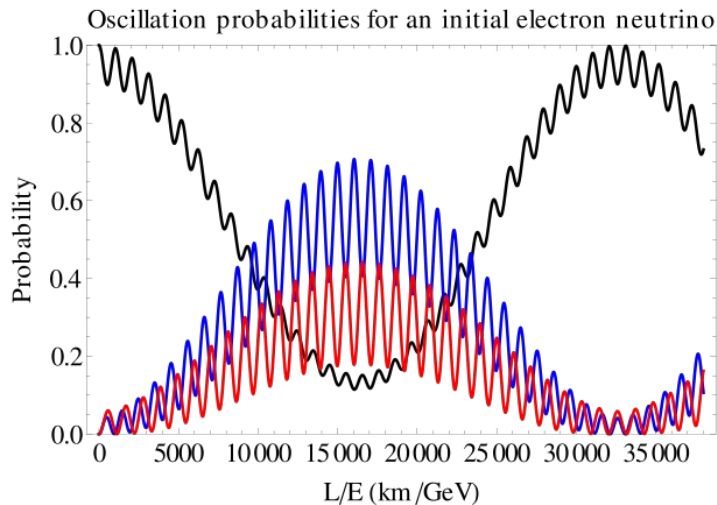


NvDEx实验进展

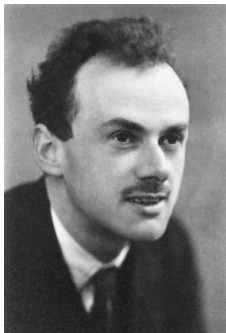
仇浩

中科院近代物理研究所

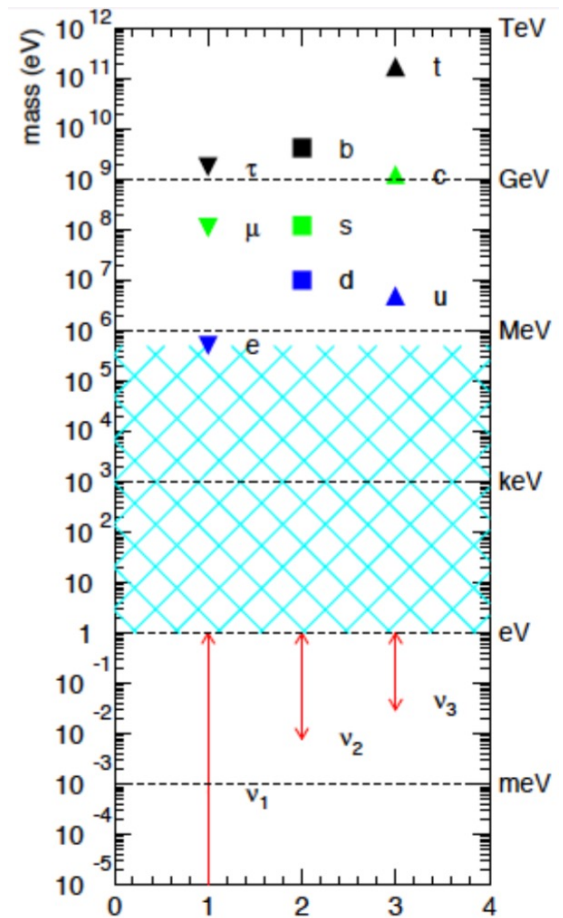
中微子



or

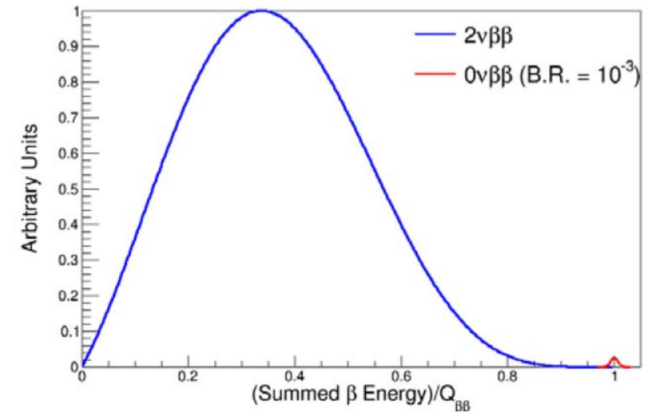
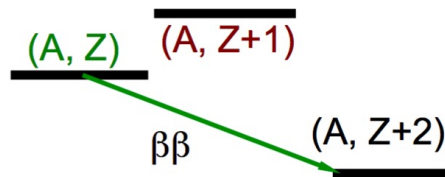
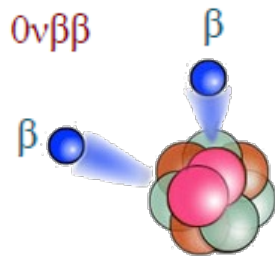
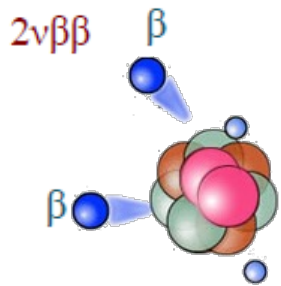


?



