



# 锦屏低温晶体量热器及测试系统 研究进展

薛明萱（代表CUPID-CJPL）

核探测与核电子学国家重点实验室  
中国科学技术大学

第二届地下和空间粒子物理与宇宙物理前沿问题研讨会 千岛湖 2023.5.7-12

# 报告提纲

## ✿ 低温粒子探测（量热器）

- ✿ 原理及应用
- ✿ 新型荧光-热量双读出

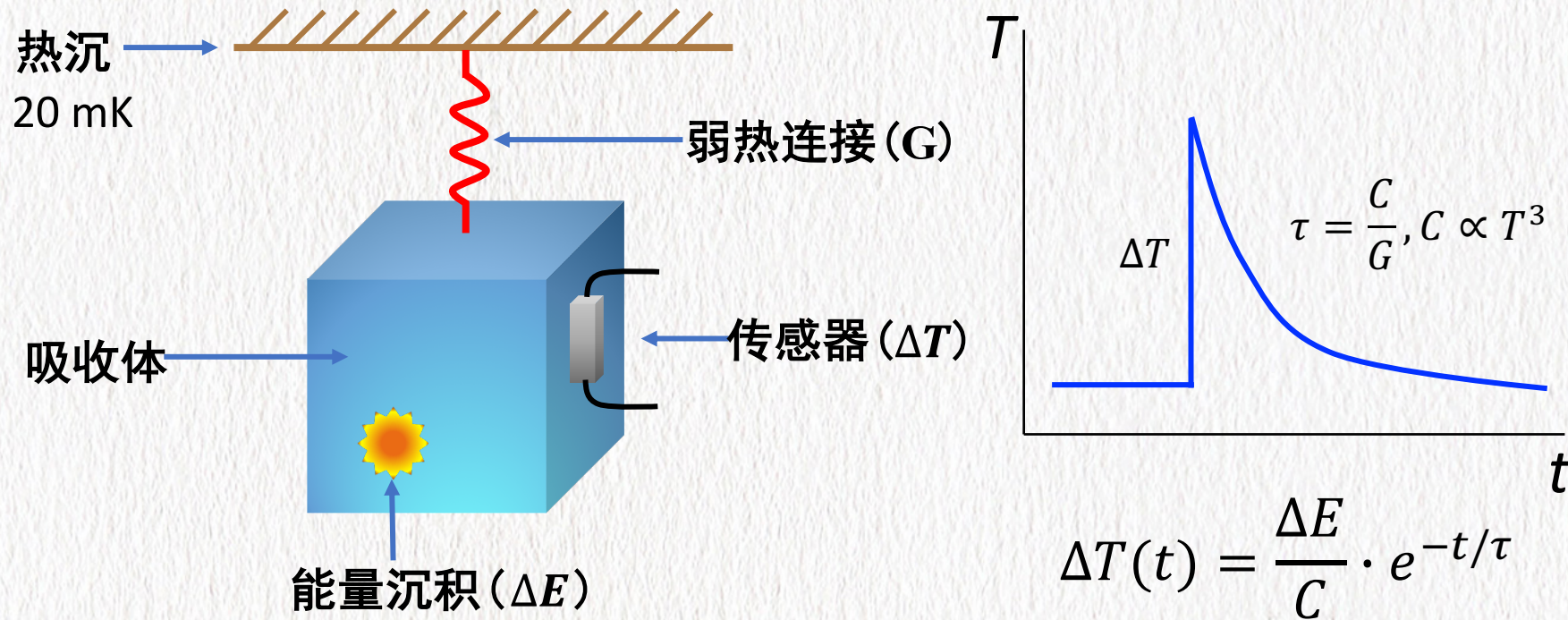
## ✿ 钼酸盐晶体光-热二维读出量热器及测试

- ✿ CMO量热器测试
- ✿ 小尺寸LMO量热器设计及组装
- ✿ mK深冷平台安装
- ✿ 引线及电学连接
- ✿ 屏蔽体初级设计

## ✿ 总结

# 探测原理

- ❁ 基于声子（或以声子为媒介的）探测的粒子探测器，称为低温粒子探测器/量热器 (Low Temperature Detector/Cryogenic phonon detector)



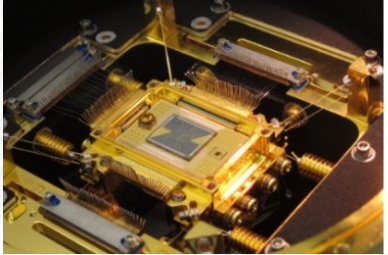
- ❁ **重要组成**：吸收体、温度传感器、弱热连接、低温恒温器（热沉）
- ❁ **独特优势**：吸收体多样、极低探测阈值( $\sim 15$  eV)、极好能量分辨(5.3 keV@2.6 MeV)

# 典型应用

低能区 MeV, keV, eV

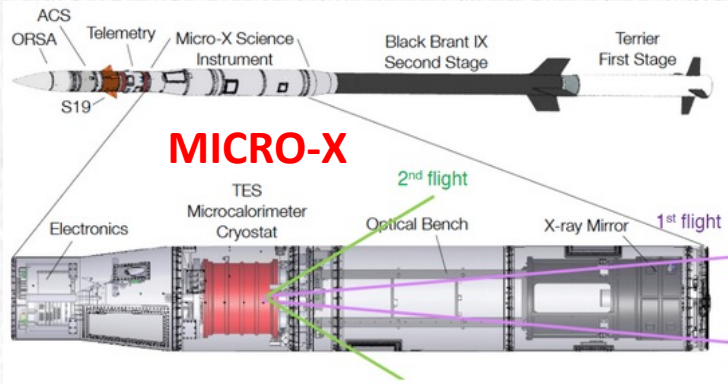
信号衰减时间  $\mu\text{s} \sim \text{百ms}$  量级

极好的能量分辨



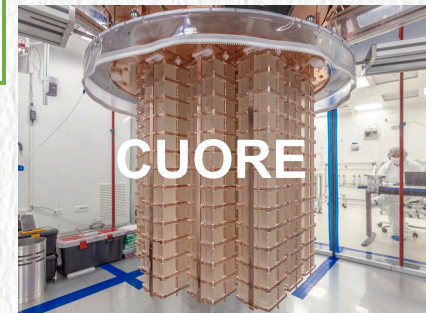
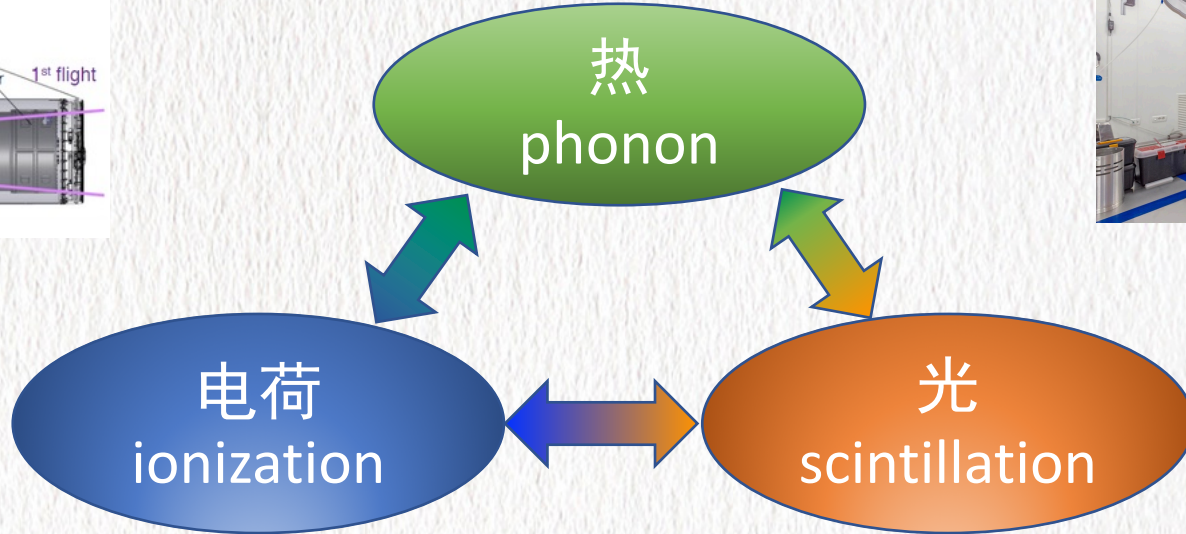
日本“瞳”卫星

