

DOI: 10.19650/j.cnki.cjsi.J2311800

冷镜原子光钟绝对频率测量及相关跃迁研究的进展*

齐启超, 金涛楹, 彭成权, 孙常越, 徐信业

(华东师范大学精密光谱科学与技术国家重点实验室 上海 200241)

摘要:光学原子钟的稳定度和不确定度都已全面进入小数 10^{-18} 量级,是目前最精密的时间频率测量工具之一。光学原子钟已在精密测量和基础物理研究等尖端科研领域展现出潜力,并有望重新定义时间单位“秒”。镱原子光钟因其独特的能级优势而成为了目前世界上发展最成熟、研究最广泛的光钟之一。镱原子钟跃迁的绝对频率测量和镱原子相关跃迁光谱的精密测量具有重要意义。综述了冷镜原子光钟的钟跃迁 $6s^{21}S_0-6s6p^3P_0$ 能级绝对频率测量的国内外进展,并介绍以 7.3×10^{-16} 的不确定度测量镱原子钟跃迁绝对频率的实验,测量值为 $518\,295\,836\,590\,863.30\pm 0.38$ Hz。综述了利用已完成绝对频率测量的镱原子光钟为基准,对镱原子的649,770和1389 nm抽运光的对应跃迁绝对频率进行精密测量的结果。

关键词:镱原子;光学原子钟;绝对频率测量;精密光谱;精密测量

中图分类号: TH714 文献标识码: A 国家标准学科分类代码: 410.55

Advances in absolute frequency measurement and related transitions of cold Ytterbium atomic clock

Qi Qichao, Jin Taoyun, Peng Chengquan, Sun Changyue, Xu Xinye

(State Key Laboratory of Precision Spectroscopy, East China Normal University, Shanghai 200241, China)

Abstract: At present, the stability and uncertainty of optical atomic clocks have reached the level of 10^{-18} , making them the most precise time-frequency measurement tools. Optical atomic clocks demonstrate potential for advanced scientific research in precision measurements and fundamental physics, potentially redefining the unit of time “second”. Among optical clocks, ytterbium (Yb) atomic clocks stand out due to their unique energy level advantages, making them one of the most mature and extensively researched optical clock candidates worldwide. The absolute frequency measurement of the ytterbium atomic clock transition and the precise measurement of the ytterbium atomic correlation transition spectrum are essential. This article provides an overview of the domestic and international progress in absolute frequency measurement of $6s^{21}S_0-6s6p^3P_0$ clock transition of cold ytterbium atomic clocks. The experiment measures the absolute frequency of Ytterbium atomic clock transition with an uncertainty of 7.3×10^{-16} is introduced whose measured value is $518\,295\,836\,590\,863.30\pm 0.38$ Hz. Additionally, we present the results of precision absolute frequency measurements of relevant repumping transitions at 649, 770, and 1389 nm, which use the absolute-frequency-measured ytterbium atomic clocks as a reference.

Keywords: ytterbium atom; optical atomic clock; absolute frequency measurement; precision spectroscopy; precision measurement

0 引言

时间和频率是测量得最准确的物理量。在国际单位制(international system of units, SI)中,时间单位“秒”

以 ^{133}Cs 原子基态两个超精细能级无扰动时的跃迁频率 $\Delta\nu_{\text{Cs}}=9\,192\,631\,770$ Hz定义^[1]。自1967年第13届国际计量大会正式通过该“秒”定义提案以来,时间频率计量技术飞速发展,以 ^{133}Cs 原子喷泉钟(如NIST-F系列^[2]、NIM-5^[3]等)为代表的微波钟的不确定度已经接近 1×10^{-16} 量级,已经趋近其理论精度极限。

收稿日期:2023-08-14 Received Date: 2023-08-14

* 基金项目:国家自然科学基金(62105102,11134003)、国家重点研发计划项目(2016YFA0302103,2017YFF0212003,2016YFB0501601)、上海市科技重大专项(2019SHZDZX01)、上海市优秀学术带头人计划项目(12XD1402400)资助

随着激光冷却与囚禁技术的进步^[4-5]、光学频率梳的成熟^[6]和超稳激光技术的不断发展^[7-8],以光学频率波段的原子跃迁作为参考的光钟逐渐成为光频标领域的热门研究方向。目前先进光学原子钟的不稳定度和不确定度指标都已全面进入 10^{-18} 量级^[9-10],已经超越目前最好的微波钟。随着相关技术的不断进步,光钟难以连续不间断地运转的问题也在不断被突破^[11],利用光钟来重新定义时间的单位“秒”的时代很快就会到来^[12]。

中性镱原子(^{171}Yb)光频标是二级秒定义,也是新一代秒定义的候选者之一^[13]。 ^{171}Yb 原子钟跃迁的基态 $6s^2\text{S}_0$ 和激发态 $6s6p^3\text{P}_0$ 两个能级间的跃迁是自旋和偶极双重禁戒的,激发态的寿命长达20 s,因而可以获得窄线宽的钟跃迁谱线。 ^{171}Yb 原子光钟相对于其他中性原子光钟有独特的优势,由于 ^{171}Yb 原子核自旋值较小($I=1/2$),基态和激发态均有两个磁子能级,只能激发2个 π 或者2个 σ 跃迁,使得塞曼频移更易控制,能级结构更加简单。而且晶格光引起的 ^{171}Yb 原子张量光频移天然为0,非常适合用于研制高精度光钟^[14-15]。 ^{171}Yb 光晶格钟所需要的大部分激光处于可见光波段,这给实验操作上带来便利,这些激光易于通过固体激光器和光纤激光器获得,使 ^{171}Yb 原子光钟有发展为可搬运、小型化和空间光钟的潜力。 ^{171}Yb 光钟的独特优势促使世界各国都开展了相关研究,包括美国国家标准与技术研究所(National Institute of Standards and Technology, NIST)、日本国家计量院(National Metrology Institute of Japan, NMIJ)、日本理化研究所(Kagaku Kenkyusho/Institute of Physical and Chemical Research, RIKEN)、韩国标准与科学研究院(Korea Research Institute of Standards and Science, KRISS)、意大利国家计量研究所(Istituto Nazionale di Ricerca Metrologica, INRIM)等。国内主要研究单位为华东师范大学(East China Normal University, ECNU)和武汉中科院精密测量科学与技术创新研究院(Innovation Academy for Precision Measurement Science and Technology, APM)。

世界上最好的镱原子光钟的频率不稳定度为 $1.5 \times 10^{-16}/\sqrt{\tau}$,在约36 h的测量时间后达到 4.5×10^{-19} ,系统不确定度为 1.4×10^{-18} ^[10]。NIST还展示了零死时间镱原子光钟,稳定度达到了 $6 \times 10^{-17}/\sqrt{\tau}$ ^[16]。随着光学原子钟指标的提升,对时间频率的测量达到了空前的精度,以光钟为代表的光频标的发展不仅和人类生产生活息息相关,更有力地推动了尖端科学研究的发展。在相对论大地测量学^[17-20]、多体物理和量子模拟^[21-24]、基本物理常数的稳定性测量^[25-28]、引力波探测^[29-31]、暗物质探测和洛伦兹不变性检验等一些前沿研究领域光钟都展现出巨大的应用价值^[32-35]。

镱原子光钟系统已经成为推动科学技术进步的有力工具。对Yb原子的相关跃迁光谱的研究和精密测量,尤

其是578 nm钟跃迁的绝对频率测量是目前重要的一个研究课题。对Yb光钟1 389、649、770 nm等相关跃迁频率的准确测量,对于提升光钟跃迁谱的信噪比,降低光钟功耗等具有重要的意义。这些能级的准确测量也可以为相关理论计算提供更准确的参考。

本文将综述冷镱原子光钟的578 nm钟跃迁绝对频率测量的进展,并着重介绍对 ^{171}Yb 原子的1 389、649、770 nm等相关跃迁频率进行精密测量的最新结果。

1 镱原子光钟绝对频率测量概述

镱原子光钟的绝对频率测量主要通过两种方式溯源,一种是溯源到现行SI秒定义Cs原子钟,另一种是通过与其他二级秒定义光钟跃迁进行比对。光学原子钟经过多年的发展,尽管其指标已经超过微波钟,但其绝对频率测量仍然需要溯源到现行秒定义,即 ^{133}Cs 原子钟。主要原因体现在如下4个方面^[36-37]。

1) 目前SI秒的频率标准的精度最终由Cs原子钟来定义。自确立Cs原子秒定义以来,世界范围内已经建立了成熟完备的Cs标准钟网络,以支持国际间可比较的频率标准的转移,并确保各个国家的主要频率标准在一定的不确定度内一致。Cs原子频标仍是现阶段最普适的频率标准,为了确保不同原子钟的测量结果间具有可比性,光钟测量绝对频率的过程需要参考到SI秒。

2) 新一代秒定义具体选择单个原子跃迁或是几个原子跃迁的集合还没有定论。国际时间及频率咨询委员会(Consultative Committee for Time and Frequency, CCTF)于2022年最新的会议上发布了一份关于新一代秒定义的决议^[12],给出了重新定义SI秒的路线图和强制性前提条件,并且排出了时间表。决议中认为重新定义秒具体是选哪个跃迁还没有形成共识。事实上各种光钟之间处于竞争态势,因此不同原子跃迁的光钟进行绝对频率测量并向国际计量局(Bureau International Des Poids Et Mesures, BIPM)进行报数是必要的。

3) 尽管近年来基于光纤和空间光的光频标传输实验已经开展^[38-39],但是事实上,光钟的远距离比对尤其是洲际间直接比对还不成熟,而溯源到SI秒是相对容易的。

4) 溯源光钟到SI秒Cs钟可以实现长期稳定测量。在一些例如精细结构常数测量和暗物质探测的实验中,可以通过与Cs钟的频率长时间比对限制可能的线性漂移和基本常数与引力势之间可能的耦合^[36,40]。

1.1 ECNU 镱原子光钟绝对频率测量

国内目前华东师范大学的 ^{171}Yb 光钟于2020年完成绝对频率测量,通过与中国计量院(National Institute of Metrology, NIM)合作,用NIM协调世界时(UTC-NIM5)溯源到SI秒测得的绝对频率为 $518\,295\,836\,590\,863.30 \pm 0.38$ Hz,

不确定度为 7.53×10^{-16} , 并且向 CCTF 提交了冷镱原子光钟的绝对频率测量值并在同年被 CCTF 采纳^[13]。这是我国首次向国际组织成功上报的镱原子绝对频率数据, 为我国建立基于光钟的新一代时间频率计量体系奠定了技术基础, 对新一代秒定义有重要意义, 也为我国在国际上重新定义秒的问题中争得发言权和主动地位^[41]。

