

提升原子光钟的精度

(北京大学 王树峰 编译自 Mukund Vengalattore. *Physics*, March 5, 2018)

研究者用光谱成像方法降低铯原子光晶格钟的频率偏移，获得原子钟精度的新纪录。

当今最精确的原子钟是基于铯、镱和其他碱土(或类似于碱土)原子。这些元素具有超窄的跃迁光频率，从而为时间测量提供了稳定、精确的频率标准。相比于目前用来定义秒的铯原子钟，碱土元素的频率标准比它精确近千倍。在美国科罗拉多州，天体物理学联合实验研究所(JILA)的Jun Ye小组在原子光钟领域达成新的纪录。他们展示了相对精度达到 2.5×10^{-19} 的铯原子钟——这相当于在宇宙寿命的时间尺度上，不精确度仅仅是100 ms。

让我们先来回顾一下频率标准的基础。首先，我们需要一个频率高但线宽窄的原子跃迁，这使我们可以精确地锁定频率。其次，这个跃迁的时间要足够长，从而可以平

均多次测量来获得高精度。第三，需要一个超稳定的振荡器(激光或微波源)用来激发原子。一个额外的考虑是同时探测 N 个原子，将量子投影噪声(QPN)降低至原来的 $(\frac{1}{N})^{1/2}$ ——这是光钟精度的极限。

基于这些要求，一些研究组开发了基于铯的极窄光跃迁的原子钟。这个跃迁频率约为429 THz，线宽在1 Hz以下。并且通过测量约束在光晶格中的数百万个原子，可提升量子投影噪声极限。Ye和同事将约10000个铯原子冷却至15 nK，并将其约束于光晶格中。然后他们用超稳定激光激发这个429 THz的跃迁，并观察其光谱。

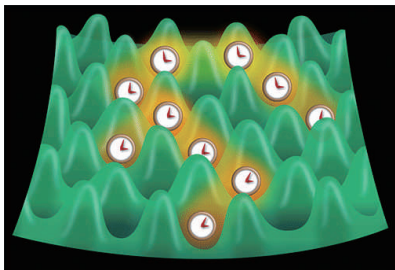
要达到更高的精度和稳定性，他们要克服系统的和统计上的不确定性。宽泛的说，这种不确定性可以分为“单粒子”或“多粒子”。单粒子的效应可以来自于激发激光的频率噪声，或局域电磁场能量背景随位置而发生改变。这种空间不均匀性导致不同区域晶格的跃迁频率存在些许差异，从而降低了整体测量时的精度。而多粒子的效应则来源于原子间的相互作用，它会导致浓度依赖的频移。这就导致了一个棘手的问题：向光晶格中增加原子可获得更高的精度，但同时也加剧了原子间相互作用，改变了钟的跃迁频率。

Ye的小组通过将铯原子冷却至1 μ K之下解决了这一多体系统的矛

盾。他们于2017年展示了冷却的原子可以自组织为一个绝缘相的量子简并气体。在这个相中，光晶格的每个位置精确地被单一的原子占据，因此原子间的相互作用受到极大地抑制，由此而形成的量子相可以获得更高精度的单粒子测量结果。

排除掉原子的相互作用，系统的误差就主要来自于单原子。如上所述，不同晶格处的原子感受到的能量背景略有差异，于是显示出不同的跃迁频率。Ye等人结合了超精密光谱和高空间分辨成像测量了不同晶格位置的钟频率(见图)。这让研究人员可以分析不均匀性的来源并加以消除。尤其是他们可以消除晶格激光在空间上的微小偏离，它会造成钟频随位置发生变化(这种影响在先前的实验中可能被忽视了)。此外，晶格激光需稳定在特定的“魔术波长”，否则会干扰原子的频率。他们通过光谱成像技术可以对准这个波长，从而消除影响。最后，可以利用这个光谱成像技术校准激光的频率噪声。

这种新技术毫无疑问会促使原子光钟的精度和稳定度进一步提升。尽管Ye展示的图像目前仍然不能做到单一位点的分辨，但是随着成像系统的进展，这个目标可以实现。利用单位点分辨，新的原子钟就可以成为超敏感探测方法，来研究长程相互作用以及奇异量子相中的量子关联。



Ye和同事们开发的原子光钟由置于三维光晶格中的约10000个铯原子组成。铯的跃迁频率在晶格各处有所不同(图中用表盘代表)，这就降低了整体频率测量的精度。Ye研究组通过对其进行空间分辨来修正这种偏移。同时，铯原子间的相互作用也会影响测量。他们将原子冷却至量子简并态，使每个光晶格只由一个原子占据，从而消除了这一影响