

La fontaine d'atomes

L'horloge la plus précise au monde utilise une fontaine d'atomes de césium.

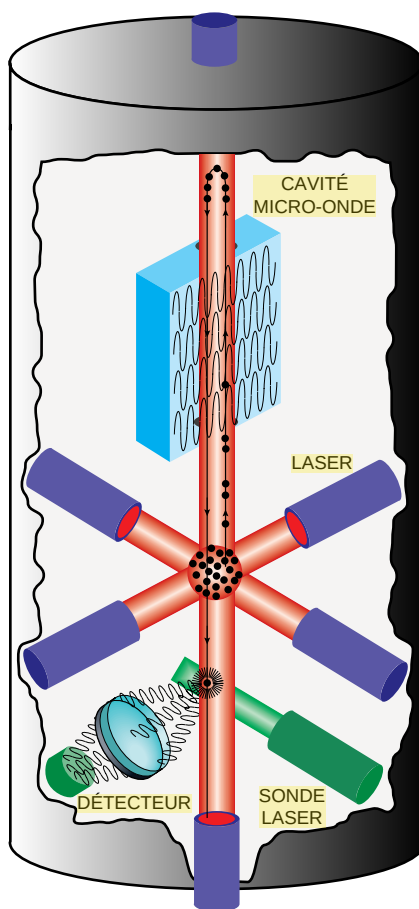
En 3 000 ans d'évolution, on est passé des horloges à eau, ou clepsydres, aux atomes : à l'Observatoire de Paris, André Clairon et ses collègues mesurent le temps en jetant en l'air des atomes de césium refroidis par laser. Leur horloge atomique est trois fois plus précise que les plus précises des horloges du moment : elle dérive de moins de une seconde en dix millions d'années.

Le fonctionnement des horloges atomiques repose sur la quantification de l'énergie des atomes : un atome change d'énergie en absorbant ou en émettant un photon (ou grain de lumière) de fréquence particulière. L'étalon primaire de temps est fondé sur la fréquence de transition entre deux états d'énergies très proches de l'énergie minimale de l'atome de césium : par définition, la seconde est égale à 9 192 631 770 fois la période (l'inverse de la fréquence) de cette transition.

Dans les horloges atomiques classiques, on utilise un jet d'atomes de césium, à une température de 120 degrés, qui se déplacent à des vitesses de quelques centaines de mètres par seconde. Un aimant dévie les atomes qui sont dans le niveau d'énergie minimale et arrête les autres. Les atomes déviés passent ensuite dans une cavité où sont émises des micro-ondes de fréquence égale à la fréquence de la transition atomique que l'on veut provoquer : certains atomes absorbent un photon, puis sont déviés par un autre aimant et détectés. Un circuit asservit la fréquence des micro-ondes pour maximiser le nombre d'atomes qui changent d'état. On stabilise ainsi la fréquence appliquée dans la cavité micro-onde, qui est alors la fréquence naturelle de transition des atomes. Pour mesurer le temps, on utilise la fréquence des micro-ondes appliquées.

Si, en théorie, la fréquence d'une transition atomique est très stable, en pratique, les perturbations extérieures (champ magnétique, collisions entre atomes, etc.) et le mouvement des atomes décalent les fréquences de transition : la transition se produit pour toute une gamme de fréquence. Afin de stabiliser les horloges, on cherche donc à isoler et à ralentir les atomes.

Dans leur fontaine atomique, A. Clairon et ses collègues ont utilisé les récentes techniques de refroidissement par laser pour ralentir les atomes jusqu'à des vitesses de l'ordre du centimètre par seconde. Les atomes sont ensuite lancés dans la cavité, ce qui permet de diviser par 100 la gamme des fréquences de transitions par rapport aux horloges classiques.



Six lasers piègent et refroidissent des atomes de césium. Toutes les secondes, les faisceaux verticaux lancent un paquet d'atomes qui passe deux fois dans une cavité dans laquelle des micro-ondes portent des atomes à un niveau d'énergie supérieur. Le système de mesure (en vert) détecte le nombre d'atomes qui ont changé d'état en absorbant un photon micro-onde.

