alpha| < 10^{-13}\% \quad (19)$$

sur cette période.

Pour sonder des échelles de temps plus grandes, il faut se tourner vers des mesures astrophysiques. Pour pouvoir mesurer une variation de la constante de structure fine, il faut absolument mesurer des raies dont l'origine est due aux corrections relativistes. En effet, le spectre atomique non relativiste (17) est proportionnel au carré de la constante de structure fine et n'est affecté que d'une déformation globale indistinguable de celle induite par le décalage spectral vers le rouge dû l'expansion de l'univers. L'idée de la mesure est d'observer le spectre d'absorption dû à des nuages intergalactiques (voir la figure 3). Les atomes de ces nuages sont excités par la lumière émise par des quasars, et qui se désexcitent en réémettant un photon dans une direction aléatoire. Il est donc perdu pour l'observateur. Seules les longueurs d'onde des transitions du spectre des atomes présents dans le gaz peuvent être absorbées ; il en résulte que le spectre du quasar possède un ensemble de raies d'absorption sombres qui sont la signature des atomes du nuage. En comparant ces spectres, qui caractérisent les niveaux atomiques au moment de l'émission du photon à des spectres obtenus aujourd'hui en laboratoire on peut déterminer si la constante de structure fine à varier au cours du temps. Plus la source est lointaine et plus cette contrainte concernera une grande échelle de temps.

On peut alors imaginer plusieurs stratégies. Les premières mesures utilisèrent principalement les doublets (ou multiplets) de structure fine d'atomes de type alcalin. Dans ce cas précis, on peut montrer que la séparation entre les deux composantes du doublet, $\Delta\nu$, et la fréquence moyenne, $\bar{\nu}$, sont reliés par

$$\Delta\nu/\bar{\nu} \propto \alpha^2. \quad (20)$$

En comparant les longueurs d'onde observées à un décalage spectral vers le rouge z et à des spectres de laboratoire, on obtient que $\Delta \ln \lambda|_z / \Delta \ln \lambda|_0 = [1 + \Delta\alpha_{EM}/\alpha_{EM}]^2$. En inversant cette relation, nous avons que

$$\left(\frac{\Delta\alpha_{EM}}{\alpha_{EM}}\right)(z) = \frac{1}{2} \left[\left(\frac{\Delta\lambda}{\lambda}\right)_z / \left(\frac{\Delta\lambda}{\lambda}\right)_0 - 1 \right]. \quad (21)$$

À titre d'exemple numérique, pour le silicium IV, on a

$$\left(\frac{\Delta\alpha_{EM}}{\alpha_{EM}}\right)(z) = 77.55 \left(\frac{\Delta\lambda}{\lambda}\right)_z - 0.5, \quad (22)$$

ce qui a permis à Varshalovich et ses collaborateurs de mettre la contrainte

$$\Delta\alpha_{EM}/\alpha_{EM} = (2 \pm 7) \times 10^{-5} \quad (23)$$

en utilisant des quasars entre $z = 2,8$ et $z = 3,1$.

Récemment John Webb de l'université de Nouvelles Galles du Sud et ses collaborateurs ont proposé une méthode dans laquelle les déplacements de plusieurs lignes d'absorption de plusieurs multiplets dans des ions différents sont corrélés. En effet, les calculs théoriques des spectres de ces atomes ont montré que les effets relativistes pouvaient avoir des signes et des amplitudes différents d'un atome à l'autre. En les corrélant et en comparant les observations à des spectres synthétiques obtenus pour diverses valeurs de la constante de structure fine, on améliore la sensibilité de cette méthode. C'est ainsi qu'en 2001 cette équipe a annoncé la détection d'une variation de la constante de structure fine. Leurs données étaient principalement constituées de 28 systèmes d'absorption en direction de 13 quasars (Mg I, Mg II, Al II, Al III, Si II, Cr II, Fe II, Ni II et Zn II), de 21 systèmes d'absorption pour Si IV vers 13 quasars et leur ont permis de prétendre que la constante de structure fine aurait variée de

$$\Delta\alpha_{EM}/\alpha_{EM} = (-0.7 \pm 0.23) \times 10^{-5} \quad (24)$$

lors des 9 à 11 derniers milliards d'années.

