

Spectrum 仪器 PXIe 板式 AWG 卡助力原子钟升级

中国北京, 2026 年 9 月 16 日讯——全球数百台原子钟持续协同比对, 共同构建国际原子时 (TAI)。德国联邦物理技术研究院 (PTB) 凭借其两台世界领先的铯原子喷泉钟成为了这一精密体系的重要参与者。然而, 如此高精度的原子钟运行离不开前沿的技术支撑, 需通过激光将原子云冷却至几微开尔文的极低温, 并配以拉姆塞光谱 (Ramsey Spectroscopy) 技术。在这一复杂过程中, Spectrum Instrumentation 公司出品的 AWG 卡发挥了至关重要的作用。CSF1 与 CSF2 不仅服务于国际原子时的构建, 还成为了 PTB 时间服务的核心, 也是全德法定时间的基石, 协调着日常时钟、铁路运行到空中交通、通信网络、广播电视乃至计算机系统等众多领域的精准同步。

铯原子喷泉钟利用铯原子的量子特性进行精密计时。根据国际单位制, 一秒被定义为铯-133 原子基态两个超精细能级之间跃迁所对应辐射的 9, 192, 631, 770 个周期的持续时间。在真空中, 一团超冷铯原子云在运动过程中两次经过拉姆齐微波腔: 第一次是在原子云上升过程中, 第二次则是在重力作用下回落时。随后, 通过激光诱导荧光光谱法测量原子的最终状态。



PTB 的两台铯原子喷泉钟为整个德国提供法定时间
(图片有 PTB 提供)

如何冷却铯原子

PTB 时间与频率部门的 Johannes Rahm 博士介绍道: “测量前需要制备并装载一团超冷原子云, 通过磁光阱 (CSF1) 或光学黏团 (CSF2) 来实现。在这两种方法中, 激光器按特定几何方式排列, 其频率略低于铯-133 光学跃迁频率。由于残余的热运动, 原子所感受到的激光频率会因多普勒效应发生偏移, 从而与跃迁频率匹配。原子吸收激光光子后并遵循动量守恒, 其运动速度会降低, 进而使原子云得到冷却。”

铯原子喷泉钟的工作周期

原子云冷却完成后, 激光频率之间的微小差异会将原子云向上推动, 如同抛球入空, 由此产生“喷泉”效应: 原子云上升时穿过一次拉姆齐微波腔, 随后在重力作用下回落再次穿过该腔体。第二次通过拉姆齐腔后, 通过荧光光谱法测定原子的跃迁概率。在原子云每次经过拉姆齐腔时, 系统都会施加一个微波脉冲。该脉冲的频率经过精确调谐, 使原子发生跃迁的概率达到约 50%。每个喷泉周期都包括原子装载、发射、拉姆齐询问、检测, 以及各阶段之间的弹道飞行过程。在每个周期中, 微波频率失谐的符号都会反转, 从而分别对称跃迁概率曲线的左右两侧进行采样。真实的跃迁频率, 则由针对 50% 跃迁几率所设定的两个导向频率的平均值得出。一次完整测量约需 1.2 秒。完成测