1) 实验装置

实验装置如图 1 所示, 分为 4 部分, 超稳钟激光系统、冷原子系统、光学频率梳系统和溯源链路系统。溯源链路如图 2 所示。

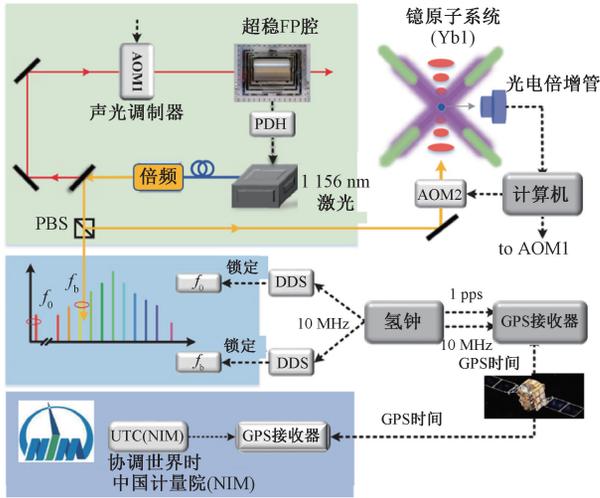


图 1 ECNU ^{171}Yb 光钟绝对频率测量装置^[41]

Fig. 1 Absolute frequency measurement schematics of ECNU ^{171}Yb optical clock^[41]

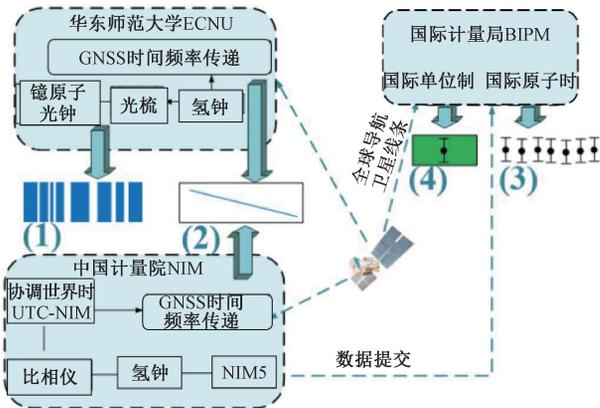


图 2 本地氢钟溯源到 SI 秒的链路^[41]

Fig. 2 The local hydrogen clock traced to SI seconds^[41]

2) 光钟跃迁系统频移项评估

获得冷镱原子光钟钟跃迁的绝对频率值, 通常需要两步校准工作, 分别是对光钟本身进行系统频移评估和对钟跃迁频率测量值进行校准。对于镱原子光钟, 系统

频移主要包括晶格光频移、碰撞频移、黑体辐射频移、塞曼频移等。

(1) 晶格光频移

两台光钟通过同步比对, 定量评估不同晶格光频率下钟跃迁频移与晶格势阱深度的关系。线性晶格光频移量为 539.1 mHz, 对应的不确定度为 8.1×10^{-17} 。根据超极化率系数评估非线性晶格光频移^[42]为 -104.9 mHz, 不确定度为 7.1×10^{-18} 。

(2) 碰撞频移

通过改变装载到光晶格中的原子数, 评估碰撞频移量为 -241.8 mHz, 对应的不确定度为 6.29×10^{-17} 。

(3) 黑体辐射频移

评估光钟的黑体辐射频移需要精确得到原子团附近的温度, 共布置了 8 个温度探头, 利用测得温度数据进行腔中心附近原子团温度的有限元仿真, 黑体辐射频移估计为 -1 263.1 mHz, 不确定度为 4.7×10^{-17} 。

(4) 塞曼频移

镱原子光钟通过双峰闭环锁定可有效抑制一阶塞曼频移^[43]。背景磁场的线性漂移对应的剩余一阶塞曼频移评估为 0.002 mHz, 不确定度 $< 1 \times 10^{-18}$ 。二阶塞曼频移项正比于磁场的平方, 评估得到二阶塞曼频移为 -77.2 ± 30.1 mHz, 对应的不确定度为 6.29×10^{-17} 。

其余频移项的频移值及不确定度都较小, 例如由钟探询光引起的 Stark 频移和由伺服反馈引起的频移等。

3) 钟跃迁频率测量值的校准

为将冷镱原子的钟跃迁最终溯源至 SI 秒, ECNU 与 NIM 之间搭建卫星链路, 获得协调世界时 (UTC-NIM) 和 ECNU 本地氢钟的相对频差, 同时 ECNU 光钟已实现闭环锁定, 可以将绝对频率测量溯源到 UTC, 并最终溯源到 SI 秒定义上。

(1) 本地测频系统不确定度的评估

将 ECNU 本地冷镱原子钟跃迁频率溯源至 SI 秒定义, 存在 4 组数据需用于绝对频率的计算, 分别是光梳参考至氢钟后, ECNU 本地钟跃迁频率的测量数据; UTC (NIM) 和本地氢钟间的校准数据; UTC-NIM 和 UTC 间的校准数据; 国际原子时 (international atomic time, TAI) 和 SI 间的校准 d 。4 组数据及其对应的时间跨度如图 3 所示, 用约化儒略日 (modified julian dates, MJD) 表示。

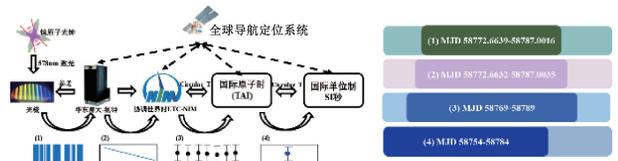


图 3 ECNU 绝对频率的溯源过程^[41]

Fig. 3 Tracing process of ECNU absolute frequency^[41]

ECNU 本地钟跃迁频率通过参考到氢钟的光梳测得,根据氢钟的噪声评估死时间对应的不确定度为 4.89×10^{-16} ,而光梳测得本地钟跃迁频率为 518 295 836 587 542.3 Hz。同步比对过程中引入的相对不稳定度为 $4.6 \times 10^{-16} \sqrt{\tau}^{[44]}$ 。

(2) 本地氢钟追溯到 TAI 传输链路的评估

在将 ECNU 本地氢钟溯源至 TAI 过程中,主要引入的不确定度项有 ECNU 本地氢钟的频率漂移,追溯到 TAI 链路的不确定度及 UTC-NIM 的不确定度。通过 UTC-NIM 对氢钟的校准,得到氢钟漂移引入的不确定度为 8.6×10^{-17} 。

根据 BIPM 发布的 Circular T,得到 UTC 和 UTC-NIM 的相对频差为 1.62×10^{-15} ,通过测量参考到 UTC-NIM 的另一台氢钟的数据并考虑该台氢钟的噪声参数,得到 UTC-NIM 的不确定度为 1.91×10^{-16} 。

(3) TAI 追溯到 SI 项评估

TAI 与 SI 的校准 d , d 为一个月的平均值,从 Circular T 中提取绝对频率测量期间的数据,算得 d 值为 -3.5×10^{-16} ,不确定度为 1.4×10^{-16} ,其中 d 为 TAI-SI 在一月内校准的平均值,UTC 的噪声参数由 BIPM 给出,评估不确定度为 2.88×10^{-16} 。

(4) 引力红移项评估

针对引力红移的评估,根据 GPS 数据测得 ^{171}Yb 原子正高水平线为 3.1 ± 0.3 m,不确定度归因于潮汐效应的动态部分偏差,最终引力红移评估为 0.18 ± 0.02 Hz。

4) ECNU 绝对频率测量结果

ECNU 绝对频率测量结果如表 1 所示,最终 ECNU ^{171}Yb 光钟通过 UTC-NIM 溯源到 SI 秒测得的绝对频率为 518 295 836 590 863.30 \pm 0.38 Hz,不确定度为 7.53×10^{-16} ,与 2017 年 CIPM 的推荐值 518 295 836 590 863.60 \pm 0.26 Hz 吻合。

1.2 镱原子光钟绝对频率测量国际进展

1) NIST

NIST 所研制的 ^{171}Yb 光学原子钟是目前国际上指标最好的 Yb 光钟^[10]。NIST 目前还在推动小型化光晶格钟的研制工作,以用于下一代的大地测量和光钟间的比对工作,为重新进行秒定义打好基础。

2009 年, NIST 成功地将 ^{171}Yb 原子囚禁到光晶格中,并评估了包括碰撞、晶格光等引起的频移,当时评估的系统不确定度在 3.4×10^{-16} ,其中最大的一项是黑体辐射(BBR)频移。他们测量的 Yb 光钟相比于 Cs 喷泉钟(NIST-F1)的钟跃迁绝对频率为 518 295 836 590 865.2 \pm 0.7 Hz^[45]。

在 2019 年 NIST 再次进行了对 $^{171}\text{Yb } ^1\text{S}_0\text{-}^3\text{P}_0$ 能级绝对频率的测量工作,并利用基于卫星的时间频率传输链路来进行溯源。本次测量的数据时间跨度达 8 个月,

表 1 ^{171}Yb 光钟绝对频率测量不确定度评估^[41]

Table 1 Uncertainty budget for the absolute frequency measurement of the clock transition in ^{171}Yb ^[41]

不确定度来源	评估项	不确定度($\times 10^{-16}$)
Yb1	系统频移	1.27
	统计不确定度	<0.01
	光钟运行死时间	4.89
光梳	光频合成	<0.01
	射频分配和合成	1.00
	计数器	0.16
本地氢钟-	氢钟的频率漂移	0.86
UTC(NIM)-	到 TAI 的链路	3.43
TAI	UTC(NIM)外推	1.91
TAI-SI	d	1.40
	TAI 外推	2.88
引力红移	—	0.39
总计	—	7.29

共有 79 次的实验数据,测得的钟跃迁绝对频率值为 518 295 836 590 863.71 \pm 0.11 Hz,相对不确定度为 2.1×10^{-16} ,这是绝对频率测量系统不确定度首次受到 SI 秒精度的限制,这也一定程度上证明了重新进行秒定义的必要性^[46]。

在 2021 年, NIST 的 Yb 光钟与美国实验天体物理联合实验室(JILA)的 Sr 光钟通过两地之间 1.5 km 的空间链路进行了比对。同时也通过光纤对 NIST 的 Yb 光钟与 Al^+ 离子钟进行比对,如图 4 所示。这项工作的创新点在于首次将基于 3 种不同原子的光钟同时进行比对,也是首次通过空间光频传输链路进行光钟比对。在将 NIST 的 Yb 钟与 JILA 的 Sr 钟进行比对时,采用了自由空间双向光频传输链路(optical two-way time frequency transfer, O-TWTFT),同时也通过光纤链路进行比对。实验结果表明 O-TWTFT 自由空间链路的性能与光纤链路相当,而相比于传统的无线传输方法精确了 1 000 倍。最终测得 $v_{\text{Yb}}/v_{\text{Sr}} = 1.207\ 507\ 039\ 343\ 337\ 848\ 2 \pm 8.2 \times 10^{-18}$, $v_{\text{Al}^+}/v_{\text{Yb}} = 2.162\ 887\ 127\ 516\ 663\ 703 \pm 1.3 \times 10^{-17}$ 。不同于以往的直接测量钟跃迁频率,测量基于不同原子的钟跃迁频率比不会受到目前国际标准的 Cs 微波钟的精度限制。基于本次工作搭建的光学时钟网络,可以用于探索物理学的前沿工作,如在更加严格的水平下测试爱因斯坦相对论,验证精细结构常数是否不变等^[38]。

