



CUPID-CJPL

锦屏低温晶体量热器无中微子双贝塔衰变实验研究

马龙

(for the CUPID-China collaboration)

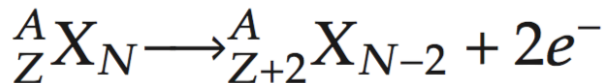
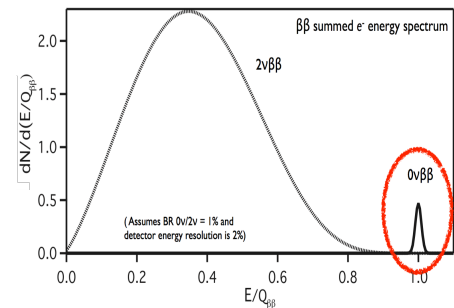
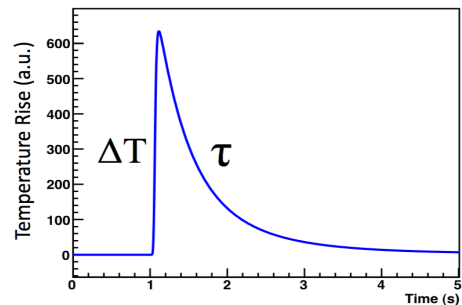
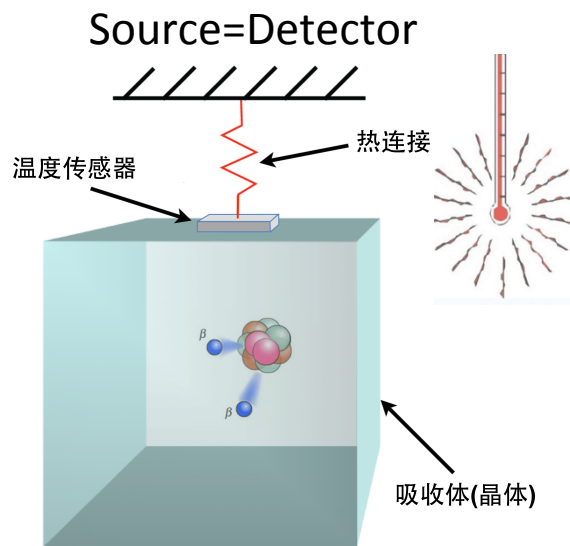
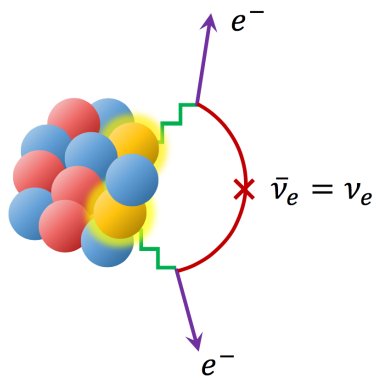
复旦大学现代物理研究所

中国高能物理非加速器战略研讨会, 2021. 05. 15-16, 北京

报告提纲

- 低温晶体量热器无中微子双贝塔衰变实验
- 锦屏低温晶体量热器实验规划 (CUPID-CJPL)
- 研究进展
- 研究计划

低温晶体量热器无中微子双贝塔衰变实验



针对四个基本问题

- 1) 中微子的绝对质量大小
- 2) 中微子的Majorana属性
- 3) 是否存在轻子数破缺过程
- 4) 物质-反物质不对称起源

➤ 低温晶体量热器 (Bolometer)

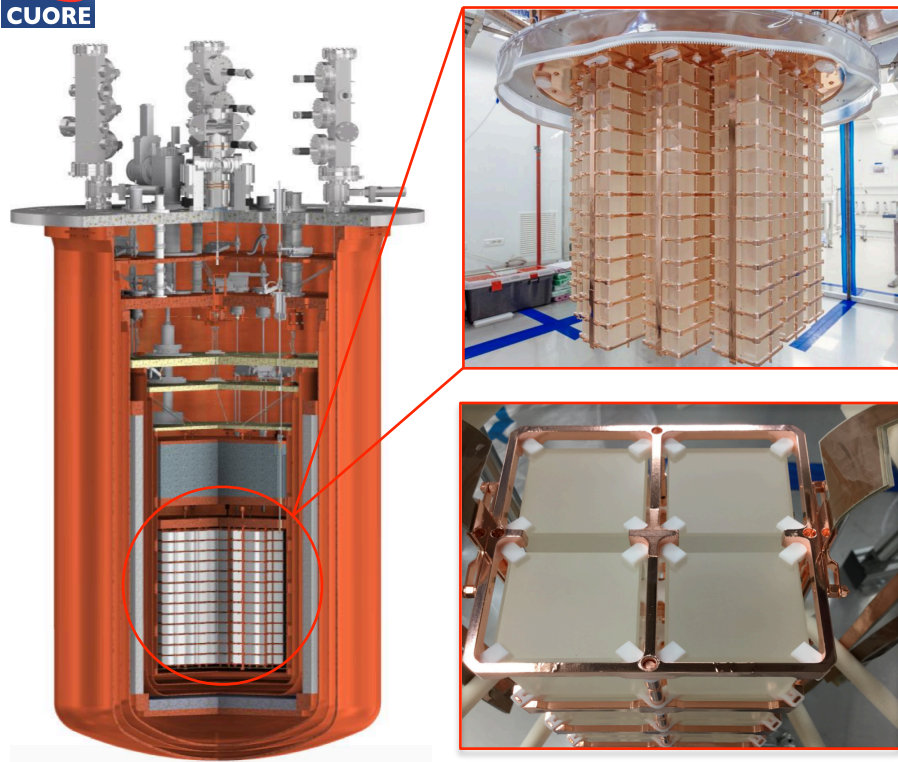
- 工作在超低温(mK)和超低本底环境下, 通过晶体微量热技术实现稀有物理事件甄别
- 在同位素双贝塔衰变理论阈值($Q_{\beta\beta}$)附近寻找 $0\nu\beta\beta$
- 具有高探测效率、高能量分辨和超低本底的优势

低温晶体量热器经过几十年的技术发展, 成为当前国际上极具竞争力的 $0\nu\beta\beta$ 实验方案之一

CUORE 实验



意大利CUORE实验—国际最大质量bolometer实验



- 位于意大利Gran Sasso地下实验室 (LNGS)
- 物理目标: 探测 ^{130}Te 无中微子双贝塔衰变
- 探测器: 988块 TeO_2 立方晶体 (总质量: 742kg)
- 有效同位素: ^{130}Te ($Q_{\beta\beta} \sim 2533\text{keV}$)
- 预期本底水平: 0.01 cts/keV/kg/yr (ROI)

Editors' Suggestion

24 citations

Improved Limit on Neutrinoless Double-Beta Decay in ^{130}Te with CUORE

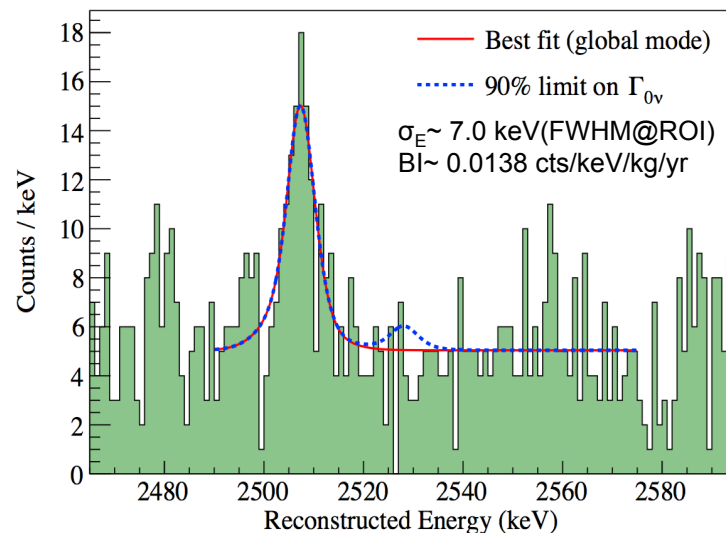
D. Q. Adams *et al.* (CUORE Collaboration)

Phys. Rev. Lett. **124**, 122501 (2020) – Published 26 March 2020



New limits have been set on the neutrinoless double beta decay in ^{130}Te from two years of data from the CUORE experiment.

