



ELSEVIER

Contents lists available at ScienceDirect

Comptes Rendus Physique

www.sciencedirect.com



The measurement of time / La mesure du temps

Foreword



In November 2015, exactly 100 years ago, Albert Einstein published his famous equations on General Relativity linking space–time, matter, and energy. His theory overturned the concepts of absolute time and space that were prevailing until then. Spectacular confirmation was obtained by measurements of star light deflection passing near the Sun in two experiments that made a great stir in 1919. In relativity, clocks and their synchronization via exchange of electromagnetic signals play a central role. Clock experiments reproducing the famous Langevin twin paradox have shown the indissoluble link between moving frames and the flow of time. They have also shown the slowing down of the flow of time near massive objects, the Einstein effect.

After 1970, tests of General Relativity have multiplied with ever-increasing precision. Up to now, they have all confirmed the theory's predictions. However, our knowledge of the Universe is far from complete. Dark matter and dark energy are challenges for present-day physicists. In parallel, modern theoretical physics intends to unify gravitation and quantum theory ruled by the three interactions of the Standard Model of particles physics. Thus, some models derived from string theory predict that the equivalence principle, a fundamental postulate made by Einstein, could be violated by high-precision measurements. These predictions can be finely tested with the new generation of classical or quantum accelerometers, and with atomic clocks. In particular, clocks can test whether the fundamental physical constants, such as the fine structure constant that characterizes the strength of electromagnetic interaction, remain effectively invariant in time or space.

This volume on the “Measurement of Time” illustrates the remarkable progress made by clocks over the last years. The gain in precision is of one order of magnitude per decade, temporarily exponential! The instability of the most modern clocks is so small that their imprecision does not exceed one second over the age of the universe, i.e. about 15 billion years. The reader will also discover that the clock comparison means have also made spectacular advances. Atomic clocks and satellite time transfer using microwave signals are at the root of the planetary success of the GPS system. On continental scales, high-precision frequency transfer in optical fibers of telecommunication networks already reaches distances of several thousand kilometers, as shown in this issue.

The most recent advances on clocks, clock comparisons, and a few applications are described in the thirteen papers of this dossier. It is shown that, thanks to laser cooling of atoms, whose concept is directly linked to Einstein contributions, cesium fountain clocks pilot the International Atomic Time (TAI), with a relative stability of a few 10^{-16} . Atomic fountains operate in the microwave domain (9 GHz), but recent optical clocks beat at a 10 000 times faster frequency. We will read that these instruments are reaching today a relative precision of 10^{-18} and they still have a large progression margin. It will soon be possible to probe the Earth gravitational potential with centimeter precision, and beyond, by a totally new method based on the clock gravitational shift. The road towards a new geodesy, relativistic geodesy, is clearly laid out. The question of the future redefinition of the second raised by the performances of optical clocks is also discussed in this volume. Finally we will learn that installing cold atom clocks onboard satellites open new perspectives for relativity and fundamental physics tests in the coming years.

We would like to warmly thank all authors who contributed to this volume. We hope that it reflects the vitality of this very interdisciplinary research domain. Advanced techniques in laser physics, quantum physics, cold atom manipulation, telecommunications, and time and frequency metrology unite to not only question our fundamental knowledge, but also to develop new instruments. Hundred years after the birth of General Relativity, this theory is at the heart of a growing number of applications!

Finally we wish to thank for his precious help Mr. Jacques Villain, the coordinating editor of *Comptes rendus physique*, as well as Mr. Jean-Michel Blengino for his efficiency in preparing this volume.

Avant-propos

En novembre 1915, il y a exactement 100 ans, Albert Einstein publiait ses fameuses équations de la relativité générale liant espace–temps, matière et énergie. Sa théorie a bouleversé les concepts de temps et d'espace absolus qui prévalaient

jusqu'à-là. Elle fut confirmée de façon spectaculaire en 1919 par les mesures de déflexion de la lumière des étoiles passant au voisinage du soleil par deux expériences qui eurent un grand retentissement. En relativité, les horloges et leur synchronisation par échange de signaux électromagnétiques jouent un rôle central. Les expériences avec des horloges reproduisant le célèbre paradoxe des jumeaux de Langevin ont montré le lien indissociable entre référentiels en mouvement et écoulement du temps. Elles ont également mis en évidence le ralentissement de l'écoulement du temps au voisinage d'objets massifs, l'effet Einstein.

