

# 氦-81定年技术突破：实现1公斤南极冰芯的定年

王杰<sup>1,†</sup> 卢征天<sup>1,2,††</sup> 蒋蔚<sup>1,3,†††</sup>

(1 合肥国家实验室 合肥 230088)

(2 中国科学技术大学 微尺度物质科学国家研究中心 合肥 230026)

(3 中国科学技术大学物理学院 合肥 230026)

2025-07-15收到

† email: wjie@hfnl.cn

†† email: ztl@ustc.edu.cn

††† email: wjiang1@ustc.edu.cn

DOI: 10.7693/wl20250806

CSTR: 32040.14.wl20250806

在地球两极的格陵兰岛与南极大陆，以及众多中低纬度的高山地区，积雪经年堆积、压实，最终形成了巨大的冰川。冰芯是从冰川上钻取的圆柱状雪冰样品，其内部封存着古代大气及大气沉积物，是古气候信息的重要载体。利用定年技术和成分分析手段，冰川学家能够解读这些冰芯中记录的气候环境历史，进而重建地球不同时间尺度的气候变化过程。例如，冰芯中水的氢氧同位素可反映全球温度和冰量的变化<sup>[1]</sup>；包裹气体揭示了远古大气中二氧化碳和甲烷等温室气体的含量(图1)；冰封的动植物残骸则保留了珍贵的古生物信息。因此，冰芯被视为研究古气候和环境的天然档案库，具有保真性高、信息量大、时间分辨率高、跨度长等独特优势。

20世纪50年代，科学家开始在南极和格陵兰冰盖上进行系统性冰芯钻探，旨在通过冰层记录揭示地球气候历史。1966年，南极伯德站(Byrd Station)首次钻取超过2000米的深冰芯，标志着现代冰芯研究的开端<sup>[2]</sup>。20世纪80至90年代，随着钻探技术的进步，东方站(Vostok Station)的冰芯深度突破3623 m。该深冰芯揭示了过去42万年的气候循环，发现大气二氧化碳与全球气候变化的紧密关联<sup>[3]</sup>。21世纪以来，欧洲南极冰芯钻探计划的冰穹C (EPICA Dome C)冰芯将记录进一步延伸至80万年前，发现了更早的冰期—间冰期旋回<sup>[4]</sup>。近年来，科学家在南极积极寻找更古老的“百万年冰芯”，以探索百万年前“中更新世气候转型”的机制<sup>[5]</sup>，其中“超越‘EPICA’-最古老冰芯”(Beyond EPICA-Oldest Ice)项目在小冰穹C点(Little Dome C)钻取了深度达到2800 m的冰芯，预计将揭示距今120万年前的地球气候与大气历

史关键数据。这些南极冰芯研究不仅推动了古气候学的发展，也为理解当前全球变暖提供了重要参照<sup>[6]</sup>。

解读冰芯中古气候信息的关键环节之一是准确测定冰芯的年龄。目前国际上主要利用年层学方法(stratigraphy)进行深冰芯定年<sup>[7]</sup>。该方法基于米兰科维奇理论，认为地球气候的周期性变化主要源于太阳辐照随地球轨道参数的变化。年层学定年首先测量连续冰芯中的多种气候指标，如稳定同位素( $\delta^{18}\text{O}$ )、温室气体( $\text{CO}_2$ 、 $\text{CH}_4$ )或粉尘含量；再通过轨道调谐(orbital tuning)，将这些指标



图1 充满包裹气泡的南极冰芯

随深度变化的曲线与天文计算得到的地球轨道参数进行匹配，最终建立冰芯的深度—年龄模型。然而，年层学方法只适用于完整连续的冰芯样品，对于冰川底部年龄更古老的基底冰(basal ice)则难以适用。这是因为基底冰在运动过程中经常受到扰动，出现不连续和翻转等现象，导致传统年层学方法失效。因此基底冰的年龄测定一直是冰川学领域的技术难题。如果能解决这一问题得到古老基底冰的年龄，就有希望进一步拓展冰芯覆盖的年代范围，通过研究其中记录的古气候信息来帮助回答诸如“中更新世气候转型”等重要科学问题。

