

释光测年

**Luminescence dating**

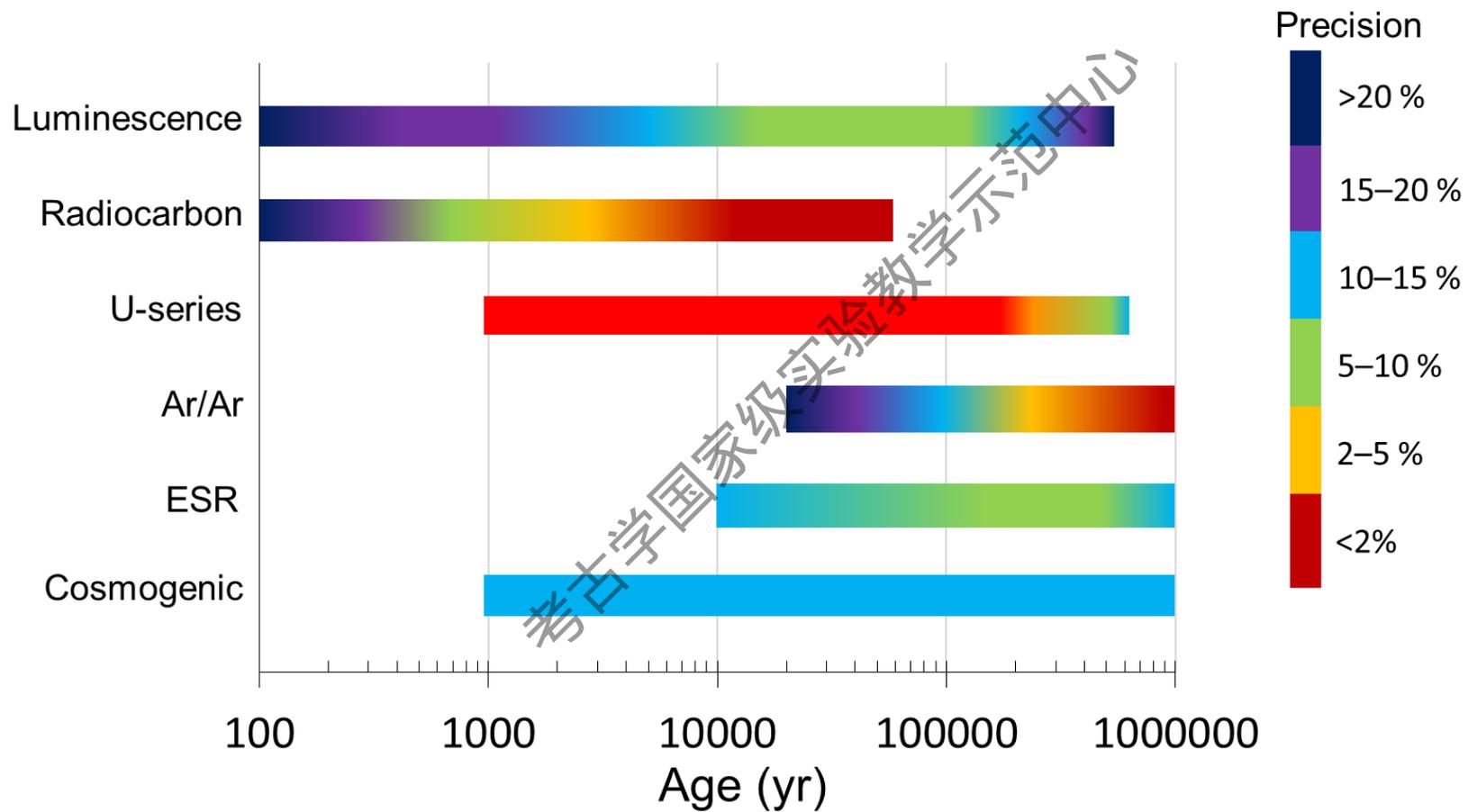
考古学国家级实验教学示范中心

# 结 构

- ❖ 释光学基础
  - 什么是释光
  - 释光测年的基本原理
- ❖ 如何使用这种测年工具
  - **基本要求**
- ❖ 采样、实验室设备以及过程
- ❖ 考古学上的应用
  - 测年范围
  - 案例研究

考古学国家级实验教学示范中心

你都知道哪些第四纪考古测年技术?



# 为什么释光测年?

- **地质年代:** 为沉积物提供年代

沉积物可为古环境, 古气候变化及地貌, 生态, 生物群改变提供关键信息。

- **考古遗址年代:** 为文化遗物和化石所在地层提供年代

为人类进化历史, 文化和技术发展提供关键信息。

## 优点:

- 可以用来测量碳十四测年范围达不到的地层 (???)
- 可以测年地球上绝大多数的沉积物
- 高分辨率测年结果

# 定义

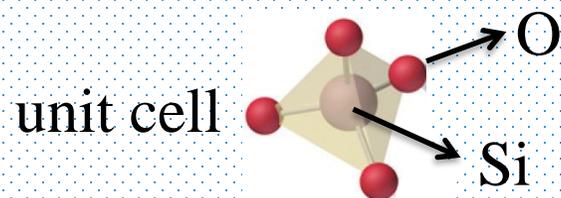
**释光**：物质在接收到诸如光子、X光、电离粒子（alpha, beta, gamma）、化学反应、电场以及加热等能量的激发下，从内部结构中（比如晶体）散发出光的过程。

释光测量过程中常用到的激发来源：

- 热能 => 热释光(thermoluminescence, TL)
- 光能 => 光释光(optically stimulated luminescence, OSL),  
红外 => 红外释光(infrared stimulated luminescence, IRSL)
- 辐射 => 辐射释光(radioluminescence, RL)

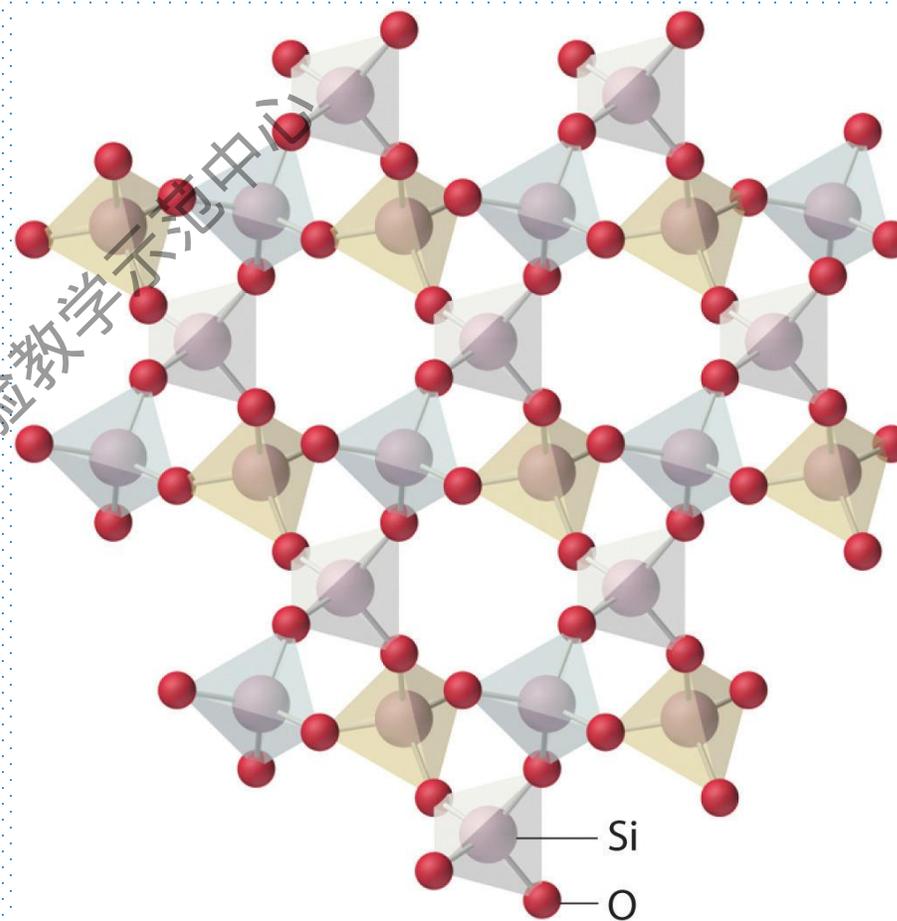
## 什么是晶体？

- 原子、离子、分子等按一定的规则有序几何排列的固体物质

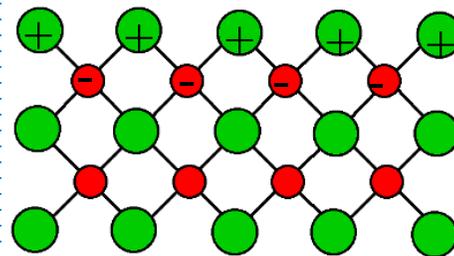
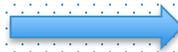


- 晶格可以理解为一系列‘小盒子（unit cell）’不断的重复出现在三维立体中

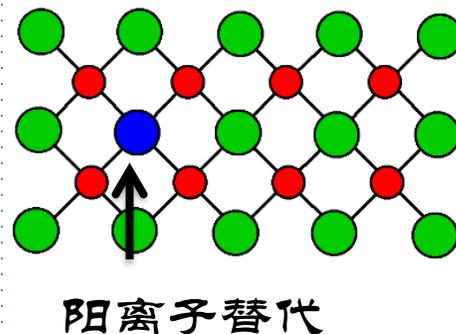
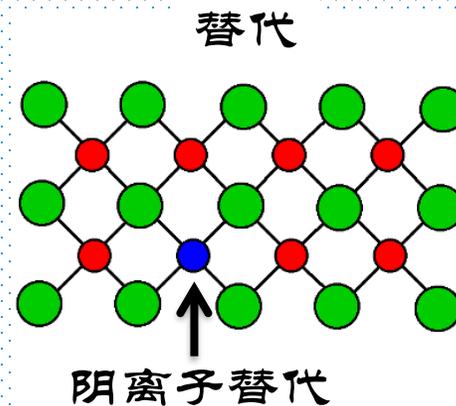
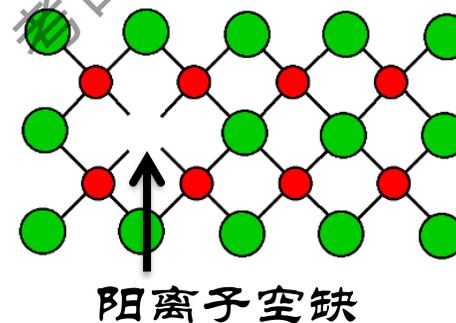
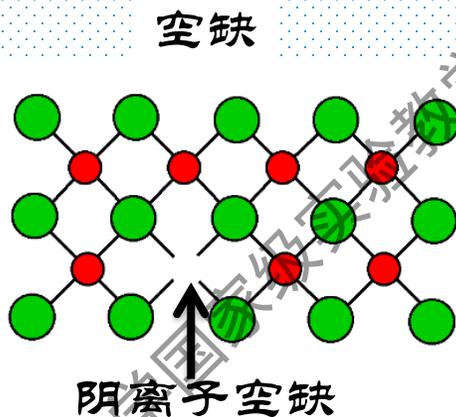
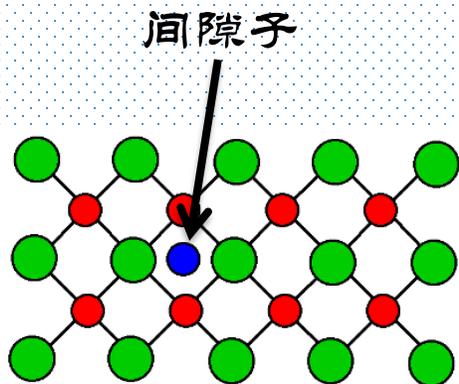
## 石英晶格( $\text{SiO}_2$ )



完美的晶格



完美的晶体材料是不存在的! **缺陷(defects)**打破了排列有序的结构.



# 缺陷对我们并不是坏事!

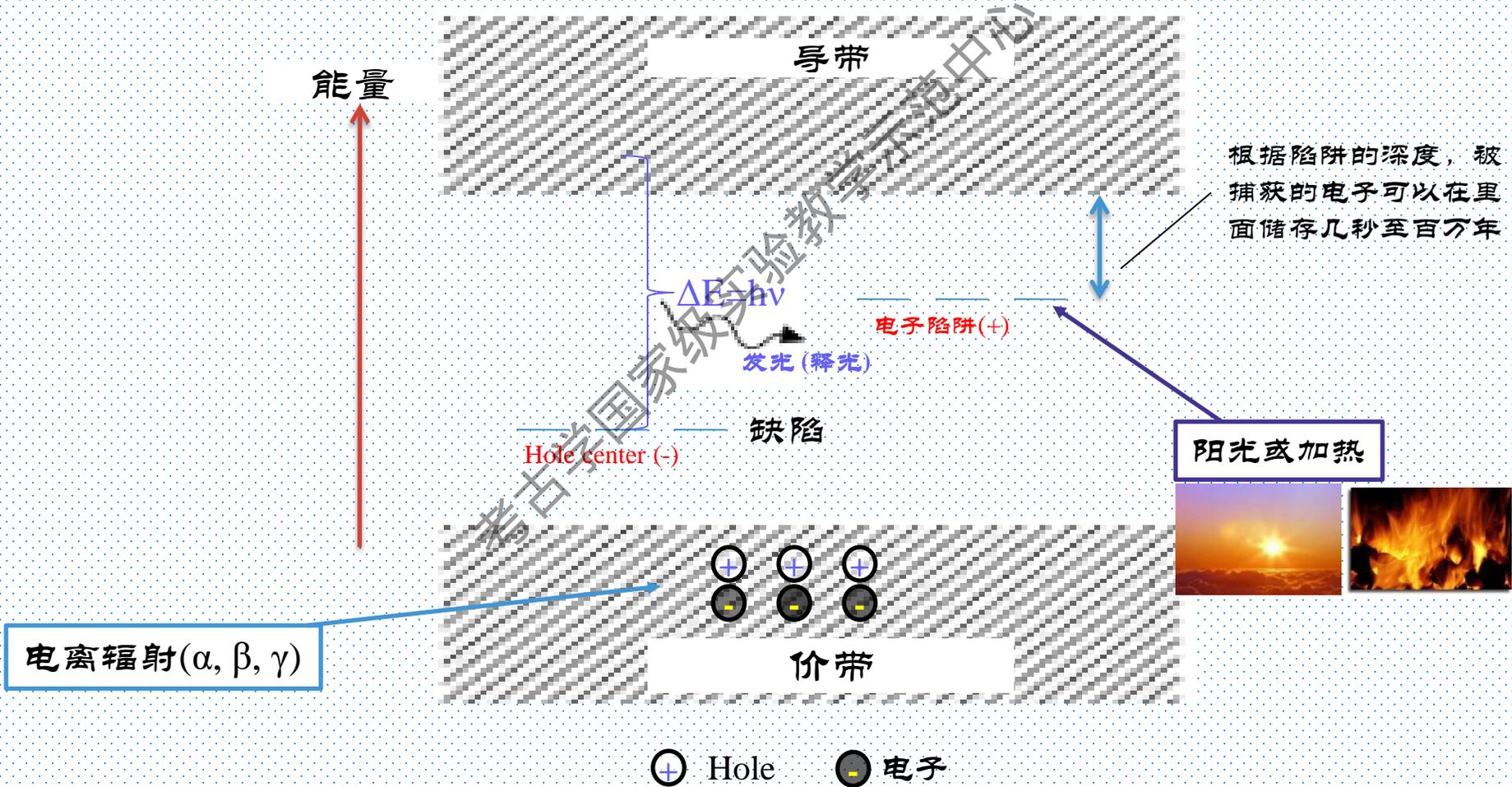
缺陷破坏了晶格内部电荷平衡，这种不平衡需要以某种方式修复：

- 例如，当晶格中的离子被外部带不同电荷的离子所替代时会使得电荷失去平衡。为了保持这种平衡即保持晶格的中性性质，这种替代通常会伴随伴随晶格空穴的产生，以及改变晶格内部离子的价态。
- 保持这种平衡可以通过电子(-e)或者holes (+e)被捕获到陷阱中来实现。例如，一个在缺陷中的带正电荷的离子可以捕获一个电子来保持中性。

