



放射性氦、氦同位素定年 方法与应用

报告人：卢征天

中国科学技术大学 近代物理系
中科院量子信息与量子科技创新研究院
合肥微尺度物质科学国家研究中心

2020年11月

創寰宇學府
育天下英才

嚴濟慈
一九八八年五月
題

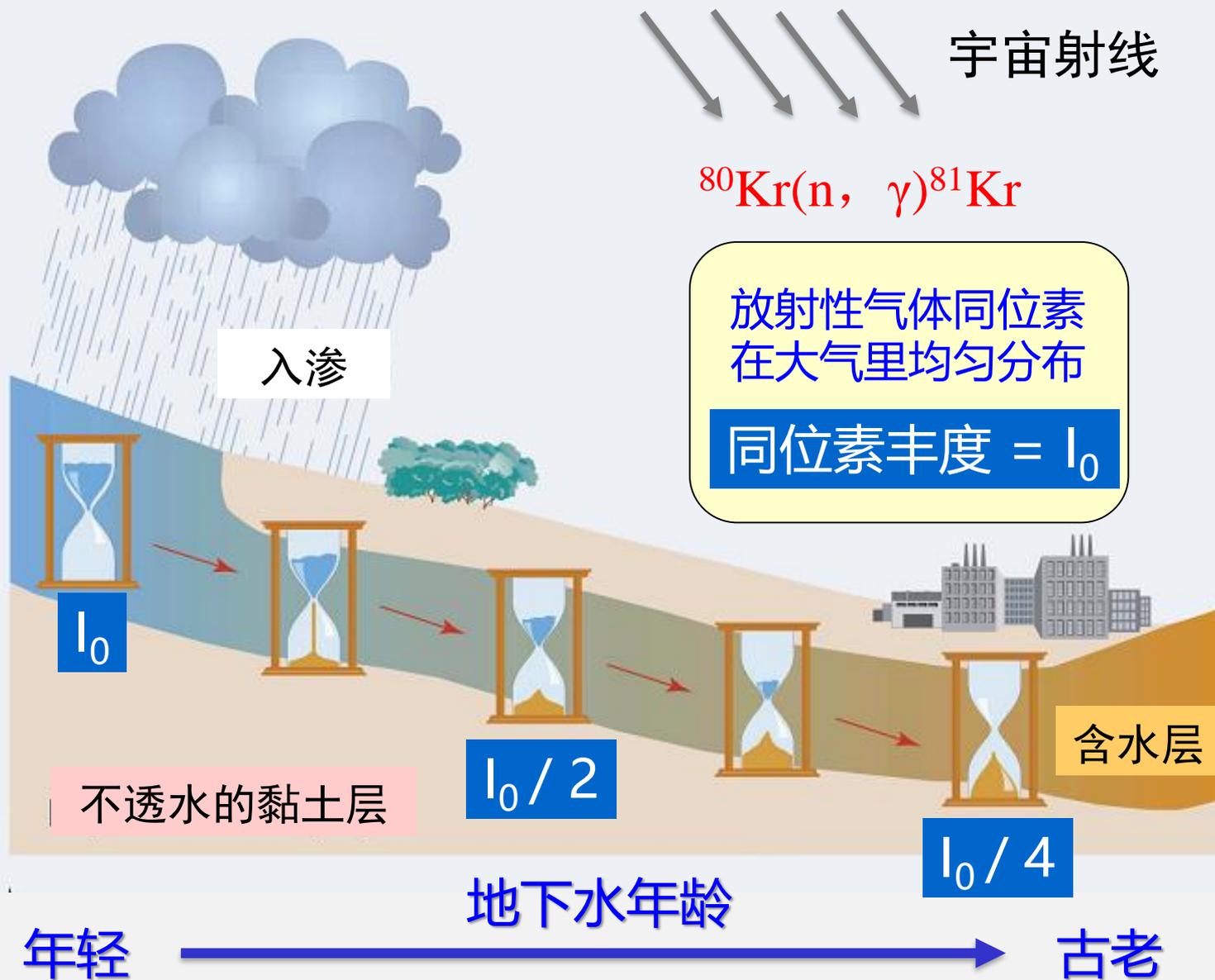
中科大激光痕量探测与精密测量实验室



atta.ustc.edu.cn

