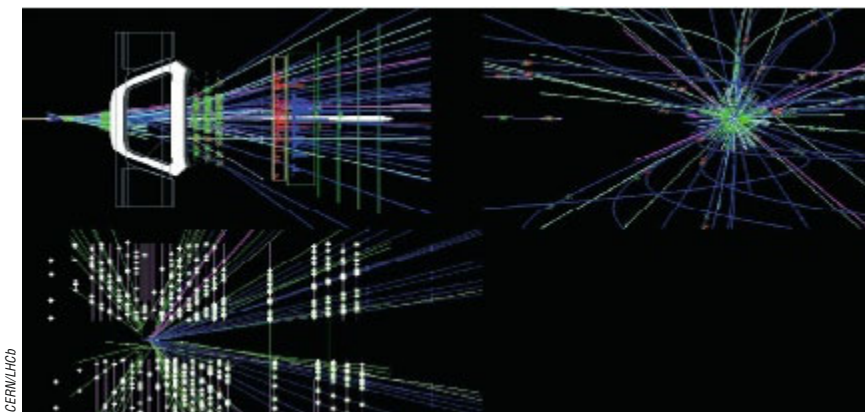




CERN/LHCb

4. LE LHC produit des milliards de mésons B au cours de collisions de paquets de protons. Enregistré le 21 avril 2010, l'événement représenté ici est le premier pour lequel un méson B^+ , composé d'un antiquark $\bar{b}$ et d'un quark u , a été reconstruit. La durée de vie du B^+ est très brève ($1,5 \times 10^{-12}$ seconde) et on ne le détecte que via les empreintes de ses produits de désintégration dans le détecteur LHCb. On voit sur la figure environ une centaine de traces chargées, dont trois seulement sont issues de B^+ , les autres étant dues aux restes de la collision. Cinq mois plus tard, des milliards de paires de quarks $b\bar{b}$ ont été produites au LHCb et des centaines de mésons B chargés ont été reconstruits par les physiciens de cette expérience.

qu'attendu : outre une solution correspondant à l'électron, il en existe une autre associée à une énergie négative. Dirac suppose alors que cette solution d'énergie négative correspond à une particule de charge opposée, sorte d'image dans un miroir de l'électron. C'est elle que nous nommons aujourd'hui positron, antiparticule de l'électron mise en évidence en 1932 par Carl Anderson dans une chambre à brouillard traversée par des rayons cosmiques.

Présente en très faible quantité dans les rayons cosmiques, l'antimatière peut aussi être produite (en quantité égale à la matière) grâce aux accélérateurs de particules. Mises en contact, la matière et l'antimatière s'annihilent en libérant de l'énergie (des photons). L'inverse fonctionne aussi, et à partir d'énergie on peut créer à parts égales des particules de matière et d'antimatière.

Il semble que lors du Big Bang, l'Univers n'était constitué que d'énergie, à partir de laquelle autant de matière que d'antimatière a été créée. Mais un mécanisme inconnu a très légèrement favorisé la matière, au détriment de l'antimatière, laquelle est devenue marginale dans l'Univers connu (rares antiprotons présents dans les rayons cosmiques, positrons créés dans certaines désintégrations β , jets de positrons émis par certains trous noirs...).

L'antimatière est ainsi en quantité négligeable à l'échelle de l'Univers. Cela pose une difficulté de taille. Des mesures qui comparent les nombres de photons et de particules de matière présents

indiquent qu'il a dû y avoir peu après le Big Bang un très léger déséquilibre : pour 10 000 000 000 particules d'antimatière, on devait trouver 10 000 000 001 particules d'antimatière... Les 10 000 000 000 paires particule-antiparticule se seraient annihilées et le petit, tout petit excès de matière, est finalement resté... et ce tout petit excès, c'est nous !

L'asymétrie cosmique reste inexpliquée

L'origine de ce déséquilibre n'est pas comprise ; toutefois, le physicien soviétique Andreï Sakharov a formulé en 1967 les trois conditions nécessaires pour qu'une asymétrie entre matière et antimatière puisse émerger à l'échelle de l'Univers à partir d'une situation symétrique.

La première condition est que les interactions de la matière et de l'antimatière soient asymétriques, en d'autres termes que certaines interactions violent les symétries C et CP (donc T).