轻质量暗物质寻找  
天然放射性衰变:  $\alpha$  衰变,  $0\nu\beta\beta$   
中微子原子核弹性相干散射  
软X射线精确测量

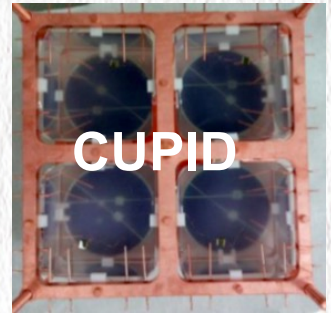


MICRO-X

空间



CUORE

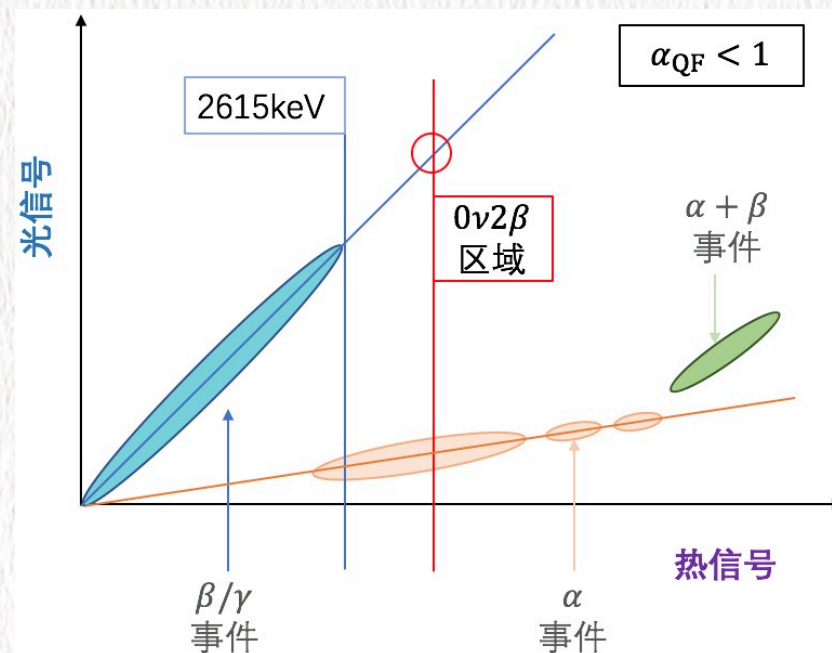
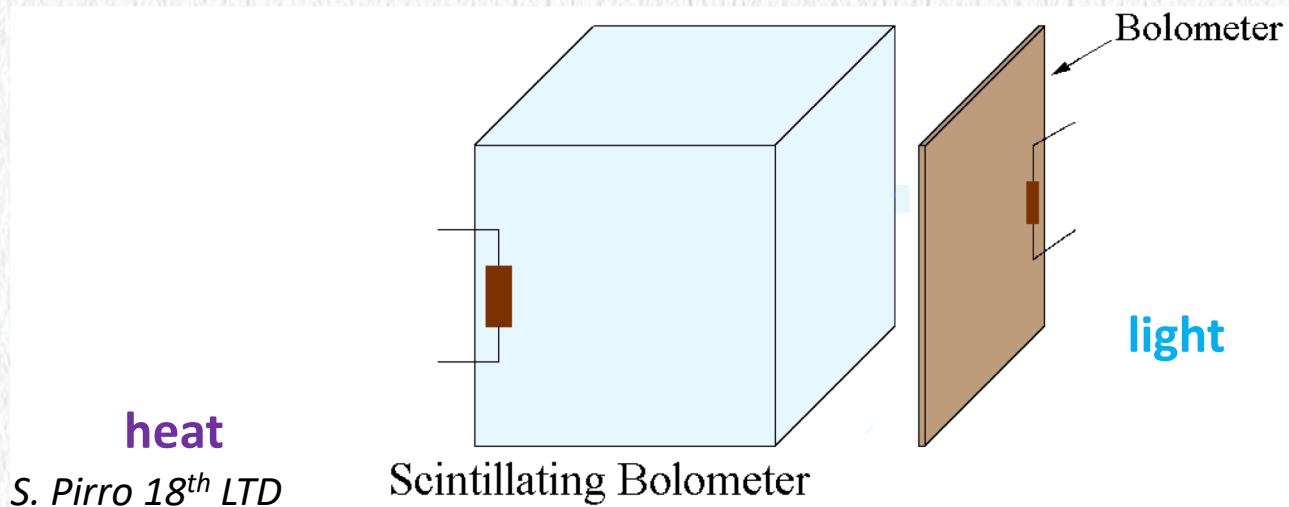


CUPID

地下

# 新型荧光-热量双读出量热器

- ✿ 以闪烁晶体为核心吸收体，实现光-热二维读出，具备粒子鉴别能力  $\beta/\gamma$  vs.  $\alpha$
- ✿ 以钼酸盐 ( $^{100}\text{Mo}$ ) 为吸收体，寻找  $^{100}\text{Mo}$  无中微子双贝塔衰变



“荧光-热量”双参数读出方案及读出信号二维分布示意图

# 报告提纲

## ✿ 低温粒子探测（量热器）

- ✿ 原理及应用
- ✿ 新型荧光-热量双读出

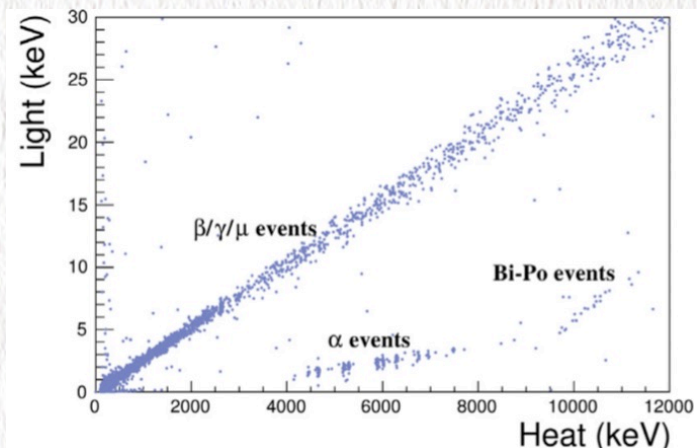
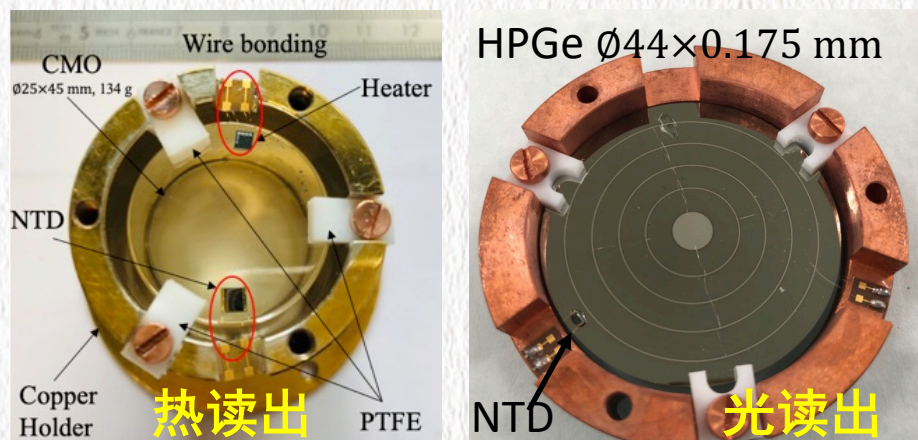
## ✿ 钼酸盐晶体光-热二维读出量热器及测试