感谢支持：基金委、科技部、中科院

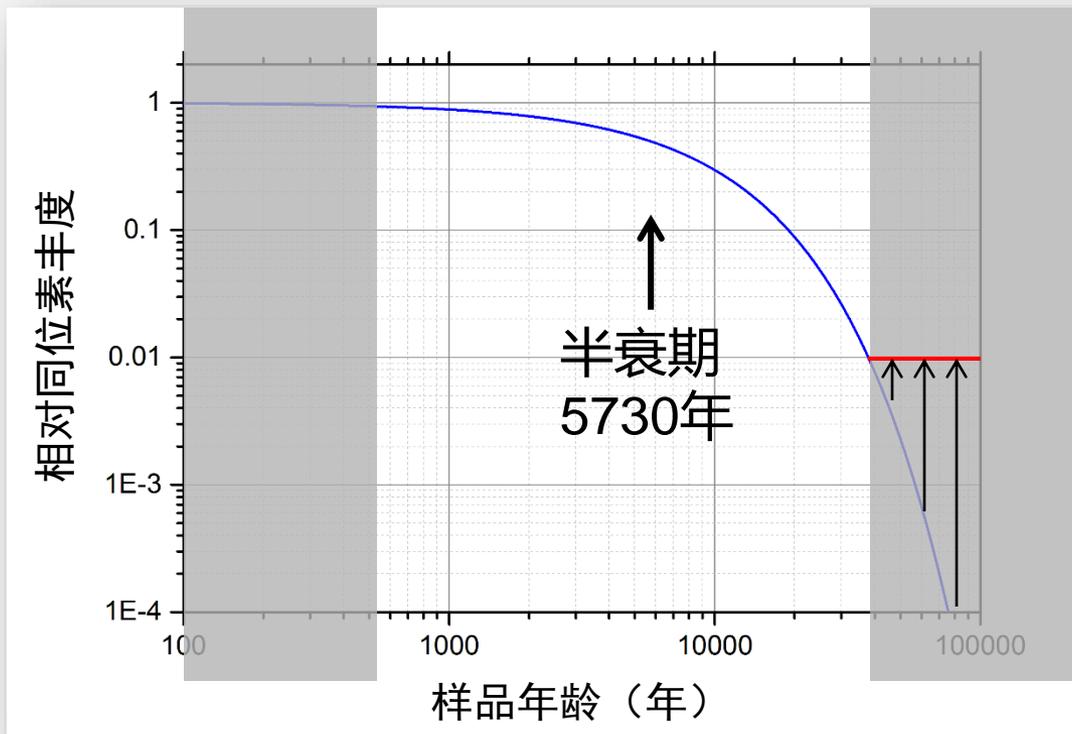
放射性气体同位素定年原理



碳-14 (^{14}C) 定年、示踪

- 广泛应用：地球与环境科学、考古……
- 定年范围：5百年 - 4万年

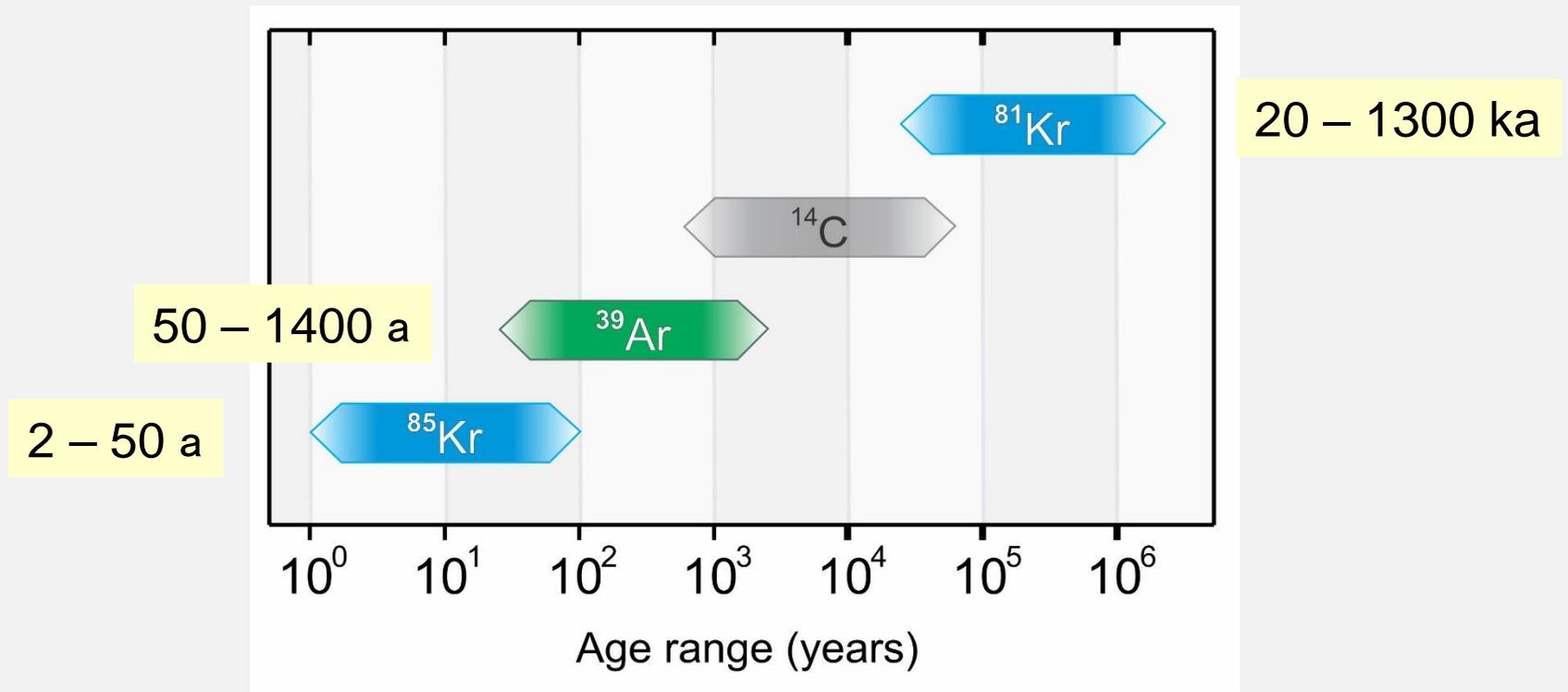
形成稳定气体!



