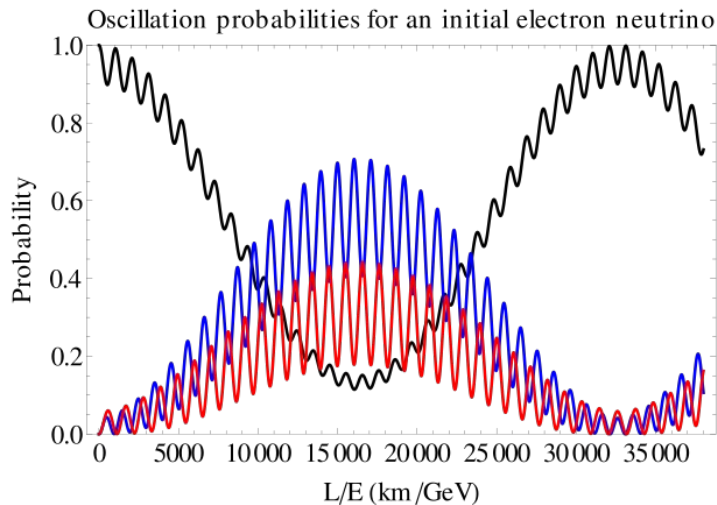


NvDEX实验进展

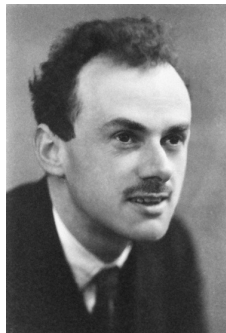
仇浩

中科院近代物理研究所

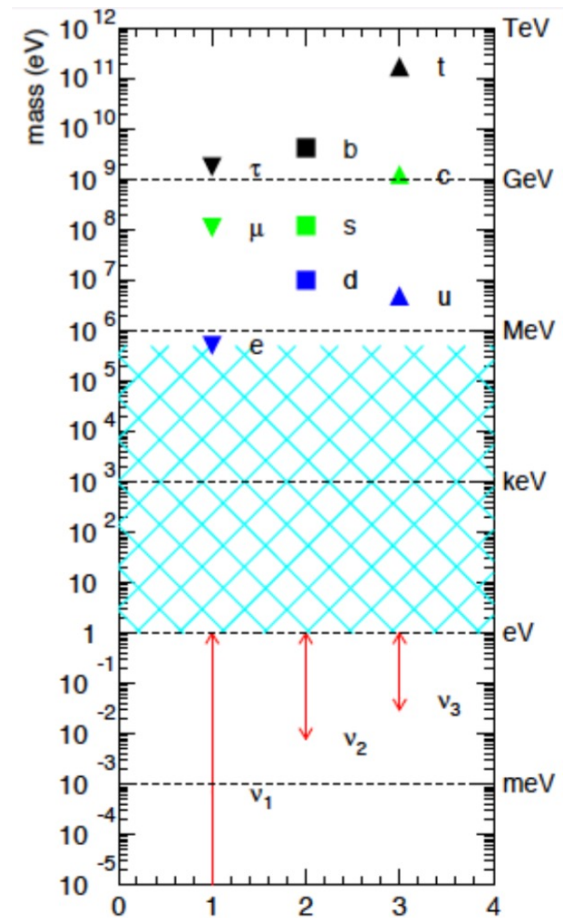
中微子



or

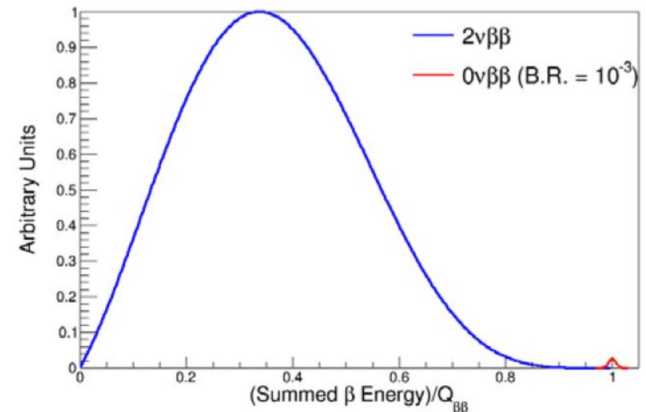
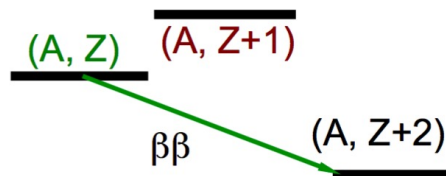
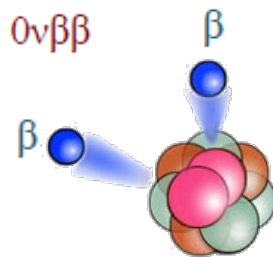
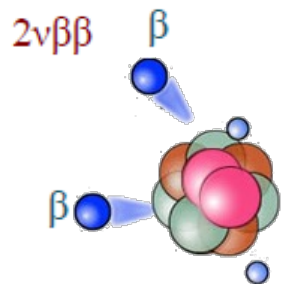


?



- 中微子震荡 $\Rightarrow$ 有质量 $\Rightarrow$ 超出标准模型
 - 中微子可能是Majorana或Dirac费米子，即可以是自己的反粒子
 - 质量远小于其它标准模型费米子
- $\Rightarrow$ 可能是探索超出标准模型新物理的关键

$0\nu\beta\beta$ 衰变



- 由于能级关系，有些原子核无法发生单 β 衰变，只能发生 $\beta\beta$ 衰变
- 如果观测到 $0\nu\beta\beta$ 衰变
 - 证明中微子是Majorana粒子 $\Rightarrow$ 超出标准模型
 - 利用跷跷板机制解释其及其微小的质量
 - 限制中微子的绝对质量，以及质量排序
 - 可能通过轻子数不守恒和CP对称破缺，解释宇宙正反物质不对称

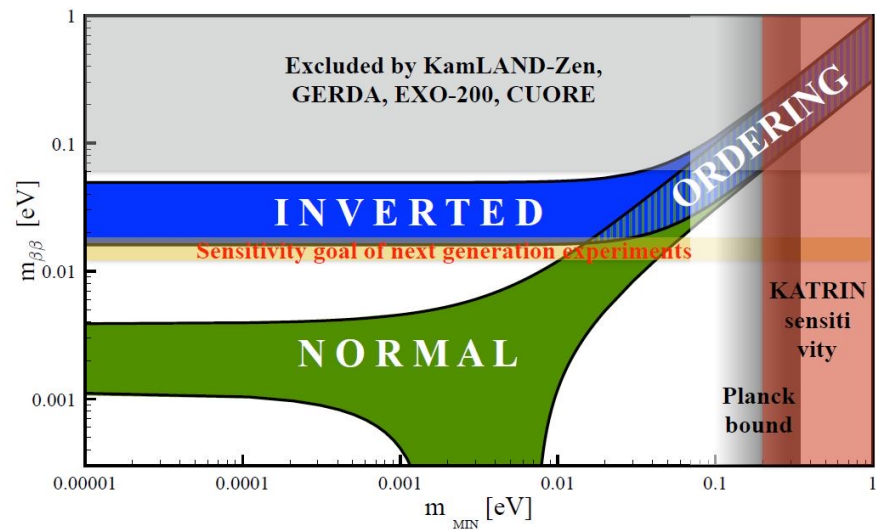
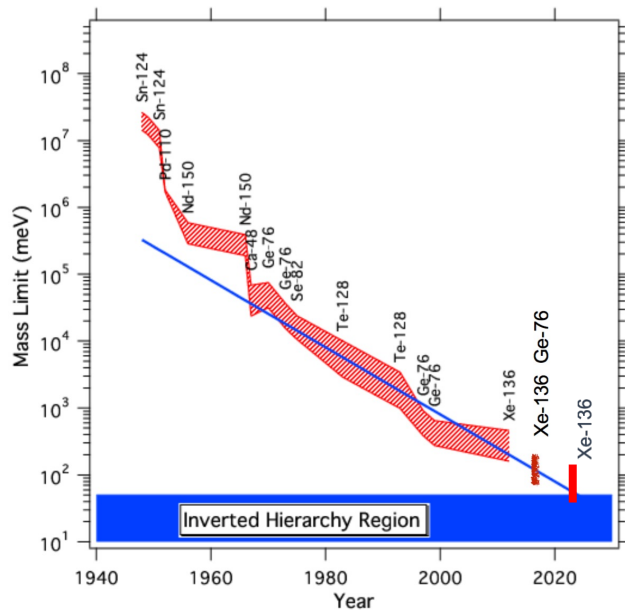
半衰期 & $m_{\beta\beta}$

$$\frac{1}{T_{\beta\beta}^{0\nu}} = G^{0\nu} \cdot |M^{0\nu}|^2 \cdot \langle m_{\beta\beta} \rangle^2$$

半衰期 $\rightarrow T_{\beta\beta}^{0\nu}$ 相空间因子 $\rightarrow G^{0\nu}$ 核矩阵元 $\rightarrow |M^{0\nu}|^2$ 有效 ν 质量 $\rightarrow \langle m_{\beta\beta} \rangle$

$$\langle m_{\beta\beta} \rangle = \sum_i U_{ei}^2 m_i$$

PMNS矩阵 $\rightarrow U_{ei}^2$ ν 质量 $\rightarrow m_i$

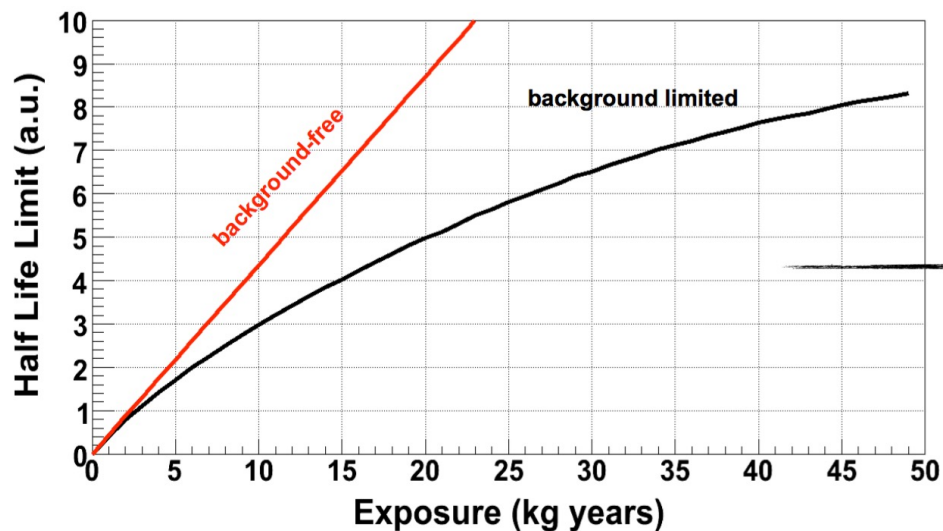


- 过去~70年, $0\nu\beta\beta$ 衰变实验敏感度一直在提高
- $m_{\beta\beta} < 100 \text{ meV}$ $T_{1/2} > 10^{26} \text{ y} \Rightarrow$ 难度很大
- 下一代实验将覆盖反常质量排序情况下所需敏感度

实验敏感度

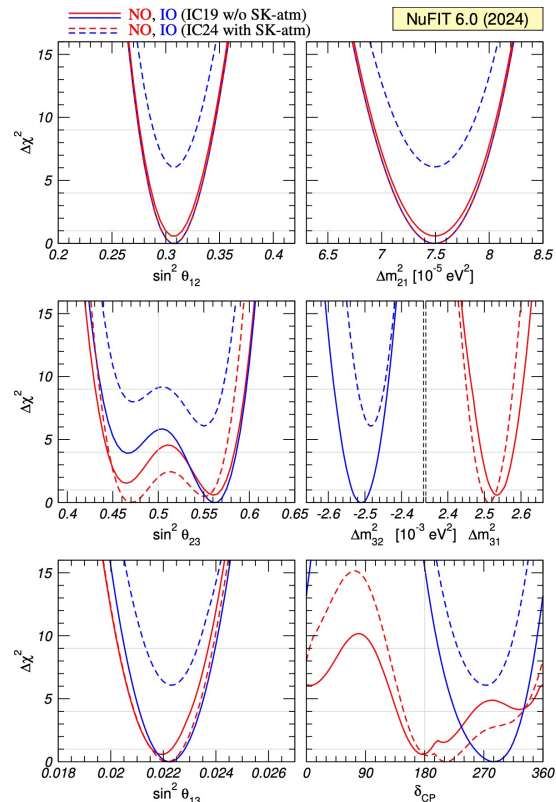
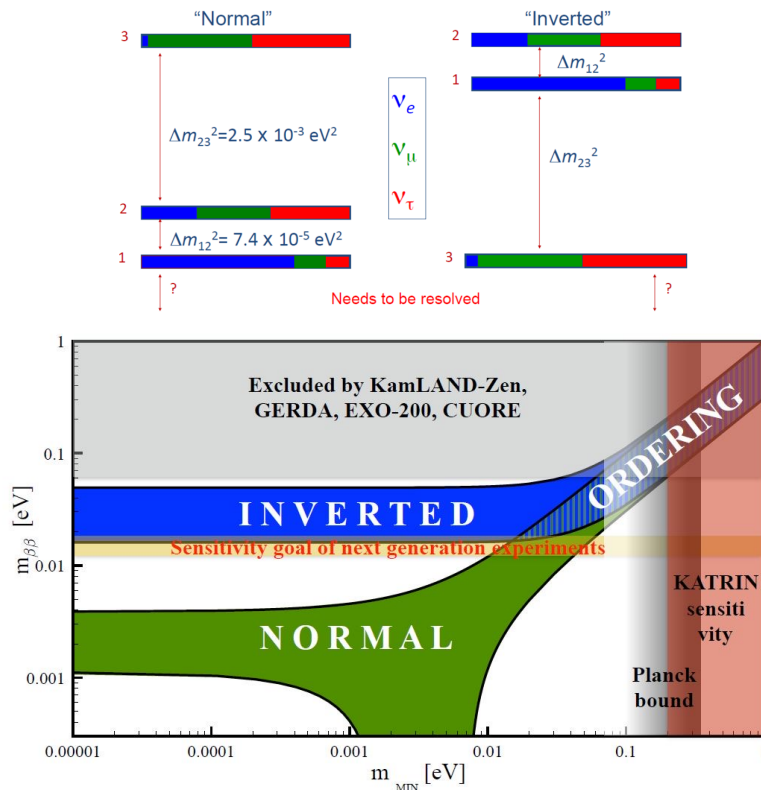
0本底情况: $T_{1/2}^{0\nu}(\text{exp}) = (\ln 2) N_a \frac{a}{A} \varepsilon \frac{MT}{n_{CL}}$ ← 曝光量: 质量 × 实验时间