A t'on vraiment détecté une variation de cette constante ? La réponse est délicate et demande d'étudier en détails tous les effets systématiques dont la liste est longue. Tout d'abord, il peut y avoir des erreurs liées à la détermination expérimentale et théorique des longueurs d'onde des spectres auxquels les observations sont comparées. Quand on compare les spectres de différents atomes, ces derniers peuvent être localisés dans des régions distinctes du gaz et donc avoir des décalages spectraux Doppler différents. L'abondance isotopique des nuages doit être contrôlée car deux isotopes ont des spectres très peu différents, la présence d'un champ magnétique peut aussi décaler les niveaux d'énergie. D'un point de vue observationnel, la variation de la vitesse de la Terre pendant l'observation induit un décalage Doppler différentiel ; la dispersion atmosphérique et une variation de la température qui change l'indice de réfraction de l'air dans le spectrographe peuvent distordre le spectre. Un des atouts de la nouvelle méthode proposée par John Webb et ses collaborateurs est qu'il est peu probable que les effets systématiques possèdent les mêmes corrélations que les déplacements des divers niveaux considérés.

Cette mesure est donc très difficile et même si la méthode et l'analyse de Webb semblent convaincantes, la complexité des observations et des prédictions théoriques demande une vérification par une équipe expérimentale indépendante sur des systèmes d'absorption différents. Très récemment, une équipe franco-russe prétend avoir détecté une indication de variation du rapport entre les masses de l'électron et du proton. Pour cela, ils ont utilisé les décalages spectraux de raies de vibration et de rotation de l'hydrogène moléculaire présent dans des nuages associés à des quasars. Le rapport entre la masse du proton et de l'électron aurait varié de $(5.7 \pm 3.8) \times 10^{-5}$ sur une durée de dix milliards d'années. D'un point de vue théorique, cette mesure préliminaire présage, si elle se confirme, d'une seconde aubaine. La masse du proton dépend principalement de l'échelle d'énergie de la chromodynamique quantique et de la masse des quarks alors que celle de l'électron dépend principalement du mécanisme de Higgs, encore non vérifié expérimentalement. Cette mesure ouvre des fenêtres sur les constantes des interaction fortes et faibles. On peut montrer, dans le cadre des théories de grande unification, que si une des constantes de couplage varie alors toutes doivent varier et que génériquement le rapport entre les masses de l'électron et du proton doit varier de 10 à 50 fois plus que la constante de structure fine.

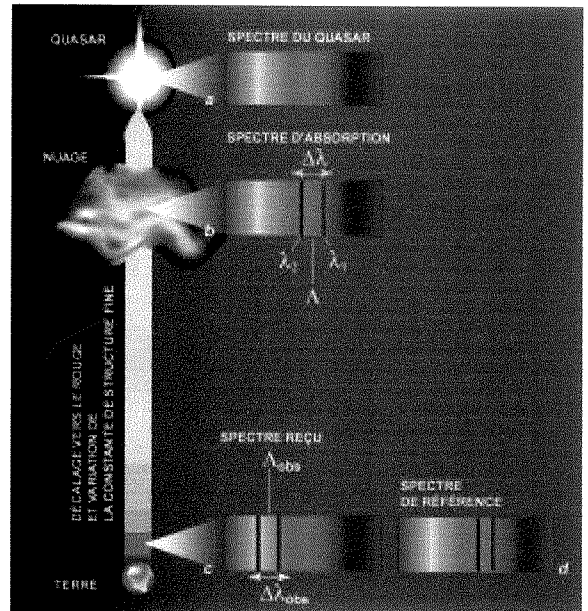


FIG. 3. La lumière émise par un quasar passe à travers des nuages intergalactiques composés d'atomes qui absorbent les longueurs d'ondes correspondant à leurs niveaux d'énergie. Il en résulte un spectre d'absorption qui a enregistré les propriétés atomiques dans le passé. En comparant ces spectres à des spectres de laboratoire, on peut en déduire des contraintes sur la variation de la constante de structure fine.

