

# 冷原子光钟

周敏 徐信业

(华东师范大学精密光谱科学技术国家重点实验室 200062)

光钟是近二十年来发展的一类新型原子钟，它参考的是具有高品质因子的光频跃迁，分为原子光钟和离子光钟。冷原子光钟利用激光冷却后的中性原子，这类原子一般是碱土金属或者类碱土金属原子，有镁 (Mg)、钙 (Ca)、锶 (Sr)、镱 (Yb) 和汞 (Hg) 等，它们最外层都有两个电子，单重态  $(ns^2)^1S_0$  至三重态  $(nsnp)^3P_0$  之间的跃迁具有非常窄的线宽，是理想的光学频率参考源。冷原子光钟凭借其极高的频率准确度和稳定性，将加深人们对基本物理规律的认识，同时在一些时间与频率标准技术应用领域发挥重要作用。

## 1. 引言

自古以来，人们就一直追求如何精确计时，早期天文学的一项重要任务就是测量时间，以确定年月

日的长短，然后制定历法。秒的定义先后经历了以地球自转周期为基础的平太阳秒和以地球公转为周期的历书秒，随着原子钟的出现和发展，历书秒很快就被原子秒取代。1967年，国际单位制 (SI) 的“秒”被定义为“ $^{133}\text{Cs}$  原子基态的两超精细结构能级经历 9,192,631,770 个周期所持续的时间”，这一定义沿袭至今，目前由铯喷泉钟精确复现这个值。相比于平太阳秒和历书秒，原子秒受外界环境干扰更小，全世界普遍适用，在短时间内就可以获得高精度的秒长。

在过去的六十多年内，基于原子时的时间频率标准在基础科学、精密测量和技术应用上起着举足轻重的作用。目前，最好的铯喷泉基准钟的准确度在  $10^{-16}$  水平，基本已经达到了极限。然而，在卫星导航系统、高速通讯系统、甚长基线干涉仪天文望远镜、基础物理规律检验等领域 (图 1)，越来越急需更高精度的计

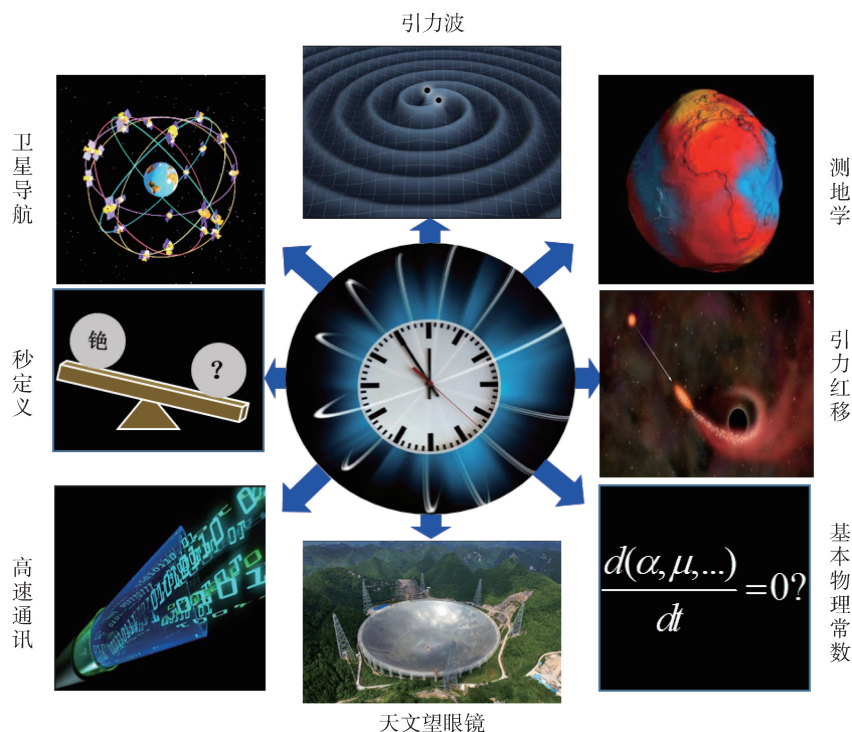


图 1 冷原子光钟的应用

时和同步技术，这就需要原子计时技术有新的革命性突破。人们发现，将原子钟的参考频率从微波提高至光频，将显著改善原子钟的稳定度，其频率准确度也会优于目前最好的冷原子喷泉钟。这种工作频率在光频频域的原于钟，也就是常说的光钟。