正是因为缺陷捕获自由电子的能力构成了释光测年的基础。

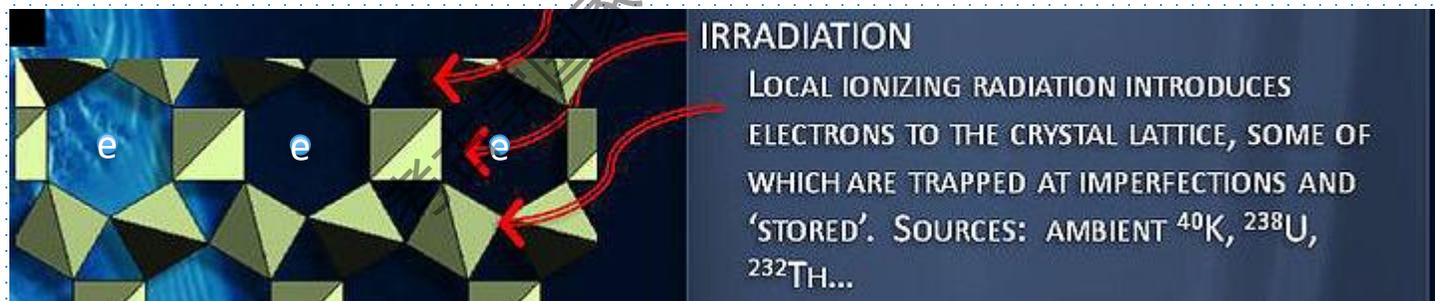
# 释光过程的能量转换

## 晶体内部的能级图



# 释光过程

- 辐射 => 释放在缺陷中捕获的电子



# 释光过程

- 辐射 => 释放在缺陷中捕获的电子
- 储存 => 捕获电子



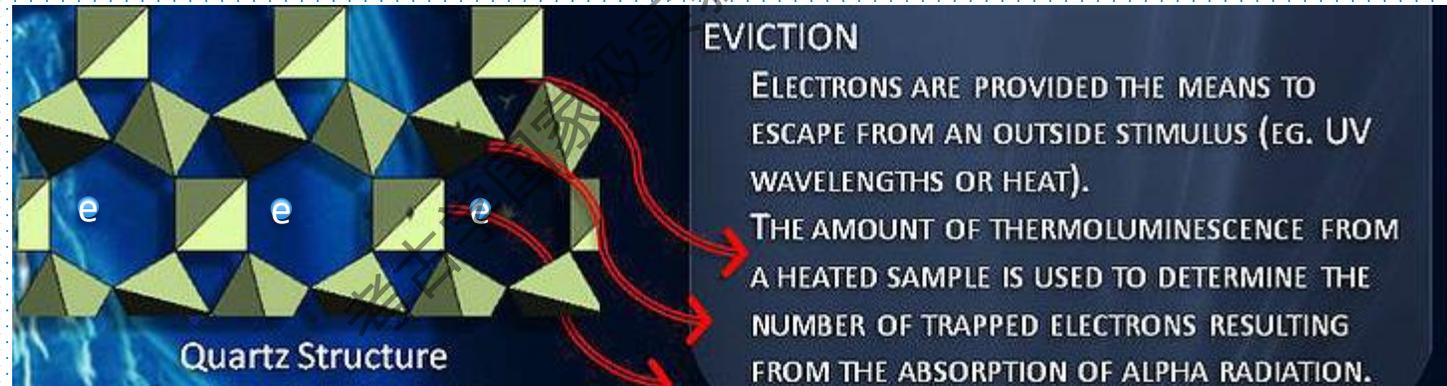
# 释光过程

- 辐射 => 释放在缺陷中捕获的电子
- 储存 => 电子被捕获
- 激发 => 释放被捕获电子 => 发光

光激发



热激发



释光强度和被释放的电子数量成正比

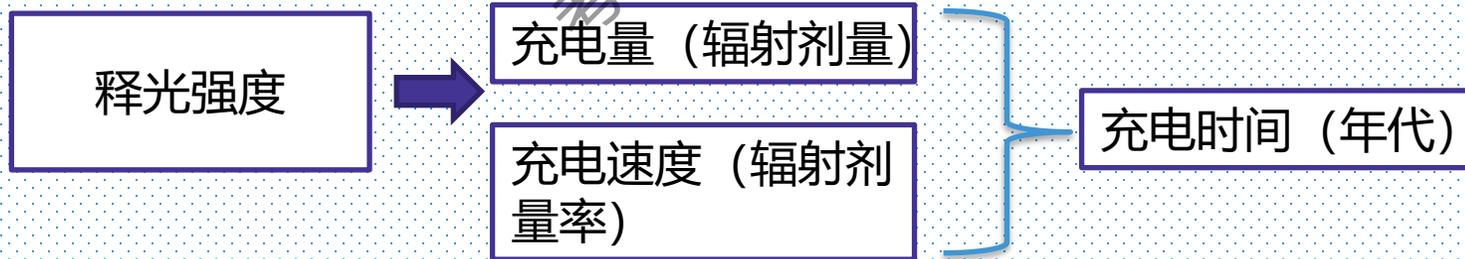
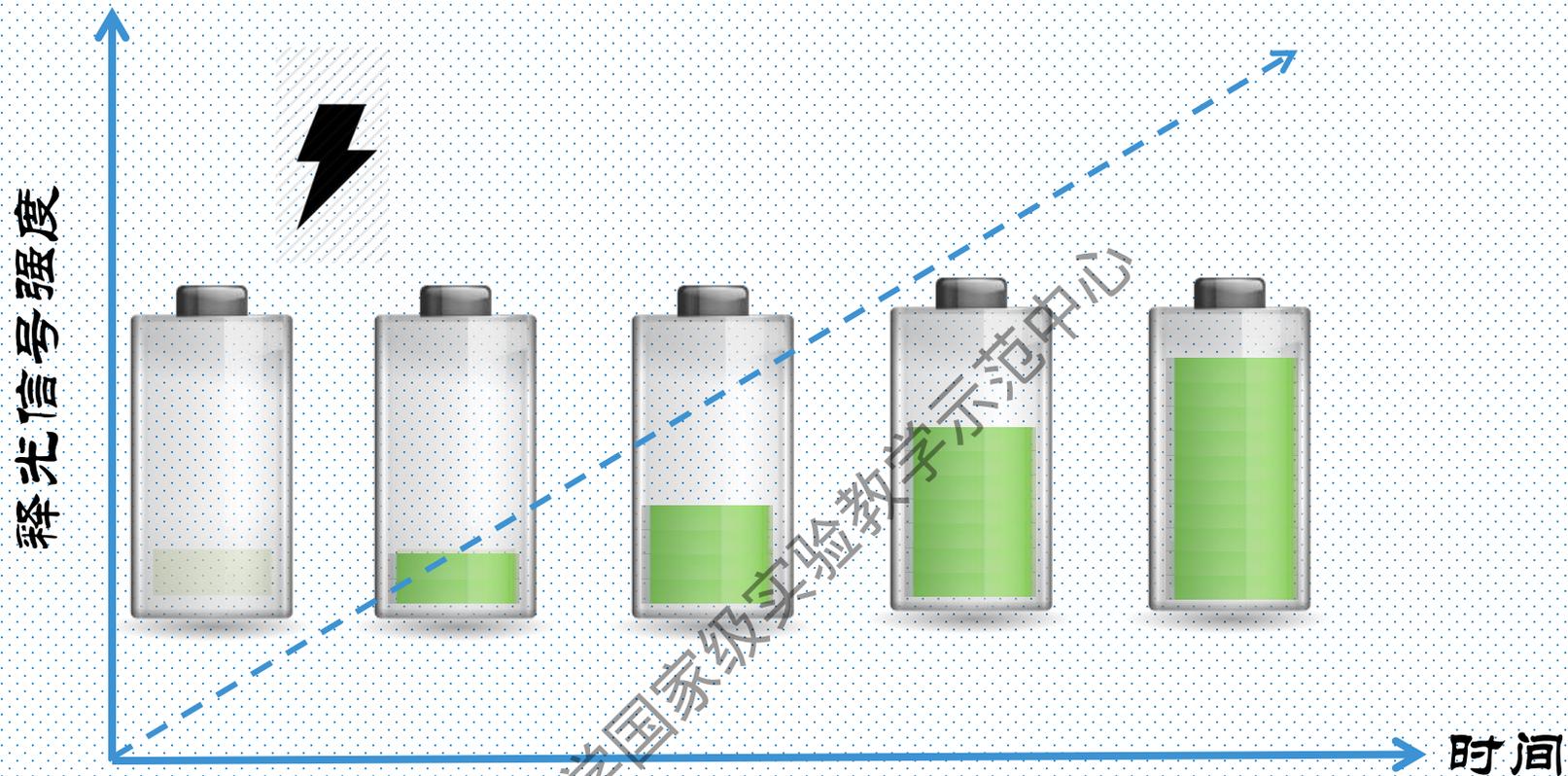
# 释光过程 ⇔ 电池充电过程



时间因素: 电池充电时间越长, 储存的电量越多

→ 释光能量储存越多

# 释光 (储存的能量) VS. 时间



# 年龄公式

辐射总量or 等效剂量  
(equivalent dose,  $D_e$ )

$$D_e = \int_0^T \dot{D}(t) dt$$

如果年剂量 ( $\dot{D}(t)$ ) 在整个沉积时间内是稳定的:

$$\text{年代, } T \text{ (ka)} = \frac{\text{总剂量, } D_e \text{ (Gy)}}{\text{年剂量, } \dot{D} \text{ (Gy/ka)}}$$

- 辐射剂量的单位为焦耳每千克 (J/kg), 有一个特殊名字为 [gray](#) (Gy).
- 年计量的单位通常用 gray 每千年 (Gy/ka) 表示.

# 结 构

## ❖ 释光学基础

- 什么是释光
- 释光测年的基本原理

## ❖ 如何使用这种测年工具

- **基本要求**

## ❖ 采样、实验室设备以及过程

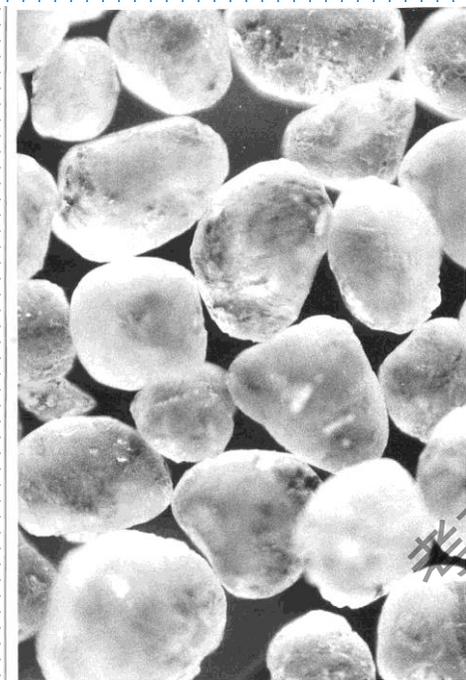
## ❖ 考古学上的应用

- 测年范围
- 案例研究

考古学国家级实验教学示范中心

## 测年需要通过什么来实现?

➤ 剂量计 (晶体: 石英或长石)



石英



长石

## 测年需要怎么实现?

- 剂量计 (晶体: 石英或长石)
- 辐射源( $\alpha, \beta, \gamma$ ) => 剂量率

考古学国家级实验教学示范中心

# 自然环境中的放射源

## ■ 放射性元素(U, Th, K, Rb):

放射性同位素:

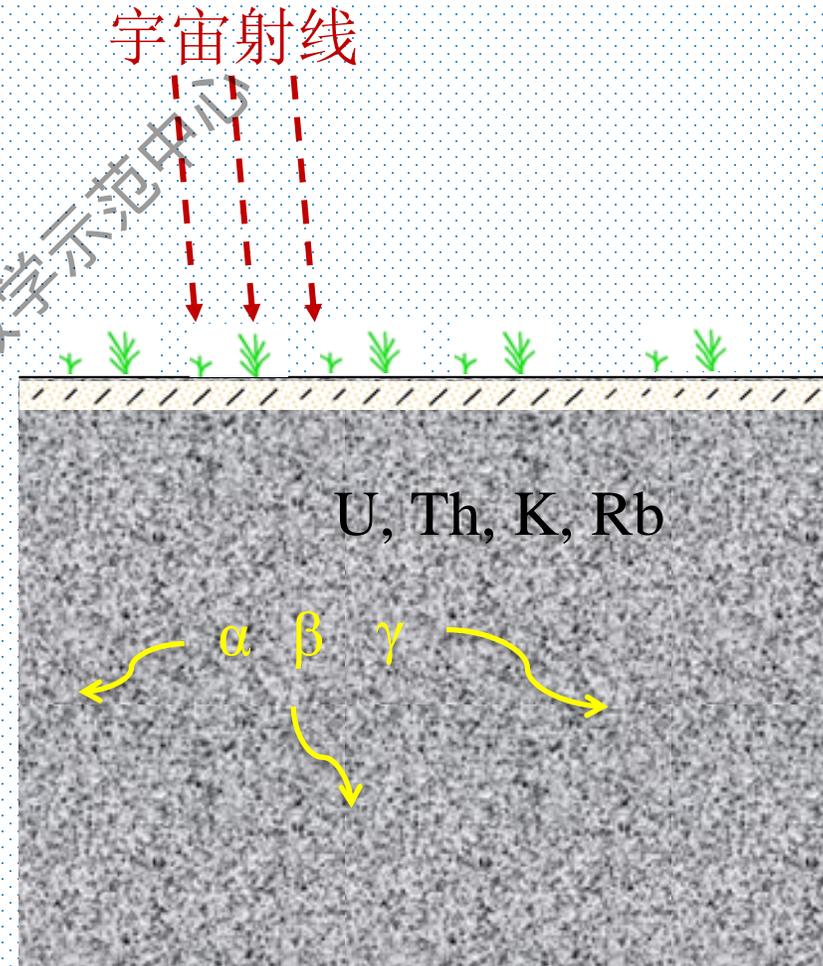
$^{238}\text{U}$ ,  $^{235}\text{U}$ ,  $^{232}\text{Th}$ ,  $^{40}\text{K}$  and  $^{87}\text{Rb}$



电离放射物:  $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\gamma$  粒子

## ■ 宇宙射线

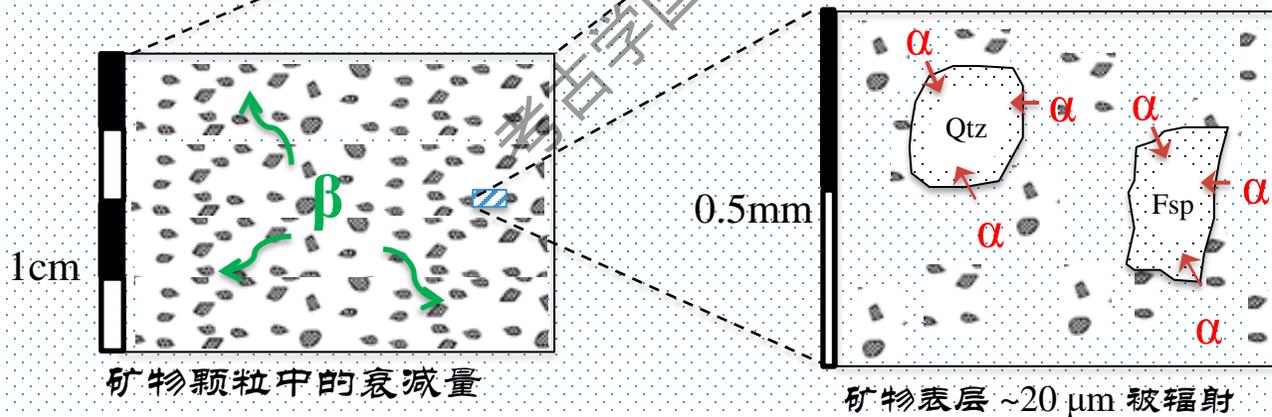
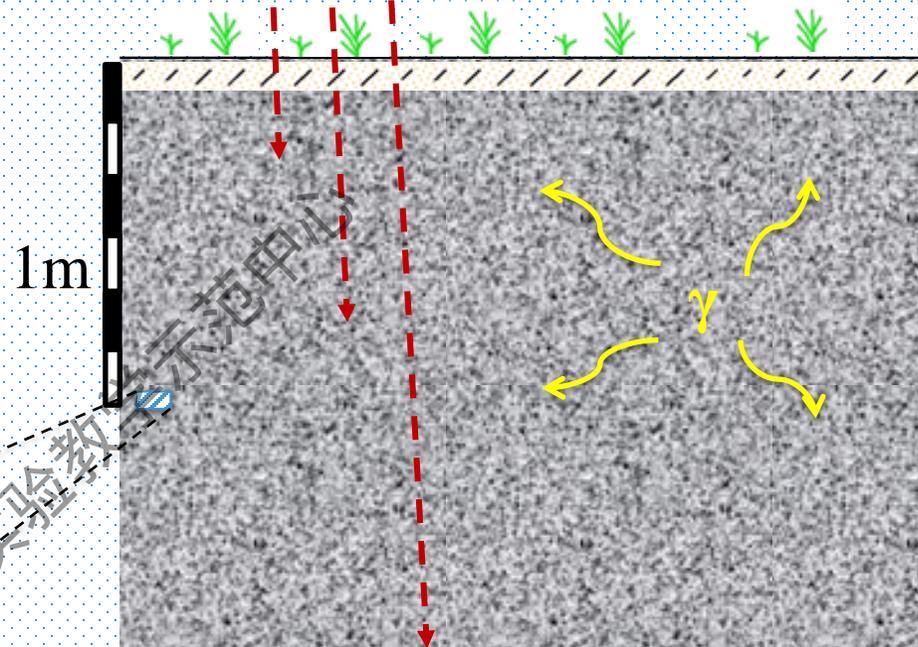
高能辐射, 通常来自太阳系外