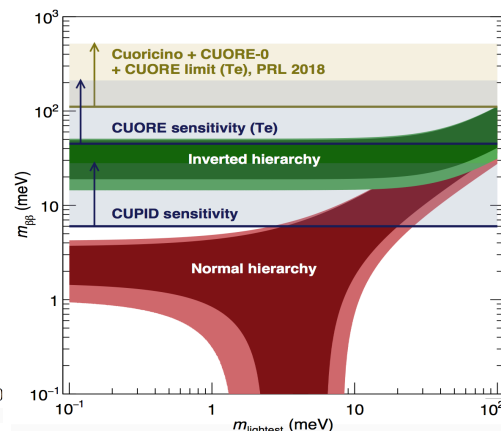
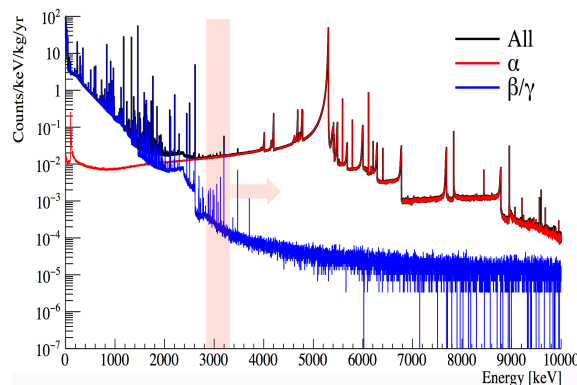
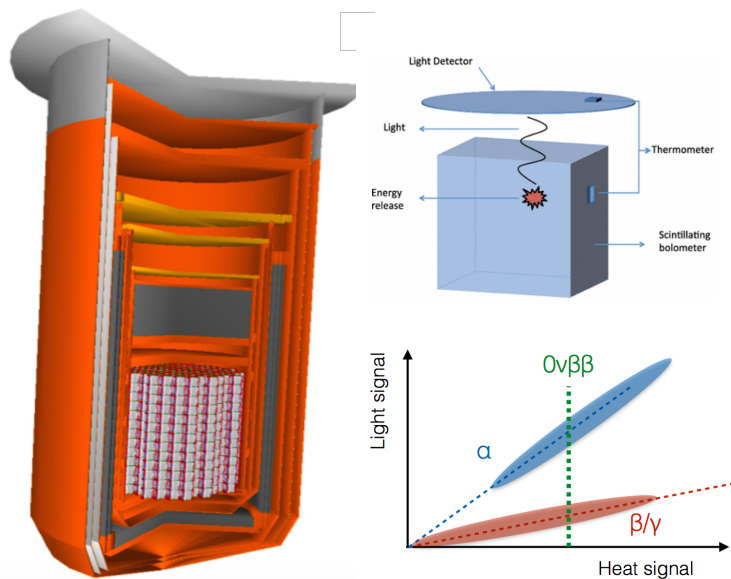
[Show Abstract](#) +



CUORE-2020 最新结果

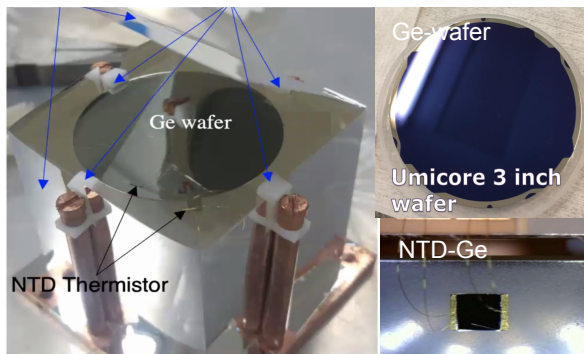
$$T_{1/2}^{0\nu} > 3.2 \times 10^{25} \text{ years (90\% C.L.)}$$
$$m_{\beta\beta} < 75 - 350 \text{ meV}$$

CUPID 实验技术



新一代低温晶体量热器实验 - CUPID (CUORE Upgrade with Particle Identification)

- 基于CUORE基础，实现反序区间覆盖
- 高Q值核素: $Q_{\beta\beta} > 2615 \text{ keV}$ ($^{208}\text{Tl } \gamma$), 远离自然放射集中区
- 高富集度晶体: $\text{Er} > 95\%$
- 高能量分辨: $\Gamma_Q < 10 \text{ keV}$ (0.25%, FWHM), $2\nu\beta\beta$ 贡献可忽略
- 光-热双读出本底甄别: 区分 α 、 β/γ , α 去除效率 $> 99.9\%$
- 拓展性强/成本可控: 可采用多种同位素富集晶体



CUPID-Mo量热器单元 (EPJC 80,77)

发展目标: 去除 α 本底, 压低 γ 本底, 保持能量分辨

CUPID 合作组

International CUPID collaboration



International Collaboration:

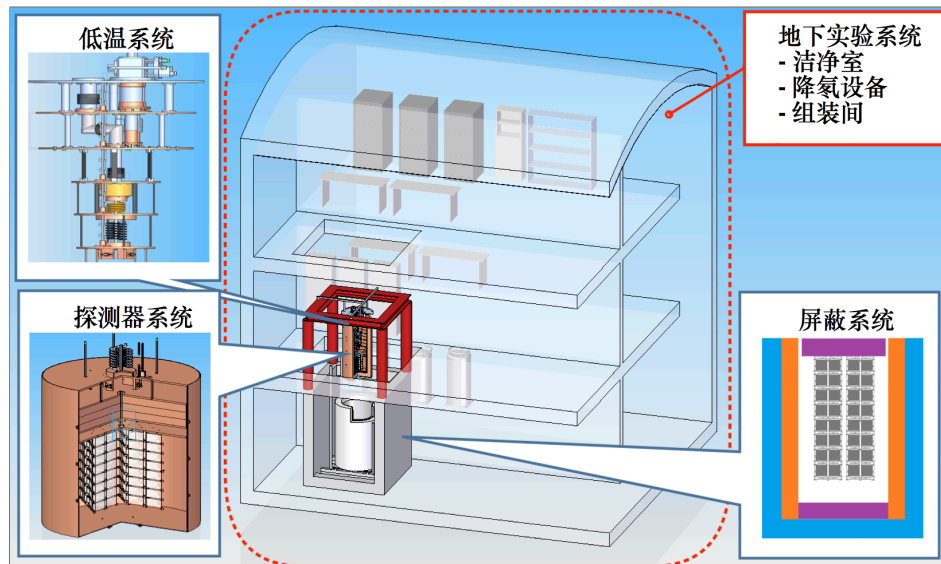
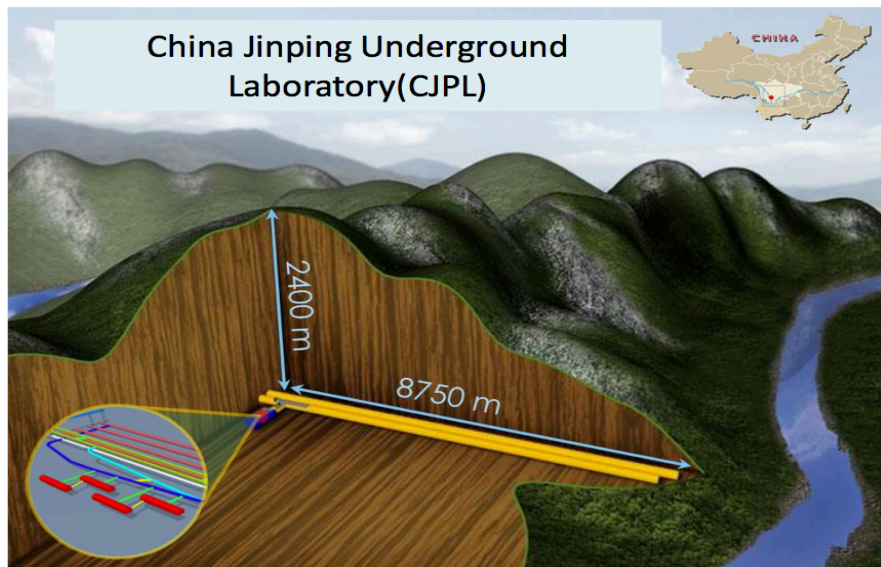
- CUPID – Italy
- CUPID – US
- CUPID – France
- CUPID – China