## 2. 关键技术

研制冷原子光钟应具备三个基本条件(图2)。第一，冷原子物理系统的光频参考跃迁(称为钟跃迁)线宽要足够窄，对外界环境干扰也相对不敏感，以保证钟跃迁具有非常高的品质因子。第二，作为本振的激光源要求频谱纯度高并且足够稳定，以保证窄线宽的钟跃迁能够被有效地激励。第三，光钟的输出要能够被有效并准确地计数，以保证光频可以下转换成微波频率以供使用。

(1) 冷原子物理系统。品质因子为  $10^{14}\sim 10^{15}$  的钟跃迁是冷原子光钟的核心。气体状态的原子由于热运动具有较宽的速度分布，谱线的多普勒展宽和频移等效应将非常显著，必须加以抑制。先利用激光冷却的方法，将热原子的速度绝对值降低，使一阶多普勒展宽和二阶多普勒频移变小，再构造势阱囚禁冷原子，将它们与外界环境隔绝，减小运动范围，进一步抑制多普勒效应。

在光晶格中，冷原子被储存在一个个微型光学阱里，可作用时间得到大大延长，同时也消除了多普勒频移等效应。选择光晶格囚禁冷原子的关键在于，若将晶格光调谐至某一特定波长(即所谓的“魔术波长”)，晶格光对钟跃迁频率的影响理论上可减小至  $10^{-17}$  至  $10^{-18}$  水平。

(2) Hz 量级线宽的钟激光。要在实验上获得 Hz 量级线宽的钟跃迁谱线，需要频谱极纯的钟激光。

常用的方法是将激光频率锁定在一超稳定的光学参考腔上。这种参考腔由两面超高反射率(通常高达 99.999%)的镜片构成，镜片之间的腔体是超低膨胀系数的材料，目的是尽量减小腔长变化。为了使腔长更加稳定，还需小心地使腔与外界环境隔绝开，例如将腔置于真空室内并加以控温、隔声及隔振。腔稳激光器的线宽已经窄至几十 mHz，已受限于腔镜材料固有的热噪声。近年来，为减小热噪声等因素的影响，参考腔被置于低温环境中，基于低温腔的激光稳频工作还在继续推进。

(3) 光梳。光学频率梳(简称光梳)的发明使得光频测量终于有了突破性的进展。光梳的核心部件是锁模飞秒激光器，经光谱展宽后可覆盖从近红外至可见光的范围。锁模飞秒激光器的输出在时域上是一系列脉冲序列，在频域上是一系列单频梳齿，梳齿间隔称为重复频率，整个序列还有一个频率起始点，称为零频。当锁定飞秒激光器的零频和重复频率后，就成为了一台光梳，可作为一把精确的光频尺子使用。

## 3. 冷 $^{171}\text{Yb}$ 原子光钟

以  $^{171}\text{Yb}$  原子为例，介绍冷原子光钟工作过程及目前的研究进展情况。

### 3.1 能级结构

$\text{Yb}$  原子共有七种稳定的同位素，其中， $^{171}\text{Yb}$  是核自旋  $I=1/2$  的费米子。 $^{171}\text{Yb}$  原子相关的能级结构(图3)与碱土金属类似，含有单重态和三重态两套能级结构。

399 nm 的  $^1S_0 \rightarrow ^1P_1$  跃迁强度最大，线宽为 29 MHz，用于原子的一级冷却和荧光探测。556 nm 的  $^1S_0 \rightarrow ^3P_1$  跃迁线宽为 182 kHz，用于原子的二级冷却