Aux échelles cosmologiques, il existe des méthodes fondées sur l'observation du fond diffus cosmologique et sur les abondances des éléments légers synthétisés lors de la nucléosynthèse primordiale.

Le fond diffus cosmologique est un rayonnement micro-onde ayant un spectre de corps noir à la température de 2,7 K. Dans l'univers primordial, plus chaud et dense, la matière est ionisée et les photons interagissent fortement avec le plasma cosmique par diffusion Compton. Leur libre parcours moyen est faible et l'univers opaque. A une température proche de 4.000 K, les protons et les électrons se combinent pour former de l'hydrogène, neutre, et avec lequel les photons interagissent faiblement : l'univers devient transparent au rayonnement électromagnétique. L'observation de ce fond diffus joue un rôle central en cosmologie moderne principalement dans la quête de la reconstruction de l'histoire primordiale de notre univers. La constante de structure fine entre en scène à travers l'opacité du milieu, qui est la quantité qui détermine l'instant où un photon interagit pour la dernière fois. Cette opacité dépend de la section efficace de Thomson, proportionnelle au carré de la constante de structure fine, qui décrit l'interaction photon-électron et du taux d'ionisation, c'est-à-dire de la densité d'électron libre. Cette dernière quantité dépend aussi de la constante de structure fine qui dicte les niveaux d'énergie de l'atome d'hydrogène. En effet, la fraction d'ionisation évolue dans la compétition entre la combinaison entre proton et électron et l'ionisation des atomes d'hydrogène formés par des photons suffisamment énergétiques. On peut penser contraindre la valeur de la constante de structure fine à 10^{-3} près avec les expériences satellites à venir telles MAP et Planck et les mesures actuelles permettent de conclure que la valeur relative de la constante de structure fine n'a pas variée de plus de 3% lors des quinze derniers milliards d'années.

Si l'on remonte plus loin dans le passé, les noyaux atomiques ne sont pas encore formés et l'univers est constitué d'une soupe de particules telles que des protons, des neutrons, des électrons... A une température de l'ordre de 10^9 K, la synthèse de éléments légers tels que l'hydrogène a lieu. L'abondance des divers éléments dépend du taux des interactions faibles, du taux d'expansion de l'univers et de la différence de masse entre proton et neutron. Les abondances de l'hélium, du deutérium et du lithium sont directement influencées par les constantes des quatre interactions fondamentales. Il est très difficile de prendre en compte la variation de toutes ces constantes sauf si on suppose une relation entre leur variation relative, qui peut être obtenue dans un cadre théorique précis. Le plus simple est de regarder l'influence de chacune des constantes indépendamment, mais ceci introduit un biais dans l'analyse. Sous cette hypothèse, on peut déduire que la constante de structure fine n'a pas variée de plus de 2% sur une période

d'environ 15 milliards d'années.

Les tests de violation de l'universalité de la chute libre que nous avons présentés dans la section précédente permettent aussi d'obtenir une contrainte sur la variation spatiale de la constante de structure fine. L'expérience de télémétrie laser Lunar Laser Ranging qui surveille la trajectoire de la Lune depuis plus de trente ans avec une précision d'un centimètre permet de conclure que la différence entre les accélérations de la Terre et de la Lune dans le champ de gravité du Soleil est au plus de l'ordre de 10^{-14} cm.s $^{-2}$. Connaissant la composition chimique de la Terre et de la Lune, on peut déduire que la variation spatiale de la constante de structure fine sur une taille de l'ordre de l'orbite terrestre est de l'ordre de 10^{-32} cm $^{-1}$. En extrapolant grossièrement à la taille de l'univers, on estime qu'à cette échelle la variation relative doit être de l'ordre de 10^{-4} , c'est-à-dire juste un ordre de grandeur plus grand que la mesure provenant des quasars. Il est fort probable que, si cette mesure est confirmée, les expériences MICROSCOPE ou STEP qui seront 100 et 10^5 fois plus sensibles que les expériences de télémétries laser, détecteront une violation du principe d'équivalence.