CUPID-China Collaboration



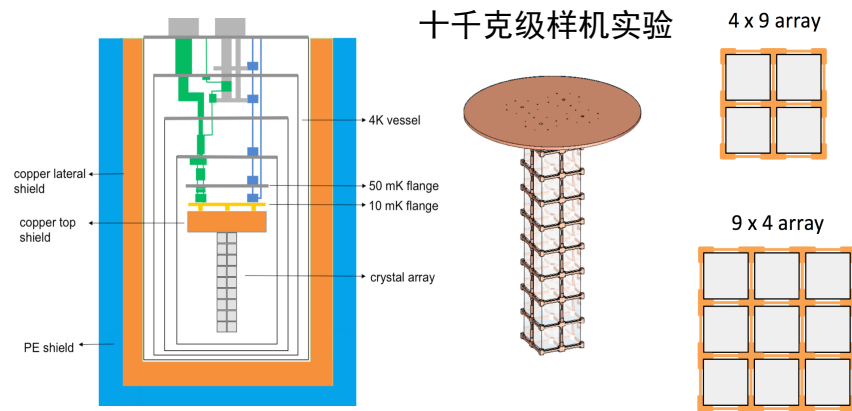
发挥锦屏优势，参与国际合作，开展低温晶体量热器 $0\nu\beta\beta$ 实验研究

锦屏低温晶体量热器实验 (CUPID-CJPL)



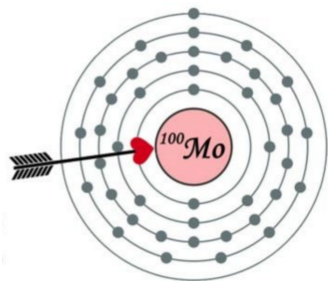
➤ CUPID-CJPL实验

- 建设国内首个地下低温量热器实验平台
- 高Q值同位素: $Q_{\beta\beta} (^{100}\text{Mo}) \sim 3034 \text{ keV}$
- ^{100}Mo 富集钼酸盐闪烁晶体
- CUPID技术: 光-热双读出本底甄别
- 高能量分辨率: $\Gamma(Q_{\beta\beta}) < 10 \text{ keV}$
- 超低本底: $< 0.001 \text{ c/kky}$

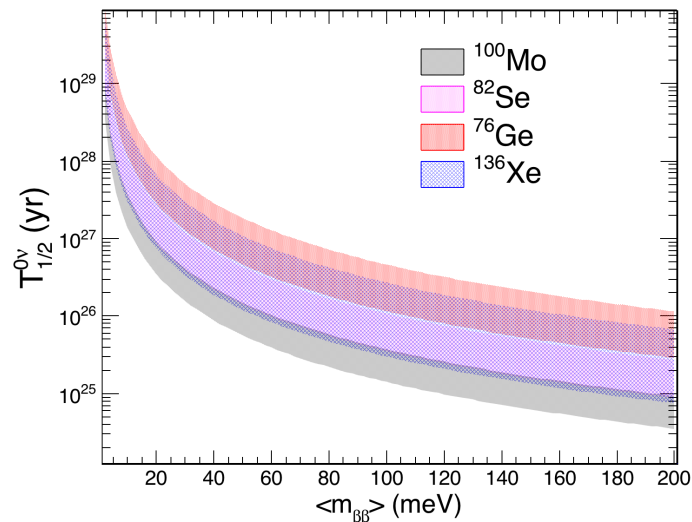
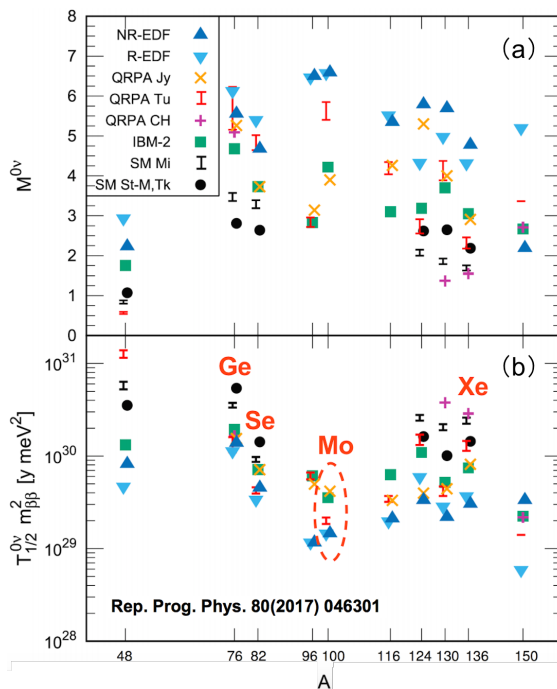


充分发挥国内晶体研发优势，开展低本底高灵敏度 $0\nu\beta\beta$ 实验测量

目标同位素： ^{100}Mo



Isotope	Q [keV]	a [%]	$T_{1/2}^{2\nu}$ 10^{19} [y]
^{48}Ca	4274	0.2	$4.4^{+0.6}_{-0.5}$
^{76}Ge	2039	7.6	160^{+13}_{-10}
^{82}Se	2996	8.7	9.2 ± 0.7
^{96}Zr	3348	2.8	2.3 ± 0.2
^{100}Mo	3034	9.6	0.71 ± 0.04
^{116}Cd	2814	7.5	2.85 ± 0.15
^{130}Te	2528	34.2	69 ± 13
^{136}Xe	2458	8.9	220 ± 6
^{150}Nd	3368	5.6	0.82 ± 0.9



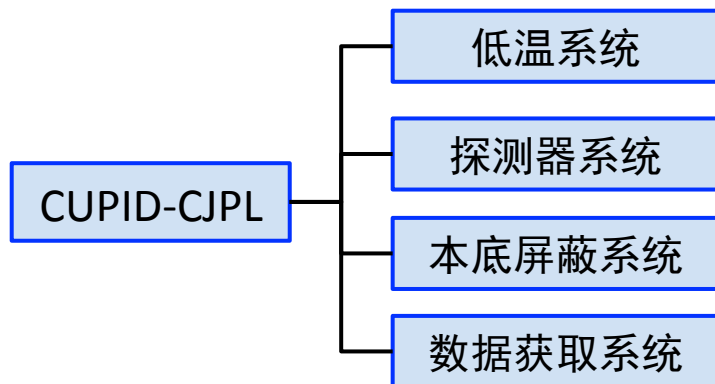
Decay rate:

$$(T_{1/2}^{0\nu})^{-1} = G^{0\nu}(Q, Z) |M^{0\nu}|^2 \frac{\langle m_{\beta\beta} \rangle^2}{m_e^2}$$