## 在沉积物中的穿透距离

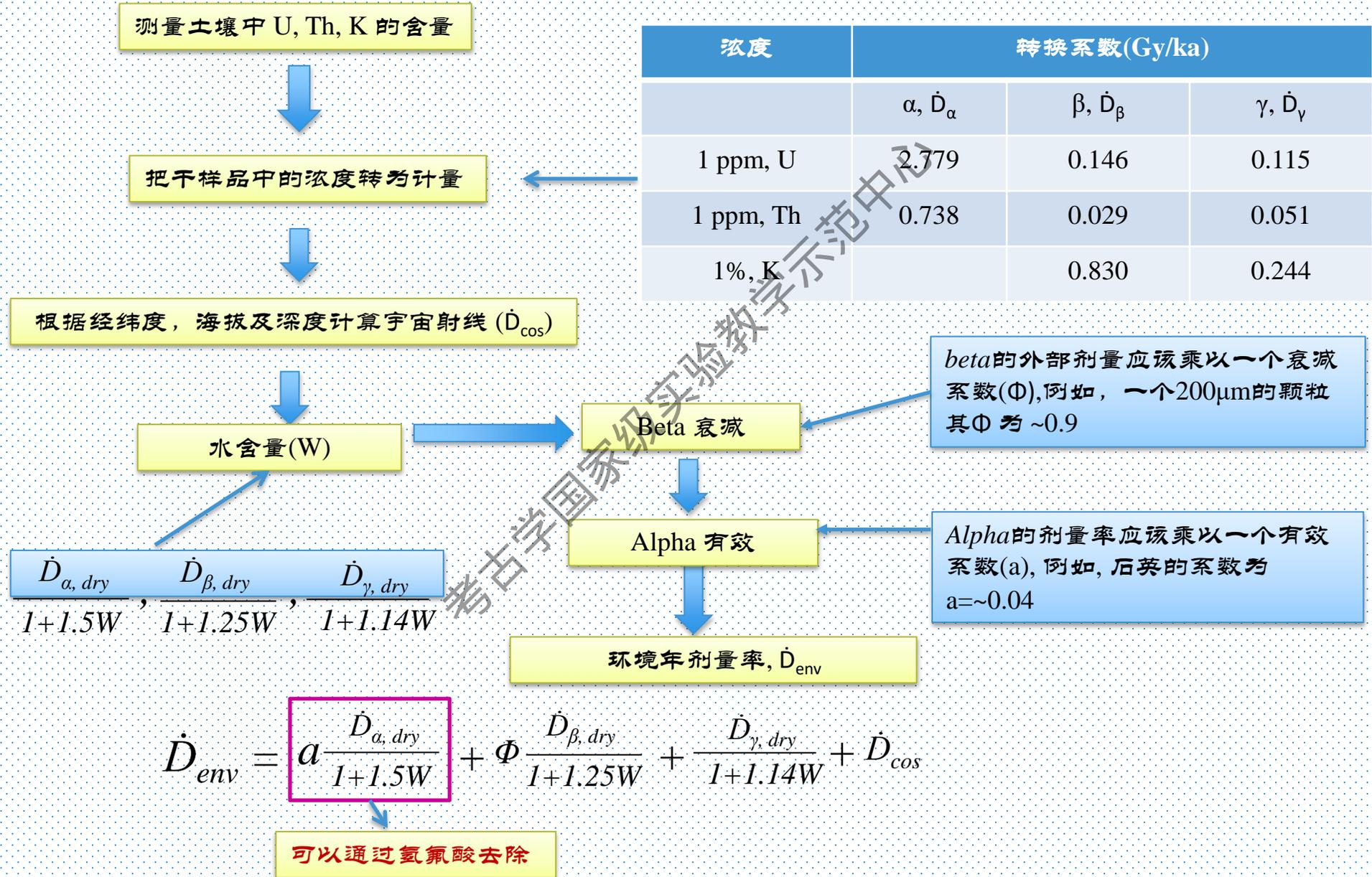
- 宇宙射线: 几米
- Gamma 射线: ~30 cm
- Beta 粒子: ~2 mm
- Alpha 粒子: ~20-30  $\mu\text{m}$

宇宙射线

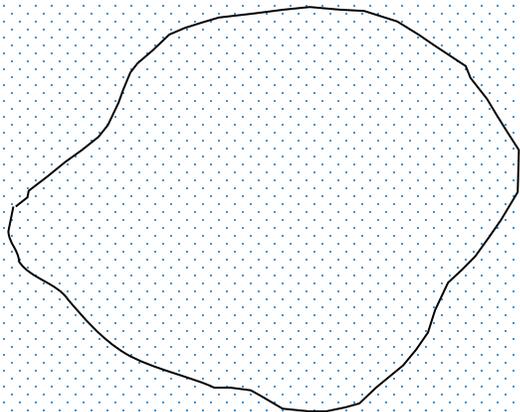


- Alpha粒子相比于beta和gamma粒子对释光强度贡献不大
- 被辐射的部分可以通过氢氟酸去掉

# 环境剂量率计算



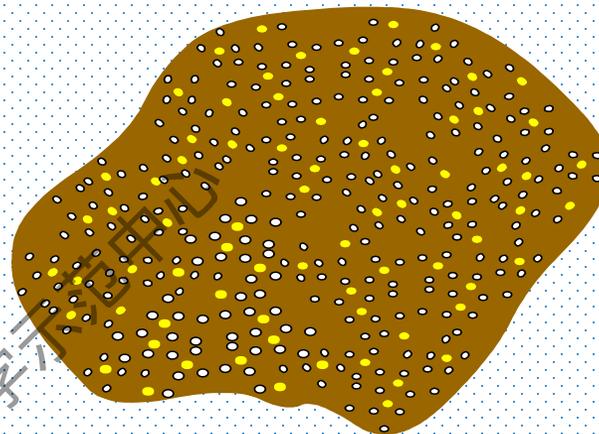
# 内部计量率



石英颗粒

U, Th, K 通常可以忽略

总剂量 = 环境剂量



钾长石

~K: 13%

~Rb: 几百 ppm

(U 和 Th 通常可忽略)

总剂量 = 环境剂量 + 内部剂量

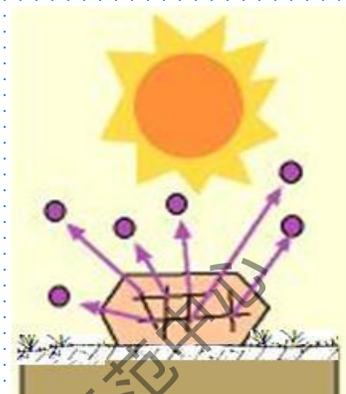
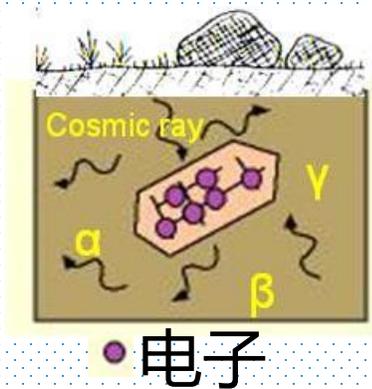
考古学国家级实验教学中心

## 测年需要怎么实现?

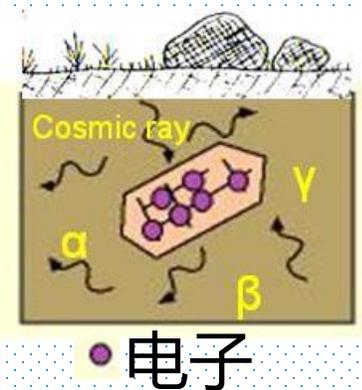
- 剂量计(晶体: 石英或长石)
- 辐射源( $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\gamma$ ) => 剂量率
- 归零事件('时钟' 重置)
  - 被加热(如,  $>400\text{ }^{\circ}\text{C}$ )
  - 被曝晒数分钟到数小时

考古学国家级实验教学示范中心

# 归零事件

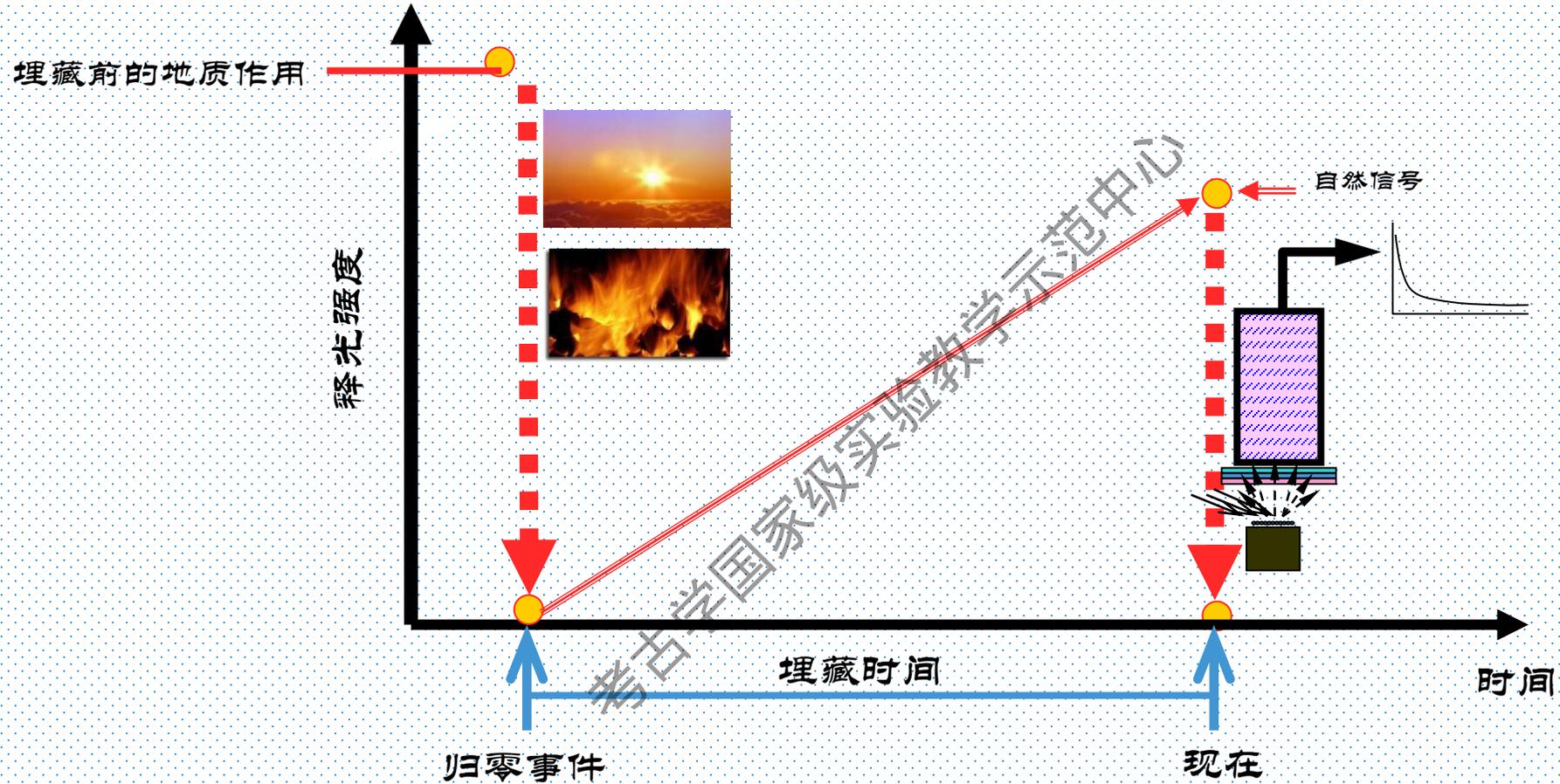


- 沉积物: 阳光曝晒 → 被捕获的电子在地表搬运过程中暴露在阳光下



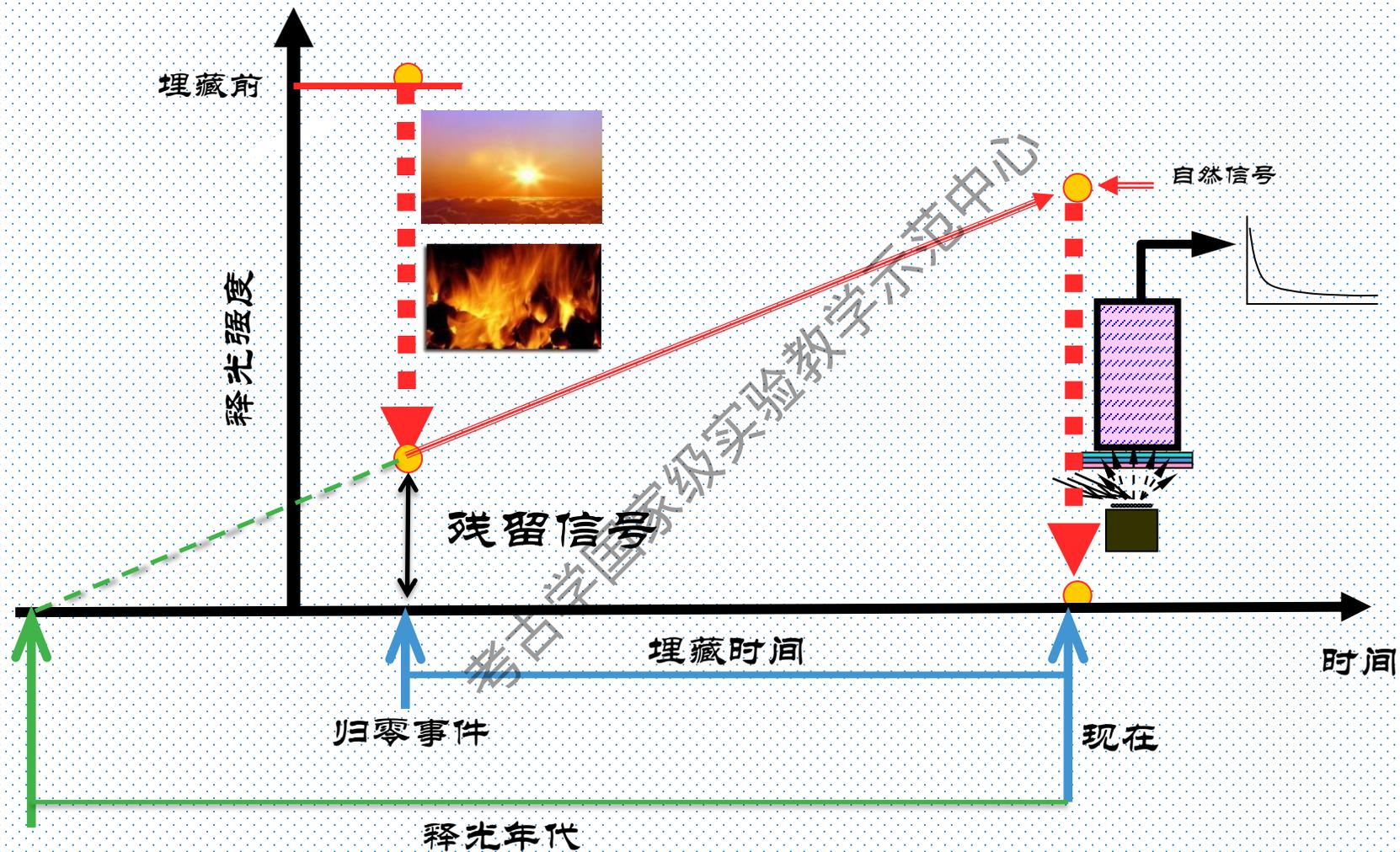
- 被加热的物质(陶器): 加热 → 被捕获的电子在烧制过程中的高温( $> 500\text{ }^{\circ}\text{C}$ )下可被释放

# 释光 vs. 时间



完全归零: 释光时间 = 埋藏时间

# 如果‘时钟’没有被归零呢？



# 什么是归零事件?

## ➤ 阳光晒退



- 石英的OSL信号: 阳光强烈照射几十秒
- 长石的IRSL信号: 阳光强烈照射数小时

注意! 在非强烈的阳光下 (如水中) 曝光时间会增长

## ➤ 加热



- 长石和石英都需要在一个较高的温度下 ( $> 400^{\circ}\text{C}$ ) 加热

长时间的较低温加热和短时间的高温加热效果相同

# 结 构

## ❖ 释光学基础

- 什么是释光
- 释光测年的基本原理

## ❖ 如何使用这种测年工具

- 基本要求

## ❖ 采样、实验室设备以及过程

## ❖ 考古学上的应用

- 测年范围
- 案例研究

考古学国家级实验教学示范中心

## 野外需要带些什么东西

- 避光管(直径2-5 cm, 长度~20-30 cm)
- 覆盖物(橡胶或者纸张)
- 不透明胶带(密封管子和遮盖物)
- 样品袋(采集计量率样品)
- 锤子(把管子砸入地层中)
- 凿子(从地层中取出管子)
- 铝箔纸(采块状样品)