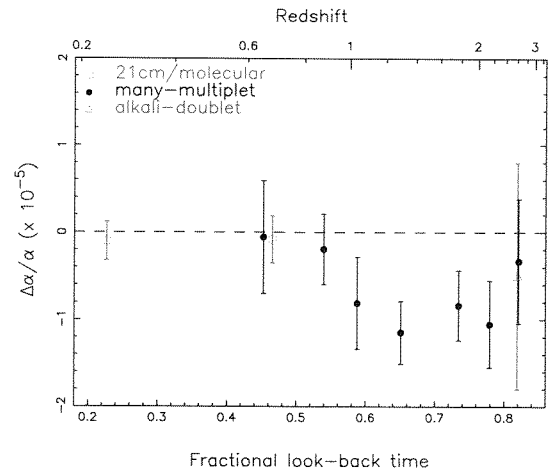


FIG. 4. Les résultats des analyses des spectres des quasars qui tendent à montrer que la constante de structure fine était plus faible dans le passé. Les résultats de trois méthodes sont présentés. Les carrés représentent les mesures obtenues en comparant la raie hyperfine de l'hydrogène à 21 cm à des raies de vibro-rotation, et en supposant que le facteur gyromagnétique du proton est constant. Les triangles représentent les contraintes obtenues à partir de doublets de structure fine d'atomes alcalins et les points noirs les données venant de la méthode des multiplets de J. Webb.

Pour comparer ces contraintes, il faut connaître la loi de variation de la constante de structure fine. On peut naïvement remarquer que si cette variation est linéaire

avec le temps cosmique alors les mesures de Webb sont incompatibles avec les contraintes d'Oklo et des météorites. La loi de variation $\alpha(t)$ ne peut pas être obtenue sans spécification d'un cadre théorique, ce qui nous amène à décrire les cadres où de telles variations sont envisageables.

IV. UNE FENÊTRE SUR LES EXTENSIONS DE LA RELATIVITÉ GÉNÉRALE

Avec l'avènement de la relativité générale en 1922, l'espace et le temps ont perdu leur structure rigide pour devenir un mollusque dynamique dont la géométrie est déterminée par les équations d'Einstein, une fois le contenu en matière connu. La théorie de la relativité est une théorie métrique de la gravitation, c'est à dire une théorie dans laquelle la gravité apparaît comme l'effet de la géométrie courbe d'un espace-temps. On peut montrer que ceci est une conséquence d'un principe connu sous le nom de principe d'équivalence d'Einstein que nous avons décrit au § II. Dans ce cadre, les constantes sont constantes et il faut aller au delà du modèle standard des interactions fondamentales pour trouver une origine à la variation des constantes. Le test de leur constance est donc, comme nous l'avons déjà souligné, aussi un des tests fondamentaux de la théorie de la gravitation.

Si les variations prétendues étaient avérées, elles indiqueraient que la relativité générale et le principe d'équivalence n'étaient que des cadres théoriques provisoires qu'il faudrait étendre. Les théories des cordes, dont le but est d'unifier les quatre interactions fondamentales et de donner une description de la théorie de la gravité à très haute énergie, sont des théories définies dans des espaces à plus de quatre dimensions. Les constantes fondamentales de ces théories sont des constantes définies dans cet espace de plus haute dimensionnalité. La physique que nous observons est cependant quadri-dimensionnelle et les constantes qui apparaissent dans la théorie effective peuvent s'exprimer en fonction des "vraies" constantes et du volume des dimensions supplémentaires (voir la figure 5). Une autre prédiction établie de ces théories de cordes est l'existence d'une particule, le dilaton, qui interagit avec la matière ordinaire. Les détails de son interaction varient d'une version de la théorie des cordes à l'autre. Ce dilaton est un champ scalaire, c.-à-d. une particule de spin 0, analogue au bosons de Higgs.