基于稀有气体放射性同位素 $^{81}\text{Kr}$ 的定年方法，为解决深冰芯的定年难题提供了新途径。 $^{81}\text{Kr}$ 的半衰期为23万年，可覆盖从2万年到130万年的定年范围。 $^{81}\text{Kr}$ 主要由宇宙射线与大气中稳定氪同位素的核反应产生，来源相对单一。由于半衰期长， $^{81}\text{Kr}$ 在大气中得以充分混合，空间分布均匀，历史含量也相对稳定。此外， $^{81}\text{Kr}$ 具有化学惰性，使其在环境中的运输机理简单明确。这些特性使得 $^{81}\text{Kr}$ 成为古老冰芯定年的理想示踪同位素。通过测量冰芯包裹气中 $^{81}\text{Kr}$ 的同位素丰度，

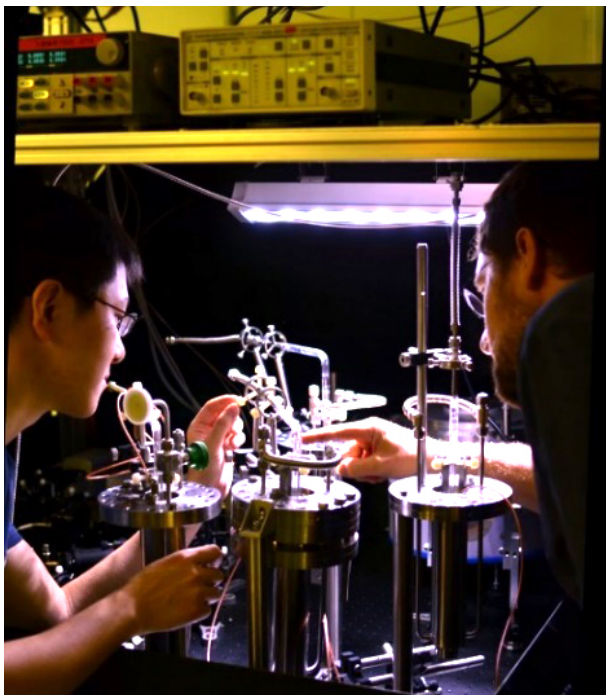


图2 研究人员调试真空紫外光源

即可根据衰变公式确定冰芯的气体年龄。与传统的定年方法相比， $^{81}\text{Kr}$ 定年法能给出冰芯的绝对年龄，且不要求冰芯是连续的，因此特别适用于冰川底部的基底冰或抬升至冰川表面的古老蓝冰的定年。同时，作为一种独立的定年方法， $^{81}\text{Kr}$ 也可为连续冰芯提供绝对年龄的锚点，为年层学定年提供约束。自20世纪60年代探测到空气中的 $^{81}\text{Kr}$ 同位素以来，科研人员一直梦想利用它对百万年尺度的冰芯进行定年。然而，自然环境样品中 $^{81}\text{Kr}$ 的同位素丰度极低( $10^{-13}$ — $10^{-14}$ 量级)，传统检测手段难以实现测量分析。

1999年，卢征天提出了原子阱痕量分析方法(atom trap trace analysis, ATTA)，从原理上解决了 $^{81}\text{Kr}$ 的测量难题<sup>[8]</sup>。该方法基于冷原子物理技术，利用磁光阱(magneto-optical trap, MOT)捕获 $^{81}\text{Kr}$ 原子，再通过荧光信号对其计数，从而确定 $^{81}\text{Kr}$ 的同位素丰度。原子阱痕量分析方法具备超高的同位素选择性和单原子水平的检测灵敏度，是目前唯一能够对环境样品中 $^{81}\text{Kr}$ 同位素进行定量分析的实验技术<sup>[9]</sup>。随着原子阱痕量分析方法的不断发展，近年来 $^{81}\text{Kr}$ 定年方法已逐步应用于山地冰、蓝冰与深冰芯的定年研究<sup>[10—12]</sup>。