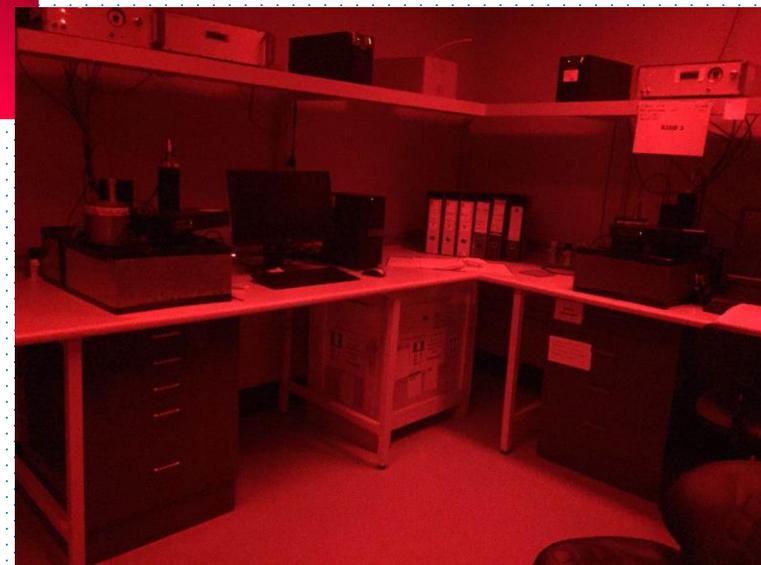
光释光野外采样

Images from web sources

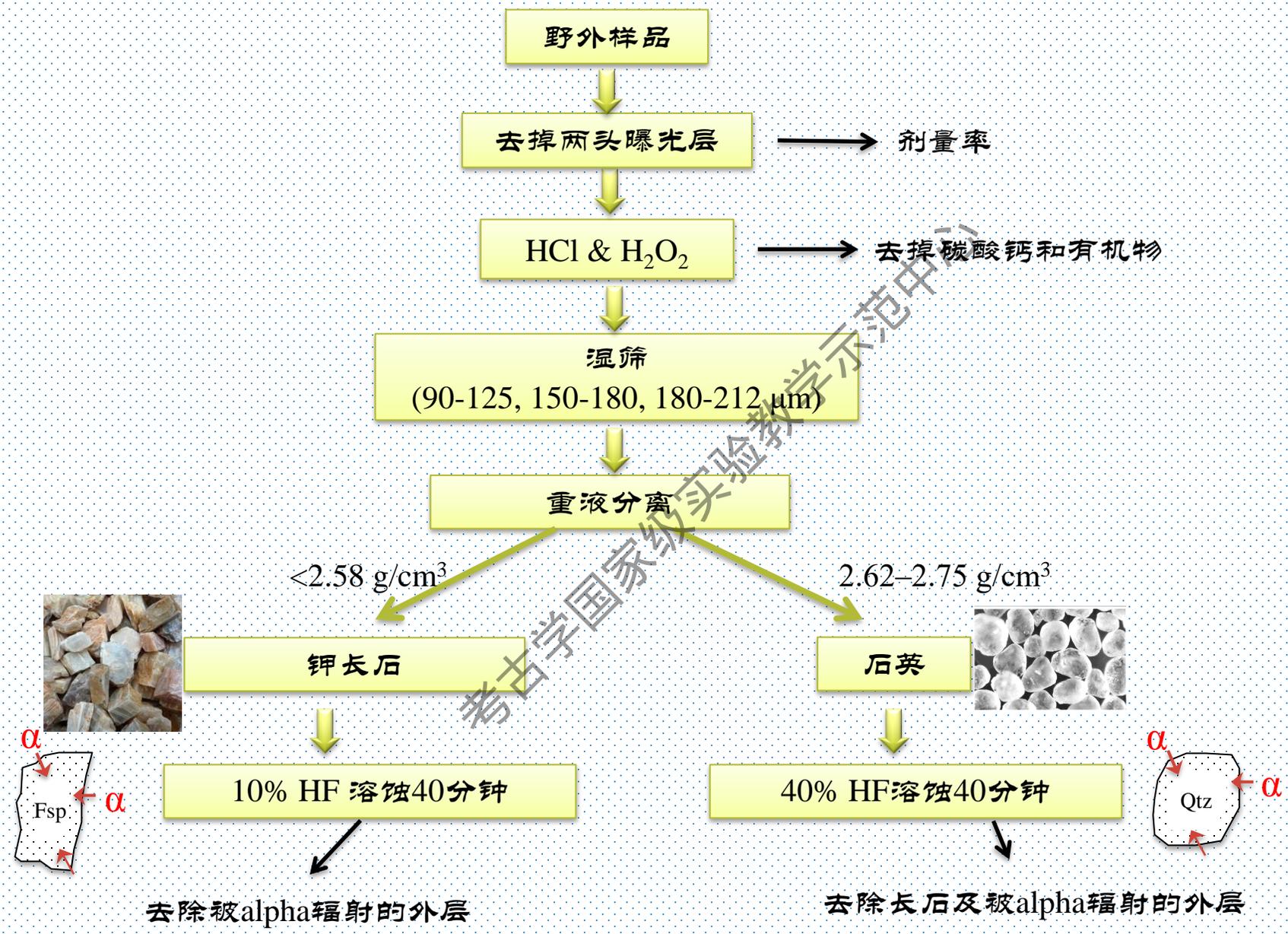


# 释光实验室

样品的处理过程必须全程在暗室中进行!



# 提取沉积物中的石英或者长石



# 实验仪器测量系统

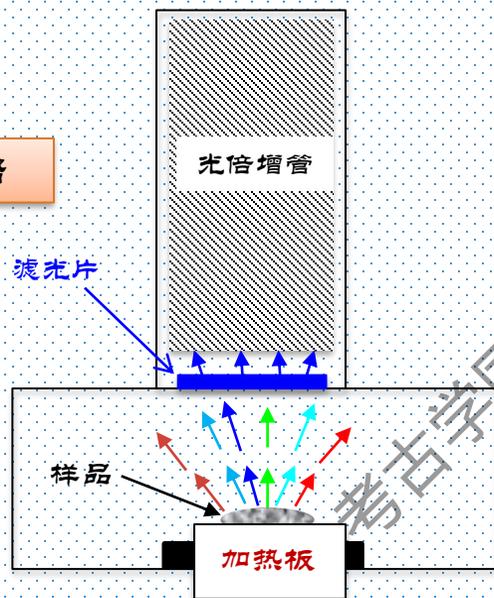
热释光

光释光

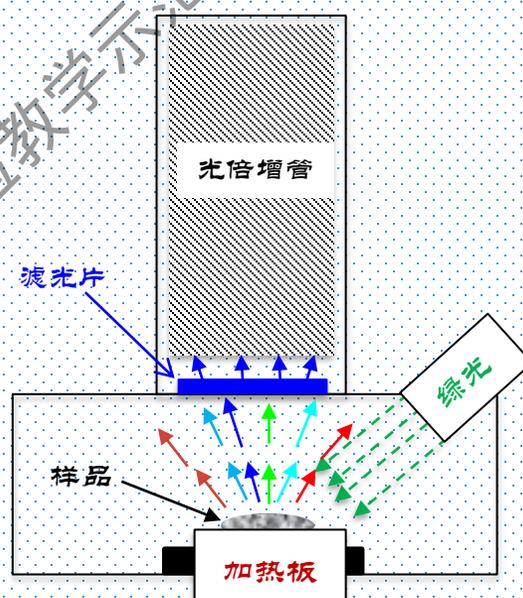
信号计数器& 收集器

释光信号探测器

样品盒

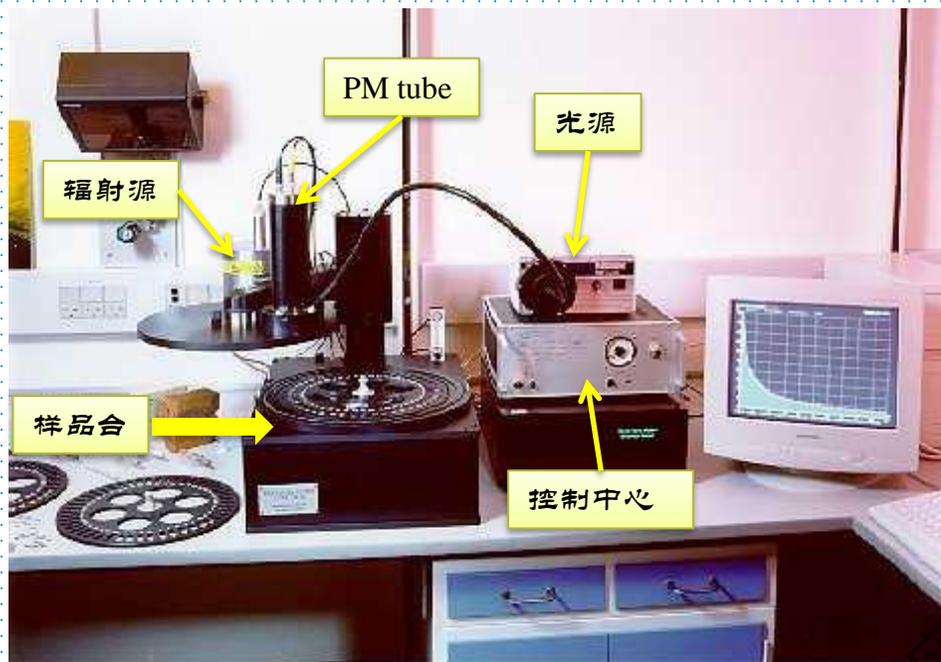


线性加热样品(e.g., 25 - 500 °C)



激发光源的波长必须和探测光源不同!

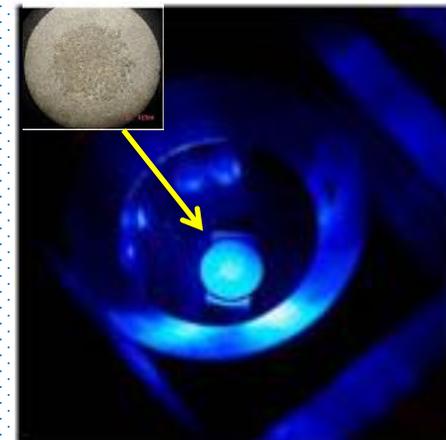
# Risø TL/OSL reader



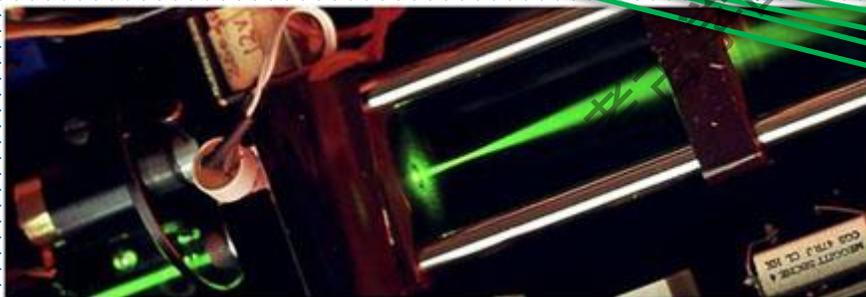
## 单片法(多颗粒)



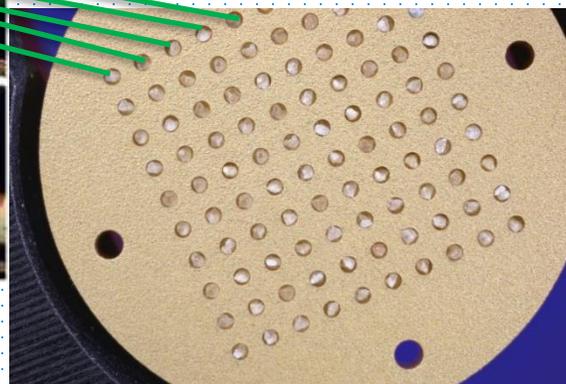
所有的颗粒一次性用blue LEDs 激发



## 绿色激光

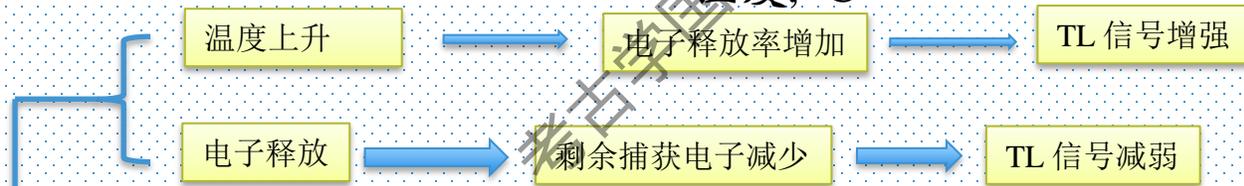
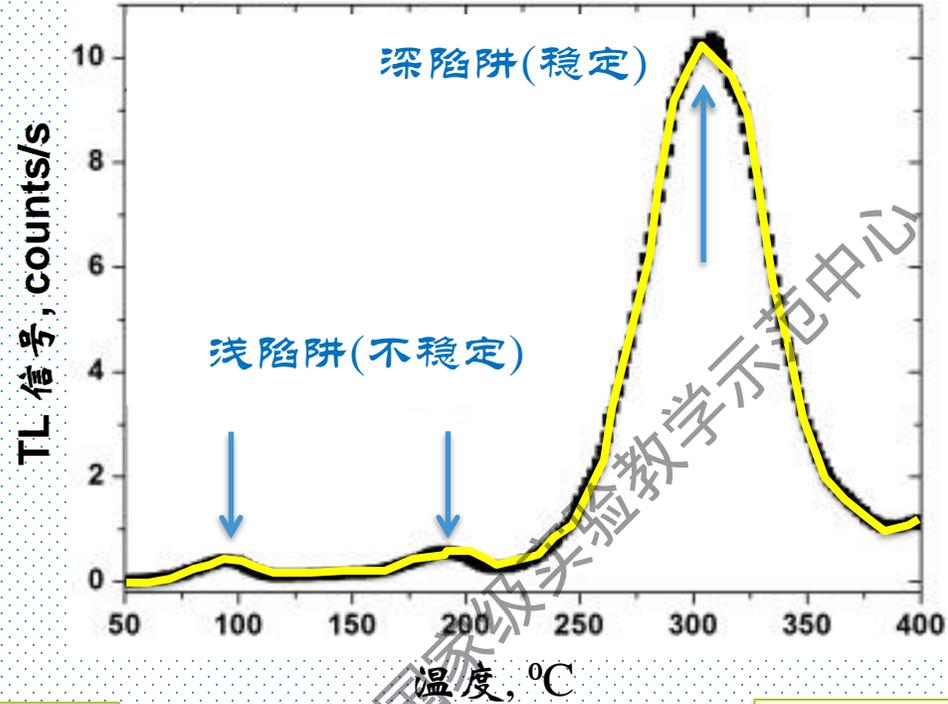


## 单颗粒测量



# 热释光 (TL)

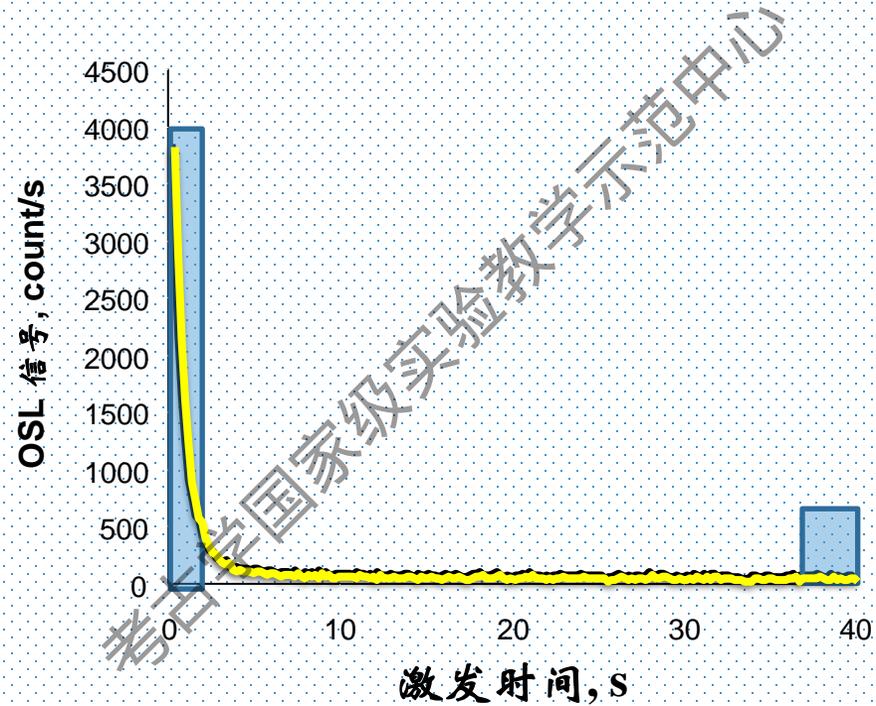
以 $5^{\circ}\text{C/s}$ 的速度把样品加热到 $400^{\circ}\text{C}$



- TL 的信号曲线通常以一个峰值或多个峰值出现
- 每一个高峰代表一个陷阱
- 最高峰代表了深度陷阱: 更稳定, 更适合用于测年

# 光释光(OSL)

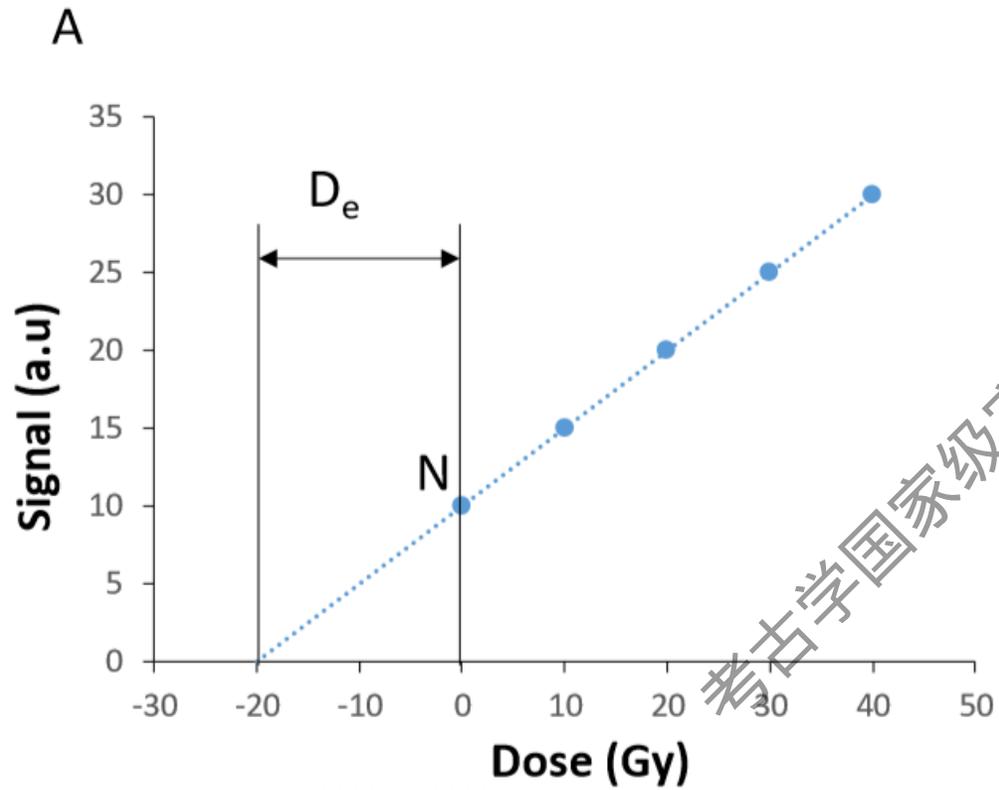
实验室激发光源: blue LEDs (470 nm) or green laser (532 nm)



