

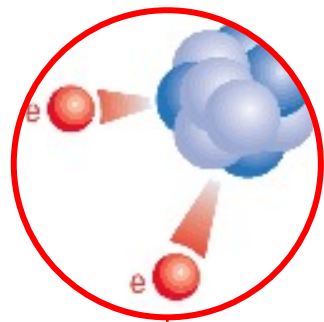
粒子与原子核物理学科 seminar at USTC

Double Beta Decay and Beyond

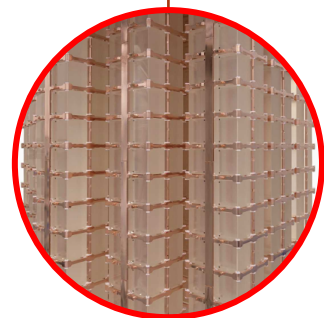
韩柯

上海交通大学

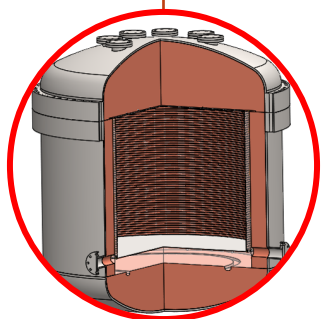
2022/03/04



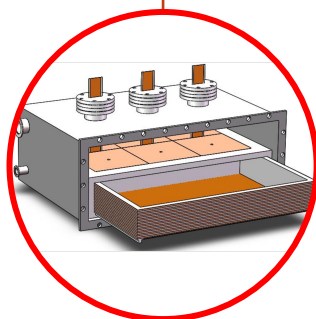
DBD及其实验挑战



主要实验技术



Pandax实验

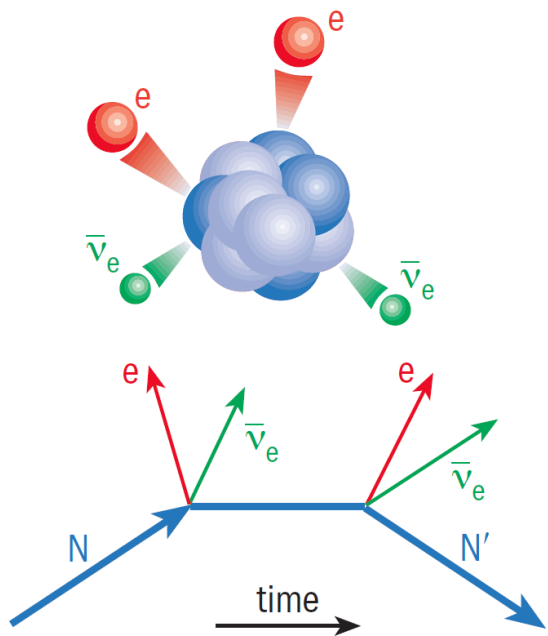


交叉、应用

无中微子双贝塔衰变 (NLDBD)

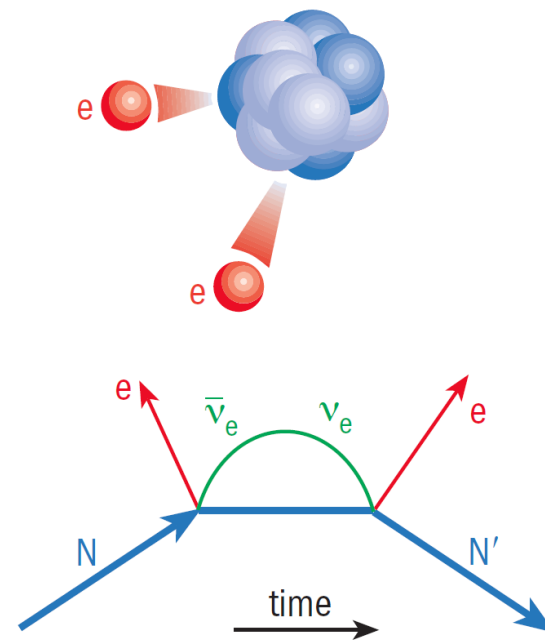
- 无中微子双贝塔衰变 \Leftrightarrow 马约拉纳中微子
- 轻子数不守恒
- 测量中微子有效质量 (Majorana Effective Mass)

• 例子:



$$\bar{\nu} = \nu$$

韩柯, 上海交通大学



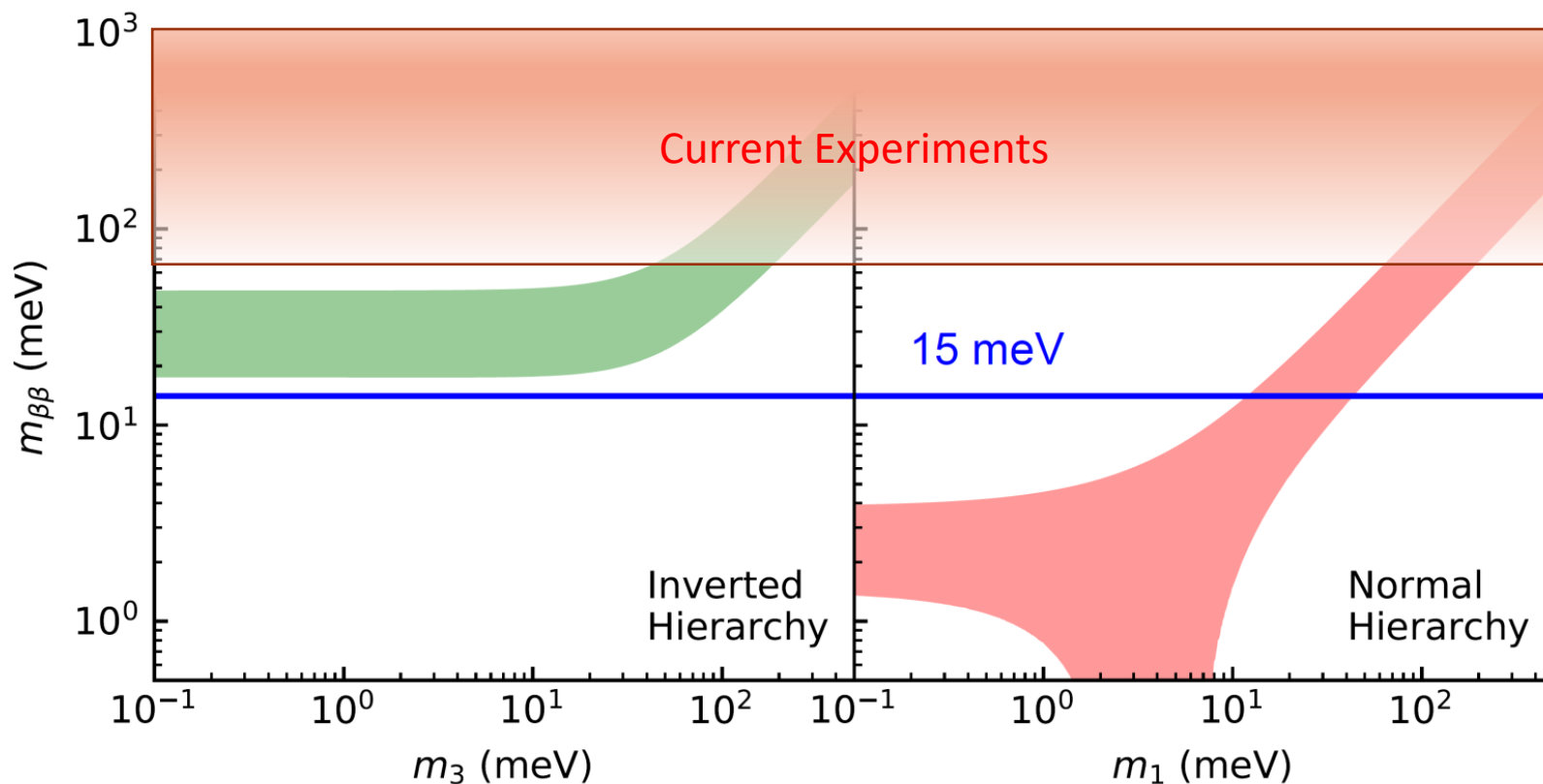
中微子有效质量

$$|\langle m_{\beta\beta} \rangle| = \left| \sum_{i=1}^3 U_{ei}^2 m_i \right|$$

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

Phase space factor

Nuclear matrix element



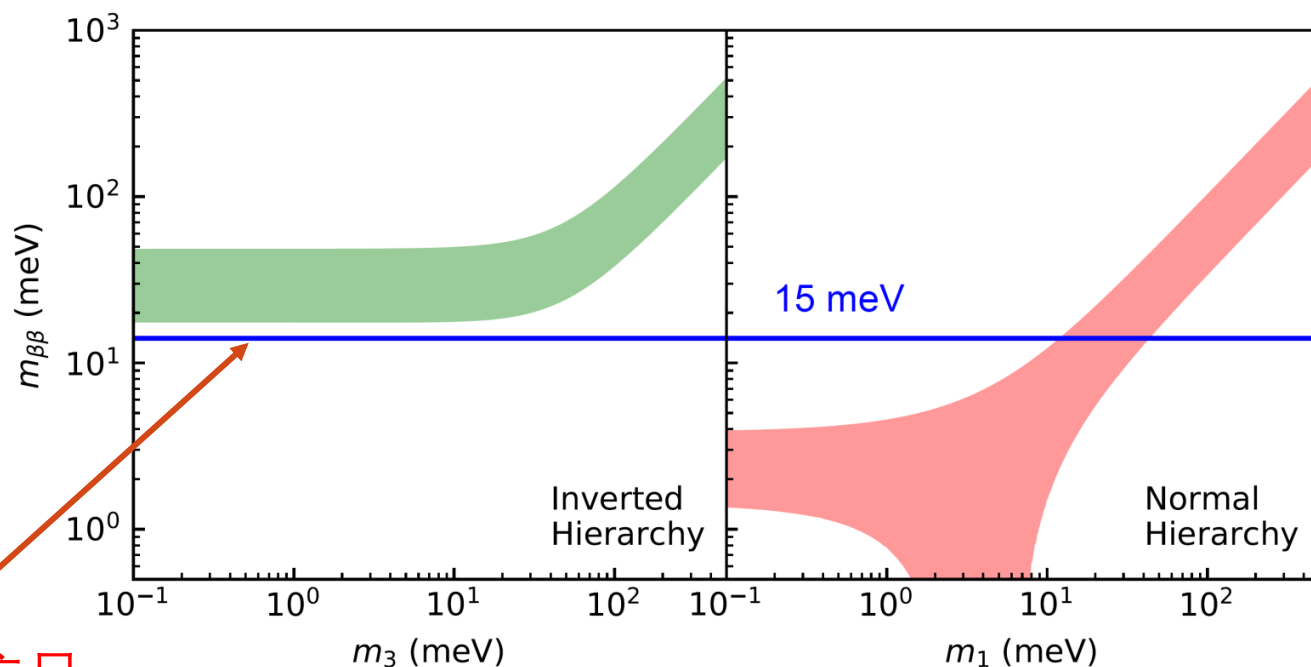
极低信号数量

- 超长半衰期 $T_{0\nu}$ ，极低信号量：

$$S = \ln(2) \frac{M \cdot N_A \cdot a \cdot \varepsilon}{W} \frac{t}{T_{0\nu}}$$

- 现有实验半衰期限制为 10^{26} 年以上
- 100kg 级 90% 富集 ^{136}Xe 探测器，每年少于3个信号
- 下一代实验目标灵敏度为 10^{27} 到 10^{28} 年

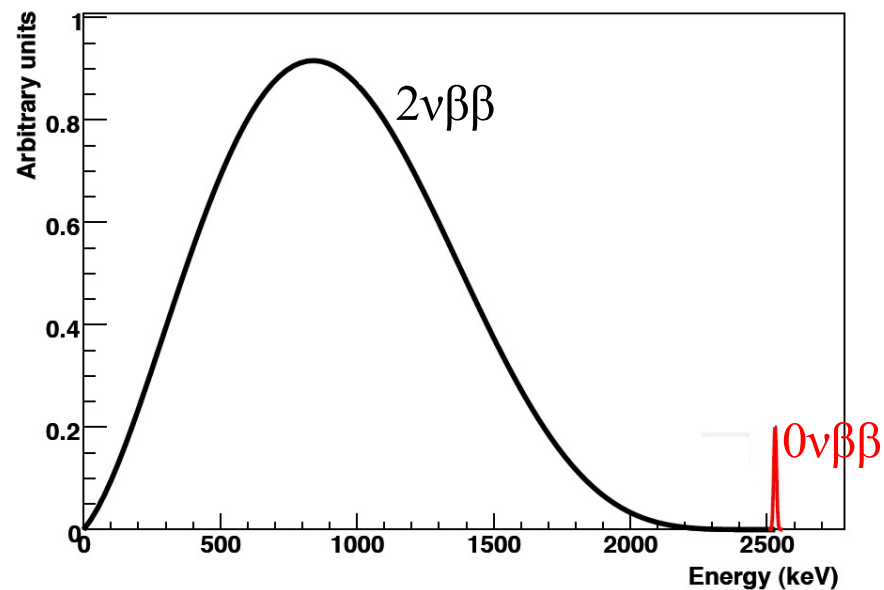
M	总质量	ε	探测效率
N_A	6.02×10^{23}	W	摩尔质量
a	丰度	t	探测时间



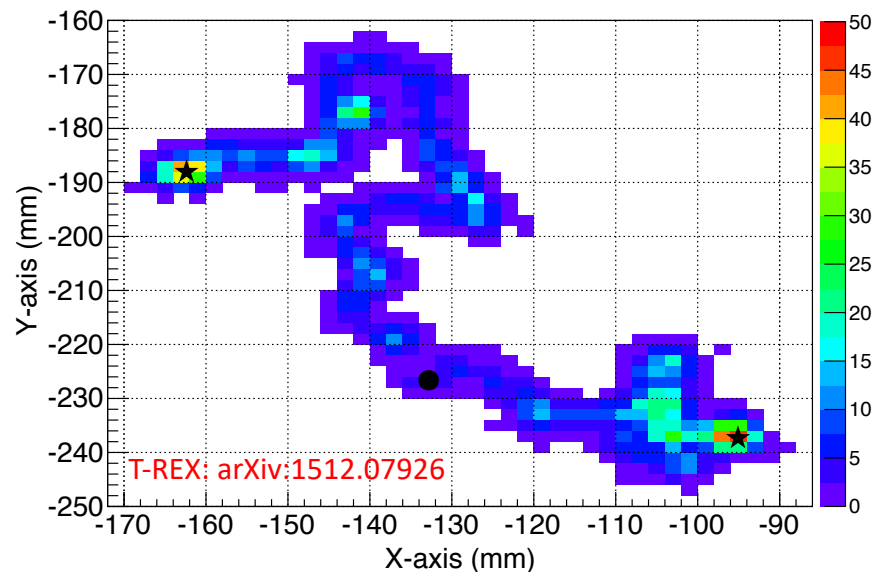
每吨年 < 1 个信号

如何鉴别NLDBD信号？

- 测量双电子的能量
- 测量双电子的径迹
- 鉴别衰变子核

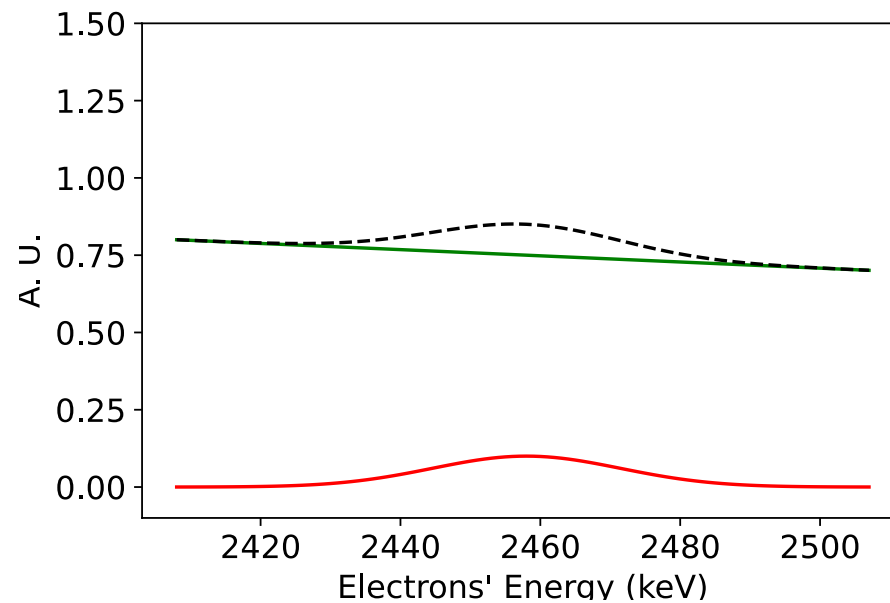
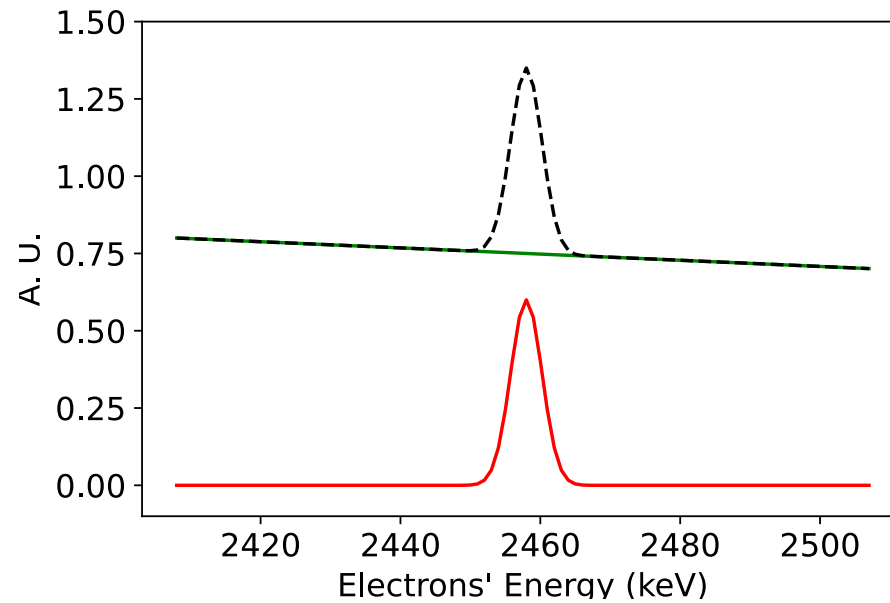
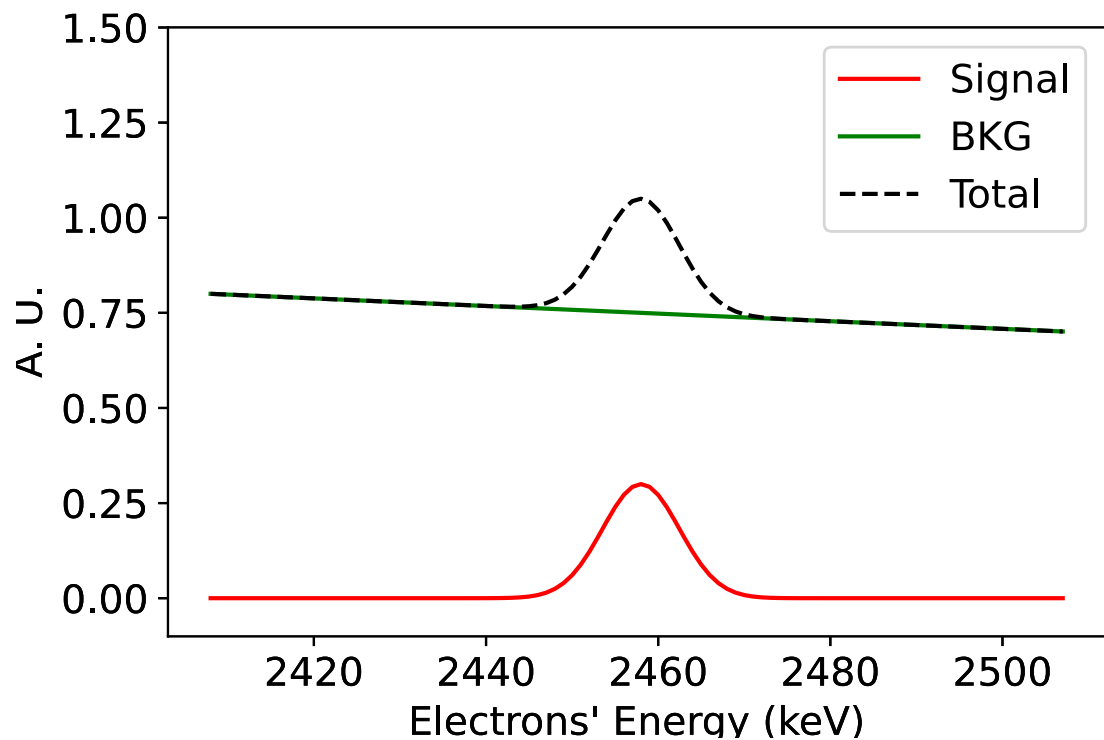


