



## 140亿年内误差不超过1/10秒

# 原子钟让计时精度走向极限

◎本报记者 冯卫东

2020年底,《自然》杂志刊载了一篇来自美国麻省理工学院研究人员的成果报道,这些研究人员利用量子纠缠现象新设计出一种原子钟,如果运行约140亿年(大约是当前宇宙的年龄),该原子钟可将时间精度保持在十分之一秒之内。而在同样的时间框架内,此前最先进的原子钟偏差在半秒左右。

自从人类意识到时间的流逝,就开始利用周期性现象进行追踪。在古代,人们是观察太阳、月亮在天空中的运动来判断时间的运行,随着科学技术发展,人类测量时间的手段也越来越先进。15世纪,依靠钟摆和发条组成擒纵机构诞生,成为现代机械钟表的核心,再后来又出现利用石英周期振动来计时的钟表。到后来,原子钟的出现成为人类计时史上的一次重大革命,它使得计时标准从天文学的宏观领域转向了物理学的微观领域,历史从此由“天文秒”时代进入“原子秒”时代,开启了人类时间测量的崭新阶段。人类对时间的测量和追踪正在越来越接近宇宙的本源。

### 通过跟踪原子振荡来测量时间

生活中常以分秒来计时,在当今太空探测、通信导航、天文观测、工业自动化等领域,越来越需要更精密的时间测量。时间常常被准确到万分之一秒,甚至百万分之一秒。为了达到要求,许多精密的计时器诞生,原子钟就是其中之一。

原子钟是世界上已知最精确的计时仪器,采用了最准确的时间测量和频率标准,同时这一标准也被认为是国际时间和频率转换的基准,广泛应用于控制电视广播和全球定位系统卫星的信号传递。原子钟的研发涉及到量子物理学、电学、结构力学等众多学科,目前国际上仅少数国家具有独立研制能力。

根据原子物理学的基本原理,原子是按照围绕在原子核周围不同电子层的能量差,来吸收或释放电磁能量的。当原子从一个“能量态”跃迁至更低的“能量态”时,它便会释放电磁波。这种不连续的电磁波的频率,就是人们所说的共振频率。同一种原子的共振频率是一定的——例如铯133的共振频率为每秒9192631770周。原子钟就是使用激光来测量原子的共振频率,从而实现精准计时。

# 颠覆物理学基本认知:量子跃迁可以被预测了

量子力学理论的标准解释认为,量子场内的变化不可预测且是瞬时的。在难以观测的微观世界里,阐明量子跃迁的性质,一直是困扰物理学家的难题。

1986年,研究人员通过实验首次证实量子跃迁是一种能被观测和研究的实验现象。从那时起,科学家借助不断发展的技术,对这种神秘现象进行了更深入的观察。2019年的一项研究显示,量子跃迁的过程可以被预测,且开始后可以被阻断。近期,一项新的理论研究更深入挖掘了量子跃迁过程,以及它何时会发生。研究显示,这个看上去简单和基础的现象,实际上十分复杂。

### 预测量子跃迁

美国耶鲁大学研究人员通过一种干扰度最小的装置来监测量子跃迁进程。每一次跃迁都发生在一个超导量子比特的两个能态之间,这个小循环可用于模拟原子中离散量子能态的超导微环路。研究人员测量了低能态系统中量子比特的“附加活动”——可被观测设备捕捉但不会影响量子系统的运行。

研究中的“附加活动”是一种监测设备所捕捉的,由系统散发出的光子信号,这表明光子未被系统吸收,跃迁尚未发生。这种方式首次实现了

如果要追求近乎完美的时间测量,原子钟必须去跟踪单个原子的振荡。但是按照量子力学的规律:当被测量时,原子振荡的行为就像抛一枚硬币,只有在多次翻转中取平均值才能给出相对稳定的数值,这被物理学家称为标准量子极限。因此,今天的原子钟被设计用来测量由成千上万个相同类型的原子组成的气体,以便估算其平均振荡频率。

尽管原子钟的类型有多种,但其背后的原理大致相同。目前最常见的原子钟使用的原子包括氢、铯、铷等碱金属原子。但元素周期表中有100多种元素,为何科学家偏偏对这几钟原子情有独钟?