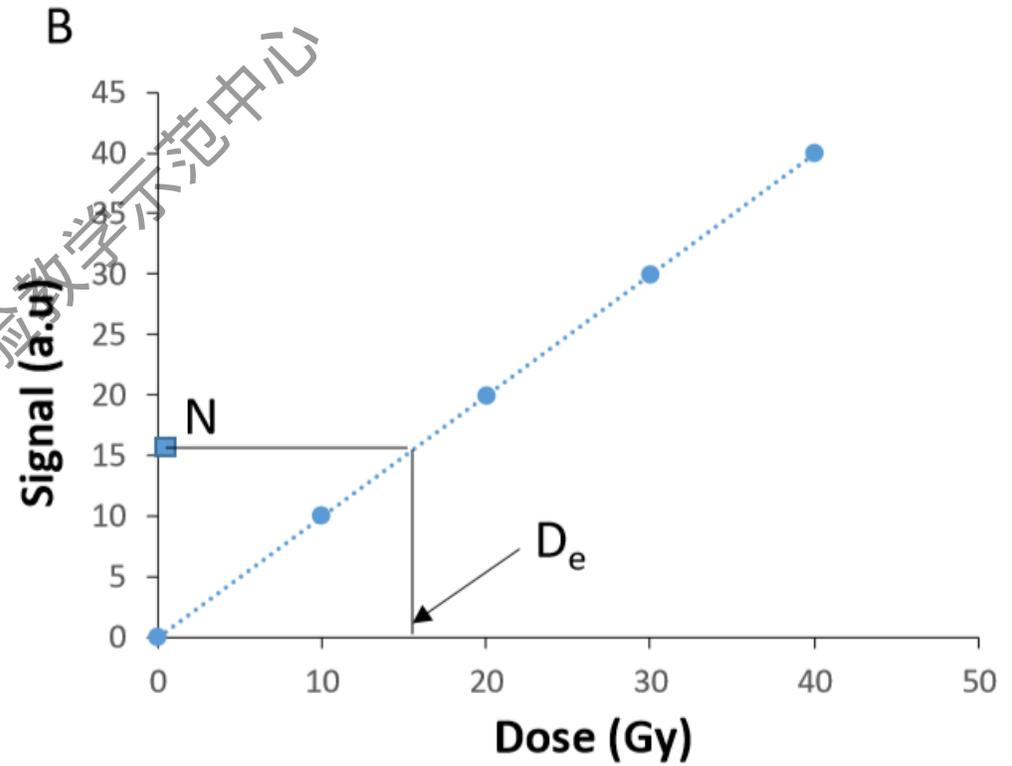
OSL的信号强度和被捕获的电子数量成正比

激发时间增加 → 电子数量减少 → OSL 信号减弱

# 两种释光方法



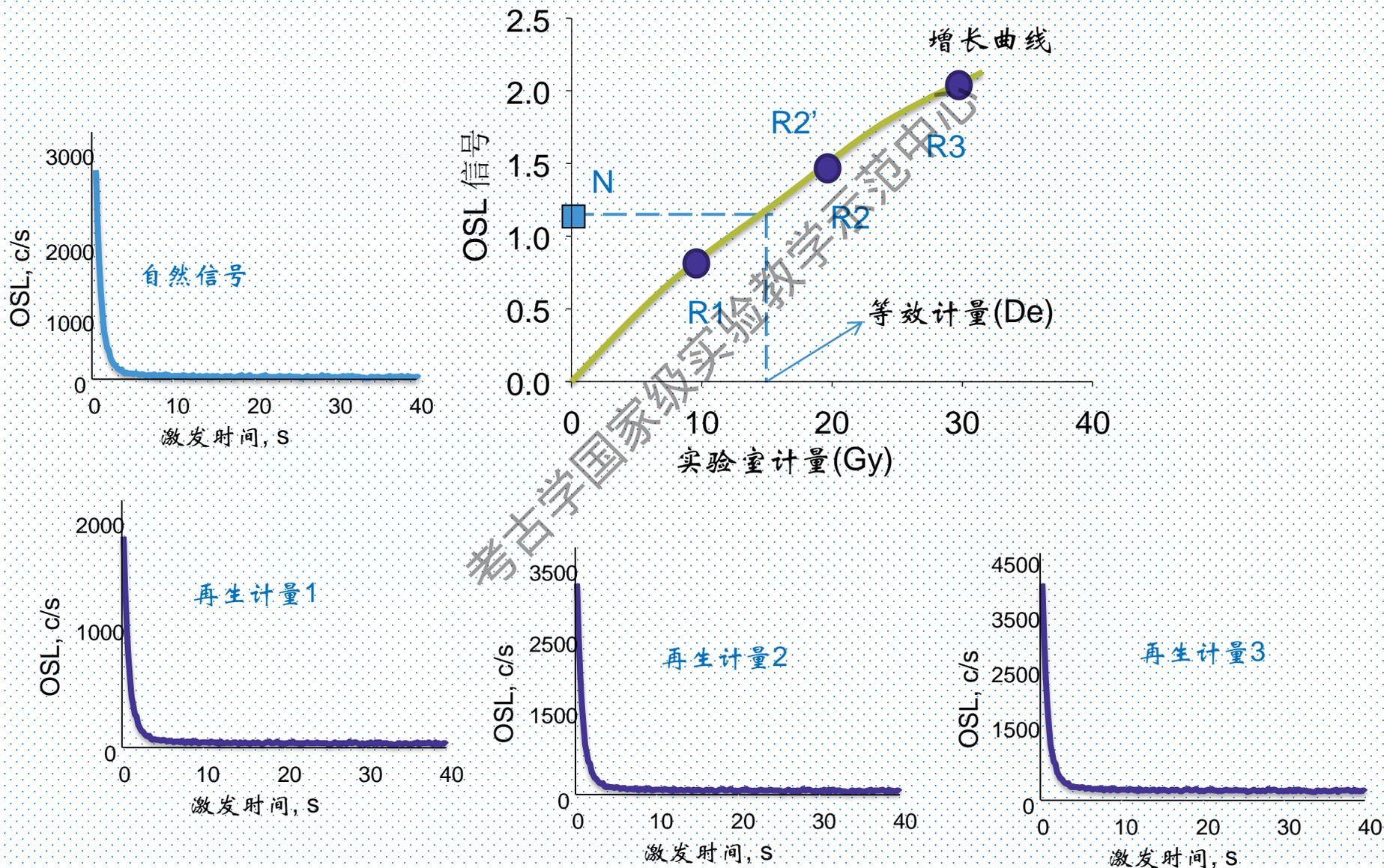
Additive-dose Method



Regenerative-dose Method

# 等效剂量(Equivalent dose, De)

## 再生计量法



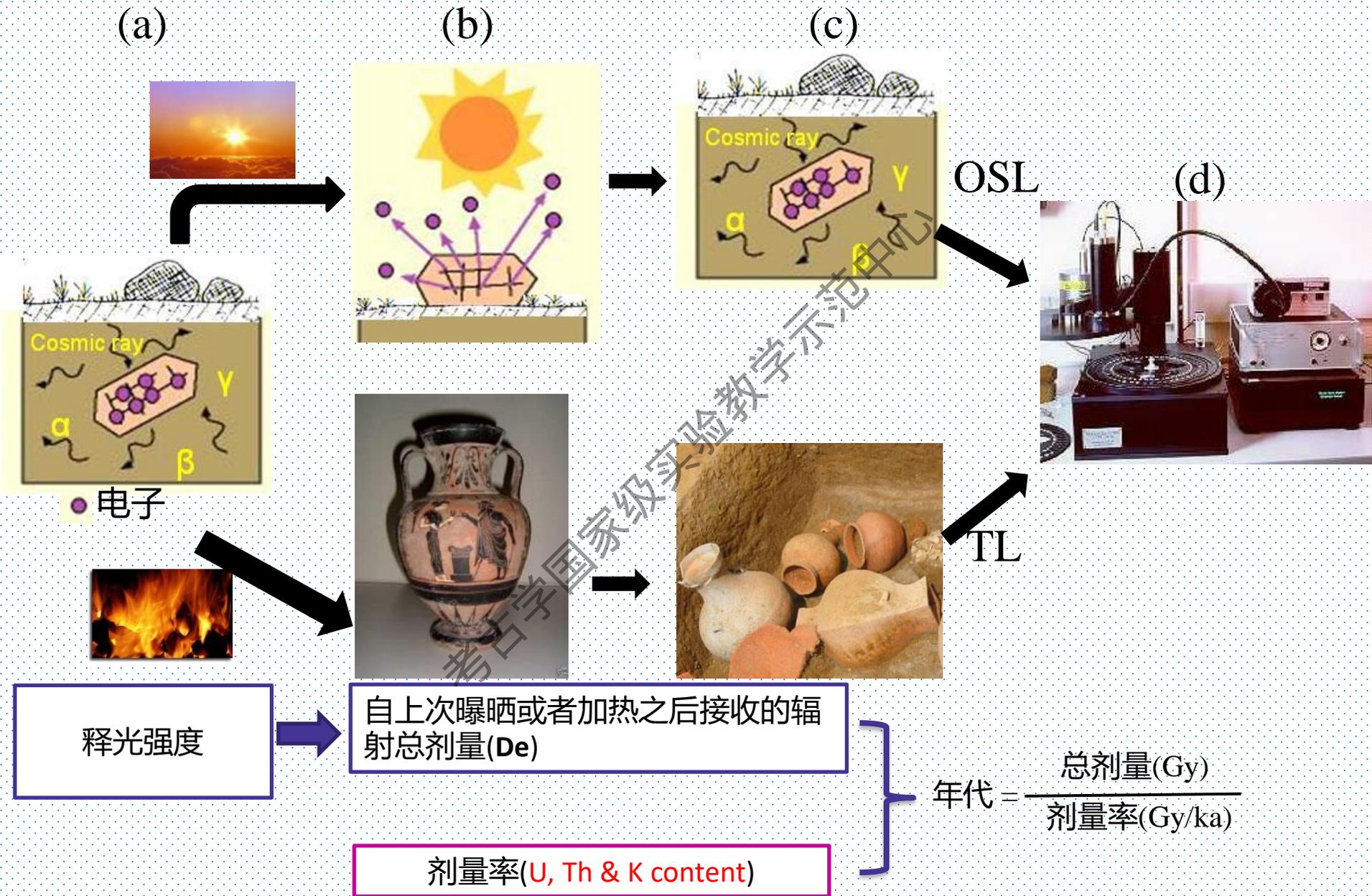
# SAR protocol

Table 3-2. The single-aliquot regenerative-dose (SAR) protocol.

Step	Treatment	Observed
1	Regenerative dose, $D_i$ <sup>a</sup>	
2	Preheat	
3	OSL measurement	$L_n$ or $L_x$
4	Test dose, $D_t$	
5	Preheat or cut-heat	
6	OSL measurement	$T_n$ or $T_x$
7	Return to step 1	

<sup>a</sup>For the 'natural' sample,  $i = 0$  and  $D_0 = 0$ . The whole sequence is repeated for several regenerative doses including a zero dose and a repeat dose.

# 释光测年过程总结



# 结 构

## ❖ 释光学基础

- 什么是释光
- 释光测年的基本原理

## ❖ 如何使用这种测年工具

- 基本要求

## ❖ 采样、实验室设备以及过程

## ❖ 考古学上的应用

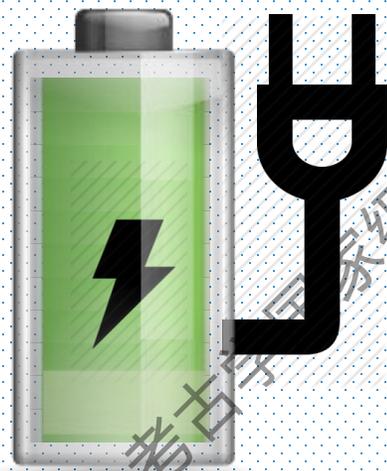
- 测年范围
- 案例研究

考古学国家级实验教学示范中心

# 我们能用它能测到多久？

$$\text{年代} = \frac{\text{总剂量 (Gy)}}{\text{剂量率 (Gy/ka)}}$$

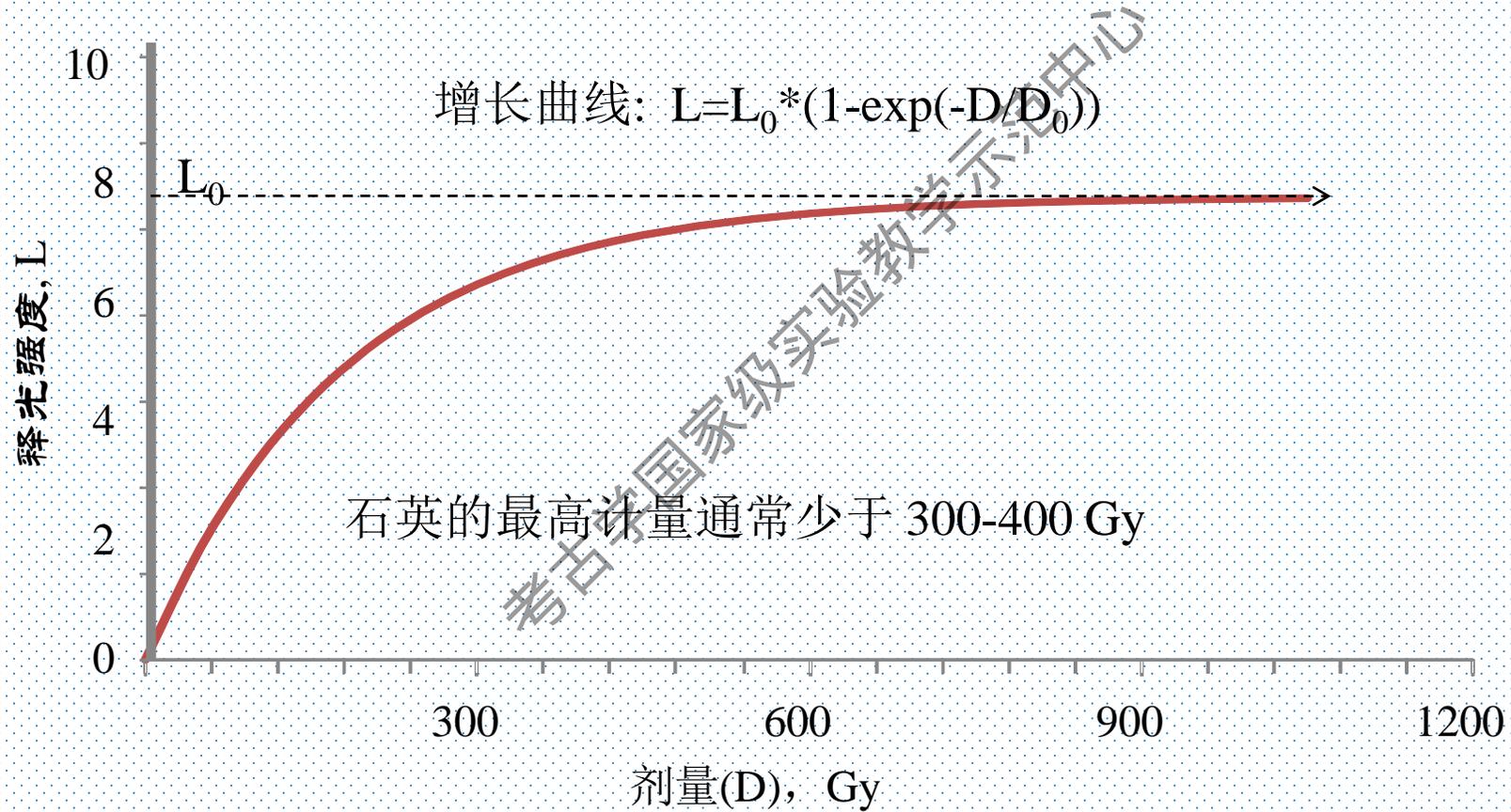
晶体 = 电池



电离辐射

所有的电池和释光接收储存能力都有限度！

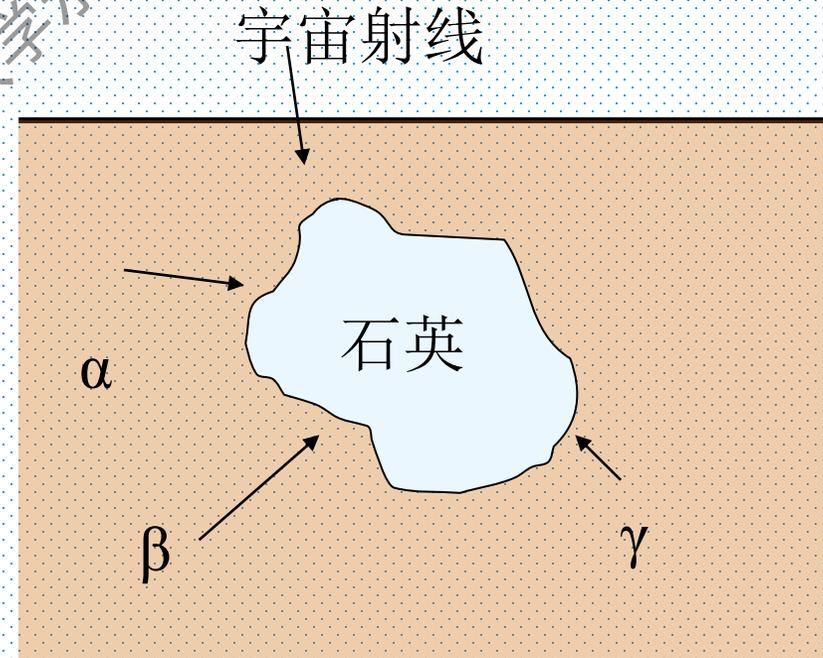
# 我们能用它能测到多久？



# 我们能用它能测到多久？

$$\text{年代} = \frac{\text{总剂量 (Gy)}}{\text{剂量率 (Gy/ka)}}$$

- 辐射元素(U, Th, K):  
每个遗址都不同:
  - 中国黄土~3 Gy/ka
  - 澳大利亚沙滩<1 Gy/ka
- 宇宙射线: 通常 <0.3 Gy/ka,
  - 和经纬度及深度有关
- 衰减因子(水含量, 碳酸盐含量)