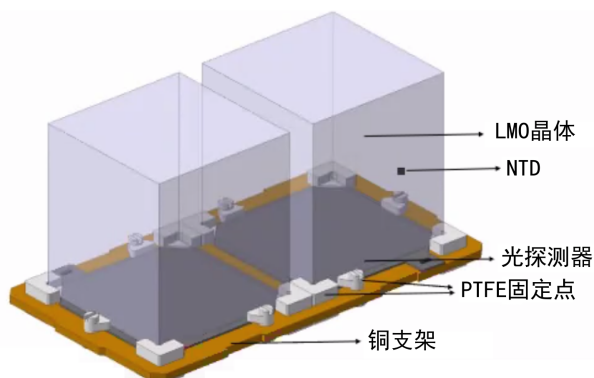
当中微子马约拉纳有效质量 ($m_{\beta\beta}$) 一定的情况下，核矩阵元 $M^{0\nu}$ 和两体相空间因子 $G^{0\nu}$ 的乘积越大（或 $T_{1/2}^{0\nu}$ $|m_{\beta\beta}|^2$ 越小），理论 $0\nu\beta\beta$ 衰变速率越大，实验测量的可行性越大。

^{100}Mo 同位素具有显著优势，LMO闪烁晶体拥有制备基础

研发计划



- 富集晶体制备技术研发
- 低温低本底技术研发
- 低噪声电子学系统研发



➤ 地面测试

- 晶体样品测试
- 系统减振测试

➤ 地下测试

- LNGS实验室地下晶体测试
(国产大尺寸LMO立方晶体)
- 本底分析

➤ CUPID-CJPL样机实验

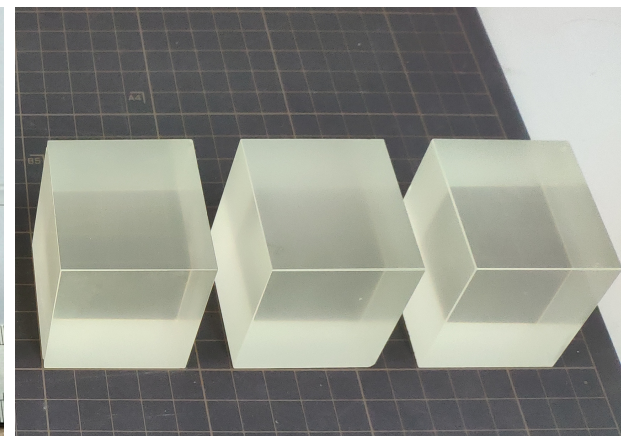
- 建立锦屏低温低本底实验平台
- 建立10 kg样机装置
- 实验取数和数据分析

充分论证CUPID-CJPL关键技术

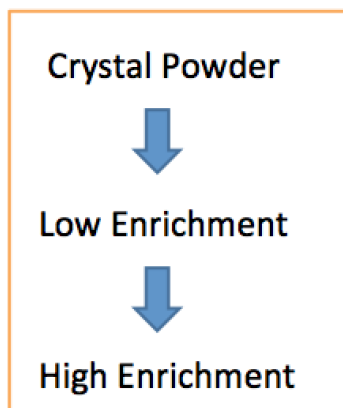
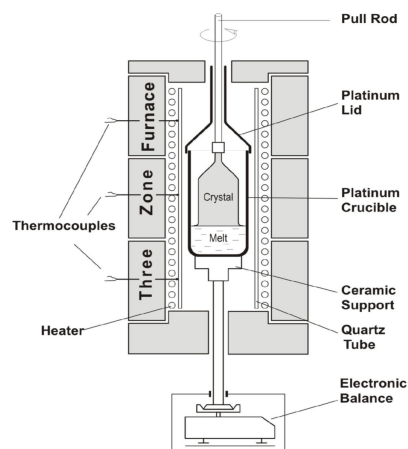
近年研究进展：晶体制备



Cylindrical $\Phi 55 \times 100 \text{ mm}^3$ LMO ingot



$45 \times 45 \times 45 \text{ mm}^3$ high purity LMO crystal

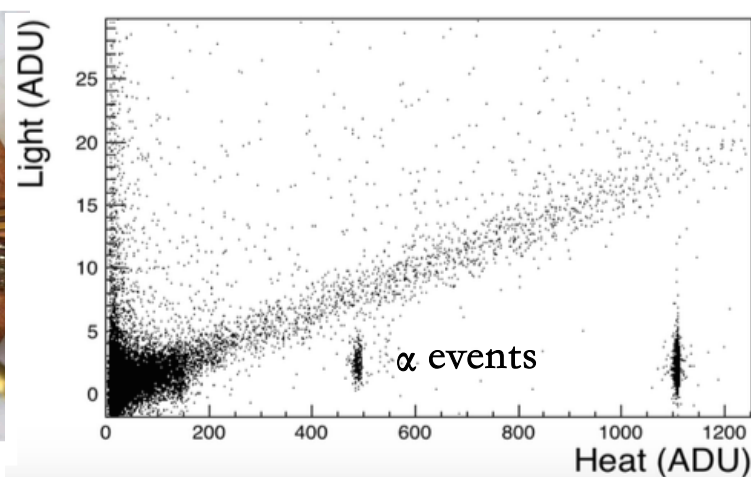
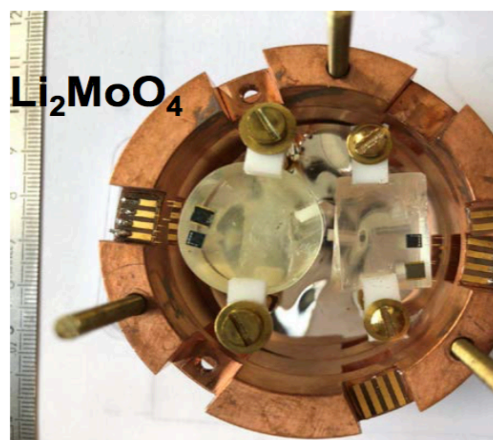
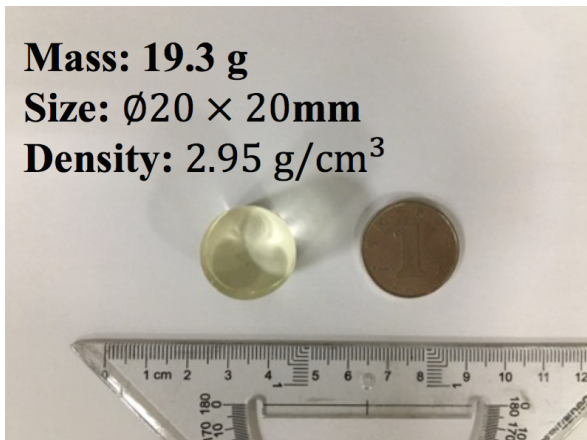