这是因为碱金属原子内部只有一个价电子,理论模型相对多价电子体系较为简单。科学家在长期实验中发现,碱金属原子中铯原子钟又最为稳定,误差可低至每2000万年1秒的水平。

据了解,铯原子钟使用铯原子束,通过磁场将能级不同的铯原子分离该时钟将高稳定性铯振荡器与GPS高精度授时、测频及时间同步技术有机结合在一起,使铯振荡器输出频率驯服同步于GPS卫星铯原子钟信号上,提高了频率信号的高精度时间频率标准,是通信广电等部门替代铯钟的高性价比产品。

氢原子钟将氢原子保持在四周由特殊材料制成的容器中,从而使氢原子保持所需的能级,而不至于太快失去其较高的能量状态,但是环境温度变化及微波谐振腔老化会引起其输出频率的变化,从而导致氢原子钟长期性能变差,为了减小这些影响,可借助自动调谐器来确保谐振腔的频率始终工作在所需的频率上,并采用新的温度控制系统来改善氢原子钟的长期性能。

铷原子钟是所有原子钟中最简单也最紧凑的一种,它使用装有铷气的玻璃腔,铷气在周围的微波频率恰到好处时,就会按照铷原子的振荡频率改变其光吸收率。铷原子钟溯源同步到GPS卫星铷原子钟上,输出频率几乎没有漂移,性能与铯原子钟相近,而且不存在铯原子钟那样铯束管寿命短需要高成本更换的问题。

### 量子纠缠让计时精度有了大幅提升

那么原子钟是如何诞生的呢? 1945年,美国哥伦比亚大学物理学教授伊西多·拉比提出,可以用他在上世纪30年代开发的原子束磁共振技术制作钟表;1949年,美国国

对量子跃迁的间接监测,揭示了一个重要的性质:在“附加活动”中,量子向高能态跃迁之前会有一个停顿。而科学家可以通过这种停顿预测甚至阻止量子跃迁。

跃迁过程由系统低能态开始也称为基态;当跃迁至系统高能态时,也称为激发态,随后跃迁路径转向,再次回到基态。文章作者 Kyrlo Snizhko 是德国卡尔斯鲁厄理工学院的一名博士后学者,他表示,模拟实验显示,在这个可间接预测或干扰量子跃迁中,一定存在一个不可捕捉的组分。

具体来说,量子跃迁从激发态向基态的回落过程,并不总是平滑和可预测的,这就是作者所描述的“不可捕捉”的组分。研究指出,观测设备与受测系统的“连接度”,对系统跃迁有直接影响。在这一过程中,量子跃迁由观测的时间尺度而非跃迁过程定义。观测设备和量子系统的连接可能很弱,在这种情况下,通过信号的暂停能预测量子跃迁。

量子系统的转变通过基态和激发态的混合实现,这称为量子系统的叠加态。然而,在观测设备和系统的联系超过一定阈值时,这种系统叠加态就会趋向某一个能值,并保持相对稳定,直至再次突然回到基态。论文的共同作者

根据原子物理学的基本原理,当原子从一个能量态跃迁至低的能量态时,它便会释放电磁波。同一种原子的电磁波特征频率是一定的,可用作一种节拍器来保持高度精确的时间。

原子钟就是利用保持与原子的电磁波特征频率同步作为产生时间脉冲的节拍器。

家标准技术研究院(NIST)的前身美国国家标准局公布了世界上第一个使用氢分子作为振动源的原子的原子钟;1952年,NIST宣布了第一个使用铯原子作为振动源的原子的原子钟NBS-1。

1955年,英国国家物理实验室制造了第一个用作校准源的铯钟。1967年,第十三届度量衡大会基于铯原子的振荡定义了1秒时间,从那时起全球计时系统抛弃了天文历书时,进入了原子时时代。1968年建成的NBS-4是当时世界上最稳定的铯原子钟,并在上世纪90年代被用作NIST授时系统的一部分。

NIST最新的铯原子钟NIST-F1能够将时间精度保持在每年约300亿分之一秒,这是NIST建造的一系列铯钟中的第8个,也是NIST第一个以“喷泉”原理工作的铯钟。

通常原子钟是用激光把数千个原子关在一个光学“陷阱”里,然后用另一种频率与被测原子振动频率相似的激光探测它们。

将原子以经典物理学定律不可能的方式关联在一起,使科学家能够更准确地测量原子的振荡。麻省理工学院的研究小组认为,如果原子被纠缠,它们的单个振荡将在一个共同的频率附近收紧,与不被纠缠相比,偏差较小。因此,原子钟可以测量的平均振荡将具有超出标准量子极限

Parveen Kumar解释道,这意味着,即使我们一开始成功预测了量子跃迁发生,但无法避免会再次“跟丢”系统。

而即使在跃迁可预测的期间,也会存在一些差异。Snizhko表示,这些过程中还包含着一种不可预测的组分。可捕捉的量子跃迁通常具有一个处在基态和激发态的叠加态上的跃迁“轨迹”,但整体的跃迁轨迹并没有明确的方向或终点。