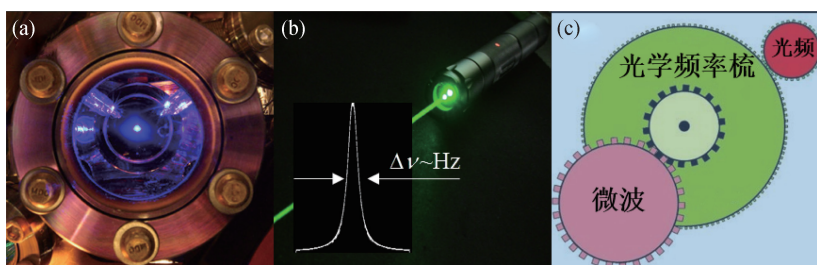


图2 冷原子光钟的三个基本条件。(a)冷原子物理系统；(b)Hz量级线宽的钟激光；(c)光梳

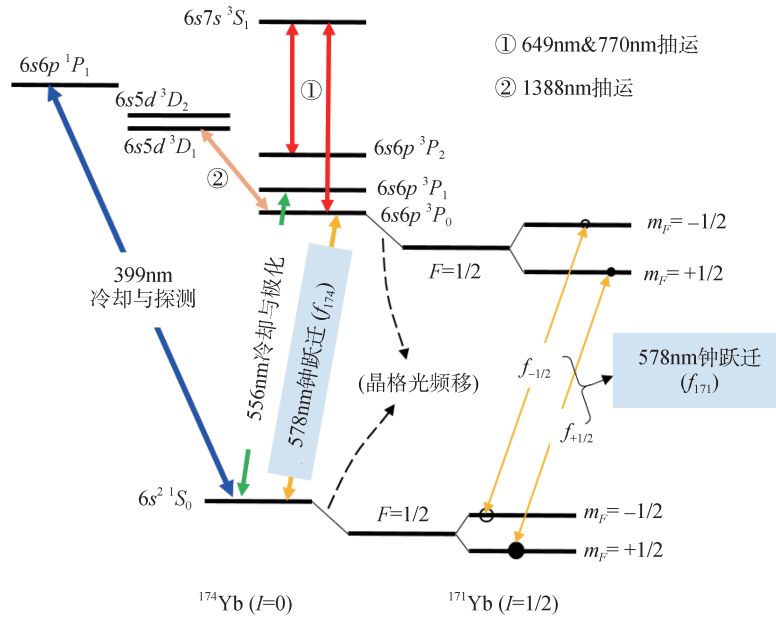


图3 Yb原子冷却和钟跃迁的简化能级图

和自旋极化。理论上， $^1S_0 \rightarrow ^3P_0$  跃迁对 Yb 的玻色子是禁戒的，而 Yb 的费米子仍有很微弱的几率发生此跃迁，对于  $^{171}\text{Yb}$  来说，自然线宽预计小于 10 mHz，因此，它可被用来研制光钟。实际上，对于  $^{174}\text{Yb}$  玻色子，也可以借助外场（如磁场）的作用将  $^3P_0$  与基态  $^1S_0$  联系起来，因此， $^{174}\text{Yb}$  也可被用于研制光钟。

$^{171}\text{Yb}$  的核自旋不为零，因而具有超精细能级结构。在磁场存在时，超精细能级  $^1S_0(F=1/2)$  与  $^3P_0(F=1/2)$  的磁子能级分裂值存在差异，使得  $\pi$  跃迁的频率  $f_{m_F}$ （对应  $\Delta m_F = 0$ ）与  $m_F$  有关。然而，在较小的磁场条件下， $(f_{m_F} + f_{-m_F})/2$  的值正好是未分裂时的钟跃迁频率值  $f_{171}$ ，同时还消除了一阶塞曼频移和矢量光频移。

### 3.2 组成结构

冷  $^{171}\text{Yb}$  原子光钟主要包括冷原子系统、钟激光系统、探测和反馈系统以及光频测量系统（图 4），下面分别加以简单介绍。

(1) 冷原子系统。冷  $^{171}\text{Yb}$  原子在三维磁光阱中产生，然后被囚禁至一维光晶格中。磁光阱由冷却光和四极型磁场组成，其中冷却光是三对互相正交的  $\sigma^- - \sigma^+$  构型，通电流的反亥姆霍兹线圈形成相对于腔中心对称的四极型磁场。光晶格实际上就是驻波光场，一般由高斯光束经过聚焦然后按原路返回形成。

光晶格包含成百上千个周期性排列的微型光阱，光阱之间的间隔距离为晶格光波长的一半。装载进光晶格的  $^{171}\text{Yb}$  原子数一般为  $10^3 \sim 10^4$ ，温度为  $10 \sim 20 \mu\text{K}$ 。

(2) 钟激光系统。578 nm 钟激光预先锁定在超稳光学参考腔上，将腔置于真空环境中并小心地对其进行控温、隔声和隔振。钟激光的线宽可被压窄至 Hz 甚至亚 Hz 量级，秒级的频率不稳定性一般在  $10^{-16} \sim 10^{-15}$  水平。