高本底情况: $T_{1/2}^{0\nu}(\text{exp}) = (\ln 2) N_a \frac{a}{A} \varepsilon \sqrt{\frac{MT}{b\Delta E}}$ ← 本底 × 能量分辨率



- 降低本底 × 能量分辨率，是有效利用衰变核素（经费），提高实验半衰期敏感度的关键
- 高本底情况下， $m_{\beta\beta}$ 敏感度 $\propto (MT)^{-1/4}$

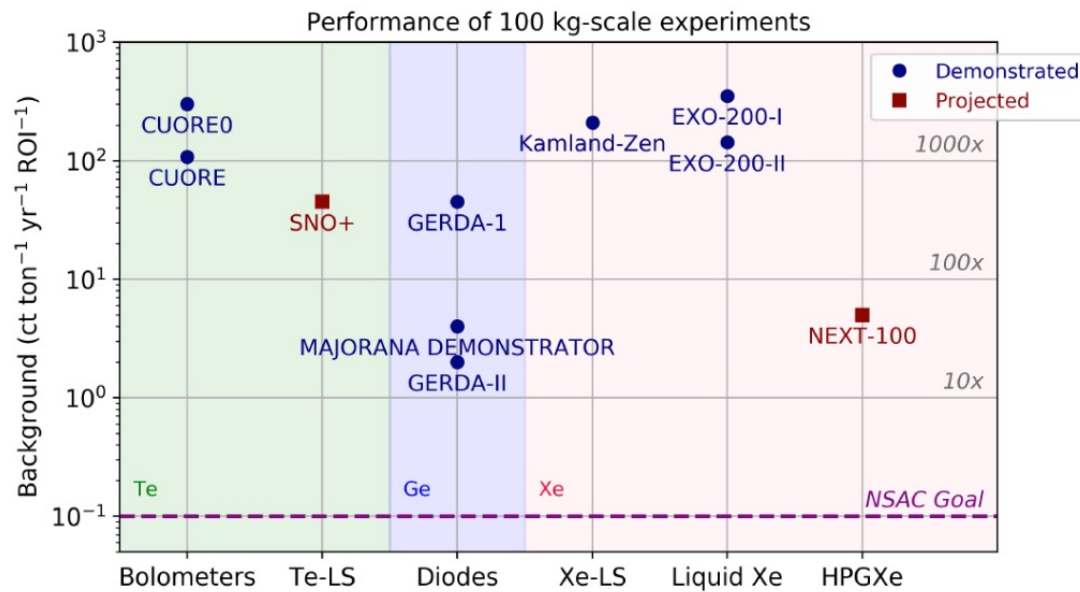
实验敏感度



- 从物理的自然性考虑，以及当前中微子震荡实验结果，都更倾向于正常质量排序
- 如同 $m_e \ll m_\mu$ ，如果 $m_1 \ll m_2 \Rightarrow 1 < m_{\beta\beta} < 4 \text{ meV}$
- 对于常用的几种 $0\nu\beta\beta$ 衰变核素，对应需要 $\sim 10^{29} \text{ yr}$ 量级的半衰期敏感度
- 在0本底情况下，需要 100 ton yr 量级的曝光量；提纯同位素：几亿元/吨
- $\Rightarrow$ 为了最有效地利用衰变核素(经费)，需要本底水平 $\ll 1 \text{ ct / ton yr ROI}$

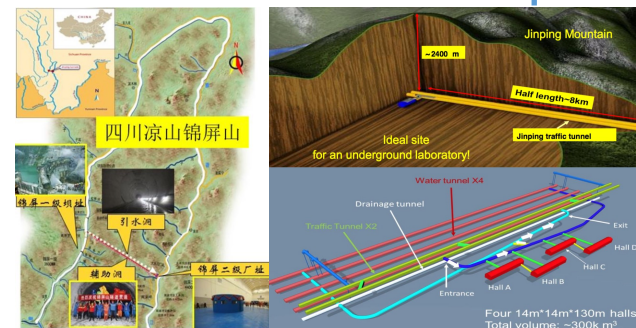
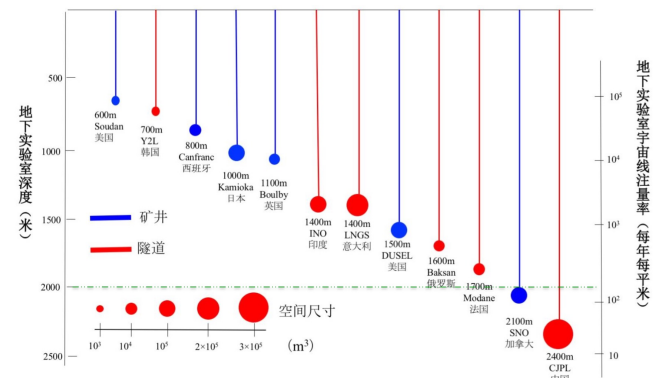
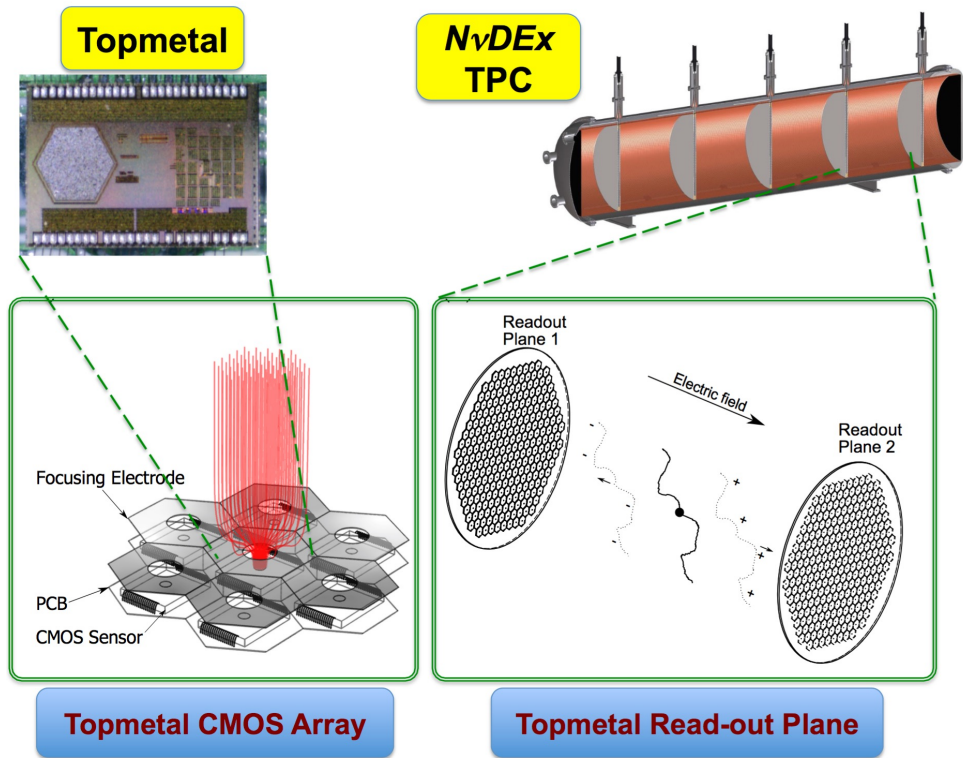
实验敏感度

“100kg-class” experiments:



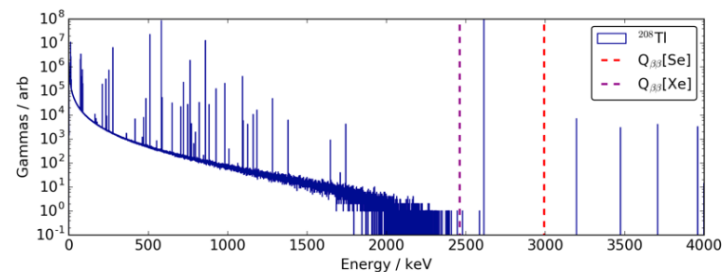
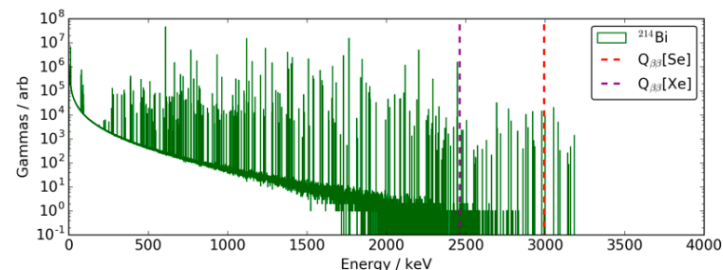
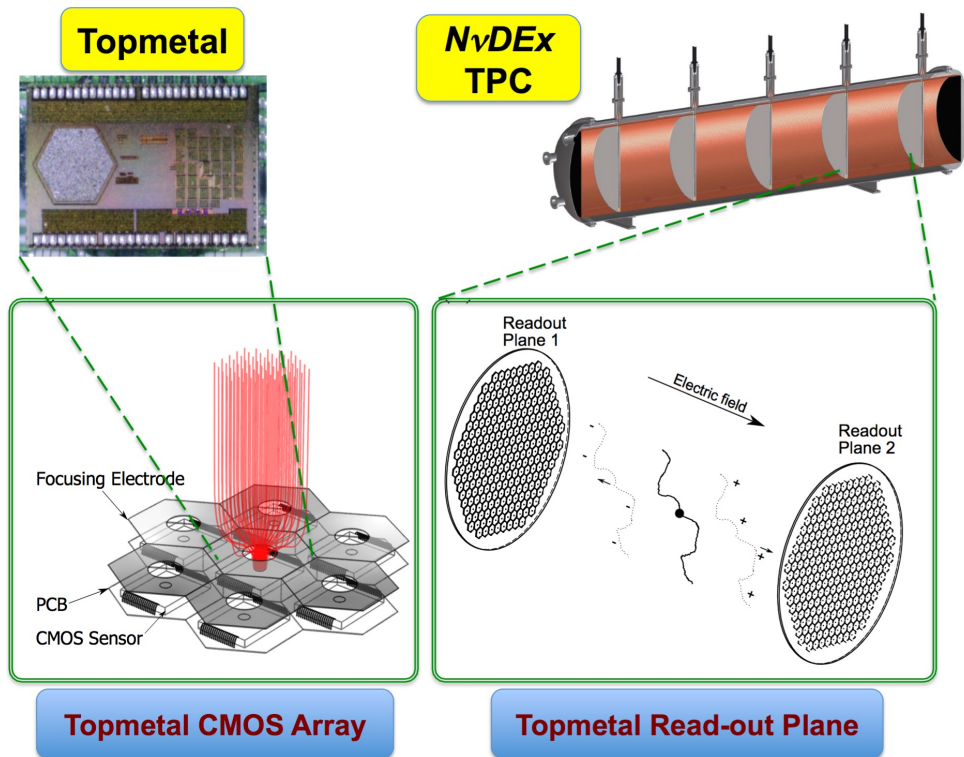
- 美国NSAC提出的 $0\nu\beta\beta$ 实验目标本底水平 $\sim < 0.1$ ct / ton yr ROI
- 现有实验本底水平高一个量级以上

