

Zeitschrift: Archives des sciences [1948-1980]
Herausgeber: Société de Physique et d'Histoire Naturelle de Genève
Band: 9 (1956)
Heft: 5: Colloque Ampère

Artikel: Développements récents à propos de la mesure du temps
Autor: Townes, C.H.
DOI: <https://doi.org/10.5169/seals-739043>

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. [Mehr erfahren](#)

Conditions d'utilisation

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. [En savoir plus](#)

Terms of use

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. [Find out more](#)

Download PDF: 29.01.2026

ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, <https://www.e-periodica.ch>

Développements récents à propos de la mesure du temps

par C. H. TOWNES

Ecole Normale supérieure, Paris

Le temps est une quantité qui pourrait être correctement définie comme une variable dans des équations de la physique, surtout dans les équations du mouvement de Newton ou celle de Schrödinger. Pour mesurer facilement le passage du temps, il nous faut un système qui suive ces équations avec une loi périodique et dont nous puissions compter le nombre des périodes avec assez de facilité et de précision.

Notre standard le plus précis a été fourni depuis les premières mesures quantitatives du temps par les mouvements périodiques des objets astronomiques. Ainsi la seconde standard dépend-elle des mesures astronomiques de la rotation de la terre autour de son axe. Nous avons aussi d'autres horloges assez précises avec lesquelles on peut comparer la rotation de la terre: ce sont le mouvement de la terre ou de la lune sur leur orbite, les oscillations d'un pendule et plus récemment les oscillations de cristaux de quartz.

Ces cristaux de quartz fournissent des oscillations très constantes pendant un temps court, mais dont l'erreur grandit de plus en plus, après quelques mois ou bien après quelques années. Ainsi un oscillateur à quartz peut ne varier que d'un pour 10^9 pendant un espace de temps assez court, mais en général, sa fréquence varie d'un pour 10^8 par mois.

Il est assez incomode d'employer le passage de la terre ou de la lune sur leur orbite pour fixer le temps, parce que leur période est très longue. Cependant, on a pu comparer assez précisément ces périodes à celle de la rotation de la terre pendant ces dernières années. Ces comparaisons ont révélé des différences supérieures à cinq pour 10^8 entre la rotation et les mouvements orbitaux. Puisque le mouvement orbital de la terre et celui de la lune sont d'accord avec plus de précision, on suppose que c'est la rotation de la terre qui a varié jusqu'à cinq pour 10^8 pendant une trentaine d'années.

Récemment les comparaisons de la rotation de la terre avec des horloges précises à pendule et des horloges à quartz ont décelé qu'il y a d'autres plus

petites variations saisonnières dans la rotation de la terre. Ces variations se répètent régulièrement avec les saisons et elles sont à peu près d'un pour 10^8 en amplitude. On peut les expliquer par des échanges de quantité de mouvement entre l'atmosphère et la terre. Ainsi pendant une saison les vents soufflent davantage sur un côté des montagnes et retardent la rotation, pendant une autre saison ils soufflent davantage sur l'autre et hâtent ce mouvement.

Depuis longtemps on a pensé employer les mouvements périodiques des atomes ou des molécules pour mesurer le temps, ou en d'autres mots construire des horloges atomiques. Un appareil peut s'appeler horloge atomique s'il compte avec assez de précision le nombre des oscillations d'un système atomique et peut ainsi mesurer un intervalle de temps. Heureusement, avec les techniques de la spectroscopie en radiofréquences ou en hyperfréquences, nous avons maintenant la possibilité de faire plusieurs types d'horloges atomiques. En effet, nous avons des raies spectroscopiques dans les régions de fréquences où il y a aussi des oscillateurs électroniques et donc des techniques pour compter leur nombre de périodes.

Par exemple, si l'on a une raie spectroscopique et que l'on peut comparer la fréquence du centre de cette raie avec la fréquence d'un oscillateur électronique, on obtient une sorte d'horloge atomique, car on peut alors comparer la fréquence de l'oscillateur avec la fréquence d'une horloge à quartz, ou bien de n'importe quelle autre horloge.

Des avantages importants dans l'utilisation d'un atome ou d'une molécule comme système périodique pour mesurer le temps viennent du fait que l'on ne peut pas déranger facilement leur mouvement périodique et que l'on peut toujours construire d'autres systèmes atomiques ou moléculaires identiques. Ce dernier fait donne à une bonne horloge atomique un caractère absolu et important qui manque pour la rotation de la terre ou pour une horloge à quartz.