(3) 探测和反馈系统。由于钟激光锁定在超稳腔的某一腔模上，其频率一般不会与钟跃迁对齐，这通常由移频器完成。原子对钟激光的响应由探测器测得，探测器一般为高灵敏光电探测器或电荷耦合器件 (CCD)，如光电倍增管、增强型 CCD 和电子倍增 CCD 等。探测器获得的电信号经相关处理后，再经频率综合器

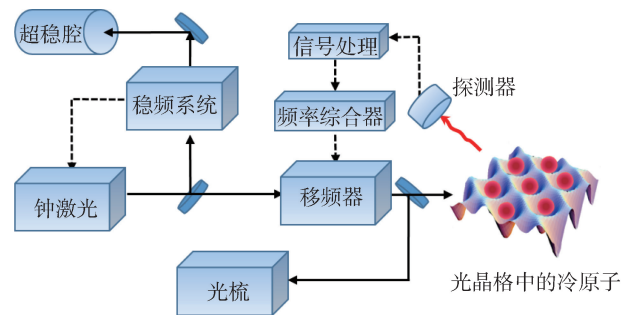


图4 冷原子光钟的组成结构

反馈给移频器。

(4)光频测量系统。将钟激光送至光梳直接与某一邻近梳齿进行拍频,用计数器对拍频信号进行计数,得出钟跃迁的频率值。

### 3.3 工作原理

冷  $^{171}\text{Yb}$  原子光钟典型的运行时序(图5)包括冷原子制备、钟跃迁探测和信号检测三个基本过程。

(1)冷原子制备。日本京都大学、美国俄勒冈大学、韩国 KRISS、美国华盛顿大学、中国华东师范大学等小组开展了 Yb 原子激光冷却方面的工作。从热炉中喷出的热 Yb 原子束,经过塞曼减速器纵向减速后,被装载进 399 nm 的磁光阱中进行一级冷却。由于  $^1P_1$  态弛豫至  $^3D_{1,2}$  态的概率非常低,一级冷却时可选择不再添加 649 nm 和 770 nm 的抽运激光,一般可获得的原子数为  $10^6\sim 10^8$ ,温度为几 mK。紧接着,原子被装载进 556 nm 的磁光阱中进行二级冷却。撤去磁光阱的磁场和冷却光后,冷原子被装载进魔术波长的光晶格中。此时,冷原子分布在基态  $^1S_0$  的超精细结构  $F=1/2$  的两个磁子能级上(图3)。

Yb 原子二级冷却所用跃迁的线宽很宽,既有优点也有缺点。优点在于原子从 399 nm 磁光阱转移至 556 nm 磁光阱的效率会比较高,能达到 50%~80%。甚至可从减速的 Yb 原子束中直接装载 556 nm 磁光阱。缺点是二级冷却后 Yb 原子的温度偏高,一般为  $10\sim 20\mu\text{K}$ ,当装载进魔术波长( $\sim 759\text{nm}$ )的光晶格后,不少原子会布居在晶格势阱的高阶振动能级,从载波-边带结构的钟跃迁谱上将看到比较明显的红边带,对光钟的准确度和稳定度都会造成不利的影 响。针对光晶格中原子温度较高的问题,日本 RIKEN 小组还使用了边带冷却的方法,将几乎所有的原子都抽运至振

动基态,所用的 1389 nm 抽运激光对应  $^3P_0 \rightarrow ^3D_1$  跃迁。

通过自旋极化制备不可分辨的费米子,可以抑制原子间的碰撞频移。自旋极化的另一个好处在于,钟跃迁谱线的信噪比得到提高,对提高频率锁定精度和改善光钟稳定度非常有利。

(2)钟跃迁探测。在钟跃迁探测阶段,要求钟激光与晶格光都是线偏振且偏振方向一致。在钟激光接近原子共振频率时,脉冲式的钟探测将一部分  $^1S_0$  态的原子激励至  $^3P_0$  相应的磁子能级(对应  $\Delta m_F = 0$ ),另一部分原子还布居在基态  $^1S_0$ 。