NvDEx实验概念



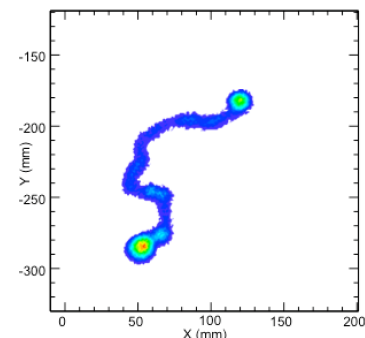
- 高压 $^{82}\text{SeF}_6$ 气体TPC，使用自研CMOS芯片直接读出
 - CJPL世界最深的地下实验室

N ν DEx实验概念



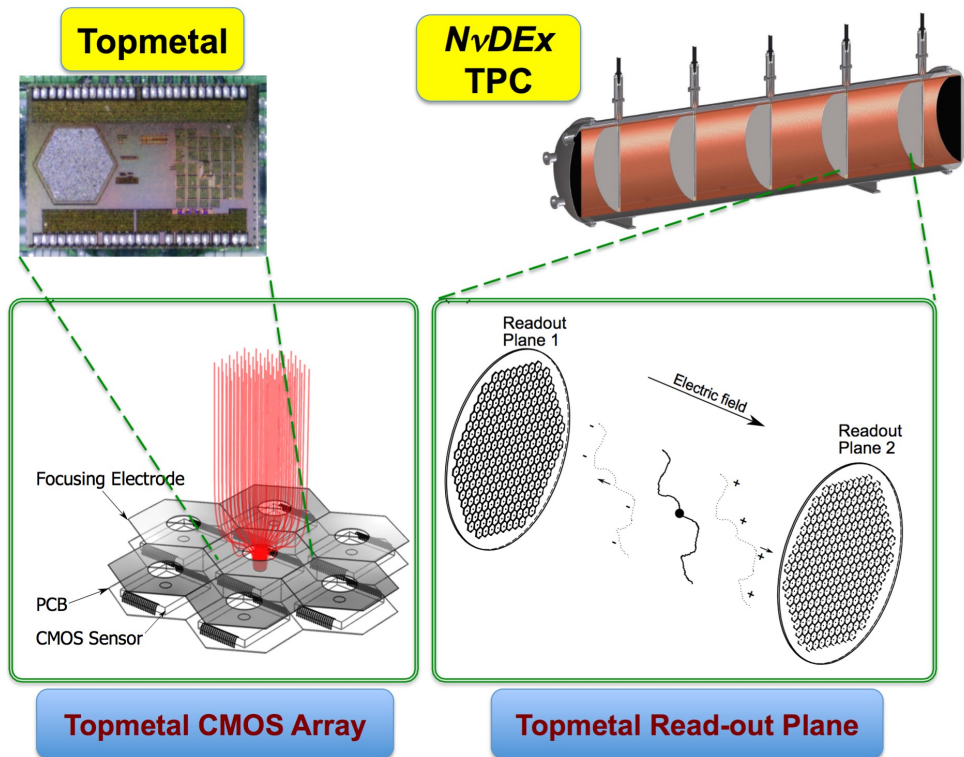
天然放射性 γ 本底能谱

- 高压 $^{82}\text{SeF}_6$ 气体TPC，使用自研CMOS芯片直接读出
 - CJPL世界最深的地下实验室
 - ^{82}Se 衰变Q值高(2.996 MeV)，高于绝大多数自然本底
 - TPC可使用事例几何特征鉴别信号本底
 - 无雪崩放大直接读出，能量分辨率更好($\sim 1\%$ FWHM)



$0\nu\beta\beta$ 事例能量沉积

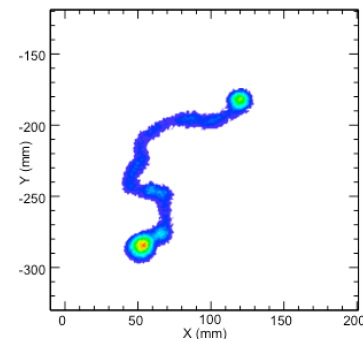
NvDEx实验概念



自研读芯片

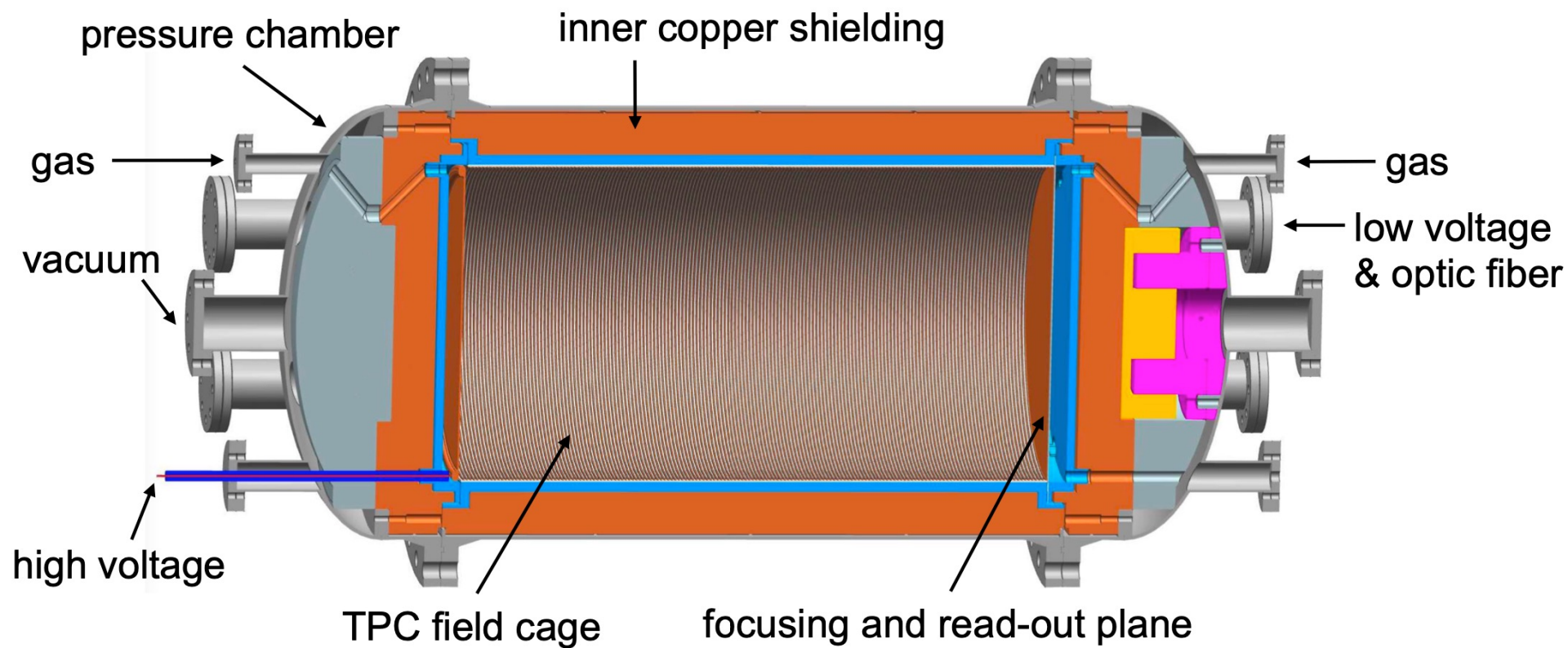


- 高压 $^{82}\text{SeF}_6$ 气体TPC，使用自研CMOS芯片直接读出
 - CJPL世界最深的地下实验室
 - ^{82}Se 衰变Q值高(2.996 MeV)，高于绝大多数自然本底
 - TPC可使用事例几何特征鉴别信号本底
 - 无雪崩放大直接读出，能量分辨率更好($\sim 1\%$ FWHM)



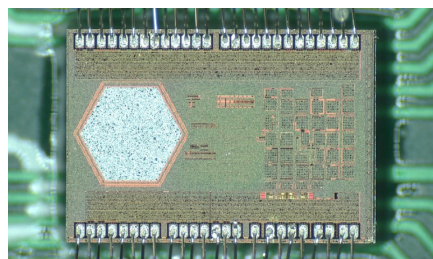
$0\nu\beta\beta$ 事例能量沉积

N_vDEx-100

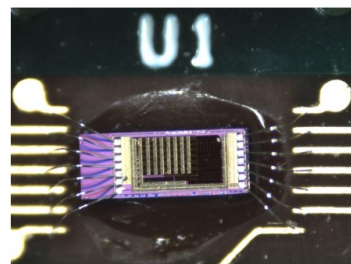
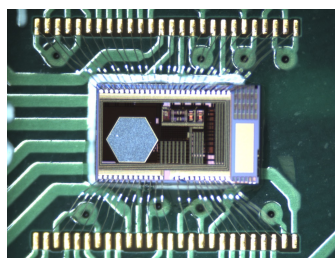


- 灵敏体积含有~100kg 10 atm $^{82}\text{SeF}_6$ 气体
- 桶部长160cm, 气腔内径120cm

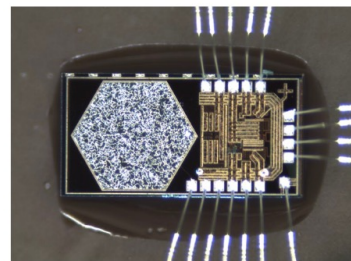
读出芯片



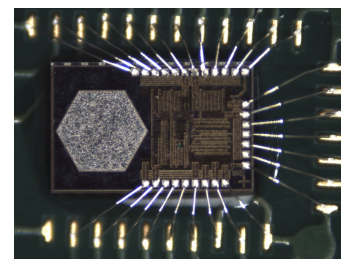
v0, 信号幅度远小于预期 v1.B, ENC~130e-



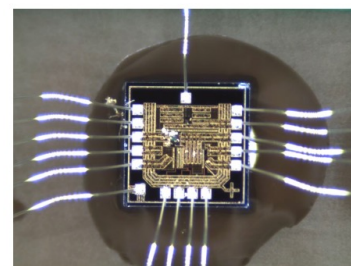
V2-GB, ENC~119e-



V2-TA, ENC~58e-



V3-TA, 测试中

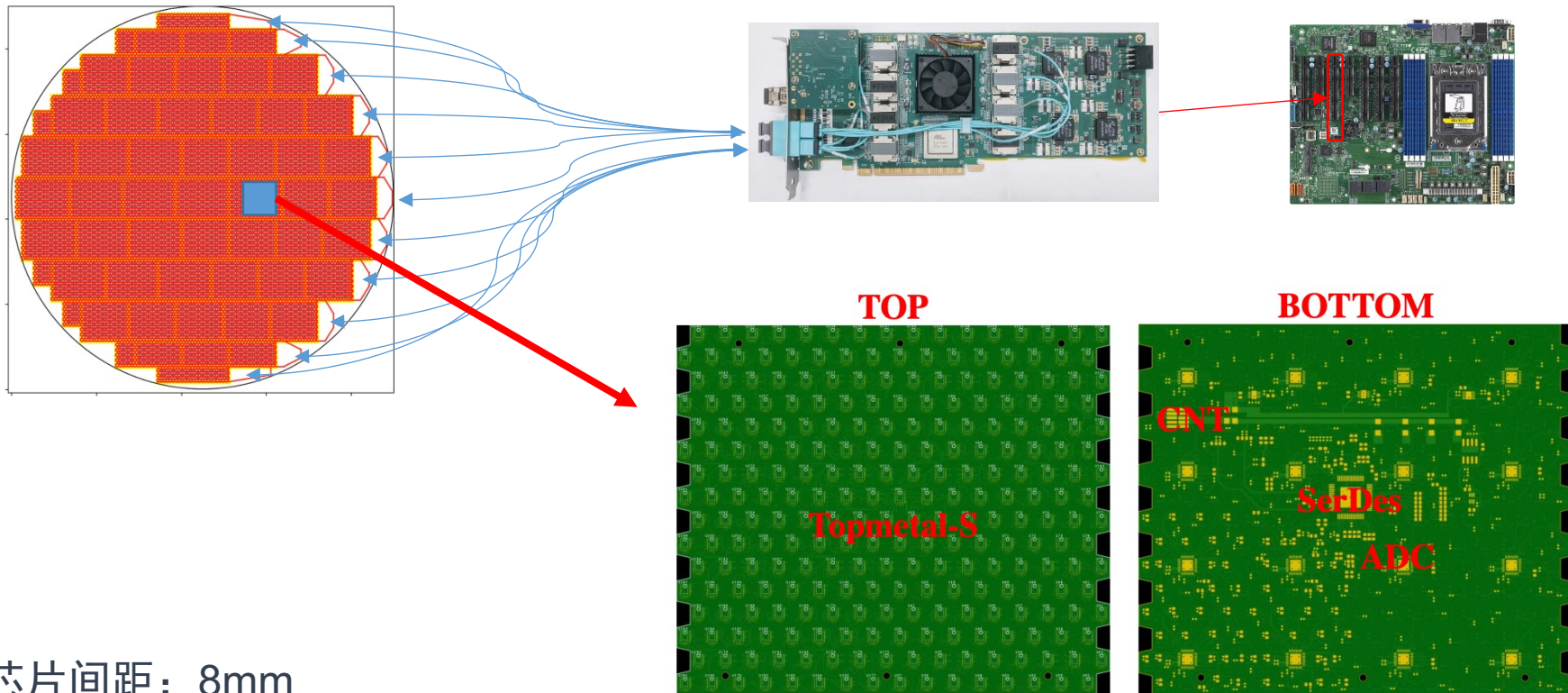


V2-TB, ENC~49e-

- 自研电荷读出芯片
- 预期等效电子噪声(ENC)可低至~30e-
- 可不依赖雪崩放大, 实现离子漂移探测, 是NvDEx技术方案实现的关键技术
- 已进行四次流片