Willard Libby (1908-1980)
芝加哥大学
1960 诺贝尔化学奖

放射性气体同位素定年、示踪

- 气体：在大气中分布均匀、稳定。
- 惰性：无化学反应，运输机制简单。
- 与 ^{14}C 一起，覆盖了从几年到140万年的范围。



^{85}Kr 、 ^{39}Ar 、 ^{81}Kr 是理想的定年同位素

科学意义和技术要求



Hans Oeschger
1927 – 1998



Hugo Loosli
Univ. of Bern

- ^{81}Kr 、 ^{39}Ar 等是环境水的理想测年同位素
——Loosli & Oeschger, *Earth Planet Sci. Lett.* (1969)
- 测量极为困难：同位素丰度极低！

	产生机制	半衰期	同位素丰度	原子数 / 公斤水
^{85}Kr	人工核裂变	11年	2×10^{-11}	30,000
^{81}Kr	宇宙射线	23 万年	6×10^{-13}	1,000
^{39}Ar	宇宙射线	269 年	8×10^{-16}	8,000

技术要求

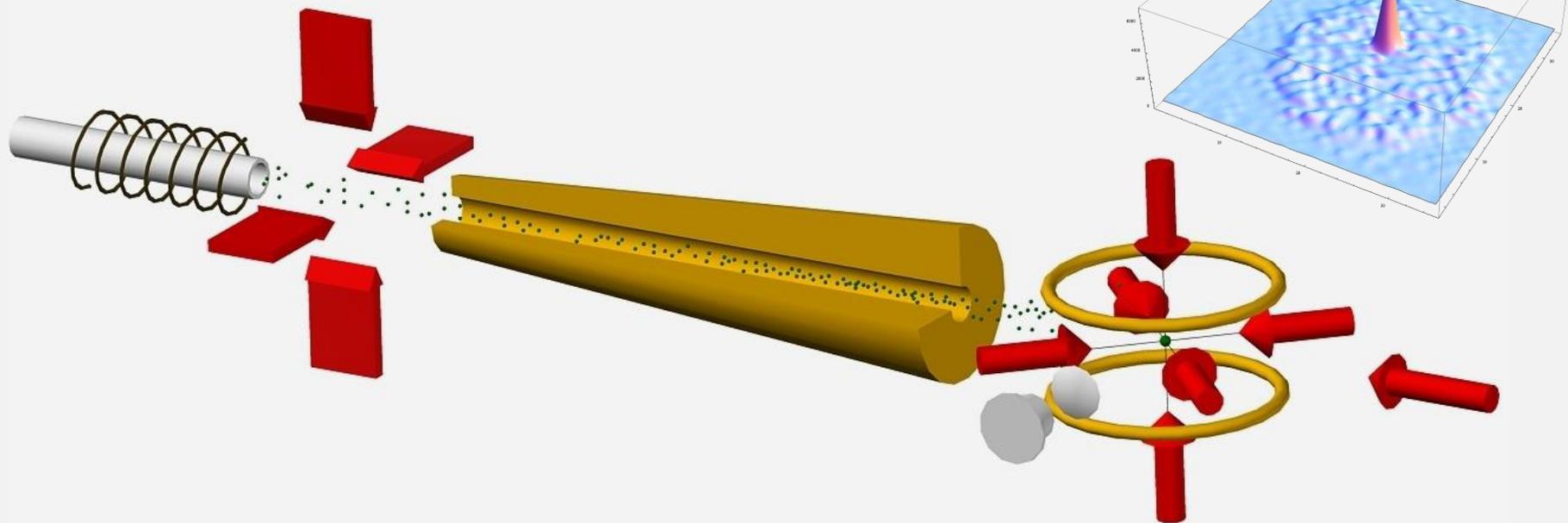
- 高效率：数样品所含的原子
- 高选择：特定同位素分辨，抗干扰

原子阱痕量分析方法

Atom Trap Trace Analysis (ATTA)