(3)信号检测。为了获得被激励原子的比例  $\kappa$ ,通常采用归一化的搁置检测法,这需要测量一系列荧光信号。首先,测得仍在基态  $^1S_0$  上的原子数  $N_g$ 。利用近共振的探测光 1 诱导原子发生  $^1S_0 \rightarrow ^1P_1$  跃迁并将其打飞掉,荧光信号测得大小为  $I_1$ 。然后,测量被激励至  $^3P_0$  上的原子数。由于  $^3P_0$  能级寿命很长,需要借助 649 nm 和 770 nm 双抽运激光或者 1388 nm 单抽运激光将  $^3P_0$  上的原子经  $^3P_1$  抽运回基态  $^1S_0$ (图3),利用探测光 2 诱导产生荧光  $I_2$ 。探测光 3 诱导的荧光  $I_3$  代表背景原子信号。那么,归一化的激发率可表示为  $\kappa = (I_2 - I_3)/(I_1 + I_2 - 2I_3)$ 。步进扫描移频器的频率,同时记录该频率值处的  $\kappa$ ,就可以获得钟跃迁谱。对于 Rabi 方式的激励,当谱线线宽达到傅里叶极限时,中心载波呈  $\text{sinc}^2$  函数形状,一般可近似为洛伦兹分布。

要成为一台光钟,钟激光的频率应始终与钟跃迁谱中心频率  $f_{171}$  保持一致。根据  $f_{171} = (f_{-1/2} + f_{+1/2})/2$ ,需要施加一个偏置磁场将两个  $\pi$  峰分裂开来,并使用四点锁定的方案。首先,在周期  $T_1$  和  $T_2$  将原子自旋极化至  $^1S_0(F=1/2, m_F=+1/2)$ ,分别探测  $f_{+1/2}$  谱线半高的左右两侧,测得的激发率之差  $\delta\kappa_1$ 。然后类似地,在周期  $T_3$  和  $T_4$  探测得到  $f_{-1/2}$  谱线左右两侧的激发率之差

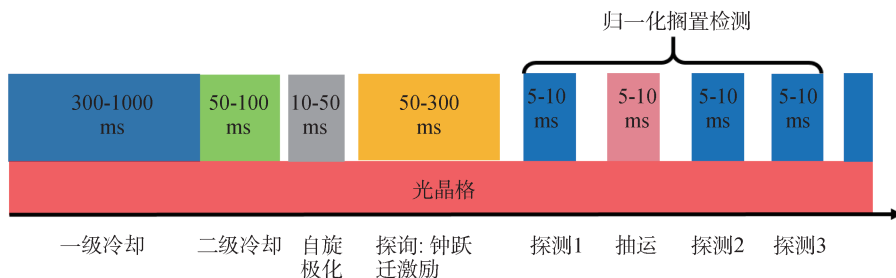


图5 光钟典型的工作时序

$\delta\kappa_2$ 。最后, 对  $\delta\kappa_1$  和  $\delta\kappa_2$  进行处理得到误差信号, 再反馈至移频器对钟激光频率完成纠偏。

### 3.4 进展简介

据不完全统计, 研制冷  $^{171}\text{Yb}$  原子光钟的单位已超过十家, 其中包括美国 NIST、日本 NMIJ&AIST、韩国 KRISS、中国华东师范大学、德国杜塞尔多夫大学、意大利 INRIM 和日本 RIKEN 等小组。早在 2005 年, 美国 NIST 小组在光晶格中囚禁了冷  $^{171}\text{Yb}$  原子, 并观察到了钟跃迁谱。同年, 美国华盛顿大学小组在 399 nm 磁光阱中观察到了  $^{171}\text{Yb}$  钟跃迁的吸收峰。在 2006 年, NIST 小组将冷  $^{174}\text{Yb}$  原子囚禁于光晶格中, 在外加一定静磁场的条件下, 成功诱导了钟跃迁的发生。华东师范大学小组从 2006 年就开始研制冷镱原子光钟, 在 2013 年成功在光晶格中囚禁冷镱原子, 同年就获得了  $^{171}\text{Yb}$  钟跃迁谱线。

冷  $^{171}\text{Yb}$  原子光钟需要超窄线宽的激光器作为本振, RIKEN 小组的 578 nm 钟激光经光梳锁定在超稳 698 nm 激光上, 秒级不稳定性为  $1\sim 5\times 10^{-16}$ , NIST 小组的 578 nm 钟激光的线宽约为 0.25 Hz, 1 至 10 秒的不稳定性为  $2\times 10^{-16}$ 。NIST 小组将两套  $^{171}\text{Yb}$  光钟进行比对, 得到单台钟的不稳定性为  $3.2\times 10^{-16}/\sqrt{\tau}$ , 在接近七小时内平均后不稳定性达到  $1.6\times 10^{-18}$ 。最近, 华东师范大学小组也比对了两套  $^{171}\text{Yb}$  光钟, 1000 秒的频率不稳定性已在  $10^{-17}$  量级。目前, NIST、NMIJ(&AIST)、KRISS 和 INRIM 四个小组分别对  $^{171}\text{Yb}$  钟跃迁的绝对频率值进行了测量(图 6)。结果表明, 所有测量值都符合地很好, 基本都在 CIPM 推荐值的不确定度范围内。RIKEN 小组在 2015 年和 2016 年测量了  $^{171}\text{Yb}$  与  $^{87}\text{Sr}$  的钟跃迁频率比, 不确定度在  $10^{-16}$  至  $10^{-17}$  水平, 推算所得  $^{171}\text{Yb}$  的钟频绝对值也具有非常高的可信度。