- ✿ CMO量热器测试
- ✿ 小尺寸LMO量热器设计及组装
- ✿ mK深冷平台安装
- ✿ 引线及电学连接
- ✿ 屏蔽体初级设计

## ✿ 总结

# 钼酸镉CMO量热器

- ✿ 晶体尺寸 $\phi 25 \times 45$  mm, 宁波大学生产, 法国Orsay组装, 荧光-热量双读出
- ✿ DU\_USTC地面实验室测试, 混合腔室MC盘10 mK



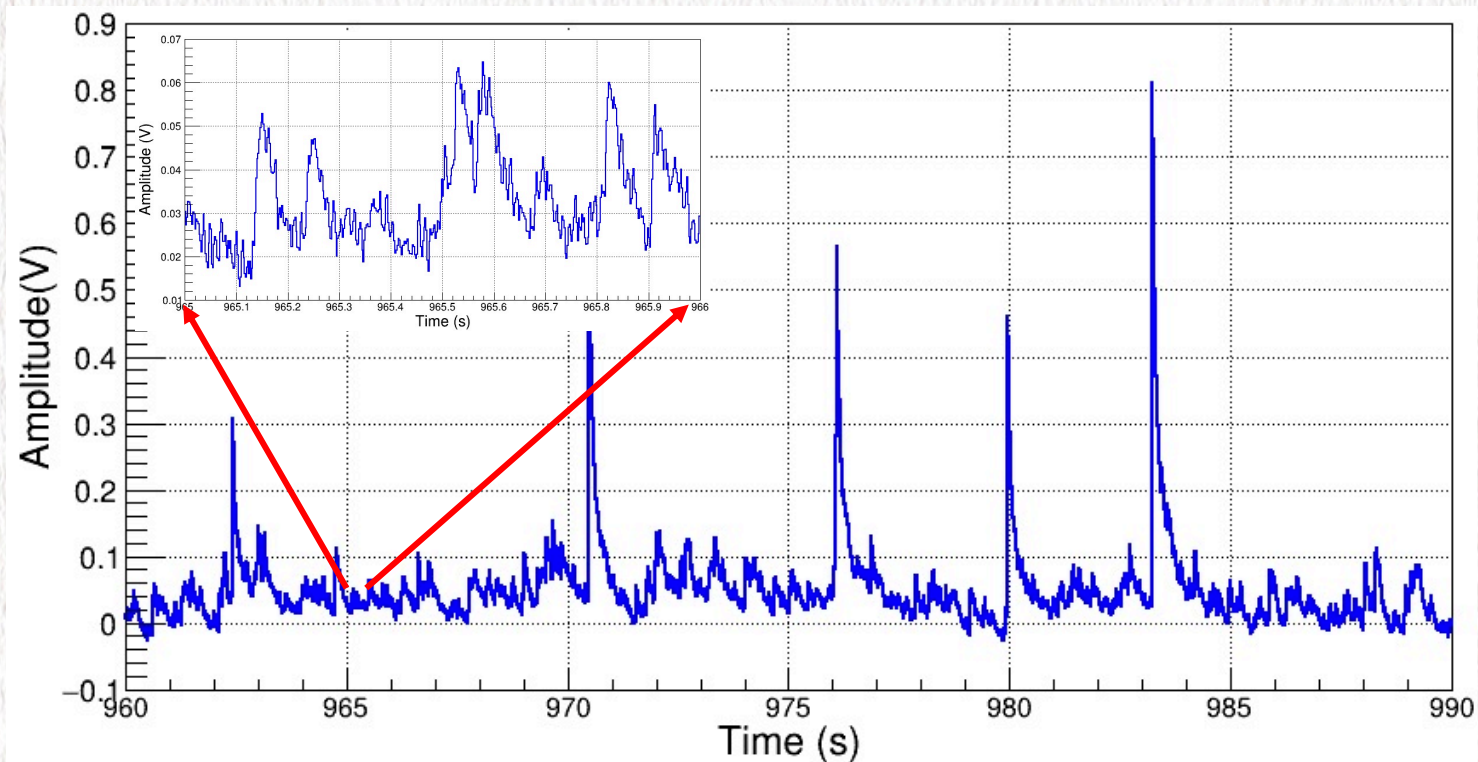
DU\_USTC冷盘



探测器安装

# CMO量热器信号读出

- ✿ CMO量热器**热读出信号**，来自宇宙线、环境/自身放射性等，衰减时间~**100 ms**
- ✿ 地面实验室，尚缺少放射性屏蔽体，事例堆积（pile-up）严重，影响能量分辨
- ✿ 拟解决方案：**更小尺寸晶体量热器测试&放置Pb/Cu屏蔽体**