# 测年范围

- 测年下限: 几十上百年(根据释光强度). 样品如果太年轻获得必需的释光信号困难
- 测年上限: (和剂量率高度相关):
  - 石英 OSL: ~200,000 年 (如果剂量率在~2 Gy/ka)
  - 长石 IRSL: ~500,000 年 (如果剂量率在~3 Gy/ka)

## 释光测年在考古学上的应用

释光测年 能够为出土人类化石，动物化石及石制品的沉积物提供可靠的**年代框架**；可以为50万年以来的关键考古事件提供**年代支撑**。

在全世界范围内被广泛的用于考古遗址测年尤其是**超过碳十四测年上限(~50,000年)的遗址**。

案例研究1: 非洲南部旧石器时代中期年代

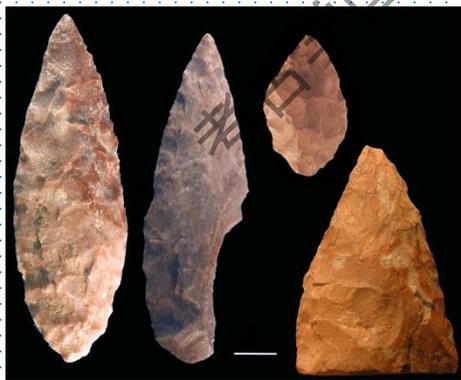
- *by Jacobs et al. (2008) - Science, Vol. 322, pp. 733—735.*

考古学国家级实验教学示范中心

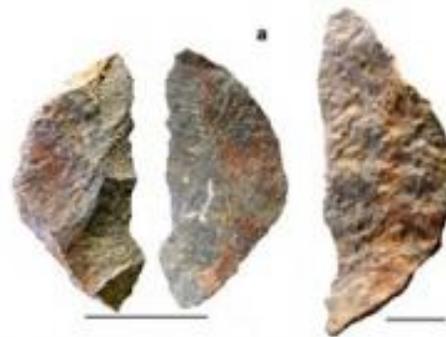
## 非洲南部的旧石器中期文化

- 现代人(Modern humans)起源于旧石器时代中期的非洲，其年代可追溯至距今 28 到 3 万年。
- 南非的Howiesons Poort (HP) 和 Still bay (SB) 是非洲旧石器时代中期拥有最先进石器工业的两个工业，这两个工业出土了代表早期象征意识的文化遗物和个人装饰物。
- **关键问题**: 旧石器时代中期遗物和代表象征意识的文化遗物以及个人装饰品处于两个不同的时代，还是一个连续的长时间堆积

- Finely shaped,
- Bifacially worked,
- Lanceolate points
- Probably parts of spearheads

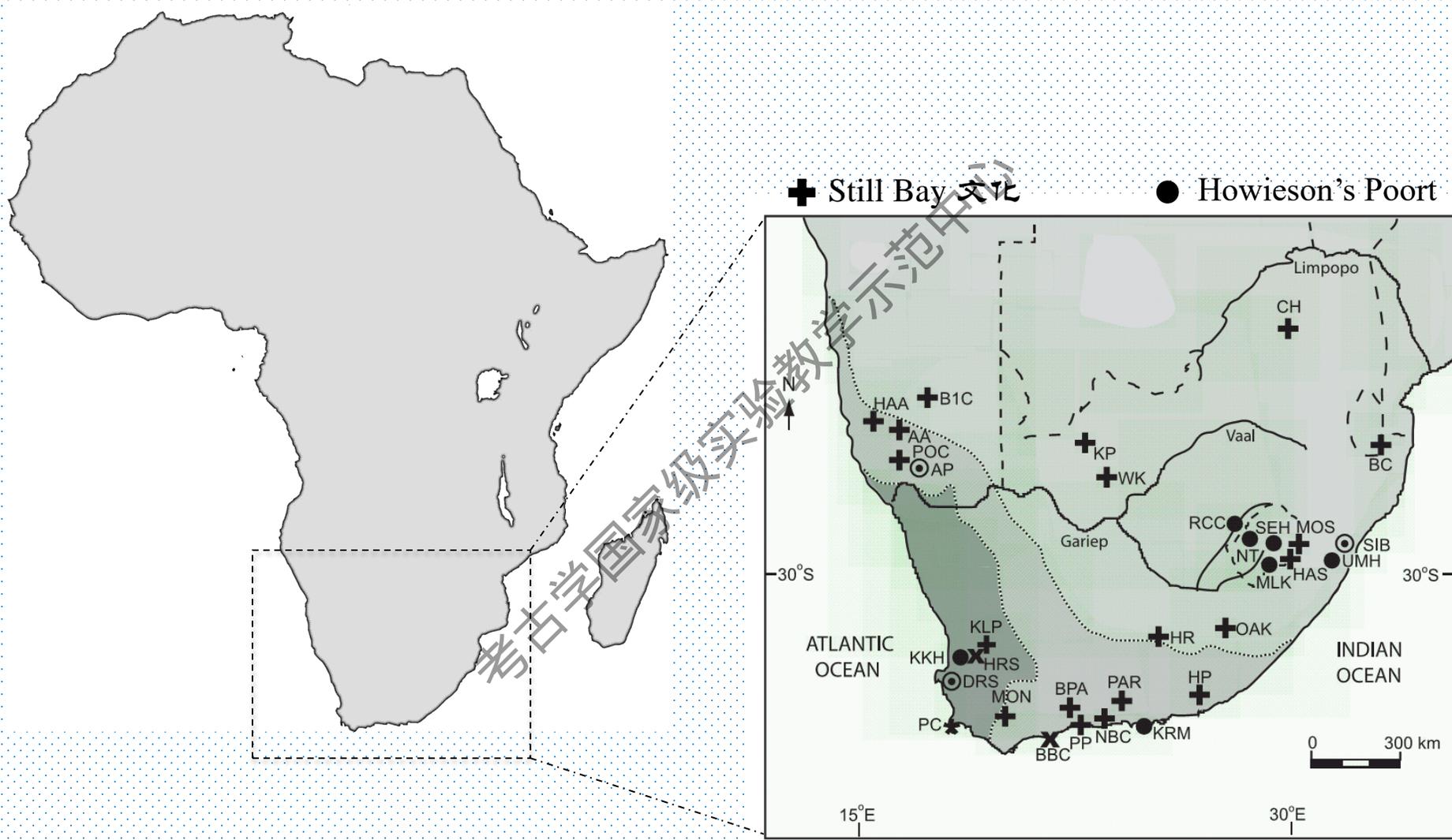


Still bay (SB) industry



Howiesons Poort (HP) industry

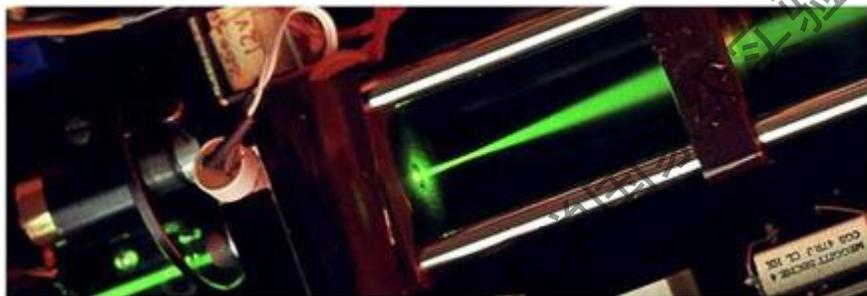
- Backed (blunted)
- Most likely served as composite weapons



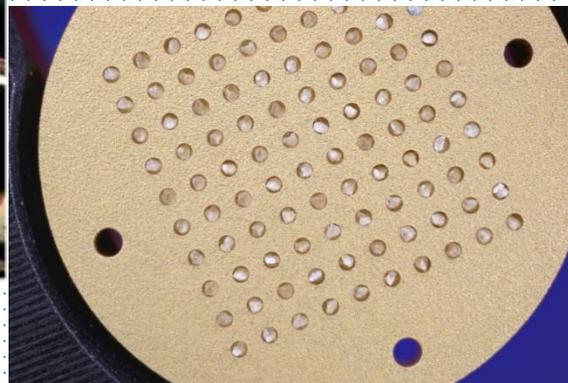
➤ 测量了来自9个遗址的54个样品.

➤ 共计53,400 个颗粒

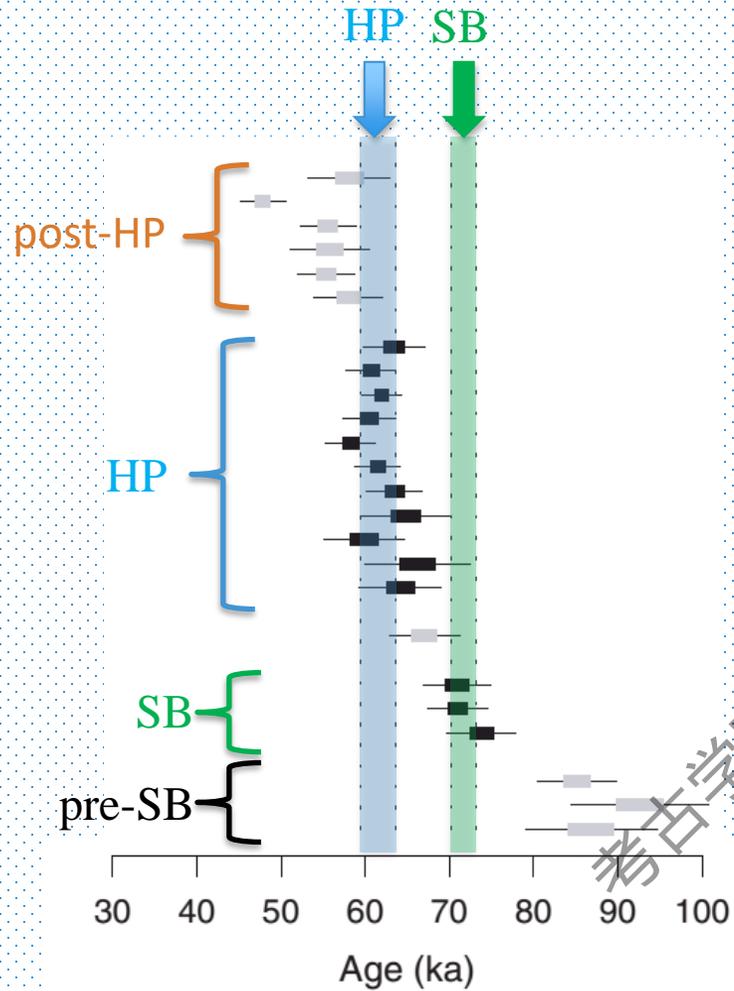
绿色激光



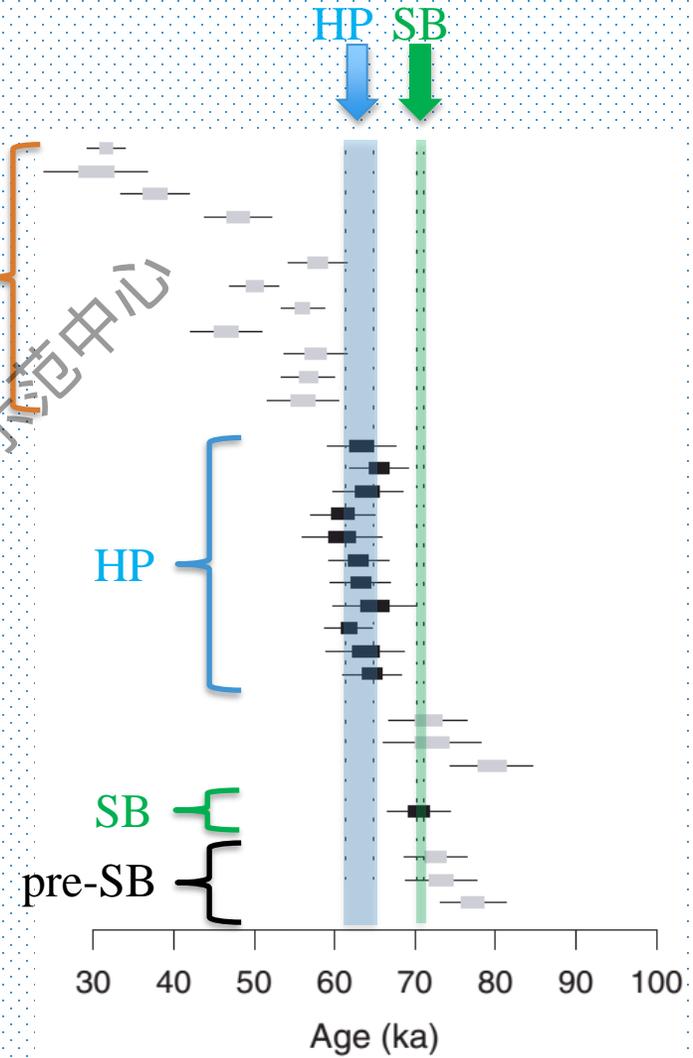
单颗粒测量



## 西区



## 东区和南区



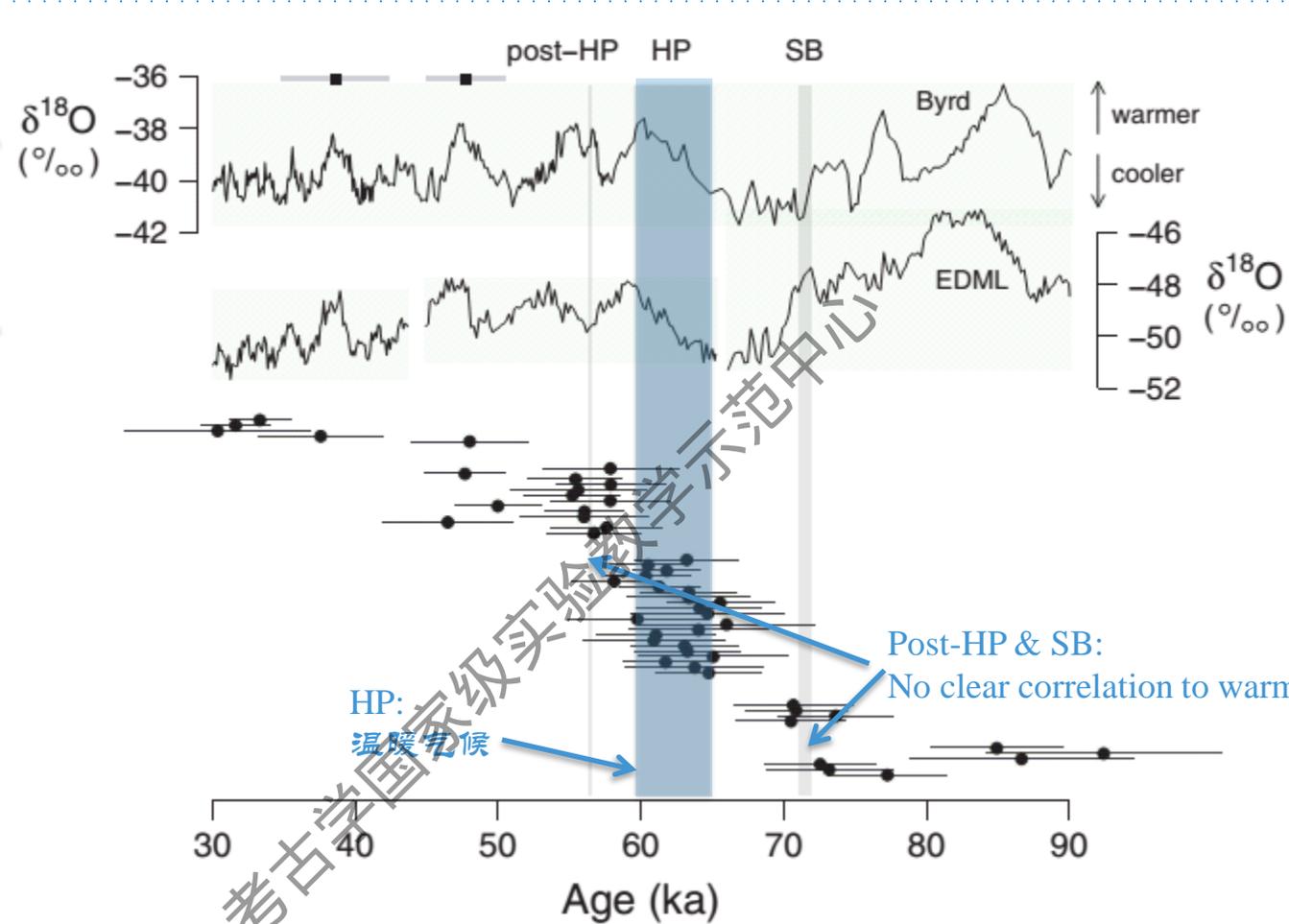
- HP: 64.8–59.5 ka, duration=5.3 ka
- SB: 71.9–71 ka, duration< 1 ka
- Gap between HP and SB: 6.7 ka