- 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



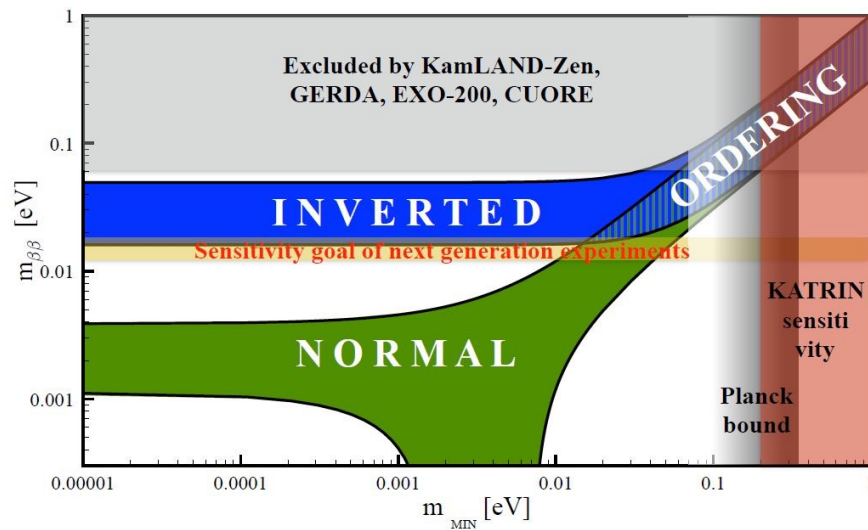
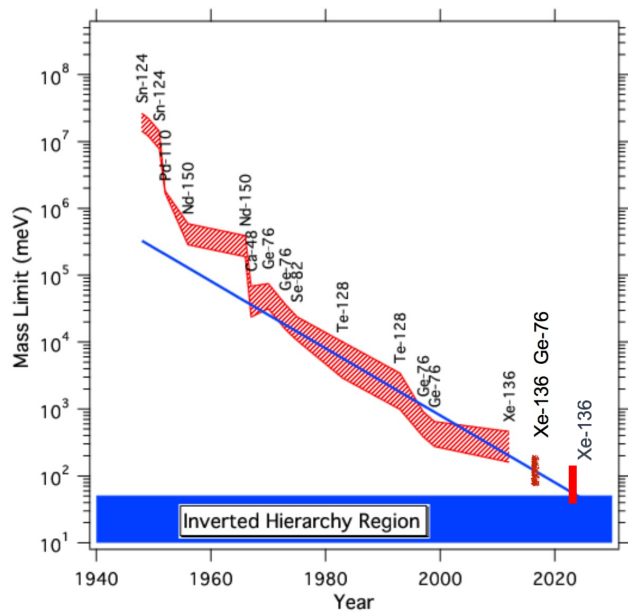
- 由于能级关系，有些原子核无法发生单 β 衰变，只能发生 $\beta\beta$ 衰变
- 如果观测到 $0\nu\beta\beta$ 衰变
 - 证明中微子是Majorana粒子 \Rightarrow 超出标准模型
 - 利用跷跷板机制解释其及其微小的质量
 - 限制中微子的绝对质量，以及质量排序
 - 可能通过轻子数不守恒和CP对称破缺，解释宇宙正反物质不对称