无触发流数据读出，16bit ADC，5 kHz取样率



# 报告提纲

## ✿ 低温粒子探测（量热器）

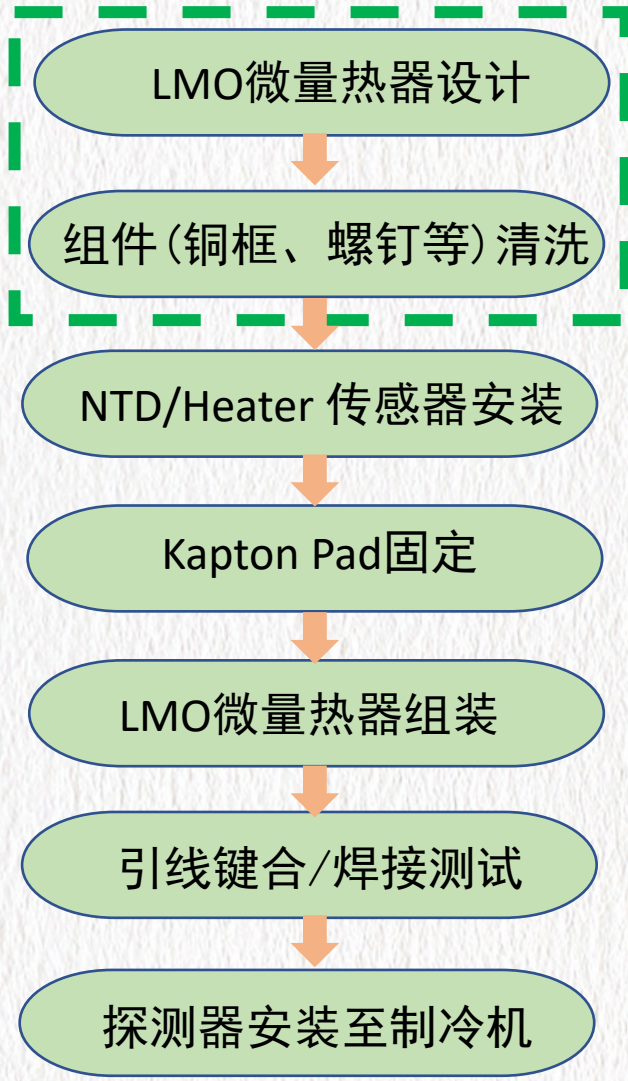
- ✿ 原理及应用
- ✿ 新型荧光-热量双读出

## ✿ 钼酸盐晶体光-热二维读出量热器及测试

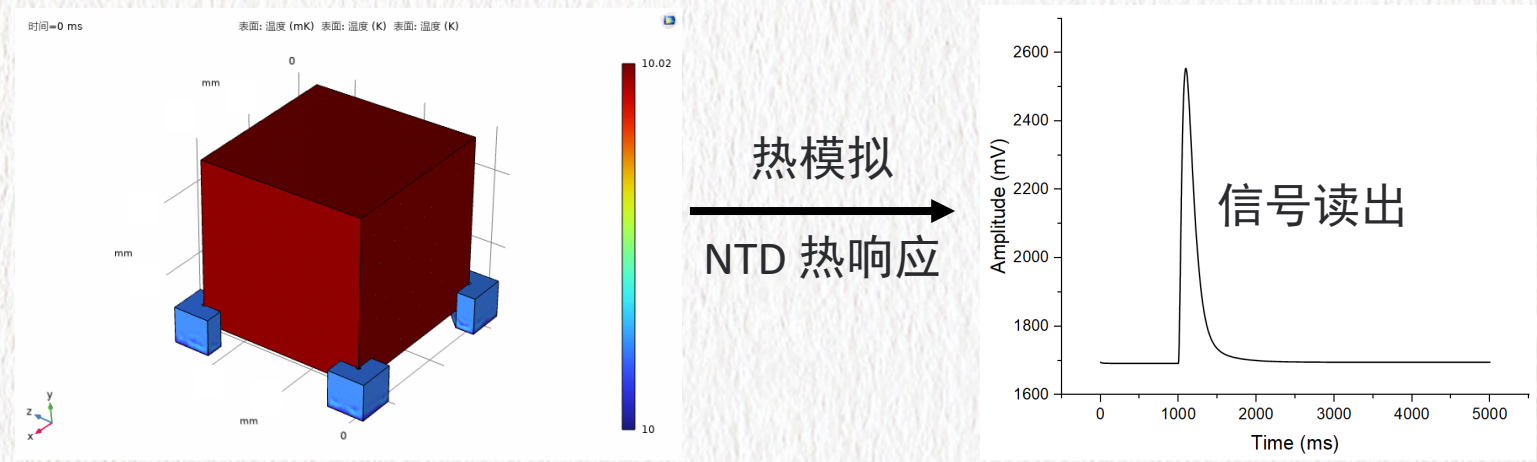
- ✿ CMO量热器测试
- ✿ 小尺寸LMO量热器设计及组装
- ✿ mK深冷平台安装
- ✿ 引线及电学连接
- ✿ 屏蔽体初级设计

## ✿ 总结

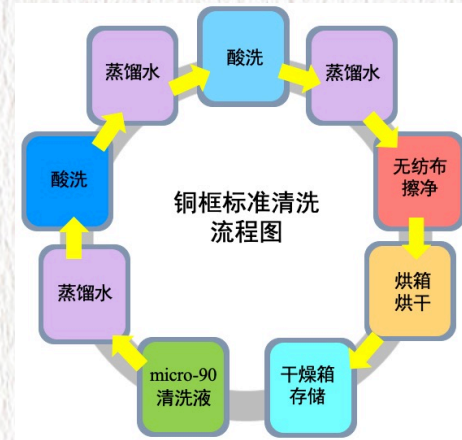
# 小尺寸钼酸锂LMO量热器设计与组装



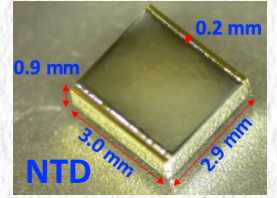
## ✿ 晶体量热器热模拟辅助探测器设计



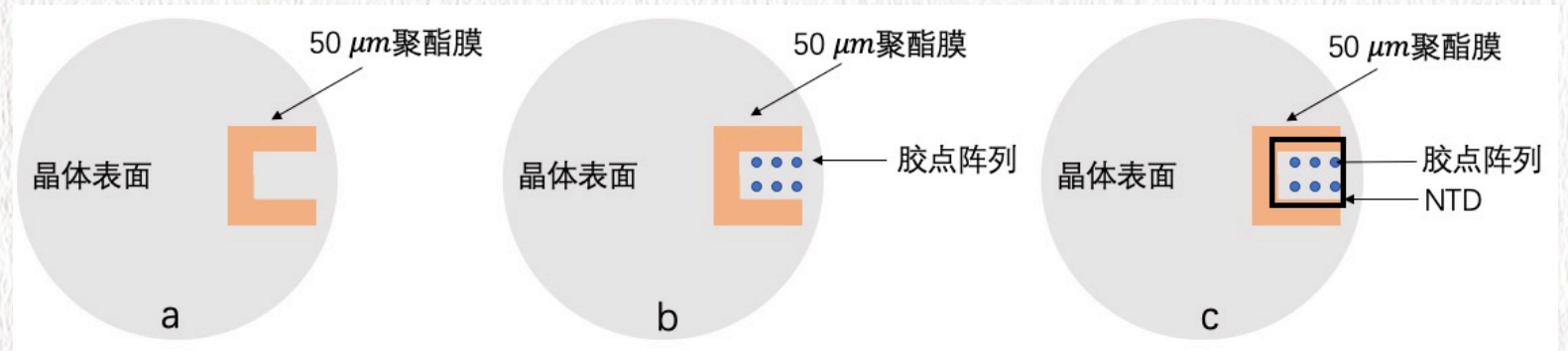
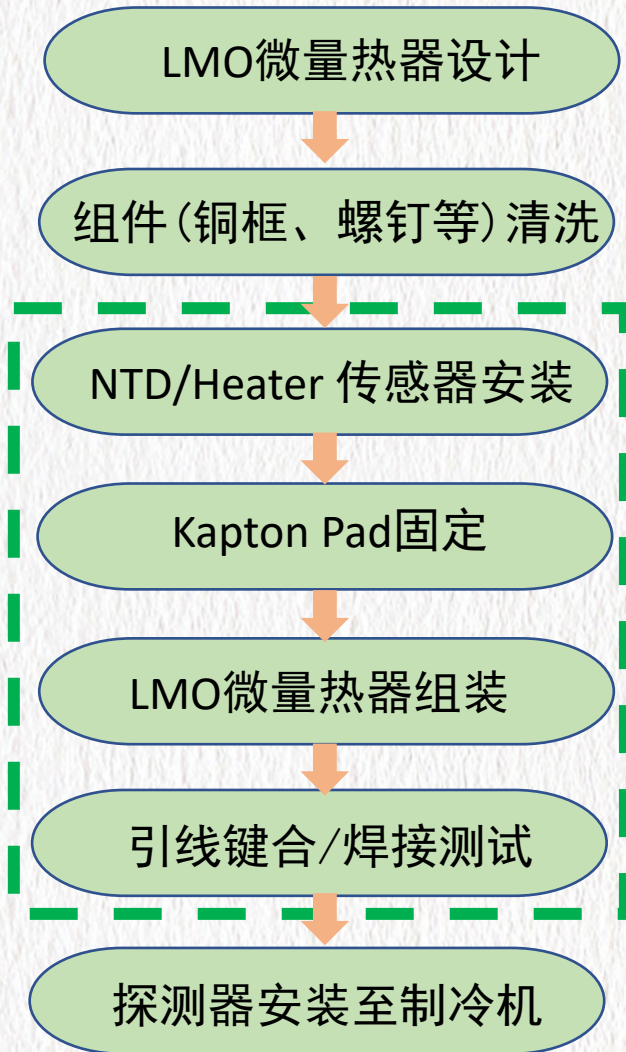
## ✿ 建立一套铜制品/探测器组装用材料有效清洗流程



