



中国科学技术大学

University of Science and Technology of China

# 锦屏低温晶体量热器无中微子 双贝塔衰变实验研究

薛明萱 (CUPID-China合作组)

核探测与核电子学国家重点实验室  
中国科学技术大学

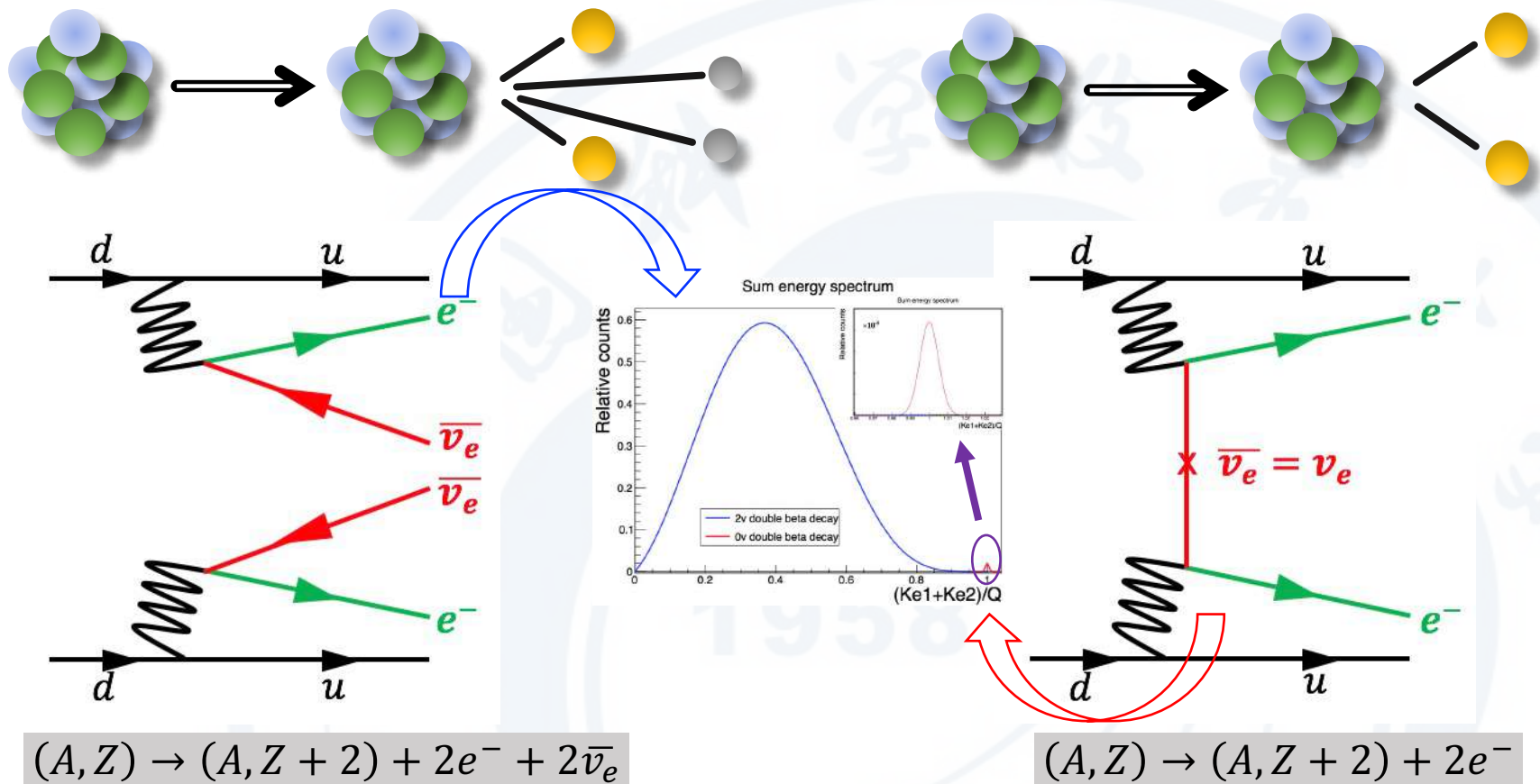
无中微子双贝塔衰变研讨会 2021. 05. 19-23 广东 珠海



# 内容概要

- 无中微子双贝塔衰变
- 低温晶体量热器
- CUPID-CJPL实验
- 近期研究进展
- 研究计划
- 总结

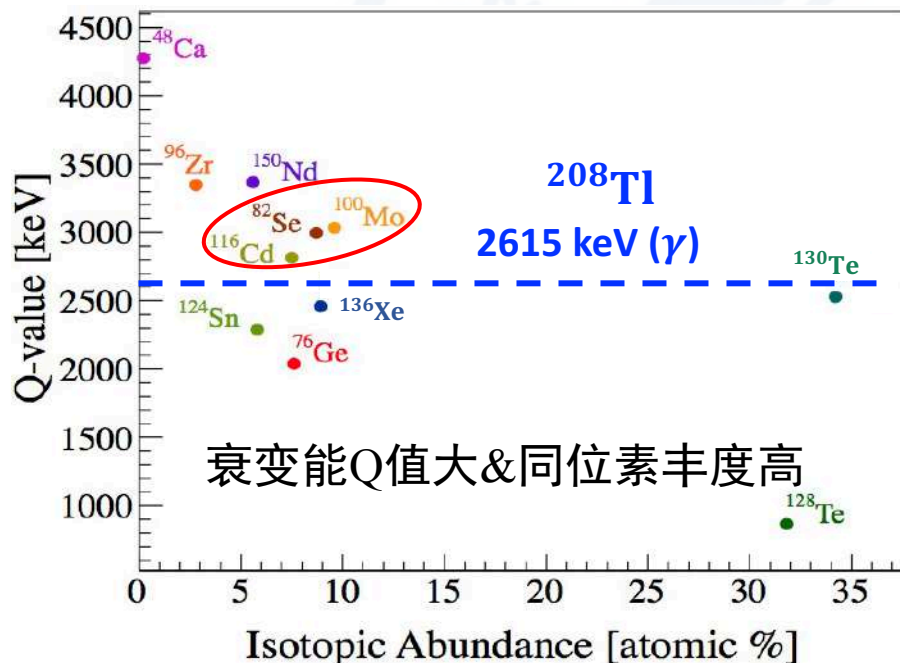
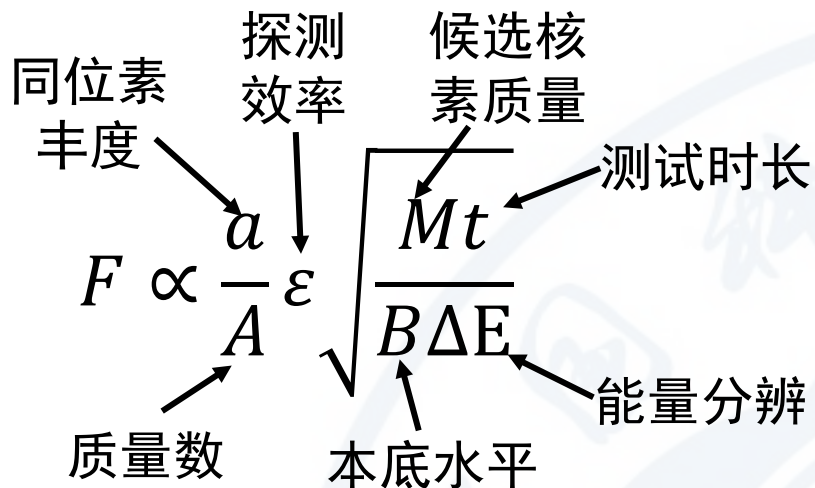
# 无中微子双贝塔衰变



## 中微子的绝对质量大小、Majorana属性、轻子数破缺、物质-反物质不对称起源

- 能谱法：末态两个电子的动能和在衰变Q值处；
- 径迹+能谱法：末态两个电子共顶点，且动能和位于Q值处。

# 无中微子双贝塔衰变



## • 探测器选择

- ✓ 高同位素含量 → 同位素富集
- ✓ 高探测效率 → “源=探测器”
- ✓ 有效物质的量，吨级 → 易于扩展
- ✓ 长时间平稳运行

- ✓ 极低本底水平

地下实验室测试

屏蔽措施

探测器（材料）低放射性

- ✓ 极好的探测器性能

能量分辨率 →  $FWHM/Q \sim$  千分之几

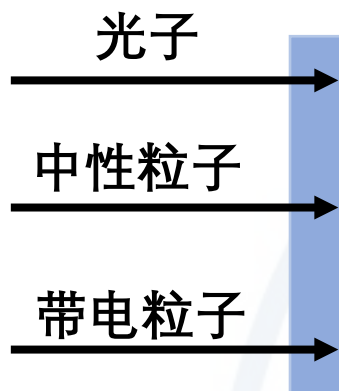
径迹拓扑

本底抑制

# 低温量热器

## • 粒子与物质相互作用

- 信息载体：电子-离子，电子-空穴，闪烁荧光，声子

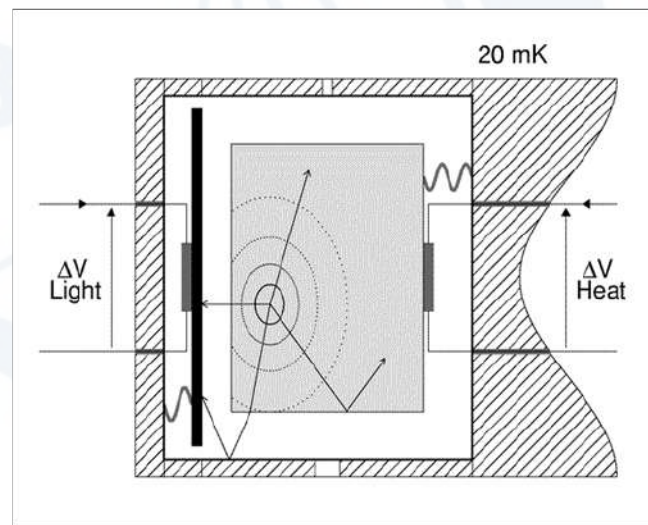


弹性碰撞：粒子沉积能量绝大部分( $\sim 90\%$ )最终转换为声子发射，产生“热”

非弹性碰撞：粒子沉积能量少部分( $< 10\%$ )转换为电子-离子（空穴）对，或者荧光

## • 闪烁探测技术(NaI晶体)

- 光产额：40000荧光光子/MeV
- 波长： $\sim 400\text{ nm}$  ( $\sim 3\text{ eV}$ )
- 荧光光子总能量： $0.12\text{ MeV}$  ( $\sim 12\%$ )
- $\sim 88\%$ 的能量直接转化为热量(声子)，被自身吸收的荧光光子能量仍然会转化为热量(声子)



# 低温量热器

- 低温探测技术

- 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

LTD-Low Temp. Detector

CPD-Cryogenic Particle Detector

- “声子” (或次级的准粒子) 数正比于能量沉积
- 原则上，各种介质都可以用来做低温探测器(LTD)的探测元件

- 1949年物理学家使用毫米级氮化铌在15K温度下观测到单 $\alpha$ 事件，标志着低温量热器被首次应用到粒子物理学科

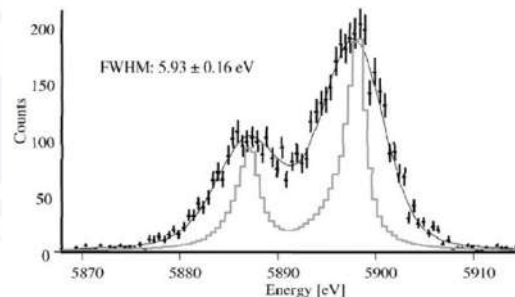
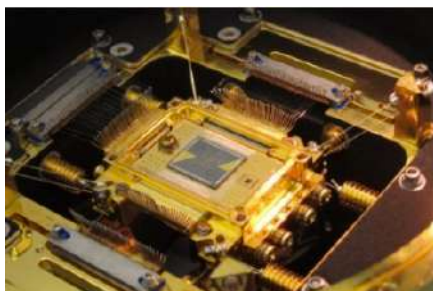
“The rapid technical developments of last years and their outstanding features make these detectors very attractive in a variety of field ranging from fundamental research to applied science.” (2015)

1987年以来，LTD的物理和相关技术成为物理界公认和关注的一个研究领域。

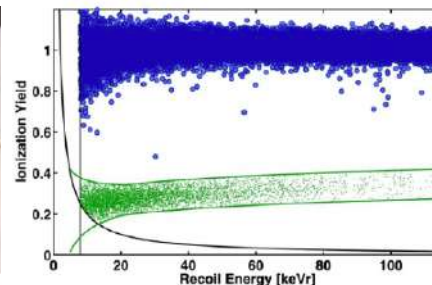
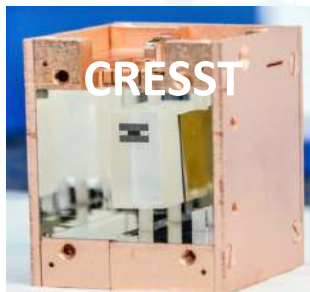
# 低温量热器——典型应用

- **应用** 天文学、粒子物理与原子核物理、原子物理学、量子技术新前沿等等

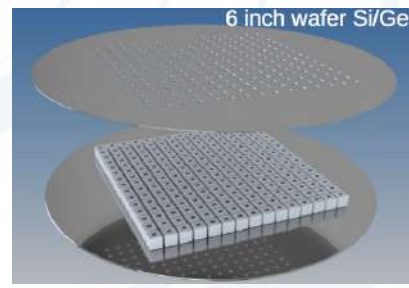
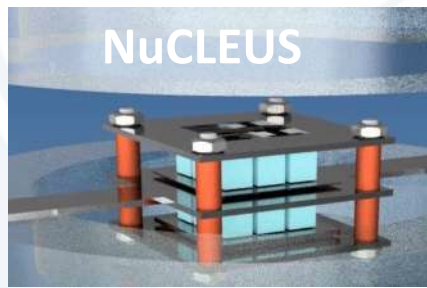
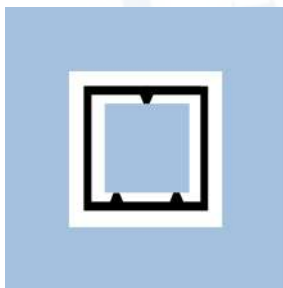
- ✓ X射线天文学