半衰期 & $m_{\beta\beta}$

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

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

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 $\rightarrow \langle m_{\beta\beta} \rangle$ PMNS矩阵 $\rightarrow U_{ei}^2$ ν 质量 $\rightarrow m_i$

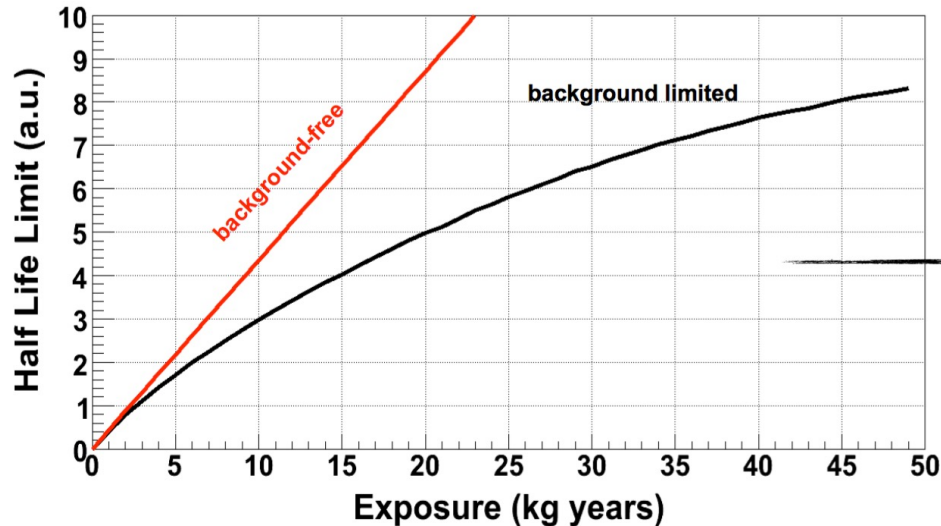


- 过去~70年, $0\nu\beta\beta$ 衰变实验敏感度一直在提高
- $m_{\beta\beta} < 100 \text{ meV}$ $T_{1/2} > 10^{26} \text{ y} \Rightarrow$ 难度很大
- 下一代实验将覆盖反常质量排序情况下所需敏感度

实验敏感度

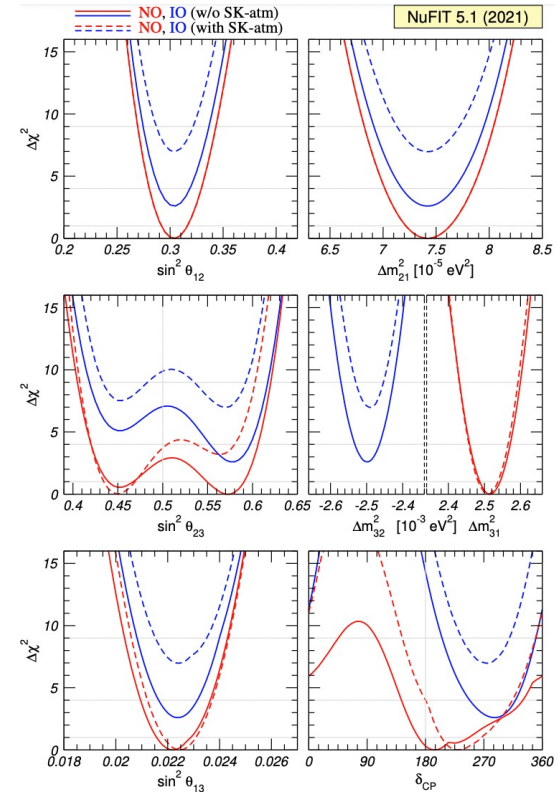
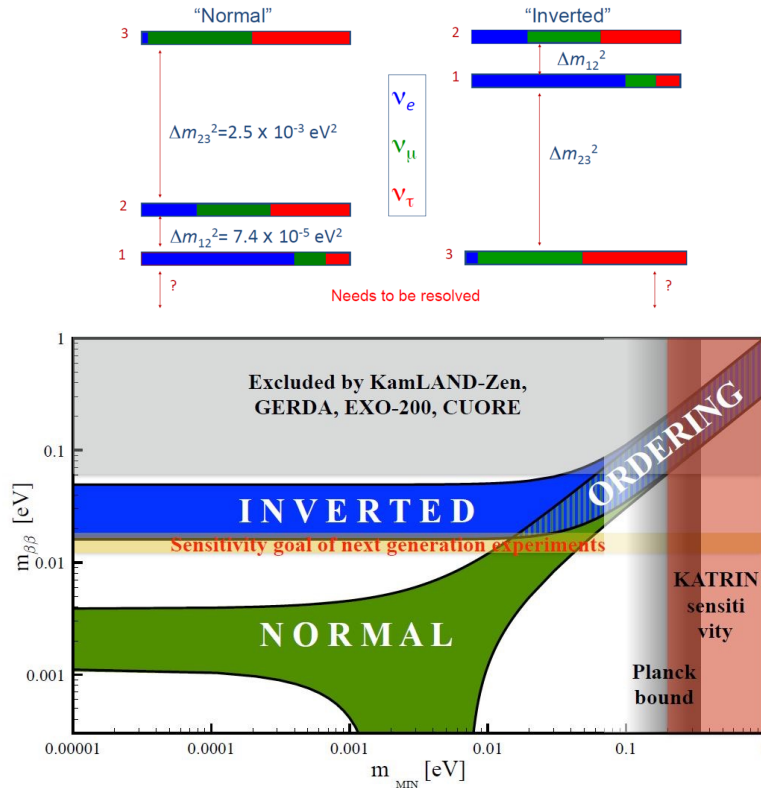
0本底情况: $T_{1/2}^{0\nu}(\text{exp}) = (\ln 2) N_a \frac{a}{A} \varepsilon \frac{MT}{n_{CL}}$ ← 曝光量: 质量 × 实验时间