Une deuxième condition est l'existence de processus qui ne conservent pas le nombre baryonique, c'est-à-dire tels que le nombre de baryons et le nombre d'antibaryons créés par ces processus soient différents.

La troisième condition est qu'il y ait rupture de l'équilibre thermique. En effet, à l'équilibre thermique, les taux des réactions créant des baryons sont égaux à ceux des processus créant des antibaryons, et il n'y a pas d'asymétrie.

Comme nous l'avons vu, le modèle standard de la physique des particules intègre une violation de CP, mais cette dernière est bien trop petite pour expliquer l'asymétrie entre matière et antimatière dans l'Univers. À ce propos, le taux de violation de CP mesuré dans la physique des mésons B (parfois de l'ordre de dix pour cent) ne peut pas être comparé directement au léger déséquilibre entre matière et antimatière évoqué : si l'on fait l'hypothèse que la violation de CP ne trouve son explication que dans le cadre du modèle standard, les calculs montrent que l'asymétrie obtenue est un grand nombre d'ordres de grandeur inférieur au léger déséquilibre entre matière et antimatière à l'époque du Big Bang...

Parmi les pistes alternatives, on évoque diverses extensions du modèle standard, avec par exemple la création d'une asymétrie initiale entre leptons et antileptons convertie par la suite en asymétrie entre baryons et antibaryons...

Pour passer de la découverte de l'antimatière dans la première moitié du XX^e siècle aux mesures ultraprécises des différences de comportement entre matière et antimatière dans les mésons B au début du XXI^e siècle, les physiciens ont accumulé plus de 70 ans de progrès théoriques et expérimentaux, durant lesquels ils ont souvent dû, après avoir été surpris, abandonner leurs idées préconçues. Au stade actuel de cette quête, une énigme centrale persiste : si le modèle standard de la physique des particules peut rendre compte des violations de la symétrie CP observées dans le secteur des mésons, il est incapable d'expliquer pourquoi notre Univers semble dépourvu ou presque d'antimatière.

Tout un pan de la réalité physique nous échappe donc, et relève de ce que nous nommons dans notre jargon la « physique au-delà du modèle standard ». Cette « nouvelle physique » fait l'objet de recherches actives, en particulier à l'aide du grand collisionneur proton-proton du CERN, le LHC.

Quoi qu'il en soit, nous savons déjà grâce au théorème CPT que la conséquence directe de la violation de la symétrie CP est celle de T, qui, elle aussi, est observée expérimentalement. L'asymétrie matière-antimatière, si ténue en physique des particules et si massive dans l'Univers, semble décidément liée à la question de la flèche du temps. ■

MESURER LE TEMPS

Les dernières horloges atomiques mesurent le temps avec une erreur inférieure à une seconde pour trois milliards d'années. En orbite dès 2013, l'horloge atomique PHARAO testera la théorie de la relativité et la dérive éventuelle des constantes fondamentales de la physique.

Christophe Salomon

En soulevant avec un cric la dernière née des horloges atomiques, des physiciens américains du Colorado ont montré qu'il était possible de détecter un effet de la relativité générale – le décalage des horloges en fonction de l'altitude – dès 30 centimètres de hauteur. Pendant ce temps, en Europe, le modèle de vol de l'horloge spatiale PHARAO est en cours d'assemblage ; il vise à tester la relativité générale au millionième près avec des atomes ultrafroids à bord de la Station spatiale internationale en 2013. Quel est le lien entre ces deux expériences ? À quoi servent les horloges atomiques ? Quels sont leurs enjeux ? Pour le comprendre, revenons quelques millénaires en arrière.

La quête de la précision

Depuis l'Antiquité, les hommes ont cherché à mesurer le temps où, plus précisément, les intervalles de temps. Ils se sont d'abord tournés vers les phénomènes naturels qui présentent une grande régularité comme la rotation de la Terre autour du Soleil, celle de la Lune autour de la Terre ou encore celle de la Terre sur elle-même pour définir des calendriers et des échelles de temps. Ils ont ensuite cherché à réaliser eux-mêmes des instruments toujours plus précis et l'un des plus anciens instruments connus est le sablier égyptien. Cependant, il faudra attendre la découverte de l'isochronisme du pendule par Galilée, au début des années 1600, et sa mise en pratique par le physicien néerlandais Christiaan Huygens quelques décennies plus tard, pour que ces instruments commencent à atteindre une précision de l'ordre de quelques dizaines de secondes par jour.