Le volume des dimensions supplémentaires et le dilaton sont des quantités dynamiques et pouvant varier dans le temps et l'espace. Comme nous savons que les constantes effectives observées ne varient que très faiblement, si elles varient, nous en déduisons que le dilaton et la taille des dimensions supplémentaires doivent être stabilisés ou proche de la stabilisation. Réciproquement, chacune de leur variation induit une variation des constantes. Un point à souligner est que si ce mécanisme est

celui à la base de la variation des constantes, il est peu envisageable que seule la constante de structure fine varie, les autres restant constantes. Comme le dilaton et la taille des dimensions supplémentaires apparaissent dans l'expression de chacune des constantes, nous avons à faire à une variation jointe de toutes les constantes. Cela rend le puzzle plus difficile à reconstruire car on peut imaginer des effets de compensation. À titre d'exemple, nous démontrons avec la figure 6 que dans les théories de dimensions supplémentaires, on s'attend de façon générique à ce qu'il existe des déviations à la loi de Newton sur des échelles plus petites que le rayon de compactification, R , et à une dépendance de la constante de gravitation de la forme

$$G = G_5/2R \quad (25)$$

où G_5 est la constante de gravitation à 5 dimensions. Si R varie, nous devons observer, dans notre espace quadri-dimensionnel, une variation de la constante de Newton.

Dans le cadre des théories de grande unification (c'est-à-dire de l'unification des interactions électromagnétiques, faibles et fortes), les trois constantes d'interaction doivent aussi varier de façon corrélée puisqu'à une énergie de l'ordre de 10^{17} GeV, elles s'unissent en une seule constante. Ceci indique de nouveaux que toutes les constantes doivent varier de façon concomitante. Dans le cadre de ces théories, les constantes varient et le principe d'équivalence n'est pas respecté. A chaque boson est associé une interaction : le photon est lié à la force électromagnétique, le graviton à la gravitation, les gluons à la force d'interaction forte, les bosons Z et W à la force faible. Le dilaton est aussi associé à une interaction à longue portée, la cinquième force. Comme il interagit différemment avec les divers composants de la matière ordinaire, cette nouvelle force dépend a priori de la composition et brise l'universalité de la chute libre. Ceci est une autre description de ce que nous avons exposé § II.

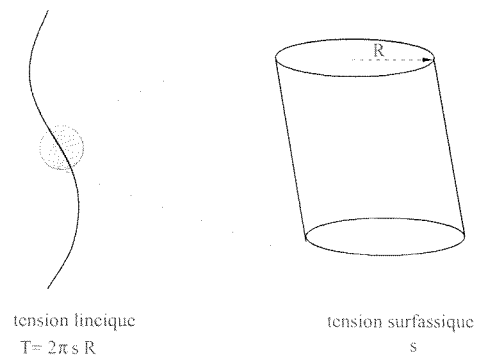


FIG. 5. Un capillaire de rayon R et de tension surfacique s se comporte à des échelles grandes devant R comme un fil de tension linéique $T = 2\pi R s$. La structure microscopique n'est accessible qu'à des expériences ayant une résolution suffisamment fine. De façon analogue, les constantes effectives observées dans notre espace à 4 dimensions s'expriment en fonction de (véritables) constantes dans l'espace de plus haute dimensionalité et du volume de l'espace des dimensions supplémentaires.

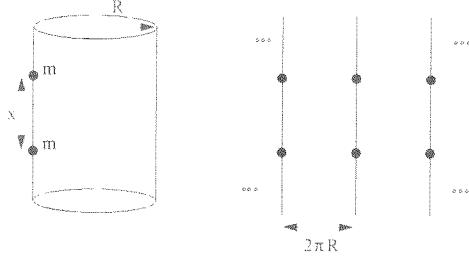


FIG. 6. Le potentiel gravitationnel à 5 dimensions est donné par $V = -G_5 m^2 / r^2$ où G_5 est la constante de gravitation à 5 dimensions. Notez la dépendance en r^{-2} au lieu de la dépendance habituelle en r^{-1} à 4 dimensions. Pour calculer la force ressentie par un corps de masse m , il est commode de développer la dimension compacte de telle sorte que la force subie est en fait celle qui serait effectivement créée par un ensemble de masses situées à des positions $(\vec{x}, 2\pi n R)$ où \vec{x} est la position dans l'espace quadri-dimensionnel et n un entier relatif. On en déduit que $V_{4D}(x) = -G_5 m^2 \sum_{n \in \mathbb{Z}} 1/(x^2 + 4\pi^2 n^2 R^2) = -(G_5 m^2 / 2R x) \operatorname{coth}(x/2R)$. Quand $x \ll R$, on retrouve la loi en r^{-2} . Cependant, quand $x \gg R$, on obtient que $V_4 = -G m^2 / x$ avec $G = G_5 / 2R$. Dans ce cas, beaucoup d'images contribuent et tout se passe comme si deux fils de densité linéique $m/2\pi R$ interagissaient, ce qui a pour effet de contrebalancer le comportement en r^{-2} et permet de retrouver la loi de Newton.