Les premières horloges atomiques ont utilisé la fréquence d'absorption de l'ammoniac. On peut déceler cette raie en introduisant des hyperfréquences dans un tube d'absorption qui contient le gaz ammoniac à une très basse pression. D'ordinaire, ce tube prend la forme d'un guide d'onde; les hyperfréquences sont produites par un klystron et sont détectées par un cristal de silicium qui fournit un élément non linéaire. Si l'on fait varier la fréquence des micro-ondes émises par le klystron de part et d'autre de la fréquence d'absorption du gaz, la puissance reçue par le détecteur suit l'absorption de la raie.

Il s'agit de mesurer le centre de cette raie avec une très grande précision. En principe, la précision avec laquelle on peut marquer le centre n'est limitée que par les fluctuations fondamentales, d'origine thermique. Après avoir mesuré la raie pendant un temps t , l'incertitude ϵ sur la position du centre, à cause des fluctuations thermiques, est donnée par l'expression [1]:

$$\frac{\epsilon}{v} = 2 e \frac{\Delta v}{v} \left(\frac{2 k T}{\pi P_0 t} \right)^{1/2} \quad (1)$$

où v est la fréquence, Δv la demi-largeur de la raie, e la base des logarithmes népériens, k la constante de Boltzmann, T la température absolue, P_0 la puissance des micro-ondes introduite dans le guide d'onde.

Pour le gaz ammoniac, les fréquences de résonance sont environ $2,4 \times 10^{10}$ Hz. La valeur minimum de Δv est limitée par l'effet Doppler à environ 35 000 Hz. dans le cas de l'ammoniac. La puissance ne peut pas être beaucoup plus que dix microwatts sans donner des difficultés dues aux effets de saturation. Donc, après un temps t d'une seconde, le centre de la raie peut être déterminé en principe avec une précision ϵ/v d'à peu près 10^{-13} . On voit aussi dans l'expression (1) que la précision peut être même plus favorable si le temps de mesure t est plus long, résultat qui vient du fait que les fluctuations thermiques sont aléatoires.

La limite de précision donnée par l'expression (1) est très encourageante; cependant, elle n'indique que les possibilités ultimes. Elle indique, en effet, que l'on peut préciser le centre de la raie avec une incertitude inférieure à un dix-millionième de la largeur. En réalité, il y a d'autres incertitudes systématiques qui empêchent une telle précision. Elles viennent de la variation dans la transmission du guide, dans le détecteur et dans la puissance émise par la source U.H.F. quand la fréquence change. Bien que ces effets ne soient pas fondamentaux, ils sont en pratique toujours présents. Ils distordent la forme de la raie et rendent impossible la précision permise par le bruit thermique fondamental.

Lyons [2], au « National Bureau of Standards », a construit une horloge à ammoniac utilisant l'absorption dans un guide d'onde et a obtenu une précision d'un pour 10^8 . Une autre horloge de ce type, mais encore plus perfectionnée, a été construite par Shimoda [3] à l'Université de Tokyo, et a donné une précision pour des temps assez courts d'un pour 10^9 . Cette précision est peut-être près de la limite pratique pour la technique d'absorption.

En général, il semble assez difficile de déterminer le centre d'une raie avec une erreur inférieure à un millième de la largeur à cause de perturbations systématiques dans l'appareil de mesure. Donc il est important de réduire la largeur due à l'effet Doppler pour obtenir une très haute précision.

On peut éviter l'effet Doppler en employant un faisceau d'atomes ou de molécules qui circule dans une direction perpendiculaire au rayonnement H.F. Les atomes de cesium sont les plus employés pour un tel faisceau. La fréquence hyperfine de cet atome se trouve être près de dix mille mégacycles par seconde, et avec un faisceau d'une longueur pratique, on a pu obtenir une raie qui a une largeur d'à peu près trois cents cycles par seconde. Essen et Parry, au « National Physical Laboratory » en Grande-Bretagne, ont réussi récemment à mesurer le centre de cette raie avec une précision d'un pour 10^9 et ont donc obtenu une horloge atomique qui a cette précision.

L'appareillage d'Essen et Parry comprend un oscillateur électronique avec lequel la raie du césium est mesurée. La moyenne de dix mesures donne la précision indiquée ci-dessus. L'oscillateur électronique est comparé avec une horloge à quartz qui est à son tour comparée aux observations astronomiques. De cette façon, Essen et Parry ont comparé pendant plusieurs mois le temps astronomique et les vibrations de l'atome de césium. Une des plus grandes difficultés rencontrées vient des fluctuations des oscillateurs de comparaison. Cependant, avec des améliorations, il espère atteindre une précision d'un pour 10^{10} .