直接对单原子进行“计数”！

单个⁸¹Kr原子
CCD 荧光图像

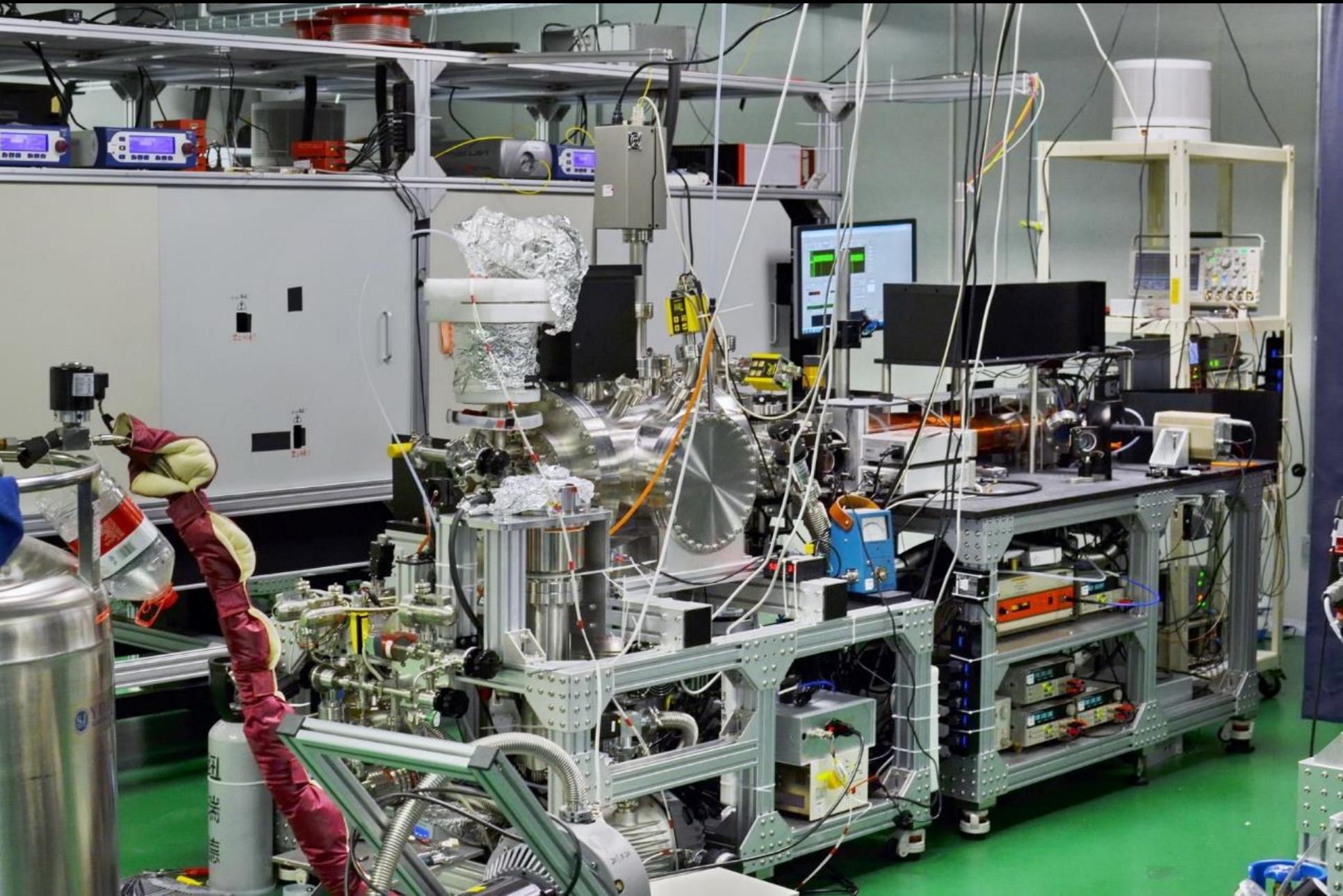


Ultrasensitive isotope trace analyses with a magneto-optical trap

C.Y. Chen, Y.M. Li, K. Bailey, T.P. O'Connor, L. Young, Z.-T. Lu*

Science 286, 1139 (1999)

ATTA-Kr for Kr-81 at USTC



自我检查

在不同实验条件下测量:

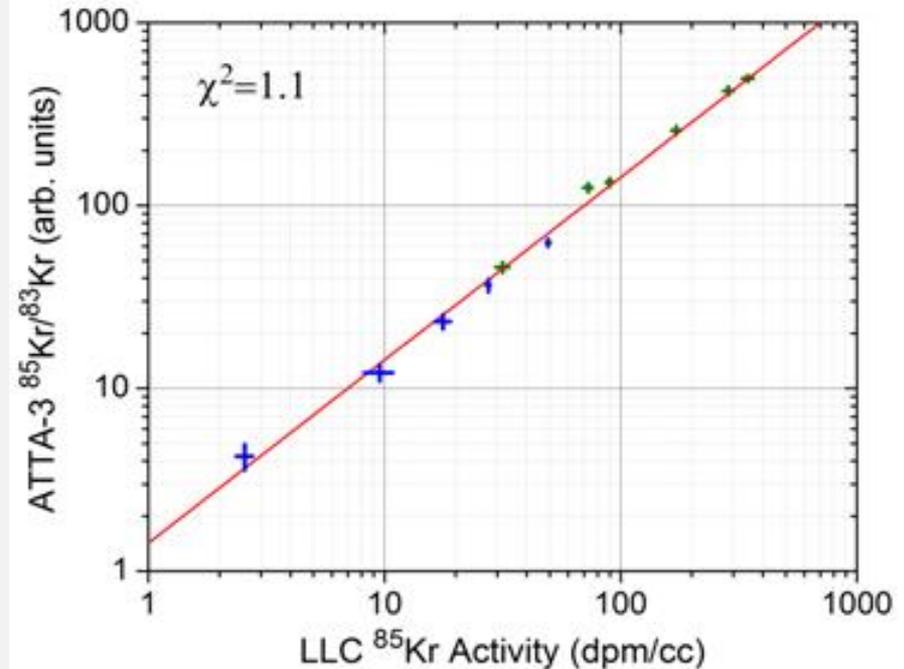
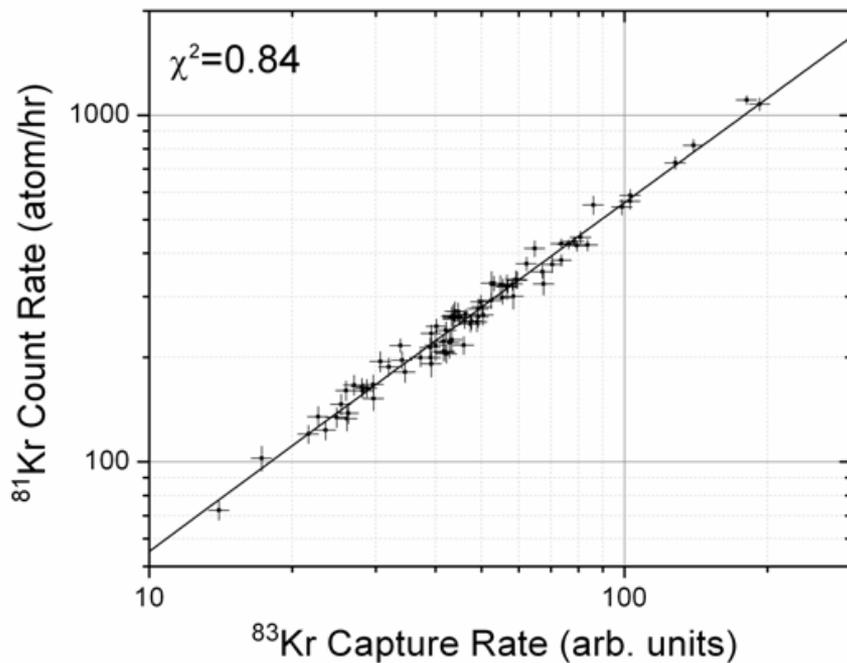
- 激光功率
- 光路重调
- 放电强度
- 气压