2) NMIJ

2009 年, NMIJ 利用可溯源到 TAI 的协调世界时(UTC_{NMIJ})锁定光学频率梳,再用光梳对 ^{171}Yb 光钟的钟

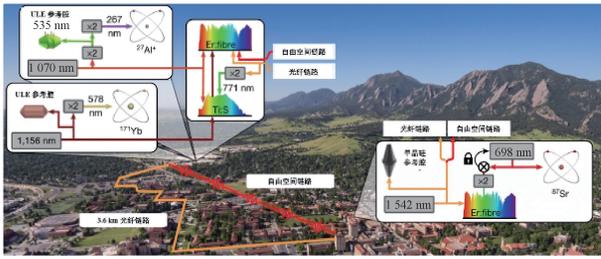


图4 NIST与JILA的光学时钟网络^[38]

Fig. 4 Atomic clock network system of NIST and JILA^[38]

激光进行测频,初步测量了¹⁷¹Yb光钟的绝对频率,测量值为 $518\,295\,836\,590\,864 \pm 28$ Hz。早期的光钟受限于钟激光线宽且没有实现归一化钟跃迁探测和闭环锁定,晶格光“魔术波长”不准确引起较大的光频移,测量不确定度较大^[47]。

NMIJ于2012年对绝对频率进行了复测,通过1 064 nm的窄线宽激光器锁定光梳,将钟激光线宽的提升到Hz量级,进一步优化晶格光频率和实现归一化探测,钟跃迁信噪比得到明显提升,溯源到SI秒后测得绝对频率为 $518\,295\,836\,590\,863.1 \pm 2$ Hz^[48]。

2020年,NMIJ报道了¹⁷¹Yb光钟长时间连续稳定运行并通过卫星链路进行绝对频率测量的结果,这台光钟在半年内(2019年9月~2020年3月)有80.3%时间在有效运转,在有效数据的前24 d平均运行覆盖率达到93.9%,后35 d平均达到92.6%,证明了光钟可长期稳定运行的潜力,并提供了丰富的光钟长期运行的细节,如图5所示。通过近半年几乎不间断地与TAI进行频率比对,与SI秒的不确定度低至小数 10^{-16} 量级,测得钟跃迁绝对频率 $518\,295\,836\,590\,863.54 \pm 0.26$ Hz^[11]。

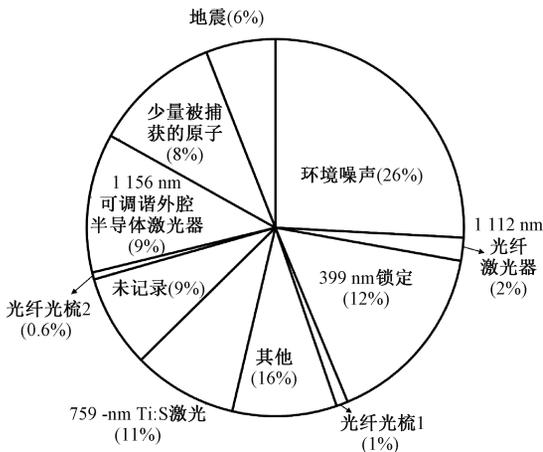


图5 NMIJ Yb光钟高覆盖率运行中断因素^[11]

Fig. 5 Distribution of interrupting events during the full campaign period operation of NMIJ Yb clock^[11]

2022年,NMIJ通过搜集和分析时间跨度为298 d(2020年11月17日~2021年9月11日)的绝对频率测量数据尝试寻找超轻量暗物质。数据分为两段,分别涵盖2020年11月17日开始的以64.4%覆盖率运行25天的数据和2021年8月2日开始的以74.5%覆盖率运行40 d的数据,总覆盖率为15.4%。研究者从NMIJ-Yb1和NMIJ-F2的长期比较数据中寻找谐波振荡信号,通过光钟的长期运行扩展了暗物质搜索的发现范围。本次公布的¹⁷¹Yb光钟的绝对频率为 $518\,295\,836\,590\,863.69 \pm 0.28$ Hz^[40]。

NMIJ在近15年的时间里不断进行¹⁷¹Yb光钟和¹³³Cs钟的频率比对并持续公布¹⁷¹Yb钟跃迁绝对频率的测量结果。通过不断优化系统的鲁棒性,证明了光钟可长期稳定运行的潜力。NMIJ的研究者认为光钟鲁棒性的提升不仅是新一代秒定义的需求,也应该有助于寻找暗物质和基本常数的变化和拓扑缺陷等。

3) RIKEN

RIKEN在¹⁷¹Yb光钟的相关研究中,通过对¹⁷¹Yb、⁸⁷Sr和¹⁹⁹Hg光钟分别进行频率比对,致力于实现小于SI秒的不确定度的钟跃迁频率测量。

2016年,他们在4个月内对¹⁷¹Yb/⁸⁷Sr频率比进行了10次测量,获得频率比 $\nu_{Yb}/\nu_{Sr} = 1.207\,507\,039\,343\,337\,749(43)$ sys(35) stat,分数不确定度 8.4×10^{-17} ^[49];于2020年测量了¹⁹⁹Hg光钟相对¹⁷¹Yb光钟的频率比, $\nu_{Hg}/\nu_{Yb} = 2.177\,473\,194\,134\,565\,07(19)$,分数不确定度为 8.8×10^{-17} ^[50]。结合2015年他们报导的 $\nu_{Hg}/\nu_{Sr} = 2.629\,314\,209\,898\,909\,60(22)$,分数不确定度 8.4×10^{-17} ^[51],以及已报导的频率比的加权平均值,实现3种晶格钟的频率闭环验证,相关的实验如图6和7所示,获得的结果为 $(\nu_{Hg}/\nu_{Yb})(\nu_{Yb}/\nu_{Sr})(\nu_{Sr}/\nu_{Hg}) - 1 = 0.4(1.3) \times 10^{-16}$,验证了光学晶格钟的频率再现性,突破了与目前国际单位制秒做比对所能达到的范围,证明仅用光钟环路可以探测超出SI限制的频率不确定度^[50]。

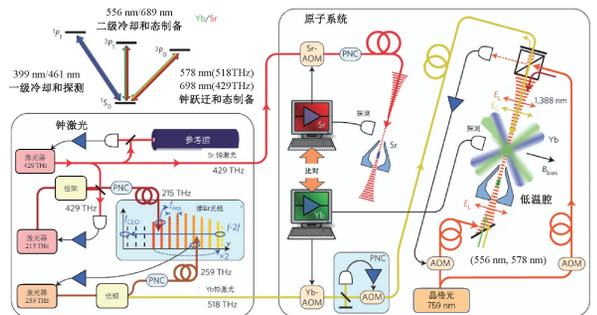


图6 RIKEN Yb/Sr频率比测量的实验装置^[49]

Fig. 6 Frequency ratio Yb/Sr scheme of RIKEN^[49]

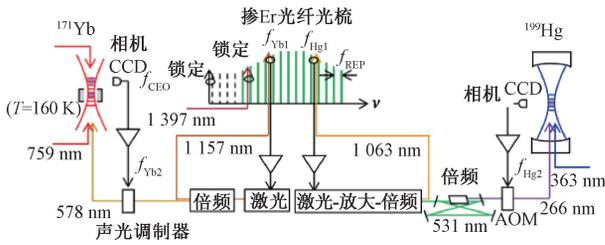


图 7 RIKEN Hg/Yb 频率比测量的实验装置^[50]

Fig. 7 Frequency ratio Hg/Yb scheme of RIKEN^[50]

4) KRISS

KRISS 于 2013 年初步测量了¹⁷¹Yb 钟跃迁的绝对频率,利用氢钟锁定光学频率梳进行频率测量,将其与地球时(TT)进行比较,得到原子钟跃迁的频率为 518 295 836 590 863.5±8.1 Hz,分数不确定度为 1.5×10⁻¹⁴,其指标受限于当时钟激光的稳定度^[52]。

2017 年他们通过溯源到 SI 测得绝对频率值 518 295 836 590 863.38±0.57 Hz,相较于之前的装置,最显著的改进在于光学晶格的功率增强腔。在持续 10 d 的测量中光钟运行时间占总测量时间的 34%。由于在降低系统不确定性方面的显著改进,结果与其 2013 年的报告的值^[52]相比,不确定度降低了 14 倍,不确定度主要来源于溯源到 TAI 的链路^[53]。

2021 年,KRISS 报导了长达 14 个月(2020 年 1 月~2021 年 2 月)的¹⁷¹Yb 钟跃迁绝对频率测量结果,如图 8 所示,有效数据总时长为 400.5 h,绝对频率为 518 295 836 590 863.75±0.14 Hz,相对频率不确定度为 2.6×10⁻¹⁶^[54]。

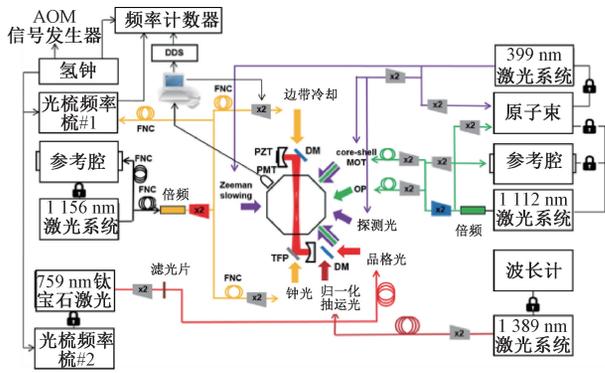


图 8 KRISS 2021 年绝对频率测量装置^[54]

Fig. 8 Absolute frequency measurement schematics of KRISS in 2021^[54]

5) INRIM

INRIM 的铯原子^[55]于 2016 年测量了¹⁷¹Yb 光钟相对于低温铯喷泉钟(ITCsF2)的绝对频率为

518 295 836 590 863.59±0.31 Hz,相对不确定度为 5.9×10⁻¹⁶。

2019 年 INRIM 开展了第 2 轮绝对频率的测量,采用图 9 所示氢钟链路(上半部分)。实验使用的 FP 腔为 ULE 材料的 10 cm 水平腔,提高了钟光性能。溯源到 SI 测得¹⁷¹Yb 光钟的绝对频率为 518 295 836 590 863.61±0.13 Hz,相对不确定度为 2.6×10⁻¹⁶。整个测量过程持续了 5 个月^[56]。