激光捕获氪原子需要一个前提：先将氪原子从基态激发到亚稳态，才能利用磁光阱对亚稳态原子进行冷却与囚禁。原子阱痕量分析方法此前均采用气体放电技术来制备亚稳态氪原子。该方案虽然简单可靠，但也存在制备效率较低和样品交叉污染等问题。因此单次 $^{81}\text{Kr}$ 定年分析至少需要10公斤的冰样，相当于数米长的冰芯。较大的样品需求量制约了该技术对冰川底部基底冰的定年应用，因为这些珍贵的基底冰芯通常总长度仅有十几米。此外，在长期堆积压实的作用下，每米厚度的基底冰芯可能跨越了数万年的年龄范围。为了建立基底冰芯年龄与深度的关系，并提升定年的空间分辨率，原子阱痕量分析方法亟需通过改进亚稳态氪原子制备方案，将样品需求量降低至1公斤以下。

2021年，中国科学技术大学的研究团队设计出一种高亮度、窄带的124 nm真空紫外光源，用于高效、共振地激发氪原子至亚稳态<sup>[13]</sup>。团队提

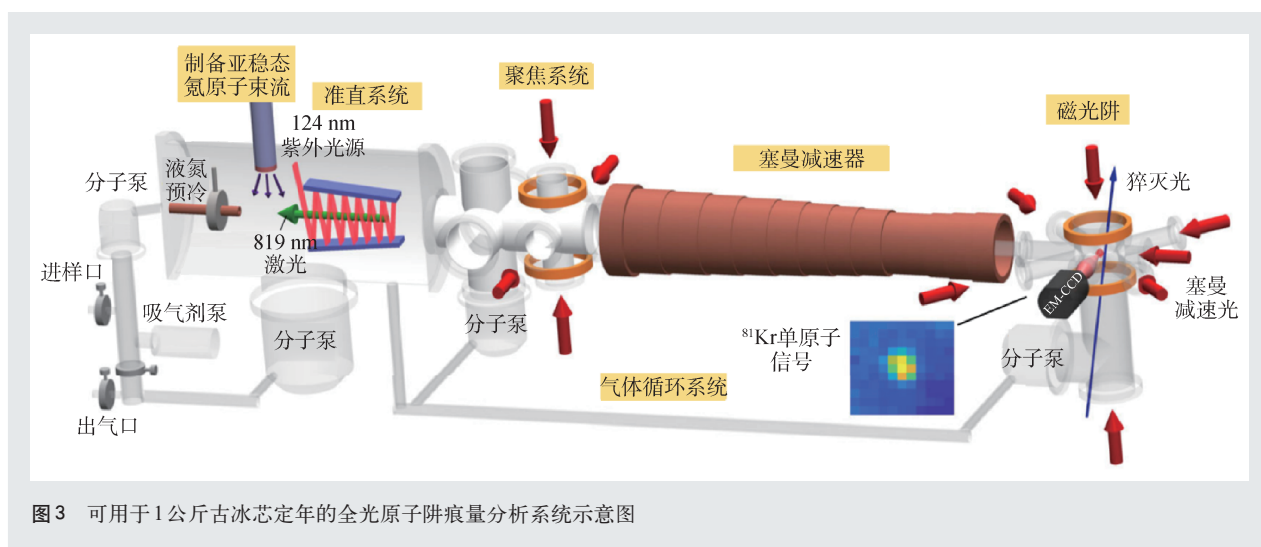


图3 可用于1公斤古冰芯定年的全光原子阱痕量分析系统示意图

出了一种不同于传统“自吸收”理论的新机制，来解释真空紫外光子在光源中的传输过程：光子在光源内部多次散射后并未大量损失，而是频率发生了偏移，正是这种频率偏移降低了氦原子的光激发效率。团队基于这一新的认识反复优化实验，设计出具有独特内部结构的真空紫外光源(图2)。新光源在保持高亮度的同时，有效减少了124 nm光频率的偏移。此外，光源寿命显著延长，达到上百小时的实用化水平。依托这项光源技术，团队实现了对氦原子的高效光激发。