# 与南极氧同位素 (oxygen isotope) 对比

南极洲西部



南极洲东部



旧石器中期遗址并没有伴随气候变化

故气候变化并不一定是导致技术变化的动力之一

## 案例研究2: 中国最早的Levallois技术

- *by Hu et al. (2019). Nature 565: 82-85.*

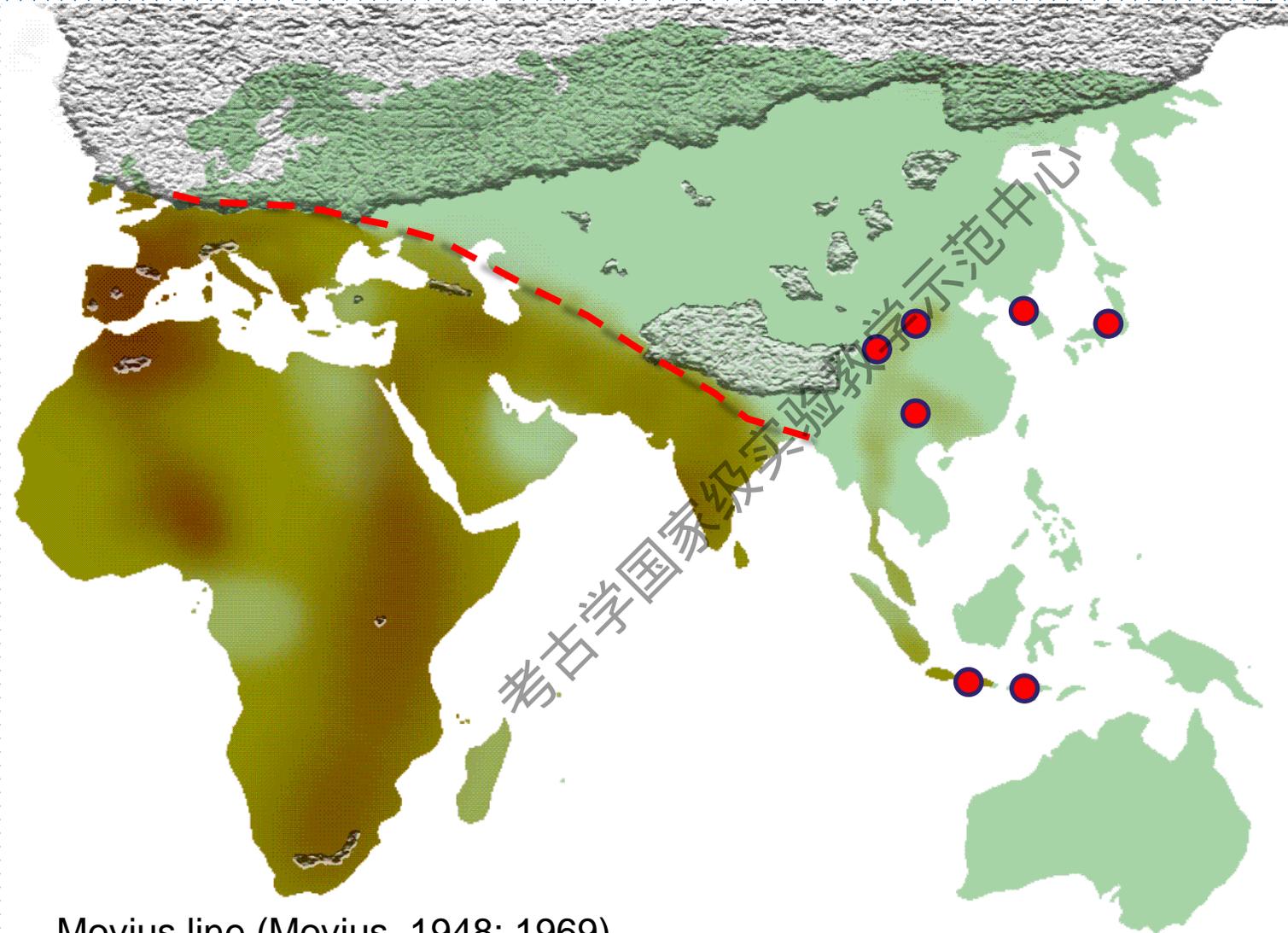
考古学国家级实验教学示范中心

# Five modes of lithic technological development

- Mode 1** : Simple cores and flakes
- Mode 2** : Bifacial tools
- Mode 3** : Prepared cores, Levallois
- Mode 4** : Blades
- Mode 5** : Component tools



# The developing trajectory of East Asia and West

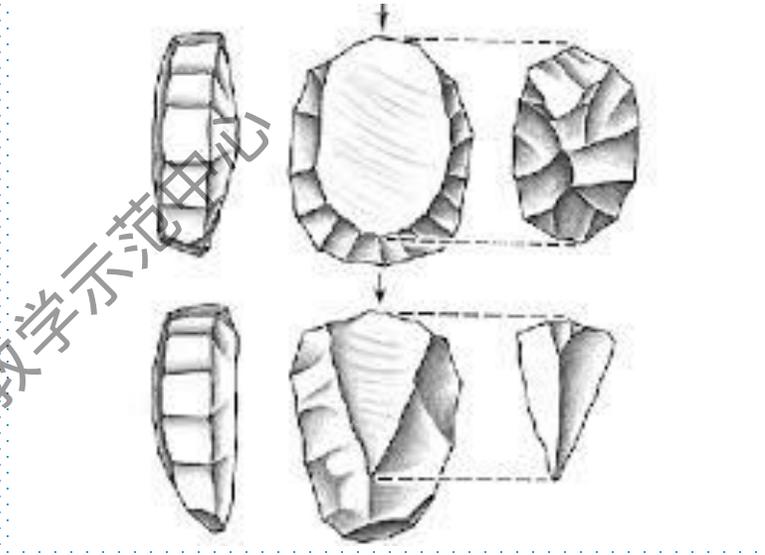
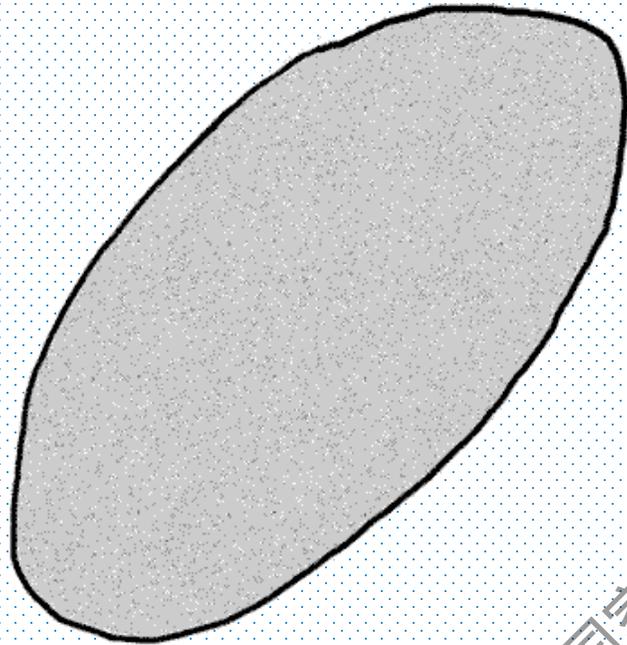


Mode 2 **biface found!**

Mode 3 Levallois?

Movius line (Movius, 1948; 1969)

# Levallois concept

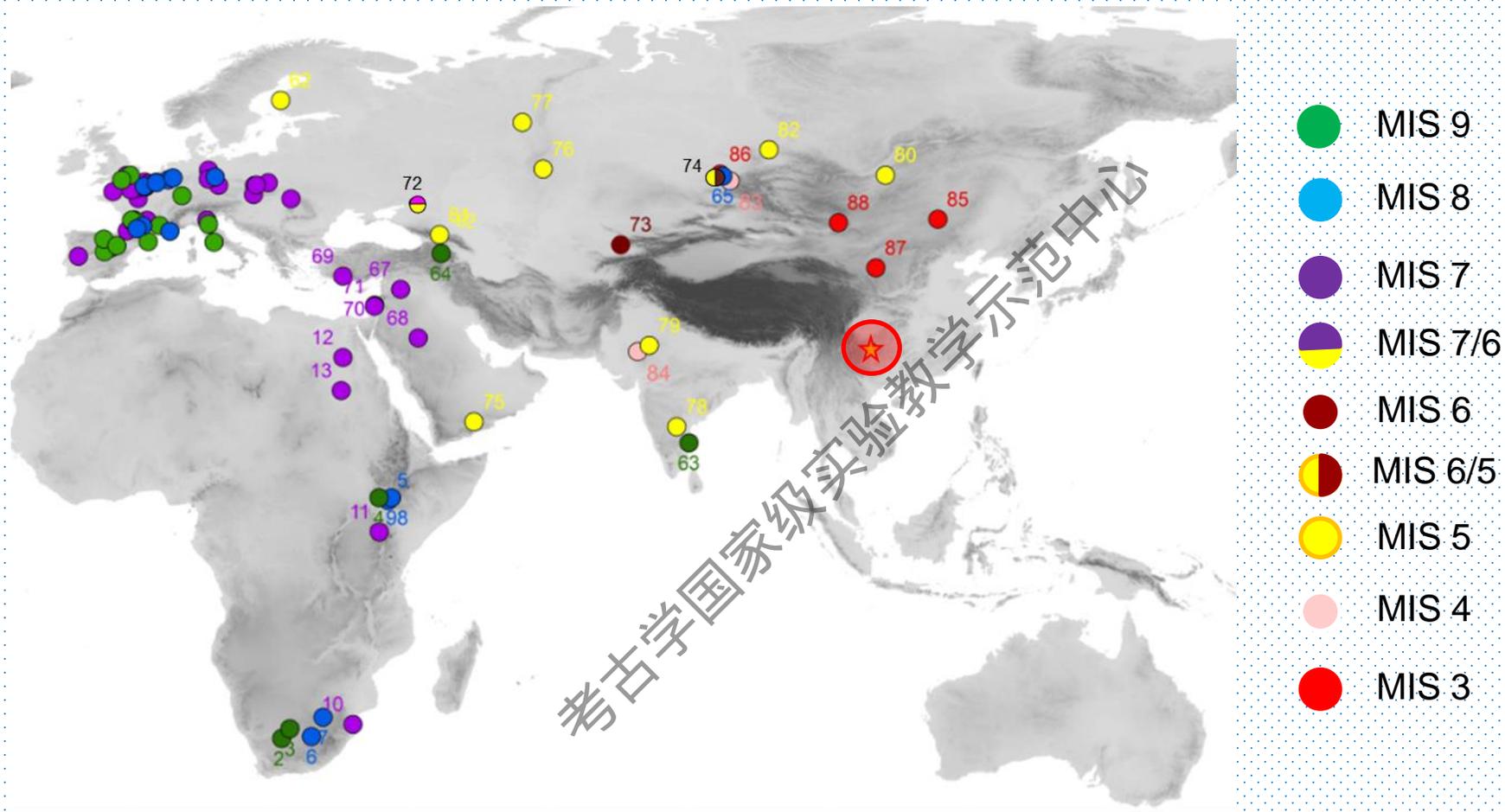


The production of a Levallois core

The predetermined products

- Prepared core technology
- Hallmark of MP (MSA) in Europe and Africa
- Related with Modern human in Africa and Neanderthal in Europe
- Previous evidence → appeared very late in East Asia

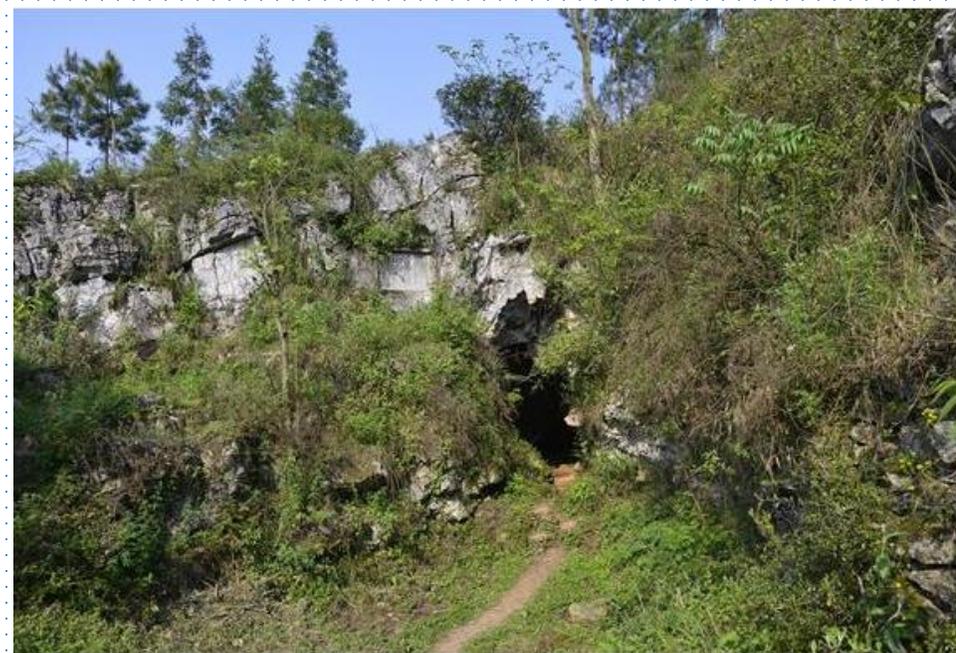
# Distribution of Levallois technology during Late Middle Pleistocene



**Note: sites younger than MIS 7 in Europe and Africa are excluded from this figure**

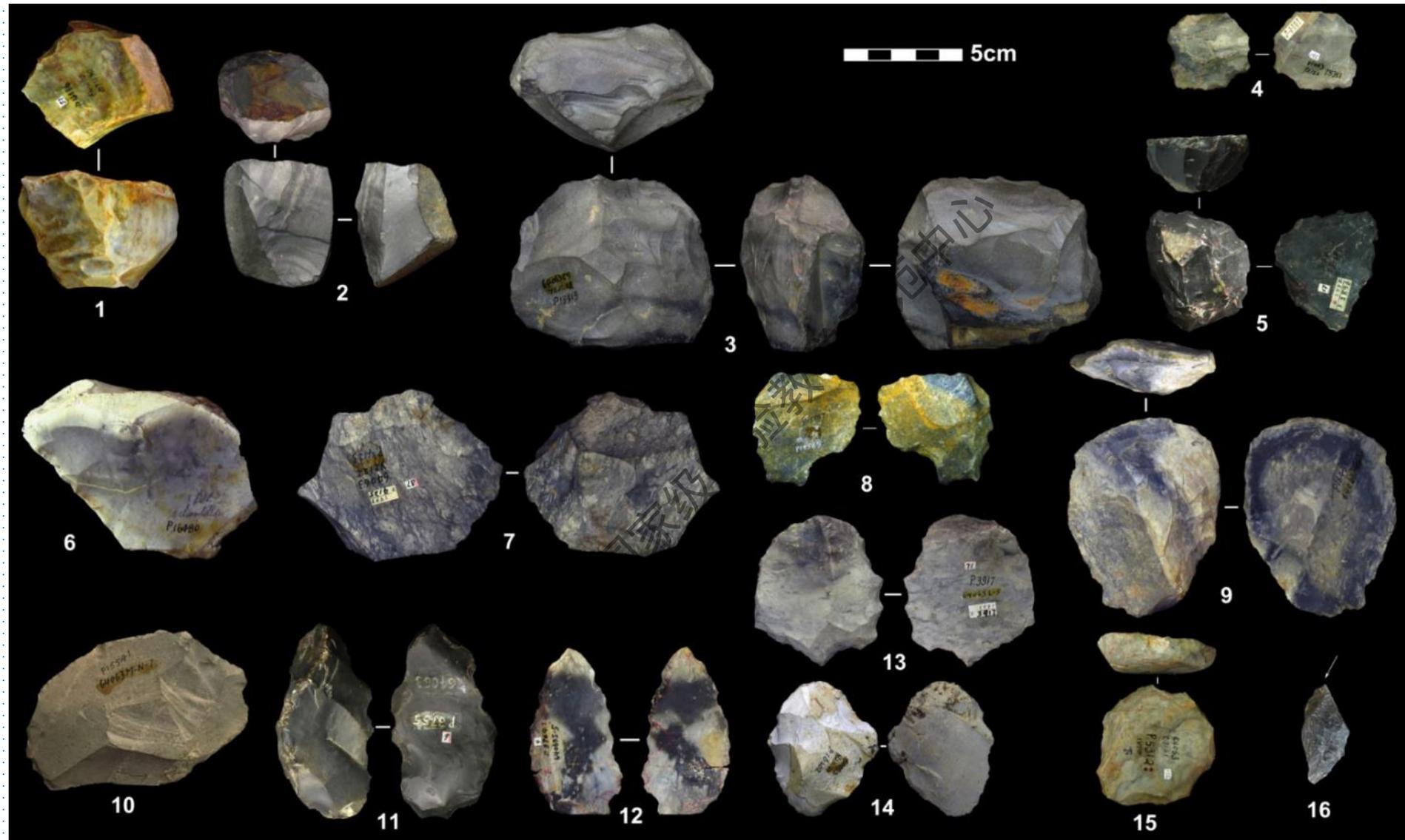
Previous opinion: diffused in East Asia with the dispersal of modern human around 40 ka