- 高纯度钼酸锂粉末合成技术优化
- 超纯LMO自然丰度晶体制备：
 - 大尺寸圆柱形单晶毛胚生长 ($\Phi 55 \times 100 \text{ mm}^3$)
 - 大尺寸立方晶体生长 ($45 \times 45 \times 45 \text{ mm}^3$)
- 富集晶体生长加工本底控制技术研发 (杂质含量目标: $^{232}\text{Th}/^{238}\text{U} < 10 \mu\text{Bq}/\text{kg}$)
- 大尺寸立方晶体光学性能测试

近年研究进展：晶体测试

USTC Testing Ningbo LMO @ CSNSM, Orsay

Mass: 19.3 g
Size: $\varnothing 20 \times 20\text{mm}$
Density: 2.95 g/cm^3



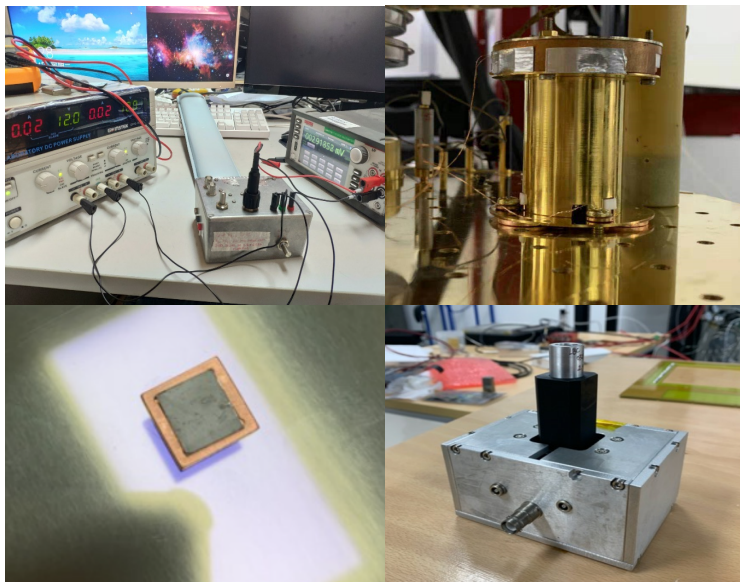
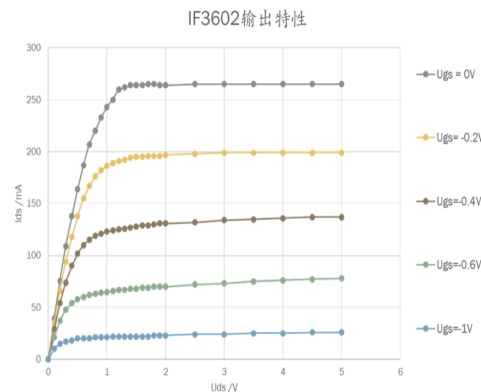
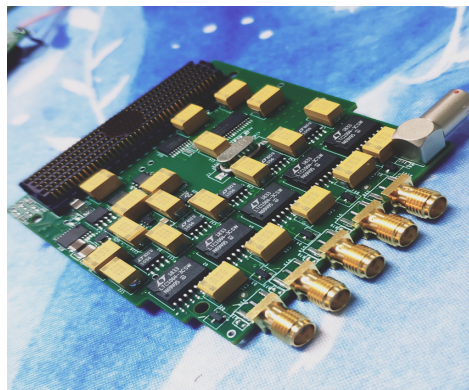
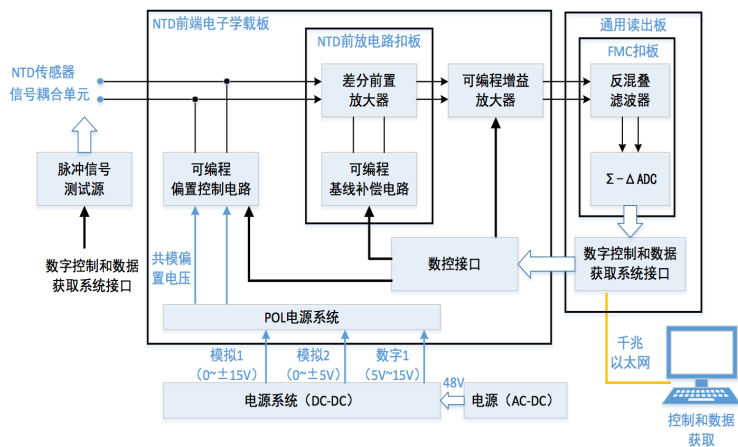
➤ 地面晶体测试

- 国产自然丰度LMO晶体样品
- 法国Orsay CSNSM地面低温测试装置
- 光-热双读出信号检验：实现alpha信号区分

目前已完成4块自然丰度大尺寸LMO立方晶体制备，
计划近期于意大利LNGS地下实验室开展测试

近年研究进展：读出电子学系统研发

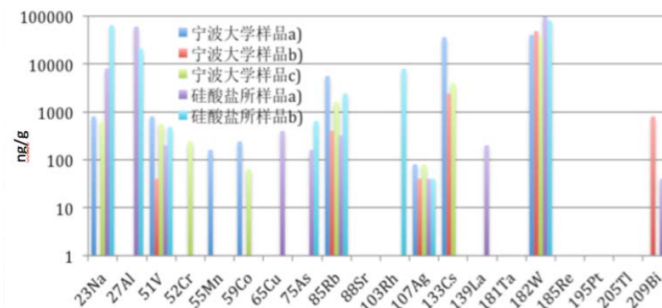
USTC Electronics Design Block Diagram



- 低温量热器数字读出系统和数据获取系统关键技术研发 (USTC/BNU)
- 晶体量热器单元前端电子学研发 (前端电路板设计)
- JFET 性能测试和评估
- NTD-Ge热敏电阻计研发与测试 (CIAE)
- 计划与意大利米兰大学合作开展CUPID电子学技术研发

近年研究进展：材料本底检测

• 晶体样品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

• 无氧铜样品检测



➤ 高精度ICP-MS检测

- 宁波大学和中科院硅酸盐所LMO原料样品检测 (SINAP)
- 无氧铜样品本底检测 (PKU, SINAP)
灵敏度: U/Th ~ 10^{-14} - 10^{-15} g/g
- 优化测量方法, 减少样品污染