更多内容见陈凯的报告

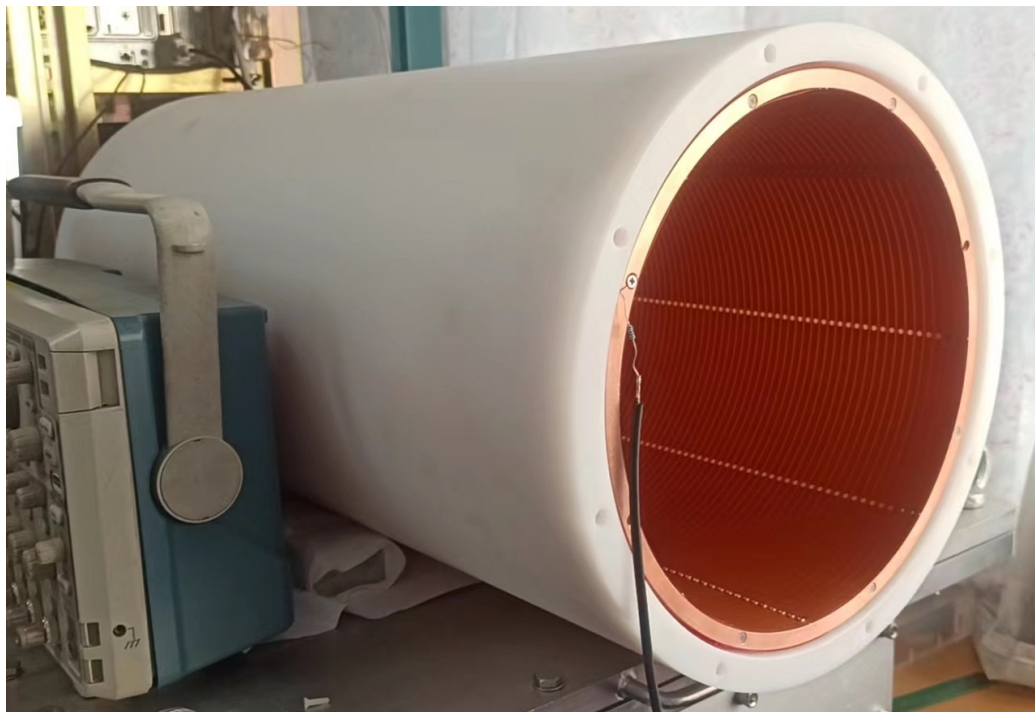
读出平面 & 数据采集系统



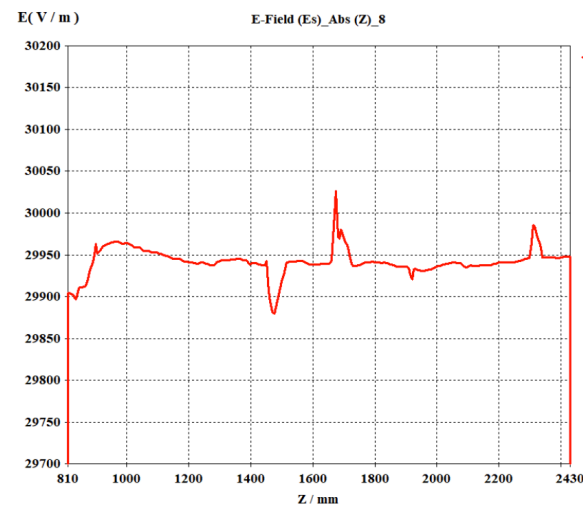
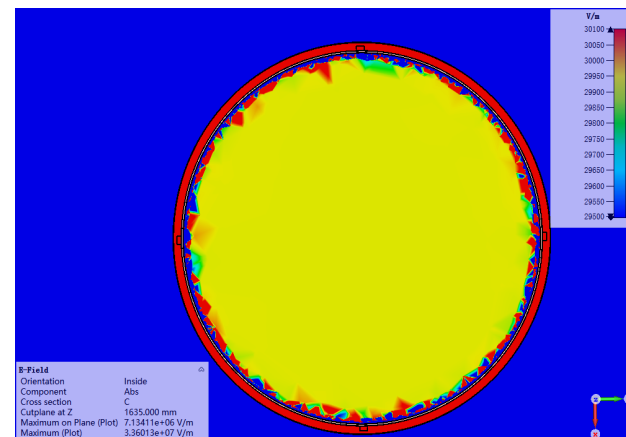
- 芯片间距：8mm
- 采样率：0.5~20 kSps
- 基于 PCIe 的数据采集系统：FELIX
 - 首个原型机已制作完成

更多内容见陈凯的报告

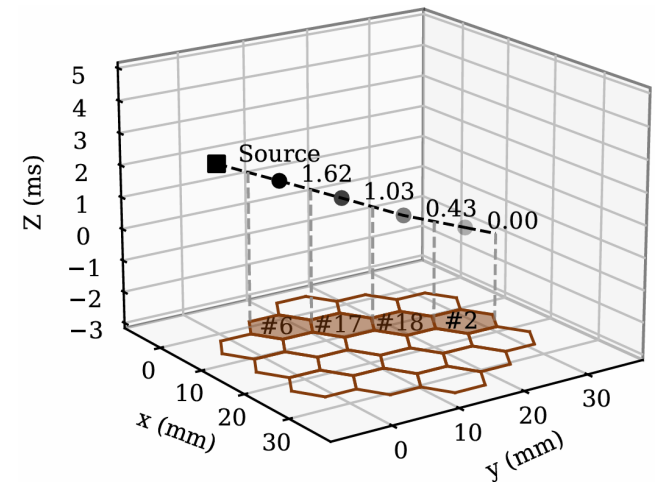
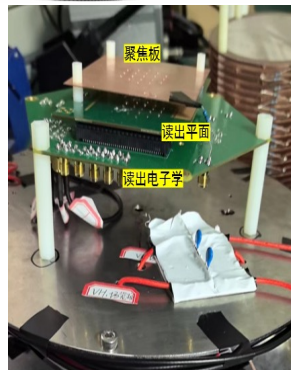
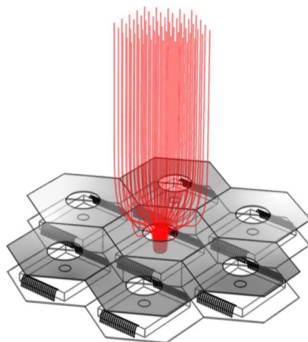
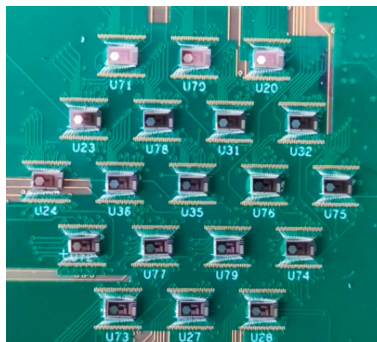
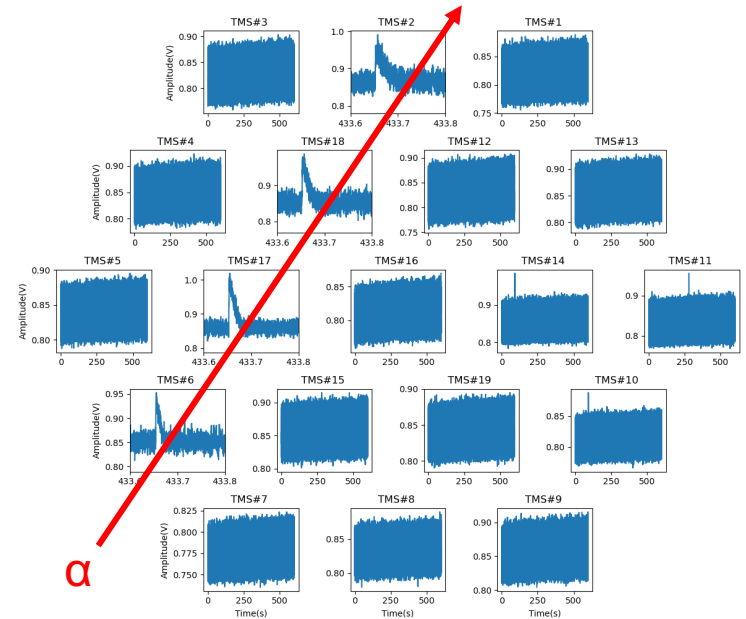
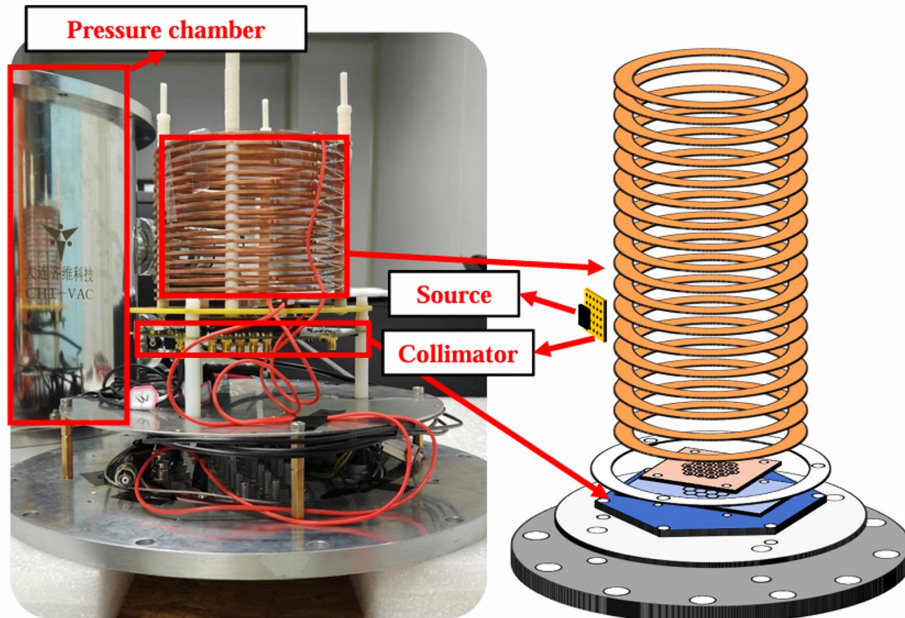
TPC场笼