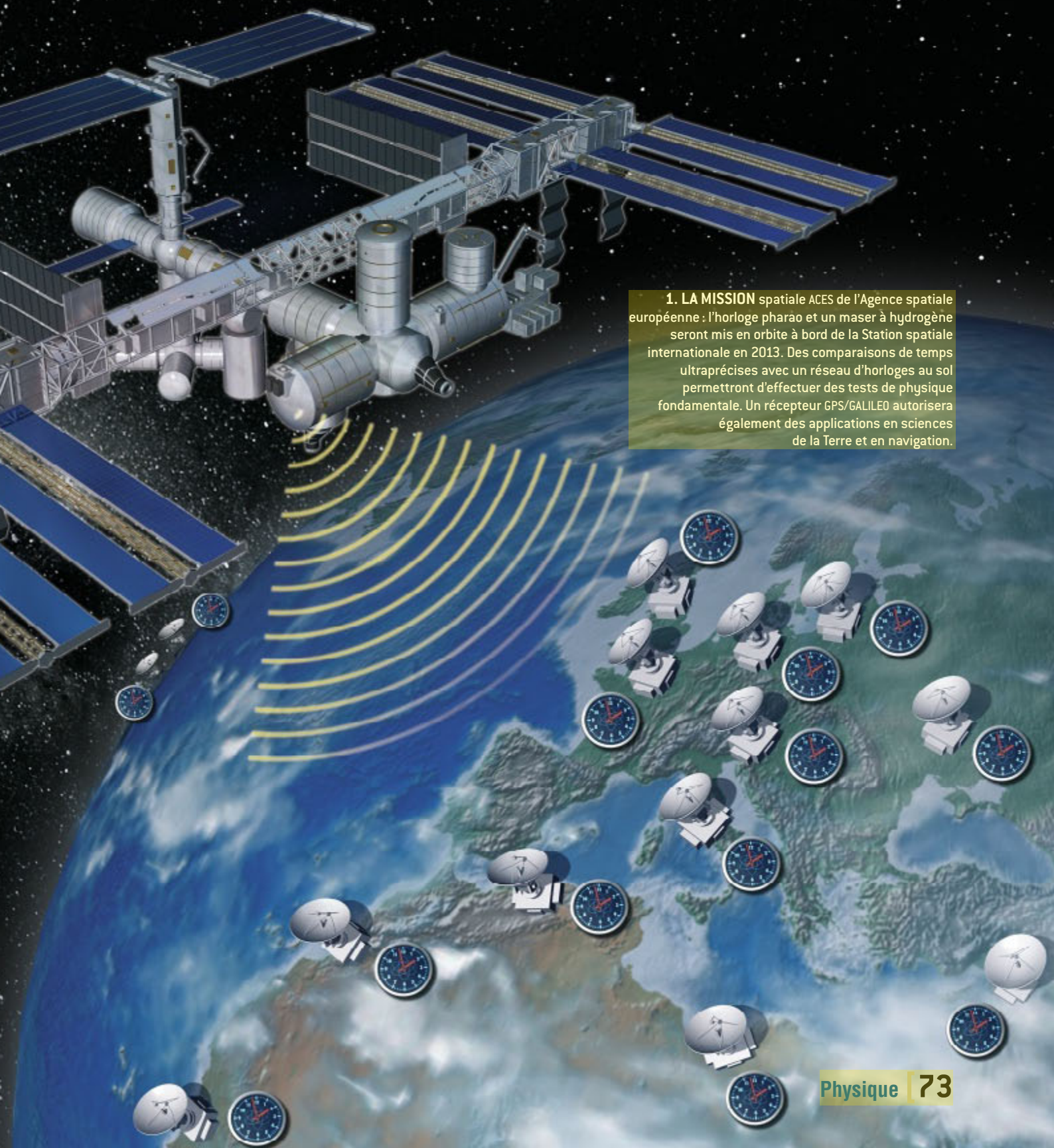
Galilée a observé que les petites oscillations du pendule sont indépendantes de l'amplitude du mouvement et sont remarquablement