实验室之间的比对

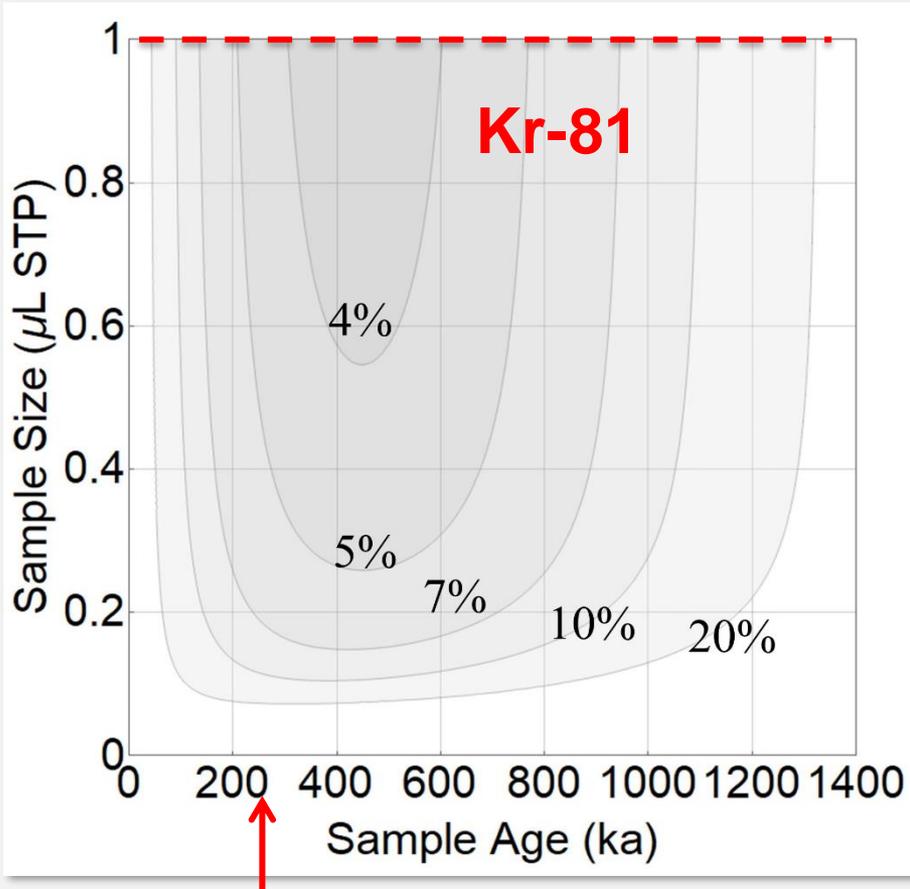
- 头一批, 6个样品, **unblind**
- 第二批, 6个样品, **blind**