- 聚甲醛绝缘层、支撑结构 + 柔性PCB
- 完成初步设计，直径30 cm的原型机加工完成

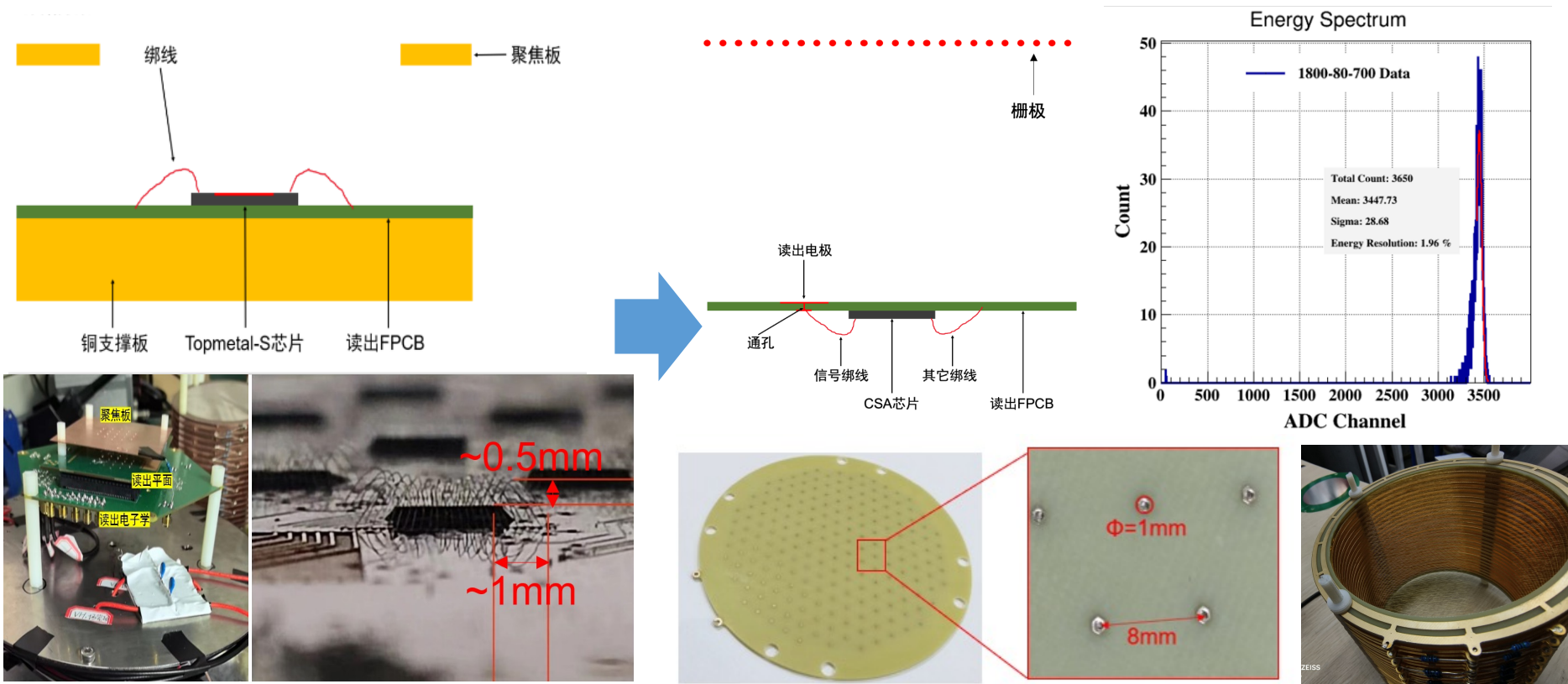


时间投影室原型机



- 基于19个V1版本芯片搭建了时间投影室原型机
- 成功探测到了 α 粒子径迹
- 但电荷收集效率很低

时间投影室原型机



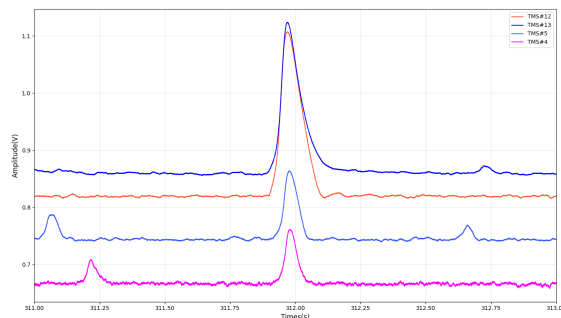
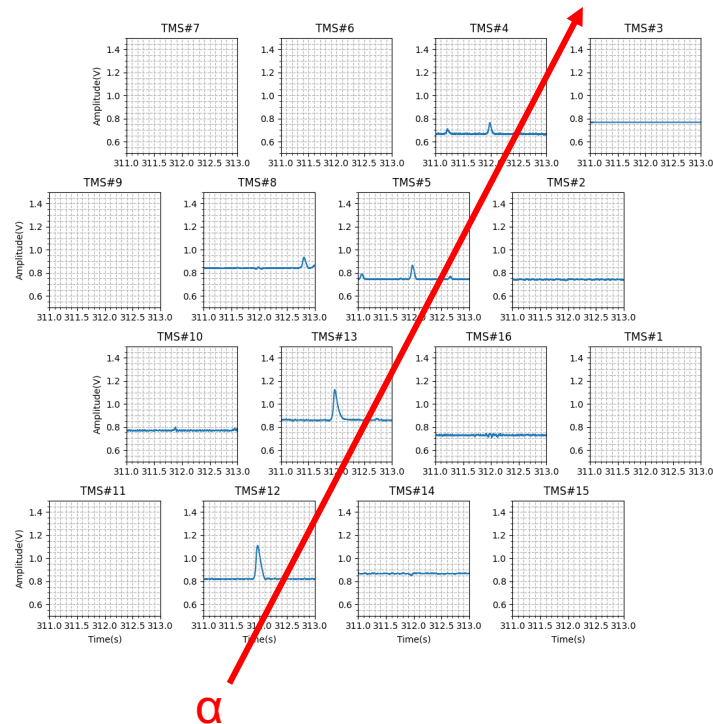
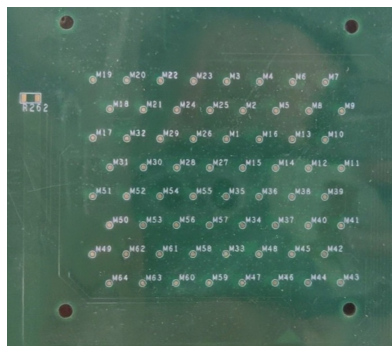
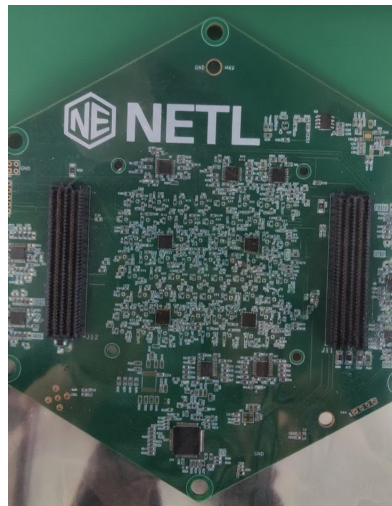
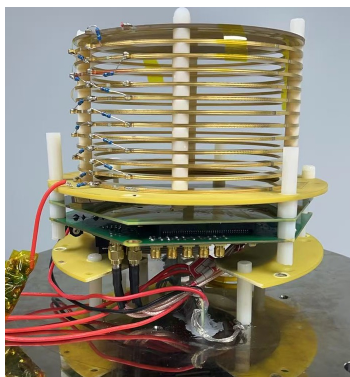
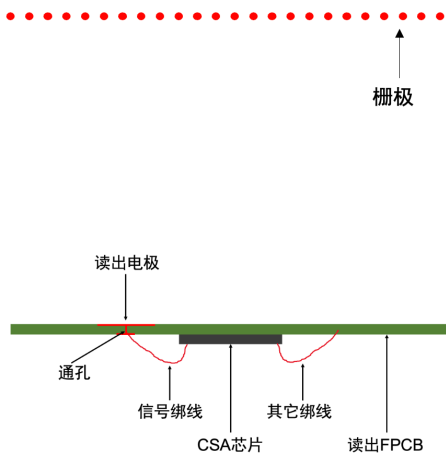
原始方案：圆孔聚焦+正面芯片

- 芯片绑线干扰电荷收集，降低了收集效率

新方案：丝面栅极+背面芯片

- 使用单路外接商用前放时，测得收集效率 $\sim 100\%$ ，能量分辨率 $\sim 2\%$

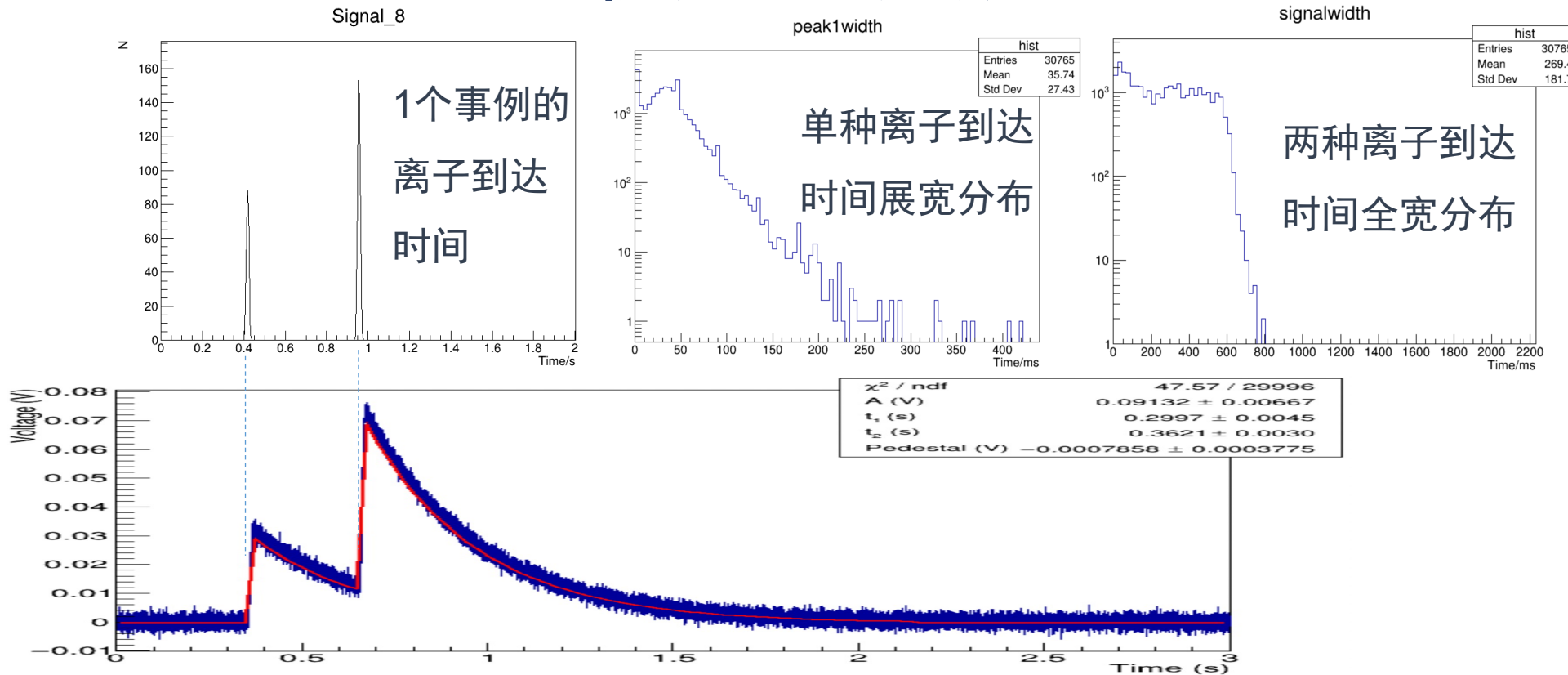
时间投影室原型机



新方案：丝面栅极+背面芯片

- 使用多路自研芯片阵列的读出平面正在测试中
- 观察到 α 粒子径迹
- 将尝试利用X射线源测量能量分辨率

长积分时间问题

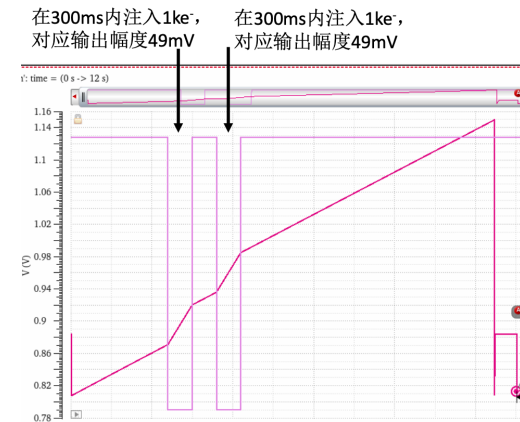


- 离子漂移速度远慢于电子
 - 单种离子到达时间展宽平均36ms，最长~300ms
- 需要s量级的信号衰减时间，或取消反馈电阻，使用开关复位
- 然而芯片内部可实现的反馈电阻范围有限
 - 当前芯片信号衰减时间最长只能调到几十ms，不适用于离子漂移信号读出

长积分时间问题

解决方案1：片内开关

- 调研、设计、仿真进行中
- 漏电流要求很高： $<10\text{ke}^- / 10\text{s} \sim 0.2\text{fA}$
- 会引入额外噪声贡献（仿真最好 $\sim 130\text{e}^-$ ），还没有找到满足噪声要求的方案



解决方案2：片外大电阻

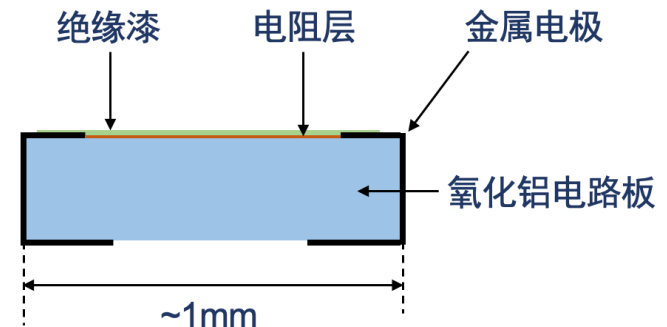
- 衰减时间 $\sim 1\text{s}$ ，反馈电容 $\sim 5\text{fF}$
 - $\Rightarrow$ 反馈电阻值 $\sim 1\text{s}/5\text{fF} = 2 \times 10^{14}\Omega$
- 市面上没有 $\sim 10^{14}\Omega$ 阻值的电阻
- 计划自研或者找公司研发
 - e.g. 绝缘漆混合防静电漆实现电阻层