- ✓ 暗物质粒子寻找

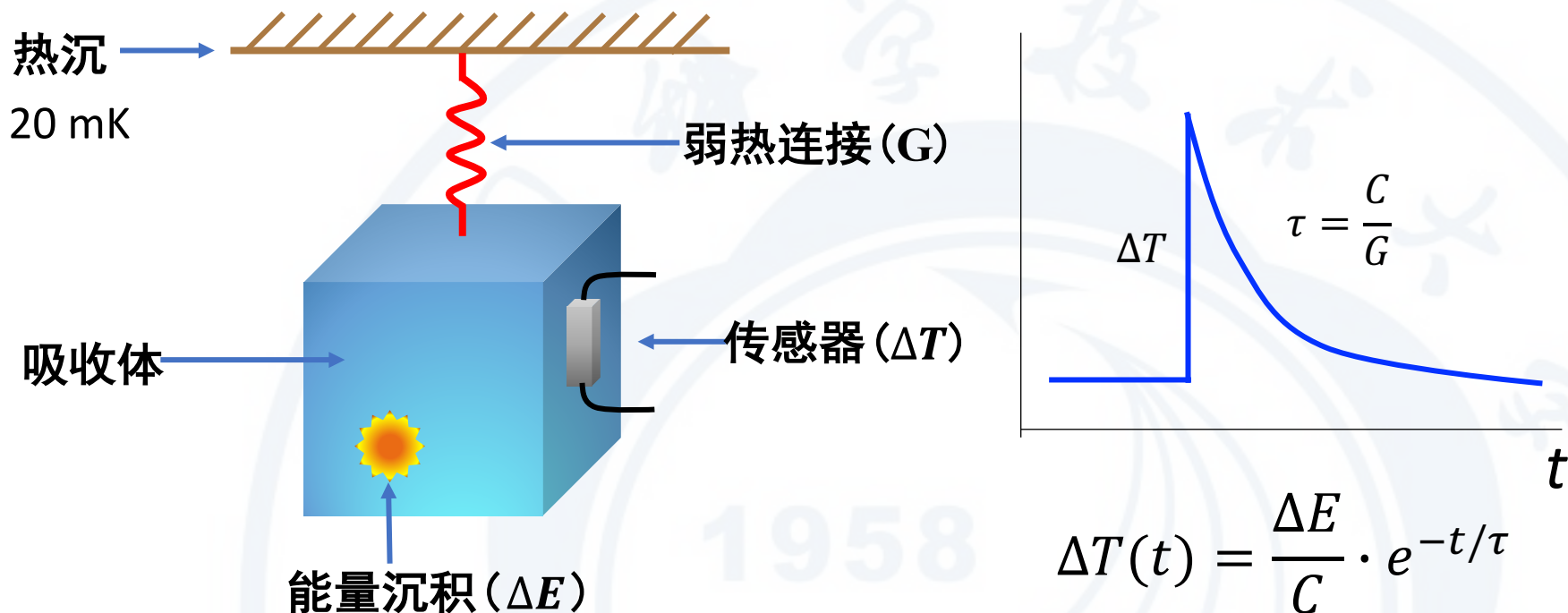


- ✓ 中微子弹性相干散射



# 低温晶体量热器—— $0\nu\beta\beta$ 探测

## • 低温晶体量热器 $0\nu\beta\beta$ 探测原理——能谱法



- ✓ 吸收体材料选择广泛，验证更多理论预测具有 $0\nu\beta\beta$ 的核素
- ✓ “源=探测器”，无能量损失，极高探测效率，
- ✓ 极好的能量分辨率，探测媒介子——声子，**5.3keV@2615keV** (CUPID-Mo)
- ✓ 极好的粒子鉴别能力，抑制本底，“光-热”两相读出



# 低温晶体量热器——CUORE实验

- **CUORE (Cryogenic Underground Observatory for Rare Event)** 位于LNGS地下实验室以 $\text{TeO}_2$ 为吸收体寻找靶核 $^{130}\text{Te}$ 的 $0\nu\beta\beta$ 实验

**$\text{TeO}_2$ 由SICCAS提供**

- 最大的晶体量热器实验
- 运行温度 $\sim 12\text{-}15\text{ mK}$
- 998块 $\text{TeO}_2$ 晶体，尺寸 $5\times 5\times 5\text{ cm}$
- 总重742 kg， $^{130}\text{Te}$ 为206 kg
- 本底水平0.0138 ckky
- 能量分辨FWHM为7 keV@ROI

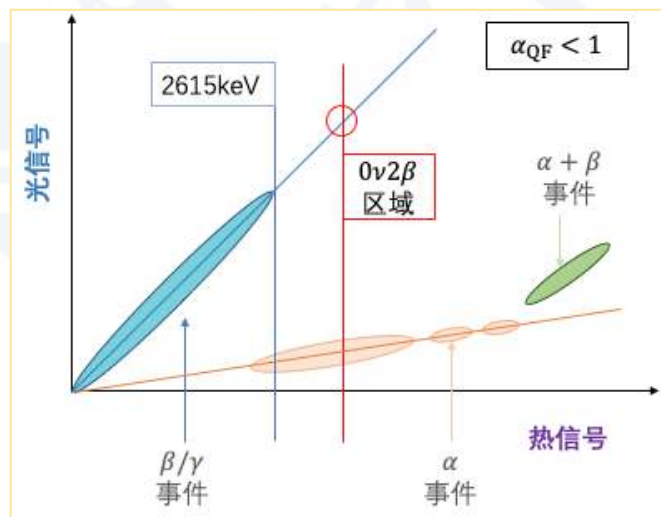
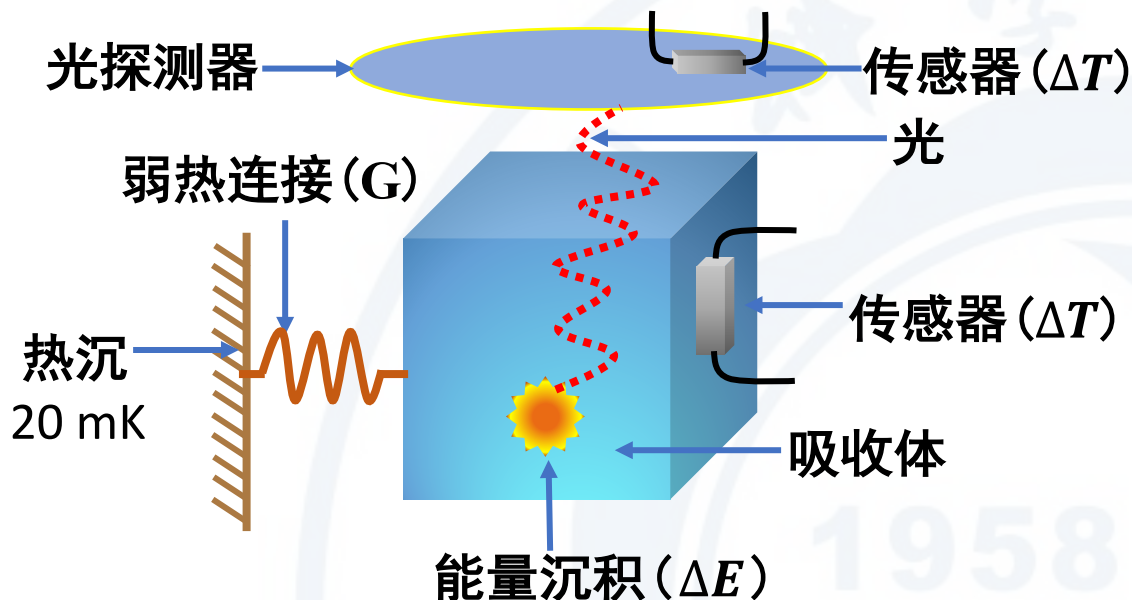
- 最灵敏的 $0\nu\beta\beta$ 探测器之一
- 最新结果
  - $T_{1/2}^{0\nu\beta\beta} > 3.2\times 10^{25}\text{ y}$  (90% C.L.)
  - $m_{\beta\beta} < 75 - 350\text{ meV}$
- 运行5年预期
  - $T_{1/2}^{0\nu\beta\beta} \sim 9\times 10^{25}\text{ y}$  (90% C.L.)
  - $m_{\beta\beta} < 60 - 280\text{ meV}$

*Phys. Rev. Lett.* 124 (2020) 122501



# CUPID-CJPL实验

- CUPID 新一代低温闪烁晶热量热器实验 (CUORE Upgrade with Particle Identification)

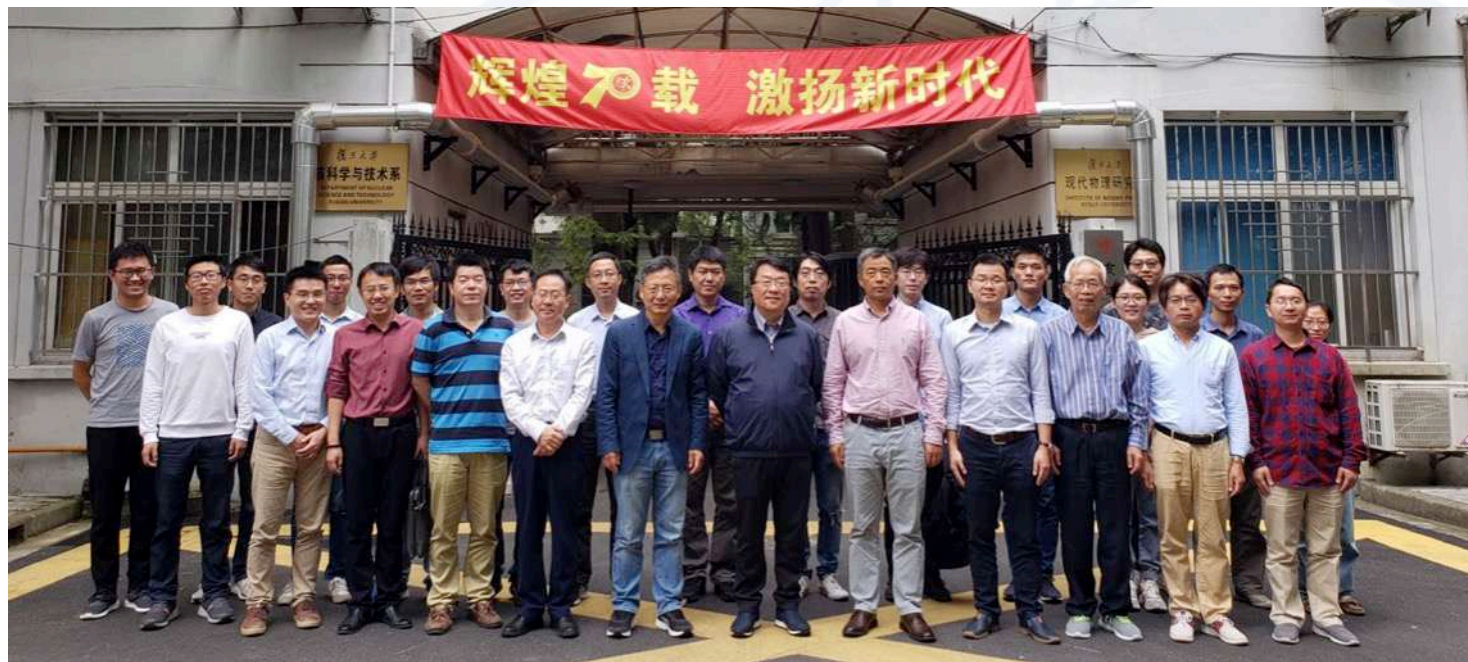


- 基于CUORE技术，实现荧光-热量二维信号读出，进行粒子鉴别，剔除 $\alpha$ 本底
- 高富集度含目标核素 $^{100}\text{Mo}$ 闪烁晶体，Er>95%
- $^{100}\text{Mo}$ 衰变能Q值3034 keV，高于 $^{208}\text{Tl}$  2615 keV天然 $\gamma$ 射线
- 高能量分辨率FWHM < 10keV @Q
- 拓展性强/成本可控：可采用多种同位素富集晶体

发展方向：压低 $\gamma$ 本底，去除 $\alpha$ 本底，保持能量分辨率！

# CUPID-CJPL实验

- CUPID-China合作组



由复旦大学现代物理研究所牵头，于2017年成立国内合作组，依托国家“十三五”重大科技基础设施——中国锦屏地下实验室，发展新一代低温晶体量热器 $0\nu\beta\beta$ 实验技术，开展无中微子双贝塔衰变和低质量暗物质等前沿物理研究。

# CUPID-CJPL实验

## • CUPID-China合作组

复旦大学(FDU)  
清华大学(THU)  
宁波大学(NBU)  
北京师范大学(BNU)  
上海交通大学(SJTU)  
中国科学技术大学(USTC)  
中科院上海硅酸盐研究所(SICCAS)  
中科院上海应用物理研究所(SINAP)



中国科学院上海应用物理研究所  
Shanghai Institute of Applied Physics, Chinese Academy of Sciences