为使该技术可以应用于实际冰芯样品，团队又历经四年攻关，解决了一系列技术难题，最终研制出能分析1公斤冰芯样品的全光原子阱痕量分析仪器(图3)。分析过程中，来自冰芯包裹气的氦气样品从仪器左端进入，在真空紫外光源与819 nm激光的共同作用下形成亚稳态氦原子束流。原子束流随后经过多级原子光学系统，被准直、聚焦和减速，最后到达仪器右端的磁光阱。通过高灵敏相机探测单个 $^{81}\text{Kr}$ 原子在磁光阱中散射的荧光，可以对原子进行计数，并将原子计数率转换为样品的 $^{81}\text{Kr}$ 丰度。

新型全光原子阱痕量分析方法将系统样品交叉污染的影响降低了两个数量级。这一突破将定年所需的冰芯样品量从原来的10公斤水平减至1公斤，同时将定年上限扩展至150万年。依托该方法，团队与普林斯顿大学冰川学家合作，对来自南极泰勒冰川的两个1公斤冰样进行了验证性定年研究。结果显示， $^{81}\text{Kr}$ 定年给出的年龄与传

统冰层年代学方法得到的13万年年龄高度吻合，验证了 $^{81}\text{Kr}$ 定年方法的准确性与可靠性<sup>[14]</sup>。

全光原子阱痕量分析方法使得极少量冰芯样品的 $^{81}\text{Kr}$ 定年成为可能，这将为冰川学和古气候研究领域带来新的研究机遇。例如：对格陵兰冰盖基底冰进行系统性定年，有助于确定该冰盖最后一次完全融化的时期<sup>[15]</sup>；在青藏高原冰川研究中， $^{81}\text{Kr}$ 同位素定年技术可用于寻找和确认该地区最古老的冰川，为研究冰川发育和演化提供年代学依据<sup>[16]</sup>；对南极深冰芯进行 $^{81}\text{Kr}$ 定年分析，可帮助科学家寻找百万年古老冰芯，为探究“中更新世气候转型”问题提供重要线索<sup>[17]</sup>。

## 参考文献

- [1] NEEM Community Members. *Nature*, 2013, 493: 489
- [2] Thompson L *et al.* *Journal of Glaciology*, 1975, 14: 433
- [3] Petit J R *et al.* *Nature*, 1999, 399: 429
- [4] Jouzel J *et al.* *Science*, 2007, 317: 793
- [5] Clark U P *et al.* *Quaternary Science Reviews*, 2006, 25: 3150
- [6] Kawamura K, Oyabu I. *Nature*, 2024, 630: 825
- [7] Cuffey A, Paterson W. *Journal of Glaciology*, 2010, 57: 383
- [8] Chen C Y *et al.* *Science*, 1999, 286: 1139
- [9] Jiang W *et al.* *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2012, 91: 1
- [10] Tian L *et al.* *Geophysical Research Letters*, 2019, 46: 6636
- [11] Bouchet M *et al.* *Climate of the Past*, 2023, 19: 2257
- [12] Hu Z Y *et al.* *The Cryosphere*, 2024, 18: 1647
- [13] Wang S J *et al.* *Phys. Rev. Lett.*, 2021, 127: 023201
- [14] Ritterbusch F *et al.* *Nature Communications*, 2025, 16: 4394
- [15] Schaefer J *et al.* *Nature*, 2016, 540: 252
- [16] Thompson L *et al.* *Science*, 1997, 276: 1821
- [17] Parrenin F *et al.* *The Cryosphere*, 2017, 11: 2427