Sum of two electrons energy



Simulated track of $0\nu\beta\beta$ in high pressure Xe

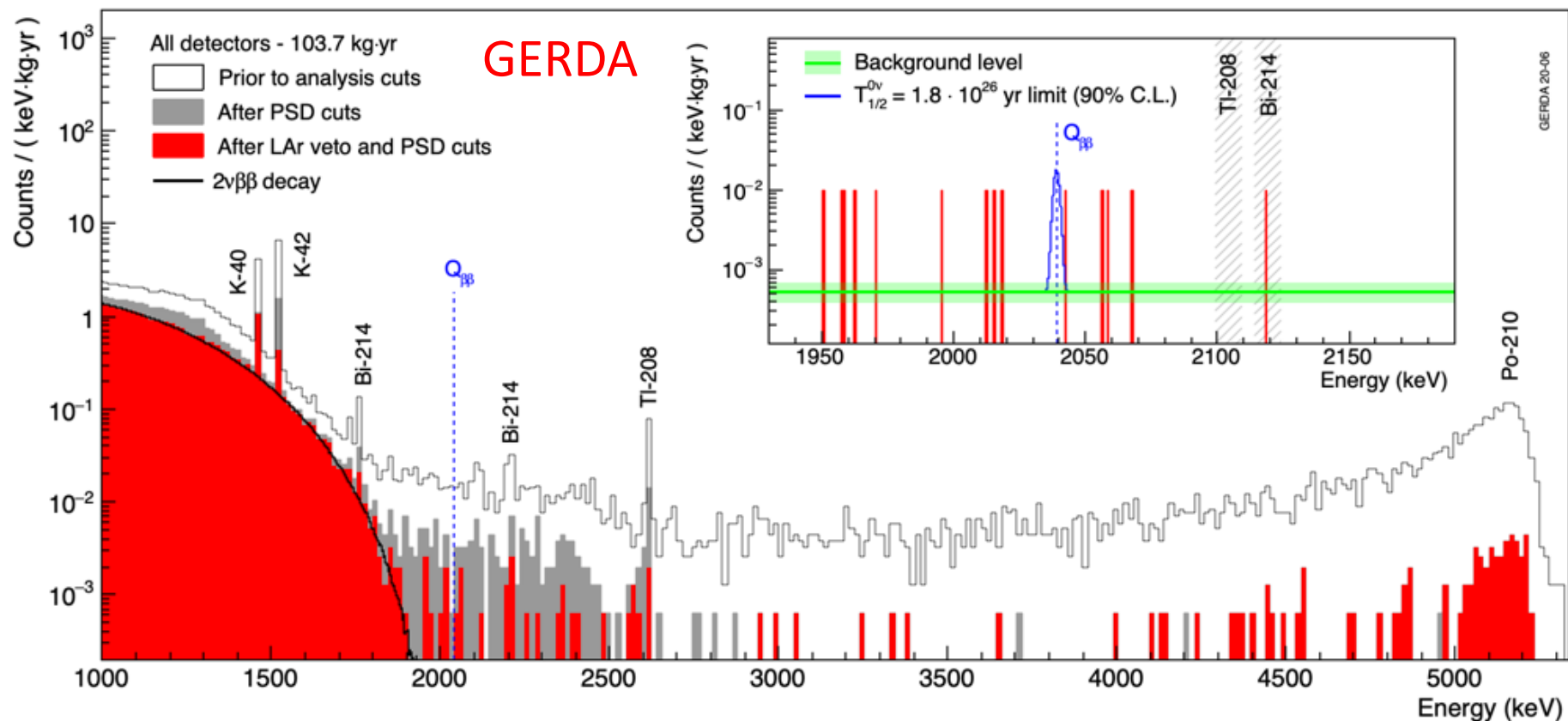
实验挑战：极限要求下的探测器技术



实验挑战：极限要求下的探测器技术

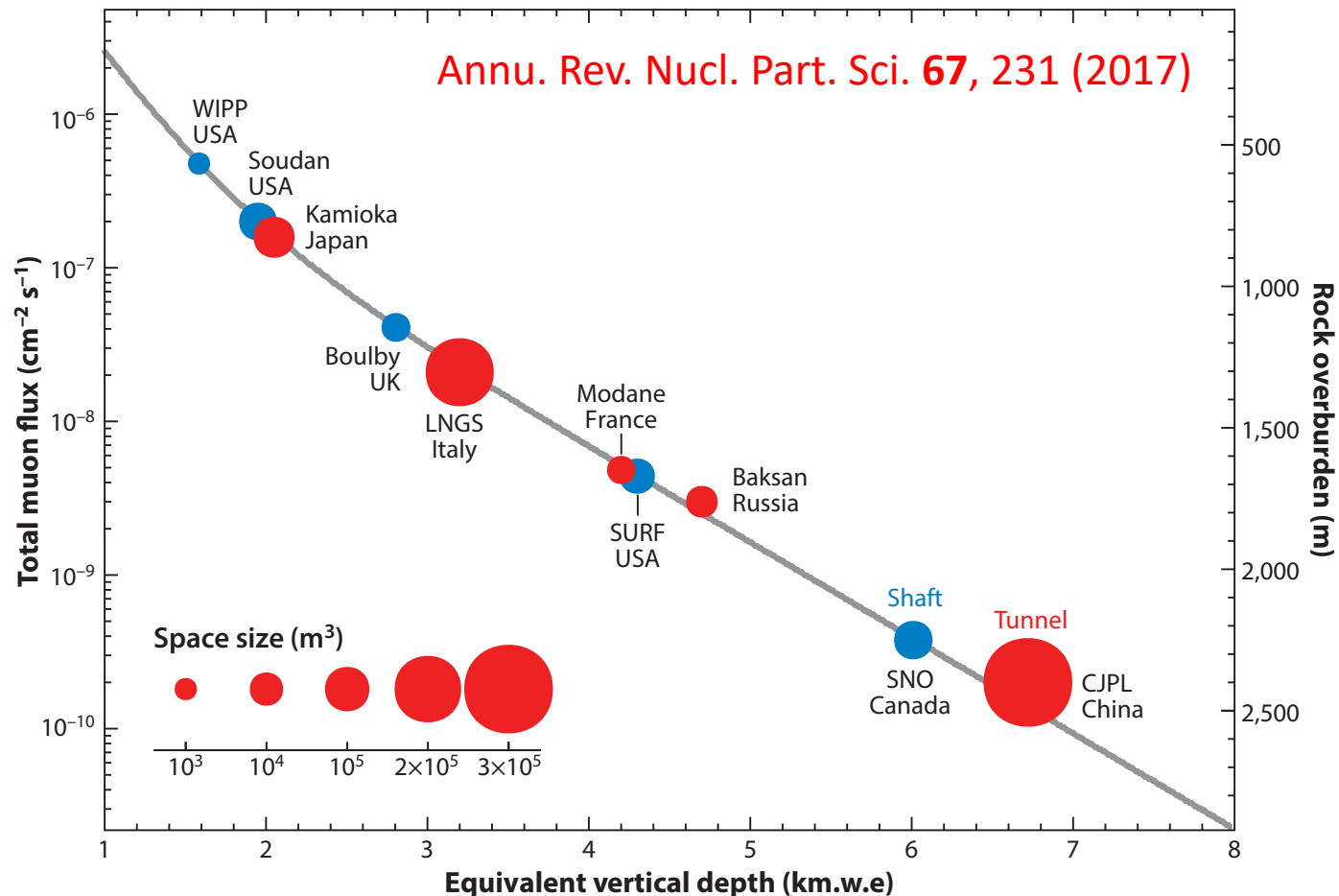
- 极低本底

- 高性能（效率、分辨率）



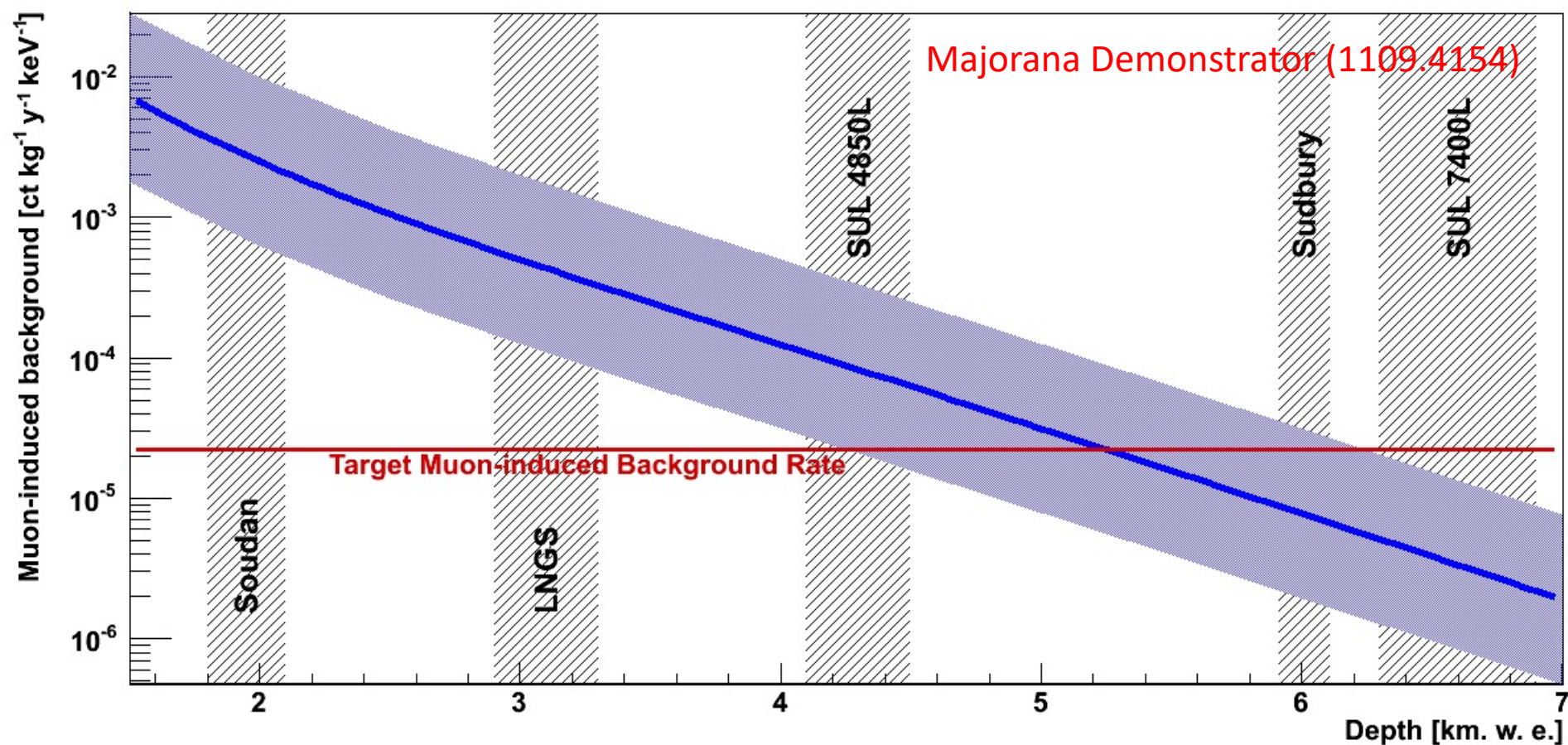
实验挑战：本底控制

- 宇宙射线：
 - 地下开展实验
- 宇生放射性
 - 地下存储，地下加工，等
- 地下实验室本底
 - 额外屏蔽体
- 探测器材料天然放射性
 - 天然放射性 1-100 Bq/kg
 - 实验要求至少1 mBq/kg



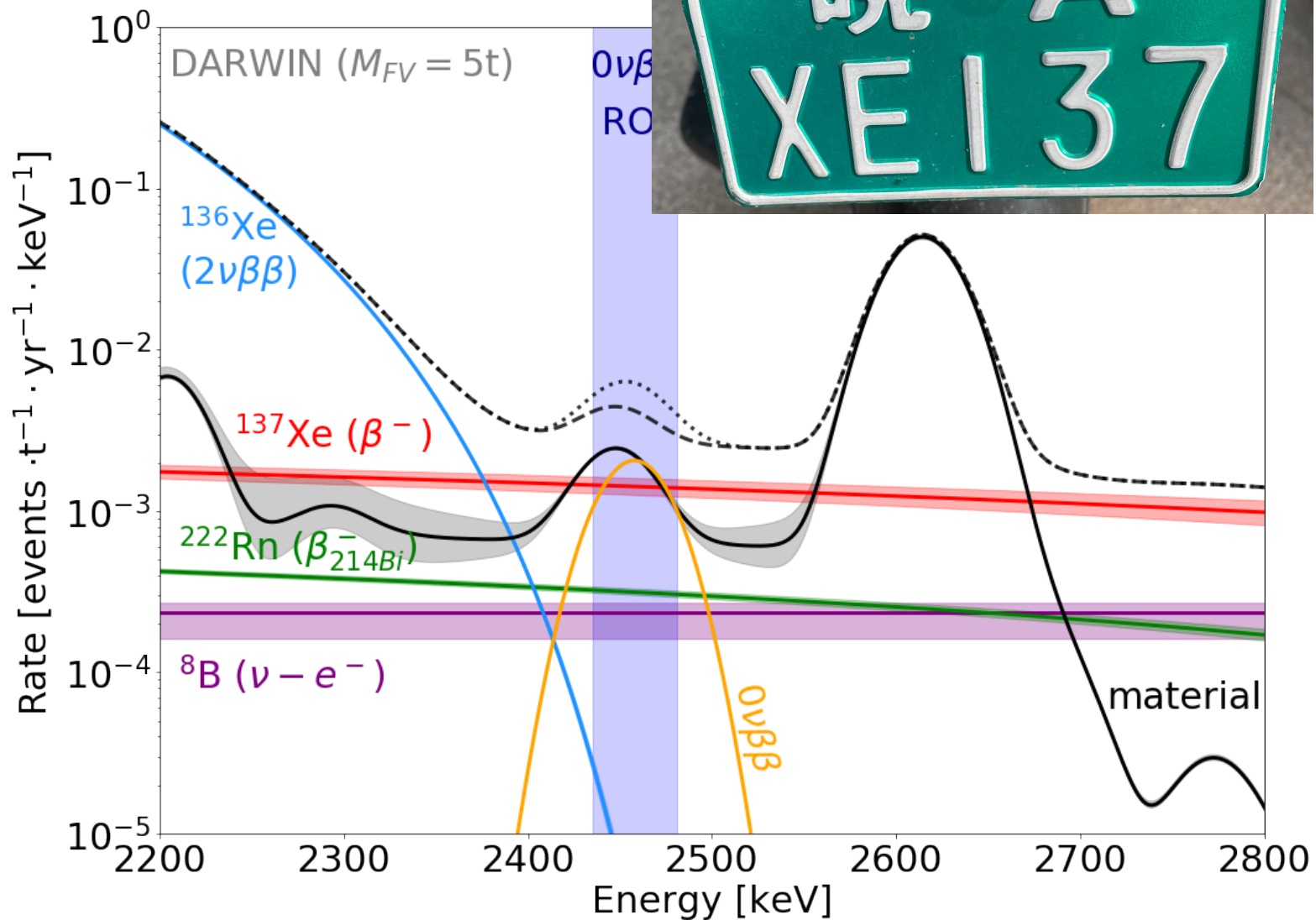
Muon-induced 环境本底

- 抑制Muon-induced 本底：更深的实验室或者更强力的主动屏蔽体（大型探测器）



Muon-induced 探测器本底

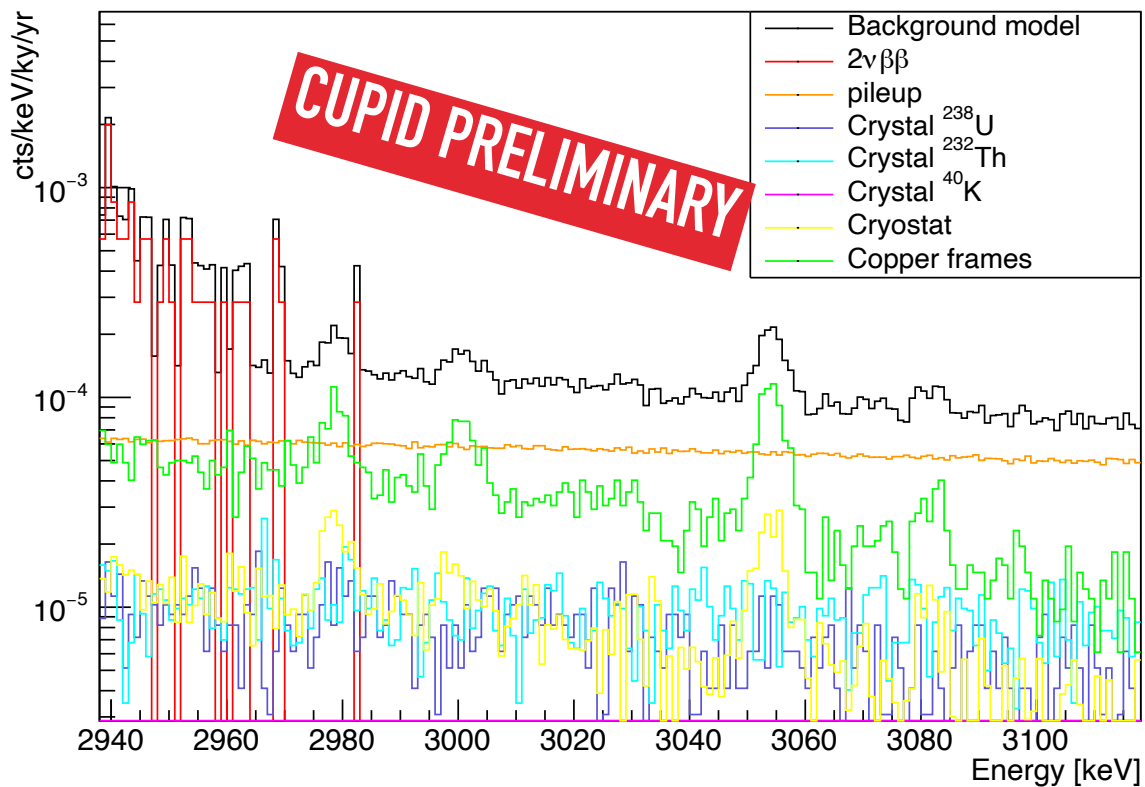
- Muon激活探测器材料带来不可避免的本底
- DARWIN@LNGS：
 ^{137}Xe beta能谱为 ^{136}Xe $0\nu\beta\beta$ ROI主要本底
- 相应本底在锦屏低100倍，优势明显



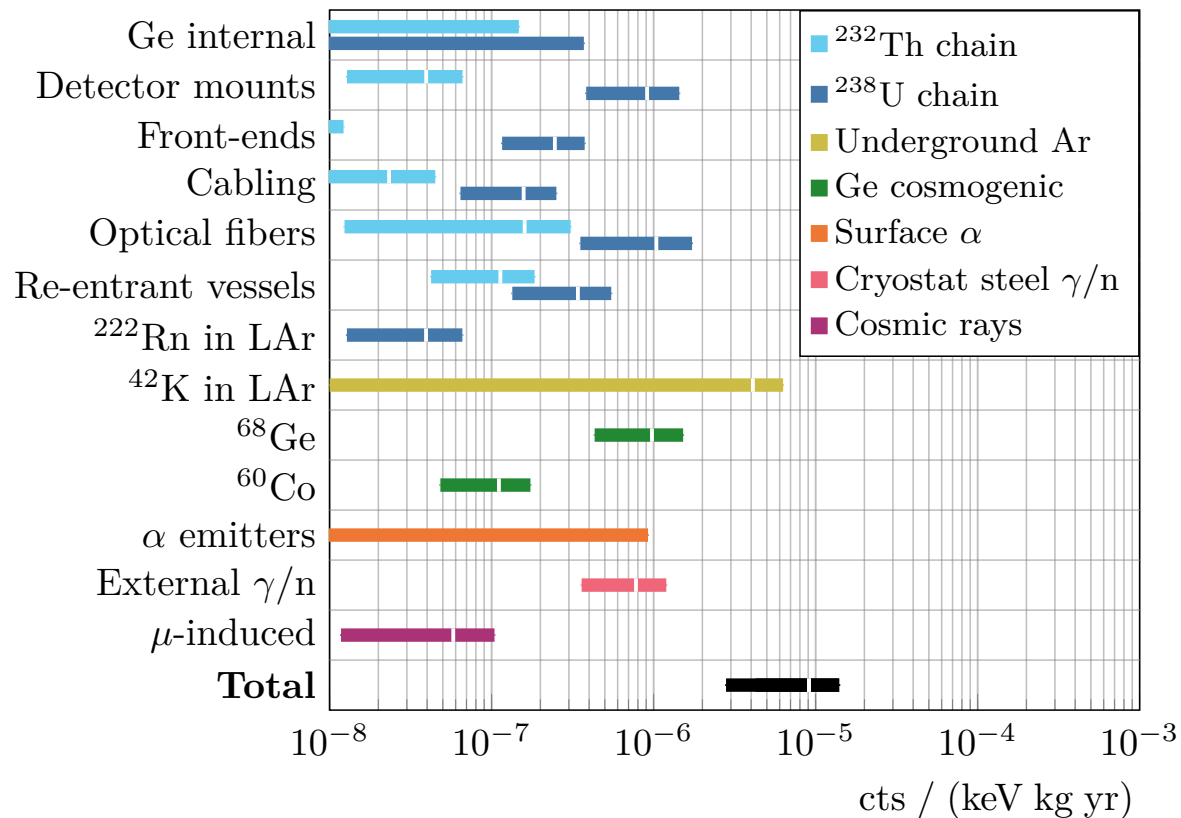
探测器本底占据主导

- $10^{-4} - 10^{-5}$ c/keV/kg/y \rightarrow 每吨年, 10 keV区间内 0.1 到 1 个本底事件
- 主要来自于探测器、屏蔽体材料