## • CUPID国际合作组



CUPID-Italy

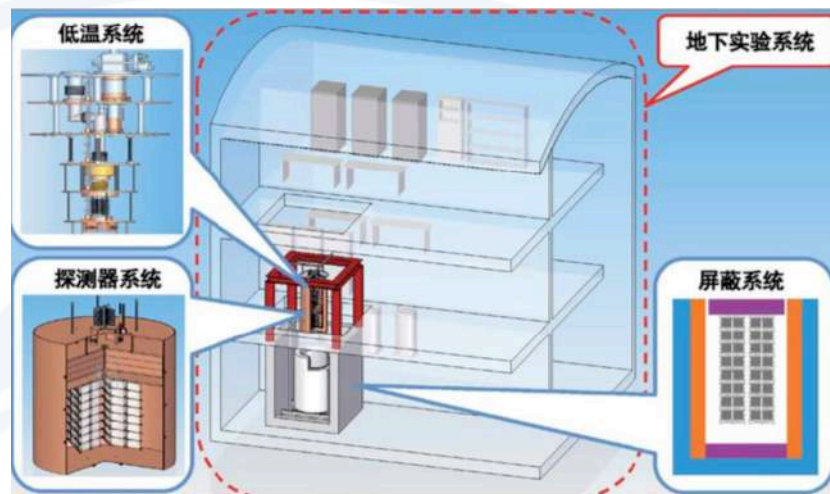
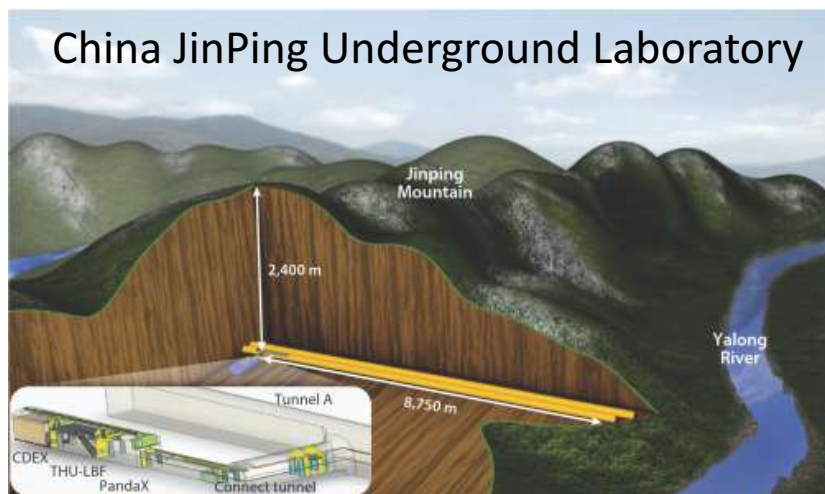
CUPID-France

CUPID-US

**CUPID-China**

**CUPID-China与国际CUPID紧密合作**

# CUPID-CJPL实验

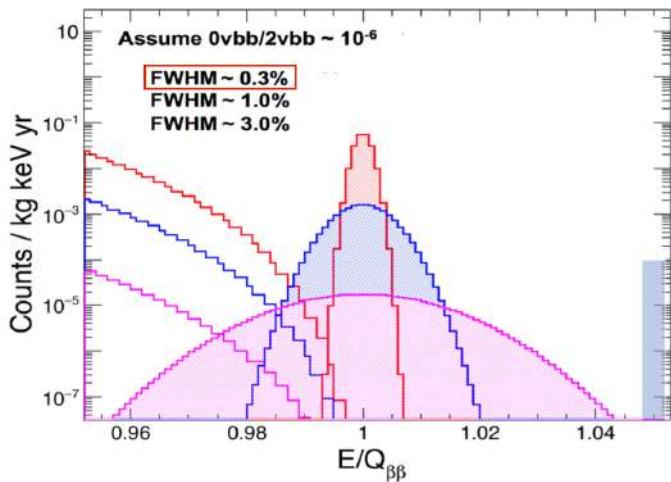
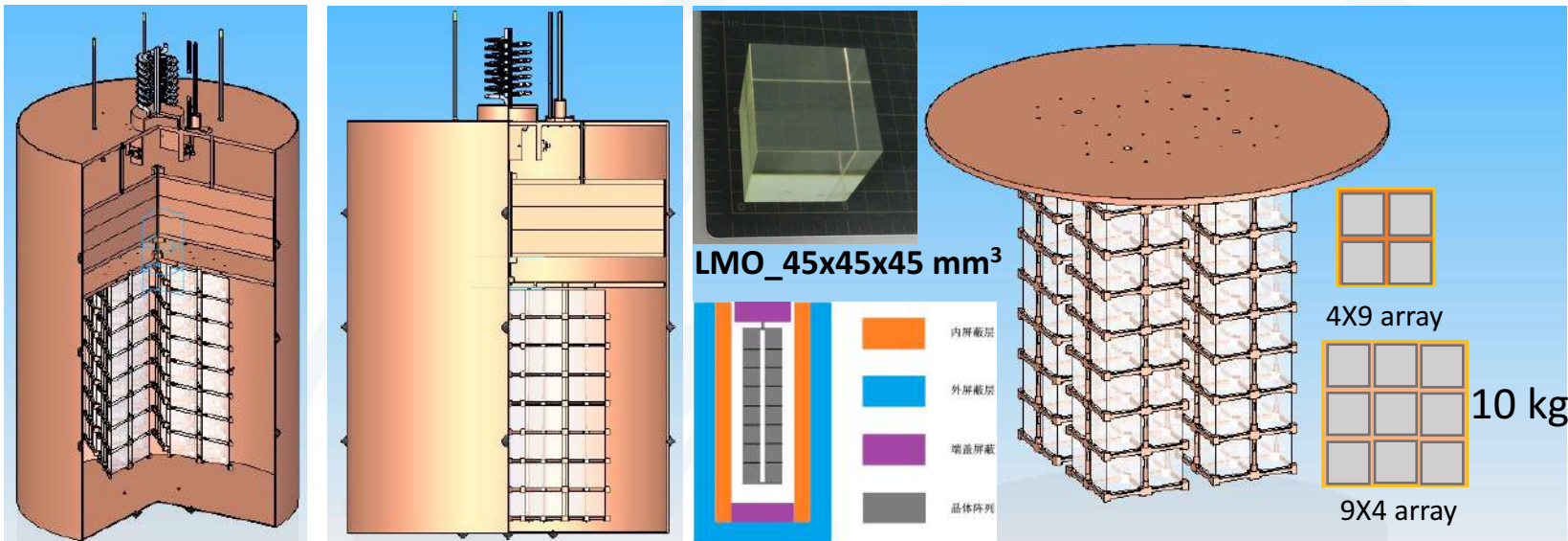


- 建立国内首个地下低温晶体量热器实验平台
- 高衰变能Q值 $0\nu\beta\beta$ 目标核素 $^{100}\text{Mo}$ , 3034 keV
- 富集钼酸锂 $\text{Li}_2^{100}\text{MoO}_4$ 闪烁晶体
- 荧光-热量双读出本底甄别技术
- 极好的能量分辨率FWHM 10 keV@3034keV, 千分之三
- 超低本底水平 $<0.001$  ccky

发挥国内晶体研发优势，开展 $^{100}\text{Mo}$ 富集晶体生长技术，开展超低本底 $0\nu\beta\beta$ 实验测量

# CUPID-CJPL实验

## 样机试验



- 10 kg  $\text{Li}_2^{100}\text{MoO}_4$
- $Q_{\beta\beta}(^{100}\text{Mo}) \sim 3034 \text{ keV}$
- $\sigma_E < 10 \text{ keV (FWHM)}$  ( $\text{BR}2\nu_{bb} < 10^{-4}$ )
- $\text{BI(ROI)} < 0.001 \text{ cky}$

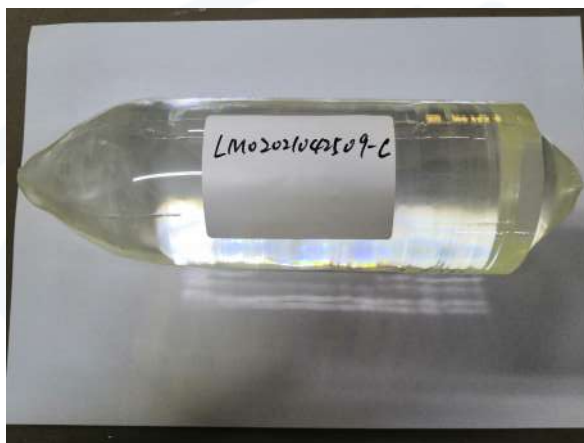
验证CUPID核心技术，检验本底模型

# 近期研究进展

- 高纯LMO闪烁晶体
  - 生长工艺
  - 闪烁荧光性能低温测试
- 深冷半导体NTD-Ge低温传感器
  - 研发工艺
  - 性能测试
- 低温低噪声小信号电子学研发
- 高纯低本底铜制备
- 材料放射性本底检测
- LMO低温晶体量热器测试
- mK稀释制冷机测试平台
- 本底模拟研究

# 高纯LMO闪烁体

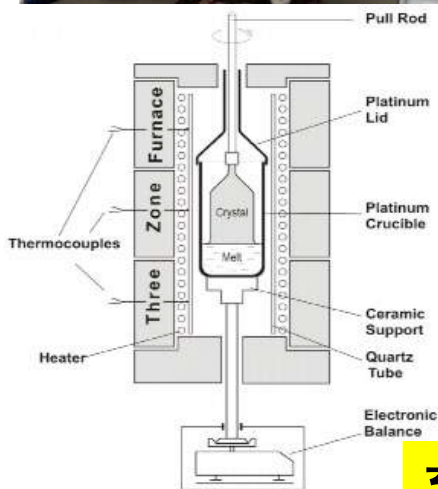
## • 生长工艺



NBU\_LMO  $\phi 75 \times 170$  mm



SIC\_LMO 45 mm cubic



Crystal powder

Low enrichment

High enrichment

- 高纯度钼酸锂粉末合成技术优化
- 超纯LMO自然丰度晶体制备
  - 大尺寸圆柱形单晶毛坯
  - 大尺寸立方晶体
- 富集晶体生长加工
  - 杂质含量控制U/Th $<10 \mu\text{Bq/kg}$
- 12块大尺寸立方晶体开展测试

充分发挥国内晶体生长优势，促进新型钼酸盐闪烁晶体生长工艺

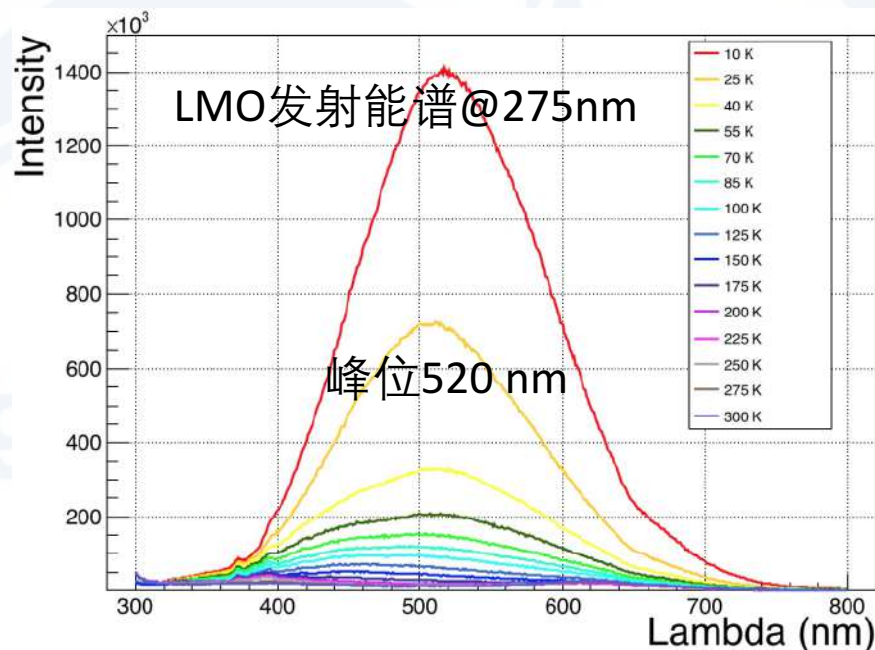
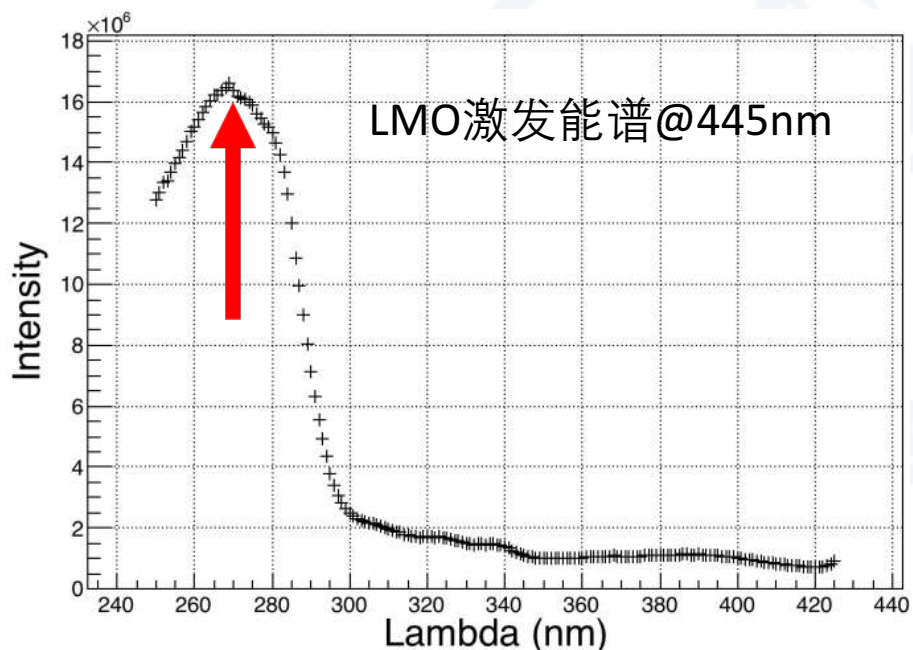


