

静态穆斯堡尔方案:探讨引力波探测的新途径

高 宇 徐 伟 张华桥

(中国科学院高能物理研究所 100049)

一、穆斯堡尔效应与广义相对论的早期验证

穆斯堡尔效应指的是原子核跃迁中光子相对于原子核产生无反冲的发射和吸收。当原子核受到晶格的紧密束缚时,光子的发射和吸收有一定概率与晶格进行整体反冲而非只和单个原子核反冲,在反冲的光子能量损失极其微小。同样的,光子经过能量补偿被相同种类的原子核吸收的时候,也有一定概率和晶格整体反冲。当发射和吸收都达到“无反冲”共振时,光子频率变化极其微小,共振峰异常尖锐。一些穆斯堡尔共振的相对精度能够超过 10^{-20} 以上,是人类目前已知共振机制中最精确的。原子核无反冲共振效应由德国物理学家鲁道夫·穆斯堡尔(1929~2011)于1958年发现,并赢得了1961年的诺贝尔物理学奖,提供了一种以发现者命名的物质结构研究手段。在随后的几十年中,基于放射源的特定核共振激发,逐渐发展为穆斯堡尔谱学,在物理、化学、生物医学、地质矿物、石油化工、考古等学科与产业领域,有极为广泛的应用。随着三代同步辐射光源的出现,人们又实现了同步辐射

穆斯堡尔谱学,利用加速器产生并经过特殊光学部件优化后的光子,开辟出核共振散射谱学领域。值得一提的是,我国新建的第四代高能同步辐射光源,也将实现这一高精度探测谱学。

由于穆斯堡尔效应能够提供无与伦比的能谱分辨力,因此,高精度穆斯堡尔谱与广义相对论的验证渊源很深。根据爱因斯坦的等效原理,加速度场中不同位置的光子会有频率的变化。因此在发现穆斯堡尔效应后不久,高精度的穆斯堡尔共振便参与了早期验证爱因斯坦等效原理的几项著名实验,例如在英国原子能研究所旋转平台上一系列实验室测量^[1],以及广为人知的1960~1965年的哈佛塔引力红移测试^[2]。后者通过安置于塔顶和塔底部的 ^{57}Fe 元素的穆斯堡尔共振精确地测量了两个位置的光子能量差,成功展示了在地球引力场下22米高度差引起了 $2g\Delta h/c^2 \sim 4.905 \times 10^{-15}$ 的光子频率漂移,有力地验证了引力红移效应(如图2所示)。穆斯堡尔效应还参加了其他等效原理的测试实验,包括在非惯性系统中的测量,以及后来更高精度穆斯堡尔谱线的实验,例如使用 ^{67}Zn 同位素在低温容器内对引力加速度的测量实验^[3]等。然而到了20世纪70