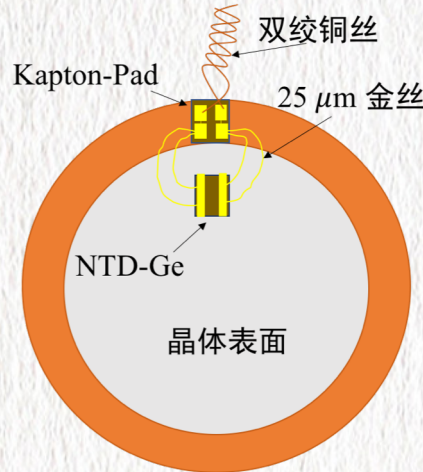
# 小尺寸钼酸锂LMO量热器设计与组装



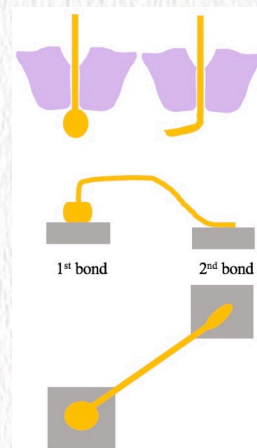
✿ 设计并搭建一套传感器与晶体耦合粘胶平台



✿ 量热器引线读出



总体布局示意图



球焊示意图



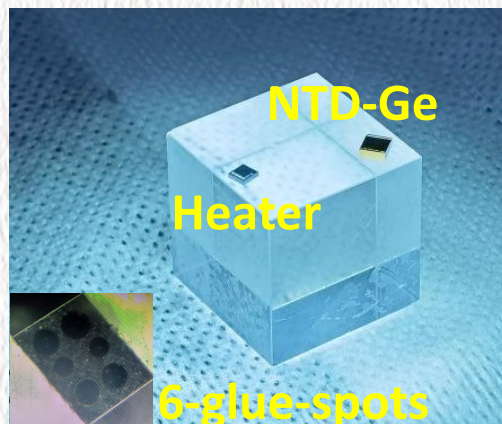
引线键合

# LMO( $2 \times 2 \times 2 \text{ cm}^3$ )量热器研制

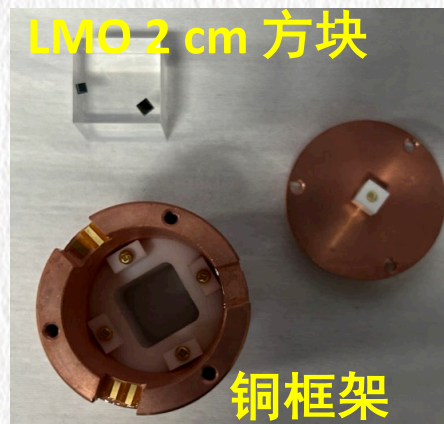
紫铜框架/PTFE支架/螺丝等清洗



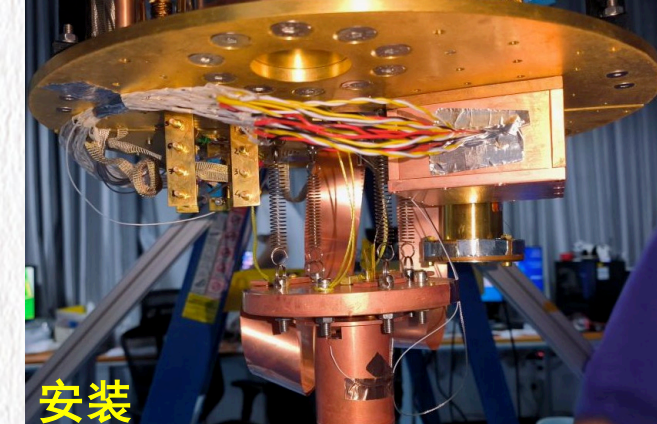
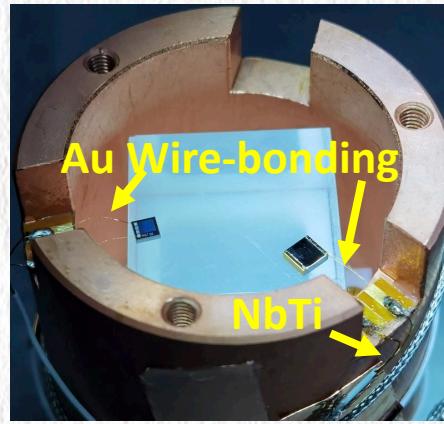
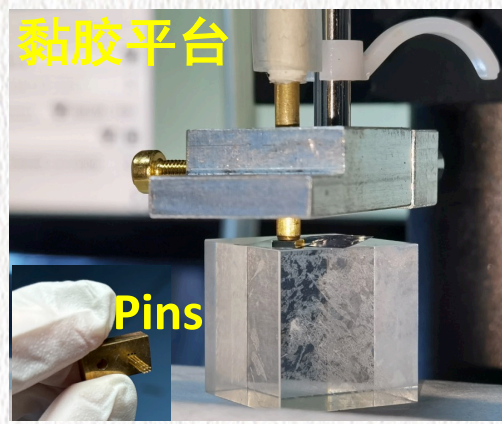
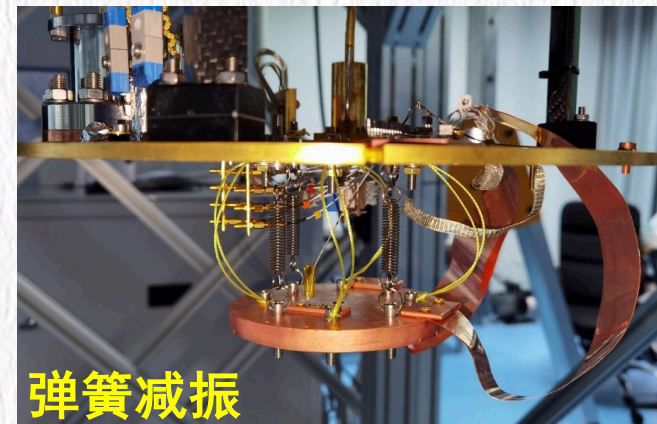
NTD/Heater等胶点阵列耦合晶体