CUPID Background Model

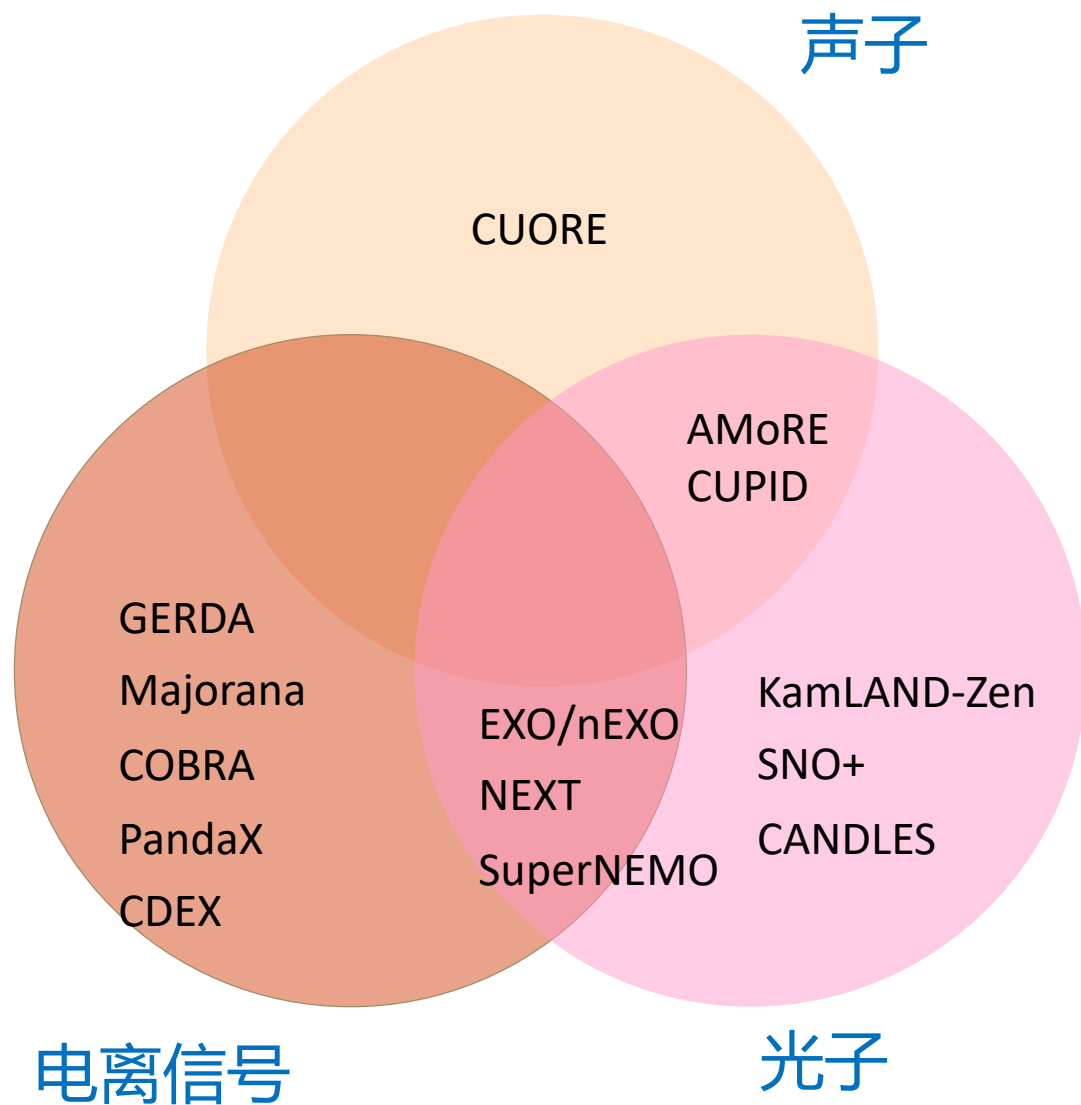



LEGEND-1000 预期本底



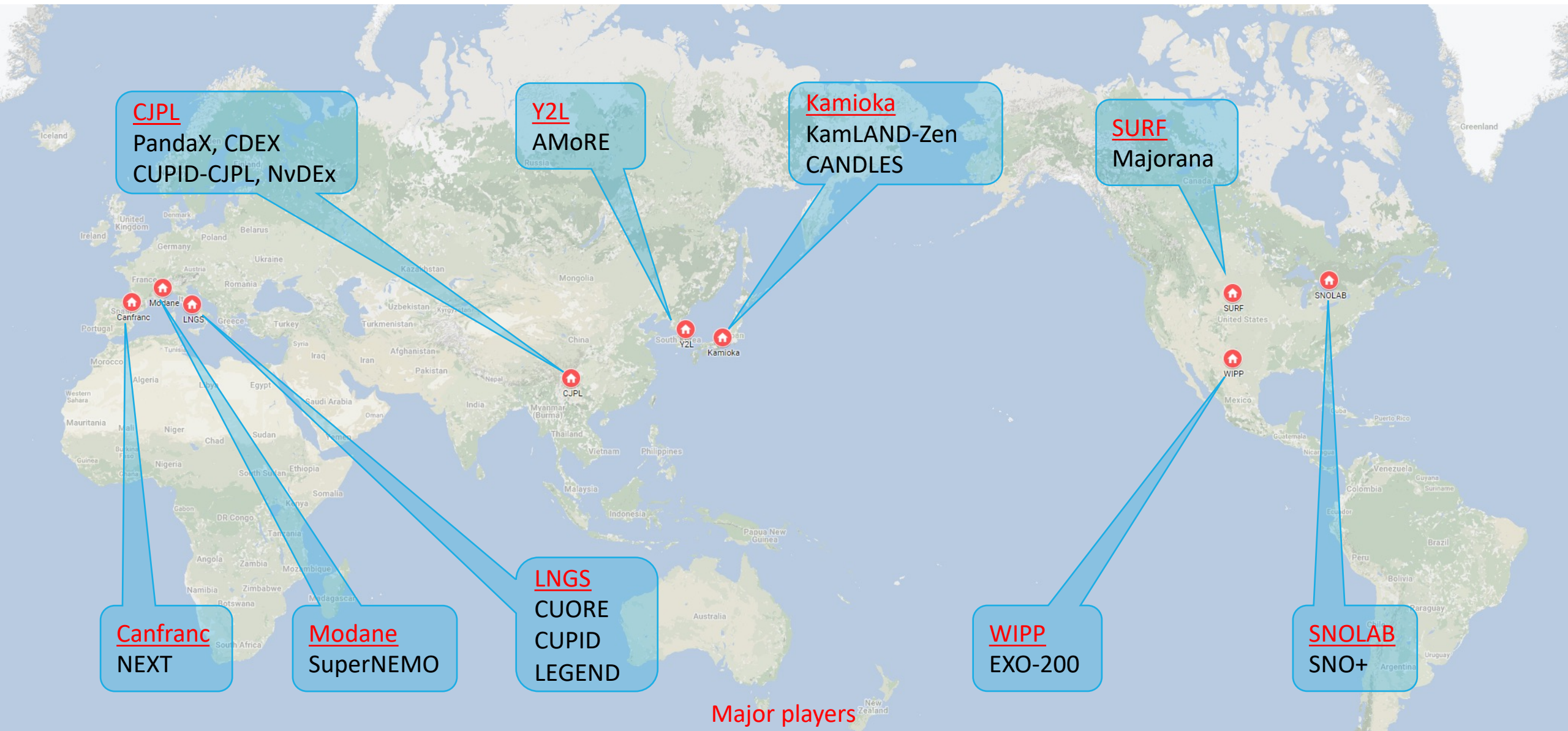
主流探测器技术

Giuliani, TAUP 2021

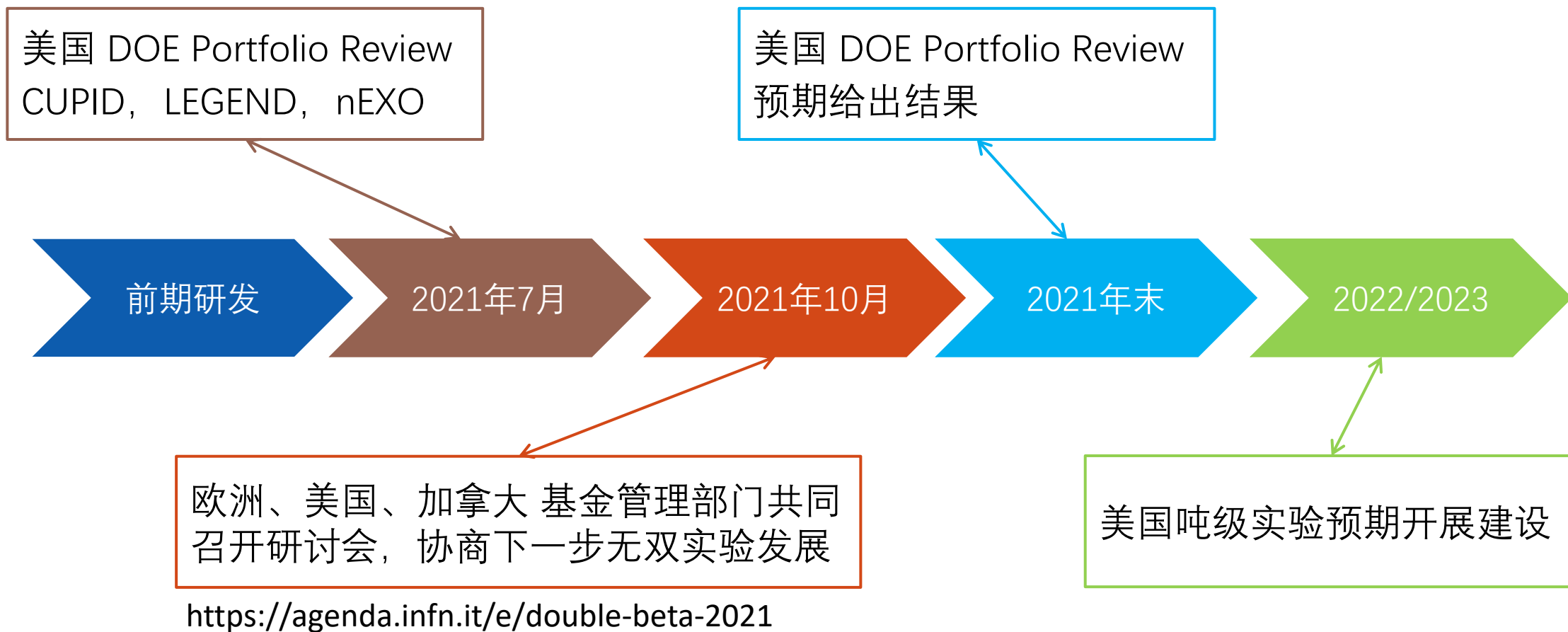


GERDA <i>Phys. Rev. Lett. 125, 252502 (2020)</i>	$T_{1/2} > 1.8 \times 10^{26} \text{ y}$
KamLAND-Zen 400 <i>Phys. Rev. Lett. 117, 082503 (2016)</i>	$T_{1/2} > 1.07 \times 10^{26} \text{ y}$
EXO-200 <i>Phys. Rev. Lett. 123, 161802 (2019)</i>	$T_{1/2} > 3.5 \times 10^{25} \text{ y}$
MAJORANA dem. <i>Phys. Rev. C 100, 025501</i>	$T_{1/2} > 2.7 \times 10^{25} \text{ y}$
CUORE <i>arXiv:1907.09376</i>	$T_{1/2} > 2.2 \times 10^{25} \text{ y}$
CUPID-0  <i>L. Pagnanini, this conference</i>	$T_{1/2} > 4.7 \times 10^{24} \text{ y}$
CUPID-Mo  <i>B. Welliver, this conference</i>	$T_{1/2} > 1.8 \times 10^{24} \text{ y}$
NEMO-3 <i>Phys. Rev. D 92, 072011 (2015)</i>	$T_{1/2} > 1.1 \times 10^{24} \text{ y}$

实验分布



美洲、欧洲协同规划

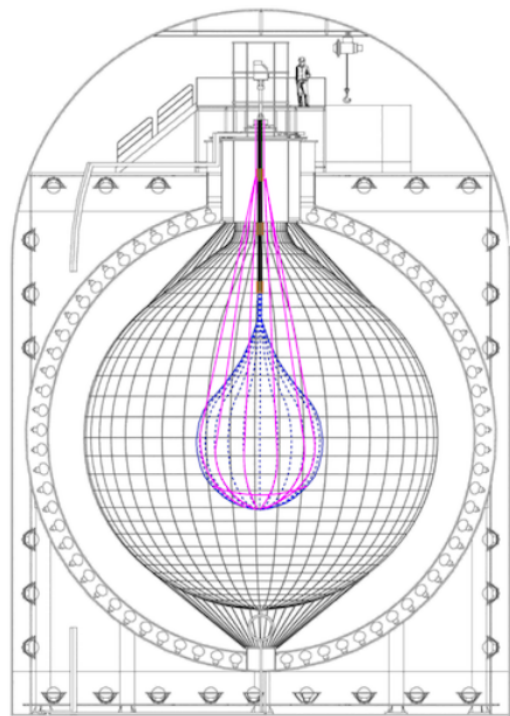


国际4大合作组



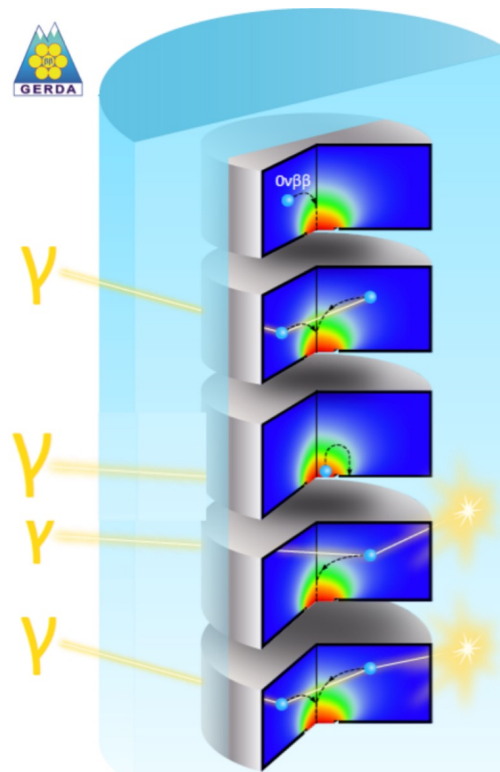
CUORE/CUPID

低温晶体量热器



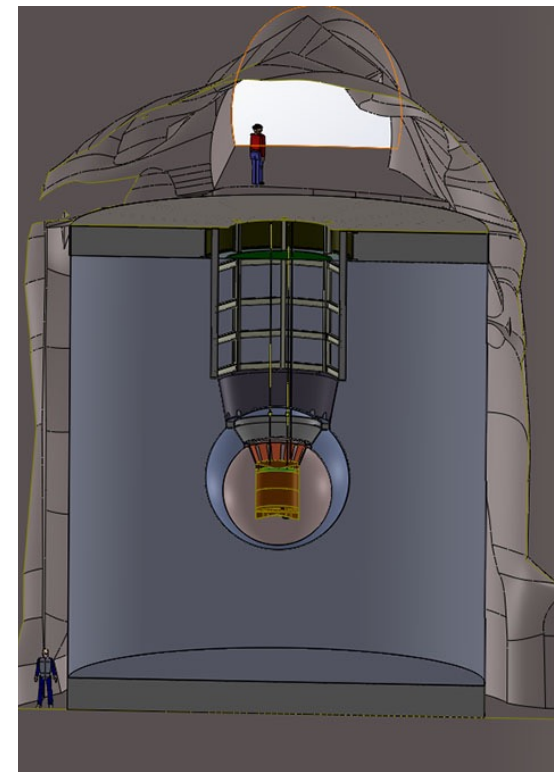
KamLAND-ZEN系列

液体闪烁体



LEGEND系列

高纯锗

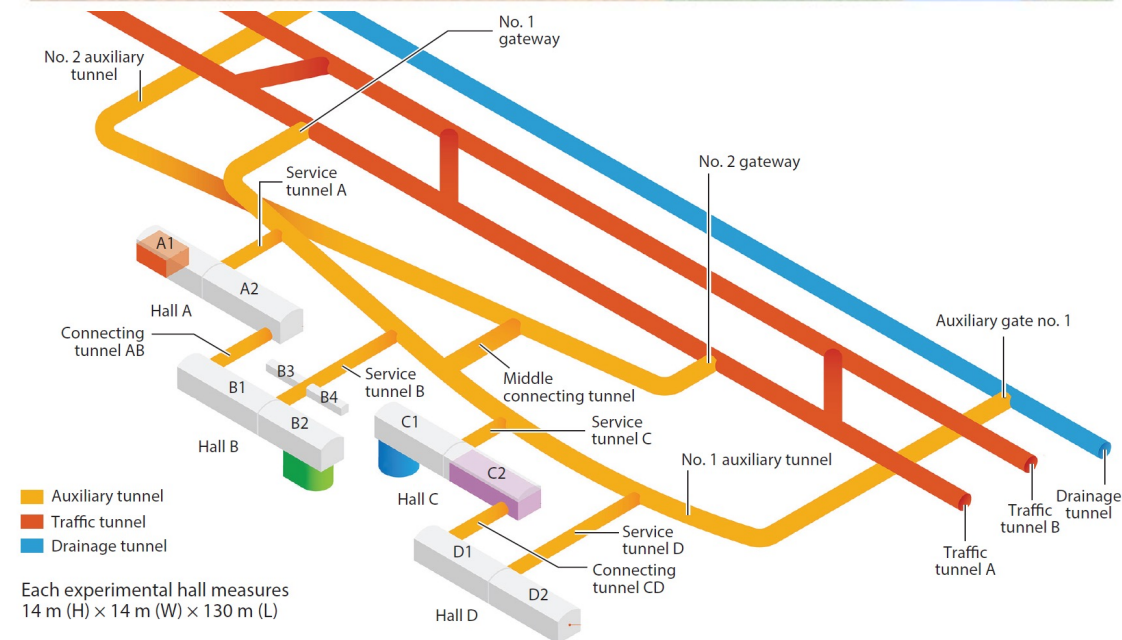
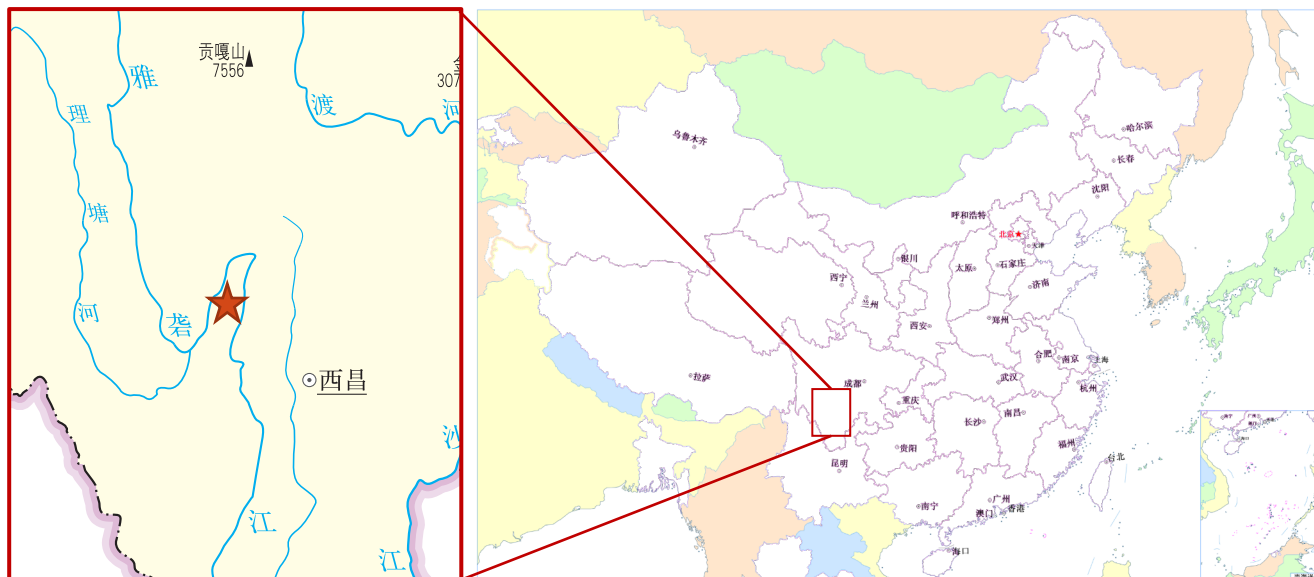
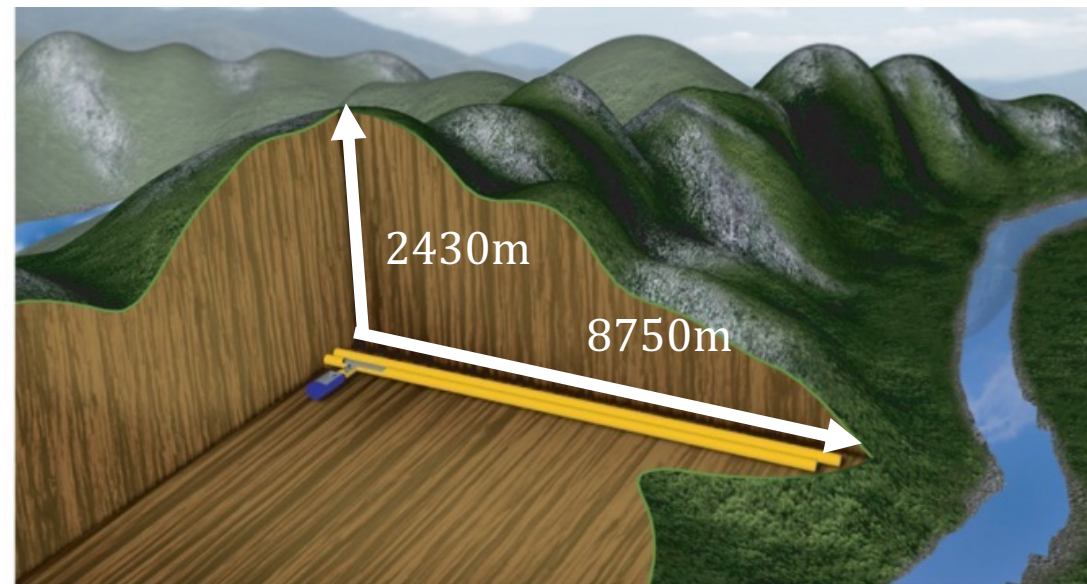


EXO/nEXO

液体氩TPC

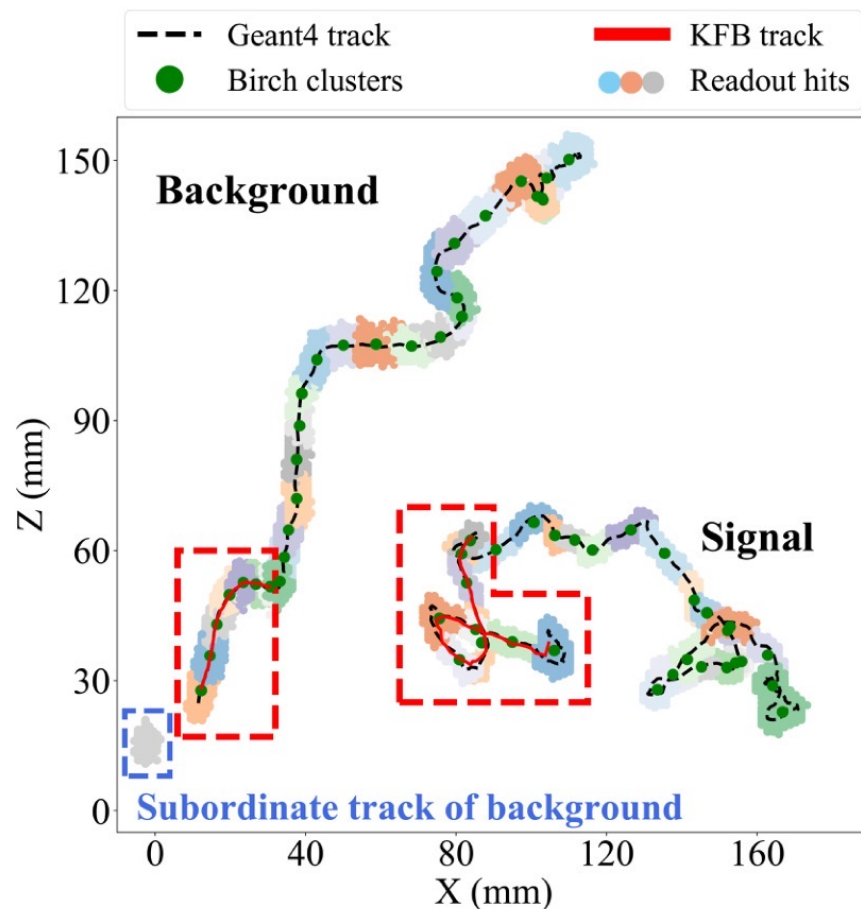
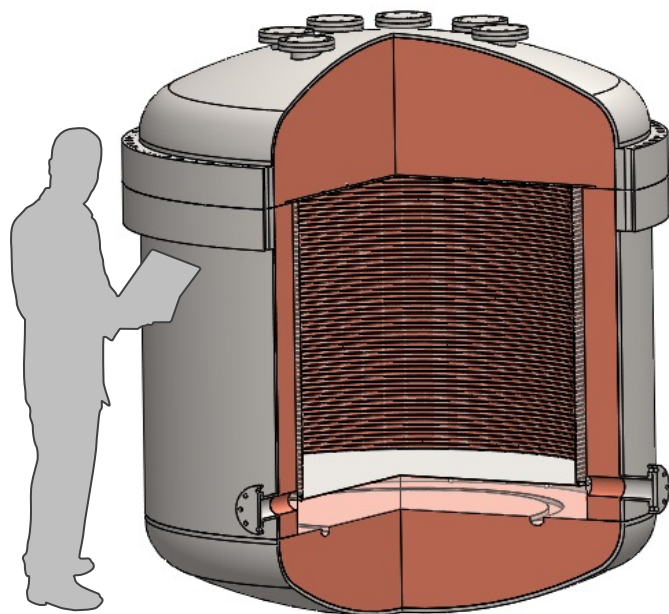
锦屏地下实验室 CJPL

- 2400米岩石埋深，等效水屏蔽约6800米
 - $< 0.2 \text{ muons/m}^2/\text{day}$
- 水平隧道开车进出
- 国家重大科技基础设施 —— “极深地下极低辐射本底前沿物理实验设施”



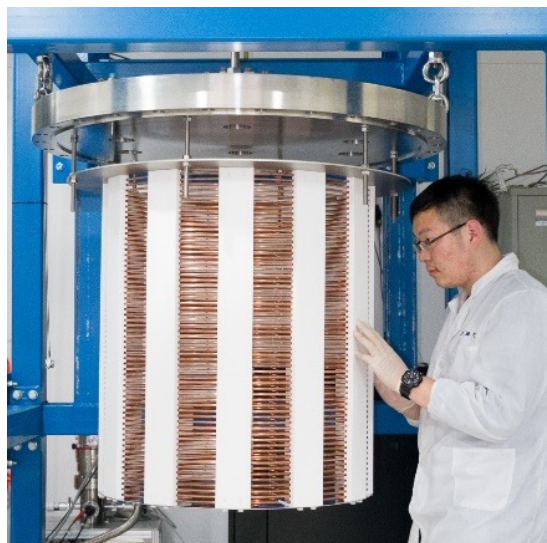
PandaX-III: 高压气体氙TPC 研发

- 高压(10bar)气体TPC 包含140公斤富集 ^{136}Xe
- 微结构气体探测器Micromegas作为读出平面：毫米量级的径迹重建能力
- 突出特点: 通过气体TPC独有的径迹识别来有效地去除本底
- 三年数据的预期灵敏度: 9×10^{25} yr (90% CL)

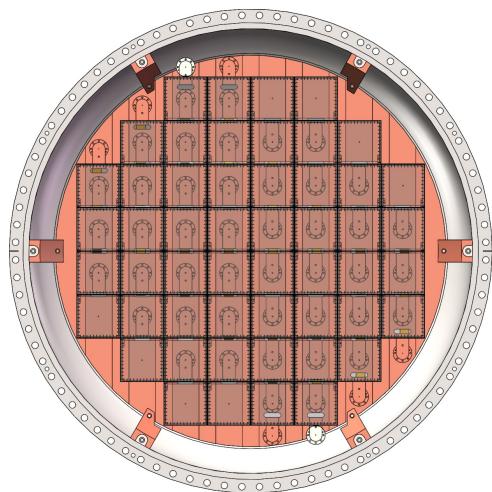


PandaX-III: 高压气体氙TPC 研发

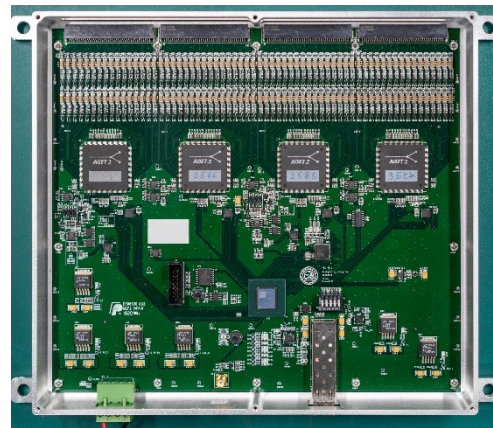
- 600 升**原型探测器**成功运行 (JINST 13, P06012, 2018)
- **主探测器**核心部件完成预研、加工，近期开始组装
 - 2 m² 读出平面，52块Micromegas (科大)
 - 6656 通道高密度、低本底电子学读出 (科大)
 - 4 m³ 容积低本底不锈钢罐体