除频率不稳定性外, 评价冷原子光钟的另一重要性能指标是频率不确定度。这需要评估系统中各种因素(如电场、磁场、光场等)对冷原子光钟的影响, 评估内容包括谱线频移的修正和修正的不确定度。系统不确定度的评估是一项非常繁琐的工作, 大多数效应的贡献可通过比对两台光钟或者交替改变单台光钟的参数测量。对于冷  $^{171}\text{Yb}$  原子光钟来说, 主要的系

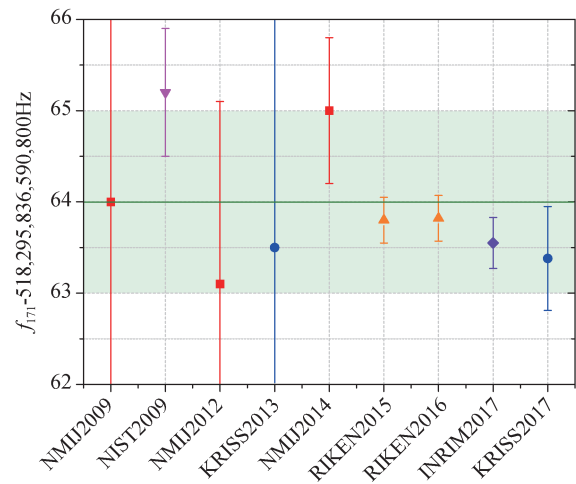


图 6  $^{171}\text{Yb}$  钟跃迁的绝对频率值。水平线为 CIPM 给出的推荐值, 阴影表示不确定范围

统频移不确定度来源于晶格光频移、碰撞频移和黑体辐射频移等。

(1) 晶格光频移。原子在晶格光场中会被极化, 继而导致原子能级发生交流斯塔克频移, 也称晶格光频移。若钟跃迁对应的上下能级发生不对等的光频移, 那么最后获得的钟频就有光频移。实际实验中, 通常是在不同晶格光波长下, 测量几组晶格光功率时产生的钟频频移, 通过拟合获得频移不随晶格光功率变化所对应的晶格光波长, 即所谓的魔术波长。需注意的是, Yb 光钟的晶格光魔术波长约为 759.3 nm, 非常接近  $6s6p^3P_0 \rightarrow 6s8p^3P_{0,2}$  和  $6s5f^3F_2$  三组双光子共振跃迁, 可能产生不可忽略的超极化光频移。实验已证实, Yb 光钟的超极化光频移不确定度在  $10^{-17}$  量级。目前, 冷  $^{171}\text{Yb}$  原子光钟晶格光频移的不确定度在  $10^{-17}$  水平, 已成为不确定度进入  $10^{-18}$  量级的最大障碍。

(2) 碰撞频移。针对冷  $^{171}\text{Yb}$  原子光钟的碰撞频移, NIST 小组在一维和二维光晶格中都进行了实验, 发现  $^{171}\text{Yb}$  原子的  $p$  波碰撞比较明显, 当选择某一合适激发率时, 可抑制碰撞频移至  $5\times 10^{-18}$  水平。在自旋极化后, 非均匀激发仍可能引起  $s$  波的碰撞频移, 华东师范大学小组分析了原子不同温度时以及晶格光与钟激光未对准时对碰撞频移的影响, 一定条件下的碰撞频移影响可减小至  $10^{-19}$  水平。