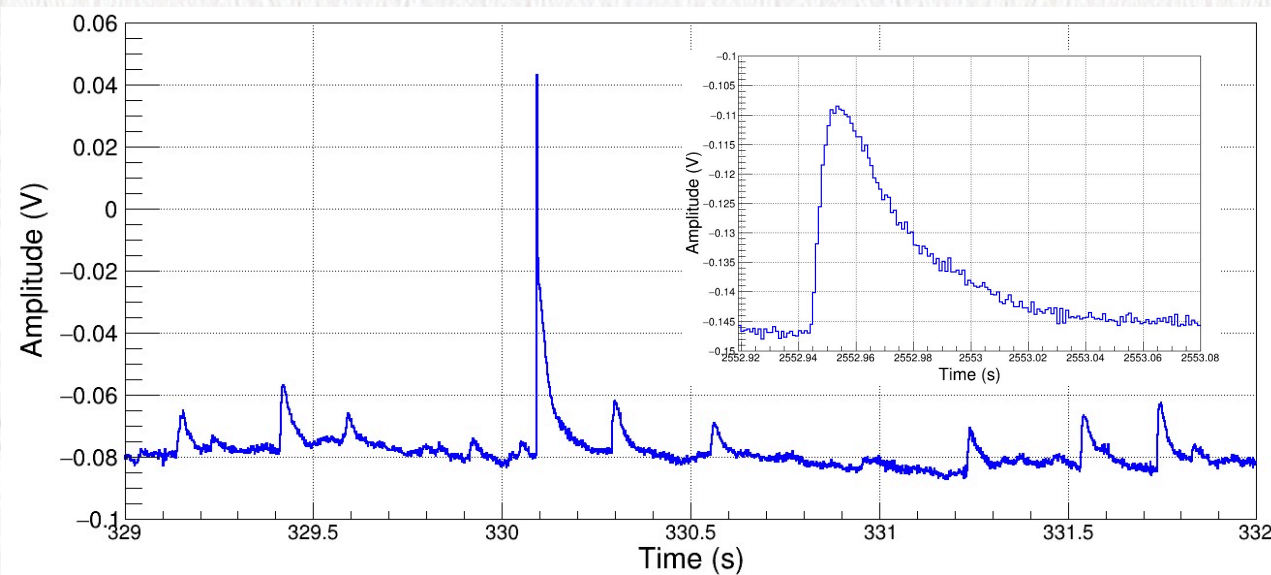
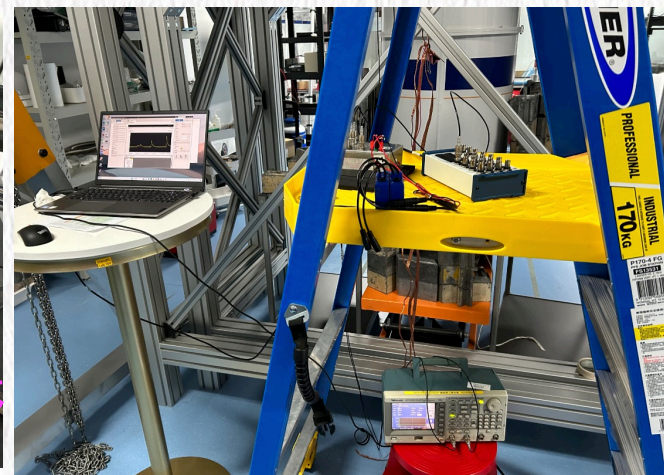
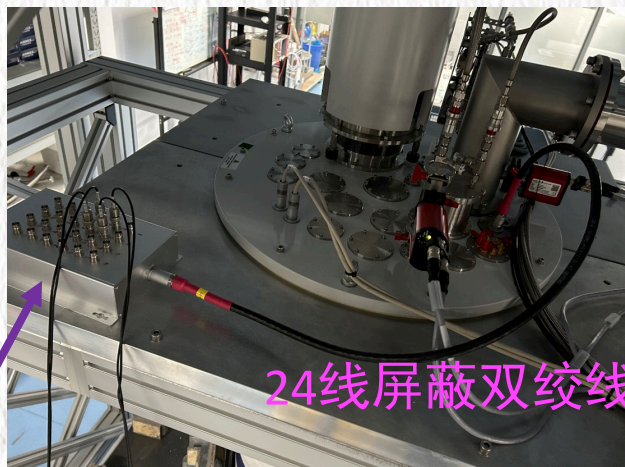
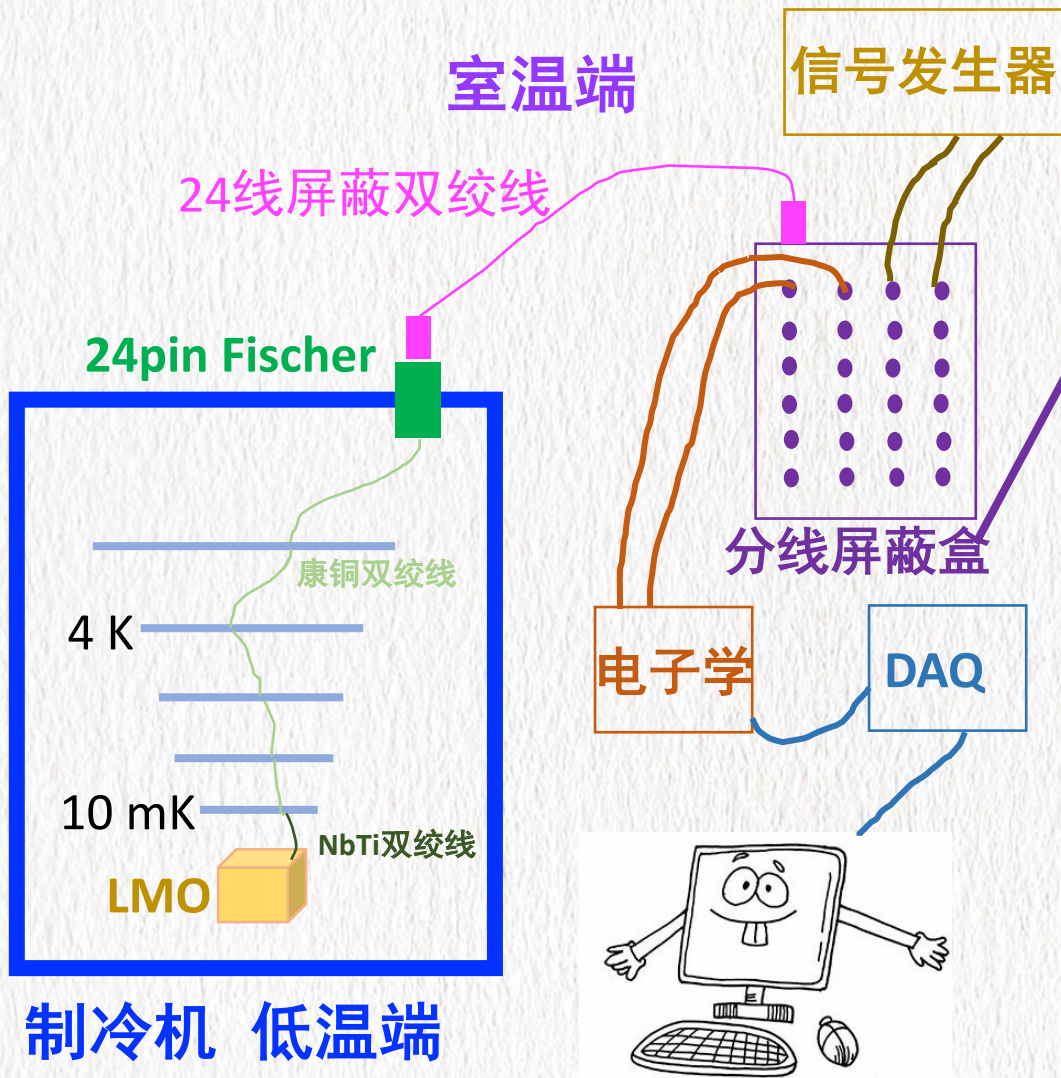
探测器组装及电学引线