原型探测器



Micromegas 以及
读出平面设计

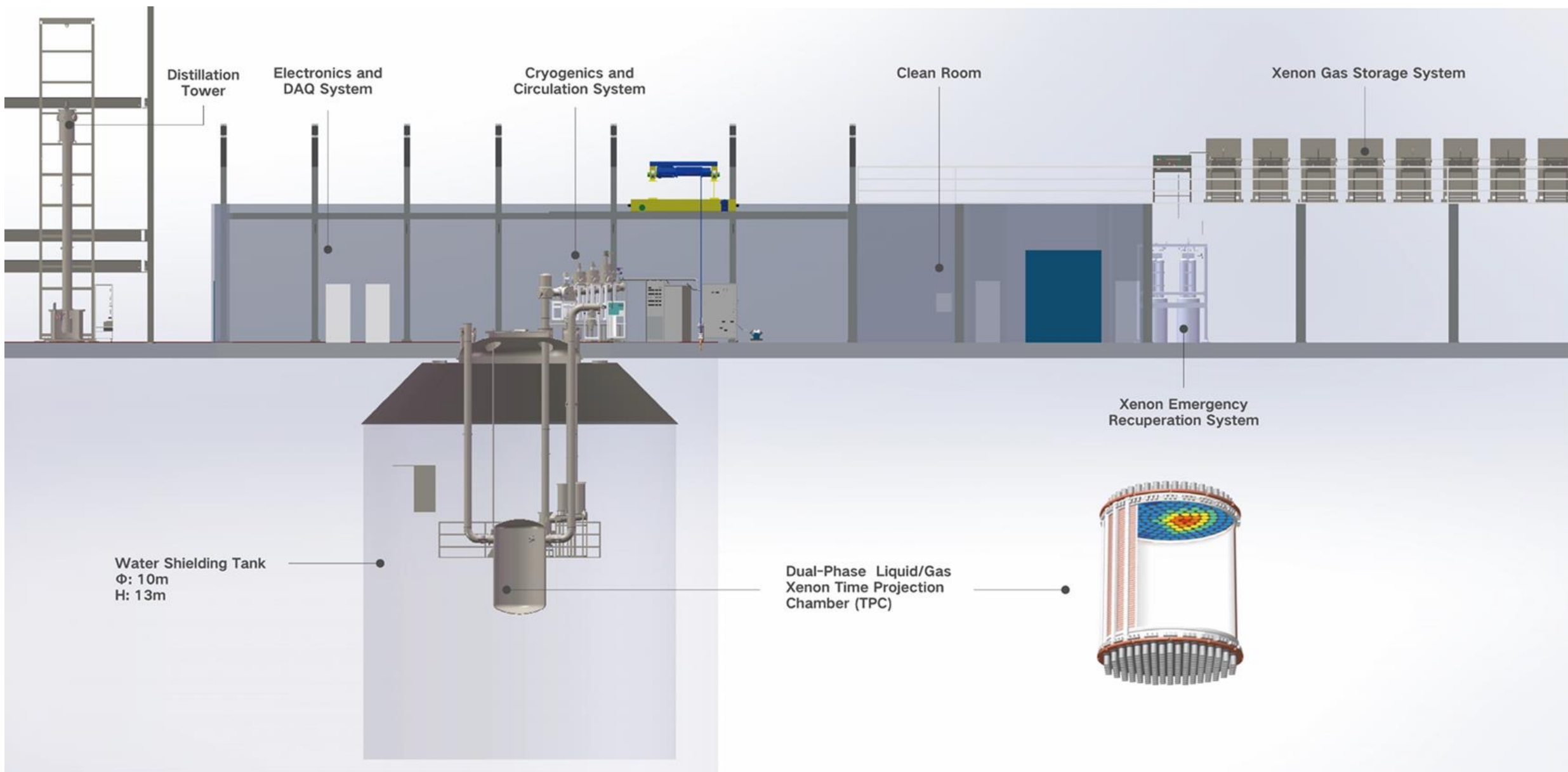


低本底电子学



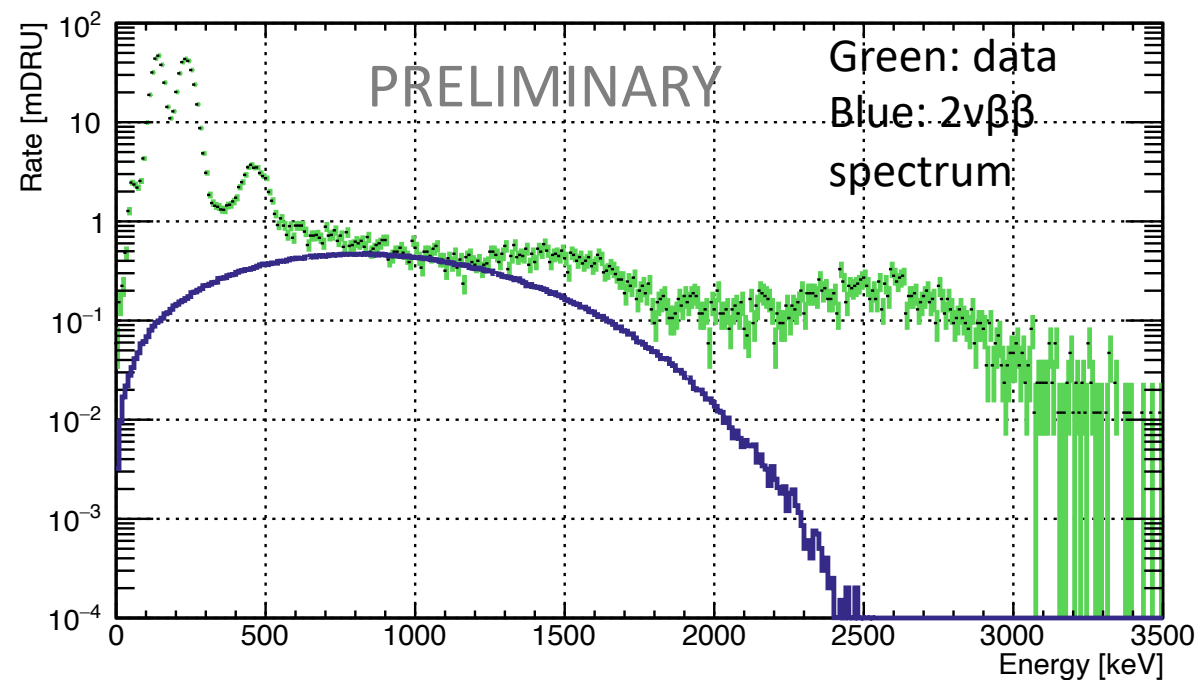
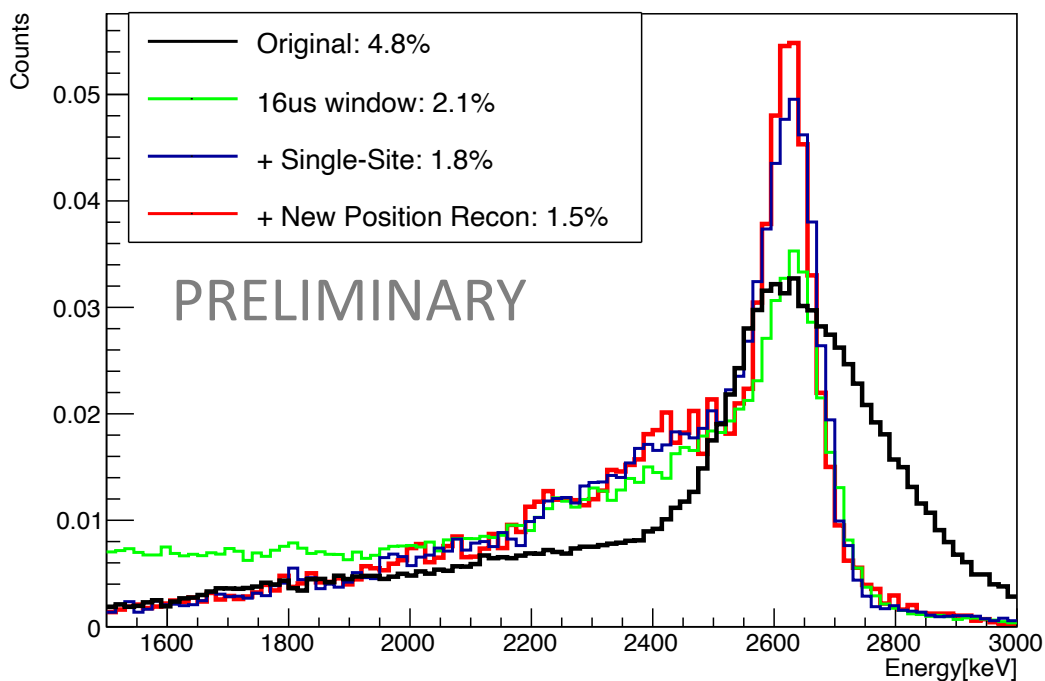
探测器压力容器及工装结构

PandaX-4T投入运行；发表约100天试运行数据

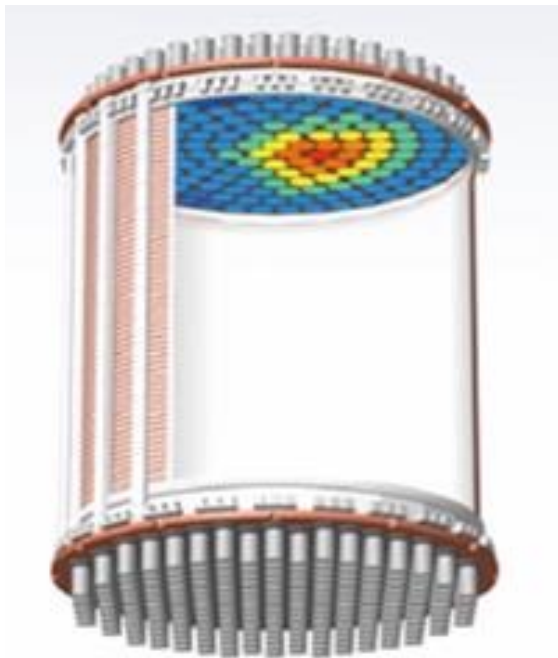


PandaX-4T 试运行数据高能初步结果

- 能量分辨率较PandaX-II 大大提高，2.6 MeV 区间标定能谱分辨率达到 1.5% (σ/E)
- 初步分析表明高能能谱中， $2\nu\beta\beta$ 开始占据主导地位
- 近期开展 ^{136}Xe , ^{134}Xe $2\nu\beta\beta$ 能谱拟合工作，测量 $2\nu\beta\beta$ 半衰期（上限）、以及 ^{124}Xe 双电子俘获相关物理分析
- 半衰期灵敏度达到 EXO-200水平 (10^{25} yr)

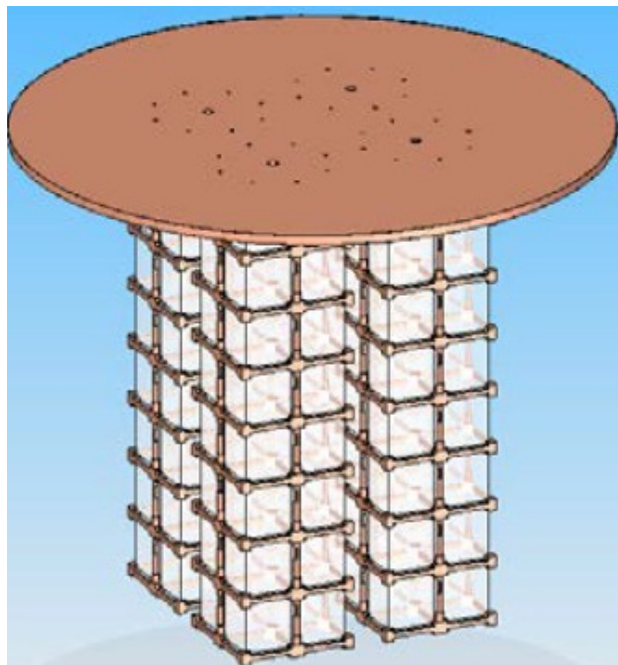


预期锦屏实验



PandaX

氙TPC



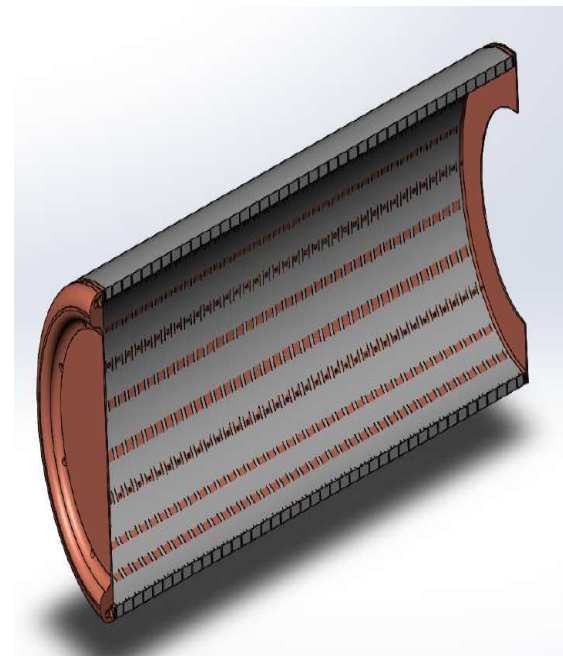
CUPID-China

低温晶体量热器



CDEX

高纯锗



NuDEX

高压气体离子TPC

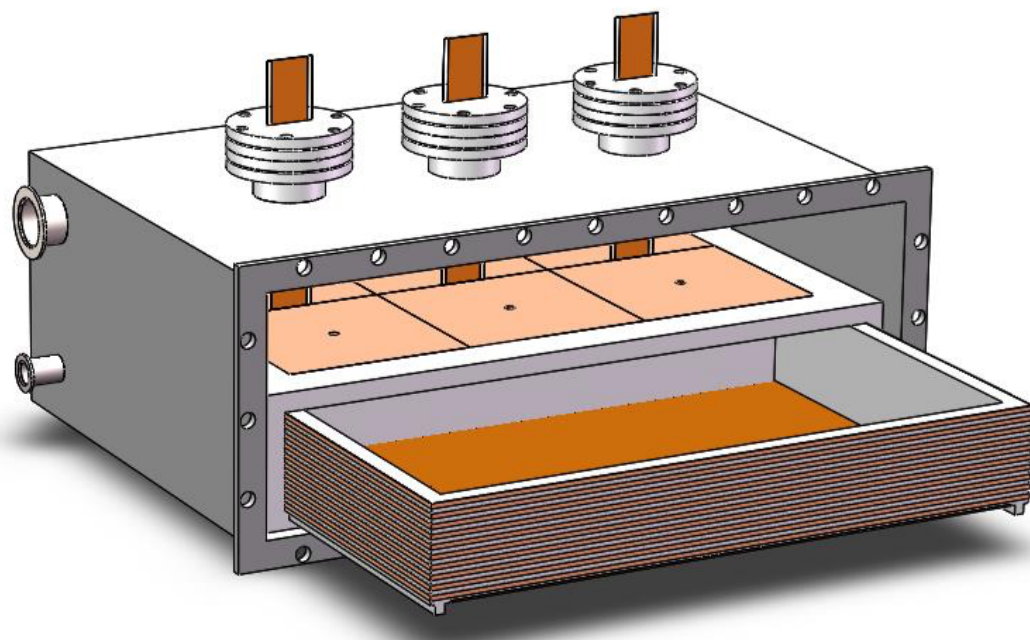
无中微子双贝塔衰变探测器技术的外溢

• 低本底技术：

- DBD探测器本身是最灵敏的本底测量仪器
- 平衡实用性和性价比

• 探测器技术：

- 高能量分辨率、低阈值
- 高探测效率
- 径迹特性
- (低本底)

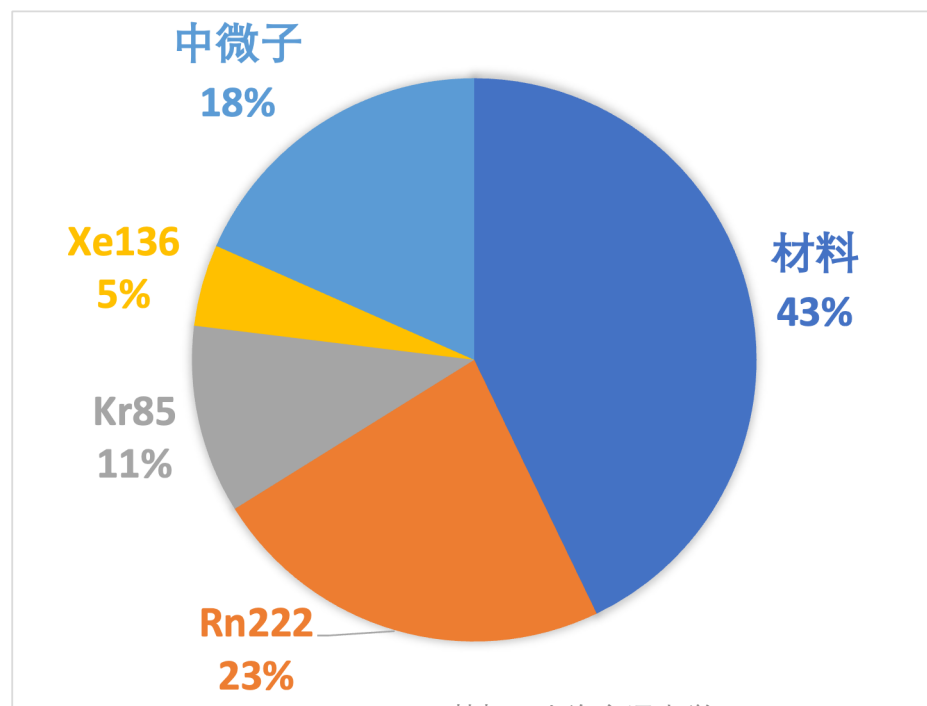


材料表面放射性问题

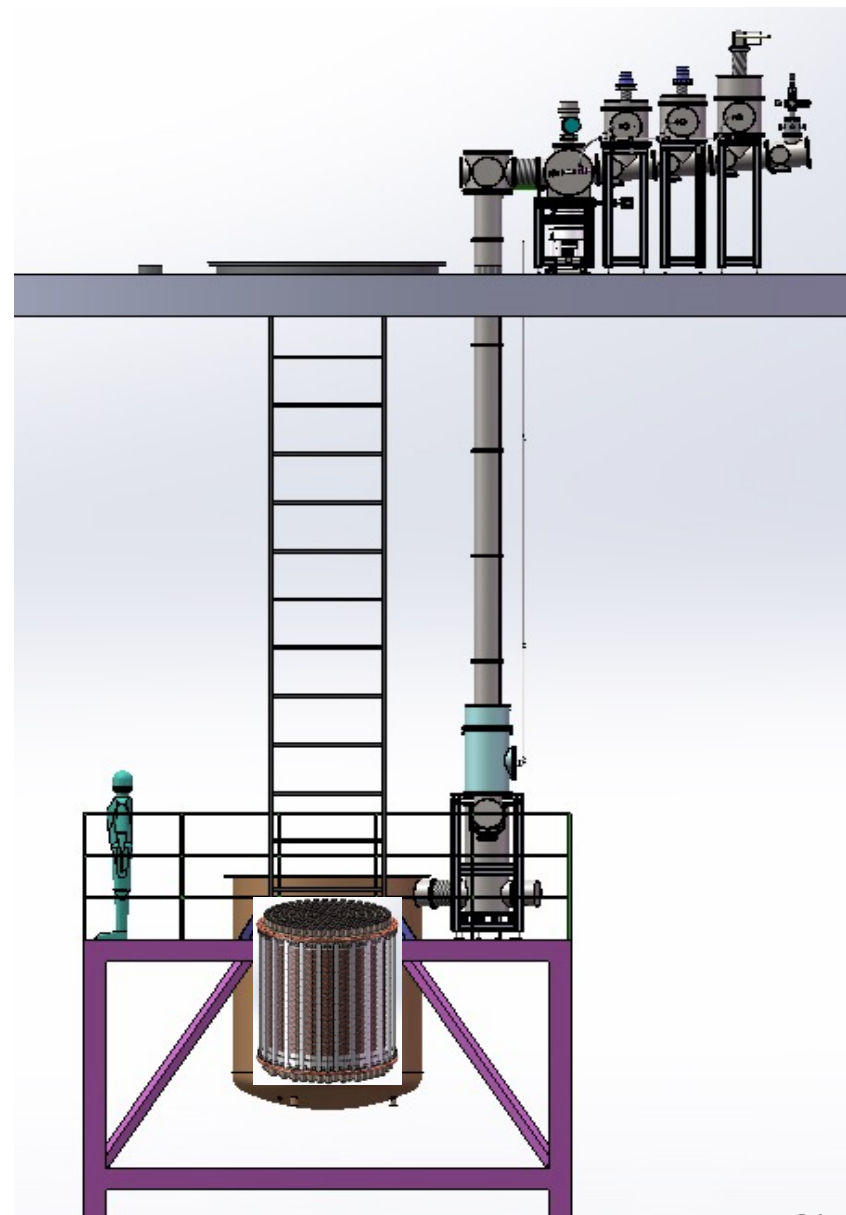
- 放射性洁净度要求 = 块材洁净 + **表面洁净**
 - 零件机械加工、组装调试、氦气及其子核 → 表面二次污染
- **表面污染引入本底**

PandaX-4T中，氦气贡献电子反冲本底约23%

氦气主要来源于探测器和相关管路材料表面的释气。



韩柯, 上海交通大学



商业解决方案



XIA Ultra-lo 1800 :

主要针对半导体硅片测量； 1800 cm^2 ；

$10^{-4} \text{ c/cm}^2/\text{hr}$ ，满足硅片 5α 每天的要求

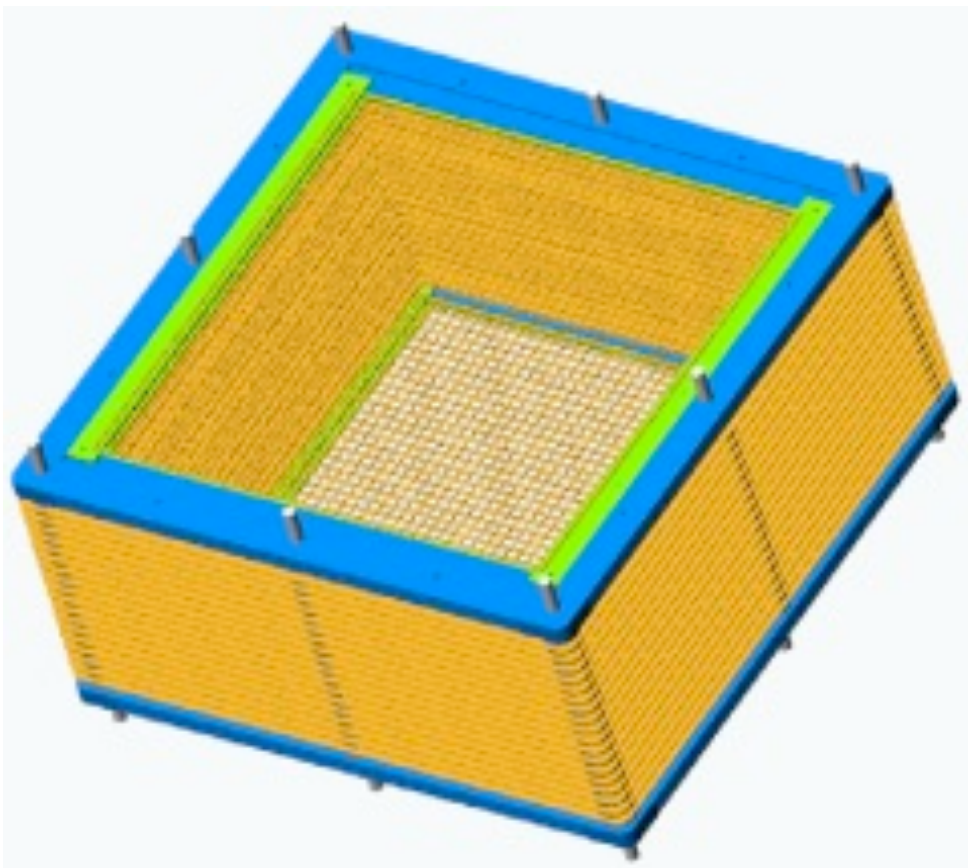


Canberra LB4200 :

