

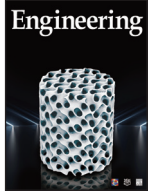


ELSEVIER

Contents lists available at ScienceDirect

Engineering

journal homepage: www.elsevier.com/locate/eng



News & Highlights

可移动光学晶格时钟让时间变得更加精确

Dana Mackenzie

Senior Technology Writer

在所有的物理学单位中，一秒钟也许是最神秘的。与一米不同，我们看不见它。与一千克不同，我们握不住它。与一伏特不同，我们感知不到它。

然而，秒是我们拥有的最精确的量化单位[1]。2020年，研究测量的计量科学家宣布了首个可将测量时间精确到小数点后18位的可移动时钟。从这个角度来看，自宇宙大爆炸以来以这种精度运行的时钟，其损失或增加的时间不到半秒。

在2020年4月出版的《自然·光子学》杂志上，东京大学应用物理学教授Hidetoshi Katori和他的6位同事一起介绍了他们如何用这个时钟来测试阿尔伯特·爱因斯坦对时间膨胀的预测。对于地面时钟而言，此次预测精度是有史以来最精确的[2]。爱因斯坦的预测通过了检验。更重要的是，Katori领导团队设计出更精确的时钟，并且通过了可移动性测试。这种时钟可以成为下一代原子时钟的衡量标准[3]，其可移动的能力大大提高了它们的实用性。

自1967年以来，科学家一直使用量子物理学领域/学科中关于秒的定义。当铯原子被激光激发时，发射的光波频率为9 192 631 770 Hz [3,4]。这不是一种测量，而是一种定义，它将铯原子钟作为时间校准的仲裁器，而铯原子钟是世界上越来越多的数字技术所依赖的基础。尽管它们质量上乘且测量高效，但是目前最先进的铯原子钟测量的时间最多也只能精确到小数点后16位，这主要是因为很难测量循环小数。

在21世纪初，Katori开始研究一种更精确的时

钟技术，称为光学晶格时钟。这些时钟使用铯原子发射可见光，而不是微波辐射，因此被称为光学时钟。它们的优点是可见光具有更高的频率，即429 288 004 229 873.0 Hz [1]。请注意，这个数字有16位。测量受到定义时间秒的长度的铯原子钟精度的限制。有了铯原子钟，我们可以将时间再精确到小数点后两位。这一进步是源于时钟可以同时询问数千个铯原子，这些铯原子被困在晶格（也就是光学晶格）中。鉴于统计学原因，如果误差源是随机噪声，则 N 次测量可将误差减小 \sqrt{N} 倍。尽管精度提高不大，但在计量学中，精度就是一切。

在整个20世纪90年代里，单离子钟是最有前景的下一代时钟技术，其电场将一个带电荷的原子固定在原位。这是诺贝尔奖得主Hans Dehmelt和Wolfgang Paul发明的技术[5,6]。单离子钟具有几个优点。位于德国伦瑞克国家计量研究所的光学晶格工作组负责人Christian Lisdat表示：“离子位置很好，这样你就不会受到多普勒效应的影响。因为多普勒效应是光学领域的一大敌人，会给出错误的频率。”

然而，Katori故意选择了一种未经验证的技术。他将他的团队在日本的研究与Charles Darwin在加拉帕戈斯群岛的研究进行了对比，这远非科学的主流。Katori说：“对于我们来说，这是一种理想的情形，我们可以集中精力进行新的努力，同时不被其他人的工作所困扰。我们的‘加拉帕戈斯群岛’隔离使得原子钟以与世界其他地方不同的方式发展进化。”

在光学晶格时钟中，铯原子被激光捕获并固定在适当的位置。然而，这是一个非常微妙的操作。Lisdat说：“当激光与原子相互作用时，它会在原子想要到达的位置产生一个凹坑，”但这个凹坑非常浅，这意味着原子必须被冷却到千分之几开尔文。还有一个更大的挑战，即在能量场中形成的凹坑会改变铯原子内部的电子的能级。换言之，将原子固定在适当位置的行为会改变你试图测量的量子跃迁的大小。

但是Katori和他的同事找到了一个巧妙的解决方案。发射光的频率是由铯原子内两个能级之间的差异决定的。通过仔细调整产生凹坑的激光频率，Katori以相同的量改变了这两个能级，从而消除了两种差异。Lisdat声称：“它被称为‘神奇波长’是有明显原因的，你不仅无法改变频率，而且还会落入陷阱。”

光学晶格时钟技术于2003年获得首次展示，现在与单离子钟一样先进。Katori表示：“全世界有将近20个研发铯原子钟的组织，这些组织是推动重新定义秒的重要力量。”