A l'Université de Columbia [1, 5], encore une autre technique a été développée, qui peut fournir une horloge atomique de grande précision et qui a aussi des applications pour l'amplification des micro-ondes et la spectroscopie de haute résolution.

La figure 1 montre les idées sur lesquelles sont basées cette dernière technique. Du tube marqué « source » sort un faisceau de molécules d'ammoniac, qui entre dans la région vidée. On peut supposer que ces molécules n'existent que dans deux états, l'un d'énergie supérieure, et l'autre d'énergie inférieure. Le faisceau passe par la lentille où il y a un champ électrique qui peut pousser les molécules à l'état supérieur vers l'axe, et qui repousse de l'axe les molécules à l'état inférieur. Cette lentille sera décrite en détail un peu plus tard. Ce faisant, on obtient un faisceau de molécules entrant dans la cavité et presque complètement composé de molécules à l'état supérieur.

Les molécules excitées du faisceau peuvent rayonner en effectuant une transition à l'état inférieur. Dans des conditions normales, il faut compter

à peu près un jour pour une transition, et le rayonnement est si faible qu'on ne peut le détecter. Cependant dans la cavité, il est possible de forcer les molécules à rayonner beaucoup plus vite. Si l'on admet un peu d'énergie électromagnétique dans la cavité par un guide d'onde, et que la fréquence du champ électromagnétique est accordée à la fréquence de résonance des molécules, on produit des transitions qui augmentent l'intensité du champ, et donc l'intensité des micro-ondes qui s'échappent de la cavité par le guide de sortie. Ainsi, la stimulation du rayonnement produit une sorte d'amplification des micro-ondes.

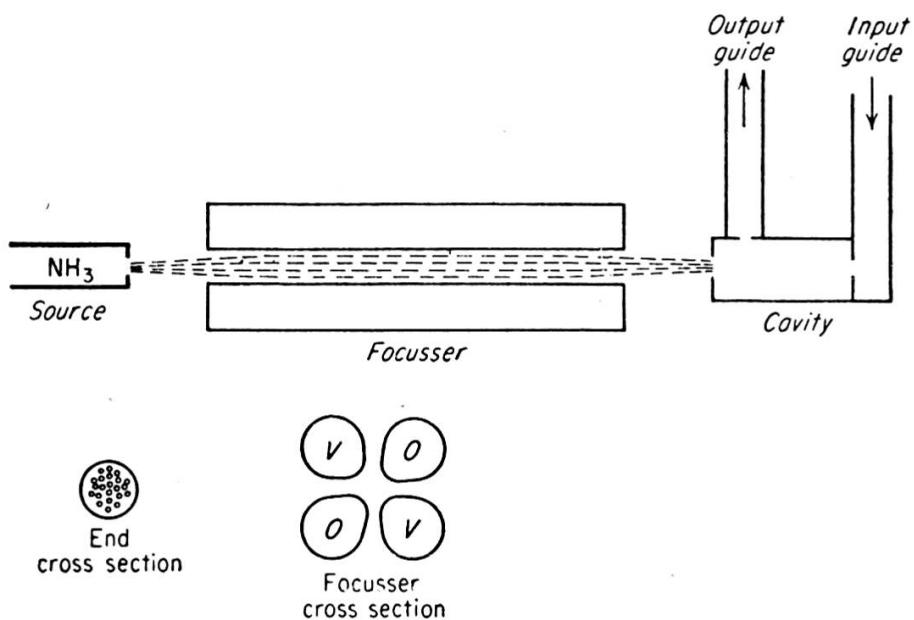


Fig. 1.

Un schéma du « maser » oscillateur et amplificateur utilisant un faisceau d'ammoniac.

On sait bien qu'un amplificateur peut devenir un oscillateur dans des conditions favorables. En fait, quand le flux de molécules entrant dans la cavité est suffisant, on constate une oscillation et les micro-ondes émises par les molécules sortent par le guide sans introduction du moindre signal.