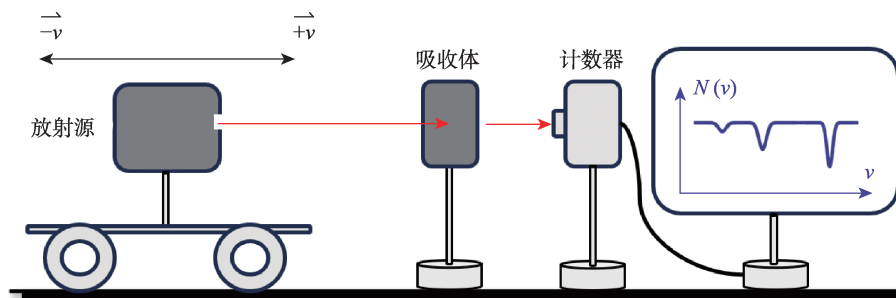


图1 传统穆斯堡尔共振示意图。晶格整体反冲产生的光子微小频移由人为调节源或吸收体的多普勒频移来进行补偿,从而达到精准共振

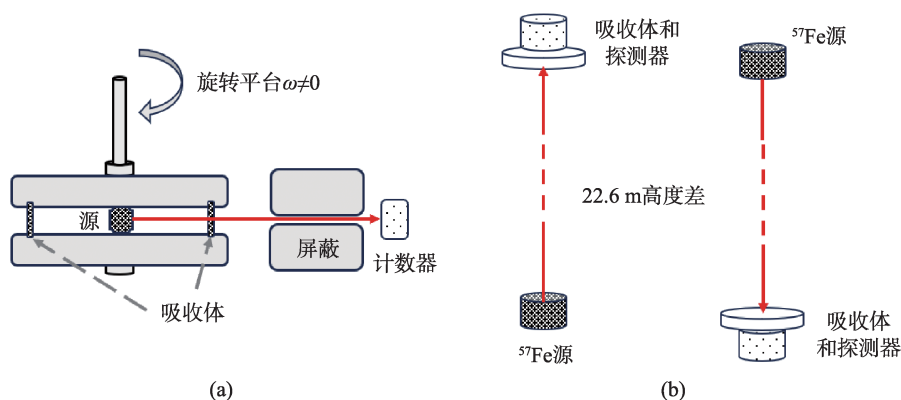


图2 英国原子能研究所的转台实验(a)和哈佛大学的引力红移实验(b)示意图。
各自利用旋转的非惯性系和垂直高度差形成光子频率漂移

年代以后,出于多种原因,广义相对论验证逐渐转向了使用其他精密测量技术:主要是基于原子钟的高精度时钟、分子激光以及高精度陀螺仪等。

广义相对论的另一大预言是引力波。除了在静引力场能引起光子能量变化,引力波是时空度规的扰动,同样也会对在其中传播的光子能量造成影响。近期,长基线的激光干涉技术在引力波探测方面大获成功。LIGO实验在2016年发现了黑洞并合的引力波^[4],下一代宏伟的空间引力波探测项目,如LISA^[5]、我国的天琴^[6]和太极^[7]等也在逐步地展开。从测量精度上考虑,利用穆斯堡尔效应探测引力波应是一个很自然的想法。在文献中,早在1970年Kaufman的一篇文章就畅想过穆斯堡尔效应或能测量来自银河系中心的引力波^[8]。通常,源自已知天体物理过程的引力波幅度很小,例如中子星并合的引力波振幅预计在 10^{-21} 的量级^[9],对精密测量而言也是个很大的挑战。

高精度恰恰是原子核共振最突出的一个特点。在追求极端分辨率的方向,穆斯堡尔谱学的发展特别引人瞩目。2023年,欧美科学家利用自由电子激光,研究了 ^{45}Sc 的核共振激发探测,提出了比原子光晶格钟更高精度的选项——核钟,其能量分辨精度高达 10^{-18} 量级,已属于高精度谱学探测极限,开辟了基于核共振的精密测量学。在已知原子核同位素中有些元素能量分辨精度更高,甚至能再高出几个量级:例如 ^{107}Ag 、 ^{109}Ag 核的共振跃迁自然宽度在

10^{-22} ;而 ^{103}Rh 和 ^{189}Os 核在原则上甚至能达到 10^{-24} 和 10^{-25} 。对引力波观测来说这样的相对精度是非常诱人的。

二、共振法的“动”与“静”

传统的穆斯堡尔测量使用多普勒频移来修正光子能量,补偿发射端和吸收端的样品能量差异从而达到共振。具体的做法是:将一个样品放在周期性运动的驱动装置上,随着运动速度的改变,每当样品到达合适的速度时,吸收端产生共振,从而得到一个光子吸收率和样品速度的依赖关系,在共振的速度处出现一个吸收的峰值。如果有多个共振能级,在周期性的速度扫描中也会出现多个共振峰。

然而在很高精度的测量中,样品的往复运动会造成一些问题。1992年,德国Karlsruhe的一个实验组尝试使用 ^{65}Zn 进行了地表引力加速度的测量^[10]。实验中遭遇了较大的系统性误差,被认为是反复的加速运动对样品的微观状态产生了影响。一个可能解决方案是采用完全静止的架构:保持发射和吸收的样品静止,采用别的方法来补偿二者之间的能量差异来达到共振。

一个自然的想法就是利用本地引力场中的引力频移来代替传统的多普勒频移。光子在一个背景度规中传播时,其四动量的零分量(即光子能量)的变化正比于两点之间的度规差。引力等价于度规的变化,无论是静止的引力场,还是动态的引力

波,都会让在其中传播的光子能量发生改变。因此静止的样品之间的高度差也可以用来修正光子能量,补偿必要的能级差:

$$1+z=\frac{1+v\cos\theta/c}{\sqrt{1-v^2/c^2}} \rightarrow 1+z=1-2g\Delta h/c^2$$