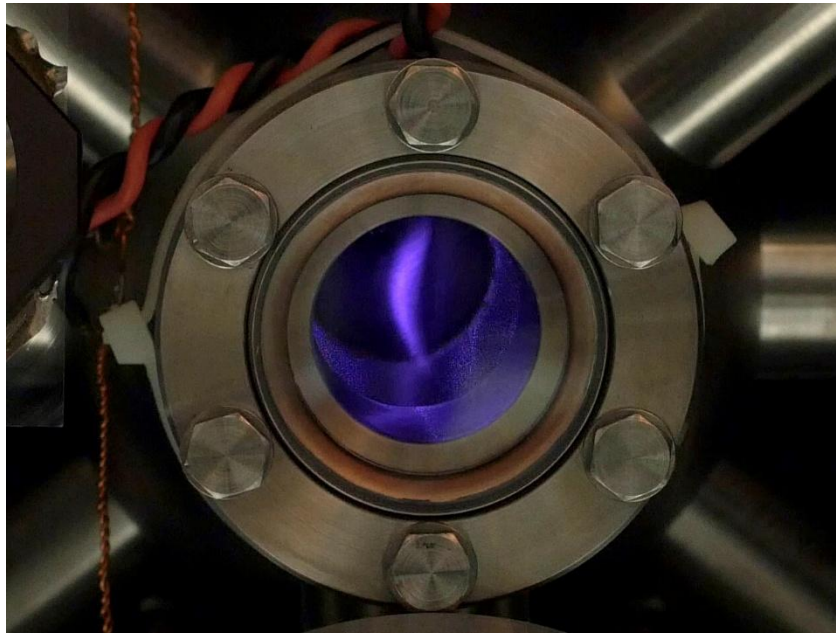
Headquarters

Spectrum Instrumentation GmbH, Germany
Phone: +49 4102-6956-0
Email: info@spec.de

US Office

Spectrum Instrumentation Corp., USA
Phone: (201) 562-1999
Email: sales@spectrum-instrumentation.com

量后，新的周期随即开始，并全天候连续运行。



红外照片显示真空腔中的铯原子云及其荧光。
图片由 Mareike Bernien 提供

原子钟系统持续升级

铯原子喷泉钟需要对激光系统进行精密控制。早期，这项工作依赖 PTB 上一代工程师和科学家开发的定制模拟电路完成。然而，对于如此复杂的系统而言，长期维护和持续运行的难度会随着时间推移不断增加。因此，随着原子钟实验本身不断发展，其配套电子系统也需要进行升级。Rahm 博士开始研究如何以数字化方案替代原有的模拟系统。经过研究，他最终将 Spectrum Instrumentation 公司的 PXIe 板式 AWG 卡集成到原子钟系统中。这些 AWG 卡能够生成所需的射频信号，并通过声光调制器（AOM）对激光频率进行精确控制，从而支持铯原子的冷却、发射和检测。



Johannes Rahm 博士正在检查连续 24 小时运行的铯原子喷泉钟。
图片由 PTB 提供

Headquarters

Spectrum Instrumentation GmbH, Germany
Phone: +49 4102-6956-0
Email: info@spec.de

US Office

Spectrum Instrumentation Corp., USA
Phone: (201) 562-1999
Email: sales@spectrum-instrumentation.com

<https://www.spectrum-instrumentation.com>

Spectrum 支持快速响应

在实施过程中出现了一项挑战。尽管 M4x. 6622-x4 AWG 卡在精度上极为出色，但现有的信号生成模式均无法满足 PTB 的特殊需求。为了高效完成一个完整的铯原子喷泉钟周期，每台激光器都需要在周期中的特定时间点输出特定的一组波形。因此，AWG 不仅需要具备高精度信号生成能力，还必须能够按照实验周期的时间要求灵活调用相应波形。Rahm 博士随后联系了 Spectrum Instrumentation 的技术支持团队（由设计工程师直接负责）。仅两天时间内，软件工程师便开发出一项名为“序列重启模式”的新功能。Rahm 博士的测试取得成功，新模式完全符合预期构想。



*Spectrum M4x. 6622 PXIe 板式任意波形发生器卡
图片由 Spectrum 提供*

此后，Spectrum Instrumentation 已将该“序列重启模式”作为免费升级，面向所有 65xx 和 66xx 系列的 AWG 发布。用户只需安装最新驱动程序，即可轻松启用新模式。

关于 Spectrum Instrumentation

Spectrum 仪器公司成立于 1989 年，采用独特的模块化设计理念并推出了 200 多款数字化仪和信号发生器产品，其中包括 PC 卡（PCIe 和 PXIe）以及独立的以太网设备（LXI）。在过去的 35 年间，Spectrum 仪器已经赢得全球众多客户的信赖，其产品也被众多行业领军企业和多所知名大学广泛使用。Spectrum 仪器总部位于德国汉堡附近，旗下产品均可享受长达五年的质保，以及来自工程师团队的卓越服务。更多详情，请访问公司官网 www.spectrum-instrumentation.com。

Headquarters

Spectrum Instrumentation GmbH, Germany
Phone: +49 4102-6956-0
Email: info@spec.de

US Office

Spectrum Instrumentation Corp., USA
Phone: (201) 562-1999
Email: sales@spectrum-instrumentation.com