On peut comprendre l'oscillation de la façon suivante: Supposons qu'une molécule fasse une transition dans la cavité et qu'elle produise donc un quantum d'énergie. Ce quantum peut stimuler le rayonnement d'une autre molécule si celles-ci sont en nombre suffisant, et si le quantum reste assez longtemps dans la cavité sans être absorbé par les murs ou sans s'échapper

par le guide. Si la nouvelle molécule rayonne aussi, on trouve un nouveau quantum qui, à son tour, stimulera les autres molécules. Ainsi la quantité de quanta dans la cavité croît par une réaction en chaîne jusqu'au niveau où toutes les molécules font des transitions et livrent leur énergie au champ électromagnétique dans la cavité.

La puissance de l'oscillation est à peu près $P = \frac{hv}{2} N$ (2)

où h est la constante de Planck et N le nombre de molécules qui entrent à chaque seconde dans la cavité. Pour un cas typique $N \approx 10^{14}/s$, et $P \approx 10^{-3}$ watt, cette puissance est petite mais elle est très grande par comparaison avec le bruit de fond, et donc utilisable.

Cet appareil peut ainsi servir d'amplificateur quand le flux de molécules n'est pas très grand, mais pour des flux plus élevés, il devient un oscillateur et une source de micro-ondes.

La séparation des molécules en deux états d'énergie se fait grâce à l'effet Stark. Dans un champ électrique E , l'énergie de l'état supérieur est augmentée de $\frac{E^2 \mu^2}{hv_0}$, où μ est l'élément de matrice du moment dipolaire, et hv_0 la séparation entre les deux états. L'énergie de l'état inférieur est abaissée de la même quantité. Ces changements d'énergie représentent un potentiel; donc les molécules à l'état supérieur subissent une force vers les régions de champ faible, et celles de l'état inférieur vers les régions de champ élevé. Sur les quatre électrodes du « focusser » sont appliquées des tensions donnant un champ électrique nul sur l'axe et d'environ 50 000 V/cm au maximum. Les molécules à l'état supérieur sont donc poussées vers l'axe et celles à l'état inférieur vers les électrodes. Un « focusser » de longueur 30 cm supprime assez complètement les molécules à l'état inférieur du faisceau qui entre dans la cavité.

Ce type d'appareil a été nommé un « maser », d'après les initiales des mots « Microwave Amplification by Stimulated Emission of Radiation ». Le principe peut être appliqué de plusieurs manières, et l'on peut imaginer d'autres techniques pour fournir des molécules ou des atomes excités. Cependant, jusqu'ici tous les « masers » emploient un faisceau de molécules d'ammoniac qui ont une fréquence de résonance d'à peu près $2,4 \times 10^{10}$ cycles par seconde.

La fréquence des micro-ondes qui sont produites par les molécules s'accorde, bien sûr, à la fréquence de résonance moléculaire. Cette résonance a une certaine largeur qui est donnée par l'expression $\Delta\nu \approx \frac{1}{2\pi\Delta t}$

où Δt est le temps de passage des molécules à travers la cavité. Pour des conditions typiques, $\Delta\nu$ est d'à peu près trois mille cycles par seconde, ou un dix millionième de la fréquence elle-même. Puisque les molécules utilisées ont une vitesse dans une seule direction, l'effet Doppler noté ci-dessus est évité.

Comme amplificateur, l'appareil peut amplifier dans une bande de fréquence qui correspond à la largeur de résonance. On peut se demander quelles sont les fréquences produites pendant que le système oscille. Comme tous les autres genres d'oscillateurs, celui-ci produit une oscillation beaucoup plus monochromatique que la largeur du circuit de résonance, le circuit dans ce cas étant les molécules.

En fait, cet oscillateur produit des ondes beaucoup plus monochromatiques que celles des autres sources déjà utilisées. On doit se rappeler que le rayonnement stimulé est toujours de la même fréquence et de la même phase que le rayonnement stimulant. Donc, s'il y a au commencement une seule fréquence dans la cavité, les micro-ondes qui résultent de l'oscillation seront tout à fait monochromatiques. Cependant il y a toujours dans la cavité un champ électromagnétique produit par les agitations thermiques. Ce champ stimule aussi des transitions; il en résulte donc une petite fluctuation de phase ou de fréquence des micro-ondes. On peut calculer l'effet de ces agitations thermiques, et l'on trouve une largeur δ de fréquence des micro-ondes produites par l'oscillateur [1, 5]

$$\delta \equiv \frac{4\pi kT (\Delta\nu)^2}{P} \quad (2)$$

où $\Delta\nu$ est la demi-largeur de la raie, ou 3000 Hz., P la puissance, k la constante de Boltzmann, et T la température de la cavité. Pour $T = 300^\circ K$ et $P = 10^9$ watt, $\delta = 4 \times 10^4$. En d'autres termes, les oscillations sont monochromatiques à une précision $\frac{\delta}{\nu} \cong 10^{-14}$.