10TΩ, 6mm



1TΩ, 2mm



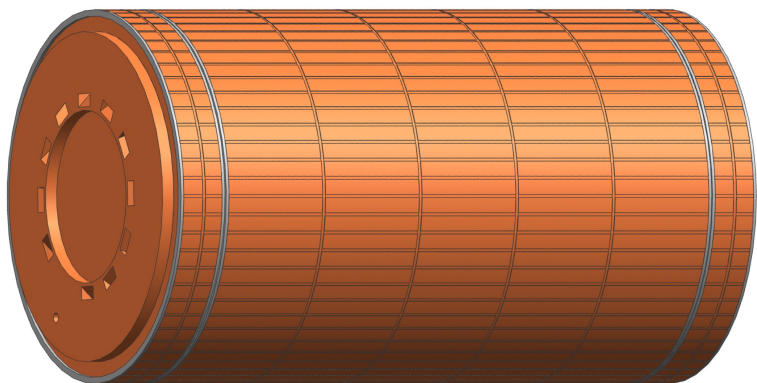
解决方案3：片外开关

- MEMS开关尺寸太大



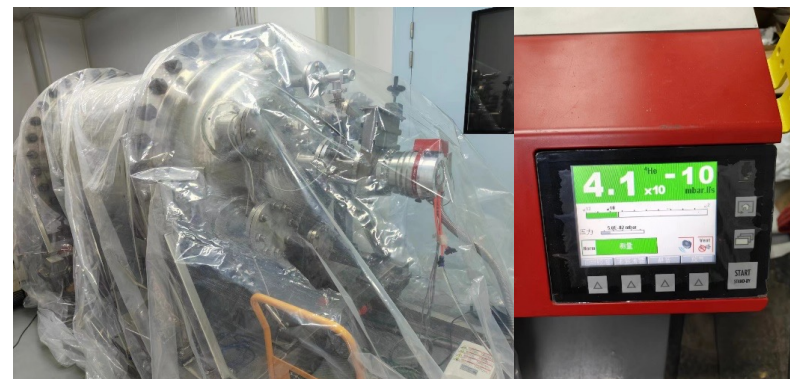
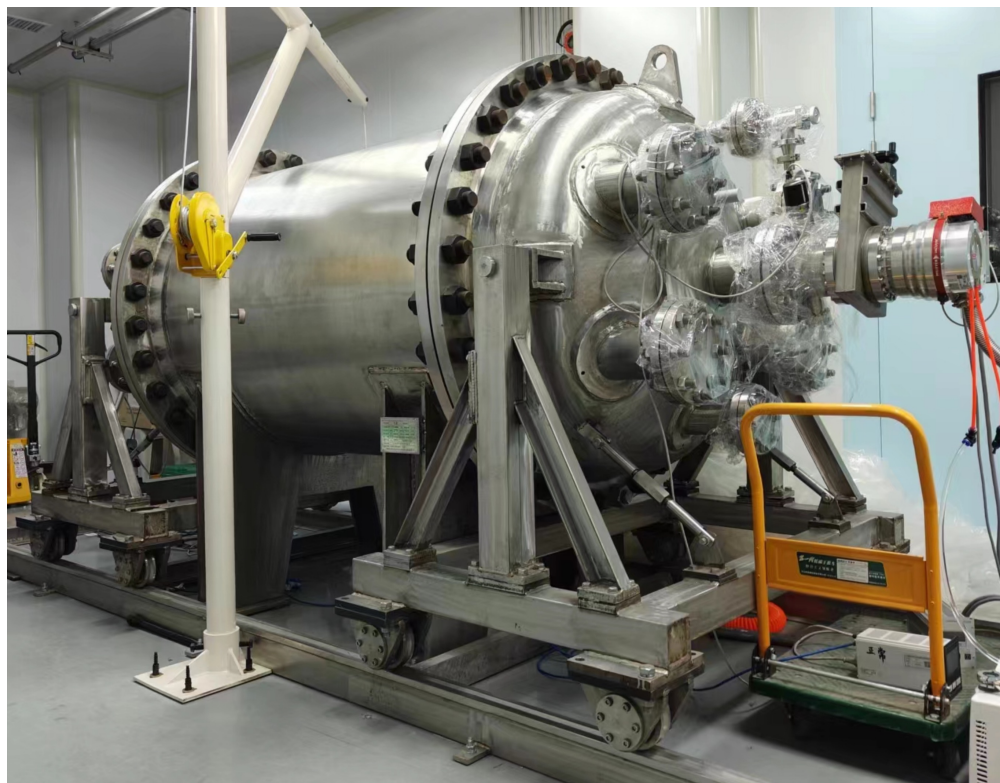
5mm × 4mm

铜屏蔽体

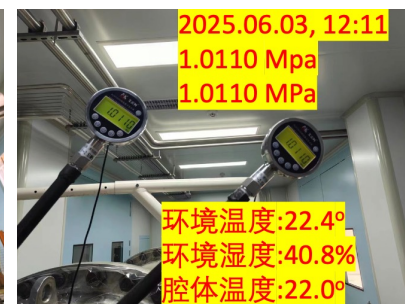
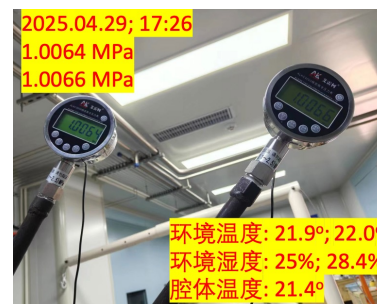


- 低本底无氧铜
- 完成加工

气腔



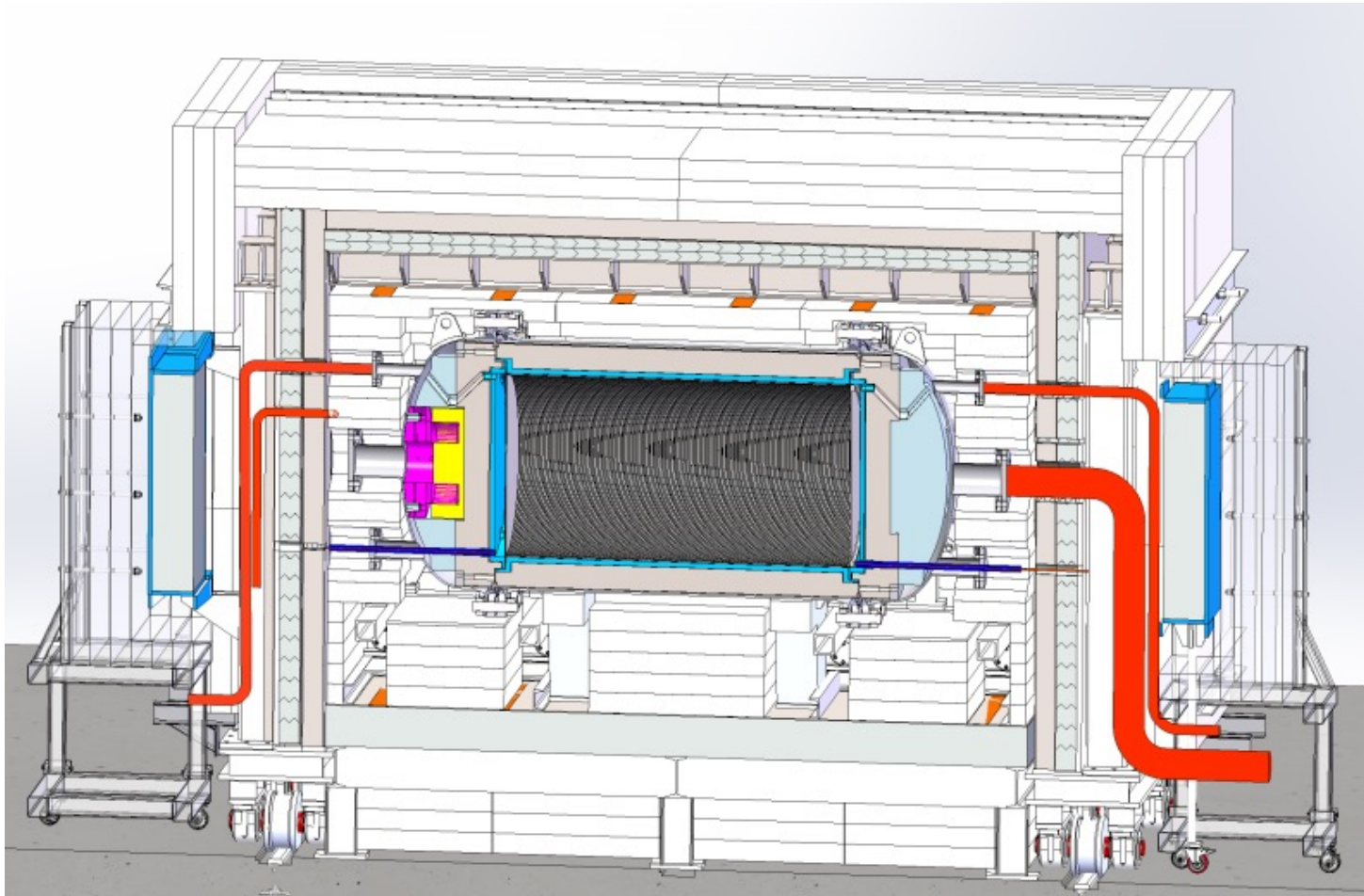
真空氦罩法检漏



保压测试

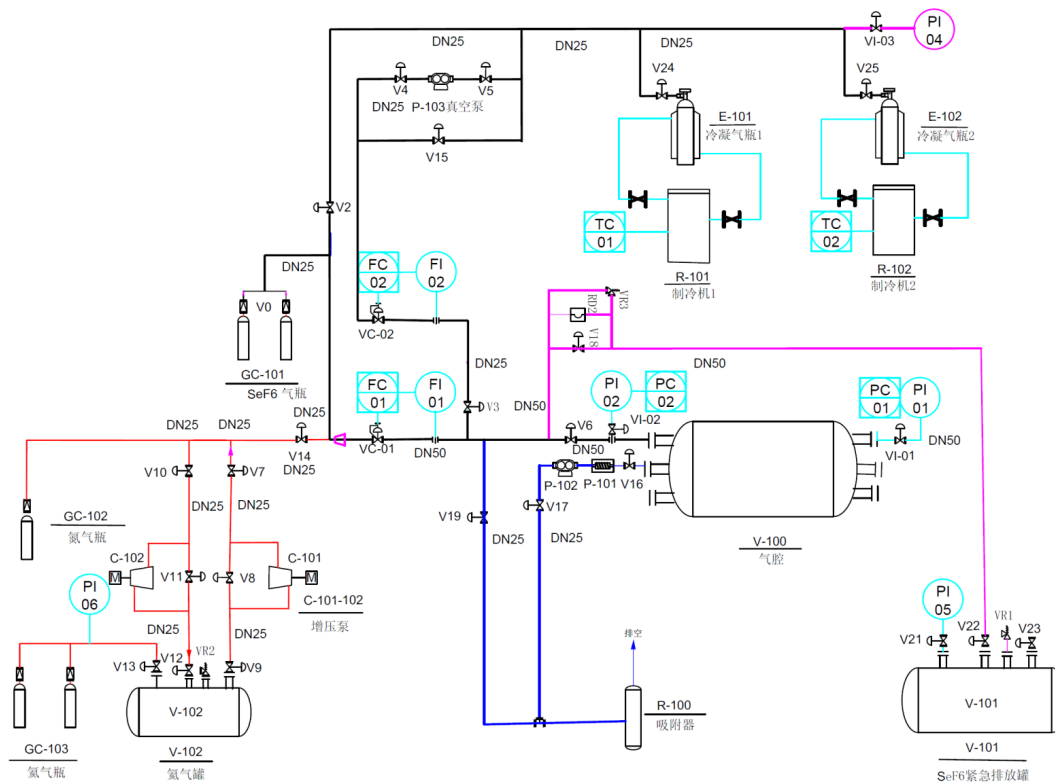
- 316L不锈钢
- 气腔加工完成、与铜屏蔽体组装完成
- 通过了真空氦气检漏、1MPa一个月高压气密性检测

外屏蔽



- 铅+高密聚乙烯外屏蔽体，阻挡、吸收 γ 、中子
- 完成设计，待实验获批下锦屏再采购加工，避免铅在地面被活化

气路



- SeF_6 有毒：环境中 $< 0.05 \text{ ppm}$ $\Rightarrow$ 多层安全措施
- 冷阱用于长期储存 SeF_6
- 紧急情况下，向紧急泄压罐泄压至低于一个大气压
- SeF_6 冷凝、抽真空后，微量余气吹扫至 SeF_6 反应器
- 每次充 SeF_6 前先用 SF_6 测试系统气密性

