



## News &amp; Highlights

## 科学新突破预示着核时钟有望达到前所未有的精度

Dana Mackenzie

Senior Technology Writer

在2024年出版的三篇论文[1–3]中，奥地利、德国和美国的物理学家称，利用桌面激光器，首次成功观测到一种新型核过程——钷原子核吸收光子后进入激发态，继而释放光子并回到基态。德国联邦物理技术研究院（德国国家计量机构，位于布伦瑞克市）时间与频率部主任Ekkehard Peik教授指出，这种“钷核荧光”现象“与常规的荧光现象完全相同，区别仅在于前者发生在原子核内部”。

2024年年初，Peik研究团队宣布，他们使用紫外激光器成功激发了钷，并初步估算了发射光的频率[1]。美国加利福尼亚大学洛杉矶分校的物理学与天文学教授Eric Hudson及其研究团队使用另一种晶体材料[2]，也证实了这一过程。仅两个月后，美国实验天体物理学联合研究所（JILA，位于美国科罗拉多州博尔德市，由美国国家标准与技术研究院和科罗拉多大学联合管理）的物理学教授叶军及其团队成功将光谱分辨率提升了五个数量级，实现了精度的惊人飞跃[3–4]。叶军团队的这项突破性研究为开发新一代“核钟”扫清了障碍。与已领先了半个多世纪的原子钟相比，核钟潜力巨大，有望在精确性、稳定性和便携性上实现全面超越。

虽然原子钟的灵敏度已足以发现时间膨胀等现象，并能保障全球定位系统（GPS）正常运行，但以核钟的灵敏度或许能够探测到“新物理现象”[5]，如探测暗物质、发现精细结构常数的变化或是找到违反爱因斯坦等效原理的证据。一切皆有可能，只是推测程度有所不同。新南威尔士大学（澳大利亚新南威尔士州悉尼）物理学教授Victor

Flambaum曾撰写多篇论文论述这类新型时钟在探索“新物理”方面的巨大潜力。他坦言：“借助核钟，我们可在数年内取得如今原子钟可能耗费数十年也难以达成的成就。”

追寻暗物质可能是“新物理”研究方向中优先级最高的领域；若物理学家足够幸运，这可能成为首个出成果的方向。叶军指出：“我们深知，现有的宇宙理论存在一个巨大漏洞——我们还并不了解暗物质和暗能量。有的暗物质理论认为，如果暗物质的确与普通物质发生相互作用，那么它将改变基本物理常数。而如果存在任何可观测的现象，那必将最先在核物理中显现。从这个角度看，我认为这种联系是存在的，而且如果不利用核钟探察暗物质，那将是非常不明智的。”

过去半个世纪以来，原子钟始终是全球计时的基准。在原子钟内，原子外层的电子受电磁辐射（如光波）激发，随后如同荧光现象一样以特定频率发射辐射。这种测量方式兼具超高精度与复现性，因此物理学界在1967年确立了全新的时间测量标准[6]——将“1 s”定义为铯原子发射的特定微波振荡9 192 631 770次所需的时间。

但上述定义已经开始显得过时了。使用微波的铯原子钟已不再是最稳定的时钟，以锶或镱原子为核心的原子钟已实现反超。具体来看，铯原子钟的精度约为小数点后16位，而锶原子钟的精度已突破小数点后18位[7]。

Peik对此坦言：“未来6到10年内，时间的定义必将发生改变。”但他随即补充道，“实际上，钷核钟不会成为新标准的主要候选方案”，因为这项技术尚不具备全天候

运行的技术成熟度，“不过有人表示，下一代计时标准或将由核钟主导。”事实上，叶军团队已为此过渡阶段做好前瞻布局——他们将核钟测量系统与铯原子钟进行了同步校准。若未来“1 s”的定义更新为以铯原子为基准，他们便能充分利用铯原子钟的更高精度。

在核钟内，激光光子的吸收和发射产生于原子核内部，相较于原子外层电子，原子核受原子外部环境的干扰要小得多。从原理上来说，这本应让核钟更精确。但是，要激发原子核内的质子与中子进入激发态，需要极强的能量冲击。若试图用光束实现这一过程，犹如用乒乓球撞击保龄球——更重的保龄球甚至不会感知到碰撞的发生。