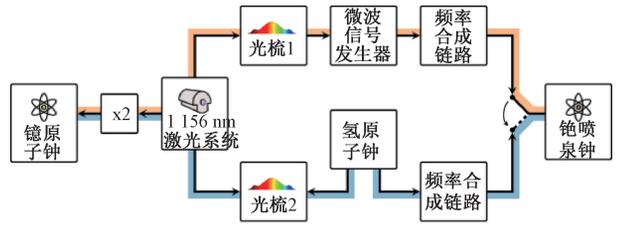


图 9 INRIM 绝对频率测量实验装置^[57]

Fig. 9 Absolute frequency measurement schematics of INRIM in 2022^[57]

2022 年再次进行了绝对频率测量工作,INRIM 改进了晶格光频移和静态 Stark 频移的评估并改用直接与 Cs 钟比对进行绝对频率测量,采用图 9 所示链路(下半部分)。通过将原本的水平光晶格变为垂直光晶格,从而能够降低光钟运行时的晶格势阱深度,有利于减少碰撞频移和降低晶格光频移;在腔体周围布置了 8 个电极评估静态 Stark 频移。IT-Yb1 相对于 ITCsF2 测量的绝对频率为 518 295 836 590 863.44±0.14 Hz,相对不确定度为 2.7×10⁻¹⁶,主要受限于低温 Cs 喷泉钟 ITCsF2 的不确定度,这是目前 Yb 和 Cs 喷泉钟比对进行绝对频率测量的最新结果,测量过程持续了 14 个月^[57]。

1.3 铯原子光钟绝对频率测量汇总

铯原子光钟绝对频率测量汇总如图 10 所示,其中阴影区域代表 CIPM ¹⁷¹Yb 钟跃迁的推荐值及不确定度,数据来源于文献[13]。

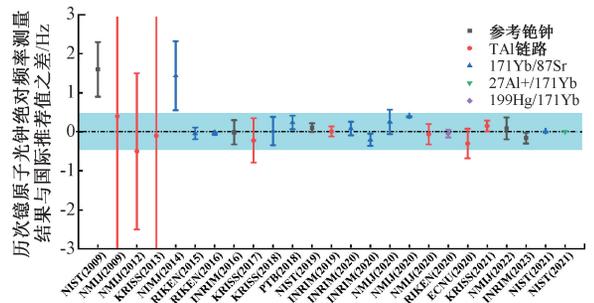


图 10 铯原子光钟绝对频率测量汇总

Fig. 10 Summary of absolute frequency measurements for ytterbium clock

2 抽运光 1 389 nm 跃迁绝对频率测量

对于 ^{171}Yb 原子 $6s6p\ ^3P_0$ 能级的超精细结构,只有 $F=1/2$ 一个能级。而对于 $5d6s\ ^3D_1$ 能级来说电子总角动量量子数 $J=1$,因此有 $F=1/2$ 和 $F=3/2$ 两个超精细能级。 ^{171}Yb 的相关能级图如图 11 所示,1 389 nm 为抽运激光。

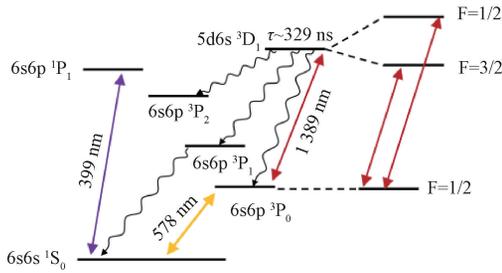


图 11 ^{171}Yb 相关能级图^[58]

Fig. 11 ^{171}Yb related energy level diagram^[58]

在跃迁过程中,由于钟跃迁激发态的寿命很长,原子被激发至 $6s6p\ ^3P_0$ 态后无法自发地快速返回基态,因此需要使用 1 389 nm 的抽运光,将 $6s6p\ ^3P_0$ 态的原子抽运至 $5d6s\ ^3D_1$ 态,帮助原子经过 $^3D_1 \rightarrow ^3P_1 \rightarrow ^3P_0 \rightarrow ^1S_0$ 通道快速返回基态^[49,59]。因此,研究其超精细结构能级分裂和相应的绝对频率对于镱原子光钟有重要意义。

2.1 ECNU 测量 1 389 nm 跃迁绝对频率

1) 实验方法

华东师范大学测量 1 389 nm 跃迁绝对频率所用到的实验装置如图 12 所示。实验中扫描 1 389 nm 激光频率,采用电子搁置法^[60]探测 1 389 nm 共振峰,获得的谱线接近自然线宽。

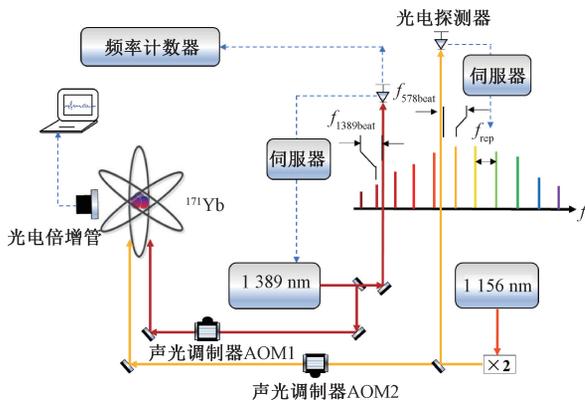


图 12 $6s6p\ ^3P_0 \rightarrow 5d6s\ ^3D_1$ 跃迁测量实验装置^[58]

Fig. 12 Diagram of $6s6p\ ^3P_0 \rightarrow 5d6s\ ^3D_1$ transition frequency measurement^[58]

2) 频移测量及不确定度评估

考虑特定原子跃迁的绝对频率时,各种系统效应引起的频移是不能忽略的。实验中,单独对晶格光功率、磁场、原子数以及 1 389 nm 光强进行改变,以测量各项频移,最终得到 $6s6p\ ^3P_0(F=1/2) \rightarrow 5d6s\ ^3D_1(F=1/2, 3/2)$ 跃迁的系统频移及其相关的不确定度如表 2 所示。

表 2 $6s6p\ ^3P_0(F=1/2) \rightarrow 5d6s\ ^3D_1(F=1/2, 3/2)$ 跃迁频移项及不确定评估表^[58]

Table 2 Frequency shift term and uncertainty evaluation table for $6s6p\ ^3P_0(F=1/2) \rightarrow 5d6s\ ^3D_1(F=1/2, 3/2)$ transition^[58]

1 389 nm	$(F=1/2 \rightarrow F=1/2)/\text{kHz}$	$(F=1/2 \rightarrow F=3/2)/\text{kHz}$
晶格光	$-1\ 170 \pm 54$	$-1\ 197 \pm 52$
一阶塞曼	72 ± 20	113 ± 17
二阶塞曼	-15 ± 3	-21 ± 3
碰撞	43 ± 28	112 ± 21
探测光	$< 1 \pm 1$	5 ± 1
总计	$-1\ 069 \pm 64$	-988 ± 59

3) 绝对频率和超精细常数

使用光梳测量激光的频率,由于 ^{171}Yb 的钟跃迁是 SI 秒的二级秒定义,通过 578 nm 激光探测的钟跃迁谱可以溯源到其绝对频率,最终结果如图 13 (a) 和 (b) 所示。

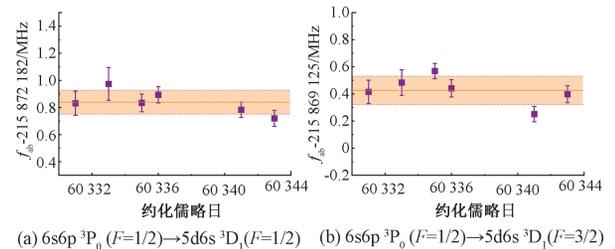


图 13 1 389 nm 绝对频率测量结果^[58]

Fig. 13 Absolute frequency measurement results at 1 389 nm^[58]

测量得到的 $6s6p\ ^3P_0(F=1/2) \rightarrow 5d6s\ ^3D_1(F=1/2)$ 跃迁的绝对频率值为 $215\ 872\ 182.84 \pm (0.09)_{\text{stat}} \pm (0.05)_{\text{sys}}$ MHz, $6s6p\ ^3P_0(F=1/2) \rightarrow 5d6s\ ^3D_1(F=3/2)$ 跃迁的绝对频率值为 $215\ 869\ 125.43 \pm (0.11)_{\text{stat}} \pm (0.05)_{\text{sys}}$ MHz。这是国际上首次报导该跃迁绝对频率测量结果。

根据两个超精细跃迁绝对频率的测量结果,可以得到 $5d6s\ ^3D_1$ 态对应的超精细分裂和磁偶极子 A 系数分别为 $3\ 057.41 \pm 0.16$ MHz 和 $-2\ 038.27 \pm 0.11$ MHz。如图 14 所示,相比以往的测量结果^[61-63],精度提升了 1 个数量级。

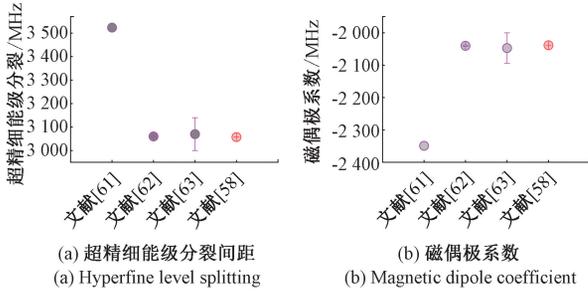


图 14 5d6s³D₁ 态磁能级分裂间距及磁偶极系数理论与实验结果比较

Fig. 14 Comparison of theoretical and experimental results on the energy level splitting and magnetic dipole coefficient of 5d6s³D₁ state magneton

2.2 5d6s³D₁ 能级跃迁研究现状

该能级超精细能级间的相对频移可以表示为:

$$\Delta\nu = \frac{\Delta E_{\text{HFS2}}}{h} = \frac{A}{2}K \quad (1)$$

式中: A 代表磁偶极系数。1999 年, Bowers 等^[62] 用 408 nm 的激光对热镱原子激发, 通过对该光谱的分析可得到同位素频移以及精细结构常数, 由此得到了磁偶极系数 A 的实验值为 $-2\,040 \pm 2$ MHz。