气路



预冷器



冷凝器



真空泵



紧急泄压罐



制冷机



SF₆ 储气罐

- 完成部件的制造、采购
- 正在接管组装

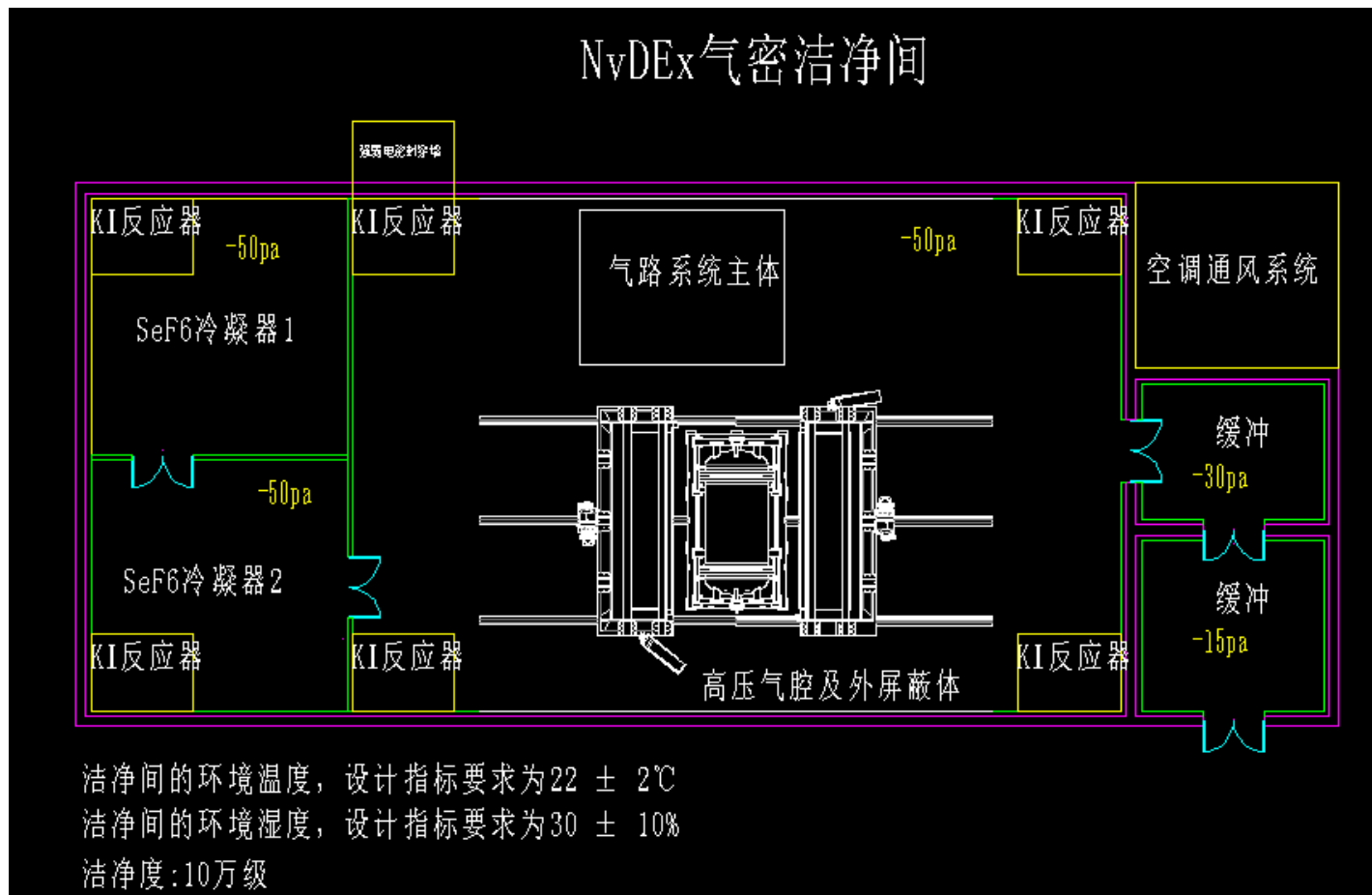
气路



- 完成了气路控制系统搭建

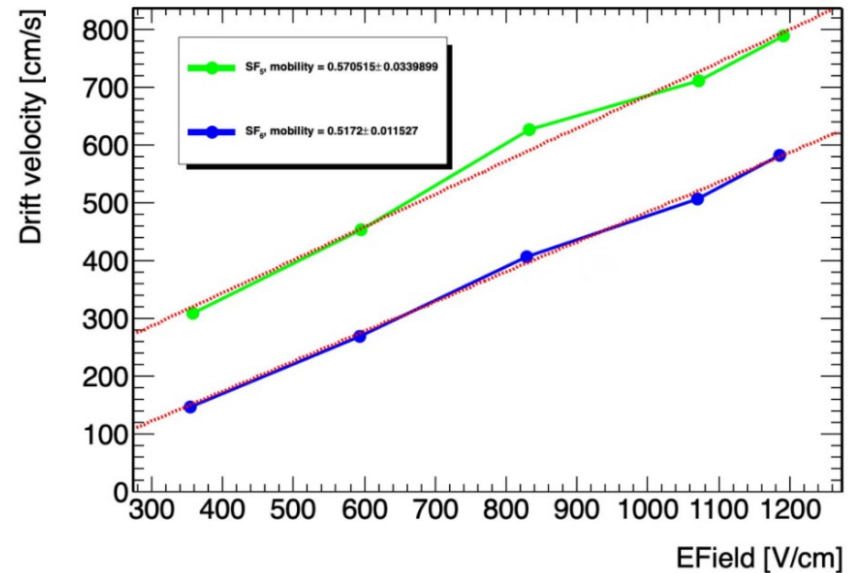
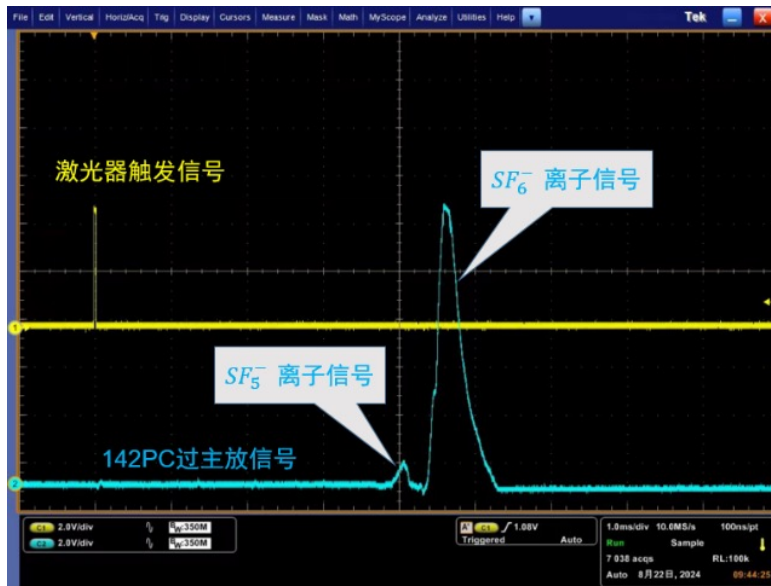
气密洁净间

NvDEx气密洁净间



- 将实验装置和气路系统置于气密负压洁净间中
- 实验运行期间（气体处于常温高压状态时）保持气密——第三道安全防线
- 内部布置SeF₆气体反应器（熔融NaOH），吸收万一泄漏的气体

气体性质测量

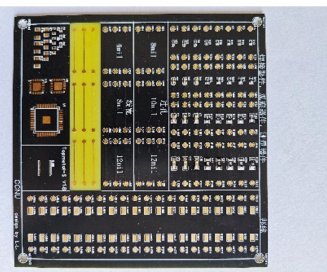
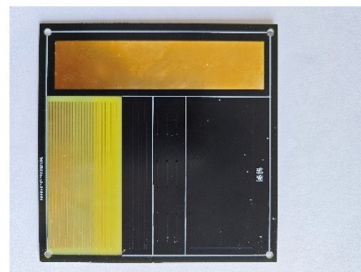


- 完成了 SF_6 漂移速度测量
- 即将在生产厂家进行 SeF_6 漂移速度测量

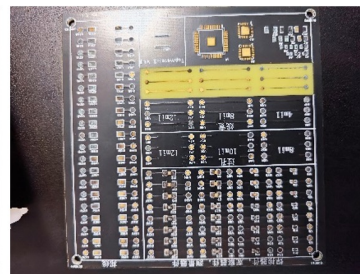
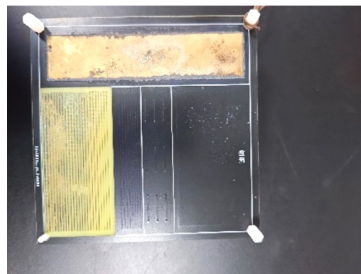
气体性质测量

- 测试了不同含水量 SeF_6 的腐蚀性
- 即使万分之一含水量，仍有一定腐蚀性
- 将调研适用的干燥剂，以及电路防护措施

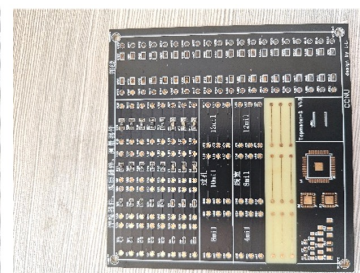
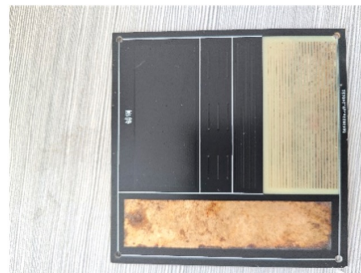
腐蚀前



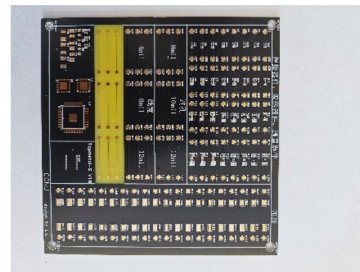
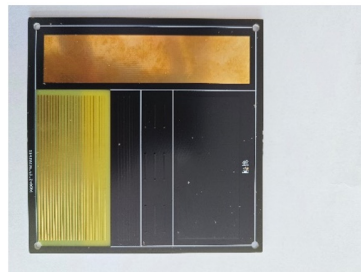
1.2%
两周



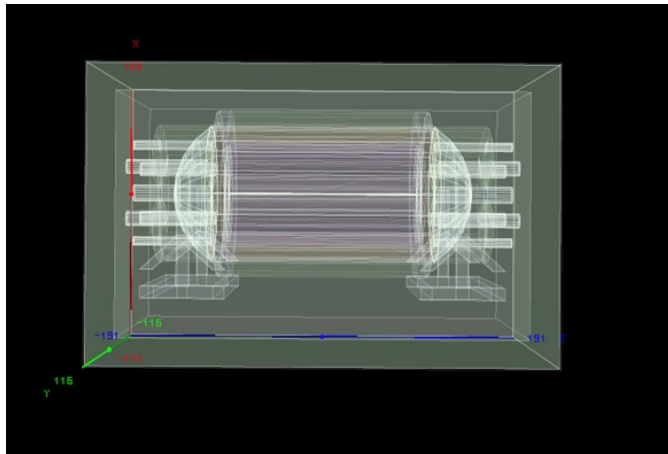
0.3%
两周



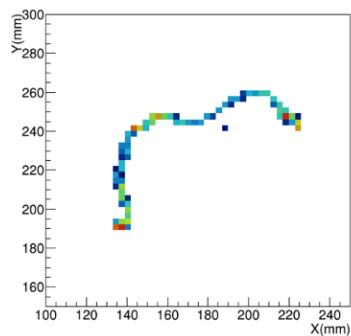
0.01%
两周



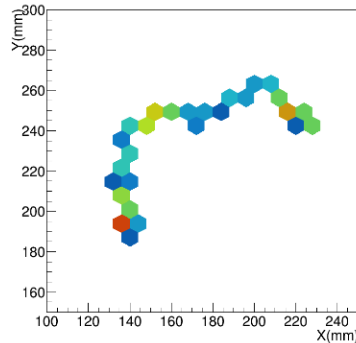
模拟软件



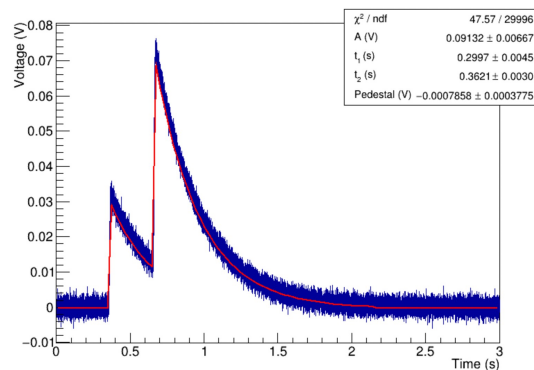
GEANT几何模型



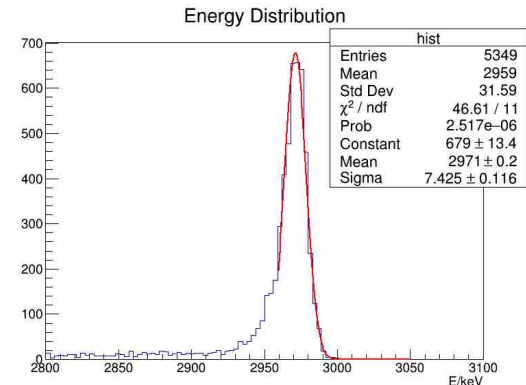
模拟信号分布



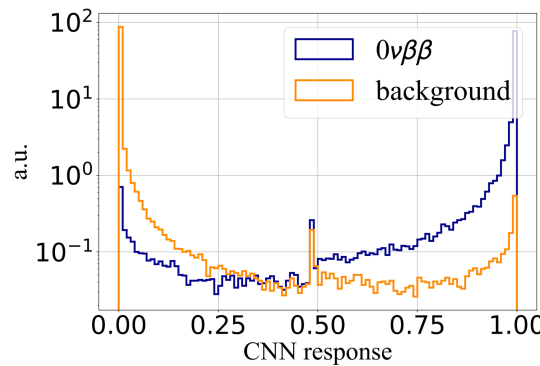
重建信号分布



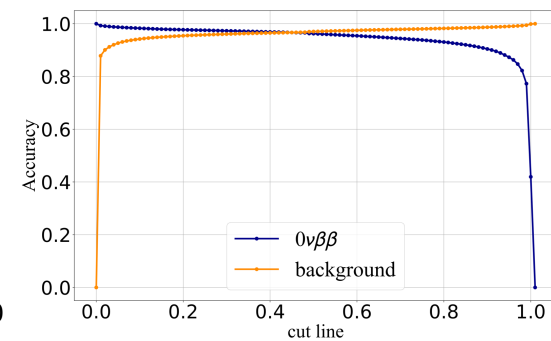
芯片输出信号与拟合重建



$0\nu\beta\beta$ 全模拟重建能谱



神经网络鉴别信号本底



- 完成了模拟和重建软件
- 芯片噪声45e-时 $\Rightarrow$ 能量分辨0.7%
- 90%信号效率时，神经网络本底压低70倍

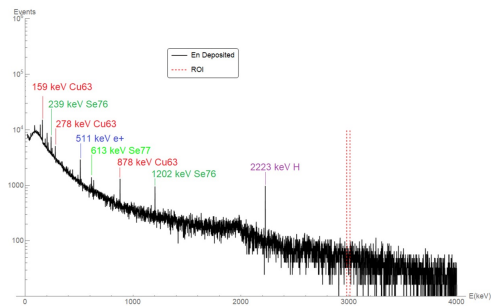
本底模拟与估计

本底来源			ROI 本底
材料	子系统	evts/yr	10^{-5} evts/(keV kg yr)
混凝土	实验大厅	0.004	0.12
铅	外屏蔽体	0.003	0.09
HDPE	外屏蔽体	0.005	0.16
不锈钢	高压气腔	0.026	0.86
无氧铜	内铜屏蔽体	0.050	1.67
POM	场笼	0.330	10.99
总计		0.42	13.9