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 $\propto (MT)^{-1/4}$

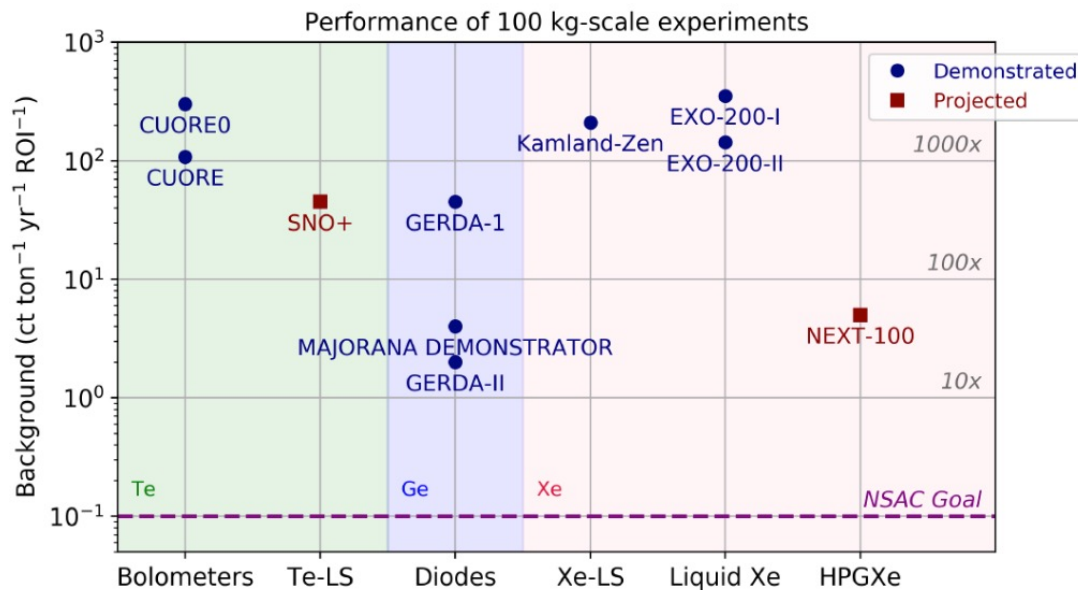
实验敏感度



- 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 10 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 $\sim < 0.1 \text{ ct / ton yr ROI}$