L'ESSENTIEL

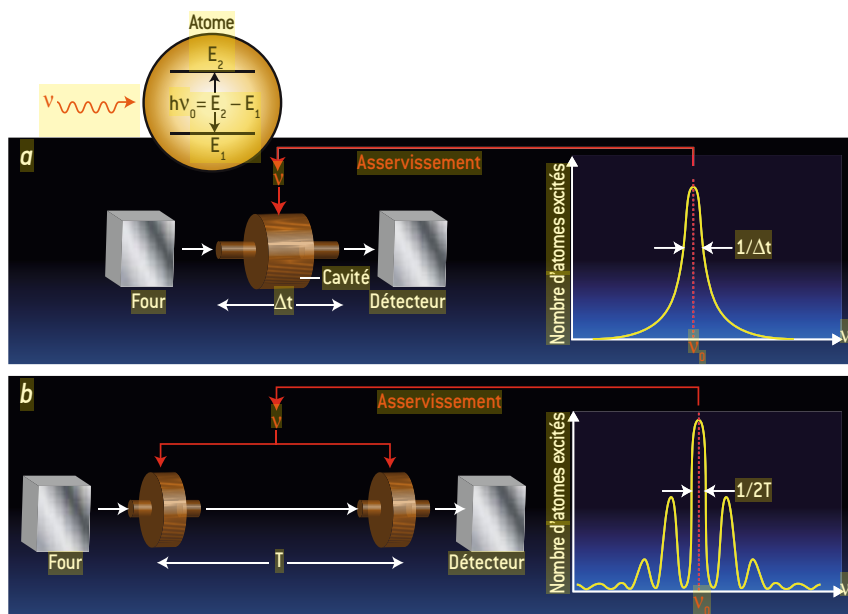
- ✓ Une horloge est un système qui oscille de façon régulière.
- ✓ Dans une horloge atomique, ces oscillations sont celles du champ électromagnétique produit par un oscillateur à quartz, un maser ou un laser.
- ✓ Pour éviter toute dérive, la fréquence de ce champ est verrouillée sur une fréquence caractéristique d'un atome.
- ✓ Bientôt envoyée dans l'espace, une telle horloge testera la théorie de la relativité et la stabilité des constantes fondamentales de la physique.

Bruno Bourgeois

AVEC DES ATOMES



1. LA MISSION spatiale ACES de l'Agence spatiale européenne : l'horloge pharao et un maser à hydrogène seront mis en orbite à bord de la Station spatiale internationale en 2013. Des comparaisons de temps ultraprécises avec un réseau d'horloges au sol permettront d'effectuer des tests de physique fondamentale. Un récepteur GPS/GALILEO autorisera également des applications en sciences de la Terre et en navigation.



2. PRINCIPE D'UNE HORLOGE ATOMIQUE : une onde électromagnétique de fréquence ν excite un ensemble d'atomes de césium de l'état d'énergie E_1 à l'état d'énergie E_2 . Issus d'un four, les atomes forment un jet qui traverse une cavité où l'onde est appliquée. Le détecteur compte le nombre d'atomes portés dans l'état excité. Lorsqu'on balaye la fréquence de l'onde autour de ν_0 , le nombre d'atomes excités fournit une courbe en cloche dont la largeur est inversement proportionnelle au temps d'interaction Δt de l'onde et des atomes. Un asservissement électronique permet de verrouiller la fréquence du rayonnement sur la fréquence de l'atome (a) ; une variante consiste à séparer l'onde appliquée en deux parties (b). Les atomes subissent deux interactions successives séparées d'un intervalle de temps T . Il en résulte un phénomène d'interférences qui produit des franges de largeur $1/2T$. Plus les atomes sont lents, plus les franges seront étroites et meilleure sera l'horloge.

régulières, c'est-à-dire périodiques. En comptant le nombre d'oscillations du pendule, on mesure un intervalle de temps, réalisant ainsi une horloge. Plus la période est courte, plus élevé sera le nombre d'oscillations dans un intervalle de temps donné, et plus précise sera la mesure.

La période T du pendule ne dépend que d'un petit nombre de paramètres, la longueur du fil l et l'accélération de la pesanteur g : $T = 2\pi(l/g)^{1/2}$. Cette formule simple montre les limites du dispositif : si la longueur du fil change, à cause de la température par exemple, l'horloge perdra sa précision ; il en est de même si l'accélération de la pesanteur change (par exemple si l'on prend de l'altitude).