表 2. 使用拓扑信息压低前不同来源的 γ 本底

核素	Q 值 (keV)	半衰期 (d)	产生率 (atoms/kg/d)		暴露 2 年 活度 (μ Bq/kg)	冷却 1 年 活度 (μ Bq/kg)
			计算	测量 [31]		
^{46}Sc	2367	83.8	3.1	2.18 ± 0.74	36	1.7
^{54}Mn	1377	312	14.3	8.85 ± 0.86	133	59
^{59}Fe	1565	44.5	4.2	18.7 ± 4.9	49	0.2
^{56}Co	4566	77.3	8.7	9.5 ± 1.2	101	3.8
^{57}Co	836	272	32.5	74 ± 17	318	125
^{58}Co	2307	70.9	56.6	67.9 ± 3.7	655	18
^{60}Co	2824	1.92×10^3	26.3	86.4 ± 7.8	71	62

表 4. 铜中不同放射性同位素的宇生产率，以及暴露在海平面、冷却一定时间后的活度



中子诱发材料的 γ 衰变本底能谱

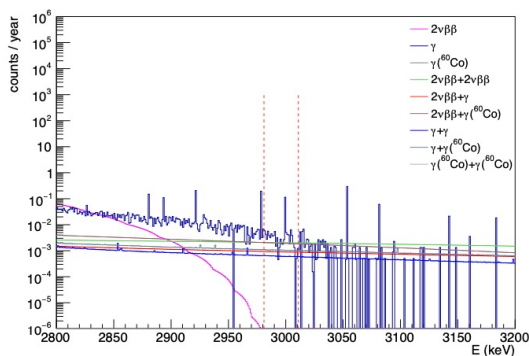
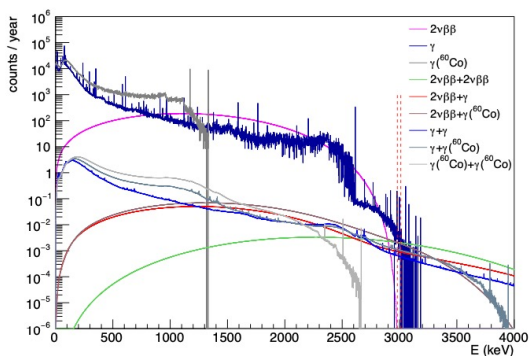
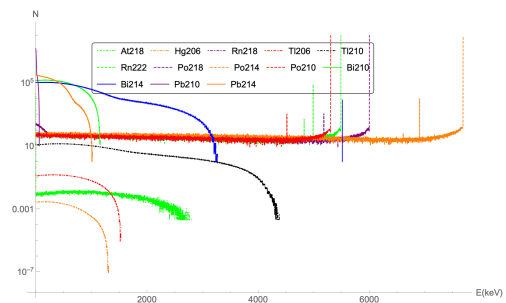


图 14. 采用天然 SeF_6 气体且无单事件几何信息抑制的 NvDEx -100 实验中不同单事件和堆积事件的本底能谱



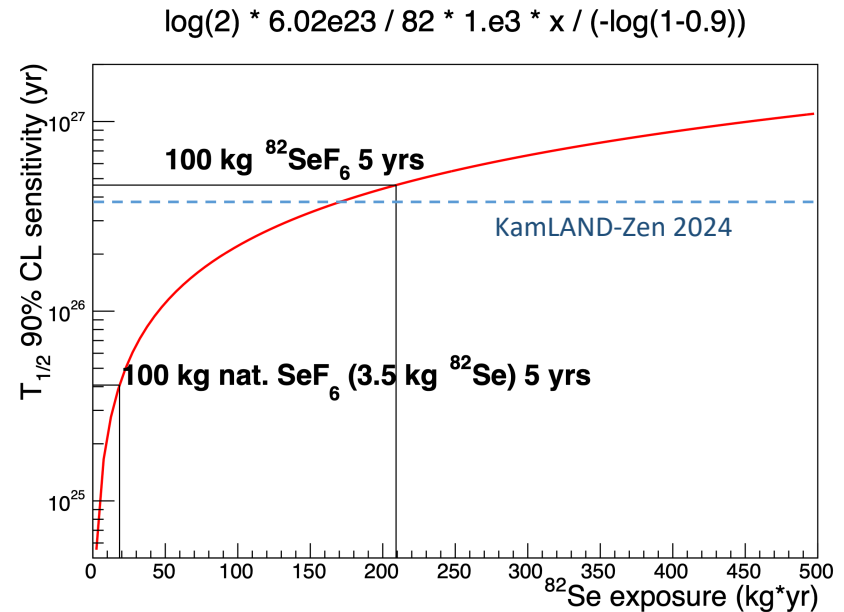
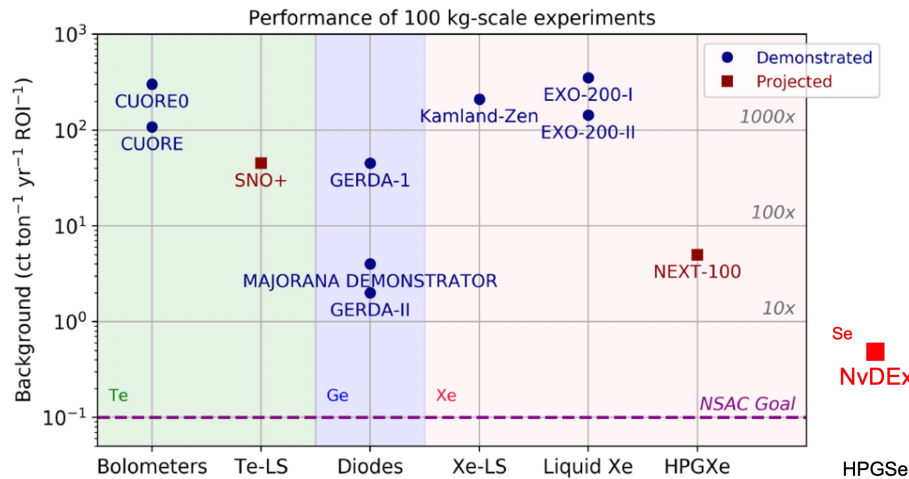
^{222}Rn 衰变链产生的本底能谱

完成了初步的实验本底模拟或上限估计

- γ 、中子、宇生、 α 、 β 、氦、 μ 、 ν 、 $2\nu\beta\beta$

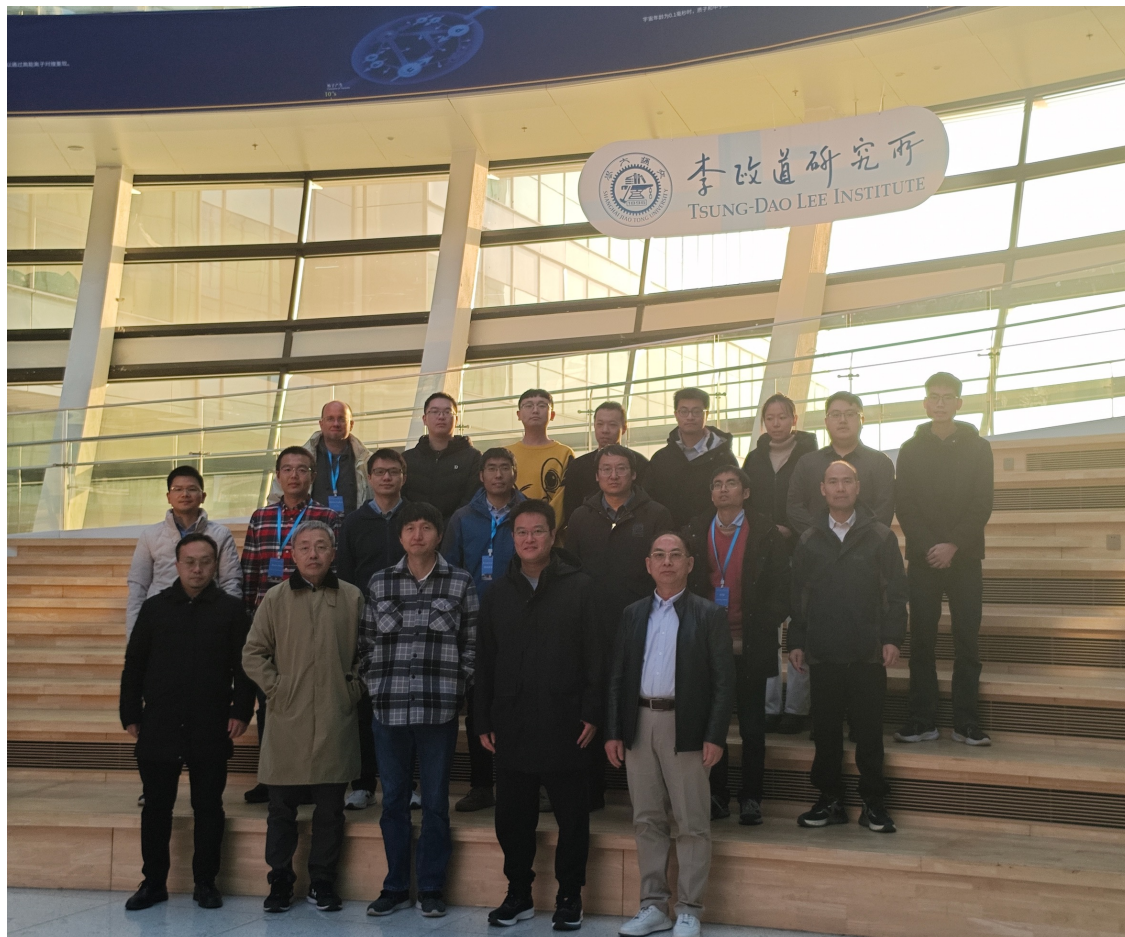
本底水平与敏感度估计

“100kg-class” experiments:



- 本底~<0.5 ct / (ton yr ROI)
 - 低于世界上主要现有和规划中的实验
 - ~2*10⁻⁵ count/yr/keV/kg
- 仅用100kg提纯⁸²SeF₆气体，运行5年，即可超过当前世界最高半衰期敏感度 - KamLAND-Zen（近吨级实验）

NvDEx合作组



- 现有来自8家单位的>30位合作者
- 急需低本底实验人才——欢迎加入！

未来计划

- 2025:
 - 验证基于自研芯片的读出平面，测得合理的能量分辨率（电子漂移）
 - 继续申请入驻CJPL
- 2026:
 - 尝试突破长积分时间问题，验证离子漂移信号读出
 - 工程批芯片流片
 - 完成入驻CJPL申请流程
- 2027:
 - 系统组装调试，开始数据采集（使用SF₆气体，无气密洁净间）

小结

- NvDEx实验概念使用全新的低噪声芯片无放大电荷读出技术，可以实现 ^{82}Se 的高Q值与TPC事件拓扑重建能力这两大优势的结合
- 进行了4次读出芯片流片，得到最小等效电子噪声49e-
- 使用自研芯片阵列成功探测到了 α 粒子径迹
- 长信号积分时间的读出电路待突破
- 气腔、铜屏蔽体加工组装完成，正在进行气路接管
- 预期极低的本底水平： $\sim 0.5 \text{ ct / (ton yr ROI)}$

谢谢☺ 欢迎加入！