TOUJOURS PLUS PRÉCIS

Depuis 1985, on sait ralentir un jet d'atomes en l'éclairant par un laser dont les photons se propagent en sens inverse du jet : lorsque l'énergie d'un photon est égale à l'énergie requise pour faire changer un atome d'état d'énergie, ce photon peut être absorbé, ralentissant l'atome. Afin de compenser le décalage dû au mouvement des particules, on accorde le faisceau laser à une fréquence légèrement inférieure à celle de la transition utilisée, qui pour le césium est nommée D_2 . Située dans l'infrarouge, celle-ci permet l'emploi de lasers communs.

Dans la fontaine atomique, six lasers piègent et refroidissent les atomes à quelques millièmes de kelvin (presque le zéro absolu). Ces atomes sont ensuite lancés vers le haut, par paquets de un million ; puis, on interrompt les lasers verticaux, de sorte que les atomes soient soumis à la seule force de gravitation. Lors de son ascension et de sa descente, le paquet d'atomes traverse une cavité micro-onde accordée à la fréquence de transition atomique. Sous la cavité, on détecte le nombre d'atomes qui ont changé d'état, et un circuit de rétroaction, analogue à celui utilisé dans les horloges atomiques classiques, asservit la fréquence des micro-ondes émises.

Pour mesurer la stabilité de leur nouvelle fontaine, les physiciens ont comparé la fréquence obtenue à celle d'un maser (champ micro-onde auto-entretenu) à hydrogène, horloge atomique très stable à l'échelle de la journée. Après trois heures de comparaison, on a mesuré une stabilité relative de 3×10^{-15} . Afin de poursuivre leurs comparaisons plus longtemps, les physiciens construisent une seconde fontaine atomique. Ils espèrent ainsi mesurer une stabilité relative 50 fois supérieure à celle des horloges classiques.

Peut-on ralentir les atomes plus que cela n'a déjà été fait ? Oui, mais alors, ils tombent, entraînés par la gravité terrestre. Pour ralentir cette chute, on devrait se placer en microgravité, ce qui permettrait de multiplier la stabilité par dix. Les atomes se déplaceraient alors à quelques millimètres par seconde, ce qui correspond à une durée d'interaction dans la cavité de plusieurs secondes. Des atomes ont été récemment refroidis en microgravité, et une fontaine en cours de réalisation devrait voler à la fin 1996.

En outre, on améliorerait encore la stabilité en utilisant des fréquences de transition supérieures, telles qu'on en a trouvées pour l'atome d'argent. Des atomes d'argent refroidis par laser et placés en microgravité seront-ils les étalons temporels de demain ? □



POUR LA
SCIENCE

VOUS INVITENT
À L'ENREGISTREMENT
PUBLIC
DE L'ÉMISSION :
L'IMPOSSIBLE

Les impossibles
de
la finance

avec
Christian Walter,
actuaire au
Crédit lyonnais,
enseignant à l'ESSEC.

LE SAMEDI 11 mai 1996
À 15 HEURES
AU PALAIS DE LA DÉCOUVERTE
SALLE DE CINÉMA
AVENUE FRANKLIN D. ROOSEVELT
75008 PARIS

π , e^π et $\Gamma(1/4)$

Démonstration d'une conjecture centenaire.

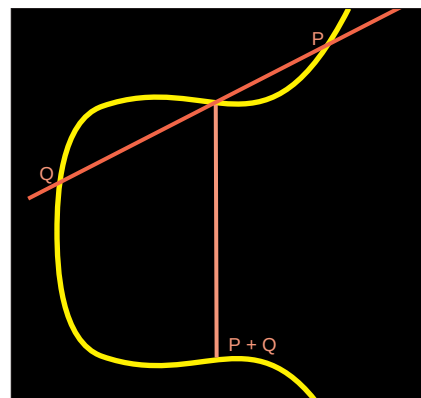
La démonstration du théorème de Fermat, par Andrew Wiles, avait mis en vedette les courbes elliptiques, composées de points dont les coordonnées x et y vérifient des équations de la forme $y^2 = 4x^3 - g_2x - g_3$. Aujourd'hui des mathématiciens français et russe obtiennent de nouveaux résultats liés à ces courbes et à l'«invariant modulaire» qui leur est associé.