Roland Purtschert
University of Bern

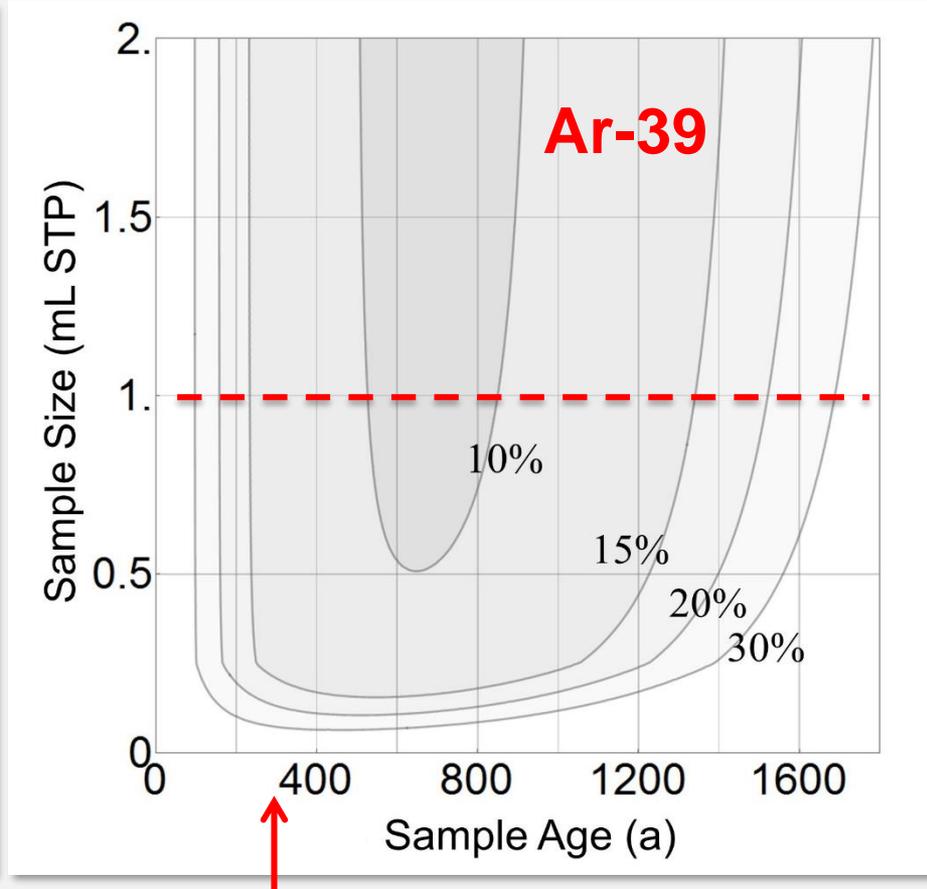


Sample Size and Measurement Precision



Half-life 230 kyr

1 $\mu\text{L STP Kr}$
20 kg water



Half-life 269 yr

1 mL STP Ar
2 kg water

单次分析所需的 地下水、海水、冰川冰样品量 (单位: 公斤)

	定年范围	地下水	海水	青藏高原冰	南极洲冰
^{85}Kr	2 – 50 a	20 kg	8 kg	10 kg	
^{39}Ar	50 – 1300 a	10 kg	4 kg	2 kg	
^{81}Kr	20 – 1300 ka	50 kg		30 kg	5 kg

假设含气量

30 ml air/kg

Web search “**ATTA Primer**”



中国科学技术大学

University of Science and Technology of China

放射性氪、氙同位素定年流程

- 1000 ^{81}Kr atoms in 1kg of ice



Ground water

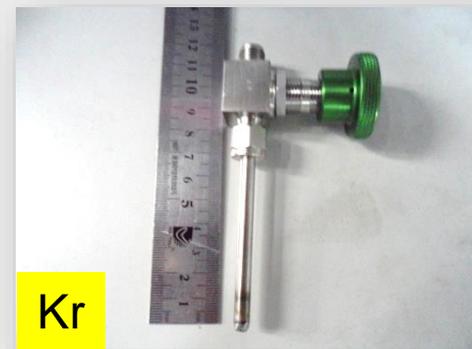
20-40kg

Gas extraction



1-2L STP

Kr purification

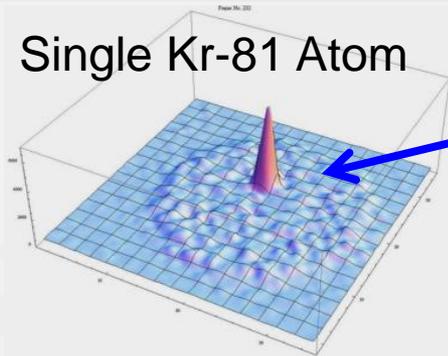


Kr

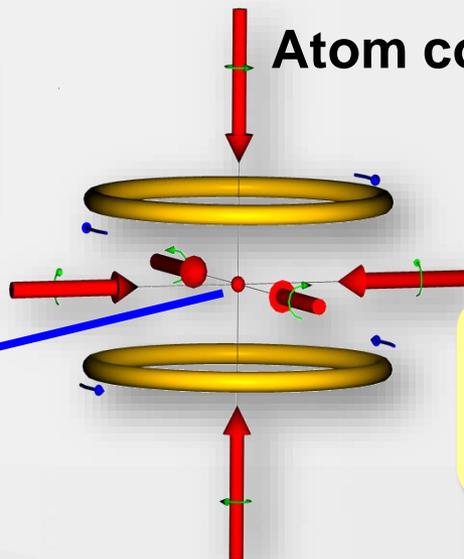
1-2 μL STP

Atom Trap Trace Analysis (ATTA)

Single Kr-81 Atom



Atom counting



$$\frac{[^{81}\text{Kr}/\text{Kr}]_{\text{sample}}}{[^{81}\text{Kr}/\text{Kr}]_{\text{air}}} = 2^{-\left(\frac{\text{Age}}{\text{Half-life}}\right)}$$