探测器安装至制冷机冷盘



# LMO量热器电学引线及信号读出



LMO@30mK, 热信号读出, 衰减时间~25 ms

# 报告提纲

## ✿ 低温粒子探测（量热器）

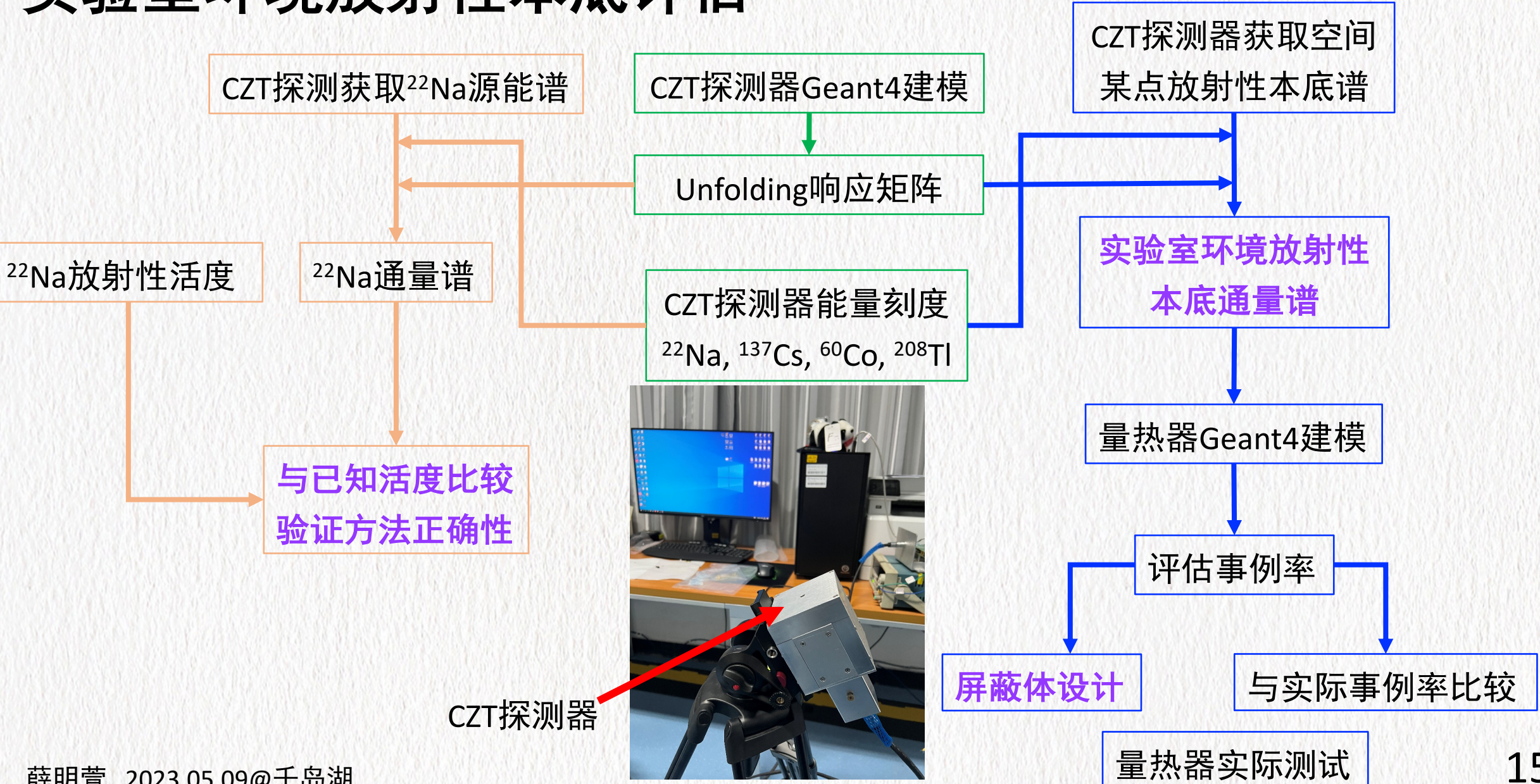
- ✿ 原理及应用
- ✿ 新型荧光-热量双读出

## ✿ 钼酸盐晶体光-热二维读出量热器及测试

- ✿ CMO量热器测试
- ✿ 小尺寸LMO量热器设计及组装
- ✿ mK深冷平台安装
- ✿ 引线及电学连接
- ✿ 屏蔽体初级设计

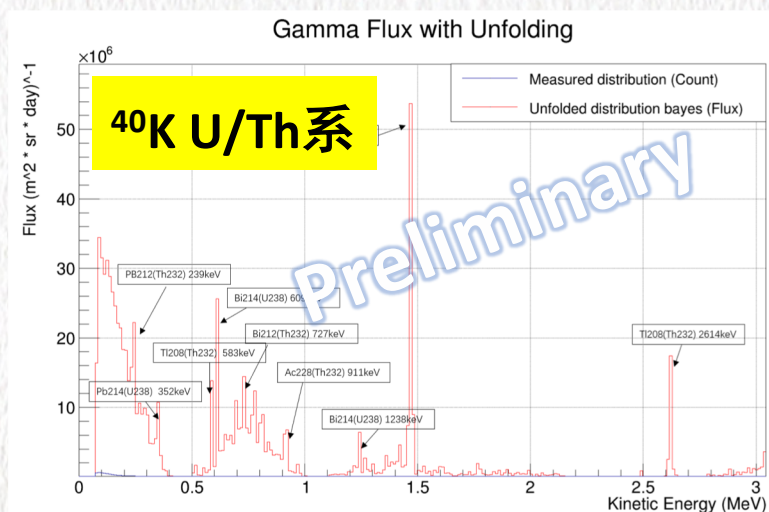
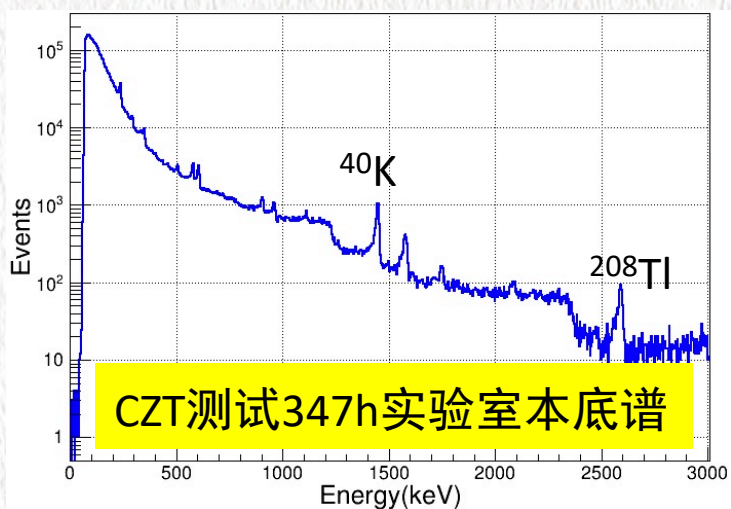
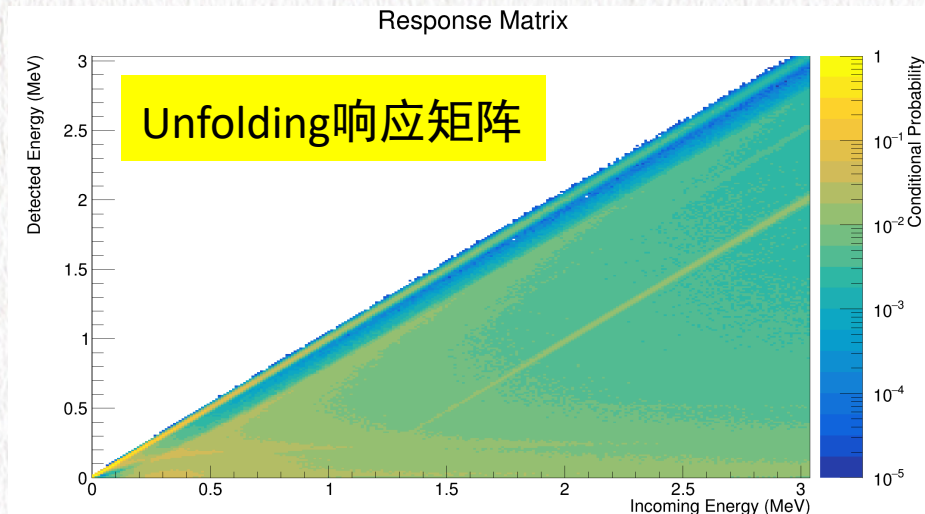
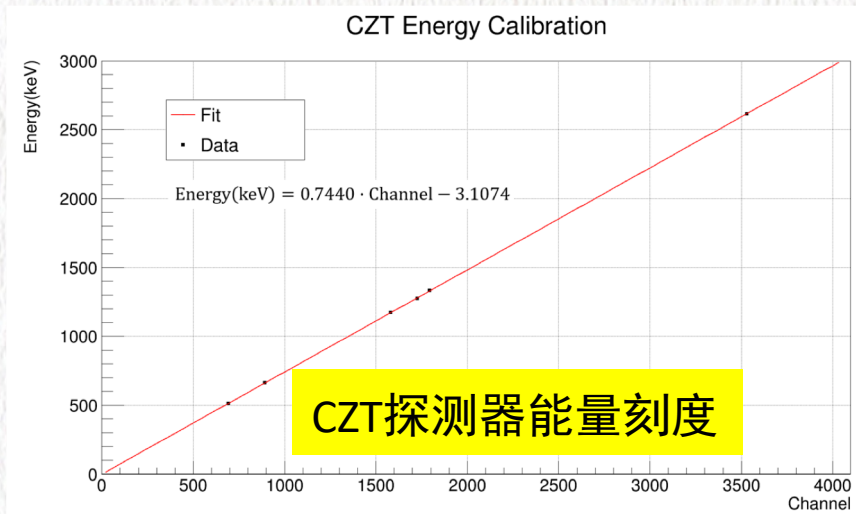
## ✿ 总结