但在种类繁多的重质量原子及各类同位素中，存在一个特例：钷-229原子（含90个质子和139个中子）。在重原子核内，质子通常会两两配对，中子也会两两配对，这使钷-229的一个中子落单。虽然存在许多中子数为奇数的重原子，但钷-229的这个落单中子尤为特殊——它仅需一点微弱的推力就能实现自旋翻转，即所谓的“自旋跃迁”。目前只有钷的自旋跃迁这么容易被激活（其原因与“强核力”和电磁力的近乎抵消有关，前者将原子核维系在一起，而后者则试图将原子核撕裂）。若延续保龄球的比喻，可以说这颗钷原子“保龄球”上暗藏了一个微型开关，当大小合适的“乒乓球”精准击中开关时，便能触发一场光的盛宴。

早在2003年，Peik与合著者Christian Tamm就基于这种自旋跃迁，提出了核钟的构想[8]。早期计算的激发该跃迁所需能量较小（为3.5 eV），而实际为8.4 eV。由于能量与频率成正比，物理学家此前一直在电磁波谱的错误波段苦苦寻找发射物。另一挑战在于钷-229的极度稀缺。天然钷几乎全以钷-232同位素的形式存在，这种同位素比钷-229多3个中子，其稳定性也远高于后者。钷-229主要是核反应的副产物，目前全球存量仅40 g，主要产自美国核武器项目。任何想要用钷研发核钟的研究者，都只能使用毫克级甚至微克级的钷-229开展实验。此外，钷-229的放射性很强。便携性本该成为核钟的潜在优势，但若因辐射危害而需要特殊防护处理，这项优势将荡然无存。

随后的二十年见证了技术进步，各实验室也尽显其能。Peik团队研发出宽频可调紫外激光器，能精准覆盖所需频率[9]。奥地利维也纳工业大学的量子计量学教授Thorsten Schumm则成功研制出掺有高浓度钷-229的微型氟化钙晶体[10]。2023年年底，Peik团队使用Schumm提供的晶体，测量出核跃迁频率约为20 204 090 亿赫兹（即每秒振荡20 204 090 亿次）[1]。尽管这些突破性成果令人瞩目，但距离造出能与原子钟媲美的设备仍道阻且长。目

前Peik的测量误差达数十亿赫兹，而理想状态下，核钟的频率须精确到1 Hz的几分之一，即达到16位数字的精度。

与此同时，叶军实验室凭借其特殊技术——频率梳——参与此项研究。这种频率梳能让他们的团队以更精细的步长对频率进行采样（并且可以一次采样多个频率，而非逐一进行）。叶军实验室自2002年以来就致力于此类紫外频率梳的研发[11]。2024年5月，叶军团队在收到Schumm提供的掺杂钷-229的氟化钙晶体后仅数日，就成功发现了他们寻觅已久的结果——一组发射光子的5个峰值，平均频率为2 020 407 384 335 000 Hz。这一测量精度较Peik的结果精确了整整一百万倍。

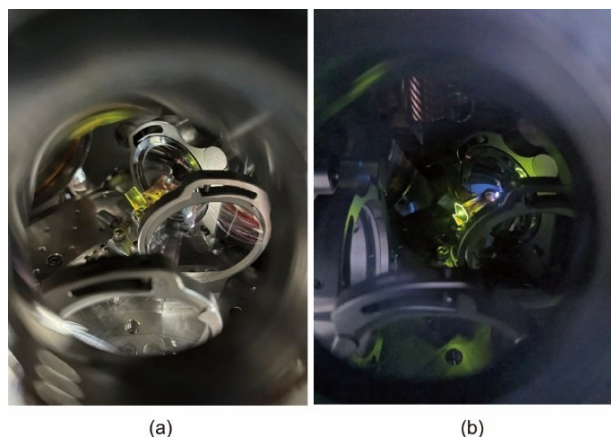
之所以出现5个分裂峰而非单一峰值，源于原子核与氟化钙晶体环境电场间的相互作用。叶军指出，这一现象既是机遇也是挑战。一方面，它证明原子核对外部环境的屏蔽作用是有限的；另一方面，也说明由量子相互作用引发的频率偏移可以被精确测量，甚至有望通过技术手段进行补偿。

面对这一挑战，叶军似乎并未打退堂鼓，部分原因在于他早已布局了另一个解决方案：掺钷薄膜[12]。这种薄膜能大幅缓解钷-229的稀缺问题，因为其含有的钷原子数量约为传统晶体的千分之一（同时其放射性也会是晶体的千分之一）。“这能推动钷核钟的研究大众化。”叶军表示，这一技术最终将为钷核钟成为全球通用标准铺平道路。他甚至展望道，也许未来某天，“你只要能给镜子镀膜，就能拥有核钟”。

