

採用 PXIe 格式 AWG 卡進一步提升原子鐘效能

全球各地有數百具原子鐘持續進行比對，以建立國際原子時（TAI）。在德國，Physikalisch-Technische Bundesanstalt（PTB）透過兩具全球領先的鉍噴泉鐘參與其中。然而，要讓這些原子鐘持續運作，需要先進技術利用雷射將原子雲冷卻至數微開爾文，並進行 Ramsey 光譜分析。Spectrum Instrumentation 的 AWG 卡在最新的原子鐘架構中扮演關鍵角色。鉍噴泉鐘 CSF1 和 CSF2 控制國家參考時間尺度 UTC（PTB），並構成 PTB 時間服務及全德國法定時間的基礎，讓時鐘、火車、航空交通、通訊、廣播、電腦系統等眾多系統保持同步。

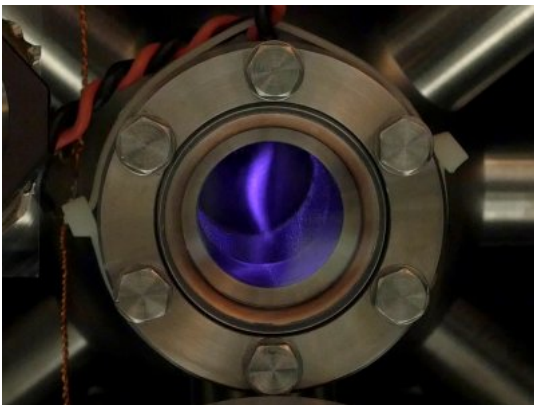


PTB 的兩具鉍噴泉鐘為整個德意志聯邦共和國提供法定時間。

鉍噴泉鐘（例如 PTB 所運作的設備）是基於鉍原子的量子行為。一秒的定義，是鉍-133 原子基態兩個能階之間躍遷所對應的輻射，恰好持續 9,192,631,770 個週期的時間。在真空腔體中，一團超冷原子雲會兩次通過 Ramsey 微波腔體，之後利用雷射誘發螢光光譜法測量其最終狀態。

如何冷卻鉍原子

PTB 時間與頻率部門成員 Dr. Johannes Rahm 解釋道：“在進行測量之前，必須先載入一團超冷原子雲。這是透過磁光阱（CSF1）或光學黏滯（CSF2）來實現。在這兩種情況下，按照特定幾何排列的雷射，其頻率都會略微調低至鉍-133 某一光學躍遷頻率以下。由於殘餘的熱運動，雷射光會因都卜勒效應而偏移至躍遷頻率；透過吸收雷射光子並遵守動量守恆，原子雲中的原子會減速，進而冷卻。”



真空腔體的紅外線照片，可看到產生螢光的鉍原子雲。（照片提供：Mareike Bernien）

鉍噴泉鐘的工作週期

接著，雷射之間微小的頻率差異會將原子雲向上推升，就像將球拋向空中一樣。這會形成「噴泉」效應：原子在上升途中通過 Ramsey 腔體一次，然後在重力作用下下降時再次通過。第二次通過 Ramsey 腔體後，會利用螢光光譜法測定躍遷機率。在每次通過 Ramsey 腔體時，都會施加一個微波脈衝。該脈衝的頻率會經過調整，使產生的躍遷機率約為 50%。每個噴泉週期由載入階段、發射階段、Ramsey 探詢、偵測，以及各階段之間的彈道飛行組成。在每個週期中，微波頻率失諧的符號會反轉，因此可以分別取樣對稱躍遷機率結構的左側與右

側。實際的躍遷頻率則由設定為 50% 躍遷機率的兩個受控頻率之平均值決定。測量完成後，約 1.2 秒後週期便會重新開始，並持續全天候運作。

原子鐘的演進

鉀噴泉鐘需要對雷射進行精確控制。最初，這項工作是透過 PTB 前一代工程師與科學家所開發的客製化類比電路來實現。長期維護如此複雜的系統變得越來越困難。因此，與實驗本身一樣，支援電子系統也必須持續演進，促使 Dr. Rahm 探索以數位替代方案取代類比系統的方法。他的研究最終促成將 Spectrum Instrumentation 的 PXIe 格式 AWG (Arbitrary Waveform Generator) 卡整合至系統中。這些卡可產生所需的 RF 頻率，利用聲光調變器控制雷射頻率，以實現原子的冷卻、發射與偵測。



Dr. Johannes Rahm 正在檢查鉀噴泉鐘，這些原子鐘每天 24 小時持續運作。（照片提供：PTB）

Spectrum 支援團隊的快速回應

然而，在實際導入過程中出現了一項挑戰。雖然 M4x.6622-x4 AWG 卡在精度方面完全符合要求，但現有的訊號產生模式中，沒有任何一種能符合 PTB 所需的特殊要求。為了有效設計鉀噴泉鐘的工作週期，每個雷射都需要在週期中的特定時間產生特定的一組波形。Dr. Rahm 聯絡了 Spectrum Instrumentation 的支援團隊，該團隊由設計工程師直接負責。軟體工程師僅用了兩天便開發出名為 “Sequence Restart Mode” 的新功能。Dr. Rahm 的測試結果成功，新模式的運作方式完全符合他的構想。



PXIe 格式的 Spectrum M4x.6622 Arbitrary Waveform Generator 卡。（照片：Spectrum）

與此同時，Spectrum Instrumentation 已將 Sequence Restart Mode 作為免費升級提供給 65xx 和 66xx 系列的所有 AWG。只需安裝最新的驅動程式即可輕鬆啟用新模式。

關於 Spectrum Instrumentation

Spectrum Instrumentation 於1989年成立，採用獨特模組化設計概念，開發並生產超過200款數位化儀（digitizer）與訊號產生器（generator）產品，包含PC介面卡（PCIe與PXIe規格）及獨立式乙太網路裝置（LXI規格）。歷經逾35年發展，該公司已累積全球客戶群，涵蓋眾多國際一線品牌大廠及幾乎所有頂尖大學。Spectrum總部位於德國漢堡近郊，以業界罕見的5年保固政策聞名，並由設計工程師直接提供頂級技術支援。更多資訊請參閱官方網站：<http://www.spectrum-instrumentation.com>

Spectrum Instrumentation GmbH

Ahrensfelder Weg 13-17

22927 Grosshansdorf

Germany

Sven Harnisch

聯繫方式: +49-4102-6956-0

sven.harnisch@spec.de

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