### 量子物理正在萎缩

Zlatko Minev是微软托马斯沃森研究中心的研究员,也是这项耶鲁大学研究的第一作者。他表示这项新的理论研究“在量子比特作为参数的实验条件下,描绘阐述了一个简单清晰的量子跃迁模式”。他认为,这项研究与先前的耶鲁实验互相参照,显示“相比于我们之前的认识,量子跃迁轨迹的离散性、随机性和可预测性还有待更广阔而充分的研究。”

具体而言,耶鲁大学进行的研究首次揭示了量子跃迁的微妙行为——系统从基态到激发态的跃迁能被预测,表明量子世界中部分是可以预测的。这在此前曾被认为是不可可能的。当Minev首次与组内的其他研究者讨论预测量子跃迁的可

精度。

研究人员纠缠了约350个铯原子,该元素每秒比常规原子钟所使用的铯原子的振荡频率高10万倍。该小组使用标准技术冷却原子并将其捕获,困在由两个反射镜形成的光学腔中。然后,他们通过激光腔发出激光,使其在反射镜之间反射,与原子反复相互作用并纠缠它们。

通过这种方式,研究人员将原子纠缠在一起,然后使用类似于现有原子钟的另一激光来测量其振荡的平均频率。与不纠缠原子的类似实验相比,他们发现带有纠缠原子的原子钟达到了所需精度的4倍。

### 既有助于解码宇宙又能服务生活

与生活中常见的闹钟、手表等计时器不同,我们在日常生活中很难一窥原子钟的真面目。事实上,原子钟既高大上又接地气。说它高大上,是因为它或许能帮助解码宇宙中神秘莫测的信号;说它接地气,是因为如果没有它的帮助,手机上的导航就会把你带偏不止一点点。

卫星定位系统都是通过获得卫星和用户接收机之间的距离来计算的,而距离等于传播时间乘以光速,因此精确的距离测量实际上就是精确的时间测量。没有高精度的时频,卫星导航定位系统就不可能实现高精度的导航与定位。所谓失之毫“秒”谬以千里,这正是原子钟大显身手的地方。

由于引力会影响时间的流逝,因此距离海平面更近的时钟实际上比珠穆朗玛峰上的时钟慢一点,这意味着物理学家可以使用原子钟来测定地球的形状、大小和地球重力场等,这是一个被称为大地测量学的科学领域。

为了提高测量精度,天文学家已开始将设施同步到单个精确的时间标准。这种同步会改善被称为超长基线干涉法的天文成像技术,该方法涉及多个天文台协同成像一个原本无法用单个望远镜分辨的物体。例如,天文学家今年早些时候使用这种技术拍摄了黑洞的第一张图像。更好的时间同步将可以实现更高分辨率的成像,因此也需要原子钟来帮忙。

此外,如果原子钟能够更准确地测量原子振荡,那么它们将足够灵敏以检测诸如暗物质和引力波之类的现象。有了更好的原子钟,科学家还可以开始回答一些令人费解的问题,例如重力对时间的流逝可能产生什么影响,以及时间本身是否随着宇宙的老化而改变。

行性时,受到了一位同事激烈的回击:“跃迁轨迹如果能预测,量子物理界就要坍塌了!”

“我们的实验最终成功了,并且推断出量子跃迁整体路径是随机和离散的。然而,在更精密的时间尺度上,每一次跃迁都是连续而逐步开展的。这二者尽管看似矛盾,却是量子跃迁中同时存在。” Minev解释道。

而这一跃迁过程能应用到整个物质世界吗,如预测实验室外的原子? Kumar还不确定,而很大部分原因在于研究条件上的过多限制。Kumar说:“推广这项研究当然很令人兴奋。”如果未来不同的观测设备都得到了类似结果,那么这种量子行为将能解释量子世界的更多基本性质;在量子世界中,事件在某种意义上同时具有随机性和可预测性、离散性和连续性。

量子跃迁是自然界中最基本、最原始的物理问题,但一直很难被真正观测到。直到最新的科技进展扭转了这一局势。美国华盛顿大学的助理教授 Kater Murch 表示:“耶鲁大学的实验启发了这项理论研究,为解决这个数十年的物理难题打开了全新的局面。在我心目中,实验与理论的相辅相成,最终转变我们这些理论物理学家对世界的认知,为日后的新发现奠定了基础。”

(韩佳桐翻译,据《环球科学》)