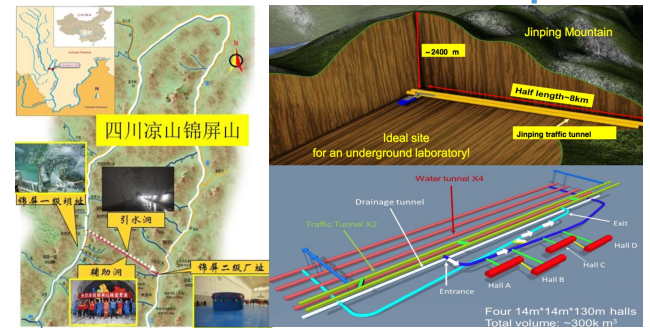
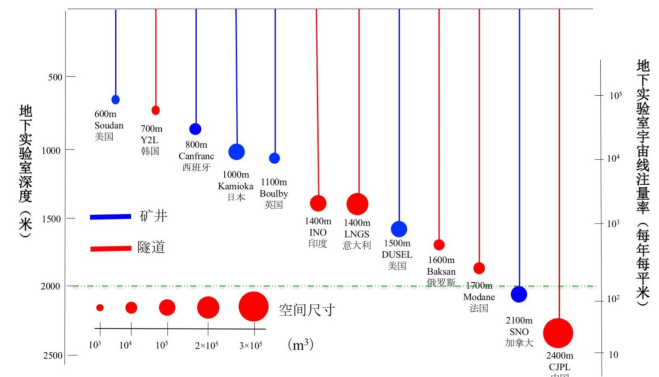
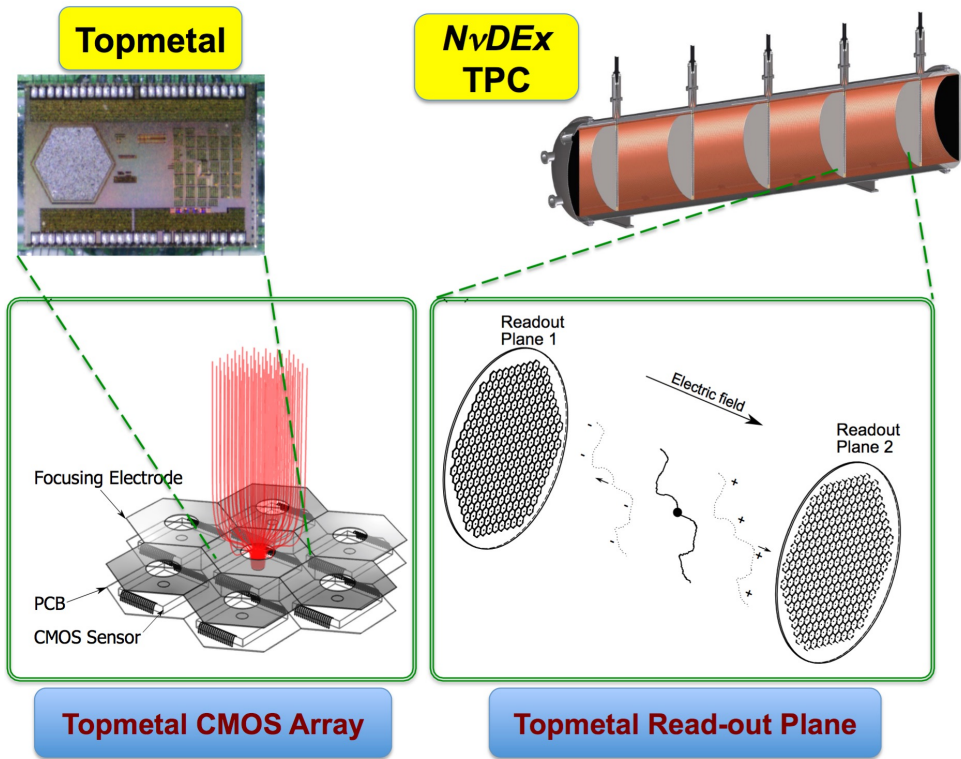
实验敏感度

“100kg-class” experiments:



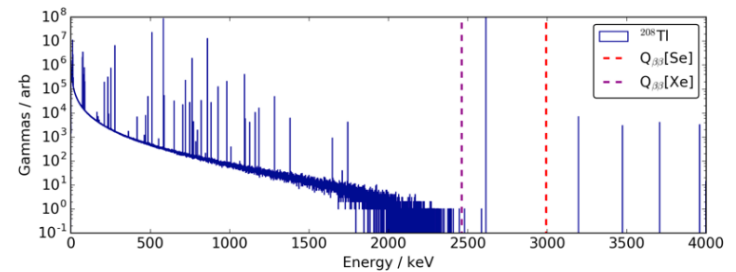
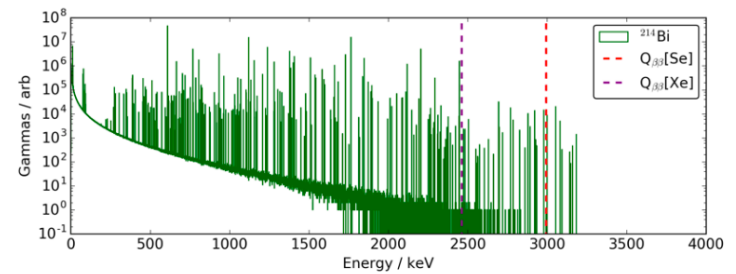
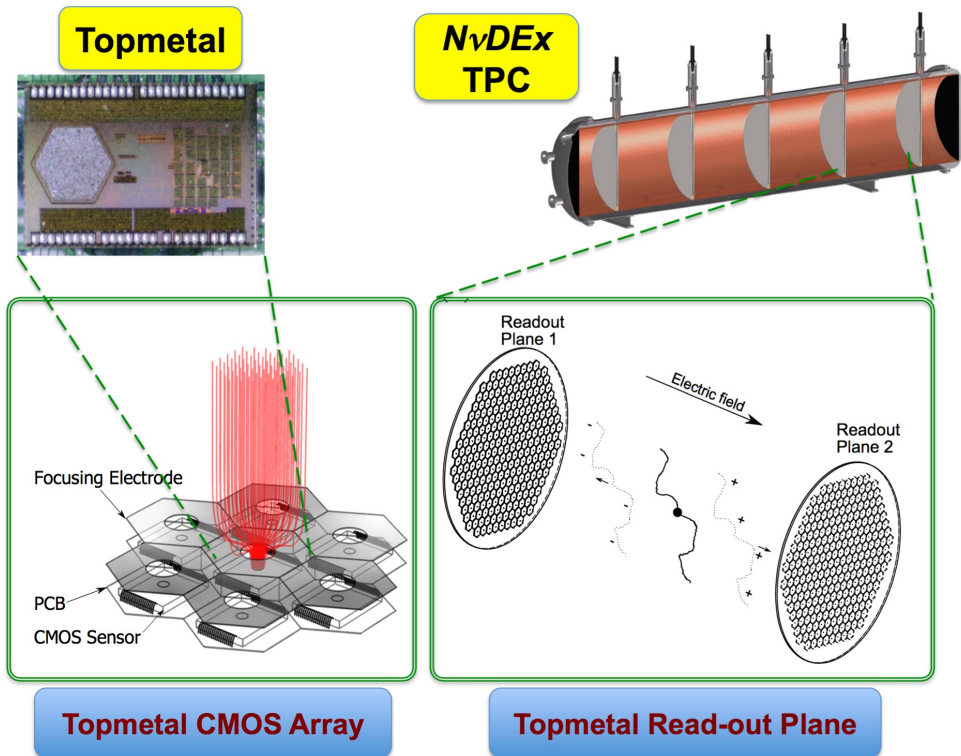
- 本底水平 $\sim < 0.1$ ct / ton yr ROI也是美国NSAC提出的 $0\nu\beta\beta$ 实验目标本底水平
- 现有实验本底水平高一个量级以上