其中左侧多普勒频移公式中 z 代表了光子能量的相对漂移, $v\cos\theta$ 是一个往复周期内运动的速度, c 是光速。右侧引力频移公式中 g 为本地的重力加速度, Δh 是两个样品之间的高度差。当我们的吸收样品能够覆盖一定的高度范围时,穆斯堡尔共振就会在合适的高度上发生,表现为探测器上不同高度处产生亮度的差异。如此,我们就可以通过精确测量共振峰的位置来实现光子能量的精确测量。

这个方法对谱线形状是有要求的:共振峰线宽必须足够窄。因此特别适合精度极高、共振峰极窄的穆斯堡尔核素。原因在于1毫米的高度差引起的引力频移为 $z=10^{-19}$,所以如果采用常见的 ^{57}Fe 核素,它的共振峰宽度在地球 $1g=9.8\text{ m/s}^2$ 引力场中对应的高度差会高达4.6千米,远远超出正常吸收样品的尺度。若采用更高精度的核素,如 ^{109}Ag 具有相对宽度为 10^{-21} 的共振峰,峰的宽度在 $1g$ 下对应的高度差仅几个微米,能够被现代的探测器检测出来,适合在较小的空间范围内进行观察。此外,使用引力频移的静态测量还有一个优点:探测器的一次读出就可以同时得到不同高度处的共振情况,而不必等待完成一个不同速度往复运动的扫描周期,从而大大提高测量穆斯堡尔共振的速度,为快速并且高精度的测量提供可能。

三、高效的度规扰动计

使用引力频移的高精度静态穆斯堡尔共振方法就像是测量海浪的高度。我们可以在海边固定一把垂直的尺子来直接测量每一个海浪淹没尺子的高度变化,从而知道海浪的相对波动大小。另一个更从容的测量方式是寻找一个有相对平缓坡度的沙滩,测量每次波浪在沙滩斜坡上推进的最远距离来换算浪的高度,如图3所示。通过比较这些前

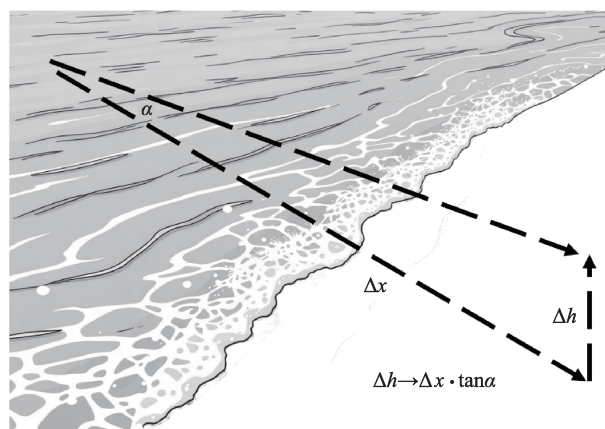


图3 以沙滩作类比,较平缓的沙滩上可用海浪走过的距离代替高度测量。在静态方案中,引力频移相对多普勒频移是一把更平缓的尺子(艺术背景由 FLUX.1-shnell 人工智能模型生成)

进距离,我们很容易区分那些高度相差不大的波浪的相对浪高,从而对海浪的高度进行更加准确的测量。引力红移就是我们选择的这个具有很小坡度的沙滩,用来对引力波动引起的光子能量的变化进行精确的测量。

若实现了高精度静态穆斯堡尔共振,就相当于利用空间位置这把尺子,在很小的高度差上实现了高精度的光子能量分辨。使用 ^{109}Ag 的激发态,在4.2 K的温度下,其发射的88 keV光子在地面垂直方向共振吸收的宽度大概在10微米量级,可以使用像素型的重金属探测器,如碲化铬来进行探测。如果观测到该共振峰的结构,就观测到了10微米量级引力红移所引起的光子的相对能量改变,这将把目前最精确的引力红移测量——2022年使用原子钟测量到毫米量级高度差引起的光子能量变化^[10]——提升2个数量级左右。当然,想要观测到 ^{109}Ag 引力穆斯堡尔效应并不那么容易,需要严格控制实验环境,降低任何影响测量精度的噪声。

四、引力波探测远景

实现了与引力波测量精度相比拟的超高精度光子能量的测量,并不意味着立刻就能进行引力波的测量,最主要的原因在于引力波引起的光子相对能量变化不仅小,而且变化的速度非常快,并且在