(3) 黑体辐射频移。要获得  $10^{-18}$  水平的系统不确定度, 还需要抑制黑体辐射频移的影响。由于 Yb 原

子理论模型比较复杂并且缺乏可靠的实验数据对比，黑体辐射频移的不确定度很长一段时间都被限制在 $10^{-16}$ 水平。为此，NIST小组精确测量了 $^{171}\text{Yb}$ 原子钟跃迁上下能级的直流差分极化率，并对热辐射场的近似处理进行了修正，使得黑体辐射频移影响主要由原子附近的温度性质决定。室温下起伏1 K对应的黑体辐射频移不确定度为 $3 \times 10^{-17}$ 。为了降低温度对频移的影响，NIST小组重新设计了具有热辐射屏蔽层的真空腔，腔内原子所受热辐射也将更均匀，黑体辐射频移不确定度评估为 $1 \times 10^{-18}$ ，而RIKEN小组将原子转移至冷腔中进行钟探测，黑体辐射频移不确定度为 $7 \times 10^{-19}$ 。最近，华东师范大学小组提出一种评估冷原子光钟黑体辐射频移不确定度的新方案，即腔体外表面温度的精确测量与冷原子附近温度分布的数值模拟相结合方法，为无法实施以上两种技术的装置提供一种实用可靠、精度高的评估手段(图7)。

#### 4. 应用与成就

在20世纪初叶，针对爱因斯坦的狭义相对论，

人们提出了“双生子佯谬”思想实验的质疑，内容是这样的：一对孪生兄弟，一个驾驶宇宙飞船作长程太空旅行，而另一个则留在地球，当旅行者回到地球后，他发现自己比留在地球的兄弟更年轻。其实这个故事并没有与狭义相对论矛盾，因为相对于惯性系统移动的时钟具有“时间膨胀”现象，即走的较慢一些。而关于引力的广义相对论也有一个类似的推论，那就是时间在巨大的引力势下会变慢，称为“引力时间膨胀”，可观察到的现象是当光波远离引力场时，整体频谱向红色方向偏移。特别地，由地球的重力势引起的频率移动称为重力红移。实际上，借助数十亿年才相差一秒的冷原子光钟，是可以验证这些“时间膨胀”现象的(图8)。

在2010年，美国NIST小组利用系统不确定度分别为 $8.6 \times 10^{-18}$ 和 $2.3 \times 10^{-17}$ 的两台冷 $\text{Al}^+$ 光钟，成功测量了33 cm高度差引起的重力红移，从而验证了广义相对论的“引力时间膨胀”。随着冷原子光钟的精度越来越高，重力红移也越来越容易被观测到。在2016年，日本Katori等人利用分别位于RIKEN和东