→ No cultural or genetic communication with the West



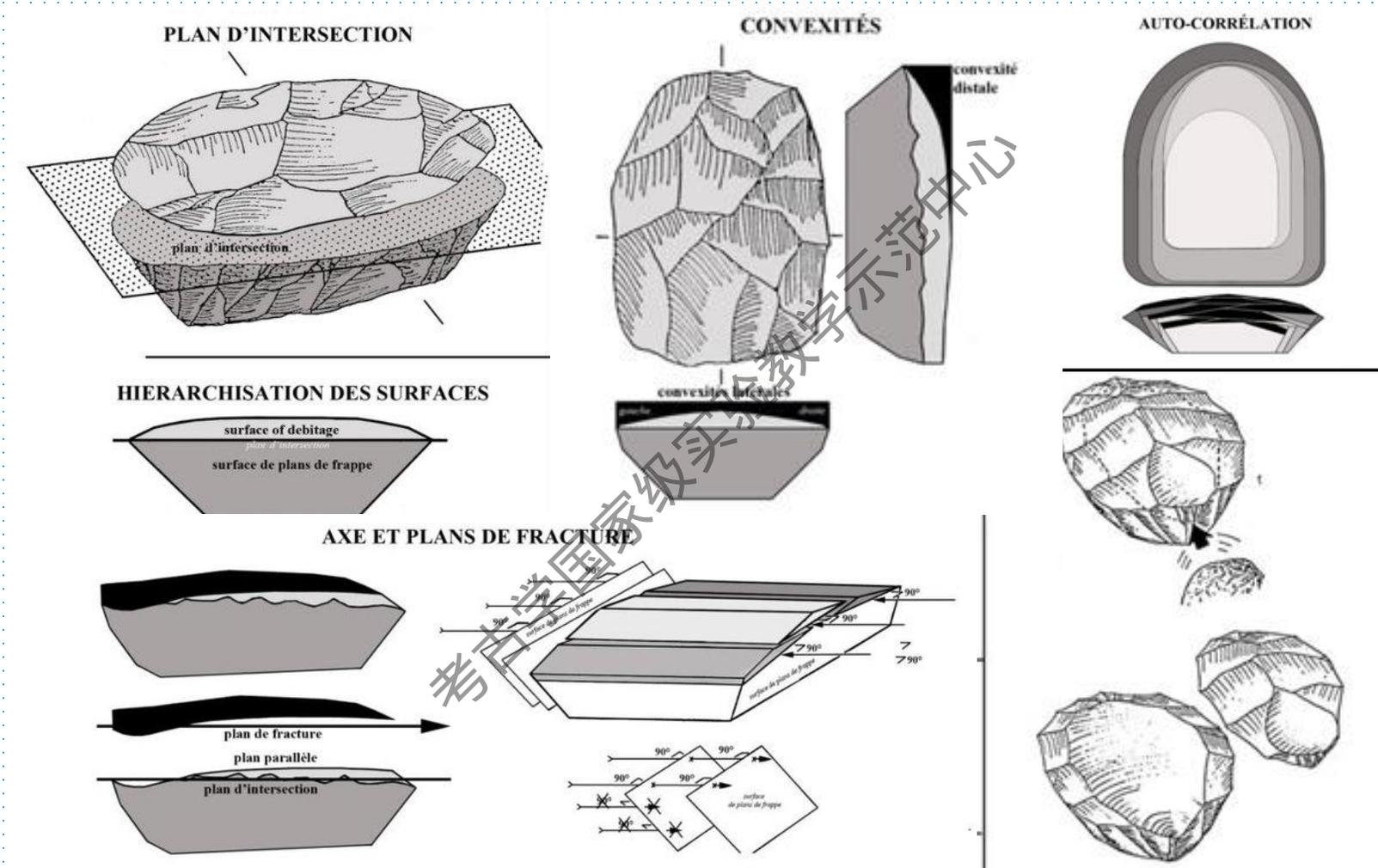
GYD: Guanyindong site

# Examples of cores, flakes and tools



- More than 2000 stone artifacts
- 45 Levallois products

# A volumetric construction of a Levallois core

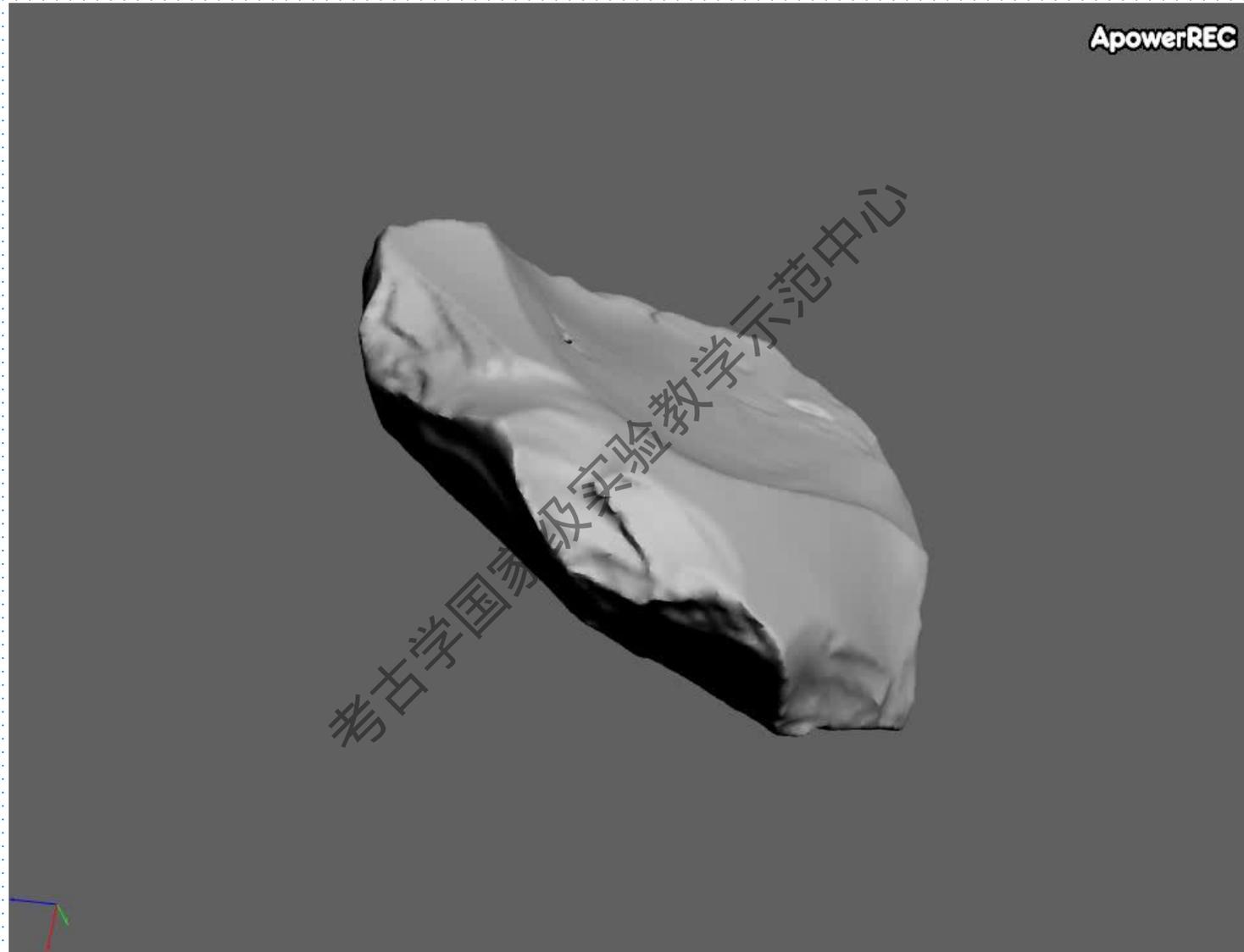


Boëda, 1995

# Levallois cores from Guanyindong



# CT scan of a Levallois core from Guanyindong

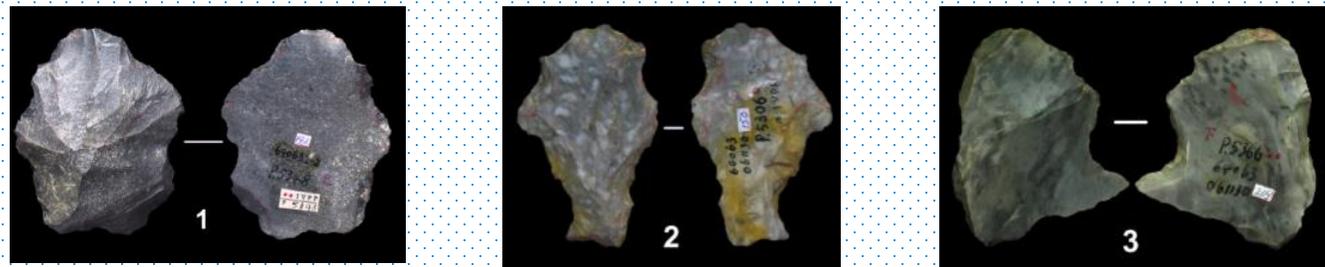


# Levallois in Guanyindong

When were these made?

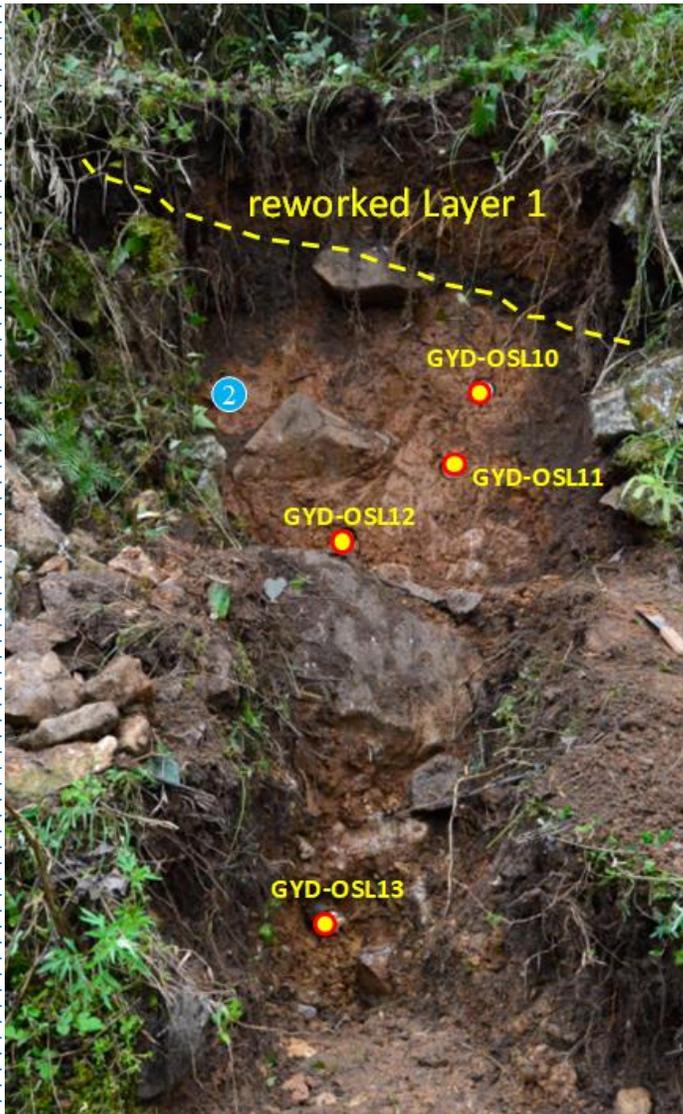


Flakes

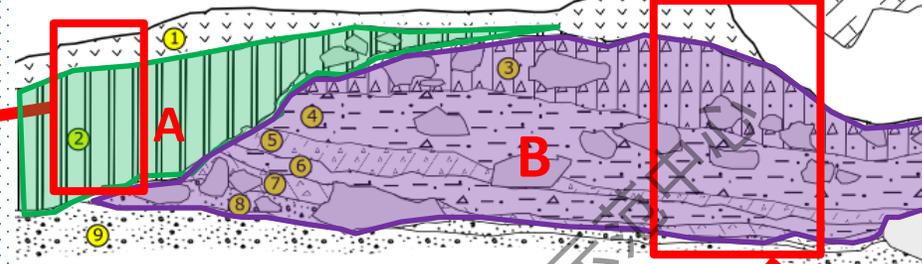


Tools

Profile S2



W

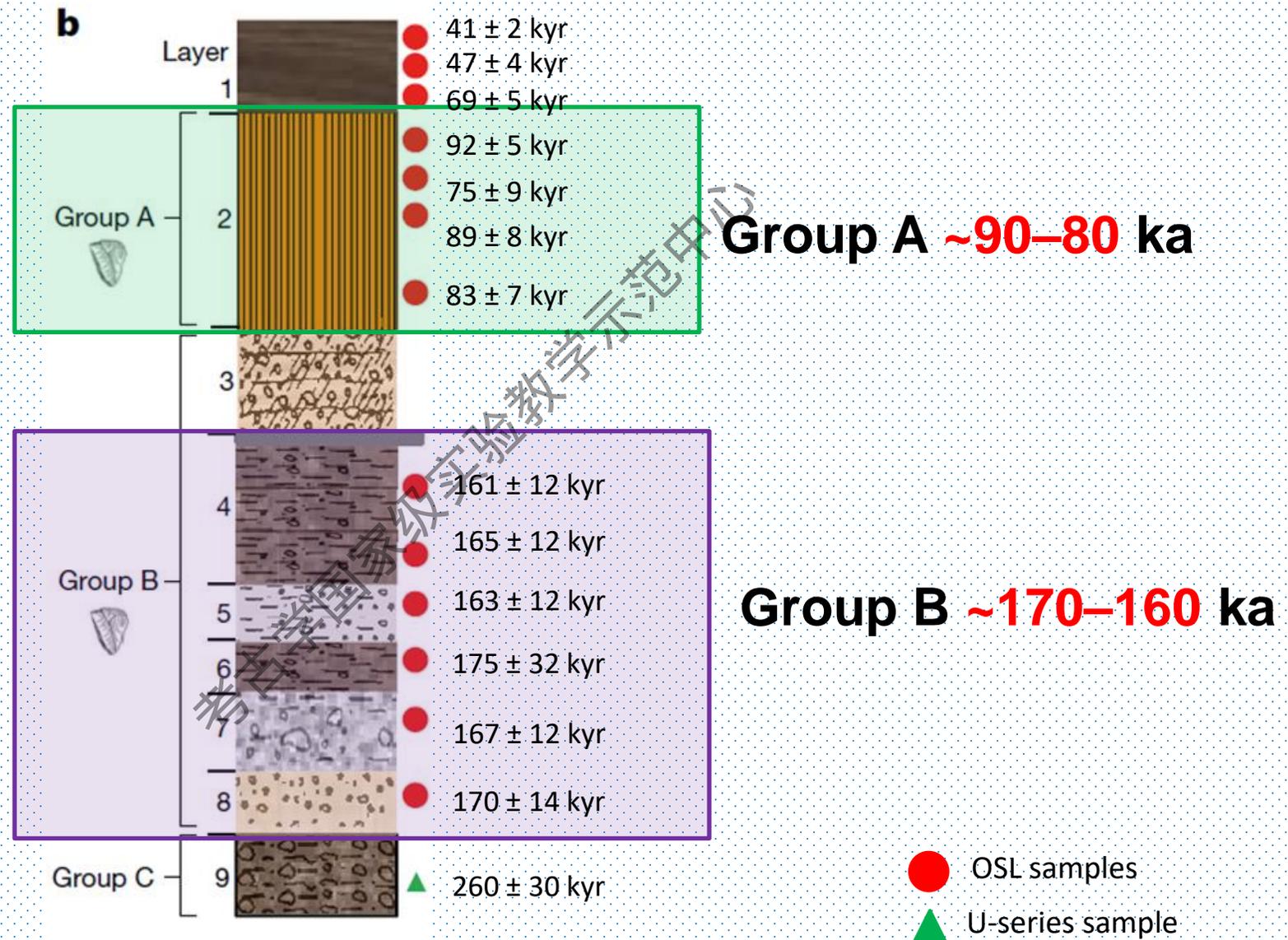


考古学国家级实验教学示范中心

Profile S1



# OSL dating results



## Significance of Guanyindong Levallois

- The **earliest** evidence of prepared core technology in East Asia
- A **behavioral capacity** compatible with their counterparts from the western hemisphere
- Possibility of **demographic events** that may have occurred earlier in the Middle Palaeolithic

# Who made these stone artifacts?



© Thilo Parg/Wikimedia Commons



## 释光测年小结

- 两种测量方法：热释光(TL)及光释光(OSL).
- 热释光采用加热样品来进行测量.
- 光释光采用光来激发样品.
- 样品再埋藏前需要被充分的曝晒或者加热.
- 被埋藏后，环境中的电离辐射使被捕获的电子不断积累和增加.
- 通过热释光和光释光两种方法来测量样品埋藏在沉积物里所接收的环境总辐射剂量.
- 通过测量土壤中放射性元素的含量和宇宙射线来计算年剂量.
- 释光年代通过总剂量和年剂量的比值来计算.
- 释光测年的范围通常为几十年至50万年，如果年剂量比较小的话，其测年上限更老.
- 因为其测量对象是石英和长石，所以大多数的考古遗址都可以使用释光测年.