NvDEX实验概念



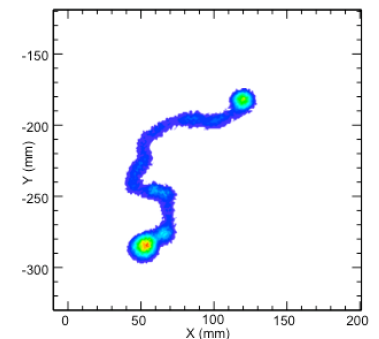
- 高压 $^{82}\text{SeF}_6$ 气体TPC，使用Topmetal CMOS芯片直接读出
 - CJPL世界最深的地下实验室

N_vDEX实验概念



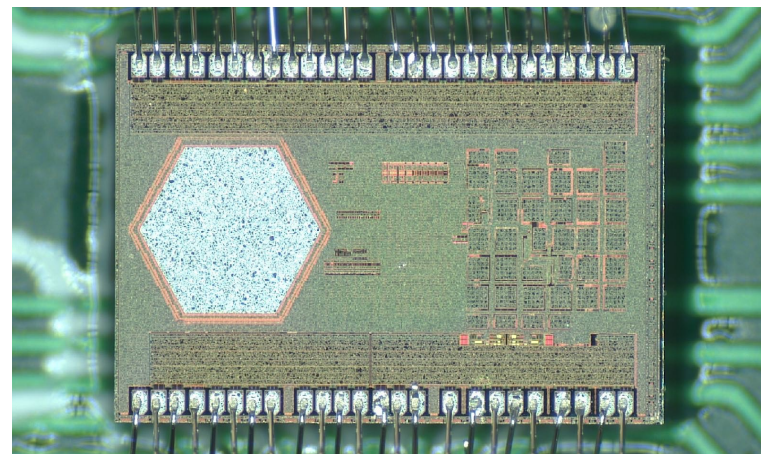
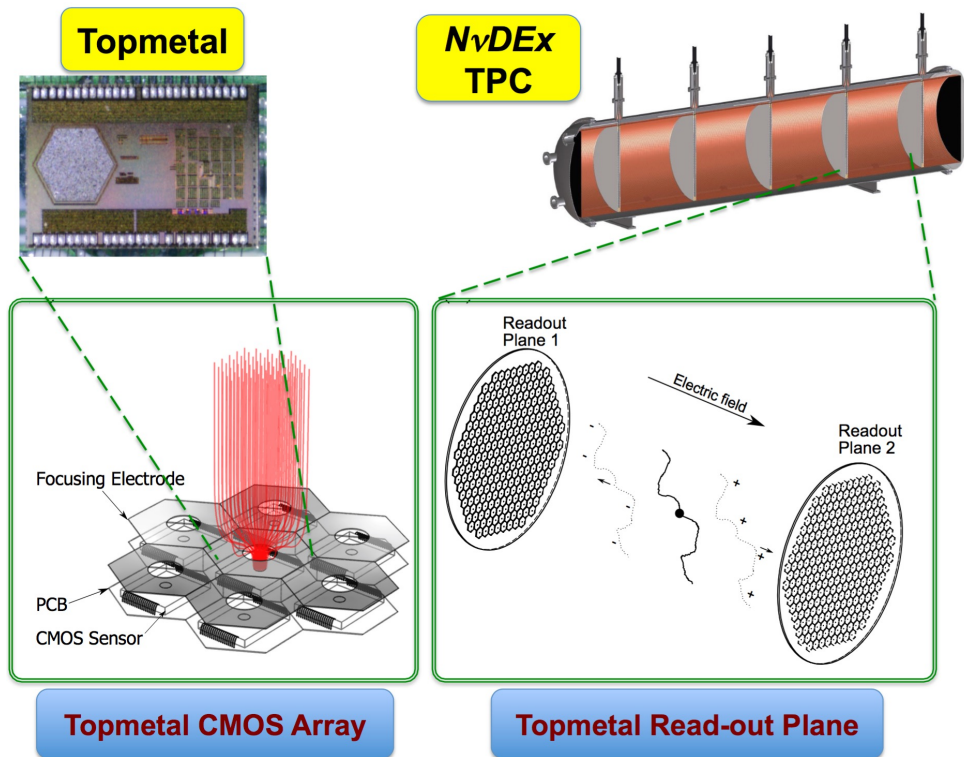
天然放射性 γ 本底能谱