尽管关于暗物质等“新物理”的探索备受瞩目，但叶军指出，我们不应忽视其最直接的应用领域——核物理本身。与通过量子电动力学（QED）已得到完善阐释的电子轨道物理不同，原子核主要受“强核力”或量子色动力学（QCD）支配。叶军坦言：“我们对核结构的认知还非常有限。”以钷-229为例，其五个紧密相邻的谱峰揭示了原子核的大小及其“四极矩”，大致描述出它如同美式橄榄球般的拉长形状。叶军团队首次通过激光操控核状态，实现了对原子核形状的观测与尺寸的测量（图1）。

让叶军感到兴奋的正是这种利用光谱技术探索原子核的可能性。他指出：“20世纪60年代激光器的问世曾彻底革新了原子物理学。通过激光，我们得以实现对电子轨道的精准操控。如今，既然能操控核钟跃迁，便意味着我们能用同样方式去探索核物理的深层奥秘。”

要让核钟从理论走向现实，仍有诸多关键问题亟待攻克。对于钷来说，什么环境是最安静的：晶体、薄膜还是离子阱？环境干扰能否被精确控制或修正？如何大幅降低核钟的成本？如何有效减少放射性？但与过去二十年核钟面临的看似不可逾越的障碍相比，上述难题似乎都能被



**图1.** 叶军团队实验装置图。(a) 掺杂钍的氟化钙晶体（中央，浅蓝色圆点）已制备完成，待用于激光实验。(b) 晶体在紫外激光照射下产生辐射，其频率测量精度已达小数点后13位。图中蓝色辉光为普通荧光现象，由掺杂钍-229的载体晶体中氟原子的电子受激后释放。同时，钍原子核受激后也会产生荧光（即“钍核荧光”），释放人眼不可见的紫外线。图片来源：叶军实验室、JILA、NIST及科罗拉多大学（经许可）。

解决。正如叶军所言：“我毕生的追求，就是开拓人类的未知疆域。”

## References

- [1] Tiedau J, Okhupkin MV, Zhang K, Theilking J, Zitzer G, Peik E, et al. Laser excitation of the Th-229 nucleus. *Phys Rev Lett* 2024;132(18):182501.
- [2] Elwell R, Schneider C, Jeet J, Terhune JES, Morgan HWT, Alexandrova AN, et al. Laser excitation of the  $^{229}\text{Th}$  nuclear isomeric transition in a solid-state host. *Phys Rev Lett* 2024;133(1):013201.
- [3] Zhang C, Ooi T, Higgins JS, Doyle JF, von der Wense L, Beeks K, et al. Frequency ratio of the  $^{229\text{m}}\text{Th}$  nuclear isomeric transition and the  $^{87}\text{Sr}$  atomic clock. *Nature* 2024;633(8028):63–70.
- [4] Pálffy A, Crespo L U. Countdown to a nuclear clock. *Nature* 2024;633(8028):43–5.
- [5] Dzuba V, Flambaum V. Using the Th III ion for a nuclear clock and searches for new physics. 2024. arXiv:2412.18308v1.
- [6] Palmer C. Redefining the kilogram. *Engineering* 2019;5(3):361–2.
- [7] Mackenzie D. Time gets more precise with transportable optical lattice clocks. *Engineering* 2020;6(11):1210–1.
- [8] Peik E, Tamm C. Nuclear laser spectroscopy of the 3.5 eV transition in Th-229. *Europhys Lett* 2003;61(2):181–6.
- [9] Thierolf T. Shedding light on the thorium-229 nuclear clock isomer. *Physics* 2024;17:71.
- [10] Beeks K, Sikorsky T, Rosecker V, Pressler M, Schaden F, Werban D, et al. Growth and characterization of thorium-doped calcium fluoride single crystals. *Sci Rep* 2023;13(1):3897.
- [11] Ye J, Schnatz H, Hollberg L. Optical frequency combs: from frequency metrology to optical phase control. *IEEE J Select Topics Quant Electron* 2003;9:1041.
- [12] Zhang C, von der Wense L, Doyle JF, Higgins JS, Ooi T, Friebe HU, et al.  $^{229}\text{ThF}_4$  thin films for solid-state nuclear clocks. *Nature* 2024;636(8043): 603–8.