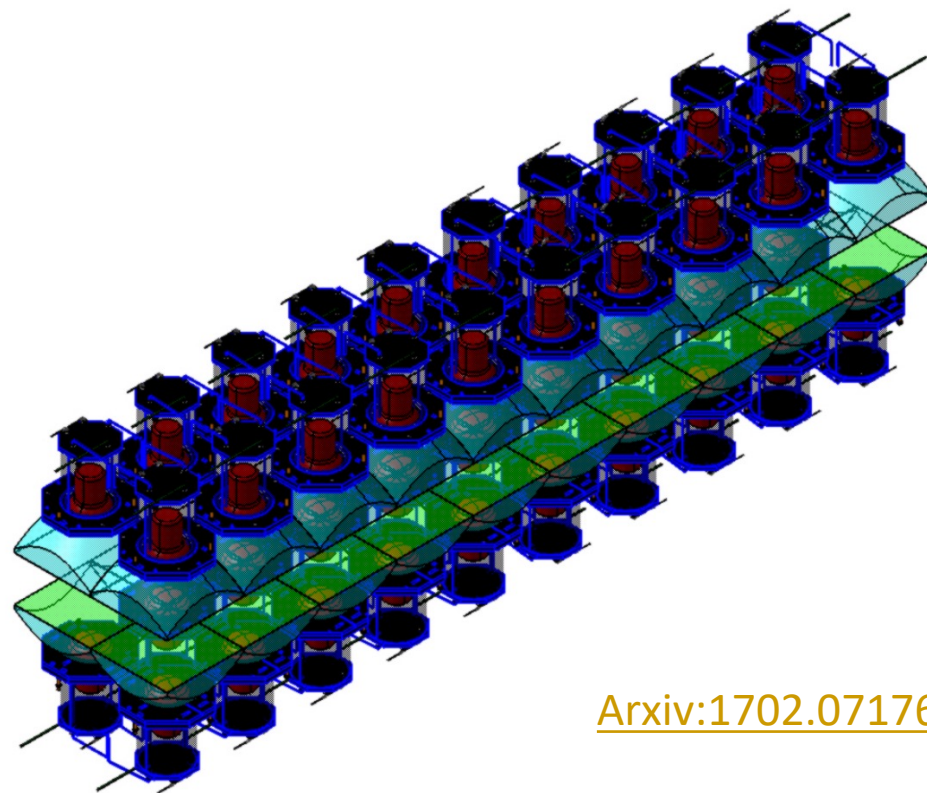
最大5寸硅片

约 $10^{-2} \text{ c/cm}^2/\text{hr}$

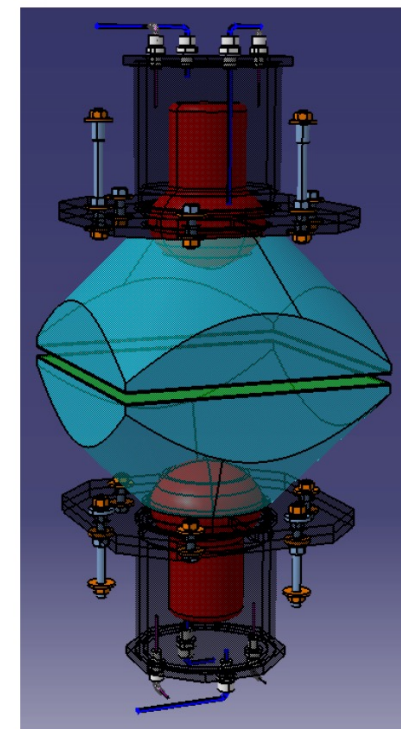
国际研究现状



BetaCage : CDMS实验组提出的低本底MWPC设计, 未能实现



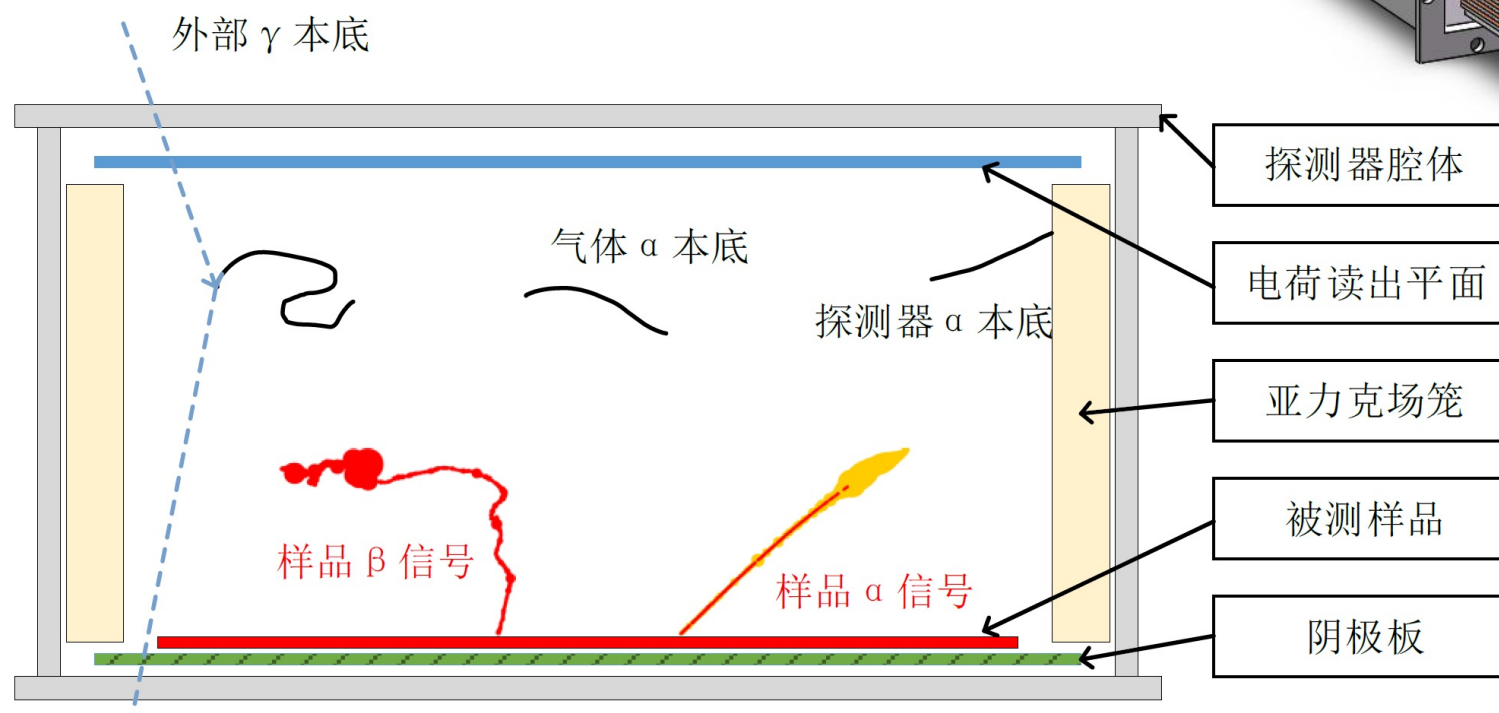
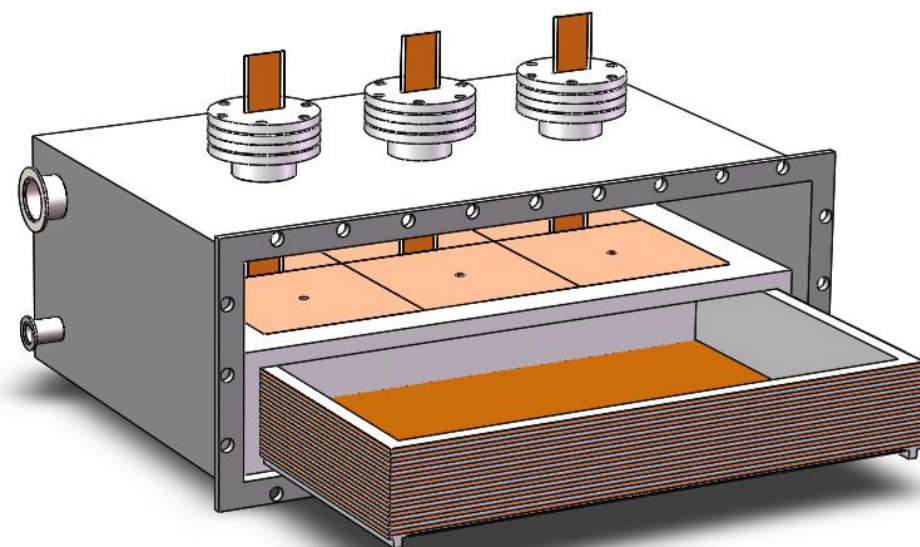
[Arxiv:1702.07176](https://arxiv.org/abs/1702.07176)



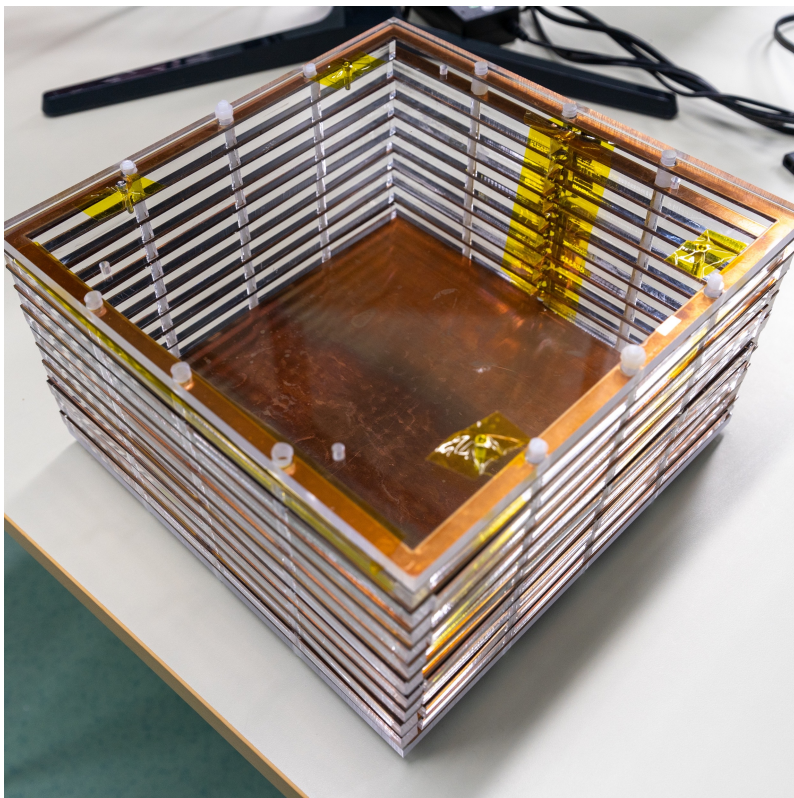
BiPo-3 : SuperNEMO实验组设计建造PMT阵列, 测量Bi-Po耦合

时间投影室技术：能量+径迹

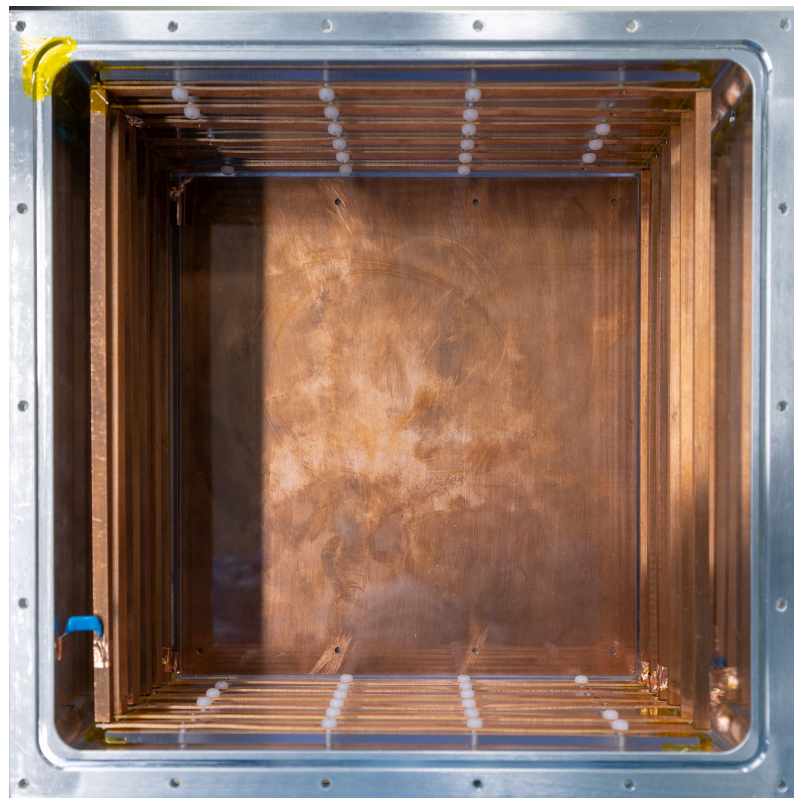
- 利用气体探测器的**能量+径迹特性**测量样品表面污染
 - 粒子鉴别去除本底，径迹定位筛选信号来源
 - 大幅面(2400cm²)、高灵敏度、高效率
 - 目标测量灵敏度为 4×10^{-5} c/cm²/hr α



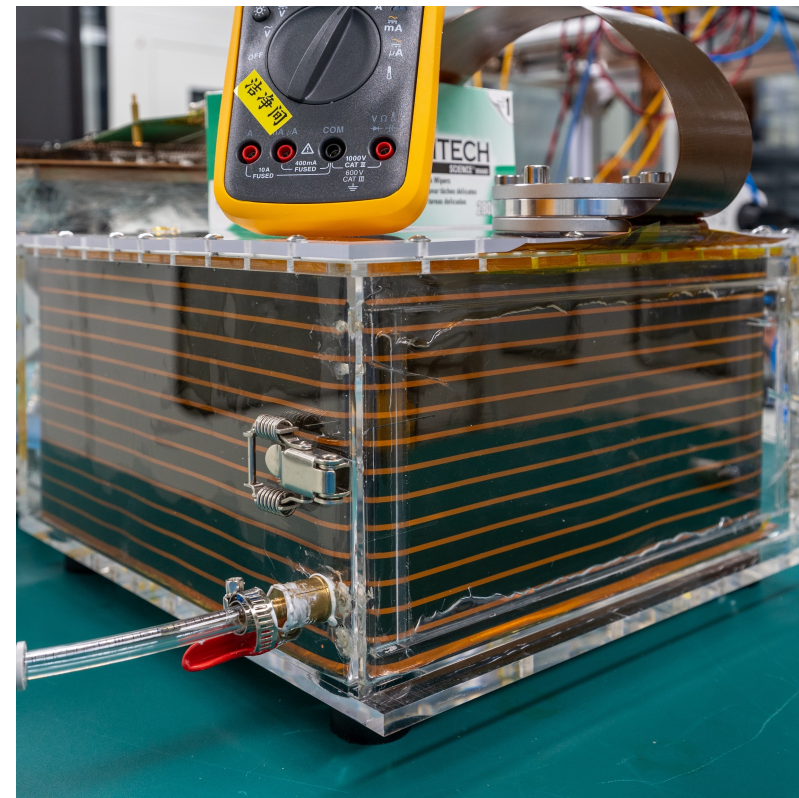
多轮原型探测器迭代 (单块 Micromegas)



亚克力+铜条场笼
@圆桶腔体



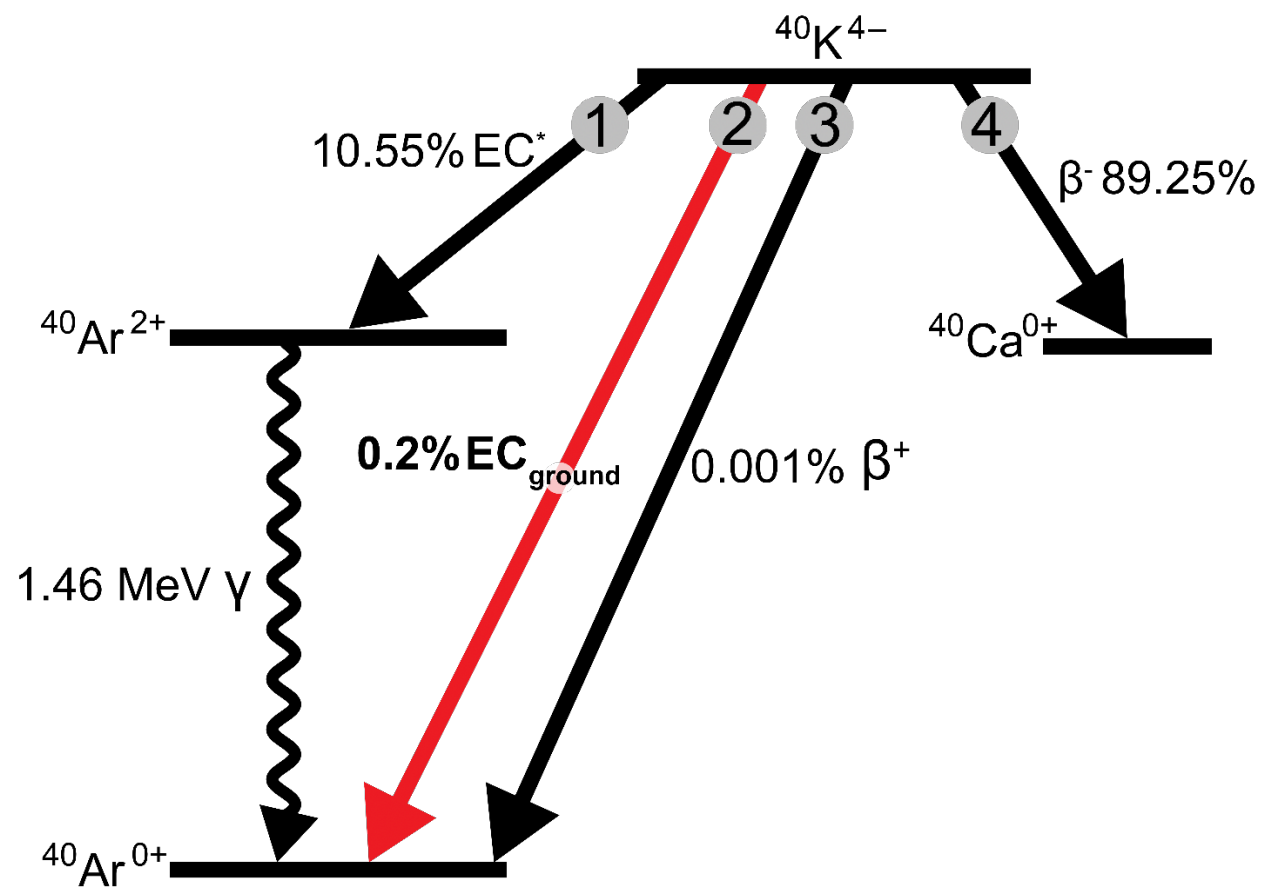
场笼 + 适配铝合金腔体



柔性PCB场笼 + 适配亚克力腔体

无中微子双贝塔衰变探测器技术的外溢

- 低本底技术：
 - DBD探测器本身是最灵敏的本底测量仪器
 - 平衡实用性和性价比
- 探测器技术：
 - 高能量分辨率、低阈值
 - 高探测效率
 - 径迹特性
 - (低本底)



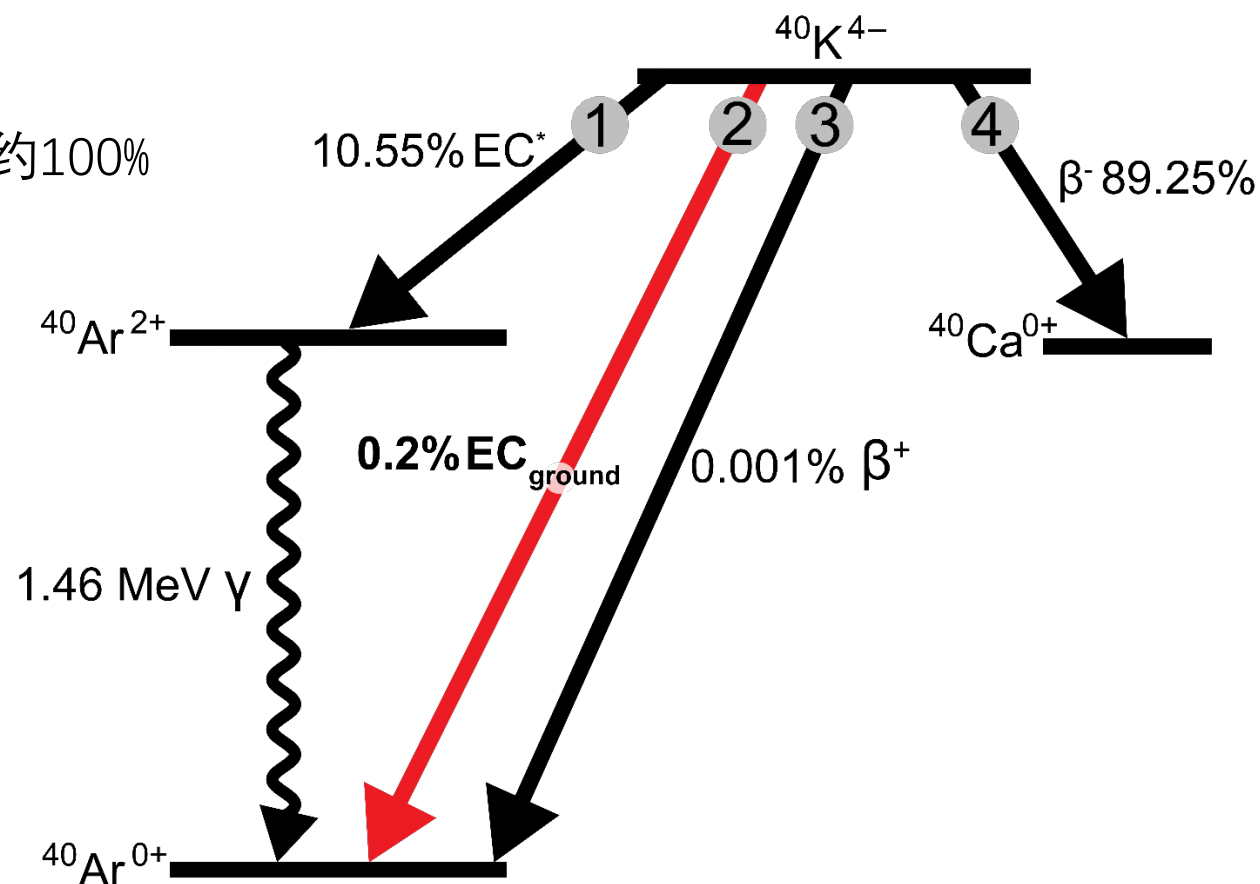
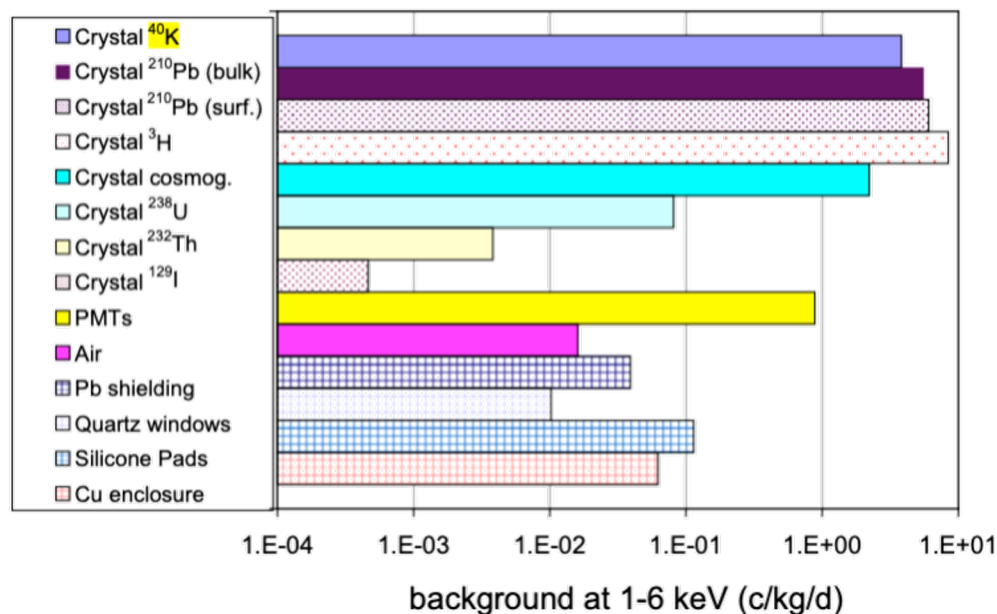
测量稀有核衰变分支比

- ^{40}K 电子俘获到 ^{40}Ar 基态是核物理中非常重要的衰变过程，但尚未实验观测到

- ^{40}K EC 是唯一一个三阶禁闭的EC过程 ($\Delta I = 4, \Delta\pi = \text{yes}$)

- ^{40}K 是 NaI 暗物质探测器中重要本底

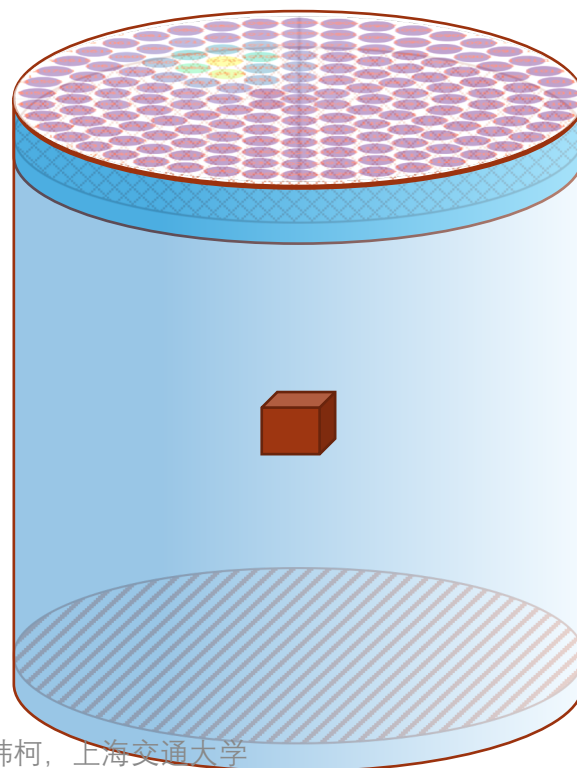
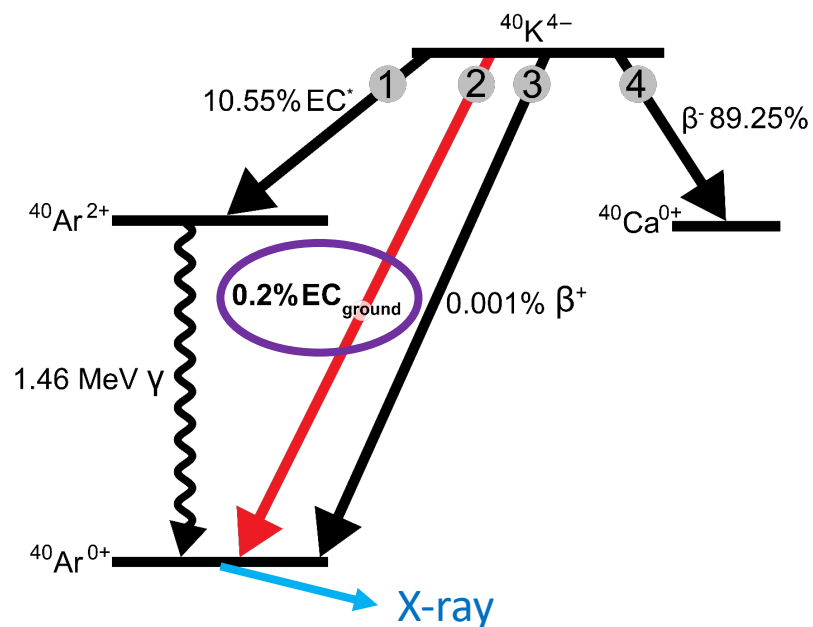
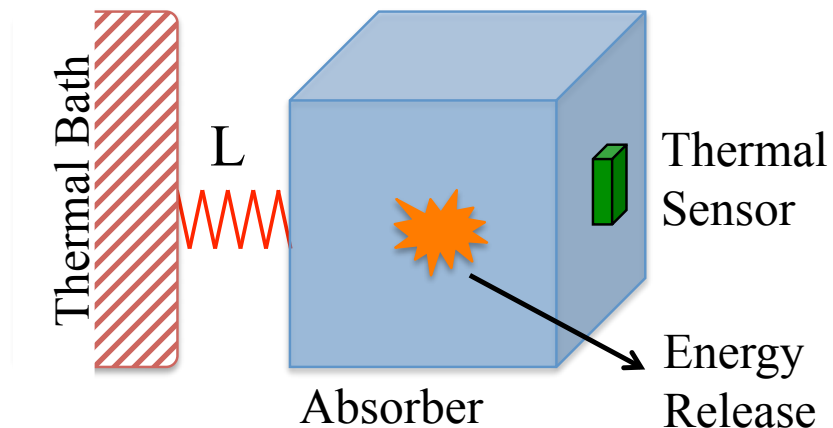
- 由于高阶禁闭效应，其理论预期分支比0.2%误差约100%