Nous avons comparé les ondes émises par deux tels oscillateurs, pour éprouver leur régularité et leur monochromaticité. Pour les comparer, on amène les signaux des deux oscillateurs par des guides d'ondes à un détecteur au silicium, où les signaux sont mélangés. Ce mélange produit une nouvelle fréquence qui est la différence entre les fréquences des deux oscillateurs. Puisque la fréquence d'un oscillateur est d'environ $3 \cdot 10^{10}$ Hz et que la différence est peut-être une dizaine de cycles par seconde, on peut voir de façon assez sensible, en mesurant cette nouvelle fréquence des petites

fluctuations des oscillations. En fait nous avons observé la différence sur un oscilloscope et avons trouvé que pendant un temps court, c'est-à-dire une seconde, on ne peut voir aucune variation. Cela veut dire que les fluctuations pendant une seconde sont moins d'un dixième de cycle, ou que les signaux des deux oscillateurs sont monochromatiques, au moins jusqu'à une précision de 3×10^{-12} . Il semble probable qu'en fait la monochromatique soit encore meilleure, comme l'indique la théorie. En tout cas, il est évident que ces oscillateurs sont plus monochromatiques par un grand facteur que tout autre type connu. On peut aussi dire que cette expérience avec les deux horloges est la comparaison la plus précise réalisée jusqu'ici de deux quantités physiques. La longueur est une autre quantité susceptible d'une mesure précise. Cependant, on ne peut pas comparer deux longueurs avec une précision très supérieure à 10^{-8} .

Jusqu'ici nous avons parlé de la monochromatique ou de la régularité déterminée par les fluctuations pendant un temps assez court. Il y a aussi des variations qui se produisent pendant un temps plus long et qui sont un peu plus grandes. Actuellement, la source principale de ces variations est le changement des dimensions de la cavité.

L'oscillateur a deux circuits résonants: l'un est formé par les molécules avec une résonance très fine, l'autre par la cavité avec une résonance beaucoup plus large — peut-être mille fois plus large que celle des molécules. Pour large que soit cette résonance, elle n'en affecte pas moins un peu la fréquence des oscillations. Ainsi, si les dimensions de la cavité dérivent, la fréquence de résonance change et cause une variation dans la fréquence d'oscillation produite dans la cavité.

Un calcul théorique indique que la fréquence d'oscillation du système est donnée par l'expression [6]

$$\nu = \nu_0 + \frac{\Delta\nu}{\Delta\nu_c} (\nu_c - \nu_0) f(N) \quad (4)$$

où ν_0 est la fréquence résonante des molécules, $\Delta\nu$ la largeur de la raie, $\Delta\nu_c$ la largeur de réponse de la cavité, ν_c la fréquence résonante de la cavité, et $f(N)$ une fonction du nombre N de molécules qui entrent chaque seconde dans la cavité. $f(N)$ est voisin de l'unité pour les conditions typiques. Pour les oscillateurs déjà construits, le rapport $\frac{\Delta\nu}{\Delta\nu_c}$ est d'à peu près un millième. Donc, si les dimensions de la cavité changent de 10^{-6} à cause d'une variation

thermique ou du vieillissement des matériaux, notre horloge change sa marche de 10^{-10} .

Pour éprouver la précision de l'oscillateur « maser », il a fallu en utiliser un autre du même genre, puisque le premier était évidemment plus précis que toutes les autres horloges disponibles. La comparaison de deux oscillateurs par la méthode exposée ci-dessus a décelé, outre les variations aléatoires qui ont déjà été mentionnées, des variations assez systématiques et assez lentes d'une amplitude d'à peu près deux ou trois cycles par seconde. Puisque la fréquence est de $2,4 \times 10^{10}$, ces variations sont de 10^{-10} .

La température des deux cavités où ont lieu les oscillations a été maintenue constante avec une précision d'à peu près un dixième de degré. A partir du coefficient de dilatation des cavités, on peut calculer qu'une différence d'un dixième de degré entre les températures des cavités, doit justement causer la variation observée dans la fréquence d'oscillation. D'ailleurs, ces lentes variations semblaient synchronisées avec les changements de température. Il est évident qu'on pourrait contrôler la température beaucoup plus exactement, et de cette façon on obtiendrait peut-être une régularité encore plus grande dans la marche des deux oscillateurs. Cependant, il y a d'autres sources de variations [6] qui pourraient être sérieuses si on cherchait une précision nettement meilleure. En tout cas, il semble qu'une régularité de 10^{-10} soit réalisable et qu'on puisse espérer atteindre un résultat encore meilleur.

