

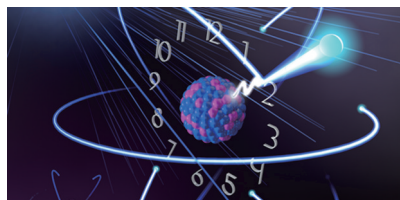
# 原子核光学钟

(中国原子能科学研究院 周书华 编译自 Lars von der Wense. *Physics*, September 28, 2020)

现今最精确的钟，以原子在光学波段的超窄电子跃迁所确定的频率为标准。光学原子钟的精度为 $10^{18}$ 分之一，也就是说，这些钟在宇宙年龄那么长的时间内只会差1秒。原则上，更精确的钟可以使用核跃迁代替电子跃迁。由于原子核比原子的电子壳小得多，这样的“核光学钟”预计对外界的扰动更不敏感。

多年以前，研究人员在钍的同位素 $^{229}\text{Th}$ 中发现了适用于核光学钟的核跃迁。但直到最近，该跃迁频率确定的还不够精确，不能用窄带激光直接激发，不满足光学钟运行的先决条件。德国海德堡大学的Tomas Sikorsky及其同事报道了 $^{229}\text{Th}$ 跃迁的高精度测量，显著缩短了跃迁谱的范围。这一结果为基于激光谱学更精确的测量铺平了道路。对于精确跃迁频率的测定将使核光学钟成为可能。

自从1960年发明激光以来，原子电子壳层的激光谱学已发展为成熟的技术，并用于包括光学原子钟在内的许多方面。相反，核跃迁的激光谱学却很不成熟。原因很简单：通常核激发态的跃迁需要keV到MeV范围的能量，这是当今激光技术无法达到的。 $^{229}\text{Th}$ 的跃迁是仅



钍同位素核跃迁的高精度测量是开发核光学钟的关键一步

知的例外，其基态与第一个亚稳激发态 $^{229\text{m}}\text{Th}$ 之间的能量差非常小，以前报道的值在3.5—8.3 eV之间。与这些能量相对应波长的激光原则上是可用的。但是，由于对跃迁频率知道的不够精确，不清楚哪种激光技术最合适。用窄带激光找到精确的跃迁频率将需要极长时间的扫描和使用多种激光器。

几十年来， $^{229\text{m}}\text{Th}$ 能量的精确测定一直是十分困难的课题。由于高精度激光谱学不适用，只能依靠与跃迁频率间接相关的观察量。基于对 $^{229\text{m}}\text{Th}$ 核衰变中发射的 $\gamma$ 射线测量的研究，初步估计跃迁能为3.5 eV。从 $\gamma$ 辐射导出的更精确的值，使得测量到的跃迁能改变为7.6 eV和7.8 eV左右。2019年使用不同技术得到另外3个值，都趋向略高的跃迁能量。

Sikorsky及其同事通过略微不同的步骤导出了4个新的跃迁能量值，与2009年B. R. Beck等，2019年B. Seiferle等及2019年A. Yamaguchi等发表的4组值彼此符合的相当好。用不确定度加权的平均值为 $8.12 \pm 0.11$  eV。

为获得 $^{229\text{m}}\text{Th}$ ，Sikorsky等采用基于 $^{233}\text{U}$ 的 $\alpha$ 衰变技术。这种衰变生成包括 $^{229\text{m}}\text{Th}$ 在内的 $^{229}\text{Th}$ 不同态，伴随有多条 $\gamma$ 射线谱线。每一条 $\gamma$ 谱线对应于特定的 $^{229}\text{Th}$ 核能级之间的跃迁。通过扣除所测到的适当 $\gamma$ 谱线可以推断出 $^{229\text{m}}\text{Th}$ 的能量。

这种方法与早期的一些工作相同，但是由于 $\gamma$ 射线探测的分辨率更高，新的测量精度有很大改进。

Sikorsky基于磁微量热器开发了一种 $\gamma$ 谱仪。在这种高灵敏探测器中，因吸收 $\gamma$ 光子引起的温度升高转换成磁化的降低。这种探测器在 $\gamma$ 射线能量为30 keV处的分辨小于10 eV，比以前所用探测器的分辨高3倍。重要的是，通过仔细测量每一条 $\gamma$ 谱线的形状，确定谱线中心的精度可以比谱线半峰全宽的分辨率更高。

计入谱的分辨和所有可能的误差来源，Sikorsky导出4个最精确值的平均值为8.10 eV，不确定度为0.17 eV，此结果与之前的最好值， $8.12 \pm 0.17$  eV一致。新的结果有重要的优点。Sikorsky等的分析表明，结果的精度因统计所限，而非为系统误差所限。因此，对于进行长期实验，该方法具有进一步降低不确定度的可能。

新的结果提供了通过激光谱学直接研究 $^{229\text{m}}\text{Th}$ 的重要线索。跃迁的窄光谱范围将使所需的激光扫描时间减少，而且确定了哪种激光技术最适于精确谱学。由于没有8.1 eV能量的连续波激光，目前唯一的可能是用频率梳——具有等距离谱线光谱的激光源，进行极精确的谱学测量。这种实验目前正在进行。

一旦能够直接用激光激发核跃迁，核光学钟便可以实现。这种2003年首次提出的钟，比目前运行最好的原子钟精度高10倍。一项重要的应用是检测精细结构常数 $\alpha$ 可能随时间的变化。最近的研究表明，钍光学钟的频率是这种变化的超灵敏探针，可以将现有的结果改进约6个数量级。