Qu'est-ce que l'invariant modulaire ? Tout commence par le paramétrage des courbes elliptiques : on sait qu'on peut aussi les définir par un seul paramètre, un nombre complexe z (un nombre que l'on associe à un point d'un plan, au lieu de l'associer à un point d'une droite) et par une fonction p dite de Weierstrass. L'abscisse x de tout point de la courbe s'écrit sous la forme $p(z)$, tandis que l'ordonnée correspondante s'écrit sous la forme $p'(z)$, où p' est la fonction dérivée de p .

Ce paramétrage étant fait, les mathématiciens ont défini une sorte d'addition des points de la courbe, en associant un point noté $P + Q$ à deux points P et Q de la courbe : si le point P a pour coordonnées $(p(z), p'(z))$ et si le point Q a pour coordonnées $(p(t), p'(t))$, alors le point $P + Q$ a pour coordonnées $(p(z + t), p'(z + t))$. Géométriquement, le point $P + Q$ s'obtient en traçant la droite qui passe par les points P et Q ; cette droite coupe la courbe elliptique en un troisième point, dont le symétrique par rapport à l'axe des abscisses est la somme $P + Q$.

Peut-on classer les diverses courbes elliptiques ? Les mathématiciens utilisent à cette fin la fonction p et ses périodes. Une fonction d'une variable réelle, comme le sinus, a une période unique, égale en l'occurrence à 2π ; mais les fonctions p sont des fonctions de la variable complexe, et elles ont deux périodes de base. Le nombre $J(q)$ nommé invariant modulaire est défini à partir de leurs périodes ; il indique les ressemblances entre les courbes elliptiques : deux courbes ayant le même invariant modulaire ont des comportements identiques pour la loi d'addition de leurs points.

En 1969, Kurt Mahler, de l'Université de Canberra, avait conjecturé que l'invariant modulaire $J(q)$ est transcendant quand q est algébrique. Un nombre est transcendant s'il n'est pas algébrique, c'est-à-dire s'il n'est racine d'aucune



On définit une addition de points appartenant aux courbes elliptiques. Pour classer de telles courbes selon la façon dont leurs points s'additionnent, on utilise une fonction nommée invariant modulaire.

équation polynomiale à coefficients entiers. S'il n'est pas besoin d'être grand mathématicien pour vérifier que $\sqrt{2}$ est algébrique (puisque'il est racine de l'équation $x^2 = 2$), la démonstration de la transcendance d'un nombre est souvent très difficile : il a fallu attendre 1882 pour savoir que le nombre π est transcendant. La conjecture de Mahler a intéressé de nombreux théoriciens des nombres : en démontrant cette conjecture, on obtient la transcendance d'une famille infinie de nombres.

Avec Katia Barré-Sirieix, Guy Diaz et Georges Philibert, nous avons démontré la conjecture de K. Mahler en février 1995. Notre résultat a fait quelque bruit dans la communauté mathématique, parce qu'il résolvait un problème ancien, mais il a surtout ouvert une voie nouvelle pour l'étude de questions difficiles, et il est à l'origine de résultats spectaculaires : Yuri Nesterenko, de l'Université de Moscou, talonné par Patrice Philippon, de l'Université Paris VI, ont démontré l'indépendance algébrique des nombres π , e^π et $\Gamma(1/4)$, où la fonction Γ d'Euler prolonge la fonction factorielle aux nombres fractionnaires. Cela signifie que, si P est un polynôme de trois variables à coefficients entiers non tous nuls, le nombre $P(\pi, e^\pi, \Gamma(1/4))$ n'est pas nul. L'indépendance algébrique de π et e^π qui découle du travail de Y. Nesterenko et P. Philippon est un résultat dont les mathématiciens rêvaient depuis près d'une centaine d'années !

François GRAMAIN
Université de Saint-Étienne