# 高纯LMO闪烁体

- LMO晶体低温荧光性能测试

10 K低温下LMO激发能谱

不同温度下的荧光产额10-300 K



**LMO晶体在低温下具有较高荧光产额，适合光-热双读出**

# NTD-Ge低温传感器

✓ 中子核嬗变掺杂锗传感器 (Neutron Transmutation Doped Ge thermistors)

| Five stable isotopes                | Doped process  | Type                     |
|-------------------------------------|--|--------------------------|
| ${}^{70}_{32}\text{Ge}$<br>(3.052b) | ${}^{70}_{32}\text{Ge} + n \rightarrow {}^{71}_{32}\text{Ge} \xrightarrow{EC} {}^{71}_{31}\text{Ga} + \bar{\nu}_e$ ( $T_{1/2} = 11.43d$ )  | Ga acceptors form p-type |
| ${}^{72}_{32}\text{Ge}$             | ${}^{72}_{32}\text{Ge} + n \rightarrow {}^{73}_{32}\text{Ge}(\text{stable})$   | -                        |
| ${}^{73}_{32}\text{Ge}$             | ${}^{73}_{32}\text{Ge} + n \rightarrow {}^{74}_{32}\text{Ge}(\text{stable})$   | -                        |
| ${}^{74}_{32}\text{Ge}$<br>(0.519b) | ${}^{74}_{32}\text{Ge} + n \rightarrow {}^{75}_{32}\text{Ge} \xrightarrow{\beta^-} {}^{75}_{33}\text{As} + \bar{\nu}_e$ ( $T_{1/2} = 82.8min$ )  | Donors n-type            |
| ${}^{76}_{32}\text{Ge}$<br>(0.154b) | ${}^{76}_{32}\text{Ge} + n \rightarrow {}^{77}_{32}\text{Ge} \xrightarrow{\beta^-} {}^{77}_{33}\text{As} + \bar{\nu}_e$ ( $T_{1/2} = 11.3hrs$ )<br>$\xrightarrow{\beta^-} {}^{77}_{34}\text{Se} + \bar{\nu}_e$ ( $T_{1/2} = 38.8hrs$ ) | Donors n-type            |

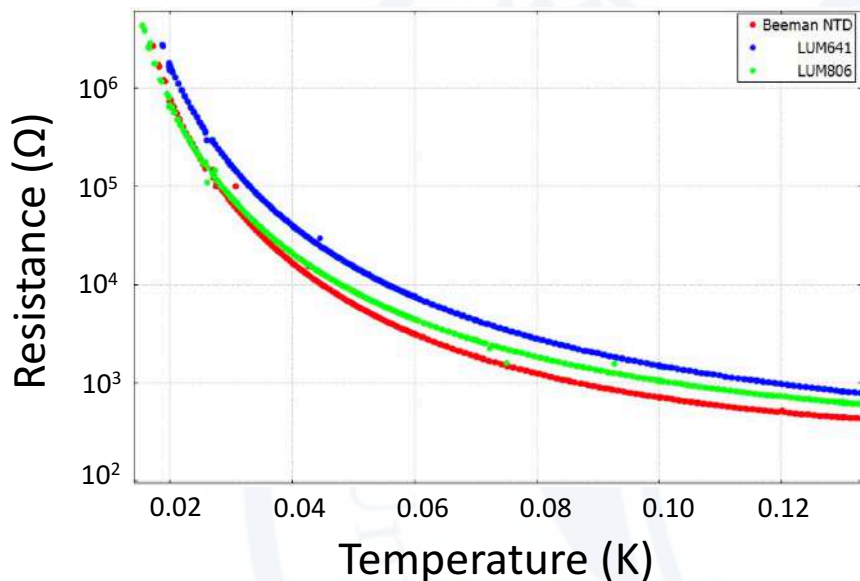
- 净载流子浓度:  $N_A - N_D = N_{{}^{71}_{31}\text{Ga}} - (N_{{}^{75}_{33}\text{As}} + 2 \times N_{{}^{77}_{34}\text{Se}})$
- 蛙跳传导机制(Hopping Conduction) 在足够低温温度下(<1 K), 电子作为载流子将从一个能级跃迁到另一个能级, 实现半导体热敏电阻属性

# NTD-Ge低温传感器

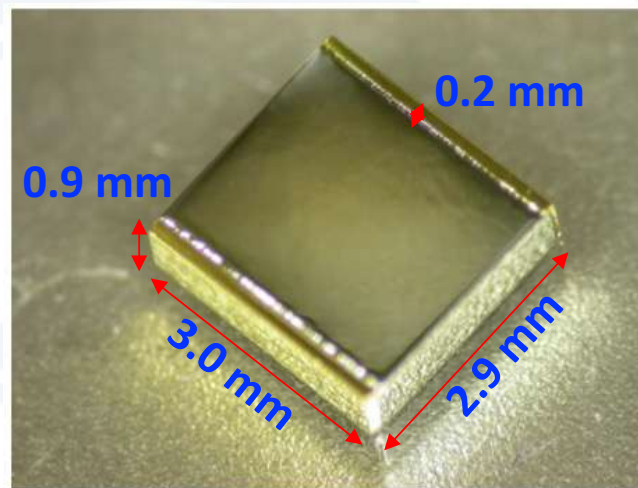
- 传感器热敏电阻描述公式

$$R = R_0 \exp\left(\frac{T_0}{T}\right)^\alpha$$

Ge本征属性  $\rightarrow R_0$       掺杂浓度  $\rightarrow T_0$       其中,  $\alpha = 0.5$