2012 年, Beloy 等^[63] 测量了 6s6p³P₁ 和 5d6s³D₁ 的辐射寿命, 报道了理想的 300 K 黑体环境引起的时钟偏移精度为 0.05%, 得到了磁偶极系数 A 的实验值, 结果为 $-2\,047 \pm 47$ MHz。2019 年, Kozlov 等^[61] 报道了¹⁷¹Yb 5d6s³D₁ 态磁偶极系数 A 的理论值, 为 $-2\,349$ MHz。

2023 年, Ai 等^[58] 也报道了基于冷镱原子光钟测量的磁偶极系数 A 的实验值, 结果为 $-2\,038.27 \pm 0.11$ MHz 同时华东师范大学在国际上首次报道 6s6p³P₀ ($F=1/2$) \rightarrow 5d6s³D₁ ($F=1/2, 3/2$) 的绝对频率分别为 $215\,872\,182.84 \pm (0.09)_{\text{stat}} \pm (0.05)_{\text{sys}}$ MHz 和 $215\,869\,125.43 \pm (0.11)_{\text{stat}} \pm (0.05)_{\text{sys}}$ MHz。

3 抽运光 649 nm 跃迁绝对频率测量

3.1 相关能级研究现状

近年来, 冷镱原子在光学原子钟^[10,43,49]、宇称守恒^[64-65]及量子简并气体^[66-67]研究中引起了广泛的关注。原子光钟的钟激发态为亚稳态, 其寿命通常在秒量级以上, 短时间难以通过自发辐射落回到基态以进行探测。为了获得归一化钟跃迁谱, 实验上一般需要借助另一束激光将钟激发态的原子泵浦回到基态后进行荧光探测。精确的测量泵浦光的频率, 可以提高泵浦的效率, 即使在较小的泵浦光功率下也可以获得较高钟跃迁谱的激发率

和信噪比, 对小型化的可搬运光钟及空间光钟等的发展提供重要的支持。此外, 同位素频移和超精细常数的精确测量可以为原子结构理论提供检验。

6s6p³P₀-6s7s³S₁ 跃迁可以用作¹⁷¹Yb 原子光钟系统中的泵浦跃迁, 跃迁的波长约 649 nm, 自然线宽约 1.5 MHz。早期在空心阴极灯 (hollow cathode lamp, HCL) 中通过饱和吸收谱或光电流光谱对 649 nm 跃迁的同位素频移和超精细结构进行了研究^[68-69], 其中频率通过法布里-珀罗 (FP) 干涉仪进行校准。2008 年, Yanaguchi^[70] 在 HCL 中通过饱和吸收谱实验测量获得 649 nm 跃迁的频率。649 nm 共振跃迁频率由光梳测量, 光梳锁定在商用铷 (Rb) 频标上。实验获得了 Yb 各同位素 649 nm 跃迁的频率及费米同位素超精细分裂间距, 误差在几十兆赫兹量级。早期的实验结果缺乏对系统频移及误差的充分讨论, 测量精度较低。

2020 年, Zhou 等^[71] 在 HCL 中, 对中性 Yb 同位素的 6s6p³P₀-6s7s³S₁ 跃迁的调制转移光谱 (modulation transfer spectroscopy, MTS) 进行了研究并对跃迁频率进行了测量, 如图 15 所示。

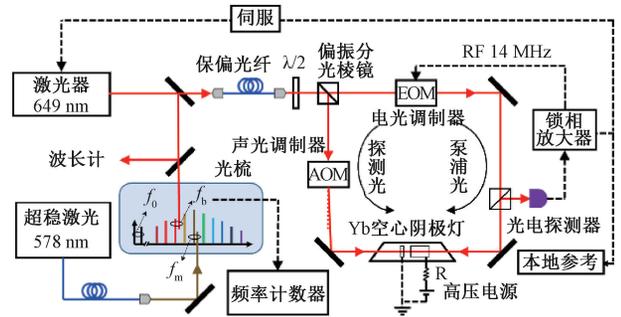


图 15 调制转移光谱测量 649 nm 跃迁频率装置示意图^[71]

Fig. 15 Diagram of modulation transfer spectrum measurement device for 649 nm transition frequency^[71]

实验获得了 Yb 649 nm 跃迁的 MTS, 除了低丰度的¹⁶⁸Yb 同位素, MTS 可以分辨剩余的所有 649 nm 同位素跃迁, 产生具有较高的信噪比的色散信号。通过 MTS 将 649 nm 激光锁定, 锁定后 649 nm 激光通过光梳进行测量, 光梳以及其他的射频信号都参考于氢钟。实验对各同位素锁定激光的频率进行了测量并对系统频移进行了评估。

649 nm 跃迁测量的各项系统频移及相应的不确定度如表 3 所示, 总的不确定度在 MHz 量级, 各同位素及超精细跃迁的绝对频率结果如表 4 所示。

根据测量结果, 给出了镱原子费米同位素的 6s7s³S₁ 态的超精细分裂间隔及超精细结构系数结果如图 16 所示。

表3 649 nm 跃迁 MTS 测量的各项系统频移及不确定度^[71]

Table 3 The system frequency shifts and uncertainties of 649 nm transition MTS measurement^[71]

649 nm	频移/MHz	不确定度/MHz
压力频移	-14.0	3.2
探测光	0.13	0.04
空心阴极灯电流	3.59	0.09
剩余幅度调制	-0.12	0.08
锁定偏置	0	0.08
总计	-10.4	3.2

表4 各同位素超精细跃迁的绝对频率^[71]

Table 4 Absolute frequency of hyperfine transition of each isotope^[71]

同位素及超精细跃迁	中心频率/MHz
¹⁷¹ Yb(1/2-1/2)	461 861 338.1
¹⁷³ Yb(5/2-7/2)	461 863 970.9
¹⁷⁰ Yb	461 867 981.9
¹⁷² Yb	461 868 512.3
¹⁷⁴ Yb	461 868 929.9
¹⁷⁶ Yb	461 869 328.3
¹⁷³ Yb(5/2-5/2)	461 870 590.3
¹⁷¹ Yb(1/2-3/2)	461 871 594.9
¹⁷³ Yb(5/2-3/2)	461 875 319.7

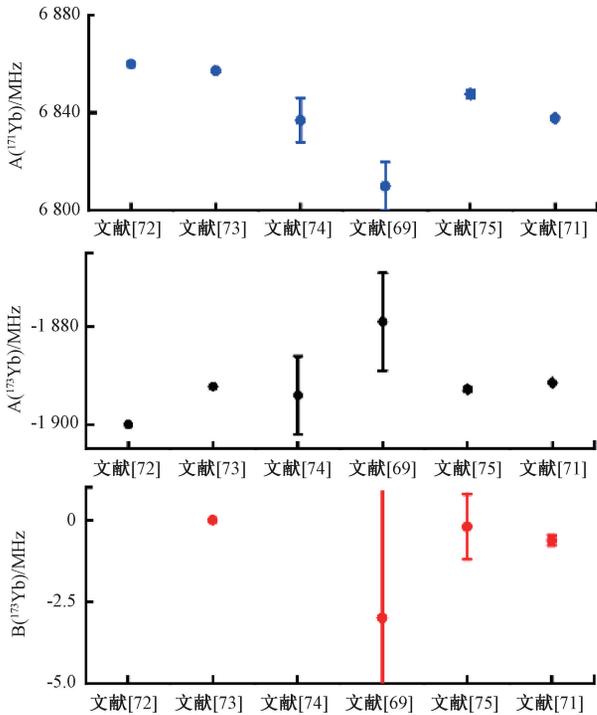


图16 649 nm 跃迁超精细结构系数

Fig. 16 Hyperfine structure coefficient of 649 nm Transition

3.2 ECNU 649 nm 跃迁测量

在以上的报道中,对于 649 nm 跃迁的测量都是在热原子系统中进行,2022 年, Qiao 等^[76]利用囚禁在光晶格中的冷¹⁷¹Yb 原子对 649 nm 跃迁谱线的绝对频率进行了测量。与饱和吸收谱、调制转移光谱等测量原子频率的方法相比,囚禁在光晶格中的冷原子,多普勒频移引起的展宽受到极大抑制,测量精度可以明显的提升。

实验中,649 nm 激光频率锁定在光梳上,光梳参考在锁定于 30 cm FP 腔^[44]上的 578 nm 钟激光上。通过声光调制器 AOM 对抽运光进行扫频,利用归一化的探测方法,获得 649 nm 跃迁谱线。实验装置如图 17 所示。

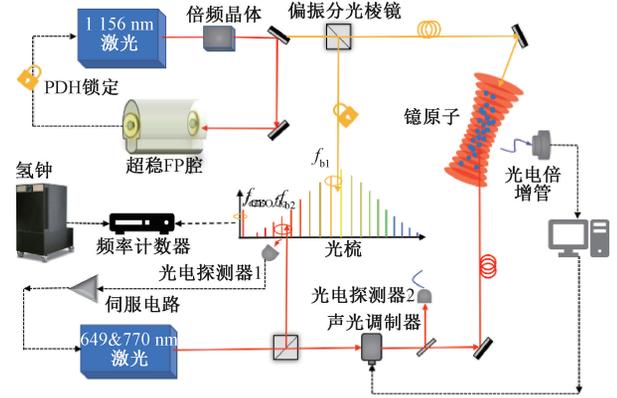


图17 649&770 nm 测频实验示意图^[76]

Fig. 17 Diagram of 649&770 nm frequency measurement experiment^[76]

实验对主要的频移项进行了测量评估,各项频移值及对应的不确定度如表 5 所示,其他的频移项可以忽略。

表5 649 nm 超精细能级跃迁的系统频移项和相应的不确定性^[76]

Table 5 System frequency shift terms and corresponding uncertainties for 649 nm hyperfine level transitions^[76]

649 nm 跃迁	$F=1/2-F=1/2$ /MHz	$F=1/2-F=3/2$ /MHz
晶格光	-5.20±0.15	-6.09±0.12
探测光	-0.01±0.01	0.10±0.02
碰撞	0.44±0.09	0.39±0.16
塞曼	<0.01±(<0.01)	
统计	0±0.11	0±0.24
总计	-4.77±0.21	-5.60±0.31

649 nm 激光频率通过光梳测量,并将测量结果溯源到¹⁷¹Yb 光钟 $1S_0-3P_0$ 绝对频率值,根据该跃迁能级的系统频移值,计算得到 649 nm 各个超精细能级跃迁的绝对频率,649 nm 跃迁的绝对频率值相较之前 MTS 实验^[71]测

得的结果在精度上具有 1 个数量级的提升,如表 6 所示。根据实验测得的 649 nm 跃迁的两个超精细能级跃迁频率差,即 $6s7s\ ^3S_1$ 的分裂间隔,可以计算得到相应的 $6s7s\ ^3S_1$ 超精细结构常数,与之前 MTS 实验测得的结果相符,精度更高,结果如图 18 所示。