V. CONCLUSION

D'un point de vue théorique, la détection d'une variation des constantes aurait des implications importantes et serait une preuve incontournable de nouvelle physique. Pour l'instant, seules les observations des spectres d'absorption de quasars fournissent un signal et nul n'est à l'abri d'effets systématiques inconnus. D'un point de vue expérimental, il est donc important de comparer ces résultats avec d'autres systèmes. Soulignons de nouveau que si la variation de la constante de structure fine est linéaire avec le temps alors cette mesure est incompatible avec la contrainte d'Oklo. Comme toutes les constantes doivent a priori varier si une d'entre elles varient, il est aussi important de contrôler la validité des résultats expérimentaux souvent obtenus sous l'hypothèse qu'une seule constante variait. Là encore, le résultat de Webb

est incompatible avec d'autres contraintes telles que celle pour le rapport m_e/m_p dans le cadre des théories de grande unification.

Tout comme la théorie de la relativité générale a fait perdre son statut de scène immuable à l'espace temps, les nouvelles théories des hautes énergies font perdre aux constantes leur statut de constantes. Malheureusement, les théories telles que la théorie des cordes ne nous fournissent pas pour l'instant de mécanisme satisfaisant de stabilisation des dimensions supplémentaires et du dilaton et il faudra expliquer pourquoi la stabilisation de ces quantités a lieu si tard dans l'histoire de l'univers. Ceci ne semble pas très naturel mais une chose est sûre : la variation des constantes a une relation intime avec l'expansion de l'univers mais elle est loin d'être comprise.

REFERENCES

Références dans la presse de vulgarisation :

- Arkani-Hamed, N., S. Dimopoulos, et G. Dvali, *Les dimensions cachées de l'univers*, Pour La Science, numéro 276, octobre 2000.
- Cohen-Tannoudji, G., 1995, *Les constantes universelles*, Coll. Questions de sciences (Hachette, Paris).
- Green, B., *L'univers élégant*, Éditions Robert Laffont, 2001.
- Lehoucq, R., *Du rififi chez les constantes*, La Recherche, numéro 348, décembre 2001, pages 16-17.
- Lehoucq, R., and J.-P. Uzan, *La gravité à très courte distance*, Pour La Science, numéro 280, février 2001, pages 108-109.
- Uzan, J.-P., *Les constantes varient-elles ?*, Pour La Science, numéro 297, juillet 2002, pages 72-78.

Références dans la presse spécialisée:

- Damour, T., and F.J. Dyson, 1996, *Nuc. Phys. B* **480**, 37.
- Dirac, P.A.M., 1937, *Nature (London)* **139**, 323.
- Petley, B.W., 1985, *The fundamental physical constants and the frontiere of measurement*, (Adam Hilger, Bristol and Philadelphia).
- Sortais, Y., et al., 2001, *Physica Scripta* **T95**, 50.
- Uzan, J.-P., *The fundamental constants and their variations: observational status and theoretical motivations*, *Rev. Mod. Phys.*, [[hep-ph/0205350](http://arxiv.org/abs/hep-ph/0205350)].
- Webb, J.K., M.T. Murphy, V.V. Flambaum, V.A. Dzuba, J.D. Barrow, C.W. Churchill, J.X. Pochaska, and A.M. Wolfe, 2001, *Phys. Rev. Lett.* **87**, 091301.

Pages WEB :

- [www.curtin.edu.au/curtin/centre/waisrc/OKLO/].
- [map.gsfc.nasa.gov/].
- [astro.estec.esa.nl/SA-general/Projects/Planck/].
- [sci2.esa.int/Microscope/].
- [einstein.stanford.edu/STEP/].
- [physics.nist.gov/cuu/Constants/].