NTD-Ge传感器温度-电阻变化关系

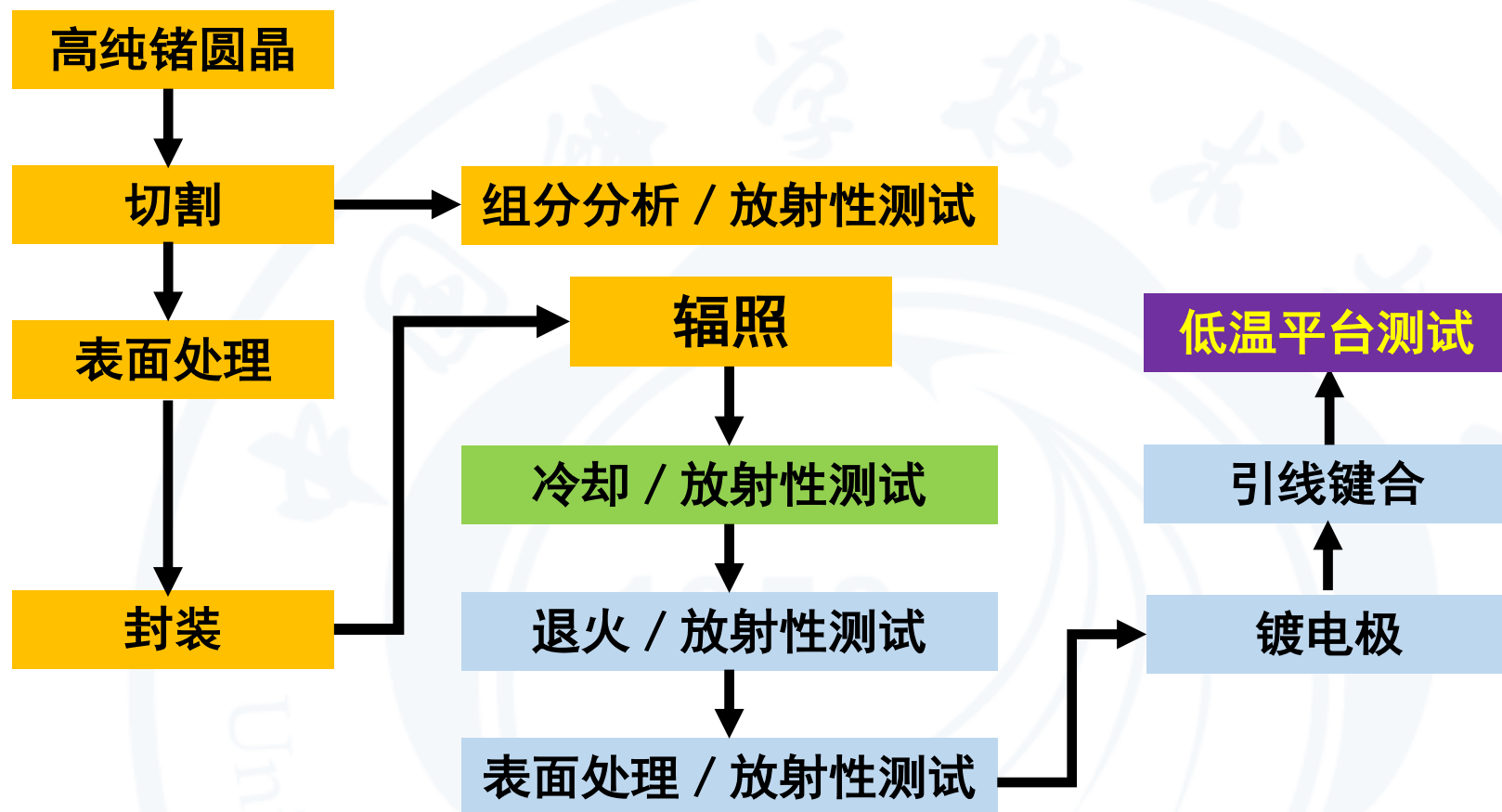


尺寸 3×2.9×0.2 mm<sup>3</sup>

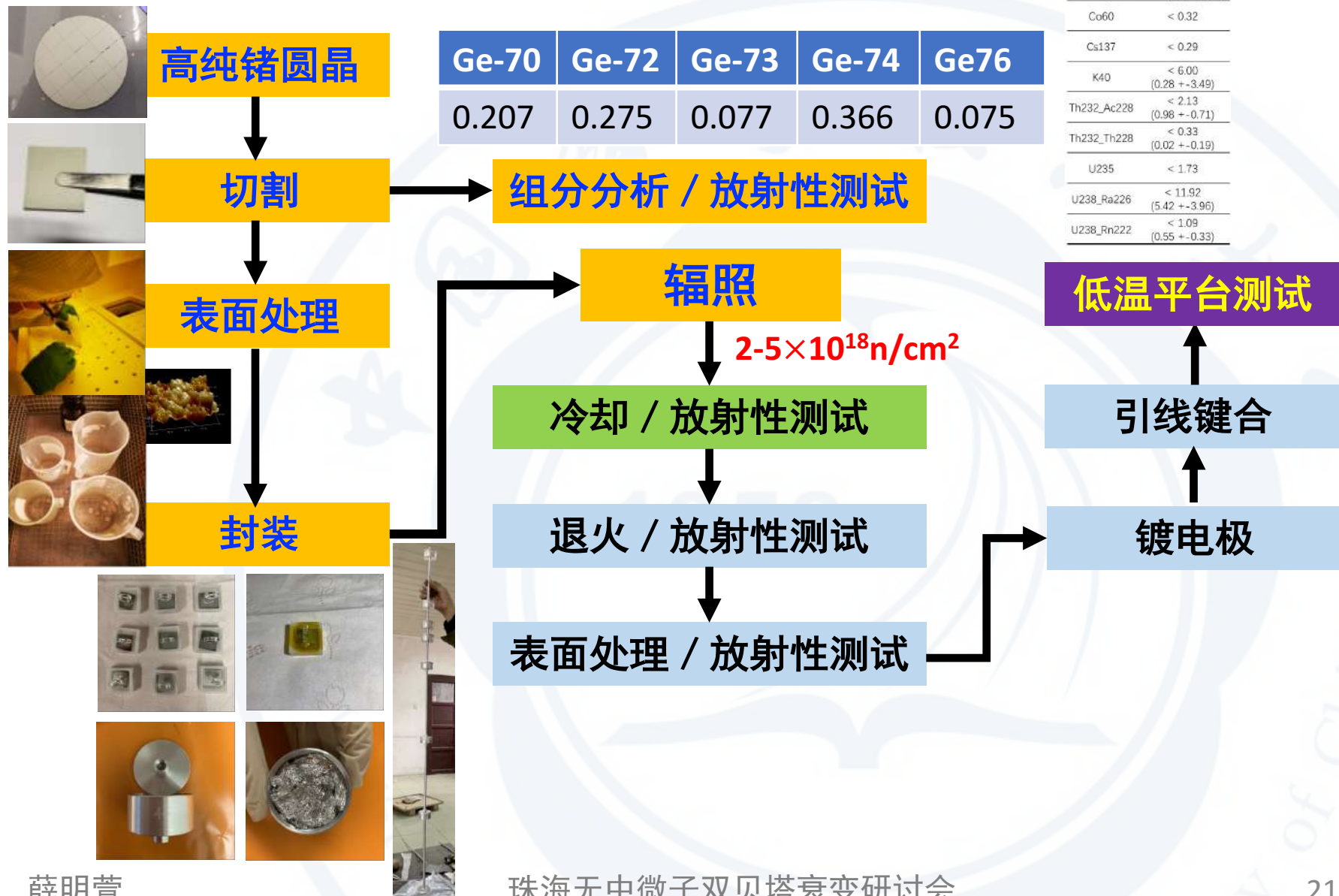
典型NTD-Ge传感器

- NTD-Ge由伯克利国家实验室Beeman研制, 典型取值 $R_0 \sim 1 \Omega$ ,  $T_0 \sim 4 K$

# NTD-Ge低温传感器技术研发路线

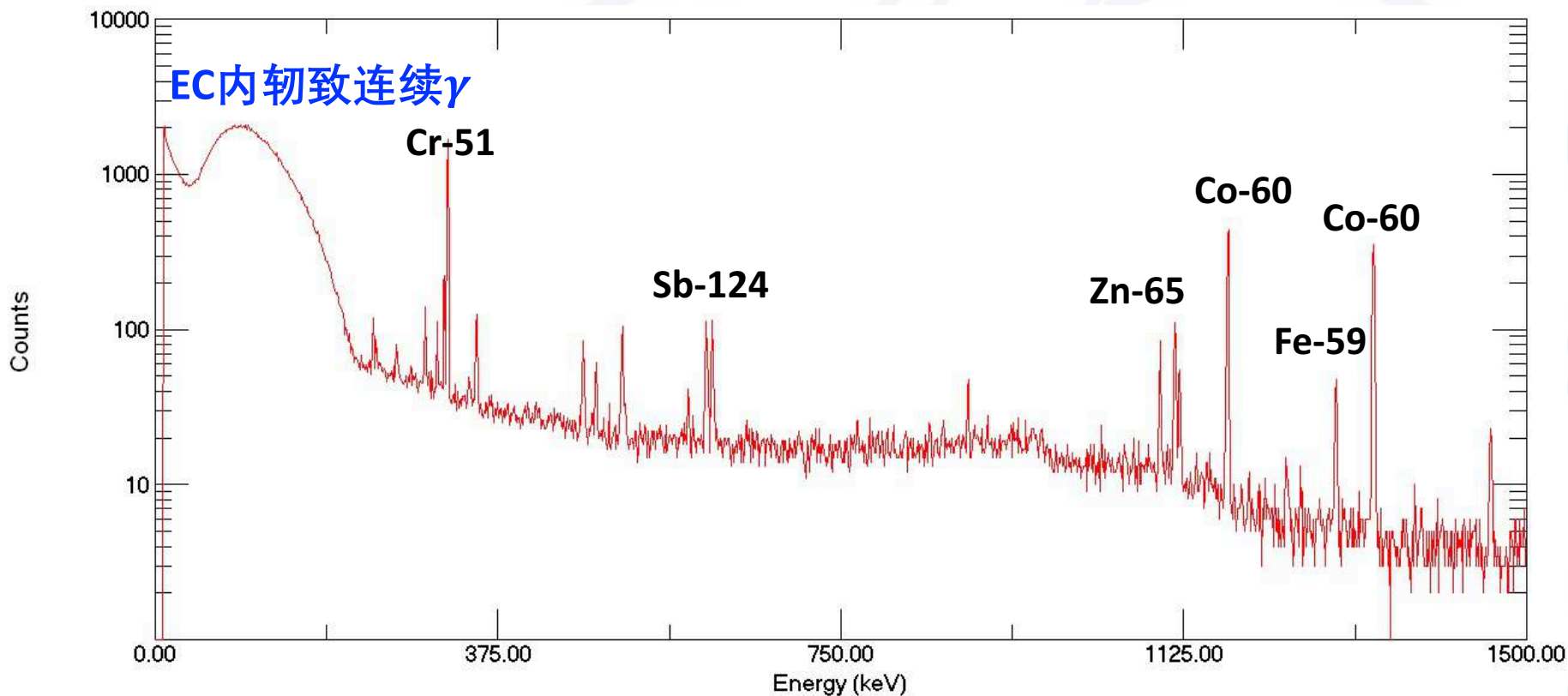


# NTD-Ge低温传感器技术研发路线



# NTD-Ge放射性活度测试

- 低本底HPGe谱仪测试辐照后HPGe片能谱图

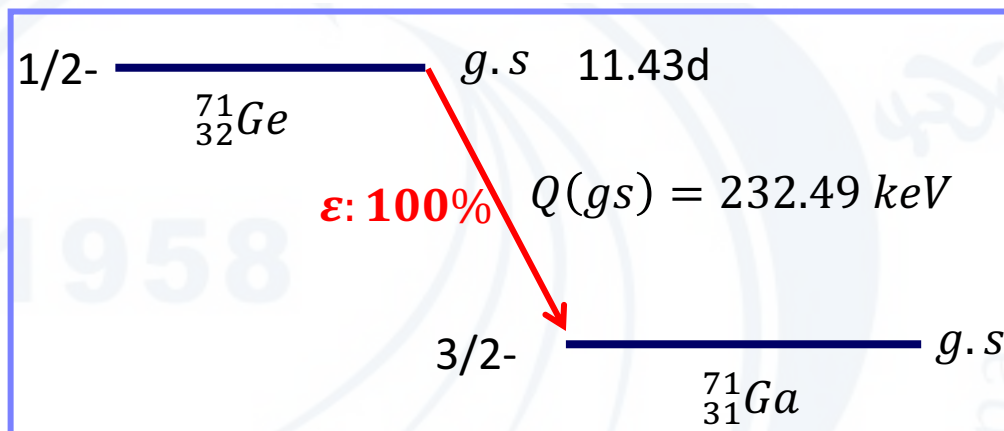
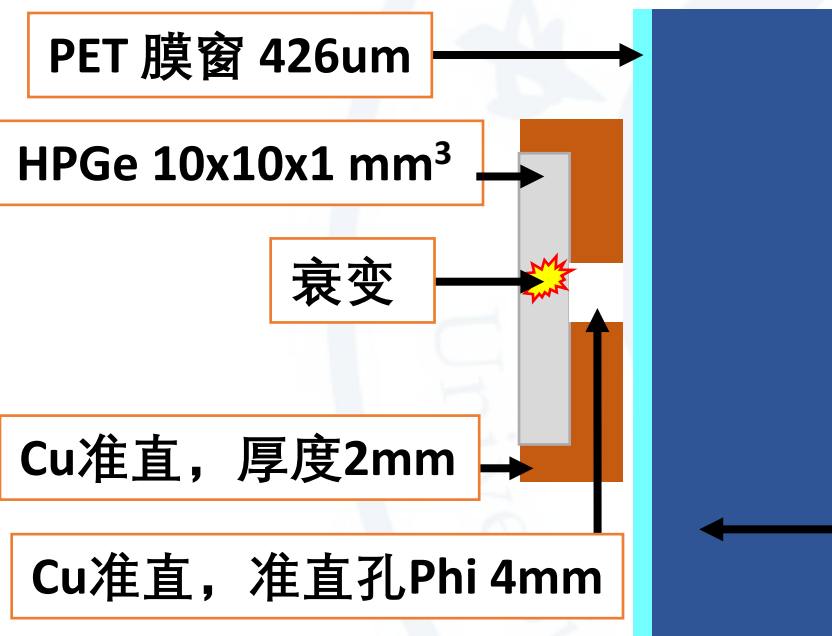


# NTD-Ge辐照通量监测

- 辐照过程无剂量监测片 (CoAl)
- 采用Ge自身放射性标定
  - 半衰期相对较长
  - 信号相对干净
- 模拟与实验相结合
- 微结构气体探测器MMD

Gamma and X-ray radiation:

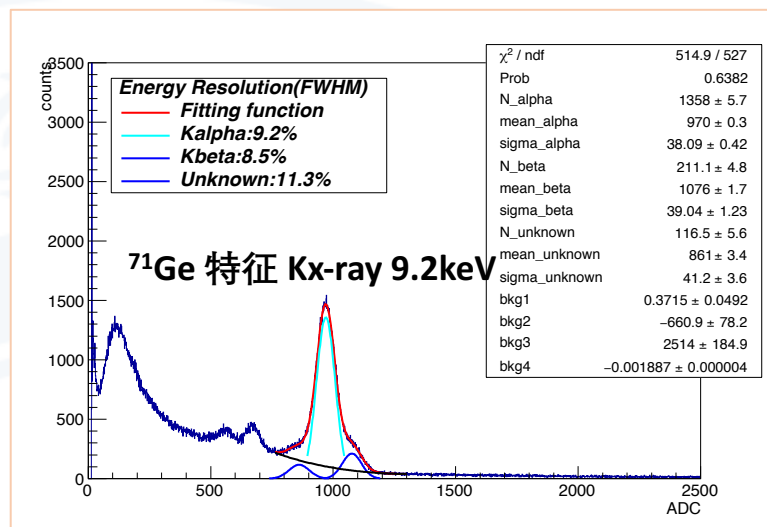
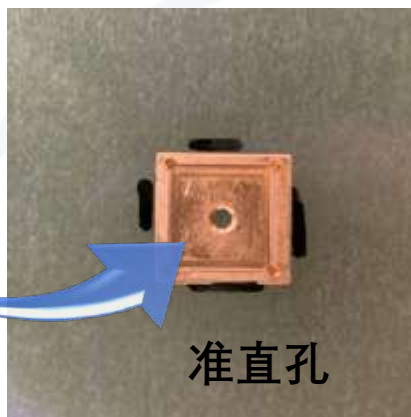
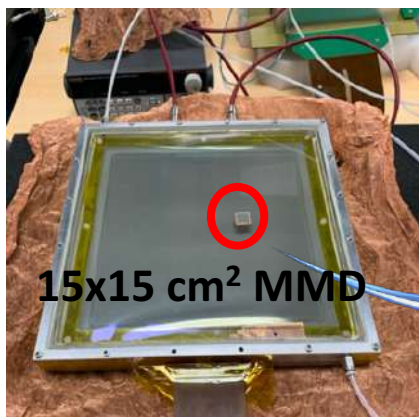
|                 | Energy (keV) | Intensity (%) | Dose (MeV/Bq-s) |
|-----------------|--------------|---------------|-----------------|
| XR 1            | 1.1          | 1.52 % 5      | 1.68E-5 5       |
| XR k $\alpha$ 2 | 9.225        | 13.3 % 5      | 0.00123 5       |
| XR k $\alpha$ 1 | 9.252        | 26.1 % 10     | 0.00242 9       |
| XR k $\beta$ 3  | 10.26        | 1.66 % 6      | 1.71E-4 6       |
| XR k $\beta$ 1  | 10.264       | 3.24 % 11     | 3.33E-4 12      |
| XR k $\beta$ 2  | 10.366       | 0.0275 % 10   | 2.85E-6 10      |



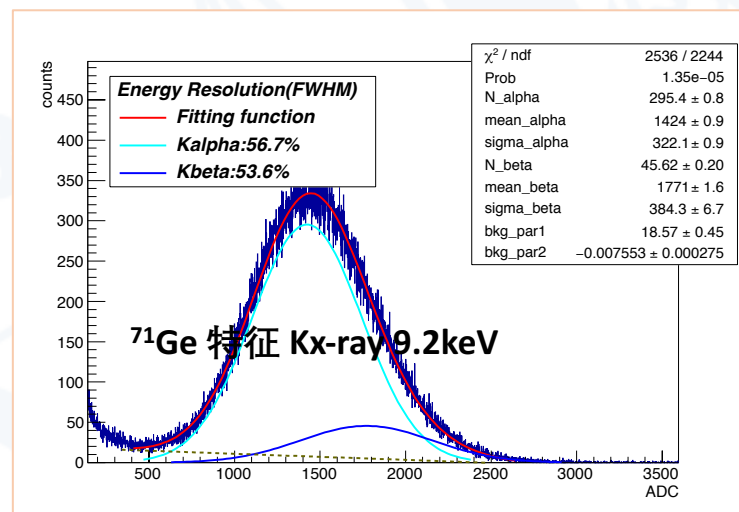
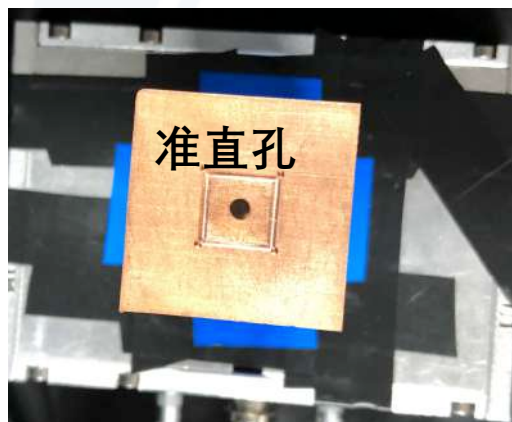
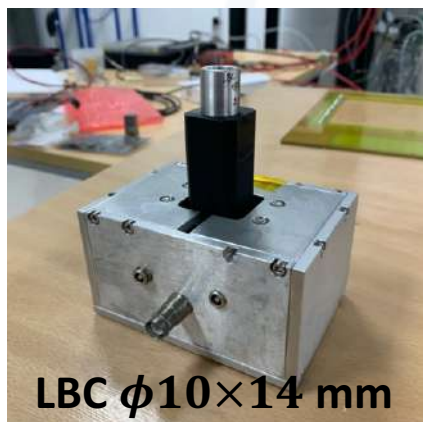
气体: 1cm  
 (1)95%Ne+5%iC4H10  
 (2)93%Ar+7%CO2