表 6 649nm 超精细能级跃迁的绝对频率值^[76]

Table 6 Absolute frequency values of 649 nm hyperfine level transitions^[76]

跃迁	基态	激发态	频率/MHz	文献
649 nm ($^3P_0-^3S_1$)	$F=1/2$	$F=1/2$	461 861 338.1±3.2	[71]
		$F=3/2$	461 871 594.9±3.2	
		$F=1/2$	461 861 338.03±0.21	[76]
		$F=3/2$	461 871 596.07±0.31	

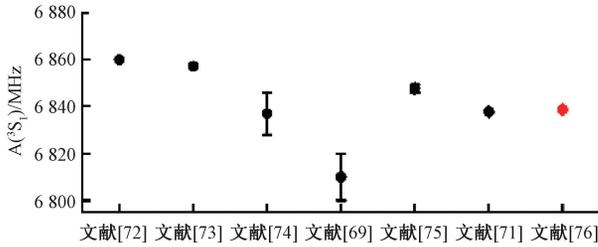


图 18 $6s7s\ ^3S_1$ 能级超精细结构常数比较

Fig. 18 Comparison of Hyperfine structure constants of $6s7s\ ^3S_1$ energy levels

4 抽运光 770 nm 跃迁绝对频率测量

4.1 ECNU 770 nm 跃迁测量实验

1) 实验原理和装置

镱原子中 $6s6p\ ^3P_2-6s7s\ ^3S_1$ 770 nm 可用于钟跃迁 $6s2\ ^1S_0-6s6p\ ^3P_0$ 578 nm 钟光与 $6s6p\ ^3P_0\ 6s7s\ ^3S_1$ 649 nm 组合作为抽运光,实现归一化钟跃迁谱的探测,精确测量抽运光的频率可以提高整个泵浦过程的效率,提高钟跃迁谱的激发率和信噪比。

$6s6p\ ^3P_2$ 和 $6s7s\ ^3S_1$ 分别有 2 个超精细结构如图 19 所示。由于跃迁选择定则,要探测基态至激发态跃迁,需相应匹配设置 $6s6p\ ^3P_0-6s7s\ ^3S_1$ 649 nm 超精细跃迁以获得最大抽运效率。

实验中选择合适的波长将 770 nm 激光锁定在相应跃迁频率附近的光梳梳齿上获得稳频激光,锁定后 770 nm 激光频率漂移在亚千赫兹量级远小于待测的 $^3P_2-^3S_1$ 跃迁 5.9 MHz,满足对 $6s6p\ ^3P_2\ 6s7s\ ^3S_1$ 的测量要求,利用电子搁置法探测 770 nm 跃迁谱线,实验装置如图 17 所示。

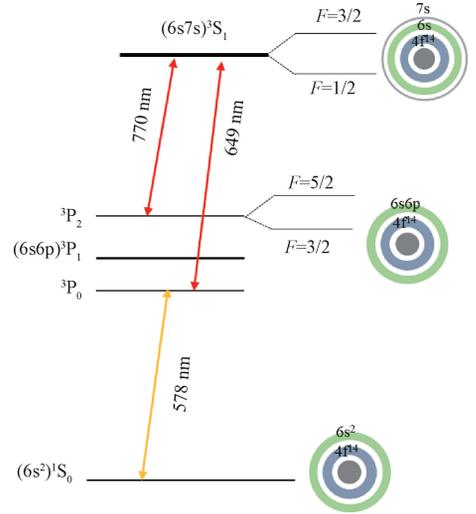


图 19 ^{171}Yb 中关于 770 nm 超精细能级跃迁简图

Fig. 19 Hyperfine structure of 770 nm transition in ^{171}Yb

2) 系统频移项的评估和绝对频率

在探测原子跃迁谱线过程,原子会受到各种物理效应的影响,导致能级发生移动。为了准确获得跃迁频率的大小,需要对各项因素造成的影响进行测量和评估,其中主要包括晶格光频移,探测光频移,塞曼频移和碰撞频移等。实验中,通过改变晶格光波长和晶格光功率可以评估晶格光频移,改变 770 nm 探测光获得探测光频移。在原子被探测时,由于背景磁场的存在会引起 Zeeman 频移,测量谱线中心位置情况,随后,反向偏置磁场进行同样扫谱获得新的谱线中心频率,将两频率平均后可消除一阶 Zeeman 效应的影响。实验中保持晶格光功率不变,通过调节 Zeeman 光功率可改变晶格光原子数评估碰撞频移。

对于一些其他频移项,如光纤链路引起的光纤相位噪声,探测光与晶格光非零夹角导致剩余多普勒频移,黑体辐射,探测光功率起伏等引起的系统频移量,对于目前的测量精度其大小和不确定度均可忽略不计。对于 770 nm 跃迁主要频移项和相应不确定度如表 7 所示。

表 7 770 nm 超精细能级跃迁的系统频移项和对应不确定度^[76]

Table 7 The frequency shifts and their associated uncertainties for the 770 nm transition^[76]

770 nm 跃迁	$F=3/2-F=1/2$ /MHz	$F=3/2-F=3/2$ /MHz	$F=5/2-F=3/2$ /MHz
晶格光	7.80±0.58	9.12±0.01	6.75±0.75
探测光	-0.02±0.05	-0.26±0.02	-0.22±0.05
碰撞	0.03±0.17	-0.07±0.17	0.04±0.20
塞曼	<0.01±(<0.01)		
统计	0±0.24	0±0.32	0±0.44
总计	7.81±0.65	8.79±0.37	6.57±0.89

通过光梳测量 770 nm 激光频率,并将测量结果溯源至 ^{171}Yb 光钟 $^1\text{S}_0\text{-}^3\text{P}_0$ 钟跃迁的绝对频率如表 8 所示,该跃迁绝对频率值为在实验上首次在冷原子上实现精密测量。

表 8 770 nm 跃迁绝对频率^[76]

Table 8 Absolute frequency of 770 nm transition^[76]

跃迁	$6s6p\ ^3\text{P}_2$	$6s7s\ ^3\text{S}_1$	绝对频率/MHz
770 nm	$F=3/2$	$F=1/2$	$389\ 257\ 019.71\pm 0.65$
	$F=3/2$	$F=3/2$	$389\ 267\ 277.10\pm 0.37$
	$F=5/2$	$F=3/2$	$389\ 260\ 569.95\pm 0.89$

3) 超精细结构常数计算

对于 ^{171}Yb 原子,其核自旋 $I=1/2$,存在超精细能级分裂,相对不受干扰时的能级频移大小可表示为^[77]:

$$\nu_{\text{HFS}} = \frac{1}{2}A[F(F+1) - I(I+1) - J(J+1)] \quad (2)$$

式中: A 为磁偶极常数; F 为原子总角动量量子数; I 为核自旋角量子数; J 为电子总角动量量子数。对于 $6s6p\ ^3\text{P}_2$ 能级, $J=2$, $I=1/2$, $F=3/2$ 和 $5/2$,其超精细能级频改写为:

$$\Delta\nu = \nu_{\text{HFS}}\left(F = \frac{5}{2}\right) - \nu_{\text{HFS}}\left(F = \frac{3}{2}\right) = \frac{5}{2}A \quad (3)$$

根据实验测得各超精细能级跃迁频率,可以计算得到 $^3\text{P}_2$ 分裂间隔为 $6\ 707.15\pm 0.96$ MHz,相应超精细结构常数为 $2\ 682.86\pm 0.38$ MHz,相比以往结果^[78],由于采用冷原子测量可降低碰撞频移获得更小不确定度的测量结果,如图 20 所示。

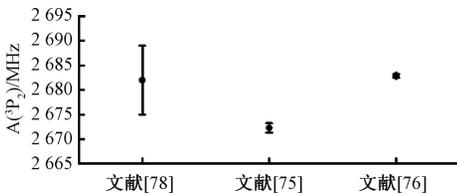


图 20 $6s6p\ ^3\text{P}_2$ 能级超精细结构常数比较

Fig. 20 Summary of the hyperfine constants A for the $^3\text{P}_2$ line in ^{171}Yb

4.2 770 nm 跃迁研究现状

各国也有多个小组对于 ^{171}Yb 原子的 $6s6p\ ^3\text{P}_2 \rightarrow 6s7s\ ^3\text{S}_1$ 的跃迁频率和能级的超精细结构常数进行了测量。Yamaguchi^[70]利用饱和吸收光谱锁定 770 nm 激光并使用光学频率梳测得 $^3\text{P}_2 \rightarrow ^3\text{S}_1$ 跃迁 ^{171}Yb 的跃迁频率为 $389\ 259.690\pm 0.23$ GHz。Wakui 等^[75]使用可调谐二极管激光器以及准直的原子束对 Yb 等稀有元素进行了高分

辨率光谱测量,测得 $^{171}\text{Yb}\ ^3\text{P}_2$ 态的超精细结构 A 系数为 $2\ 672.27\pm 0.95$ MHz, $^{171}\text{Yb}\ ^3\text{S}_1$ 态的超精细结构 A 系数为 $6\ 847.7\pm 0.17$ MHz。Maier 等^[78]使用连续单模可调谐染料激光器测得 $^{171}\text{Yb}\ ^3\text{P}_2$ 态的超精细结构 A 系数为 $2\ 682\pm 0.7$ MHz。Schulz 等^[74]利用共线几何中的共振电离光谱测得 $^{171}\text{Yb}\ ^3\text{S}_1$ 态的超精细结构 A 系数为 $6\ 837\pm 0.9$ MHz。Berends 等^[69]使用无多普勒饱和吸收激光光谱测得 $^{171}\text{Yb}\ ^3\text{S}_1$ 态的超精细结构 A 系数为 $6\ 810\pm 0.10$ MHz。Zhou 等^[71]2020 年利用调制转移光谱测得 ^{171}Yb 的 $^3\text{S}_1$ 态超精细结构 A 系数为 $6\ 837.83\pm 0.19$ MHz,2023 年 Qiao 等^[79]用调制转移光谱测得 Yb 原子各同位素的 $6s6p\ ^3\text{P}_2\text{-}6s7s\ ^3\text{S}_1$ 跃迁的绝对频率,并由此计算得到 ^{171}Yb 的 $^3\text{S}_1$ 态超精细结构常数为 $6\ 838.5\pm 0.1$ MHz。