## 新知

### 中国西南地区 为全世界苦荞起源驯化中心

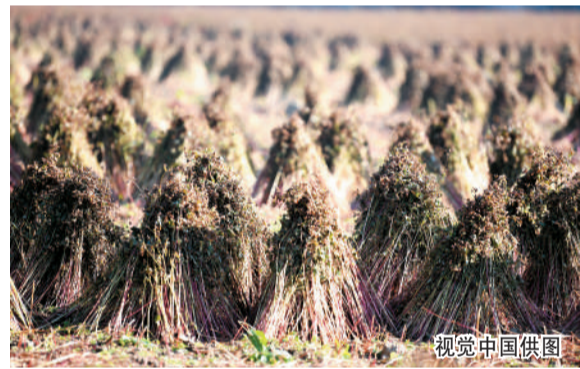
科技日报讯(记者翟剑)中国农业科学院作物科学研究所(以下简称中国农科院作物所)特色农作物优异种质资源发掘与利用创新团队牵头,联合国内外10余家科研机构,对来自14个国家的510份苦荞核心资源进行全基因组重测序,构建了苦荞基因组变异图谱,揭示了苦荞的起源和传播驯化路径,明确了我国西南地区作为全世界苦荞多样性中心和栽培苦荞起源驯化中心的独特地位,为研究苦荞驯化和性状改良奠定了重要理论基础。相关研究成果与1月12日以长文形式发表于国际著名期刊《基因组生物学(Genome Biology)》。

团队成员、中国农科院作物所研究员周美亮介绍,荞麦分苦荞、甜荞两个广泛栽培种,其中苦荞富含芦丁、槲皮素、大黄素、荞麦糖醇等众多生物活性物质,具有较高的可溶性膳食纤维、维生素和矿物质元素含量,可与其他主要粮食作物形成很强的互补,是重要的药食同源和健康养生作物。苦荞起源于我国,广泛栽培于北半球,它生长快速、生长期短,适应性强,能耐瘠薄土地,在全世界,尤其是东亚及东欧地区广泛种植。在我国,荞麦栽培面积近100万公顷,年产量超过120万吨,均仅次于俄罗斯,位居世界第二。

然而,目前关于苦荞的遗传基础和驯化过程并不清楚,重要性状和品质形成机理缺乏研究,严重制约其性状改良和遗传育种。

团队从我国西南地区搜集野生和农家荞麦资源上千份,结合来自其他十余国苦荞品种,构建了涵盖野生种、农家种不同层次的510份苦荞核心种质资源;经基因组测序,从中挖掘到超过109万个单核苷酸多态性(SNP),全面系统构建了苦荞基因组变异图谱。通过生物学分析,将510个种质分为一个野生群体和两个栽培群体,从分子水平证明了苦荞起源于泛喜马拉雅地区,然后传播到中国的南方和北方,形成中国南北栽培苦荞的两个独立分支,再由中国北方传播到韩国、中亚、俄罗斯、欧洲以及北美地区,由此明确了我国西南地区作为全世界苦荞多样性中心和栽培苦荞起源驯化中心的独特地位。

该研究还在两个苦荞栽培群体中分别鉴定到与株高、千粒重、果皮颜色、黄酮类物质含量等农艺和品质性状相关的独立驯化区间及重要遗传位点;同时还利用GWAS分析挖掘到的芦丁等重要活性物质的关键调控基因进行了功能解析。这些关键位点和基因的发现,将极大推动荞麦的品质改良,加快荞麦的遗传育种进程。



### 我国科学家成功克隆 水稻白叶枯病“克星”基因

新华社讯(记者黄鑫)近日,我国科学家成功克隆水稻白叶枯病的“克星”——持久抗病基因Xa7。通过揭示Xa7高抗、广谱、持久、耐热特性的新抗病分子机制,为水稻白叶枯病的长效防控奠定了基础。

白叶枯病是我国水稻生产中的“三大病害”之一,严重影响水稻产量和品质。资料显示,20世纪80年代以前,白叶枯病常导致水稻减产20%至30%,严重时可达50%,甚至绝收。

据中国科学院遗传与发育生物学研究所研究员周俭民介绍,由于我国主栽水稻品种引入Xa4、Xa21、Xa23等抗性基因,白叶枯病曾得到有效控制。但随着全球气候变暖、白叶枯病菌不断变异,陆续出现了新型致病变种,导致主栽水稻品种逐渐失去抗病性。

“近些年,水稻白叶枯病呈逐年加重趋势,‘老病新发’问题日益严重,产量损失巨大。”周俭民说。

一直以来,Xa7是国际公认对白叶枯病菌抗性最持久的“明星基因”,从最初发现其持久抗病性至今已有20年。但由于该抗病遗传位点的序列与参考基因组完全不同,国际上许多实验室在Xa7基因的分离鉴定上一直未获成功。

浙江师范大学马伯军团队和中国水稻研究所钱院士团队多年联合攻关,近日取得突破性进展——在精细定位的基础上,通过辐射诱变和遗传筛选,终于将Xa7锁定在28kb范围,并通过大量分子功能验证,成功克隆Xa7基因。

同时,研究还表明在高温下,Xa7受诱导产生防卫反应阻止病菌入侵表现更为突出。在全球气候变暖情况下,该基因具有更大育种价值。

目前,这项研究已在期刊Plant Communications上发表。