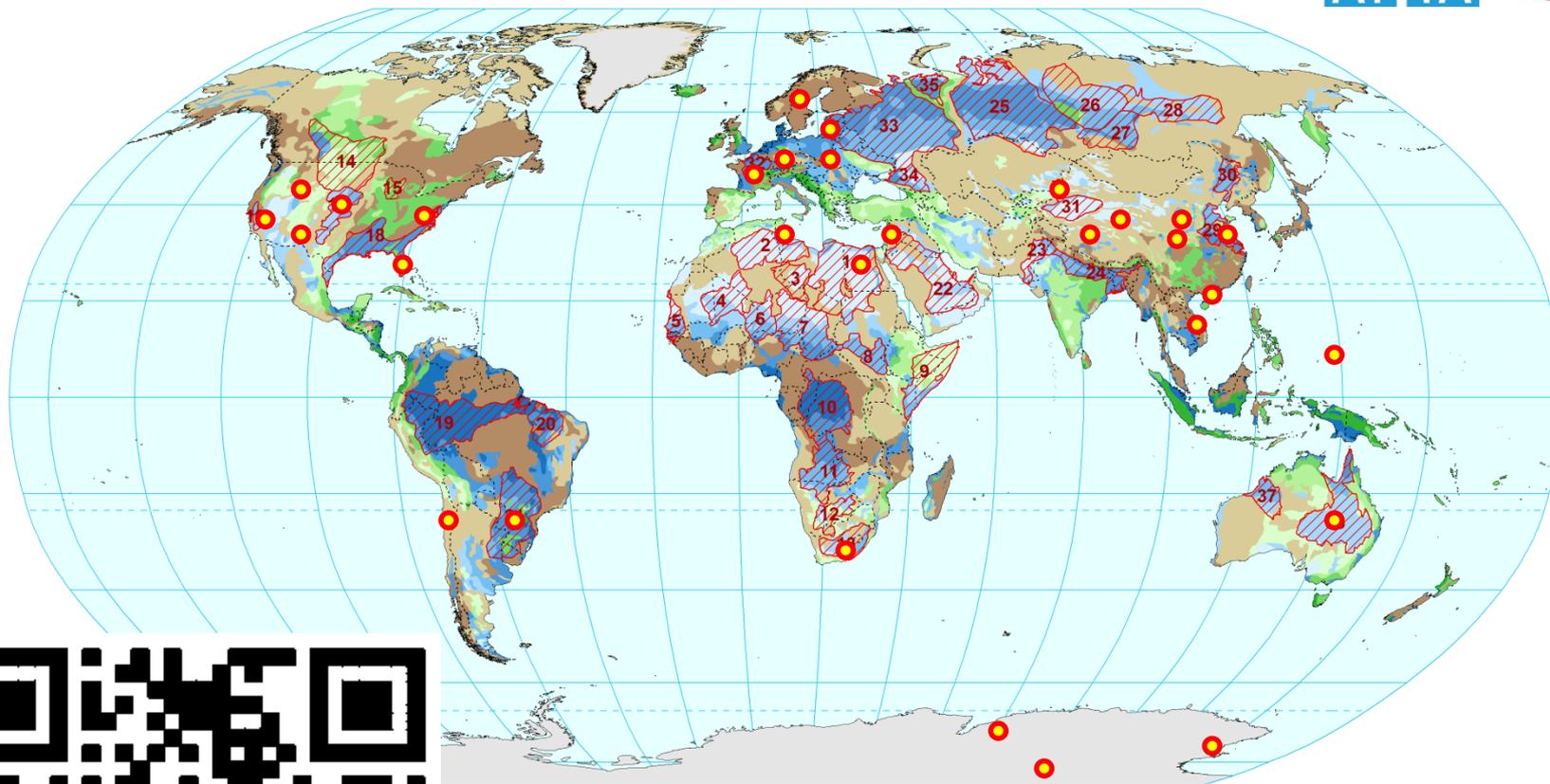
井边直接取气体样品
阿根廷潘帕斯平原，2019





Groundwater Resources of the World

- Large Aquifer Systems -



Web search "ATTA Primer"

国际原子能组织 CRP F33023 项目 -- 用⁸¹Kr给古水定年



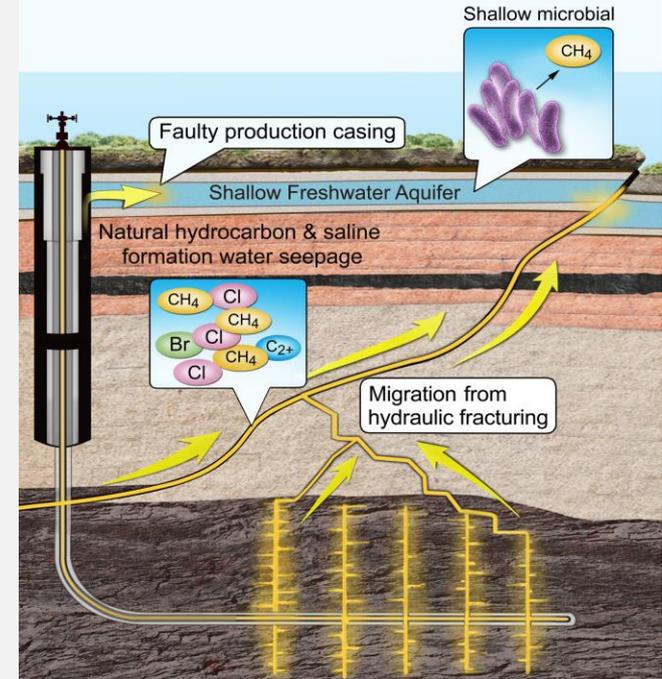
亚洲：中国、日本、印度； 澳洲：澳大利亚；
非洲：摩洛哥、阿尔及利亚、突尼西亚； 欧洲：爱沙尼亚、匈牙利；
北美：加拿大； 南美：巴西、阿根廷