5 结 论

本文综述了镱原子光钟的钟跃迁绝对频率测量的国内外进展,回顾了国内外各个团队逐步提升绝对频率测量精度的历程,并着重介绍了华东师范大学的镱原子绝对频率测量实验。

镱原子光钟的绝对频率测量主要通过两种方式溯源,一种是溯源到现行 SI 秒定义 Cs 原子钟,其中一些单位的绝对测量结果已经受限于 Cs 原子钟的指标;另一种是通过与其他二级秒定义光钟跃迁进行比对,目前已有美国和日本的两个团队实现了闭环测量,且结果已超越 Cs 原子钟指标的限制。绝对频率的测量要求光钟实现高覆盖率的稳定运行,促进了光钟的鲁棒性不断提升。光钟持续稳定输出频率值的实现并不断与现行 SI 秒比对是新一代秒定义的前置条件之一,也是光钟应用于精密测量和探索新物理现象的需求。

镱原子光钟作为二级秒定义,对其相关能级进行精密测量是必要的,基于已完成绝对频率测量的光钟,可以对其他跃迁频率进行精密测量和溯源。对 Yb 光钟 1 389、649、770 nm 等相关跃迁频率的准确测量,对于提升光钟跃迁谱的信噪比,降低光钟功耗等具有现实意义,这些能级的准确测量也可以为相关理论计算提供更准确的参考。基于本团队近期的相关工作,综述和梳理了目前这些跃迁的研究进展。

致谢

感谢中国计量科学研究院(NIM)在镱原子光钟绝对频率测量工作中予以的帮助。

参考文献

[1] RIEHLE F, GILL P, ARIAS F, et al. The CIPM list of

- recommended frequency standard values: guidelines and procedures[J]. *Metrologia*, 2018, 55(2): 188.
- [2] LOMBARDI M A, HEAVNER T P, JEFFERTS S R. NIST primary frequency standards and the realization of the SI second [J]. *NCSLI Measure*, 2007, 2 (4) : 74-89.
- [3] FANG F, LI M, LIN P, et al. NIM5 Cs fountain clock and its evaluation[J]. *Metrologia*, 2015, 52(4): 454.
- [4] KIM K, AEPPLI A, BOTHWELL T, et al. Evaluation of lattice light shift at low 10^{-19} uncertainty for a shallow lattice sr optical clock [J]. *Physical Review Letters*, 2023, 130(11): 113203.
- [5] USHIJIMA I, TAKAMOTO M, KATORI H. Operational magic intensity for Sr optical lattice clocks[J]. *Physical Review Letters*, 2018, 121(26): 263202.
- [6] FORTIER T, BAUMANN E. 20 years of developments in optical frequency comb technology and applications[J]. *Communications Physics*, 2019, 2(1): 153.
- [7] MATEI D G, LEGERO T, HÄFNER S, et al. 1.5 μm lasers with Sub-10 mHz linewidth[J]. *Physical Review Letters*, 2017, 118(26): 263202.
- [8] SEBASTIAN H F, STEPHAN F, CHRISTIAN G, et al. 8×10^{-17} fractional laser frequency instability with a long room-temperature cavity [J]. *Optics Letters*, 2015, 40(9): 2112-2115.
- [9] OELKER E, HUTSON R, KENNEDY C, et al. Demonstration of 4.8×10^{-17} stability at 1 s for two independent optical clocks[J]. *Nature Photonics*, 2019, 13:714-719.
- [10] MCGREW W F, ZHANG X, FASANO R J, et al. Atomic clock performance enabling geodesy below the centimetre level [J]. *Nature*, 2018, 564 (7734) : 87-90.
- [11] KOBAYASHI T, AKAMATSU D, HOSAKA K, et al. Demonstration of the nearly continuous operation of an ^{171}Yb optical lattice clock for half a year[J]. *Metrologia*, 2020, 57(6): 065021.
- [12] DIMARCQ N, GERTSVOLF M, MILETI G, et al. Roadmap towards the redefinition of the second [J]. *Physics*, 2023, DOI:10.48550/arXiv.2307.14141.
- [13] Recommended values of standard frequencies for applications including the practical realization of the metre and secondary representations of the definition of the second. (https://webtai.bipm.org/ftp/pub/tai/publication/wgfs/MeasurInput_2021).
- [14] PORSEV S G, DEREVIANKO A. Hyperfine quenching of the metastable $^3\text{P}_{0,2}$ states in divalent atoms [J]. *Physical Review A*, 2004, 69(4): 042506.
- [15] PORSEV S G, DEREVIANKO A, FORTSON E N. Possibility of an optical clock using the $6^1\text{S}_0 \rightarrow 6^3\text{P}_0^o$ transition in $^{171,173}\text{Yb}$ atoms held in an optical lattice[J]. *Physical Review A*, 2004, 69(2): 021403.
- [16] SCHIOPPO M, BROWN R C, MCGREW W F, et al. Ultrastable optical clock with two cold-atom ensembles[J]. *Nat Photonics*, 2017, 11(1): 48-52.
- [17] BOTHWELL T, KENNEDY C J, AEPPLI A, et al. Resolving the gravitational redshift across a millimetre-scale atomic sample [J]. *Nature*, 2022, 602 (7897) : 420-424.
- [18] MEHLSTÄUBLER T E, GROSCHE G, LISDAT C, et al. Atomic clocks for geodesy [J]. *Reports on Progress in Physics*, 2018, 81(6): 064401.
- [19] GROTTI J, KOLLER S, VOGT S, et al. Geodesy and metrology with a transportable optical clock [J]. *Nature Physics*, 2018, 14(5): 437-441.
- [20] TAKAMOTO M, USHIJIMA I, OHMAE N, et al. Test of general relativity by a pair of transportable optical lattice clocks [J]. *Nat Photonics*, 2020, 14 (7) : 411-415.
- [21] OZAWA H, TAIE S, TAKASU Y, et al. Antiferromagnetic spin correlation of $\text{SU}(N)$ Fermi gas in an optical superlattice[J]. *Physical Review Letters*, 2018, 121(22): 225303.
- [22] SCHINE N, YOUNG A W, ECKNER W J, et al. Long-lived bell states in an array of optical clock qubits[J]. *Nature Physics*, 2022, 18(9): 1067-1073.
- [23] SONDERHOUSE L, SANNER C, HUTSON R B, et al. Thermodynamics of a deeply degenerate $\text{SU}(N)$ -symmetric Fermi gas [J]. *Nature Physics*, 2020, 16(12): 1216-1221.
- [24] SCHÄFER F, FUKUHARA T, SUGAWA S, et al. Tools for quantum simulation with ultracold atoms in optical lattices [J]. *Nature Reviews Physics*, 2020, 2 (8) : 411-425.
- [25] GODUN R M, NISBET-JONES P B R, JONES J M, et al. Frequency ratio of two optical clock transitions in ^{171}Yb and constraints on the time-variation of fundamental constants [J]. *Physical Review Letters*, 2014, 113(21): 210801.
- [26] LANGE R, HUNTEMANN N, RAHM J M, et al.

- Improved limits for violations of local position invariance from atomic clock comparisons [J]. *Physical Review Letters*, 2021, 126(1): 011102.
- [27] BLATT S, LUDLOW A D, CAMPBELL G K, et al. New limits on coupling of fundamental constants to gravity using ^{87}Sr optical lattice clocks [J]. *Physical Review Letters*, 2008, 100(14): 140801.
- [28] SCHILLER S. Hydrogenlike highly charged ions for tests of the time independence of fundamental constants [J]. *Physical Review Letters*, 2007, 98(18): 180801.
- [29] KOLKOWITZ S, PIKOVSKI I, LANGELLIER N, et al. Gravitational wave detection with optical lattice atomic clocks [J]. *Physical Review D*, 2016, 94(12): 124043.
- [30] YU N, TINTO M. Gravitational wave detection with single-laser atom interferometers [J]. *General Relativity and Gravitation*, 2011, 43(7): 1943-1952.
- [31] GRAHAM P W, HOGAN J M, KASEVICH M A, et al. New method for gravitational wave detection with atomic sensors [J]. *Physical Review Letters*, 2013, 110(17): 171102.
- [32] SANNER C, HUNTEMANN N, LANGE R, et al. Optical clock comparison for Lorentz symmetry testing [J]. *Nature*, 2019, 567(7747): 204-208.
- [33] PIHAN-LE BARS H, GUERLIN C, LASSERI R D, et al. Lorentz-symmetry test at Planck-scale suppression with nucleons in a spin-polarized ^{133}Cs cold atom clock [J]. *Physical Review D*, 2017, 95(7): 075026.
- [34] DEREVIANKO A, POSPELOV M. Hunting for topological dark matter with atomic clocks [J]. *Nature Physics*, 2014, 10(12): 933-936.
- [35] ROBERTS B M, BLEWITT G, DAILEY C, et al. Search for domain wall dark matter with atomic clocks on board global positioning system satellites [J]. *Nature Communications*, 2017, 8(1): 1195.
- [36] CAMPBELL G K, LUDLOW A D, BLATT S, et al. The absolute frequency of the ^{87}Sr optical clock transition [J]. *Metrologia*, 2008, 45(5): 539.
- [37] GILL P. Is the time right for a redefinition of the second by optical atomic clocks? [J]. *Journal of Physics: Conference Series*, 2016, 723(1): 012053.
- [38] BELOY K, BODINE M I, BOTHWELL T, et al. Frequency ratio measurements at 18-digit accuracy using an optical clock network [J]. *Nature*, 2021, 591(7851): 564-569.
- [39] SHEN Q, GUAN J Y, REN J G, et al. Free-space dissemination of time and frequency with 10^{-19} instability over 113 km [J]. *Nature*, 2022, 610(7933): 661-666.
- [40] KOBAYASHI T, TAKAMIZAWA A, AKAMATSU D, et al. Search for ultralight dark matter from long-term frequency comparisons of optical and microwave atomic clocks [J]. *Physical Review Letters*, 2022, 129(24): 241301.
- [41] LUO L, QIAO H, AI D, et al. Absolute frequency measurement of an Yb optical clock at the 10^{-16} level using International Atomic Time [J]. *Metrologia*, 2020, 57(6): 065017.
- [42] BROWN R C, PHILLIPS N B, BELOY K, et al. Hyperpolarizability and operational magic wavelength in an optical lattice clock [J]. *Physical Review Letters*, 2017, 119(25): 253001.
- [43] GAO Q, ZHOU M, HAN C, et al. Systematic evaluation of a ^{171}Yb optical clock by synchronous comparison between two lattice systems [J]. *Scientific Reports*, 2018, 8(1): 8022.
- [44] AI D, QIAO H, ZHANG S, et al. Study of optical clocks based on ultracold ^{171}Yb atoms [J]. *Chinese Physics B*, 2020, 29(9): 090601.
- [45] LEMKE N D, LUDLOW A D, BARBER Z W, et al. Spin-1/2 optical lattice clock [J]. *Physical Review Letters*, 2009, 103(6): 063001.
- [46] MCGREW W F, ZHANG X, LEOPARDI H, et al. Towards the optical second: verifying optical clocks at the SI limit [J]. *Optica*, 2019, 6(4): 448-454.
- [47] KOHNO T, YASUDA M, HOSAKA K, et al. One-dimensional optical lattice clock with a Fermionic ^{171}Yb isotope [J]. *Applied Physics Express*, 2009, 2(7): 072501.
- [48] YASUDA M, INABA H, KOHNO T, et al. Improved absolute frequency measurement of the ^{171}Yb optical lattice clock towards a candidate for the redefinition of the second [J]. *Applied Physics Express*, 2012, 5(10): 102401.
- [49] NEMITZ N, OHKUBO T, TAKAMOTO M, et al. Frequency ratio of Yb and Sr clocks with 5×10^{-17} uncertainty at 150 seconds averaging time [J]. *Nat Photonics*, 2016, 10(4): 258-261.
- [50] OHMAE N, BREGOLIN F, NEMITZ N, et al. Direct measurement of the frequency ratio for Hg and Yb optical lattice clocks and closure of the Hg/Yb/Sr loop [J]. *Optics Express*, 2020, 28(10): 15112-15121.