空间分布上具有独特的特征。所以想要探测引力波,还需要在合理的探测器设计之上,提高精度探测的速度。在近期的一篇文章中^[13],我们提出了一种中心圆环的探测器结构,在圆环中心放置一个 ^{109}Cd 的源, ^{109}Cd 的半衰期约为463天,缓慢地衰变到 ^{109}Ag 的激发态, ^{109}Ag 激发态的寿命约为40秒,很快就衰变到基态并放射出88 keV能量,其中大部分时候能量在原子内部发生内转化,剩下约3.6%几率以88 keV硬X射线光子的形式释放出来。在4.2K的低温下,这部分88 keV的光子约有5.3%的发生无反冲发射。在与源水平的平面上放置一圈像素型光子计数探测器,探测器相对源的方向有一层 ^{109}Ag 吸收层,共振吸收这些88 keV的光子,从而使得后方的光子计数器能够观测到共振吸收形成的暗色条纹。暗色条纹即穆斯堡尔共振点的位置。当受到外来引力波扰动时,这些条纹会在垂直方向上移动,对应了该处光子能量在引力频移下的变化。共振点移动量沿圆环的分布则反映了引力波传播的方向,以及引力波的极化信息。引力波自旋为2的这个性质,使得引力波空间形变具有独特的特征,如图4所示,将成为确认引力波的最佳证据。

这个探测过程和我们的数码相机照相拍照非常类似,为了避免不同周期之间的重影,照相机的

快门必须足够快;同时,为了获得引力波完整的波形,我们需要像摄像机一样连续照相,这就对我们拍摄时的光的亮度提出了要求。在探测高频引力波的情况下,光子探测器的快门频率大概是引力波的10倍,即光子计数器的读出频率最高大概在10 MHz。这对目前的核电子学探测器仪器来说不是太大的难度,如目前大型强子对撞机上的取样频率为40 MHz。但是过快的快门会导致曝光不足,可以通过类似聚光灯,或者闪光灯的设计来补充光源的亮度。目前在地面上典型的光源强度下,由于曝光不足会导致对非重复性引力波振幅的理论探测精度仅能达到 10^{-17} 量级。而对于相干的重复性引力波信号,如果有百万周期级别的信号重复,最灵敏波段的引力波振幅的理论探测精度能提升至 10^{-21} 量级。

值得注意的是,穆斯堡尔共振效应的测量灵敏度与引力场的强度成平方根反比,引力场越弱,其灵敏度理论上限越高。这主要得益于在弱引力场中需要更大的高度差来补偿同样大小的光子能量变化,从而可以使用面积更大的探测器,也就更容易在空间上确定引力波引起的共振吸收峰的位置变化。同时在太空中,真空状态可以避免光子与气体分子作用引起的能量、方向变化,对整个实验灵

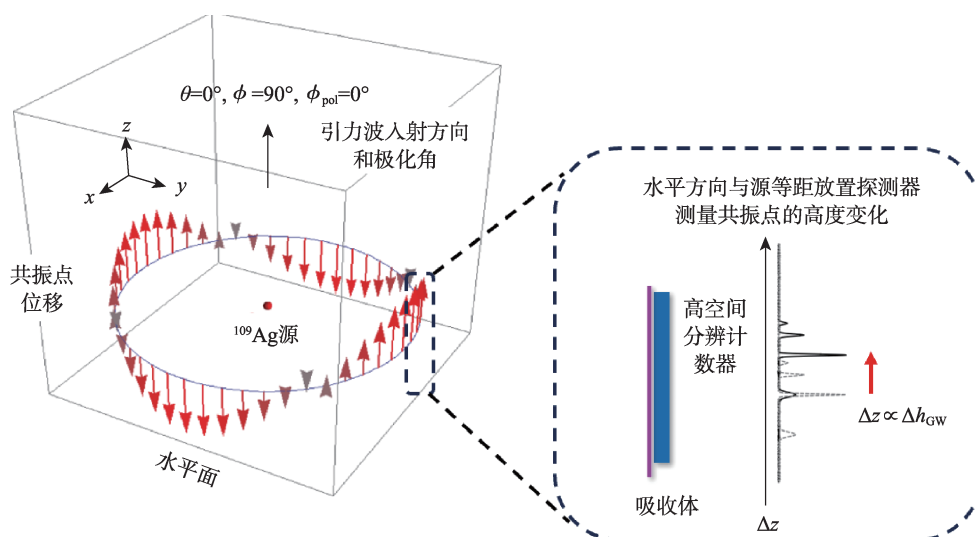


图4 静态探测方案示意图。与 ^{109}Ag 源共水平面呈环状分布的探测器记录共振点的高度变化。共振点高度变化正比于引力波扰动强度,其空间分布情况可反应引力波的入射方向和极化角