New Ideas

*A critical review of state-of-the-art and emerging approaches to identify **fracking**-derived gases and associated contaminants in aquifers*

J. C. McIntosh^{1,*}, M. J. Hendry², C. Ballentine³, R. S. Haszeldine⁴, B. Mayer⁵, G. Etiope⁶, M. Elsner⁷, T. H. Darrah⁸, A. Prinzhofer⁹, S. Osborn¹⁰, L. Stalker¹¹, O. Kuloyo¹², **Z.-T. Lu**¹³, A. Martini¹⁴, B. Sherwood Lollar¹⁵

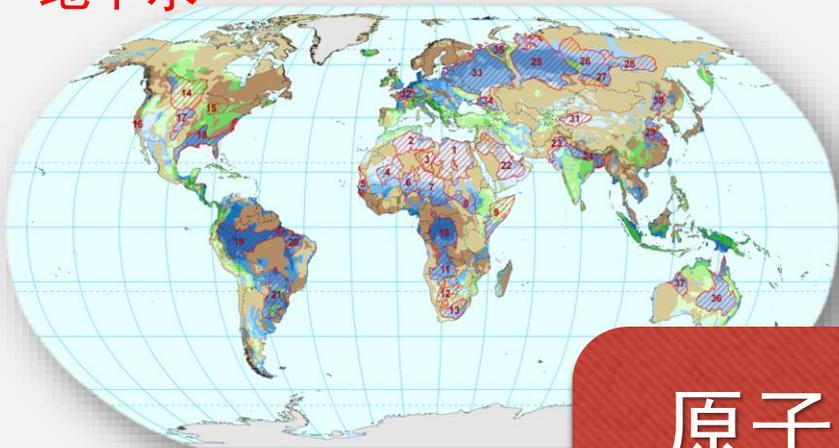
ES&T (2019)



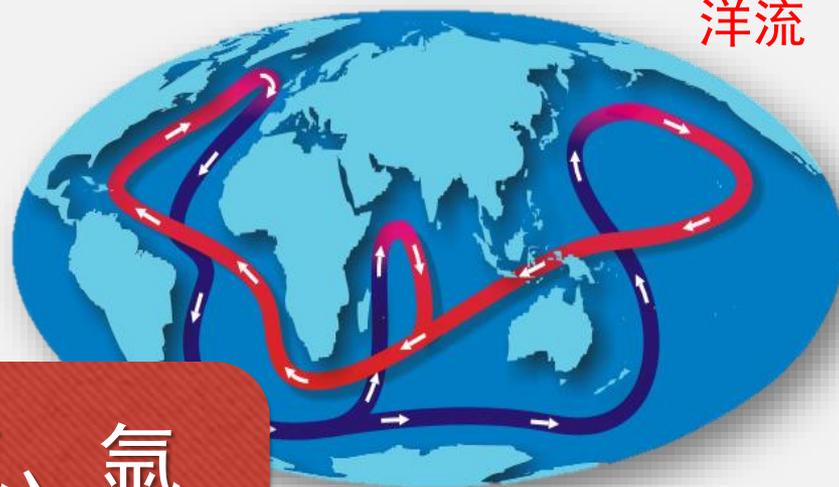
- ***CO₂ sequestration***
- ***Volcanic released gas***
- ***Hydrothermal vent***



地下水



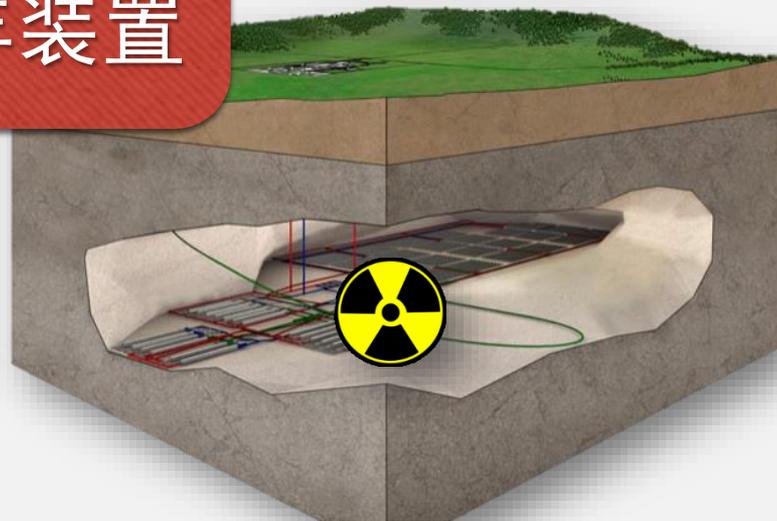
洋流



原子阱氦、氦
同位素定年装置



冰川



环境监测与核安全