À partir des années 1970, les tests de la théorie de la relativité générale se sont multipliés, avec une précision croissante. Jusqu'à ce jour, ils ont tous confirmé les prédictions de cette théorie. Pourtant, la connaissance de notre univers est loin d'être complète et la compréhension de la matière noire et de l'énergie noire restent des défis pour la physique de notre époque. Parallèlement, la physique théorique moderne s'attache à unifier la gravitation et le monde quantique régi par les trois interactions du modèle standard de la physique des particules. Ainsi, certains modèles issus de la théorie des cordes prédisent que le principe d'équivalence, un postulat fondamental émis par Einstein, pourrait être mis en défaut par des mesures de grande précision. Ces prédictions peuvent être testées très finement avec la nouvelle génération d'accéléromètres classiques ou quantiques et avec les horloges atomiques. Celles-ci peuvent en particulier tester si les constantes fondamentales de la physique, comme la constante de structure fine qui caractérise l'interaction électromagnétique, sont effectivement invariables dans le temps ou dans l'espace.

Ce volume sur la « mesure du temps » illustre les progrès considérables réalisés par les horloges au cours de ces dernières années. Le gain en précision est d'un facteur 10 tous les dix ans, un gain temporairement exponentiel ! L'instabilité des horloges atomiques les plus modernes est si petite que leur imprécision n'excède pas une seconde sur l'âge de notre univers, soit environ 15 milliards d'années ! Le lecteur découvrira aussi que les moyens de comparaison entre horloges ont également subi des avancées spectaculaires. Les horloges atomiques et le transfert de temps par satellites par échange de signaux micro-ondes sont à la base du succès planétaire du système GPS. À l'échelle continentale, le transfert de fréquence de haute précision par les fibres optiques des réseaux de télécommunications atteint déjà des distances de plusieurs milliers de kilomètres.

Les avancées les plus récentes sur les horloges, leurs moyens de comparaison, et quelques-unes de leurs applications sont décrites dans les treize articles de ce dossier. On y montre que, grâce au refroidissement d'atomes par laser, dont les concepts fondamentaux sont également issus des travaux d'Einstein, les horloges à césium en fontaine permettent de réaliser le temps atomique international avec une stabilité relative de quelques 10^{-16} . Les fontaines atomiques fonctionnent dans le domaine micro-onde (9 GHz), mais les horloges optiques les plus récentes battent à une fréquence 100 000 fois plus rapide. Le lecteur découvrira que ces instruments atteignent désormais des précisions relatives de 10^{-18} et possèdent encore une grande marge de progression. Ils vont bientôt permettre de sonder le potentiel de gravitation terrestre avec une précision centimétrique et au-delà, par une méthode totalement nouvelle fondée sur le décalage gravitationnel des horloges. La voie vers une nouvelle géodésie, la géodésie relativiste, est clairement tracée. La question d'une redéfinition de la seconde du système international d'unités soulevée par les performances de ces horloges optiques est également discutée dans ce volume. Enfin, le lecteur apprendra que l'installation à bord des satellites d'horloges à atomes froids ouvre de nouvelles perspectives pour les tests de relativité et de physique fondamentale dans les années qui viennent.

Nous voudrions remercier chaleureusement tous les auteurs des contributions à ce volume qui, nous l'espérons, reflète bien la vitalité de ce domaine de recherche très interdisciplinaire. Les technologies de pointe en physique des lasers, physique quantique et physique des atomes froids, télécommunications et métrologie du temps et des fréquences s'allient pour permettre, non seulement de questionner les fondements de nos connaissances, mais aussi pour développer de nouveaux instruments. Cent ans après la naissance de la relativité générale, celle-ci est au bien au cœur d'un nombre croissant d'applications !

Finalement, nous souhaitons remercier pour son aide précieuse le coordinateur des *Comptes rendus Physique*, M. Jacques Villain, ainsi que M. Jean-Michel Blengino pour son efficacité dans la préparation de ce volume.

Christophe Salomon
Laboratoire Kastler-Brossel, École normale supérieure,
24, rue Lhomond, 75231 Paris, France