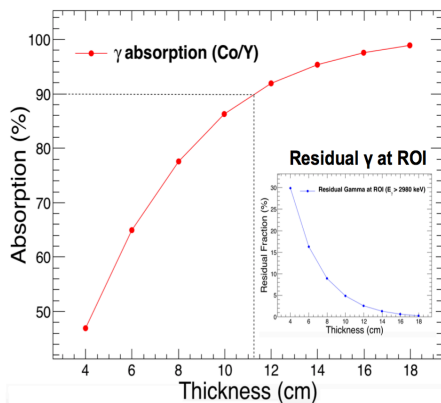
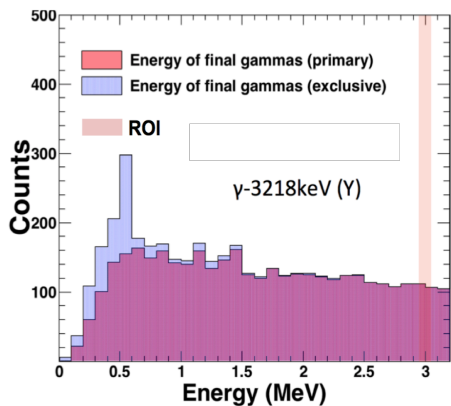
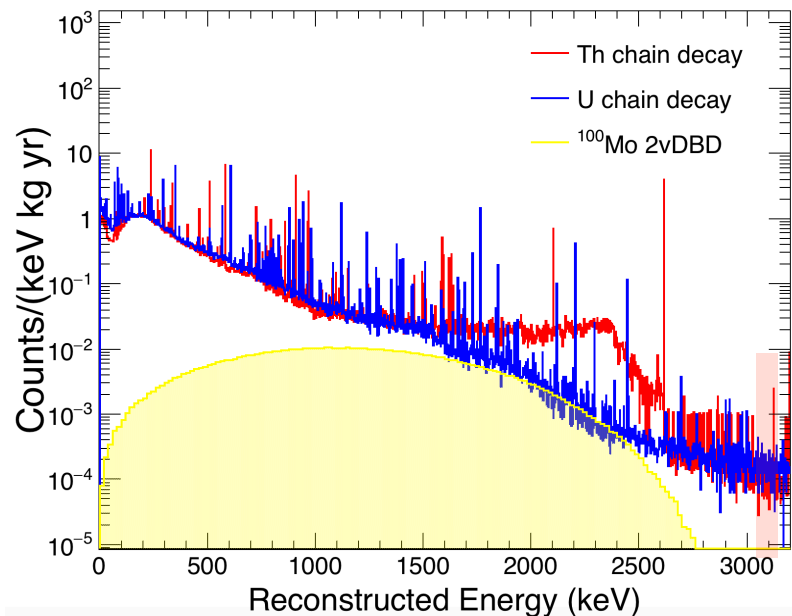
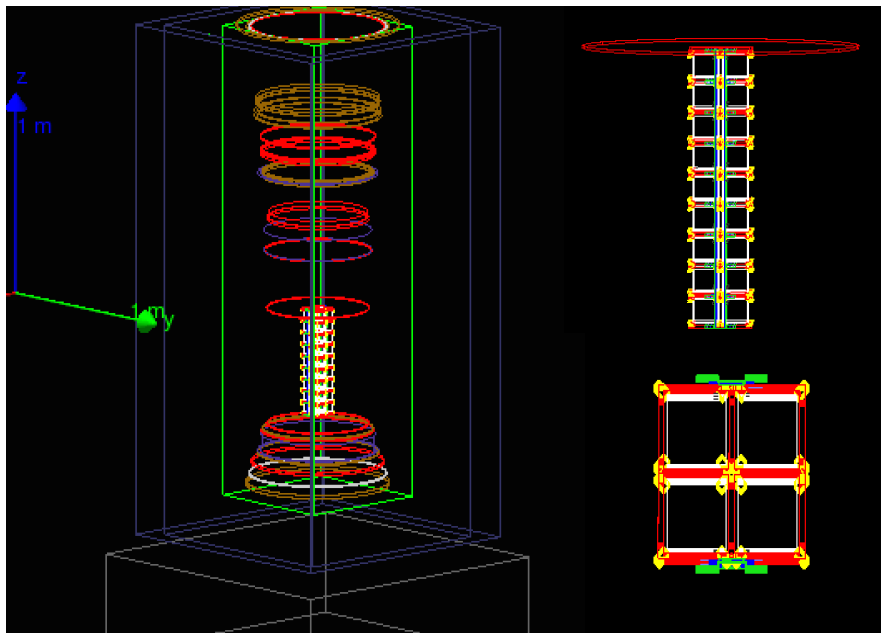
可开展晶体样品和金属材料快速检测, 对于CUPID材料筛选和本底控制至关重要

近年研究进展：地下低本底铜制备



- 地下低本底电解铜主要用于探测器阵列和内部屏蔽体，是实现新一代大型低温晶体量热器实验本底目标的重要途径
- CUPID-China 合作组开展研发，已具备地下低本底测量和地下超纯铜材制备基础，能够自主设计研制地下超纯铜制备装置（清华大学）

近年研究进展：本底模拟研究

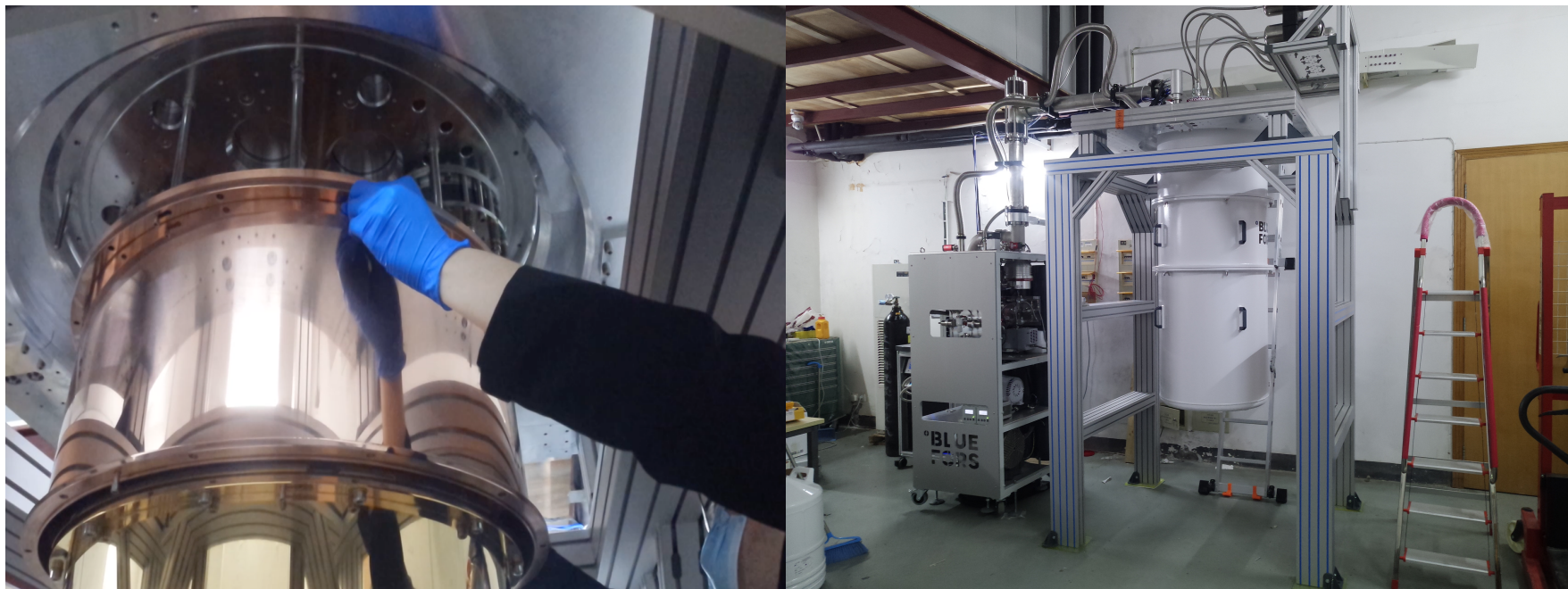


➤ CUPID-CJPL样机本底模拟研究

- ✓ 探测器建模和效应实现
- ✓ 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

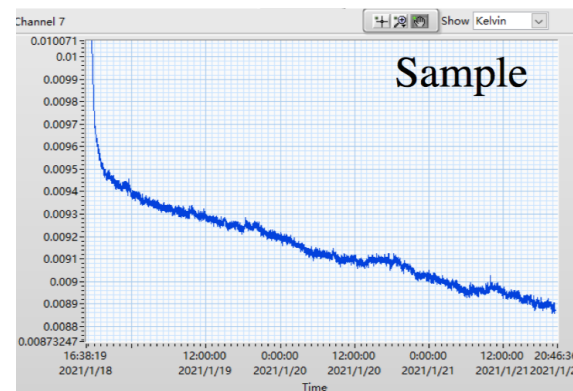
L Ma, HZ Huang, JH Chen in preparation for JINST