然而，如果你只能将时钟同步到16位精度，那么18位精度将会被浪费。这是目前卫星技术的局限，因为它们使用铯原子钟来计时。光纤技术更好，但它只能在中等距离范围内工作。欧洲的时钟可以互相同步，但美国的时钟却不能。

Katori的最新发明是一个可移动的铯原子钟。以前所有的光学晶格时钟都是房间大小的仪器，需要庞大的激光和冷却设备。在最近的研究中，Katori将整个包装减为三个盒子，总体积大约为 1 m^3 （图1）[2]。为了使



图1. Katori教授蹲坐在两个可移动的光学晶格原子钟之一的旁边，图中的这个位于东京晴空塔顶部的原子钟（见图2），另一个在塔底部。这个塔利用时钟的能力来测量秒（精确到小数点后18位），这项实验测试了阿尔伯特·爱因斯坦对时间膨胀的预测，该原子钟是有史以来最精确的地面时钟[2]。东京大学的Katori和他的同事制造的每一个可移动时钟都由三个盒子组成，总体积约为 1 m^3 。图片来源：由Katori提供。

它们能够抵抗实验室外的振动，他的团队将激光器焊接在合适的位置，并取消了所有的调节旋钮。该仪器是通过互联网控制的。一个相当具有创意的想法是：使用一个隔热的“询问室”（interrogation chamber），将被捕获的铯原子与周围环境产生的黑体辐射隔离。铯原子首先被两个激光器以“神奇频率”（magic frequency）囚禁在屏蔽室外面的一个光学晶格中，然后通过使其中一个激光器稍微失谐而逐渐将铯原子移动到该室中。这就像把患者推进计算机轴向断层（CAT）扫描仪一样。英国量子技术中心传感器与时间中心首席研究员、英国伯明翰大学工程与物理科学学院创新主任Kai Bongs教授称：“这是一项绝对令人着迷的技术成就。”

Katori团队将其中一个时钟放在东京450 m高的晴空塔的顶部（图2）[2]，把另一个放在晴空塔底部。在这些不受控制的非实验室条件下，他测量了塔顶一秒钟和塔底一秒钟之间的差。爱因斯坦的相对论预言，由于时间膨胀效应，铯原子光在塔底的频率应该比在塔顶的频率低21.18 Hz，这种效应假设越靠近地球中心，时间就越慢。依靠时钟的18位小数的测量精度和坚固耐用的设计，Katori的时钟所测量的结果与爱因斯坦相对论预言的结果高度切合。

如果成本和可移动性能够得到足够的改善，那么可以在每一颗全球定位系统（GPS）卫星上安装一个铯原子钟以取代铯原子钟。但这不太可能很快实现。然而，



图2. Katori教授和他的同事把一个时钟放在东京450 m高的晴空塔顶部，另一个放在底部，成功地测试了可移动的铯原子钟的精度[2]。图片来源：Wikimedia Commons（CC BY-SA 4.0）。

如果真的发生了，GPS卫星的时钟可以与18位小数的精度同步，这就为许多新的应用开辟了道路。在那之前，可以利用简单、老式的方式通过把时钟带到不同的地方实现时钟在地面上的同步。

新时钟还有其他潜在的应用，如测量海平面的上升或火山的扩张（正准备喷发）。Katori说：“使用现有技术无法在100 km的长距离范围内或短于几小时的时间内以厘米为单位精确测量高度。”利用新的时钟，科学家可以通过检测时间膨胀来测量高度差，这种方法被称为计时大地测量技术(chyonometric geodesy)。Lisdar表示：“这是我最喜欢的应用之一。很多人问我， 10^{-18} 秒的准

确度的意义。拥有关于我们对地球所做的事情的可靠信息，就很有价值。”

References

- [1] Katori H. Tricks for ticks. *Nat Phys* 2017;13:414.
- [2] Takamoto M, Ushijima I, Ohmae N, Yahagi T, Kokado K, Shinkai H, et al. Test of general relativity by a pair of transportable optical lattice clocks. *Nat Photonics* 2020;14:411–5.
- [3] Margolis H. A matter of time. *Nat Phys* 2017;13:1234.
- [4] Palmer C. Redefining the kilogram. *Engineering* 2019;5(3):361–2.
- [5] Eguchi E. In his own “Galapagos” building a unique clock of incredible precision [Internet]. Tokyo: UTokyo Voices; 2019 Mar 28 [cited 2020 Jul 20]. Available from: <https://www.u-tokyo.ac.jp/focus/en/features/voices053.html>.
- [6] The Nobel Prize in Physics 1989 [Internet]. Stockholm: NobelPrize; c2020 [cited 2020 Jul 20]. Available from: <https://nobelprize.org/prizes/physics/1989/summary/>.