# NTD-Ge辐照通量估算

- 微结构气体探测器MMD



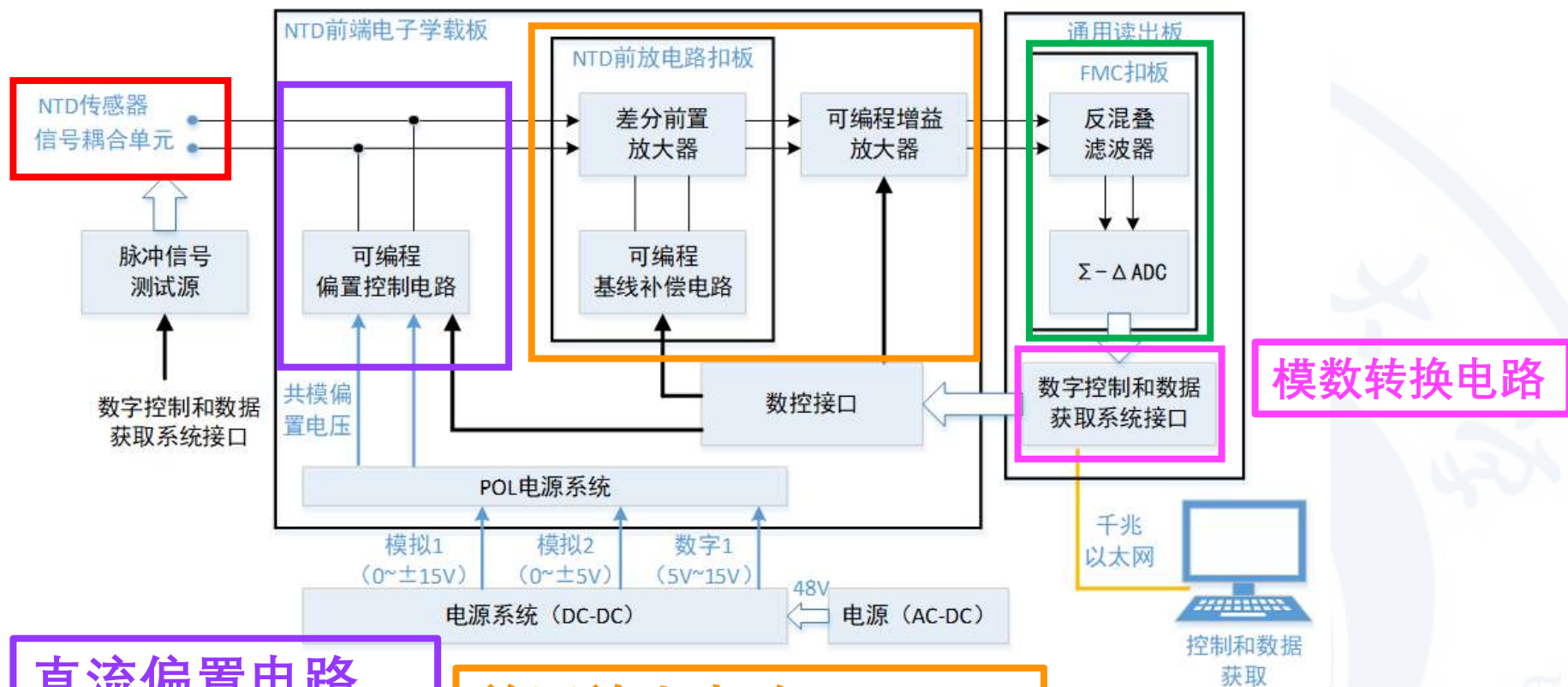
- 溴化镧闪烁体探测器LBC



- 辐照积分通量



# 低温低噪声小信号电子学研发



## 直流偏置电路

- 可调的偏置电压
- 极低噪声的电压源
- 极大阻值 ( $G\Omega$ 量级)
- 低容差负载电阻
- 低温漂负载电阻

## 前置放大电路

- 极高的输入阻抗
- 极小的输入电流
- 极小的等效输入噪声
- 合适的放大倍数和输入电压

## 抗混叠滤波电路

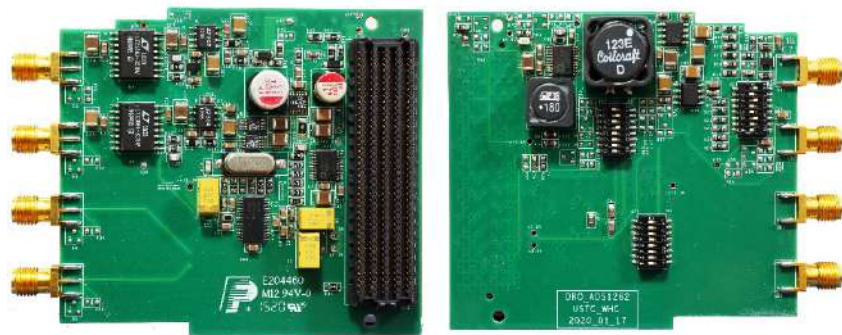
- 合适的上限截止频率
- 良好的幅频、相频特性
- 良好的噪声特性

# 低温低噪声小信号电子学研发

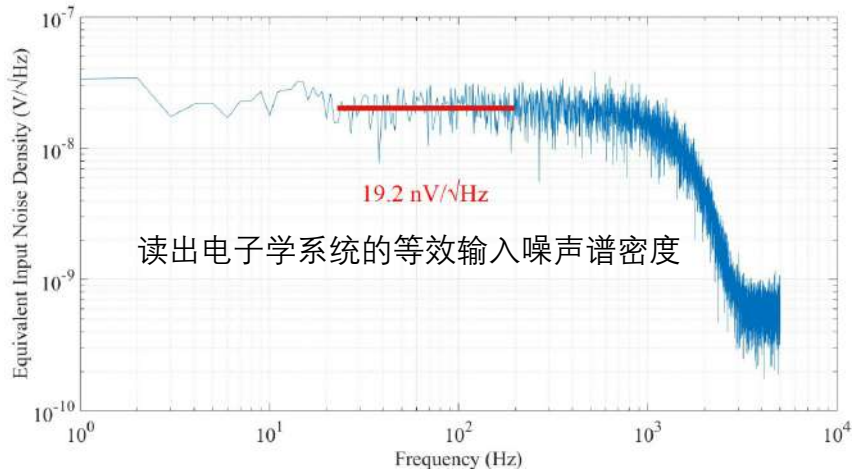
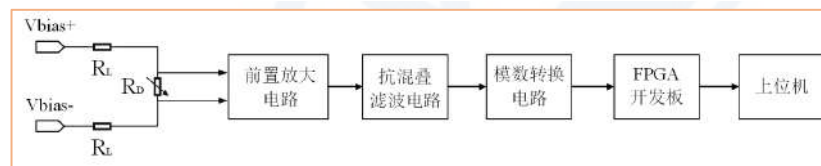
## • 电路模块实现与测试



直流偏置与前置放大电路板



数字读出电路板



## ➤ NTD-Ge传感器的低噪声前端电子学及读出系统

- 验证影响系统指标的关键电路设计
- 完成先期实验室测试
- 初步测试结果显示其总体噪声水平达到或接近国际公开报导的先进水平
- 开展与探测器系统的低温联调测试
- 展开满足工程要求的电路升级和改进工作
- 同时计划与意大利米兰大学合作开展CUPID读出电子学技术研发

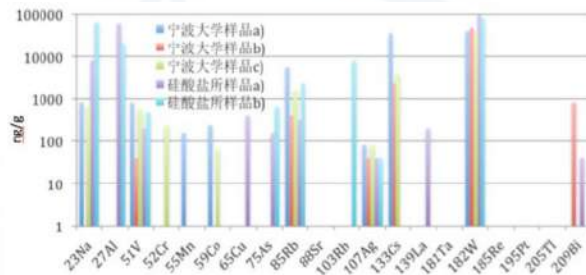
# 高纯低本底铜制备



- 地下低本底电解铜制备是实现新一代大型低温晶体量热器实验本底目标的重要技术
- 合作组目前已具备地下低本底测量和地下超纯铜材料制备基础，能够自主设计研制地下超纯铜制备装置

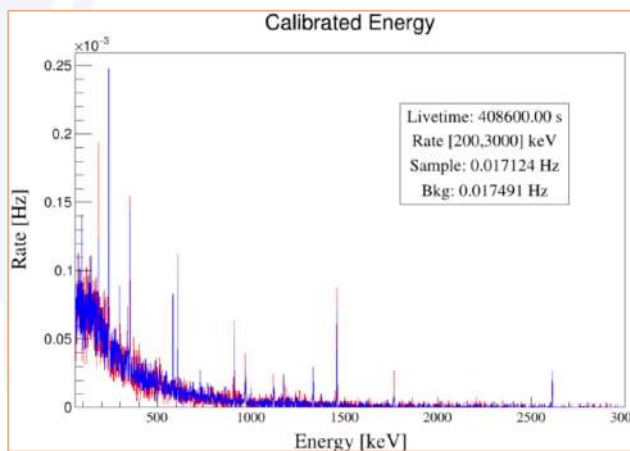
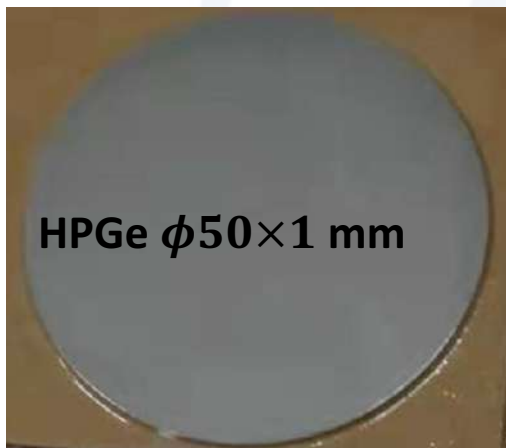
# 材料放射性本底检测

- 晶体样品、HPGe样品、无氧铜样品等进行ICP-MS检测



| Name        | Co          | Ni   | Cs   | Pt    | Tl   | Pb   | Bi   | Th   | U    |
|-------------|-------------|------|------|-------|------|------|------|------|------|
|             | ppt (ng/kg) |      |      |       |      |      |      |      |      |
| LMO crystal | 38.7        | 12.6 | 358  | 60.7  | 0.84 | 13.8 | 443  | 3.34 | 23.7 |
| powder      | 1001        | 130  | 2710 | 0.718 | 188  | 1.09 | 1843 | 6.24 | 752  |

- HPGe样品在锦屏地下实验室HPGe低本底谱仪检测

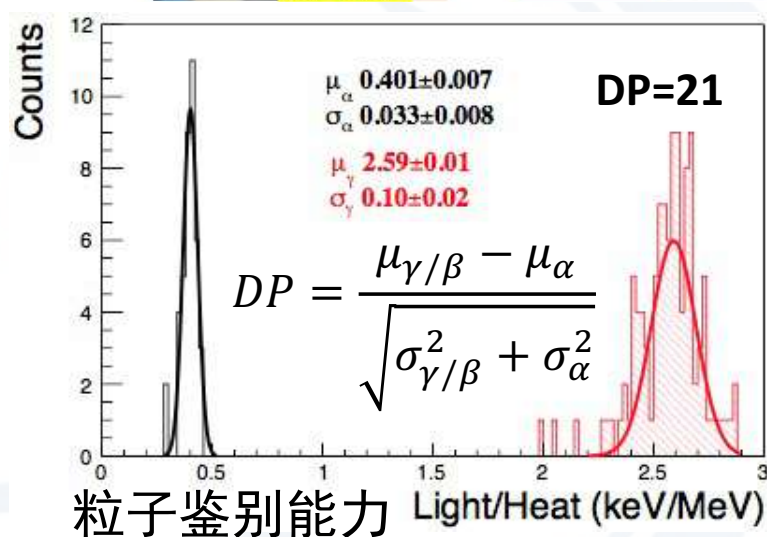
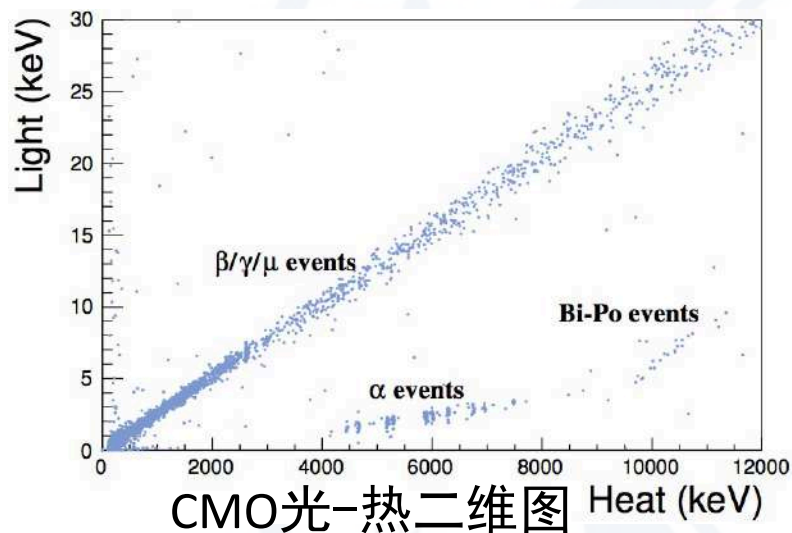
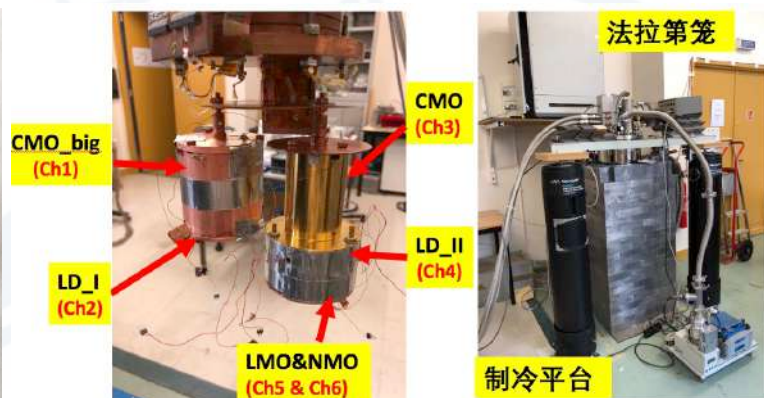
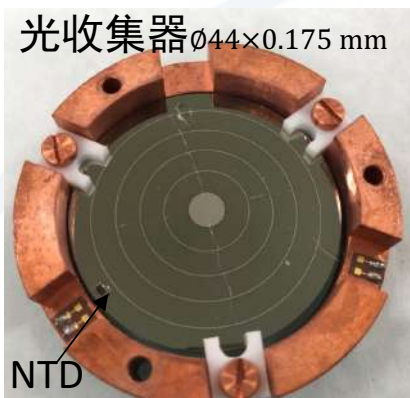


| Isotope     | Activity (mBq/pcs)        |
|-------------|---------------------------|
| Co60        | < 0.32                    |
| Cs137       | < 0.29                    |
| K40         | < 6.00<br>(0.28 + -3.49)  |
| Th232_Ac228 | < 2.13<br>(0.98 + -0.71)  |
| Th232_Th228 | < 0.33<br>(0.02 + -0.19)  |
| U235        | < 1.73                    |
| U238_Ra226  | < 11.92<br>(5.42 + -3.96) |
| U238_Rn222  | < 1.09<br>(0.55 + -0.33)  |