近年研究进展：地面测试系统建设



➤ 低温低本底晶体量热器地面测试装置

- Bluefors XLD400 (FDU)/Oxford Ins (USTC)
- 超低本底无氧铜恒温器，屏蔽体挂载设计
- 低温读出 (MXC- \rightarrow RT)，主动减振装置
- 完成屏蔽体挂载和系统真空度测试
- 通过验收运行，计划开展地面晶体测试



CUPID-CJPL研究计划

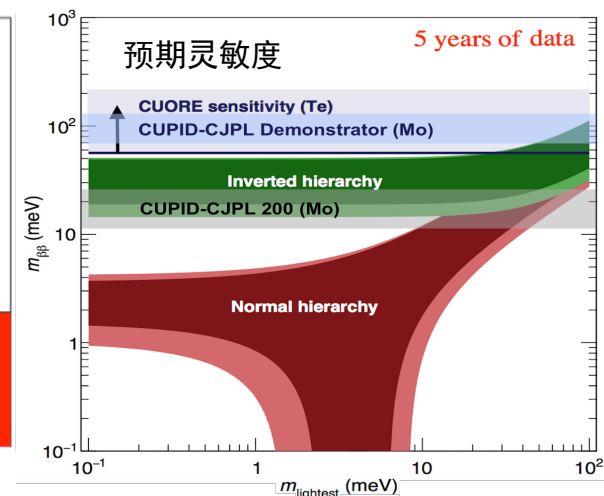
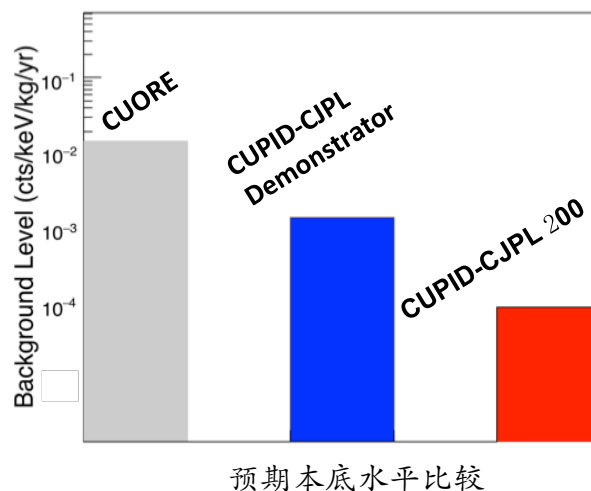
地面/地下晶体测试
(2021-2022)
6-12自然丰度晶体



CUPID-CJPL-Demo样机实验
(2022-2024)
10 kg, 36块富集晶体



CUPID-CJPL-200
(2024+)
>1000块富集晶体



➤ 研发方向

- 光-热双读出优化，提高晶体闪烁光收集效率
- 超低本底晶体探测器阵列研发
(富集晶体制备、加工组装，低噪声电子学系统研发)

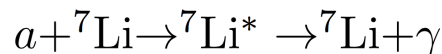
➤ 预期目标

- 锦屏样机实验 - 达到当前CUORE实验灵敏度
- 百千克级实验 - 覆盖中微子有效质量反序区间

轴子和低质量暗物质研究

➤ 轴子和暗物质探测

- 太阳轴子 (14.4 keV, 477.6 keV) 探测



- 暗物质粒子探测

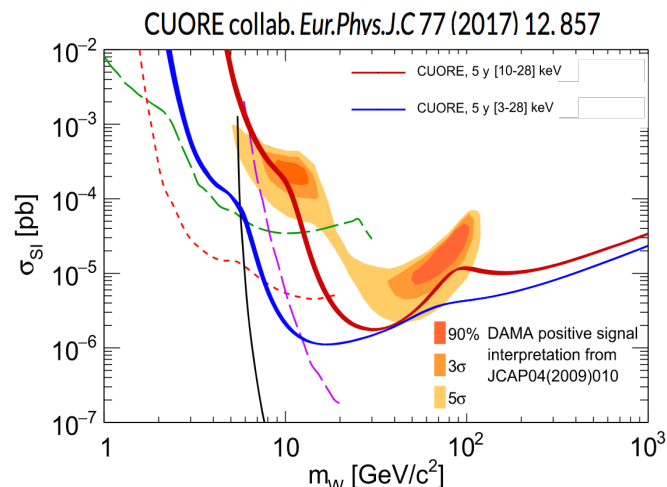
低质量靶核: Li/O, 中等质量靶核: Mo

➤ 双中微子双贝塔衰变能量谱和半衰期研究

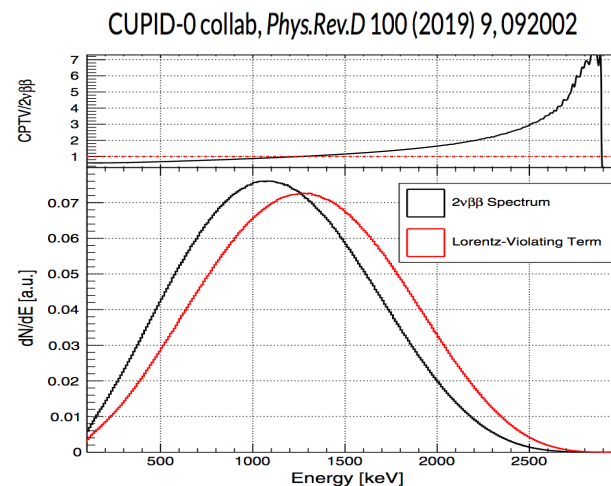
- 检验CPT守恒
- 比较不同同位素结果

➤ 中微子相干散射研究

基于CUPID技术的晶体量热器在低能区具备更低的本底水平, 有望在CUORE基础上实现更高灵敏度的测量



CUORE自旋相关WIMP粒子-核子弹性散射截面测量灵敏度预期结果



标准和含CPT破缺时的 $2\nu\beta\beta$ (${}^{82}\text{Se}$)能谱比较

总结

➤ CUPID-CJPL

- 建设锦屏低温低本底实验平台，开展钼基晶体量热器 $0\nu\beta\beta$ 及低质量暗物质等前沿物理实验研究
- 参与国际合作，确立锦屏优势，开展大型CUPID实验