- [51] YAMANAKA K, OHMAE N, USHIJIMA I, et al. Frequency ratio of ^{199}Hg and ^{87}Sr optical lattice clocks beyond the SI limit[J]. *Physical Review Letters*, 2015, 114(23): 230801.
- [52] PARK C Y, YU D H, LEE W K, et al. Absolute frequency measurement of $^1\text{S}_0(F=1/2)\text{-}^3\text{P}_0(F=1/2)$ transition of ^{171}Yb atoms in a one-dimensional optical lattice at KRISS[J]. *Metrologia*, 2013, 50(2): 119.
- [53] KIM H, HEO M S, LEE W K, et al. Improved absolute frequency measurement of the ^{171}Yb optical lattice clock at KRISS relative to the SI second[J]. *Japanese Journal of Applied Physics*, 2017, 56(5): 050302.
- [54] KIM H, HEO M S, PARK C Y, et al. Absolute frequency measurement of the ^{171}Yb optical lattice clock at KRISS using TAI for over a year[J]. *Metrologia*, 2021, 58(5): 055007.
- [55] PIZZOCARO M, THOUMANY P, RAUF B, et al. Absolute frequency measurement of the-transition of ^{171}Yb [J]. *Metrologia*, 2017, 54(1): 102.
- [56] PIZZOCARO M, BREGOLIN F, BARBIERI P, et al. Absolute frequency measurement of the $^1\text{S}_0\text{-}^3\text{P}_0$ transition of ^{171}Yb with a link to international atomic time[J]. *Metrologia*, 2020, 57(3): 035007.
- [57] GOTI I, CONDIO S, CLIVATI C, et al. Absolute frequency measurement of a Yb optical clock at the limit of the Cs fountain[J]. *Metrologia*, 2023, 60(3): 035002.
- [58] AI D, JIN T, ZHANG T, et al. Absolute frequency measurement of the $6s6p\ ^3\text{P}_0\rightarrow 5d6s\ ^3\text{D}_1$ transition based on ultracold ytterbium atoms[J]. *Physical Review A*, 2023, 107(6): 063107.
- [59] HINKLEY N, SHERMAN J A, PHILLIPS N B, et al. An atomic clock with $10(-18)$ instability[J]. *Science*, 2013, 341(6151): 1215-1218.
- [60] NAGOURNEY W, SANDBERG J, DEHMELT H. Shelved optical electron amplifier-Observation of quantum jumps[J]. *Physical Review Letters*, 1986, 56(26): 2797-2799.
- [61] KOZLOV M G, DZUBA V A, FLAMBAUM V V. Hyperfine-induced transitions $^1\text{S}_0\text{-}^3\text{D}_1$ in Yb [J]. *Physical Review A*, 2019, 99(1).
- [62] BOWERS C J, BUDKER D, FREEDMAN S J, et al. Experimental investigation of the $6s^{21}\text{S}_0\rightarrow 5d6s^3\text{D}_{1,2}$ forbidden transitions in atomic ytterbium[J]. *Physical Review A*, 1999, 59(5): 3513-3526.
- [63] BELOY K, SHERMAN J A, LEMKE N D, et al. Determination of the $5d6s\ ^3\text{D}_1$ state lifetime and blackbody-radiation clock shift in Yb [J]. *Physical Review A*, 2012, 86(5): 051404.
- [64] TSIGUTKIN K, DOUNAS-FRAZER D, FAMILY A, et al. Observation of a large atomic parity violation effect in ytterbium[J]. *Physical Review Letters*, 2009, 103(7): 071601.
- [65] ANTYPAS D, FABRICANT A, STALNAKER J E, et al. Isotopic variation of parity violation in atomic ytterbium[J]. *Nature Physics*, 2019, 15(2): 120-123.
- [66] PAGANO G, MANCINI M, CAPPELLINI G, et al. Strongly interacting gas of two-electron fermions at an orbital feshbach resonance[J]. *Physical Review Letters*, 2015, 115(26): 265301.
- [67] FUKUHARA T, TAKASU Y, KUMAKURA M, et al. Degenerate Fermi gases of ytterbium [J]. *Physical Review Letters*, 2007, 98(3): 030401.
- [68] KIMBALL D F, CLYDE D, BUDKER D, et al. Collisional perturbation of states in atomic ytterbium by helium and neon[J]. *Physical Review A*, 1999, 60(2): 1103-1112.
- [69] BERENDS R W, MALEKI L. Hyperfine structure and isotope shifts of transitions in neutral and singly ionized ytterbium[J]. *Journal of the Optical Society of America B*, 1992, 9(3): 332-338.
- [70] YAMAGUCHI A. Metastable state of ultracold and quantum degenerate Ytterbium atoms: High-resolution spectroscopy and cold collisions [D]. Kyoto: Kyoto University, 2008.
- [71] ZHOU M, ZHANG S, LUO L, et al. Characterization of ytterbium resonance lines at 649 nm with modulation-transfer spectroscopy [J]. *Physical Review A*, 2020, 101(6): 062506.
- [72] SCHÜLER H, ROIG J, KORSCHING H. Mechanische Momente von ^{171}Yb , ^{173}Yb , Quadrupolmoment von ^{173}Yb und Häufigkeitsverhältnis von $^{173}\text{Yb}/^{171}\text{Yb}$ [J]. *Zeitschrift für Physik*, 1938, 111(3): 165-173.
- [73] ROSS J S, MURAKAWA K. Nuclear moments of Yb^{173} [J]. *Journal of the Physical Society of Japan*, 1964, 19(3): 249-253.
- [74] SCHULZ C, ARNOLD E, BORCHERS W, et al. Resonance ionization spectroscopy on a fast atomic ytterbium beam [J]. *Journal of Physics B: Atomic, Molecular and Optical Physics*, 1991, 24(22): 4831.

- [75] WAKUI T, JIN W G, HASEGAWA K, et al. High-resolution diode-laser spectroscopy of the rare-earth elements[J]. *Journal of the Physical Society of Japan*, 2003, 72(9): 2219-2223.
- [76] QIAO H, SUN C Y, PENG C Q, et al. Frequency measurement of $6s6p\ ^3P_{0,2}-6s7s\ ^3S_1$ transitions in ultracold ^{171}Yb atoms referenced to local optical clock[J]. *Results in Physics*, 2023, 48: 106439.
- [77] ARIMONDO E, INGUSCIO M, VIOLINO P. Experimental determinations of the hyperfine structure in the alkali atoms[J]. *Reviews of Modern Physics*, 1977, 49(1): 31-75.
- [78] MAIER J, KISCHKEL C S, BAUMANN M. Hyperfine structure and isotope shift of some even parity levels in the YbI spectrum[J]. *Zeitschrift für Physik D Atoms, Molecules and Clusters*, 1991, 21(2): 145-151.
- [79] QIAO H, LIU L, ZHOU M, et al. Investigation of the $6s6p\ ^3P_2-6s7s\ ^3S_1$ transition of ytterbium atoms with modulation-transfer spectroscopy [J]. *Applied Physics Letters*, 2023, 122(22): 224002.

作者简介



齐启超, 2018年于北京航空航天大学获得学士学位, 现为华东师范大学博士研究生, 主要研究方向为冷原子物理和光频标。

E-mail: qiqichao777@qq.com

Qi Qichao received his B. Sc. degree from Beihang University in 2018. He is currently a

Ph. D. candidate at East China Normal University. His main research interests include cold atomic physics and optical frequency standards.



金涛韞, 2019年于上海华东师范大学获得学士学位, 现为上海华东师范大学博士研究生, 主要研究方向为冷原子物理和光频标。

E-mail: 992903184@qq.com

Jin Taoyun received his B. Sc. degree from

East China Normal University in Shanghai in 2019. He is currently a Ph. D. candidate at East China Normal University in Shanghai. His main research interests include cold atomic physics

and optical frequency standards.

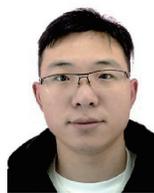


彭成权, 2018年于西南科技大学获得学士学位, 现为华东师范大学博士研究生, 主要研究方向为冷原子物理和光频标。

E-mail: pengchengquan96@gmail.com

Peng Chengquan received his B. Sc. degree from Southwest University of Science

and Technology in 2018. He is currently a Ph. D. candidate at East China Normal University. His main research interests include cold atomic physics and optical frequency standards.



孙常越, 2017年于武汉华中师范大学获得学士学位, 现为上海华东师范大学博士研究生, 主要研究方向为冷原子物理和光频标。

E-mail: sunchangyuephy@qq.com

Sun Changyue received his B. Sc. degree

from Central China Normal University in Wuhan in 2017. He is currently a Ph. D. candidate at East China Normal University in Shanghai. His main research interests include cold atomic physics and optical frequency standards.



徐信业(通信作者), 1997年于中国科学院上海光学精密机械研究所获得博士学位, 1998年作为博士后进入韩国国立首尔大学, 随后在2000年作为博士后进入美国天体物理联合实验室(JILA)以及2003年作为博士后研究员进入宾夕法尼亚州立大学。

现为华东师范大学教授, 主要研究方向为冷原子物理和光频标。

E-mail: xyxu@phy.ecnu.edu.cn

Xu Xinye (Corresponding author) received his Ph. D. degree from the Key Laboratory for Quantum Optics, Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Science in Shanghai in 1997. He joined Seoul National University, South Korea, as a Post-doctoral Fellow in 1998. Then, he joined the Joint Institute of Laboratory Astrophysics, USA as a Post-doctoral Fellow in 2000, and the Pennsylvania State University, USA, as a Post-doctoral Fellow in 2003. He is currently a professor at East China Normal University in Shanghai. His main research interests include cold atomic physics and optical frequency standards.