Nous avons discuté la régularité de ce genre d'oscillateur, mais il s'agit aussi de connaître la précision absolue, ou en d'autres termes, la précision de définition ou de reproduction de la fréquence dans d'autres laboratoires. Cette question n'a pas encore été bien étudiée. Mais de brèves expériences indiquent qu'on peut construire un oscillateur de ce genre et le régler facilement à une fréquence choisie avec une précision de 10^{-8} sans avoir eu de contact avec un autre étalon de fréquence. Il semble d'ailleurs qu'une précision absolue de 10^{-9} ne soit pas très difficile à obtenir.

Une méthode intéressante pour régler la marche d'une telle horloge est évidente d'après l'expression (4). Si la fréquence ν_0 est plus grande que ν_c , une variation du nombre N des molécules qui entrent dans la cavité produit un changement de la fréquence ν d'un certain signe. Si ν_0 est moins que ν_c , le changement est de l'autre signe. Ainsi on peut ajuster la cavité et sa fréquence ν jusqu'au point où le changement avec une variation de N est nul, c'est-à-dire où $\nu_0 = \nu_c$ ou $\nu = \nu_0$ selon l'expression (4). Des expériences très préliminaires indiquent que par cette méthode on peut reproduire la fréquence

v_0 avec une précision de 10^{-9} et qu'on peut espérer encore une amélioration.

Examinons maintenant les utilisations d'une horloge aussi précise. Bien entendu, on peut comparer une horloge atomique avec des horloges à quartz pour les mettre à l'épreuve et les améliorer. Une telle comparaison entre une horloge atomique et la rotation de la terre doit révéler plus distinctement les variations de la rotation et déceler des choses intéressantes au point de vue géophysique.

Mais il y a des expériences plus fondamentales auxquelles on peut maintenant songer. Des physiciens ont déjà beaucoup parlé de la possibilité de déceler le changement de marche d'une horloge idéale grâce à un changement du potentiel de la pesanteur. En principe, on peut comparer la fréquence d'une horloge atomique au niveau de la mer avec celle d'une horloge identique sur une haute montagne pour démontrer l'existence d'un changement dû au changement de potentiel. Cet effet doit produire une différence dans le rapport des fréquences qui égale $\frac{\Delta\Phi}{c^2}$, où $\Delta\Phi$ représente la différence de potentiel et c , la vitesse de la lumière. Malheureusement, avec une montagne de trois mille mètres, cette différence n'est que de 2×10^{-13} . Elle est encore au delà de la précision actuelle des horloges atomiques, mais on peut espérer la mesurer dans l'avenir.

Une question encore plus intéressante et plus fondamentale est de savoir si le temps déterminé par la pesanteur change par comparaison avec le temps atomique. Plusieurs physiciens ont suggéré que les constantes de la physique changent lentement, et en particulier que le rapport du temps déterminé par une horloge atomique est celui mesuré par des observations astronomiques change de $1/T_0$ chaque année où T_0 est l'âge total de l'univers. Puisque T_0 est environ 4×10^9 ans, une comparaison d'une horloge atomique et des observations astronomiques pendant dix années doit déceler un changement d'à peu près 2×10^{-9} . C'est très petit, et on ne peut pas utiliser la rotation de la terre pour le mesurer, à cause des variations déjà mentionnées. Cependant, il semble que le mouvement de la lune sur son orbite soit assez connu pour une telle précision, et qu'une expérience puisse maintenant dire si ces changements des constantes de la physique existent.

RÉFÉRENCES

1. TOWNES, C. H. and A. L. SCHAWLOW, *Microwave Spectroscopy*, McGraw-Hill, 1955.
 2. LYONS, H., *Ann. N.Y. Acad. Sci.*, **55**, 831 (1952).
 3. SHIMODA, K., *J. Phys. Soc. Japan*, **9**, 378, 558, 567 (1954).
 4. ESSEN, L. and J. V. L. PARRY, *Nature*, **176**, 280 (1955).
 5. GORDON, J. P., H. J. ZEIGER and C. H. TOWNES, *Phys. Rev.*, **99**, 1264 (1955).
 6. SHIMODA, K., T. C. WANG and C. H. TOWNES, *Phys. Rev.*, à paraître.
-