➤ CUPID-CJPL样机实验

- 充分论证LMO实验技术
- 建立百千克/吨级实验装置研发基础

➤ 国内研发基础

- 高纯晶体生长，低本底检测和读出电子学研发
- 低本底富集晶体生长技术探索

开展CUPID-CJPL技术研发，掌握新一代无中微子双贝塔衰变实验核心技术，确立锦屏优势，主导未来国际领先的CUPID实验



欢迎各位专家批评指正！

谢谢！

Backups: CUPID-1T experiment

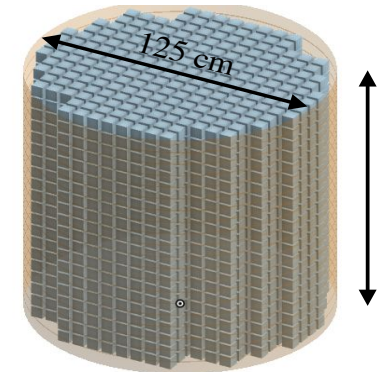
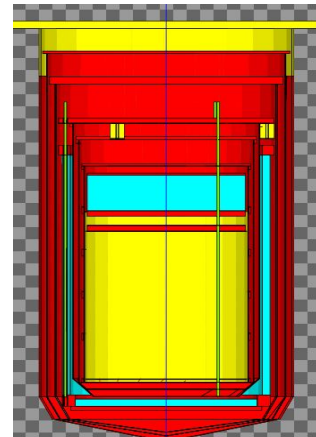
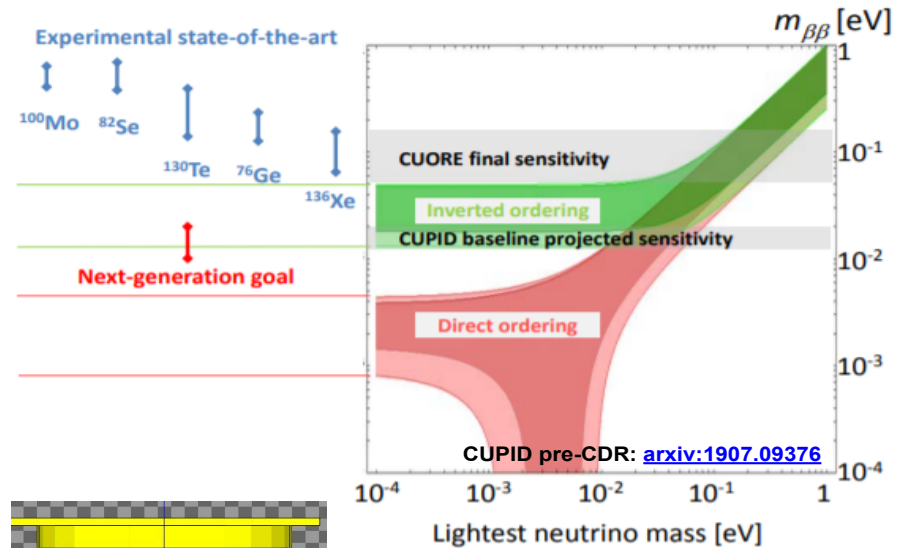
CUPID-1T: HALLMARKS

- 1000 kg of ^{100}Mo in a new cryostat or multiple facilities world wide
- Sensitivity: $m_{\beta\beta} < 10$ meV (NH)

POTENTIAL EXPANSIONS

- Large volume cryogenic facilities in multiple Underground Labs worldwide
- ~1900 kg of LMO

Build a large-size CUPID-CJPL detector as a part of CUPID network detectors to achieve ultimate ton-scale sensitivity for Mo-100



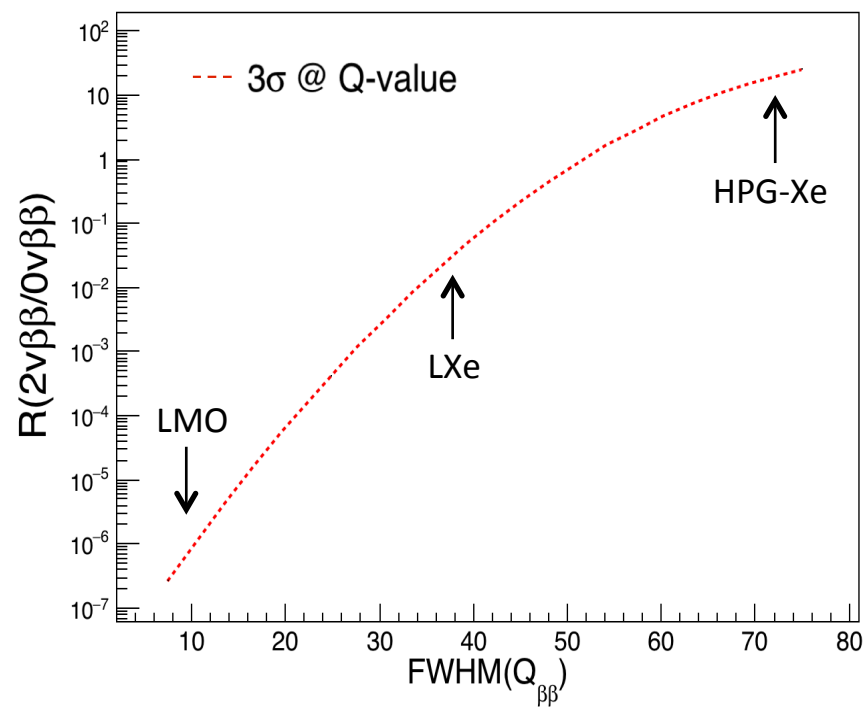
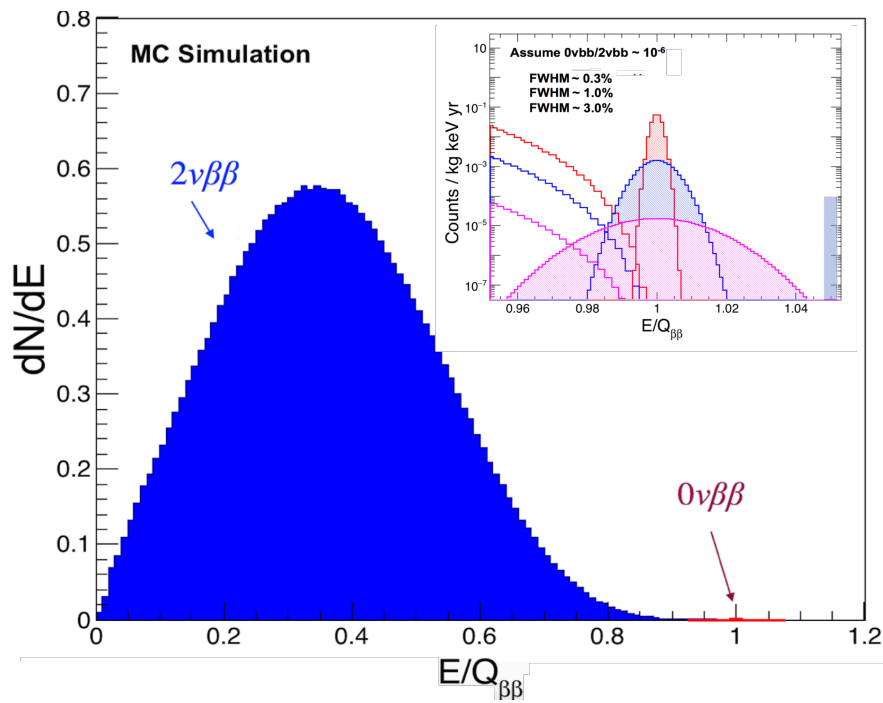
Towards CUPID-1T. Snowmass 2021 Planning workshop

Backups: Sensitivity projection

基本参数	CUPID-CJPL Demonstrator		CUPID-CJPL 200
	Li ₂ MoO ₄	Li ₂ MoO ₄	
晶体材料	Li ₂ MoO ₄	Li ₂ MoO ₄	Li ₂ MoO ₄
晶体总质量 (kg)	10	30	200
有效同位素富集度	85%	85%	95%
有效同位素质量 (kg)	5	15	106
能量分辨率 (FWHM, keV)	10	10	5
本底水平 (cts/keV/kg/yr)	0.001	0.001	0.0001
半衰期灵敏度 (5yr, yr)	3.5×10^{25}	6.0×10^{25}	9×10^{26}
有效质量灵敏度 (5yr, meV)	70-130	41-75	12-22
预算估计 (人民币百万元)	20	50	200

CUPID-CJPL不同规模实验半衰期和有效马约拉纳质量测量灵敏度预测

Backups: Resolution comparison



^{100}Mo 低温晶体量热器能量分辨率高, $2\nu\beta\beta$ 能谱末端在 $2\nu\beta\beta$ 敏感区间贡献小