ANAIS Eur. Phys. J. C (2016) 76:429

测量稀有核衰变分支比

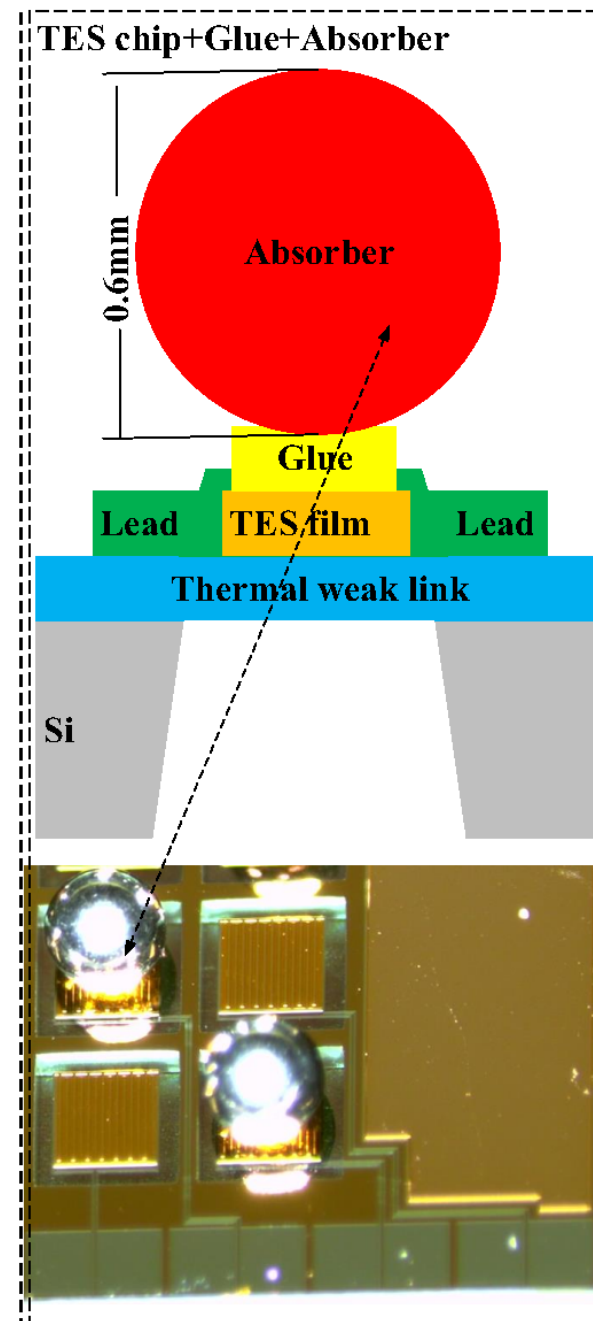
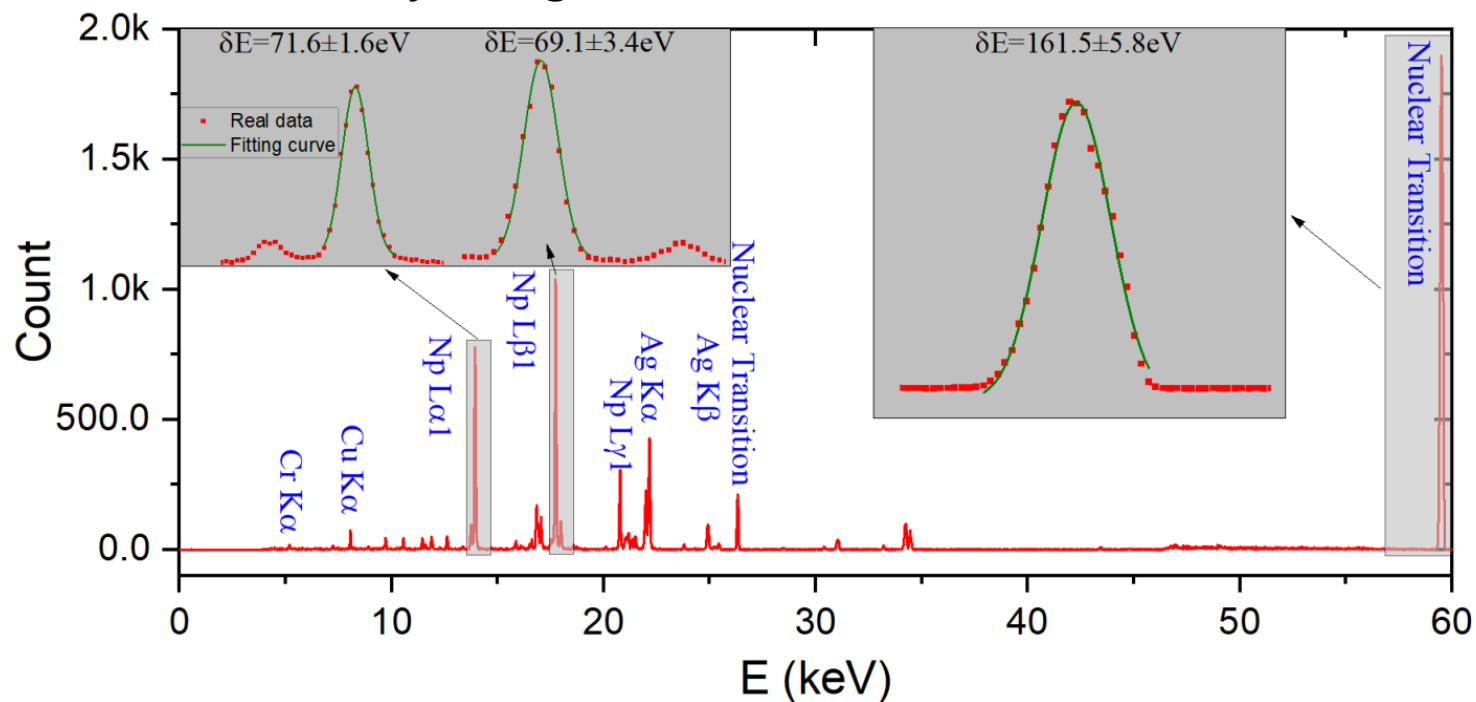
- 异步测量 ^{40}K 衰变的伽马与X-ray/Auger
- 低温量热器 (CUORE) 测量 X-ray/Auger
- 液氙探测器 (PandaX) 测量伽马
- 对比得出EC到基态分支比精确测量



1461 keV γ events:
0.2% deposit energy
in KCL; <0.1% escape
LXe

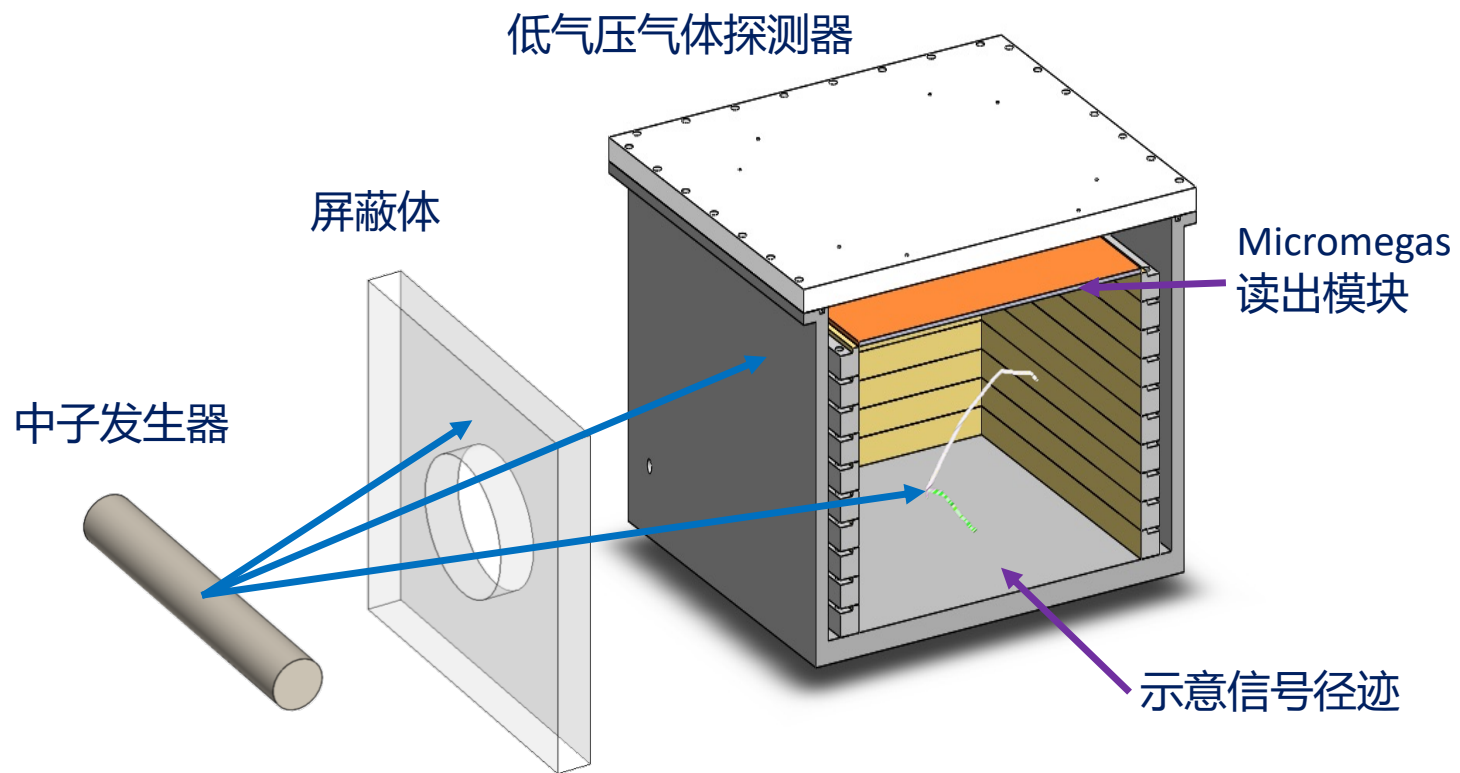
基于TES的X-ray 量热器 (上科大, 张硕)

- 低阈值, 高能量分辨率
- 测量 3.2 keV X-ray/Auger 的理想探测器:
 - 全吸收 (99.8%, 1g KCl 晶体)
 - 不区分X-ray/Auger



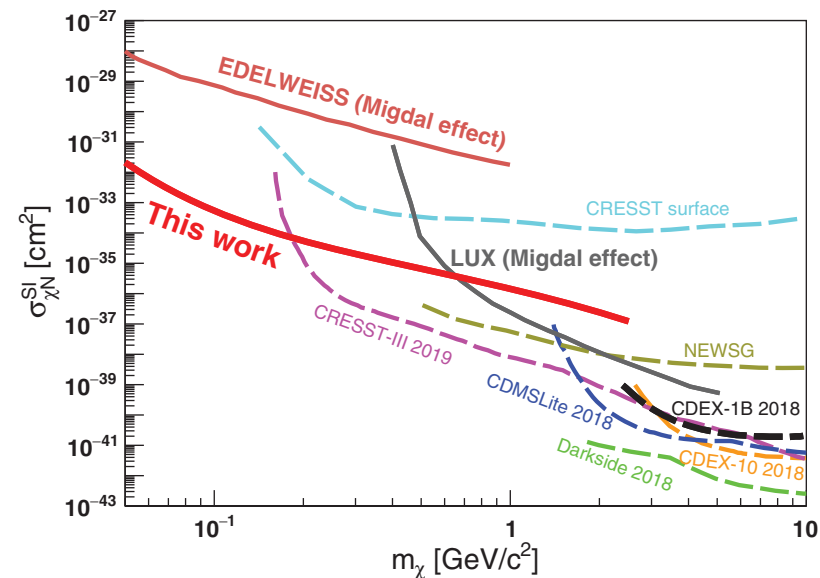
无中微子双贝塔衰变探测器技术的外溢

- 低本底技术：
 - DBD探测器本身是最灵敏的本底测量仪器
 - 平衡实用性和性价比
- 探测器技术：
 - 高能量分辨率、**低阈值**
 - 高探测效率
 - **径迹特性**
 - (低本底)

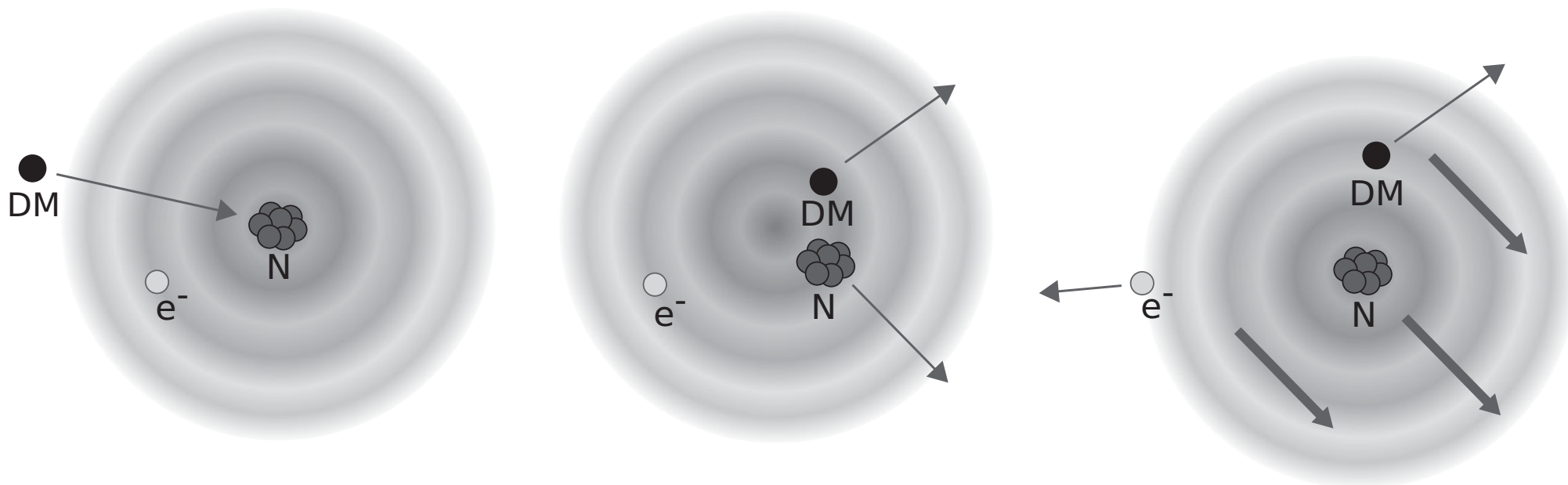


Migdal效应

- Migdal效应：电子分担核的能量，且运动方向不同，被甩出来的过程
 - 已在核衰变过程中观测到
- 暗物质粒子碰撞核，引起核反冲，有可能带来Migdal效应
- 应用Migdal效应，提高传统暗物质探测器在低能区的灵敏度

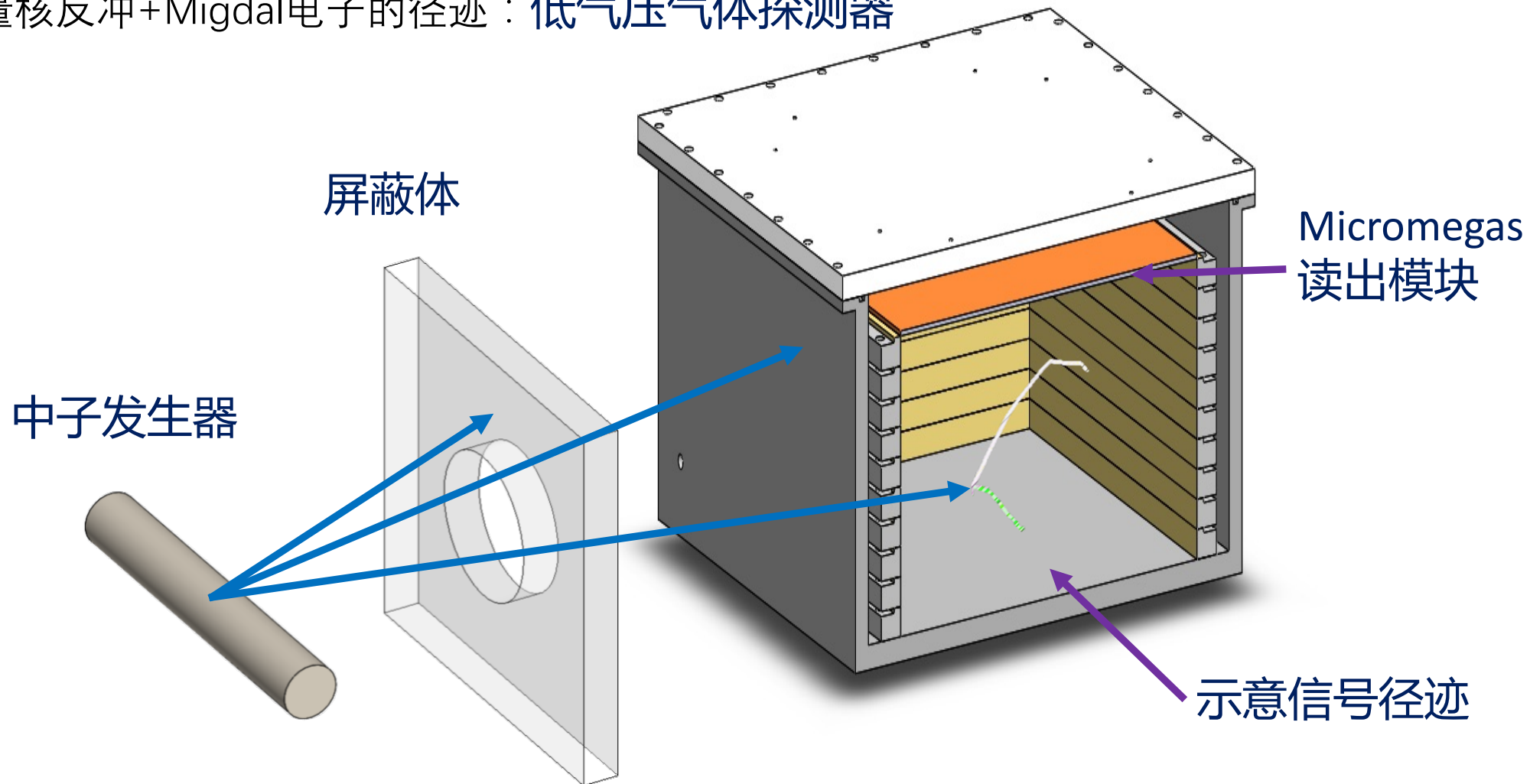


CDEX PRL 123 161301 (2019)

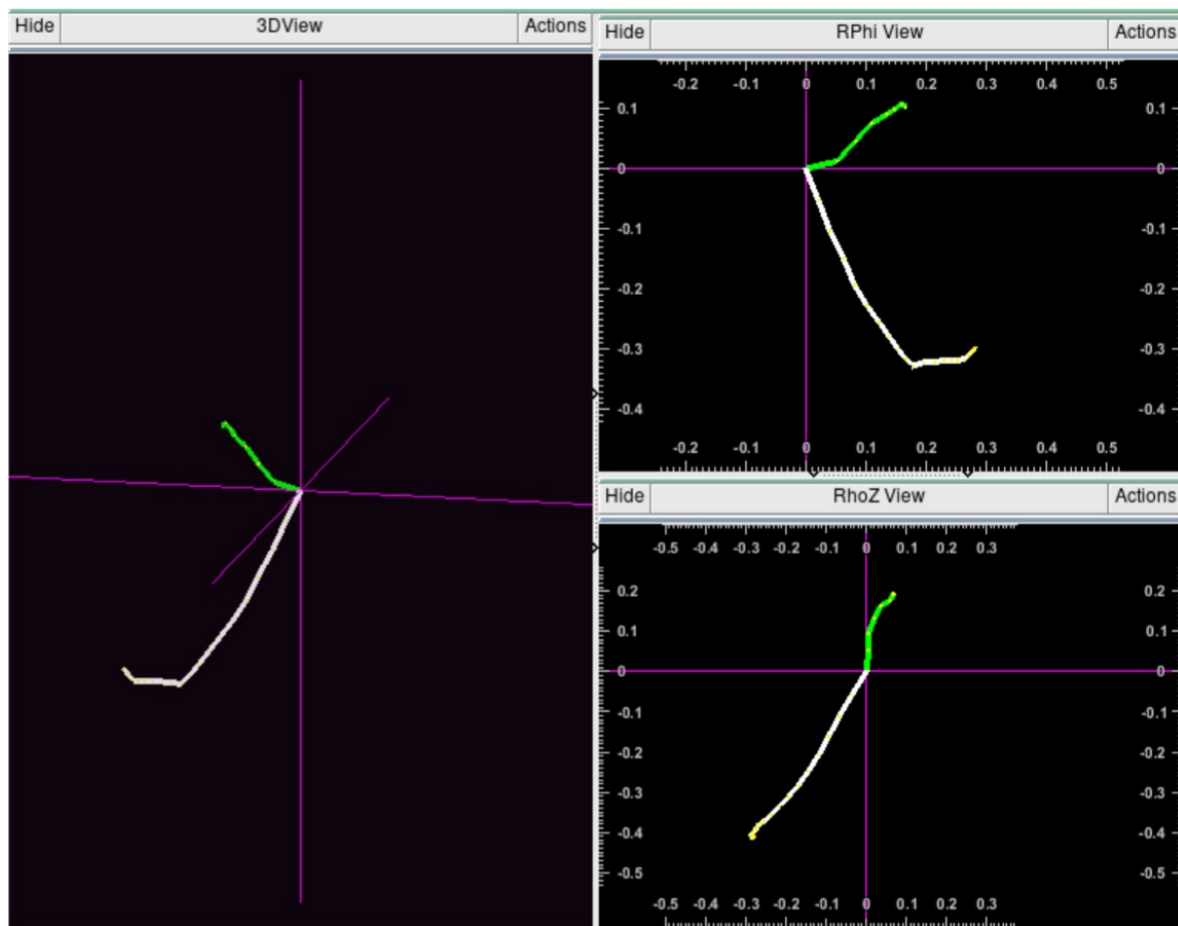


测量核反冲Migdal效应

- Migdal效应后的 X-ray/Auger 电子
- 直接测量核反冲+Migdal电子的径迹：**低气压气体探测器**

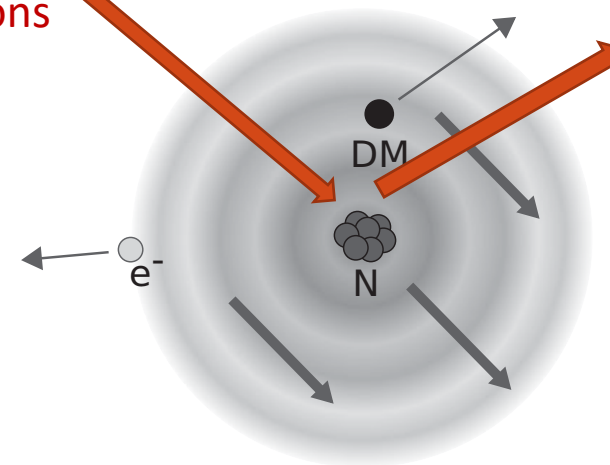


信号与本底



模拟数据：0.1 Bar CF_4 ; 470 keV NR; 5 keV Migdal 电子
中子源离探测器15 cm

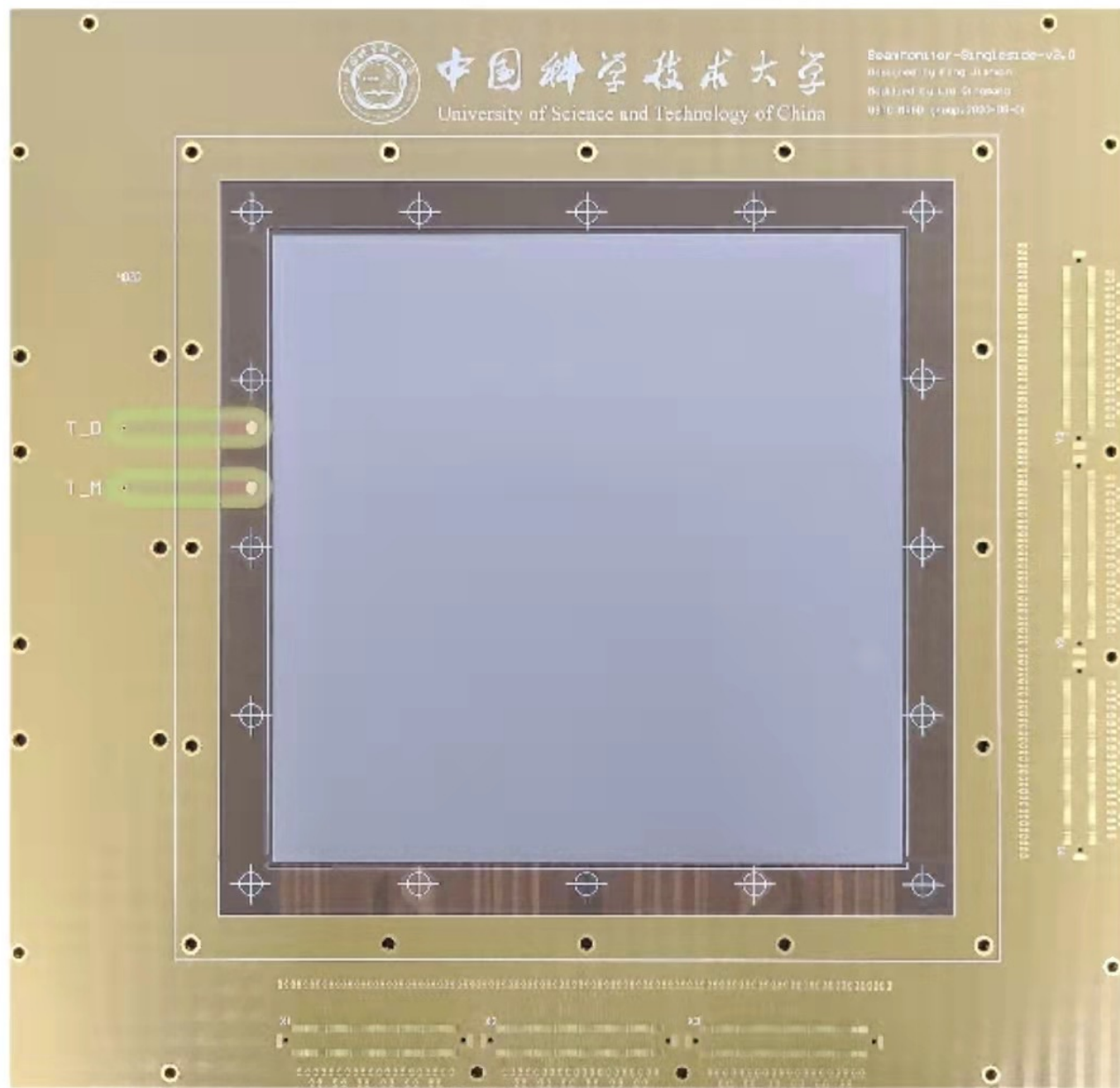
Neutrons



- 分叉的径迹；能量沉积密度完全不同
- 信号数量预估（10 mHz）：
 - 10^{-5} 概率发生可记录的Migdal效应
 - 强流DT 中子发生器 10^8 流强， 10^3 发生核反冲
- 本底：
 - 普通核反冲
 - (n, γ) 反应带来的 γ ，部分能量沉积到TPC