敏度的提升有较大的帮助,典型的最大理论探测精度能达到 10^{-23} 左右。除引力波之外,也可以对其他来源的引力场或加速度变化进行观测。若按照100米的基线估算, 10^{-23} 量级的精度相当于通过引力差来感知1千万千米距离内质量为 10^{22} kg的未知天体,例如不发光的小行星,甚至暗物质团块或小质量黑洞。

五、实验的创新与挑战

自然界中,引力和电磁力是仅有的两种长程相互作用力。近几个世纪人类依赖电磁波探索宇宙,其频率范围跨越20多个数量级。直到2015年,引力波的发现为我们提供了探索宇宙的全新视角。目前的国内外主流大型实验,例如脉冲星计时阵列和地面、太空激光干涉仪、原子干涉仪等项目探索纳赫兹至千赫兹的引力波,其探测原理主要是测量引力波在路径上引起的时间延迟效应。我们提出的穆斯堡尔引力波探测是使用高精度的穆斯堡尔核素,探测引力波引起的微小的光子能量变化,只依赖于光子的发射/探测点的度规差,不依赖路径,与现有的探测原理有本质区别,同时,圆周形的探测方案设计,在测量引力波方向和极化上有一定的优势。如果实现该新探测方式,将能实现高精度的引力波极化探测,提供研究引力波的新机制。

高精度的穆斯堡尔测量会具有很多的挑战,例如特定元素穆斯堡尔测量的可行性、放射源亮度,以及多种相互耦合的实验因素。 Ag 作为自然界中常见而又精度极高的穆斯堡尔元素,常用于催化剂领域,具有的典型的穆斯堡尔应用场景。当前 Ag 的穆斯堡尔主要还是以实验室中科学研究为主。1979年,在实验中实现了30倍自然展宽的穆斯堡尔共振^[13]。后续研究则实现了更高的共振精度,达到了约10倍自然展宽的程度。值得一提的是,Y. Bayukov等人在与水平面不同夹角方向上进行了测量,一定程度上展示了与高度相关的共振现象^[14]。目前成熟的穆斯堡尔测量仍然采用速度扫描法,静态测量可以采用具有一定能量分辨能力的晶体光子探测器,在实际的测

量中还需要根据谱线的形状和光子能量进行有针对性的研发。

共振峰测量需要考虑由放射源发出的,并实际到达探测器的伽马光强度,如果距离较远,我们现在可以考虑通过光路控制的手段进行部分的聚焦,从而增加到达吸收体的光子流量密度。例如,一个可能性是将柔性微米-亚微米的细长玻璃毛细管、弯折成椭圆形,在毛细管内壁镀上高度反射膜,则可以让更多的伽马光子,沿着管壁反射,汇聚到样品上。假设把毛细管堆叠,则可以引导更多的伽马光子到样品。这种毛细管会聚效应,在普通X光机上已经得到广泛应用,只不过通常应用中的光子能量在5至20 keV的范围。在传统的穆斯堡尔谱仪上,人们也可以通过点放射源和多束毛细管聚焦的方式,实现了样品上局部区域核共振信号的增强。如果考虑 ^{109}Ag ,其88 keV的穆斯堡尔光子能量较高,毛细管聚焦实现起来挑战性更大。当然我们也可以考虑直接提高放射源自身的辐射强度,这种方式从原理上讲是较为直接的,但考虑辐射资质、安全防护和制备工艺等因素则需要对源的强度有所控制。

在放射源以外,现代的一大类穆斯堡尔研究还可以利用具有高亮度、高准直特性的同步辐射或X射线自由电子激光光源,发出的X射线能量覆盖范围广,但可以经过特殊的单色化技术筛选出与核共振能级相匹配的X射线光子,称为同步辐射穆斯堡尔谱学。同步辐射光经过双晶硅的单色器就可以获得具有电子伏量级的能量宽度。而利用具有特殊晶体结构的单晶,人们可以观察到核共振的布拉格衍射峰,其对应的能谱宽度会大大缩减到与核能级相当。目前利用特殊单晶可以实现对 ^{57}Fe 同位素的同步辐射穆斯堡尔谱源,可以实现与传统穆斯堡尔谱类似的谱学探测。而通过特殊的光学器件,可以实现对X光的高度聚焦,达到几微米甚至百纳米的尺寸,由于在这类微小光斑内的光子数急剧增多,所以即使样品尺寸很小,也可以开展微区穆斯堡尔谱探测,亦可开展核量子态操控、核子时钟频率标定等前沿研究。