低本底检测技术经验对于CUPID实验材料筛选和本底控制至关重要

# LMO低温晶体量热器测试

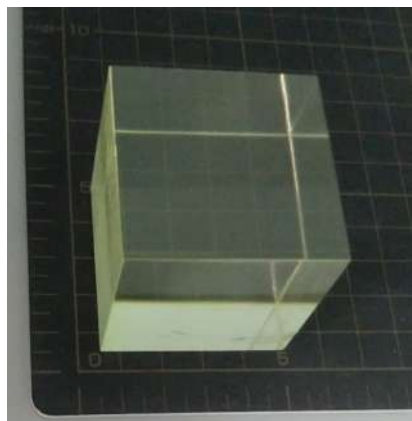
- LMO低温晶体量热器（法国奥塞）



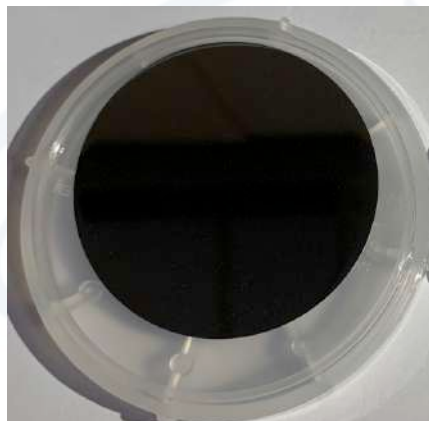
目前已选送SIC/NBU 4块自然丰度大尺寸LMO立方晶体至意大利LNGS地下实验室测试

# LMO低温晶体量热器测试

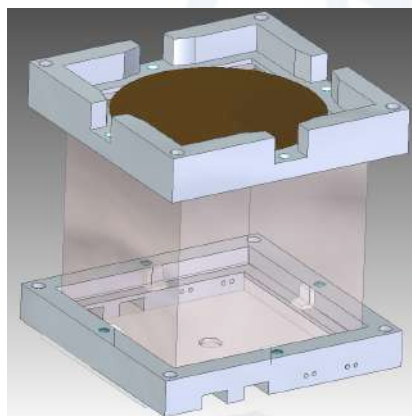
- LMO低温晶体量热器 (FDU/USTC)



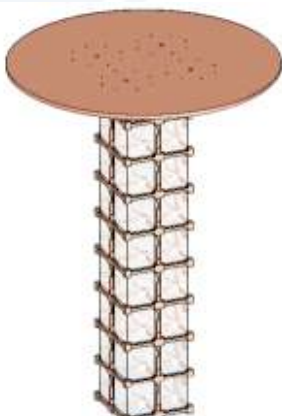
LMO\_SiC\_45x45x45 mm<sup>3</sup>



LD HPGe Phi45x0.175 mm



探测器组装



探测器阵列



制冷机冷盘

自然丰度大尺寸LMO立方晶体国内地面实验室测试

# mK低温稀释制冷机平台

- 低温低本底晶体量热器地面测试装置



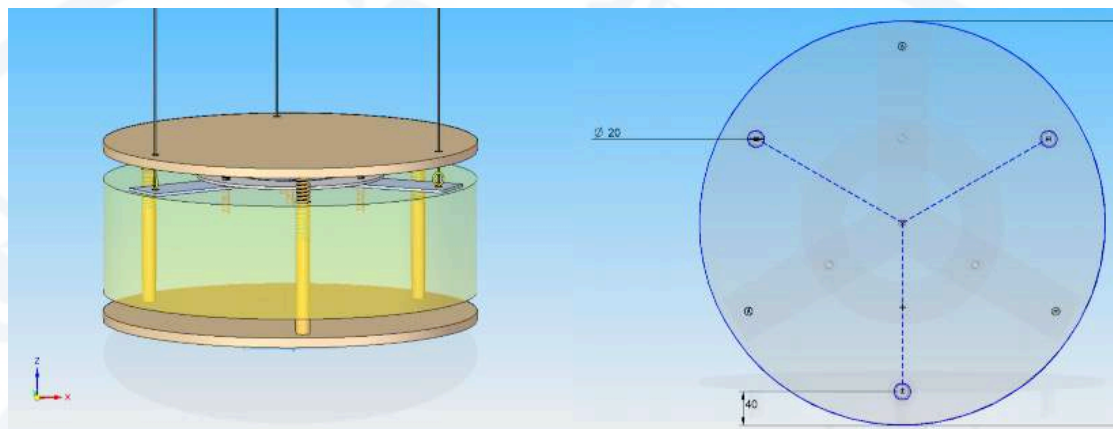
- Bluefors XLD400 (FDU)/Oxford Instruments TRON-15-500-H (USTC)
- 超低本底无氧铜恒温器，屏蔽体挂载设计(FDU-DR)
- 低温读出，主动减震装置
- 最低温 $<10$  mK，稳定性 $<10$   $\mu$ K@10mK
- 通过验收运行，开展地面低温晶体量热器测试

# mK低温稀释制冷机平台

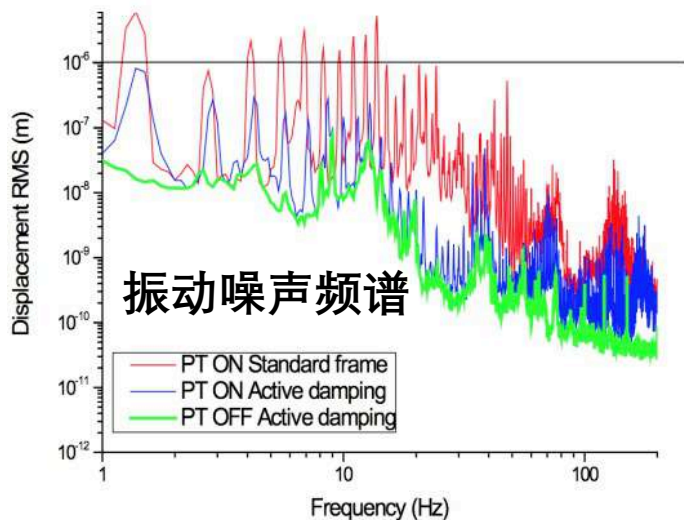
- 稀释制冷机点系统减振研究



一级减震



二级减振



➤ 低频振动噪声本底会贡献到实验测量，影响探测器能量分辨率（CUORE）

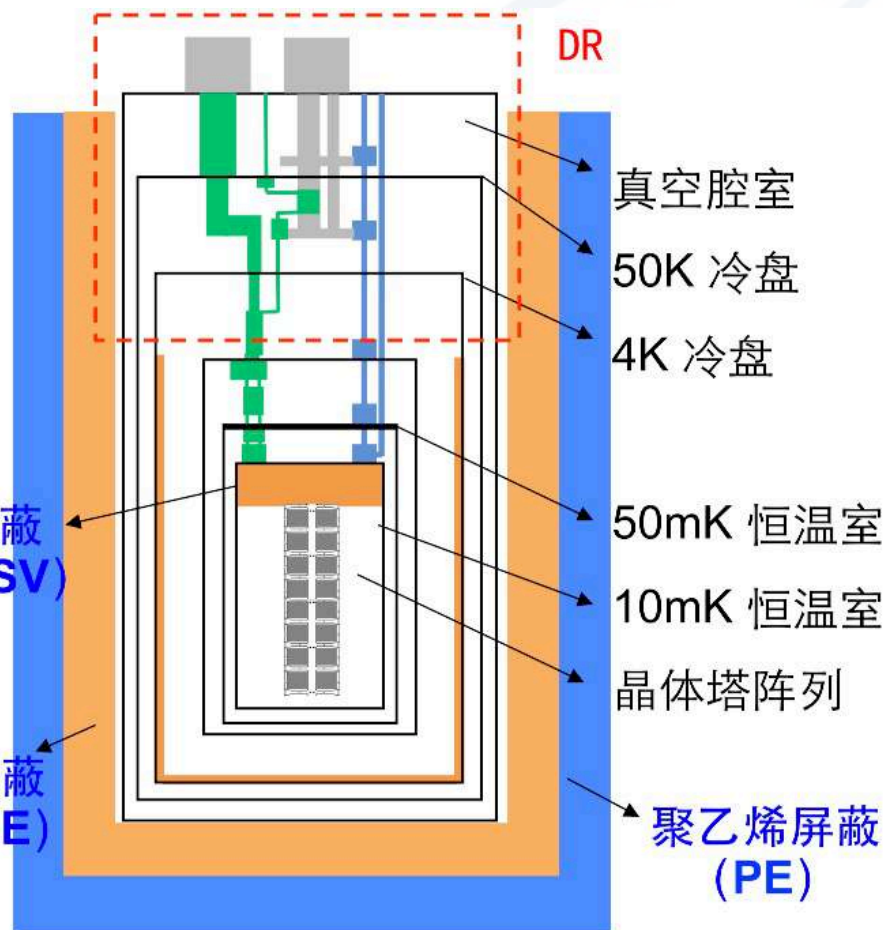
➤ 减振系统

- 一级减震：框架减震、底部主动减振
- 二级减振：弹簧减振
- 辅助减振：双冷头工作相位相消技术



# 本底模拟研究

- 构建多级屏蔽装置针对不同放射性本底类型和来源



探测器及屏蔽体安装进制冷机示意图

晶体量热探测器屏蔽系统

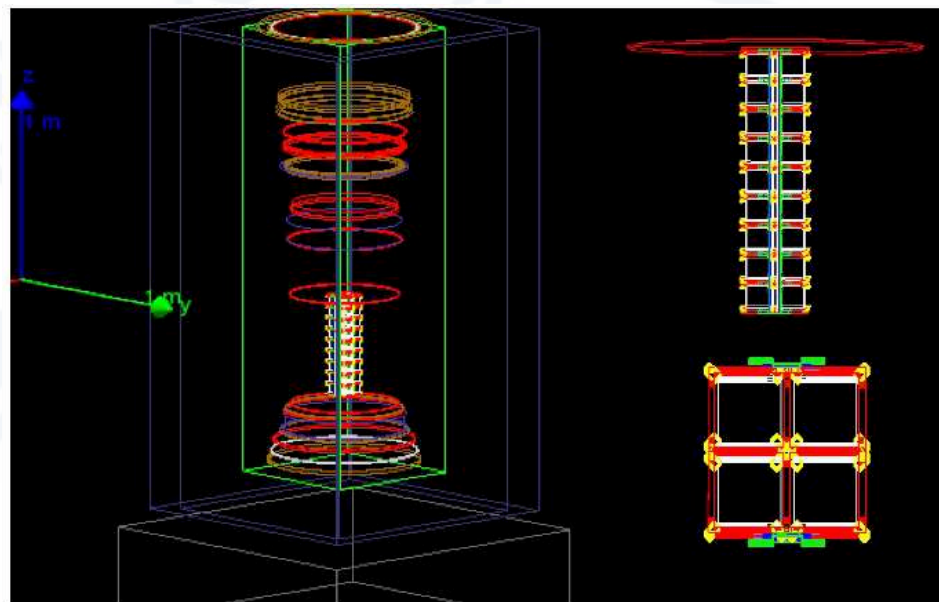
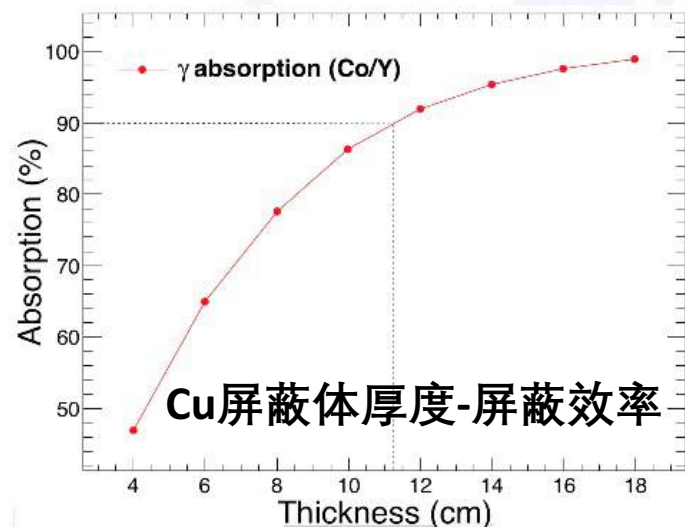
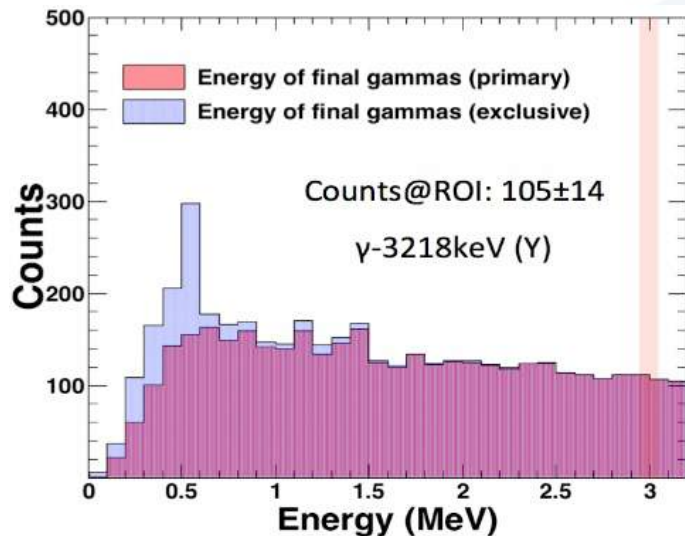
| 屏蔽结构 | 材料    | 针对本底    |
|------|-------|---------|
| 铜侧屏蔽 | 高纯无氧铜 | 低温和屏蔽系统 |
| 铜顶屏蔽 | 低本底铜  | 低温系统    |
| 铅侧屏蔽 | 低本底铅  | 环境伽马    |
| 中子屏蔽 | 含硼聚乙烯 | 环境中子    |

材料放射性杂质含量\*

| 材料     | $^{232}\text{Th}$ [Bq/kg] | $^{238}\text{U}$ [Bq/kg] |
|--------|---------------------------|--------------------------|
| CuNOSV | $<2.0 \times 10^{-6}$     | $<6.5 \times 10^{-5}$    |
| CuOFE  | $<6.4 \times 10^{-5}$     | $<5.4 \times 10^{-5}$    |
| SS     | $<3.0 \times 10^{-4}$     | $<3.0 \times 10^{-4}$    |