Enabling technology

- 亚毫米级别径迹记录能力：**高颗粒度热压接Micromegas**
 - 0.4 mm 条宽
 - 上下两层条读出
 - 15 cm × 15 cm 有效读出面积
- **信号径迹精细模拟与 TPC 硬件设计同步进行中**



张志永

总结

- 无中微子双贝塔衰变实验非常具有挑战性，但是由于其重要物理意义，仍是国际地下实验室的热点，目标为覆盖整个IH相空间
- 锦屏地下实验室自然条件优越，多个实验组布局研发
- PandaX利用高压气体和液体氙TPC开展DBD相关研究
- DBD 项目推动的低本底技术与专有探测器技术潜力巨大，交叉、应用尚在初步探索中

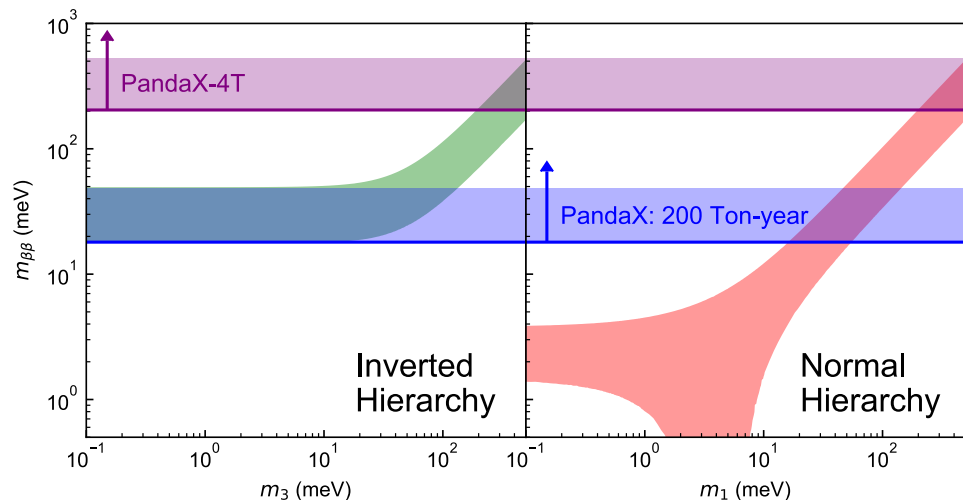
核矩阵元 (NME) 的巨大影响

- NME对于实验灵敏度有巨大影响
- 不同模型给出的NME差别巨大

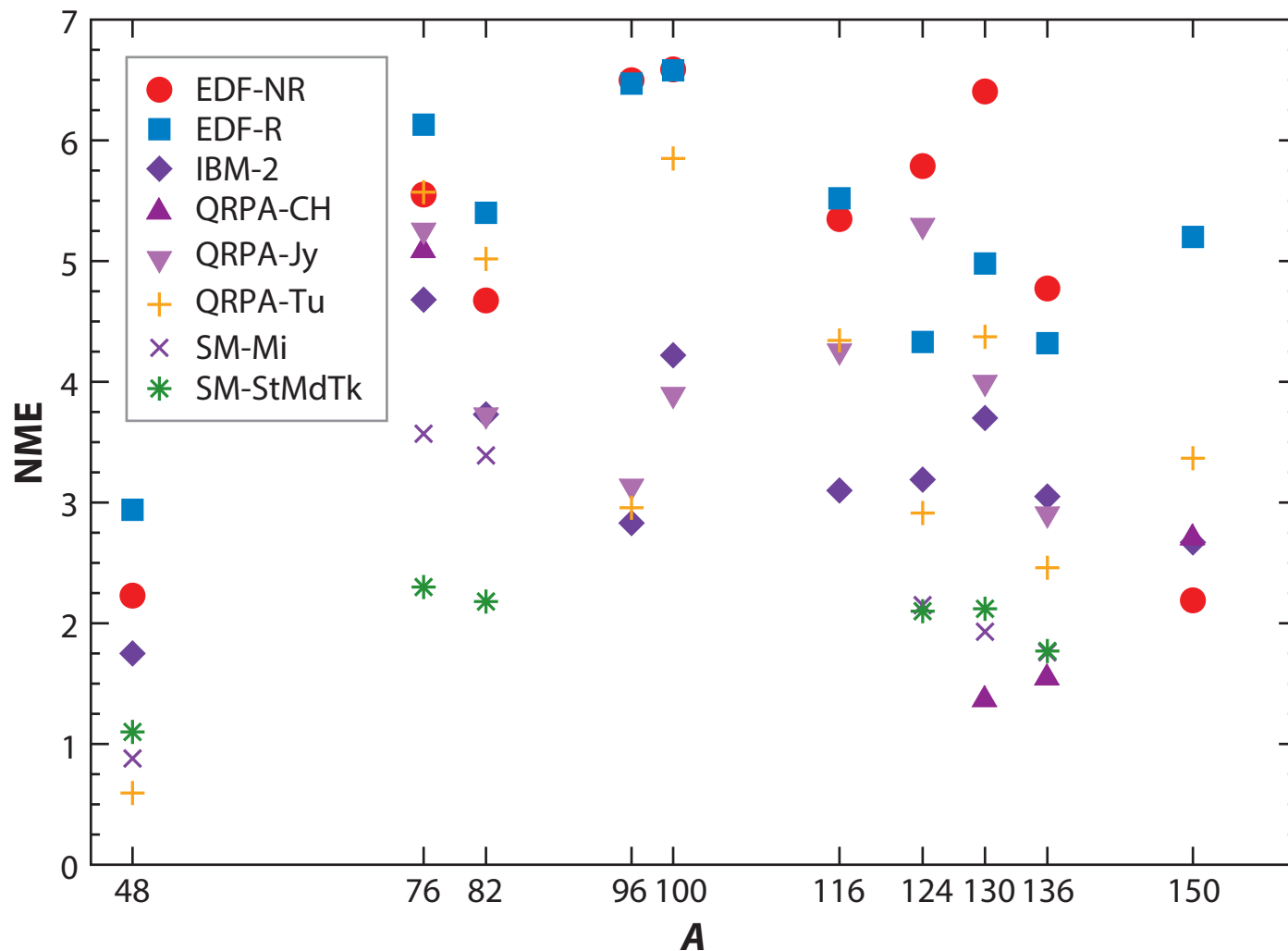
$$(T_{1/2}^{0\nu})^{-1} = G^{0\nu}(Q, Z) |M^{0\nu}|^2 \frac{|\langle m_{\beta\beta} \rangle|^2}{m_e^2}$$

Phase space factor

NME



Annu. Rev. Nucl. Part. Sci. 2019. 69:219–51

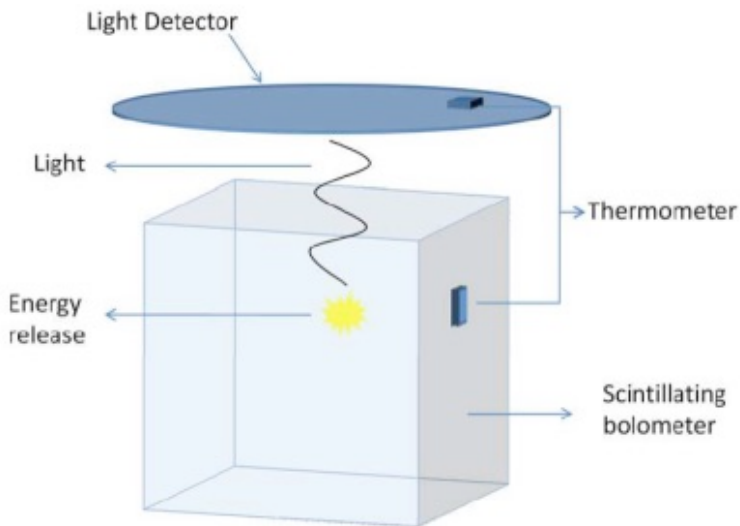


CUORE → CUPID

- 低温量热器技术，高能量分辨率
- 模块化设计，988 通道 TeO_2 阵列
- 正在取数

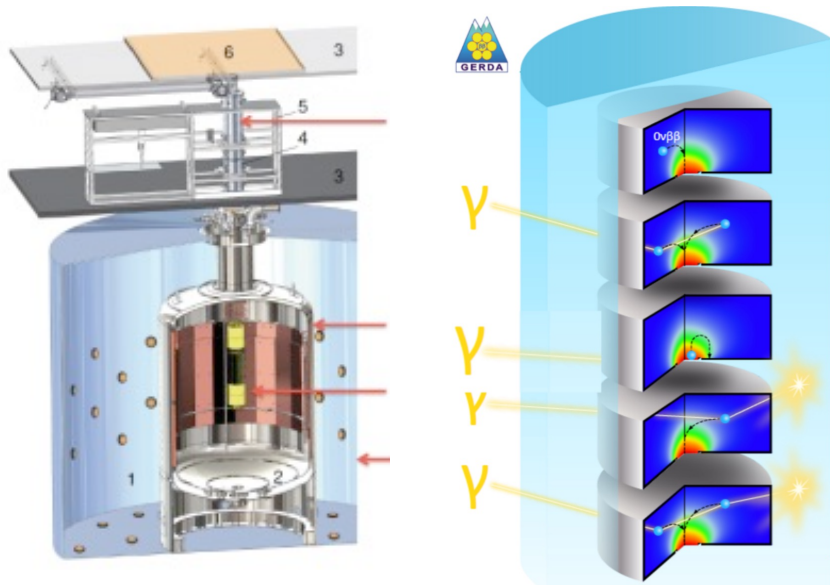
升级计划：CUPID (CUORE with particle ID)

- 光热双读出
- LiMoO_4 闪烁晶体阵列



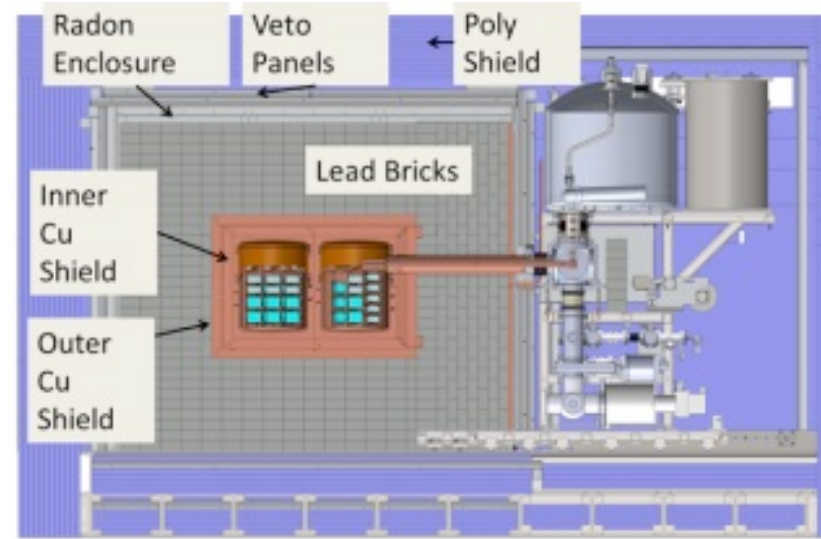
世界最大稀释制冷机
<10mK

GERDA, Majorana Demonstrator → LEGEND



GERDA at LNGS, Italy

本底水平: 5.7×10^{-4} c/kev/kg/yr (Science)



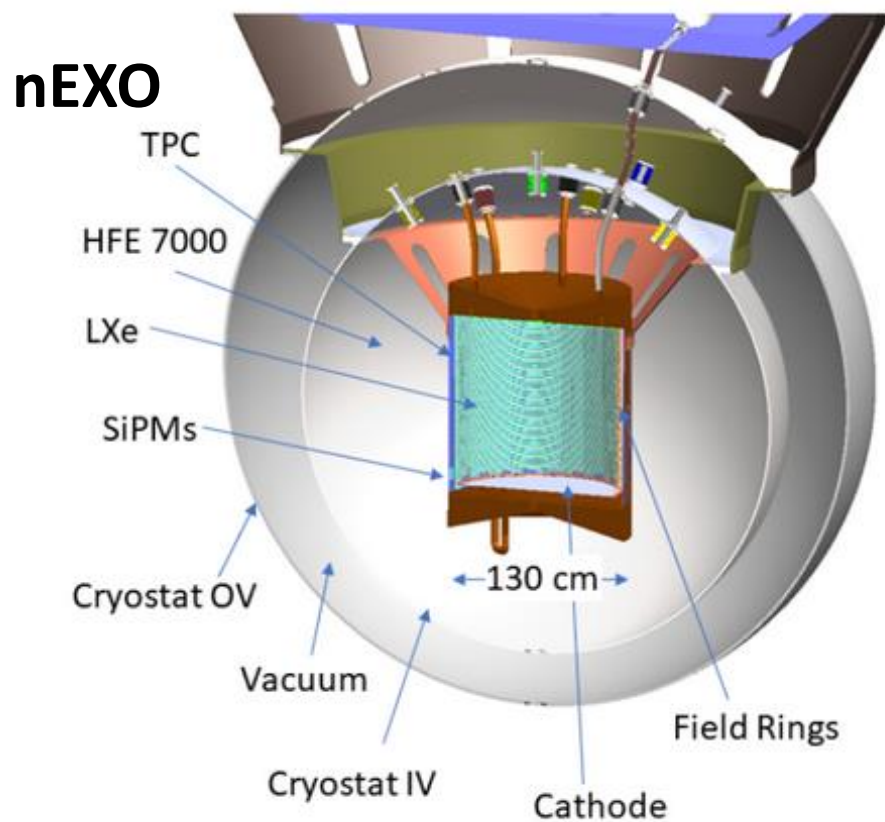
Majorana Demonstrator at Sanford, US

Bkg: $\sim 5 \times 10^{-3}$ c/kev/kg/yr (ArXiv:1902.02299)

- **合并为LEGEND** (Large Enriched Ge Experiment for $\beta\beta$ Decay)
- **第一阶段: 200 kg @ LNGS (2021--)**

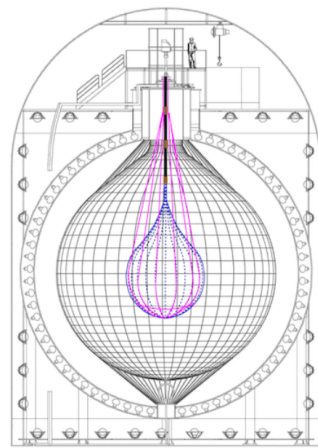
EXO-200 → nEXO

- nEXO 单相型TPC探测器 预期利用5吨富集Xe-136在加拿大 SNOLab 开展实验
- 预期灵敏度 10^{28} 年量级



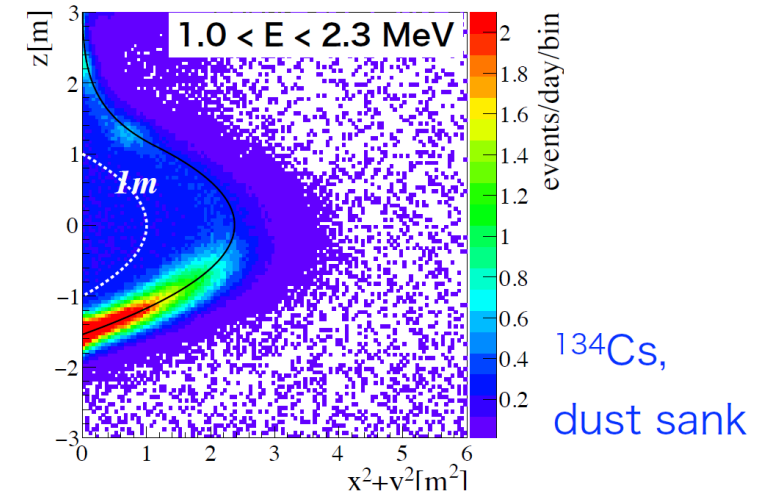
KamLAND-Zen (^{136}Xe)

- 日本主推, Kamioka实验室
- ^{136}Xe 最好的半衰期限制: 1.07×10^{26} yr (90%CL)
- KamLAND-ZEN 800 正在取数, 近期发表结果

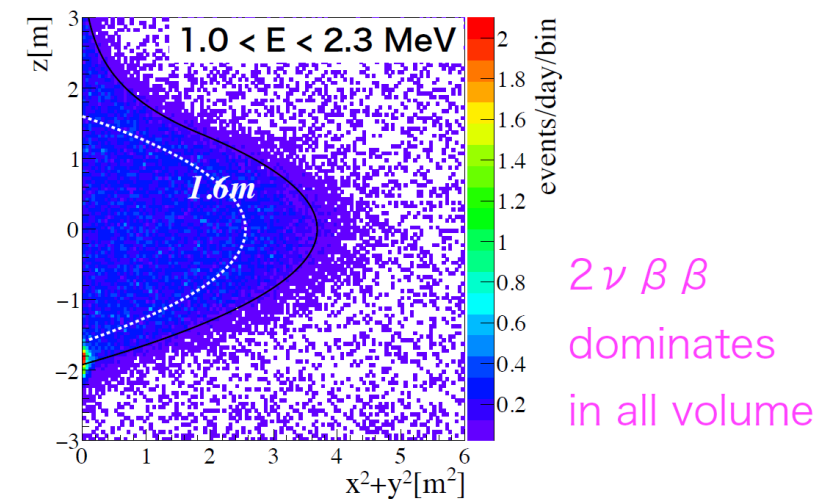


KamLAND-Zen 800

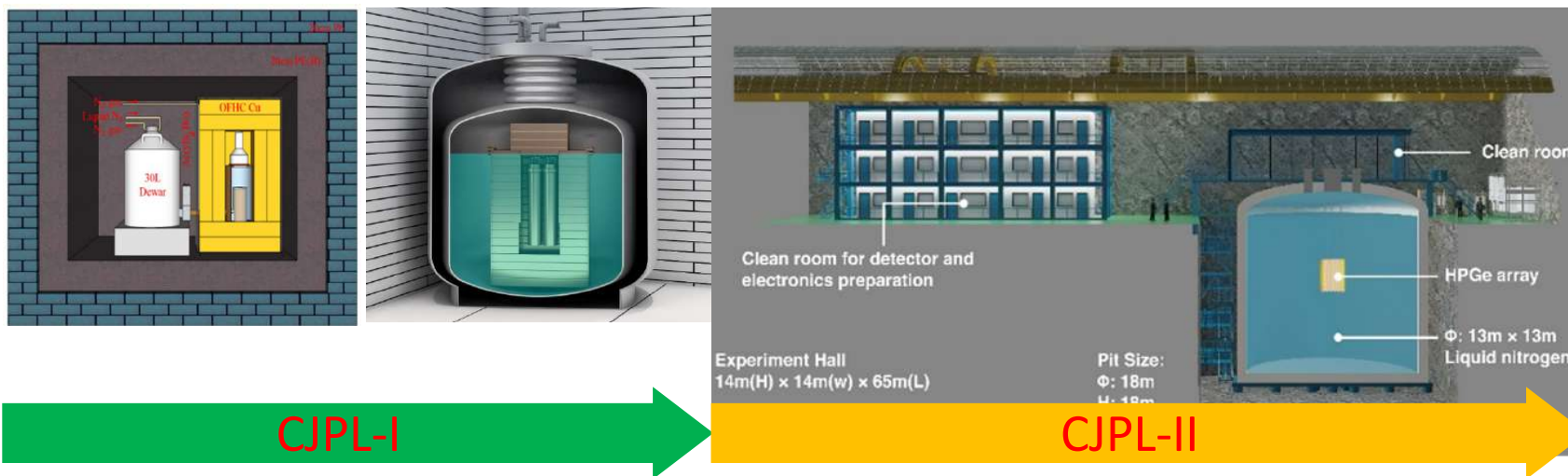
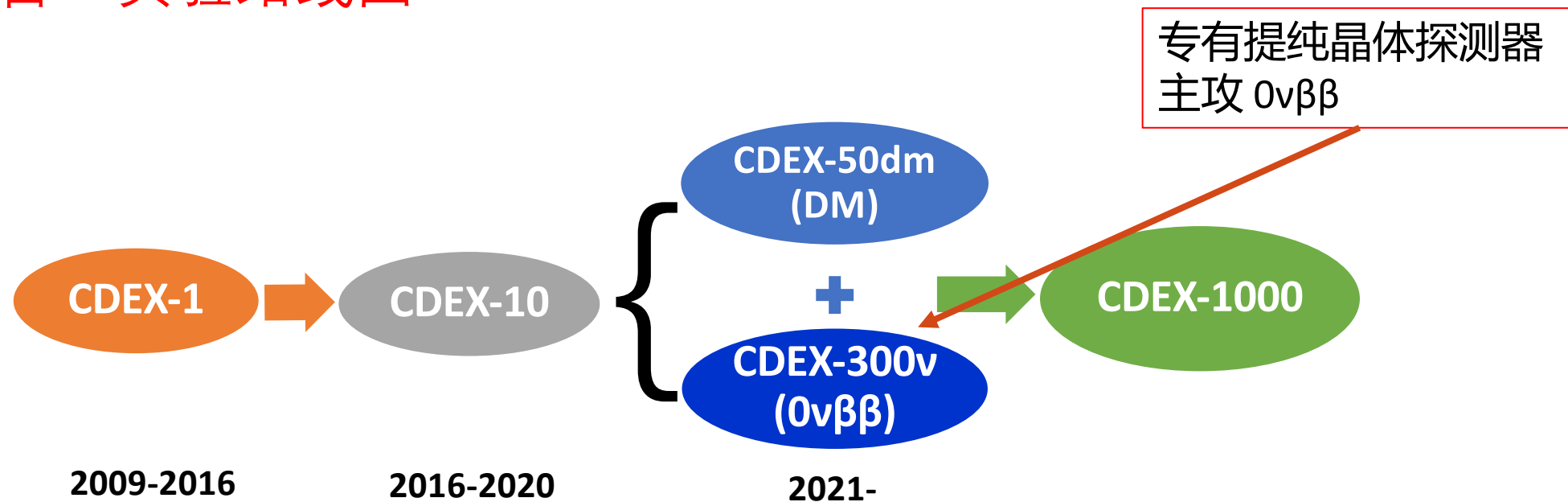
KamLAND-Zen 400 phasell