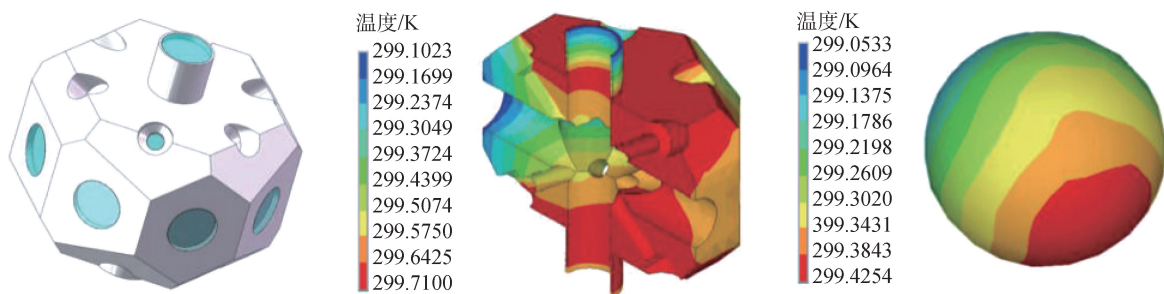


图7 真空腔温度分布的数值模拟

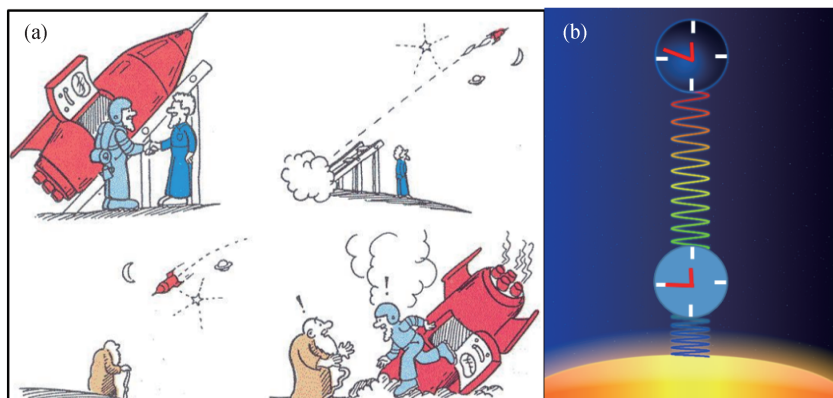


图8 时间膨胀现象。(a) 双生子佯谬；(b) 引力红移

京大学的两台冷  $^{87}\text{Sr}$  原子光钟测量了两地的相对高度差，不确定值仅为 5 cm。未来可以对冷原子光钟组网比对，全覆盖测量地球重力势，以测得的高度数据建立一套基于频率测量的水平高度基准。这种测量具有实时性，而且可以在大陆间保证厘米量级的测量不确定度。德国和法国两地的小组建立了相距超过 1400 km 的冷原子光钟网络，这种光钟网络不仅可以进行测地学研究，还有望用于研究地外天体引力势引起的潮汐摄动，检测地下岩浆的流动从而预测地震和火山喷发。

利用高精度的光钟，人们还进行了一些其他基础物理研究。对于一些物理常数是否随时间变化的问题，

冷原子光钟也是极佳的检测工具。例如，可以检测精细结构常数  $\alpha = e^2 / (4\pi\epsilon_0\hbar c)$  或电子质子质量比  $\mu = m_e/m_p$  随时间的相对变化率。当冷原子光钟能在太空环境中运行且精度进一步得到提高时，还有可能用于探索暗物质、引力波等。

## 致谢

本项研究工作分别获得国家重点研究发展规划(973 计划)(2016YFA0302103, 2012CB821302); 国家高技术研究发展计划(863 计划)(2014AA123 401); 国家自然科学基金重点项目(11134003); 上海市优秀学术带头人计划(12XD1402400)等资助。

封底照片说明

## 利用 3D 技术探索琥珀中的非鸟恐龙

还记得科幻电影《侏罗纪公园》吧，那里有这样一段：科学家在一块琥珀里找到一只蚊子，并通过保存在蚊子体内的一滴血液找到了远古恐龙的残留痕迹，并以此克隆出恐龙。前不久来自中加等多个国家科研人员组成的科研团队有了比科幻电影更加让人振奋的真实消息，他们在琥珀里找到了恐龙时代的古鸟类。这次发现是人类首次在琥珀中找到古鸟类的标本，距今已经约有 9900 万年了。这块琥珀大小仅如一枚鸡蛋，而透过这块小小琥珀所传达的信息，却让人激动不已浮想联翩。这个研究团队较早时候就已经在琥珀中发现了古鸟类的翅膀，这回他们找到的一段展开后长约 6 厘米古鸟类的尾部。让科学家最为惊喜的是这截尾巴包含了八个完整的尾椎，周围是较为浓密的羽毛，这形态不仅完整地保留了恐龙生前的状态，还保存了恐龙非常精细的羽毛形态，为科学研究提供了依据。科学家们利用 3D 技术对这段尾部进行了图像重建，发现这些尾椎没有像现代鸟类所特有的那样融合成尾综骨或棍状尾，其骨骼形态更像是虚骨类恐龙的演化分支手盗龙。研究人员据此分析，这应

该是具“新鲜”的遗骸。通过观察这件标本在光线下背面的羽毛呈栗棕色，而腹部羽毛则是白色，这种上深下浅的保护色在当今许多动物身上都可以看到。科学家们推断，这只恐龙生前全身长度只有 18.5 厘米，应该是个很萌的小家伙。在琥珀中还有两只“蚂蚁”，其实它们的名字叫作“蜂蚁”，是已经灭绝的已知最早的蚁类之一。通过这两只蚂蚁的存在，也佐证了这个样本的存在年代。这件标本来自缅甸北部，那里出产的琥珀距今约 9900 万年前，属于白垩纪中期。科研团队运用多种无损成像和分析手段对这个标本进行了研究，有多个单位的研究小组参加了这个项目。遗憾的是由于这个标本已经近 1 亿年的高龄，已经超过了 DNA 的半衰期，在现有技术条件下，还不能获得有利用价值的 DNA 片段，因此在电影《侏罗纪公园》中恐龙复活的场景目前只能暂留在人们美好的期许里，相信随着科学技术的不断进步，也许有一天恐龙复活真的会实现呢。

(博文 / 供稿)