# 本底模拟研究——探测器建模

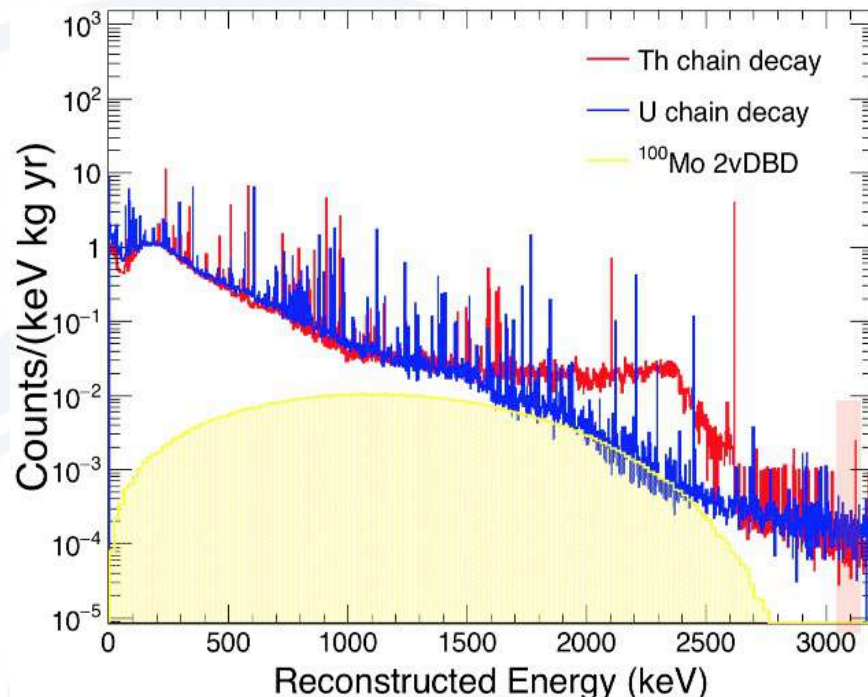
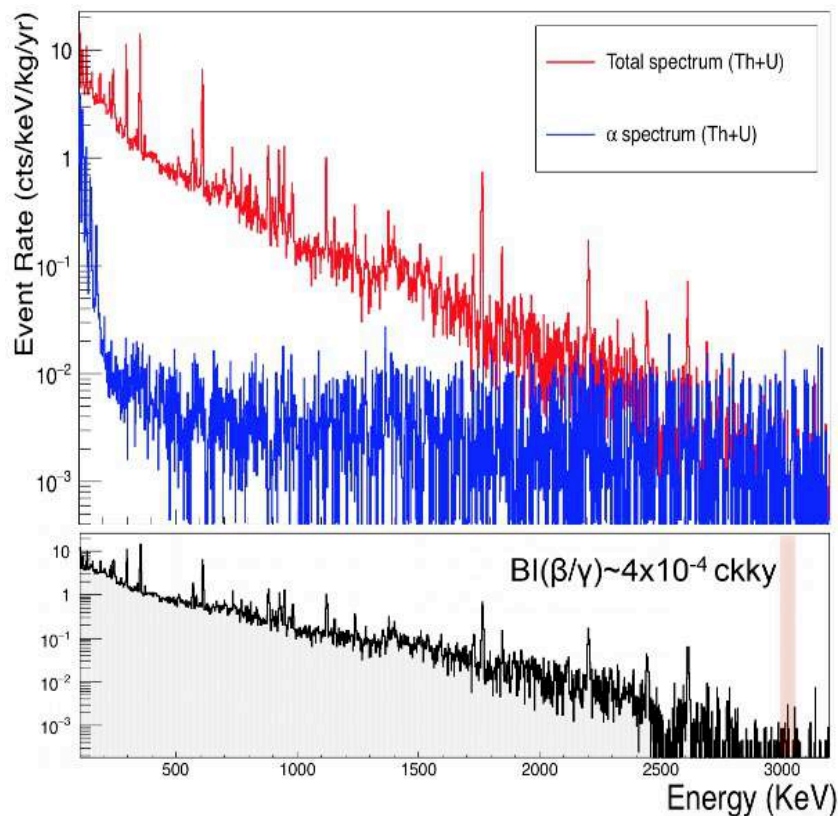
- CUPID-CJPL样机本底模拟研究



## Geant4模拟探测器搭建

- 探测器建模和相互作用实现
- 本底屏蔽模拟研究
- 环境放射性本底模拟
- 宇生放射性本底模拟

# 本底模拟研究——本底分析



Geant4模拟探测器搭建本底分析

- $0\nu\beta\beta$ 测量区间 $2\nu\beta\beta$ 本底贡献,  $\text{BR} < 10^{-4}$  (假设 $R(0\nu\beta\beta) / R(2\nu\beta\beta) = 10^{-6}$ )
- LMO低温晶体量热器 $0\nu\beta\beta$ 敏感区间的主要本底研究
  - 铜表面放射性对 $0\nu\beta\beta$ 测量区间本底贡献主要来自放射性核素 $^{232}\text{Th}$ 衰变链
  - 考虑99.9%  $\alpha$ -rejection, 剩余本底:  $\text{BI} \sim 0.0004\text{ckky}$

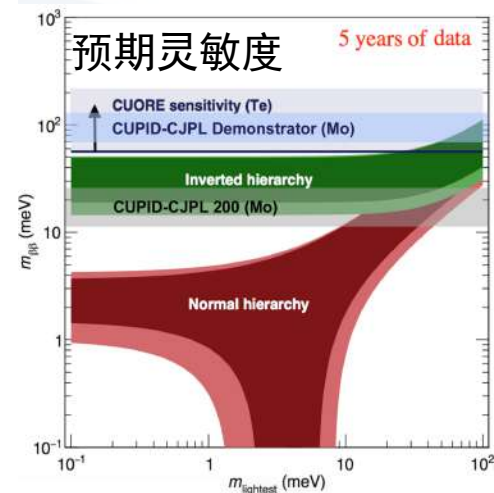
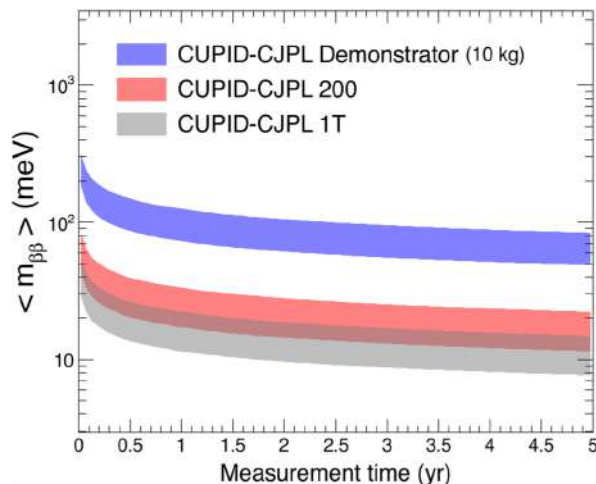
# 研究计划

地面晶体测试  
(2021-2023)  
6-12块自然丰度晶体

CUPID-CJPL样机试验  
(2023-2024)  
10 kg 36块富集晶体

CUPID-CJPL-200  
(2024+)  
>1000块富集晶体

- 锦屏样机实验  
—达到当前CUORE实验灵敏度
- 百公斤级实验  
—覆盖中微子有效质量反序区间



## ➤ 研究方向

- 新型高纯富集LMO闪烁晶体研发
- 荧光-热量双读出低温晶体量热器研发
- 低温低噪声小信号电子学研发
- 材料低本底控制

## ➤ 国际合作

- 法国IJC-Lab：CUPID-Mo晶体量热器技术
- 意大利米兰大学：读出电子学技术研发
- LNGS地下实验室/Modane地下实验室测试

# 总结

## ➤ CUPID-CJPL

- 锦屏<sup>100</sup>Mo  $0\nu\beta\beta$ 低温晶体量热器实验装置
- 国际CUPID实验群体的重要组成部分

## ➤ CUPID-CJPL样机实验

- 充分论证基于LMO晶体的低温粒子探测实验技术
- 百公斤/吨量级实验装置基础研究

## ➤ 阶段性研究成果

- 新型钼酸盐LMO晶体生长与性能测试
- 半导体低温传感器NTD-Ge研制工艺
- 低温低噪声小信号电子学研发
- mK级别稀释制冷机平台

**开展CUPID-CJPL样机实验，验证核心技术  
参与CUPID国际合作，开展新一代探测器研发  
确立锦屏优势，主导未来国际领先的CUPID-CJPL实验**

# 总结

## ➤ CUPID-CJPL

- 锦屏<sup>100</sup>Mo  $0\nu\beta\beta$ 低温晶体量热器实验装置
- 国际CUPID实验群体的重要组成部分

## ➤ CUPID-CJPL样机实验

- 充分论证基于LMO晶体的低温粒子探测实验技术
- 百公斤/吨量级实验装置基础研究

## ➤ 阶段性研究成果

- 新型钼酸盐LMO晶体生长与性能测试
- 半导体低温传感器NTD-Ge研制工艺
- 低温低噪声小信号电子学研发
- mK级别稀释制冷机平台

# 谢谢

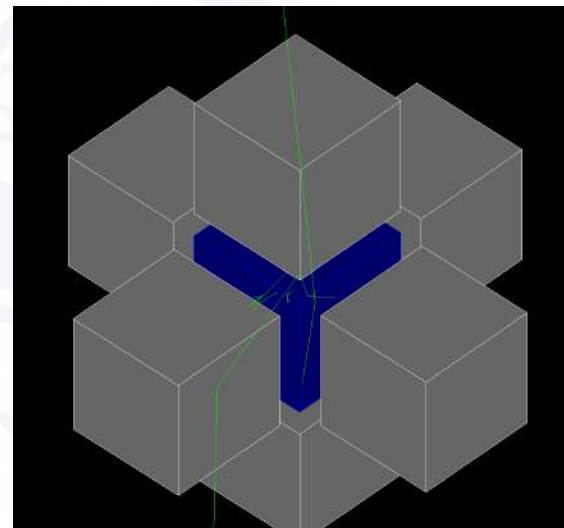
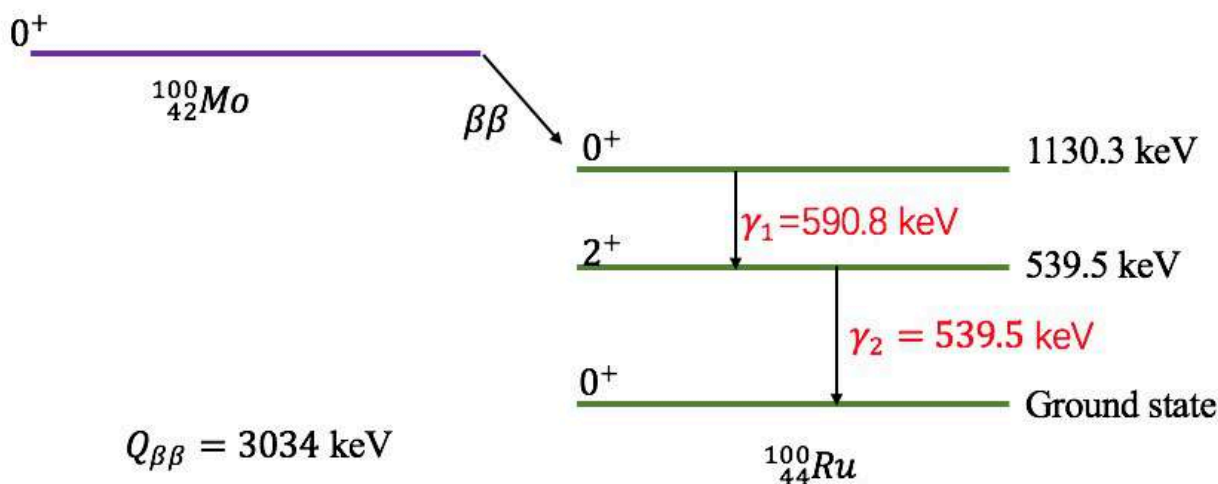
**开展CUPID-CJPL样机实验，验证核心技术  
参与CUPID国际合作，开展新一代探测器研发  
确立锦屏优势，主导未来国际领先的CUPID-CJPL实验**

# Backup slides

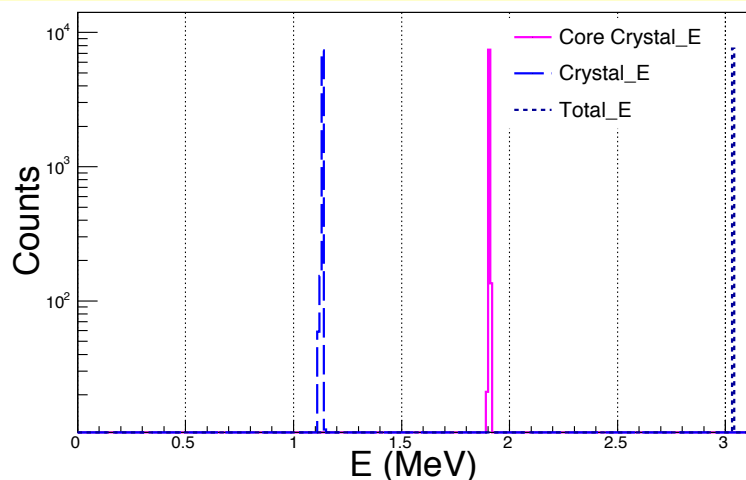
---



# ✓ 目标核素 $0\nu\text{DBD}$ 至子核激发态的可行性模拟研究



晶体微量热器阵列，可以无背景搜索该衰变模式，利用级联退激的特征 $\gamma$ 为标记



示例：

- 只触发核心晶体+周边任一块晶体
- 核心晶体能量沉积为末态电子总能量1904 keV
- 周边任一块晶体沉积能量为1130 keV，来自 $\gamma$
- 总触发率0.6%