KamLAND-Zen 800

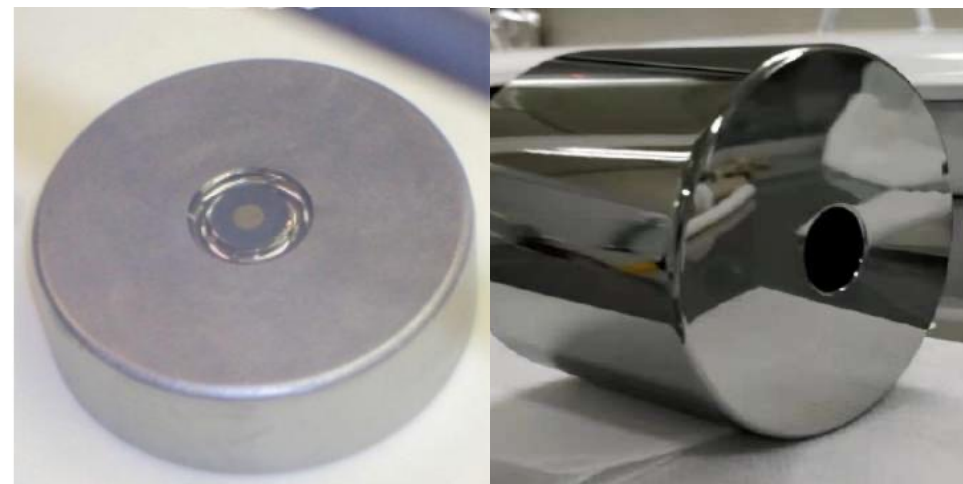
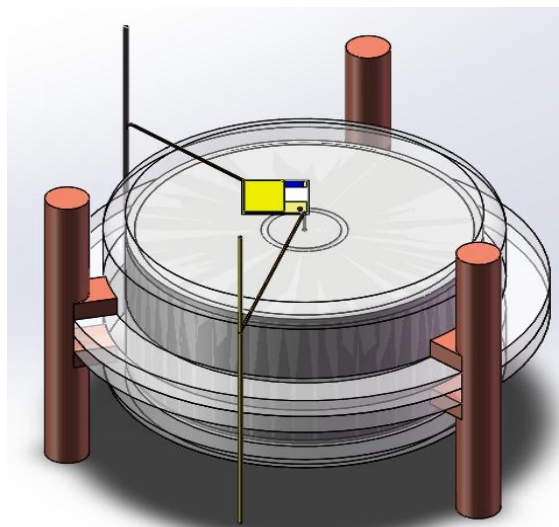
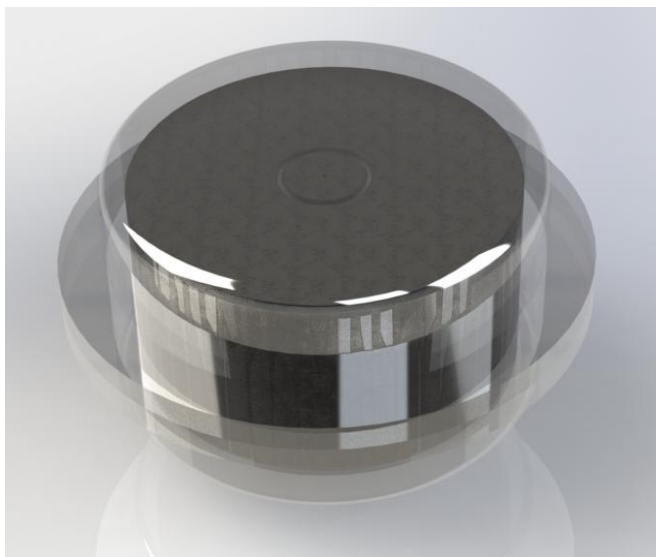


CDEX “盘古” 实验路线图



CDEX-300v 探测器

- 7串，每串~30个高纯锗晶体；锗探测器总质量: ~300kg
- 探测器类型:
 - Baseline: BEGe (1-1.2 kg/个)
 - Optional: ICPC (~2 kg/个)
- 探测器密封在亚克力壳中; 隔离锗晶体与电子学、外部屏蔽体

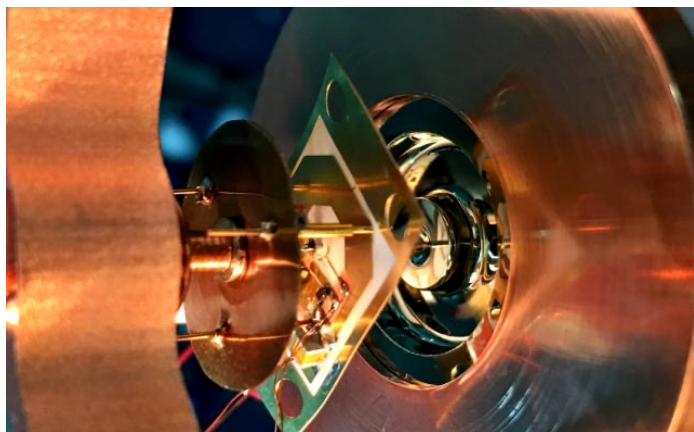


CDEX 展望

- 2024年开始探测器系统测试与运行；目前针对多项关键技术开展预研
- 半衰期目标 $T_{1/2} > 10^{27}$ yr, $\langle m_{\beta\beta} \rangle$: 30-70meV, 本底 $< 0.2/(\text{keV T yr})$
- 未来逐步推动国际合作的吨级高纯锗 $0\nu\beta\beta$ 实验落户锦屏



高纯锗探测器制备



低本底前端电子学



地下电解铜

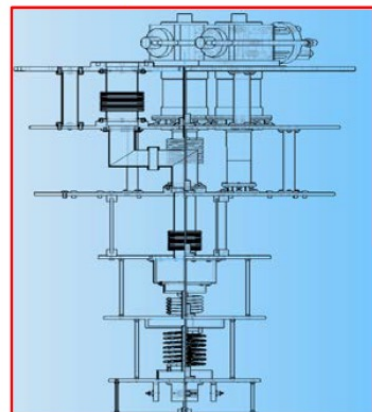


探测器高纯锗晶体生长

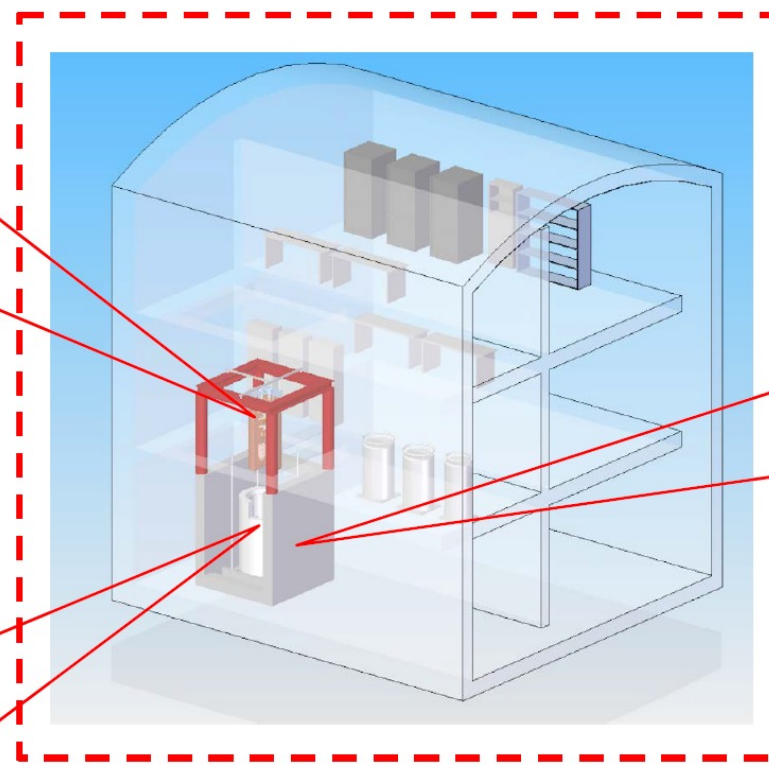
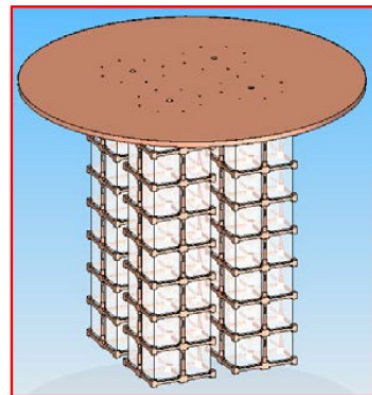
CUPID-CJPL

- 建立国内首个地下低温晶体量热器实验平台，在锦屏开展 ^{100}Mo $0\nu\beta\beta$ 实验
- 发挥国内晶体研发优势，开展 ^{100}Mo 富集晶体生长技术
- 2023年开始 10 kg 36块富集晶体实验
- 国际CUPID实验群体的重要组成部分；在CUPID-Reach、CUPID-Ton 阶段赶上国外实验。

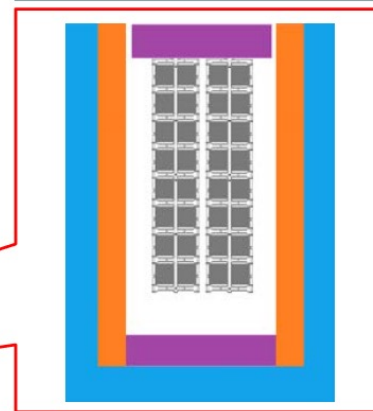
Cryogenic System



Detector Array



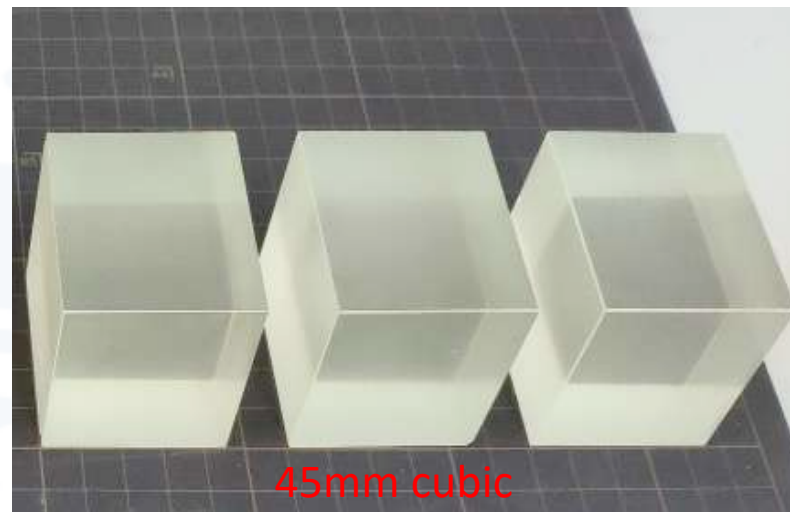
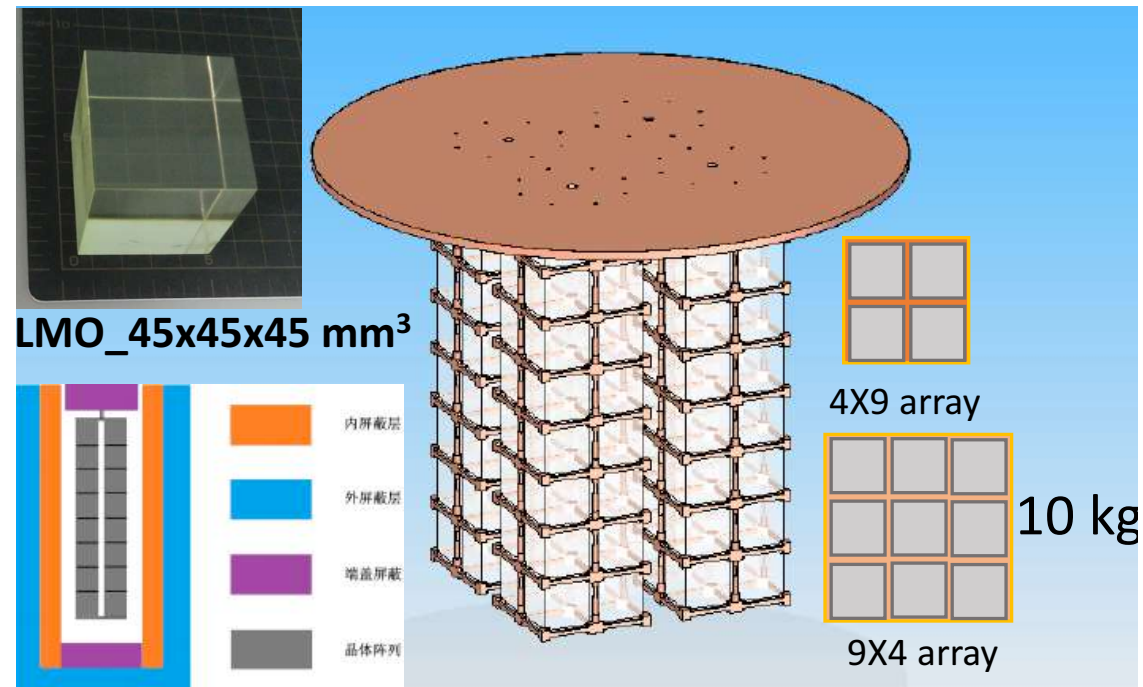
Shielding System



Underground Lab

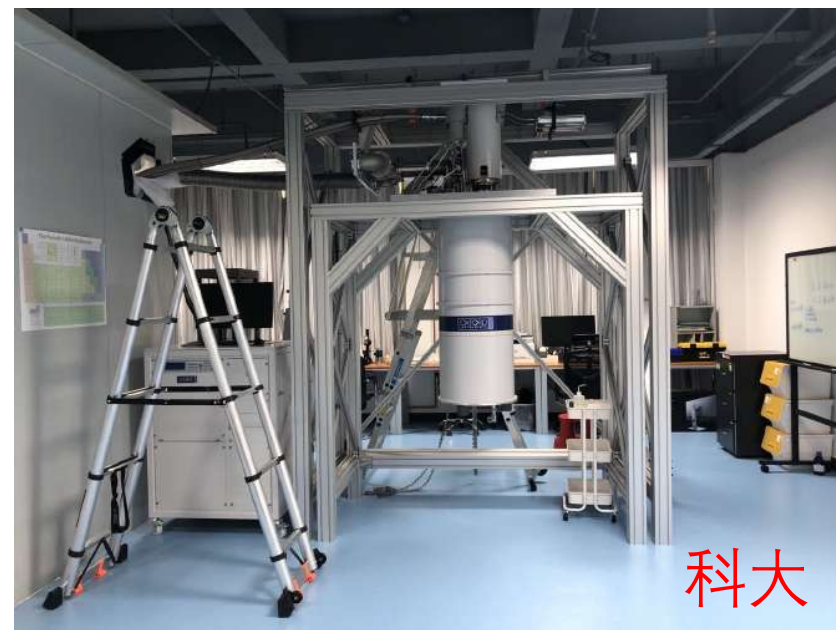
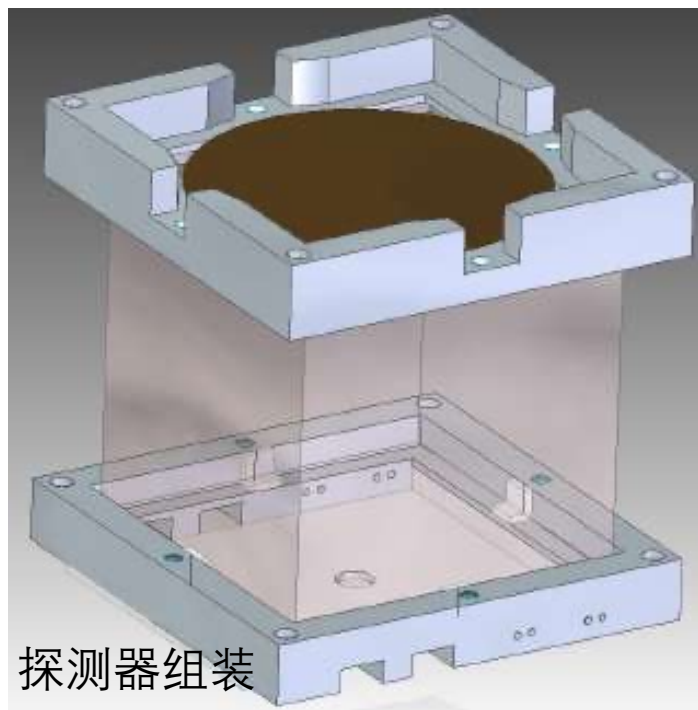
高纯闪烁 LMO 晶体

- 稳定生产大尺寸超纯LMO (钼酸锂) 自然丰度晶体圆柱形单晶毛胚、大尺寸立方晶体
- 开展富集晶体生长加工
 - 杂质含量控制U/Th $<10 \mu\text{Bq/kg}$

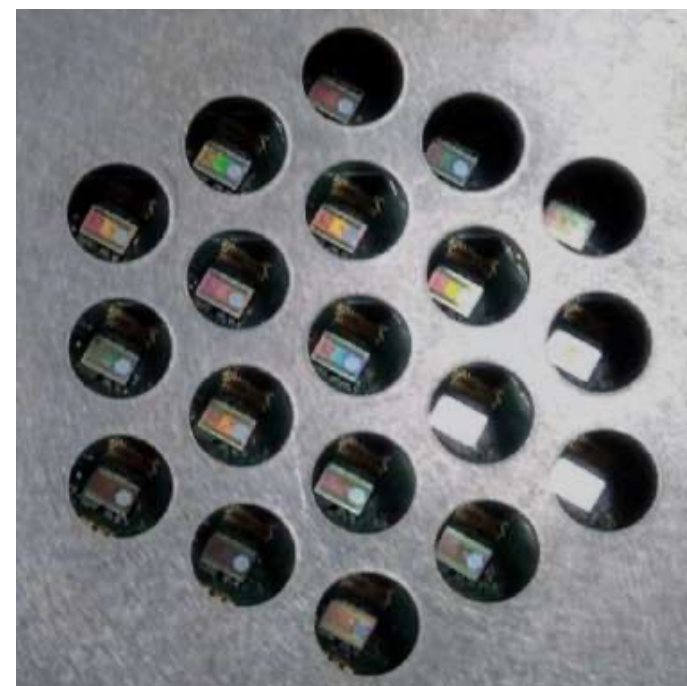
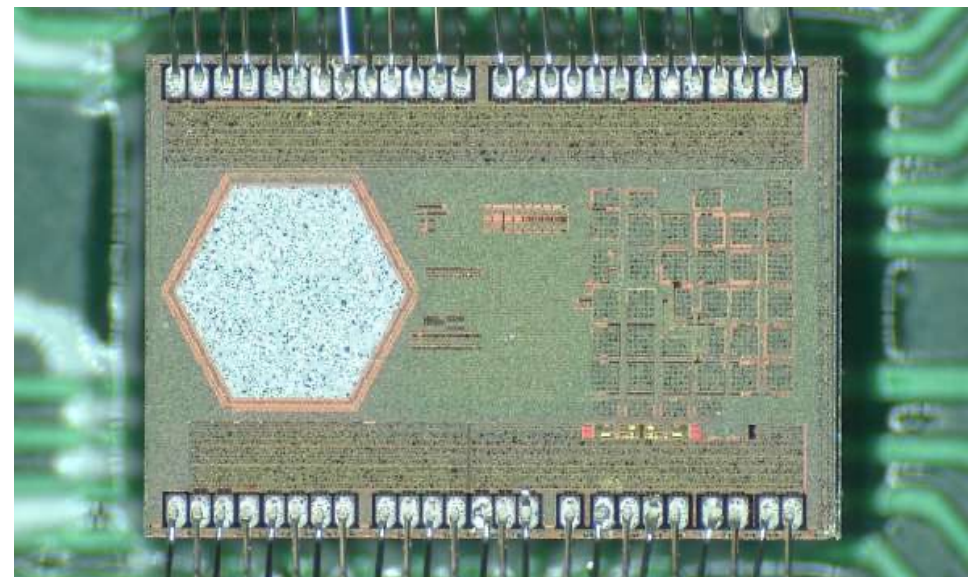
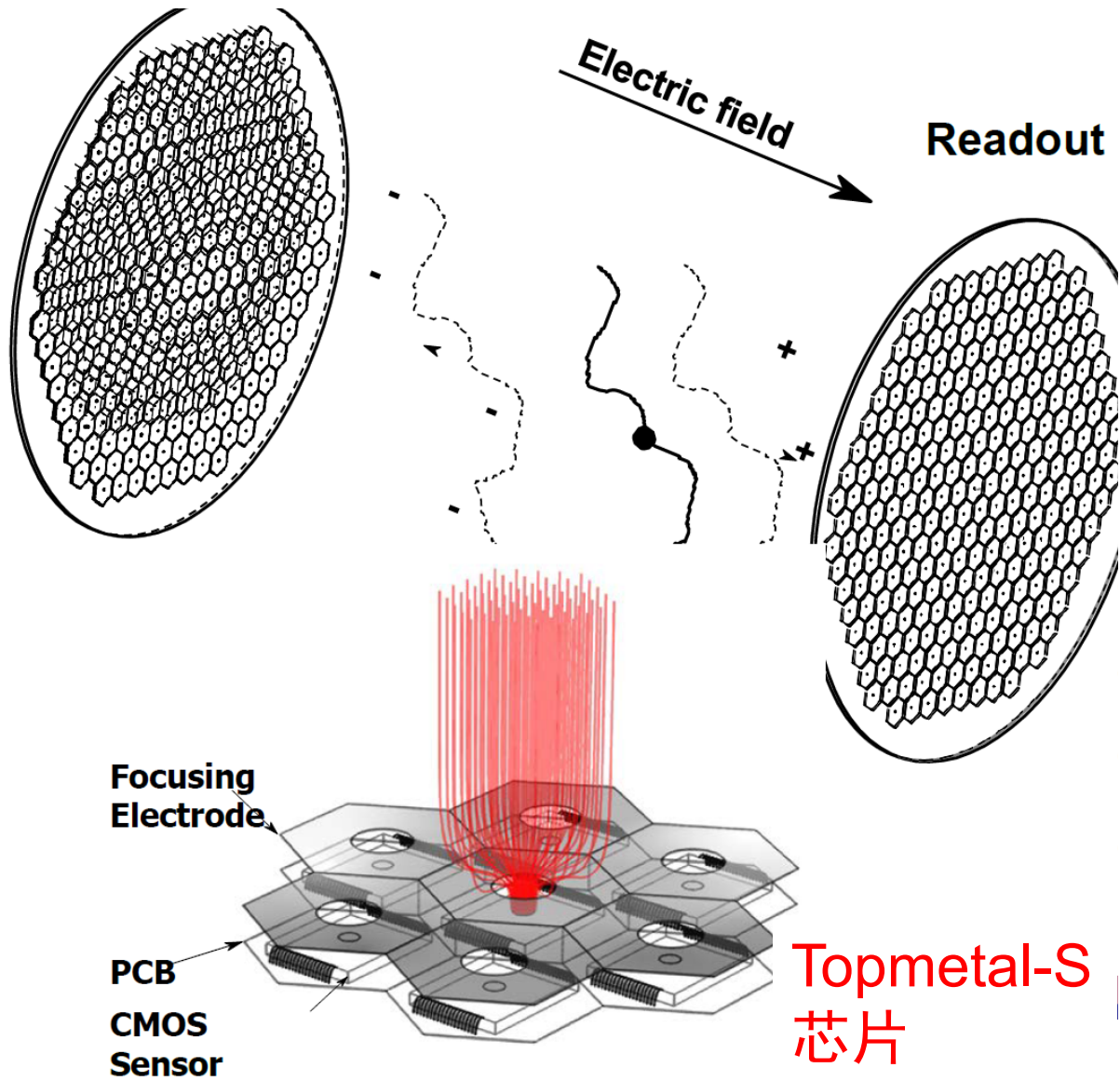


LMO低温晶体量热器测试

- 开展自然丰度大尺寸LMO立方晶体国内地面实验室测试
- 复旦与科大稀释制冷机通过验收运行
 - 最低温 <10 mK, 稳定性 <10 μ K@10mK
- 低温读出, 主动减震装置



高压气体离子时间投影室 NuDEx



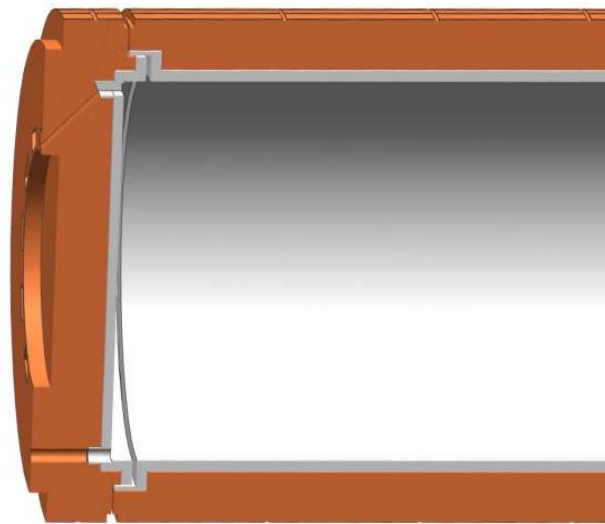
Topmetal-S
芯片

NvDEx 展望

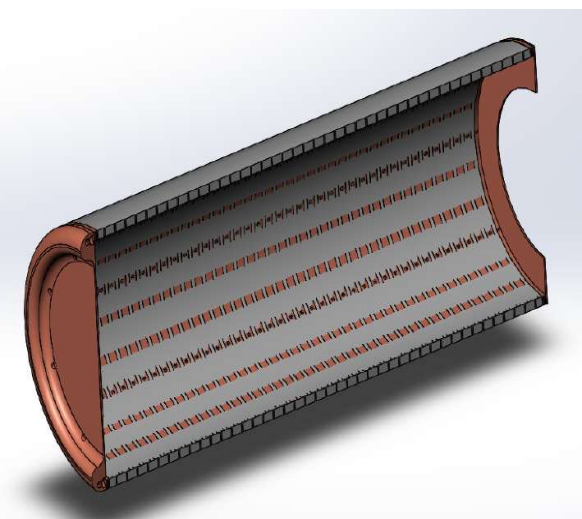
- 100-kg级实验地面样机基本完成设计，正在研制中
- 2021：验证Topmetal芯片读出、完成高压气腔和气体系统
- 2022：完成100-kg级实验地面样机
- 希望~2023年，开始在CJPL进行地下实验样机研制



低本底 316L不锈钢腔体部件



铜屏蔽体、绝缘层



TPC场笼



地面实验室

下一代液氙多物理目标探测器PandaX-xT

- 发展PandaX-xT成为多物理目标探测器，立足锦屏开展暗物质与中微子研究
- 40T量级的灵敏质量，包含多吨级 ^{136}Xe ，具有国际竞争力的 $0\nu\beta\beta$ 灵敏度
- 开始运行自然氙探测器，同步开展富集工作的研发，可以进行有无 ^{136}Xe 的对比实验，提高灵敏度和更加明确的确认疑似信号
- 深挖液体探测器MeV区间事件区分，提高信号本底鉴别效率