# 实验室环境放射性本底评估



# 实验室环境放射性本底通量谱

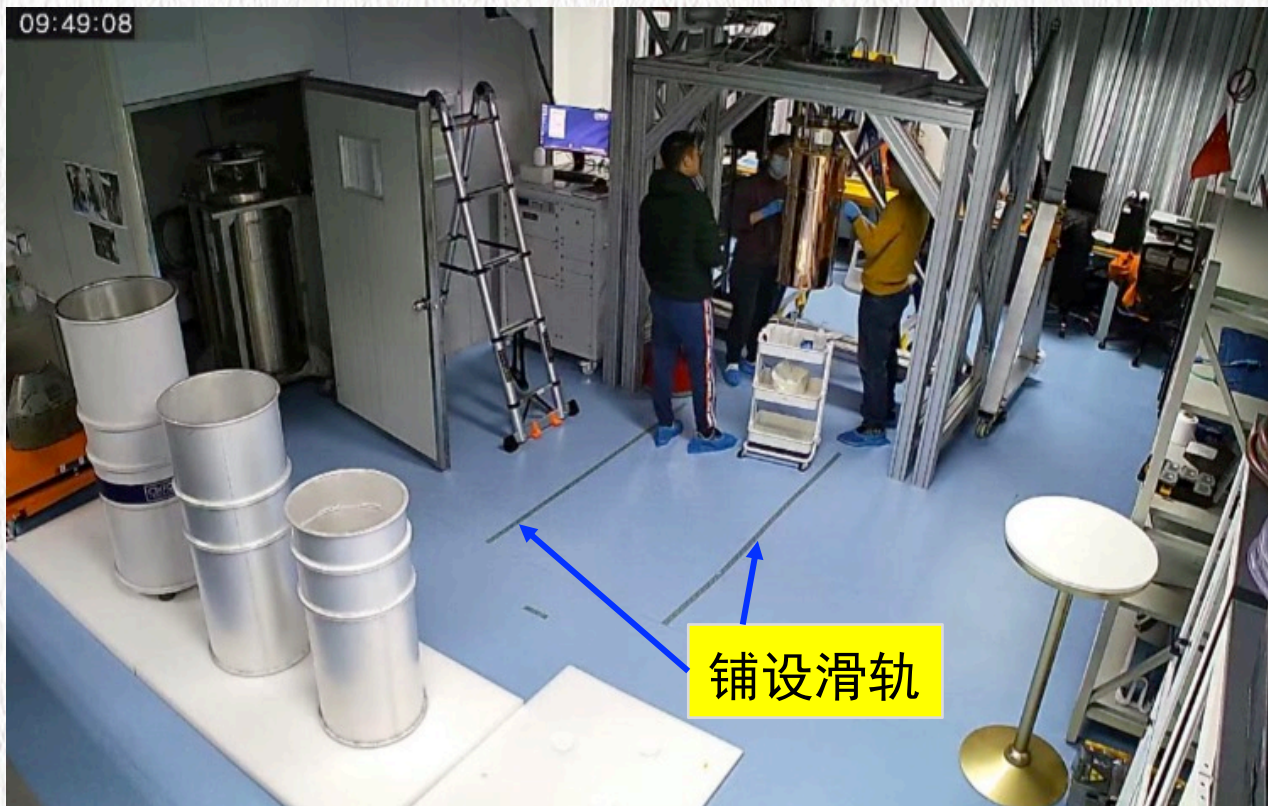
✿ CTZ探测器能量分辨率高，FWHM 13.84 keV @511 keV，更易获得精细能谱





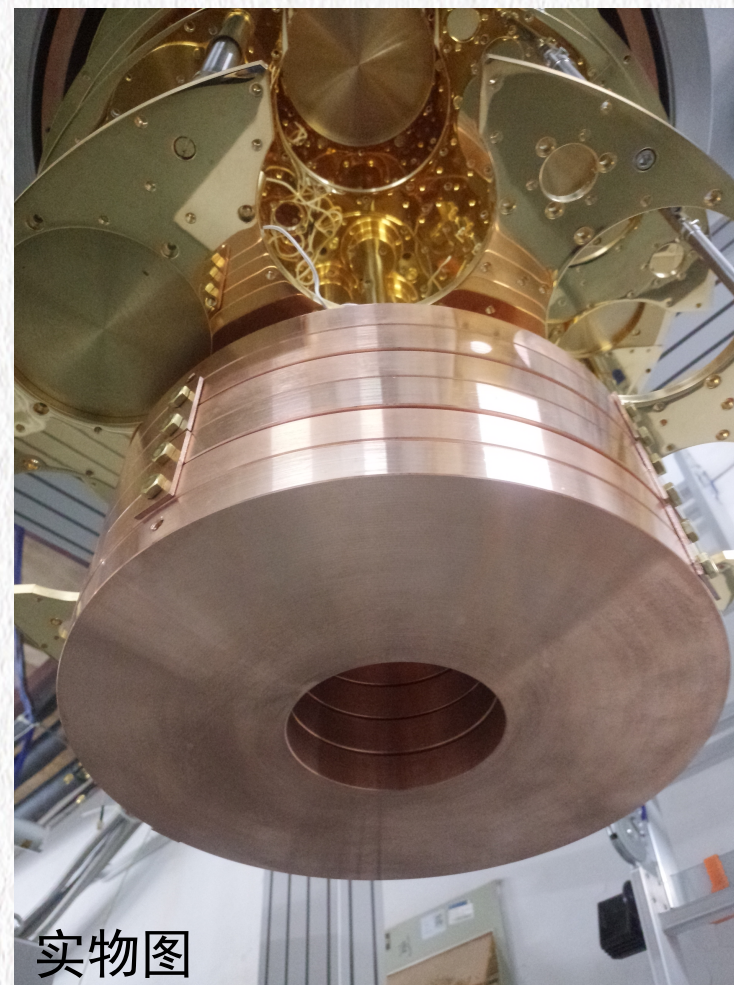
# 屏蔽体初步设计 (Pb, DU\_USTC)

✿ 进一步的模拟结果表明，Pb厚度10 cm，本底降低2个数量级；考虑立体角



# 屏蔽体初步设计 (Cu, DU\_FDU)

✿ DU\_FDU 计划在冰箱内采用Cu屏蔽体



实物图

# 展望



# 总结

- ✿ 基于声子探测的**低温粒子探测器**在稀有衰变物理寻找中有**独特优势**
- ✿ 依托中国锦屏地下实验室，以量热器技术寻找 $^{100}\text{Mo}$ 无中微子双贝塔衰变
  - ✿ CMO\_NBU晶体量热器荧光-热量双读出，组装，测试；DU\_USTC测试
  - ✿ LMO\_NBU\_SIC晶体量热器初步研制，DU\_USTC获得热信号读出
  - ✿ 搭建量热器mK深冷低温测试平台（mK至室温端），DU\_USTC&DU\_FDU
  - ✿ 地面实验室放射性本底评估，CZT探测器+unfolding方法获得本底通量谱，辅助屏蔽体设计
  - ✿ 两套屏蔽体设计方案，Pb外部(DU\_USTC)、Cu内部(DU\_FDU)
- ✿ 近期计划安排
  - ✿ 小尺寸LMO晶体量热器优化测试
  - ✿ 深冷低温测试系统及室温端线缆优化与电磁屏蔽
  - ✿ 放射性屏蔽系统设计与搭建

# 谢谢

**Additional slides**