除此之外,对于微小信号的测量还需要尽可能避免或绕开振动、环境微扰等因素,随着测量精度的提升,对环境的要求极为苛刻,需要开展大量的研究、工艺探索。也许未来的某一天,静态穆斯堡尔引力波探测器将会在太空中引力强度低的地方,如月球,小行星上,甚至地月系统的拉格朗日点上,静静注视着引力波引起的空间的微小扰动,以一种全新的探测方式探索宇宙深处有关于引力的奥秘。

参考文献

- [1] H. J. Hay, J. P. Schiffer, T. E. Cranshaw, and P. A. Egelstaff, Phys. Rev. Lett. 4, 165-166 (1960).
- [2] Robert V. Pound and Glen A. Rebka, Jr., Phys. Rev. Lett. 4, 337-341 (1960).
- [3] T. Katila and K.J. Riski, Physics Letters A 83, 51-54 (1981)
- [4] B. P. Abbott et al. (LIGO Scientific, Virgo), Phys. Rev. Lett. 116, 061102 (2016).
- [5] K. Danzmann, Class. Quant. Grav. 14, 1399-1404 (1997).
- [6] Jun Luo et al. (TianQin), Class. Quant. Grav. 33, 035010 (2016).
- [7] Wen-Rui Hu and Yue-Liang Wu, Natl. Sci. Rev. 4, 685-686 (2017).
- [8] W. Kaufmann, Nature 227, 157-158 (1970).
- [9] Nancy Aggarwal et al., Living Rev. Rel. 24, 4 (2021).
- [10] W. Potzel, C. Schäfer, M. Steiner, et al., Hyperfine Interact 72, 195-214 (1992).
- [11] Nature volume 602, pages 420-424 (2022).
- [12] Y. Gao, W. Xu, H. Zhang, Sci. Bull. 69 (2024) 18, 2795-2798.
- [13] W. Wildner and Ulrich Gonser, Le Journal De Physique, Colloques 40 (1979).
- [14] Yu. D. Bayukov, A. V. Davydov, Yu. N. Isaev, G. R. Kartashov, M. M. Korotkov, and V. V. Migachev, JETP Letters 90, 499-503 (2009).

科苑快讯

植物隐藏的第二根系有助于对抗气候变化

科学家们发现,许多植物在地下3英尺处秘密长出了第二重根系网络,挖掘隐藏的营养库,可能将碳转移到微生物无法释放的地方。利用从冻土带到雨林的土壤深度核心样本,他们发现近1/5的生态系统显示出这种“双模”根系,这意味着地球植被更能抵抗气候变化。

发表在《自然通讯》(Nature Communications)上的这项研究,揭示了一种以前未知的根系模式,这是一个充满希望的发现,尤其是在全球二氧化碳达到80万年以来的最高水平之际。

研究小组使用美国国家生态观测网(National Ecological Observatory Network, NEON)的数据来检查生根深度,这个数据库包括地下6.5英尺(约1.98米),这比传统生态学研究的1英尺深度要深得多。研究人员因此能够探测到更多的根系模式,从阿拉斯加苔原到波多黎各热带雨林,跨越了不同气候带和生态系统类型。

科学家的工作集中在3个问题上:根的丰度如何随深度变化?影响根系深度分布的因素有哪些?与表层土壤相比,深层土壤中细根对养分的利用是相同、不足还是过度的?所有这些问题都是为了更好地理



解植物的资源获取策略及其对环境变化的响应能力。

研究人员发现,在被研究的生态系统中,近20%的根在深度上有两次高峰,这种现象被称为“双峰”。研究人员说,我们有限的地下视野意味着无法估计植物在土壤深处储存碳的全部能力,这些被忽视的土壤深层可能是在快速变化的气候中理解和管理生态系统的关键;植物可能已经率先积极缓解了气候变化,这是一个好消息,我们只需要深入挖掘,充分了解它们的潜力。

(高凌云编译自2025年6月27日SciTechDaily网站)