Poussés par les enjeux de la navigation transocéanique et la détermination de la longitude, mais aussi par les sommes promises par les souverains des deux siècles suivants, les pendules, montres mécaniques et chronomètres n'ont cessé de s'améliorer. Combattant l'influence néfaste des changements de température et d'humidité sur le fonctionnement de ses chronomètres, l'horloger britannique John Harrison finit par produire en 1759, après 40 années d'efforts, un instrument qui présentait une erreur inférieure à un dixième de seconde par jour. Son chronomètre, qui alliait une mécanique de précision à un choix astucieux de métaux, fut testé en mer

par un navire britannique qui fit l'aller-retour Portsmouth-les Antilles en un peu moins de trois mois. Au retour, le chronomètre embarqué avait moins de cinq secondes d'écart avec ceux restés au sol. Harrison reçut pour cet exploit un prix de 40000 livres, une somme considérable pour l'époque !

La percée scientifique suivante fut l'invention de l'oscillateur à quartz en 1918. Le système périodique n'est plus un système mécanique, mais un champ électromagnétique oscillant reposant sur les propriétés piézo-électriques du quartz. La vibration mécanique du cristal de quartz produit un champ électrique oscillant à une fréquence bien définie et bien plus élevée que celle du pendule (quelques millions d'oscillations par seconde). Les montres et oscillateurs à quartz ont envahi le monde moderne et constituent une base de temps suffisamment stable pour la plupart des applications courantes.

Cependant, comme le pendule, mais à un degré bien moindre, l'oscillateur à quartz présente des dérives en température. Pour domestiquer ces oscillateurs, les physiciens ont eu l'idée de réaliser une horloge atomique qui combine les propriétés de l'oscillateur à quartz et celles de l'atome. L'énergie d'un atome est quantifiée : elle ne peut prendre que des valeurs discrètes, déterminées par les lois de la mécanique quantique qui gouverne le

comportement des objets microscopiques. Les niveaux d'énergie correspondant à ces valeurs ne dépendent pas de la température (ou plus exactement très, très peu !). Les atomes sont universels : un atome de césium à Paris présentera exactement les mêmes propriétés qu'un atome de césium à New York ou à Tokyo. Ce n'est pas le cas des pendules ou des oscillateurs à quartz, difficiles à réaliser à l'identique. L'idée est donc d'empêcher la dérive de l'oscillateur à quartz en verrouillant – en asservissant – la fréquence de ses oscillations sur une fréquence caractéristique de l'atome, correspondant à la différence entre deux niveaux d'énergie particuliers.

Pour ce faire, on envoie un jet d'atomes dans une cavité soumise au champ électromagnétique produit par l'oscillateur à quartz. Les deux niveaux d'énergie atomiques considérés sont E_1 (fondamental) et E_2 (excité), séparés par une énergie $h\nu_0$, où ν_0 est une fréquence et h la constante de Planck. Avant leur passage, les atomes sont dans l'état d'énergie E_1 ; lorsque la fréquence de l'onde électromagnétique appliquée à la cavité est proche de ν_0 , les atomes sont portés dans l'état excité E_2 . Un détecteur compte le nombre d'atomes excités quand on balaye la fréquence de l'onde autour de ν_0 : on obtient une courbe en cloche – dite courbe de résonance – centrée sur ν_0 dont la largeur est inversement proportionnelle à la durée d'interaction de l'onde et des atomes. Par rétroaction, un montage électronique verrouille la fréquence de l'onde sur la fréquence ν_0 de l'atome : le montage électronique vérifie en permanence que la fréquence de l'oscillateur à quartz est très proche de ν_0 et la corrige si elle s'éloigne de cette valeur (voir la figure 2a).

Horloges à césium : atomes chauds, atomes froids

La première horloge à césium réalisée en Angleterre par Louis Essen et Jack Parry en 1955 fonctionnait sur ce principe, amélioré grâce à une méthode proposée par le physicien américain Norman Ramsey (qui lui vaudra le prix Nobel en 1989) : l'onde électromagnétique produite par l'oscillateur à quartz est divisée en deux parties, qui interagissent chacune avec les atomes sur leur parcours. Cette double interaction entraîne des interférences qui affinent d'autant plus le signal transmis