- 高压 $^{82}\text{SeF}_6$ 气体TPC，使用Topmetal 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

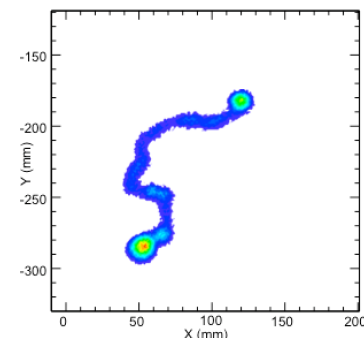
N_vDEx实验概念



Topmetal-S芯片

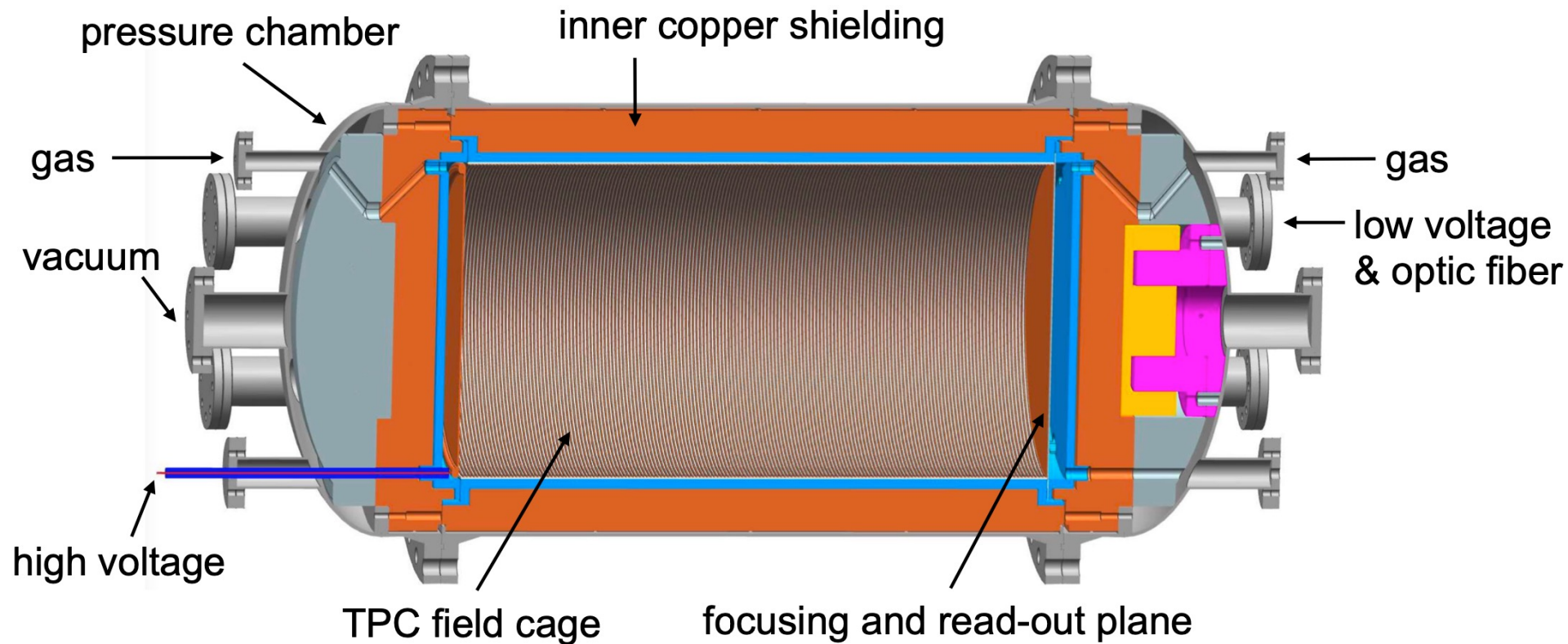


- 高压⁸²SeF₆气体TPC，使用Topmetal CMOS芯片直接读出
 - CJPL世界最深的地下实验室
 - ⁸²Se衰变Q值高(2.996 MeV)，高于绝大多数自然本底
 - TPC可使用事例几何特征鉴别信号本底
 - 无雪崩放大直接读出，能量分辨率更好(~1% FWHM)



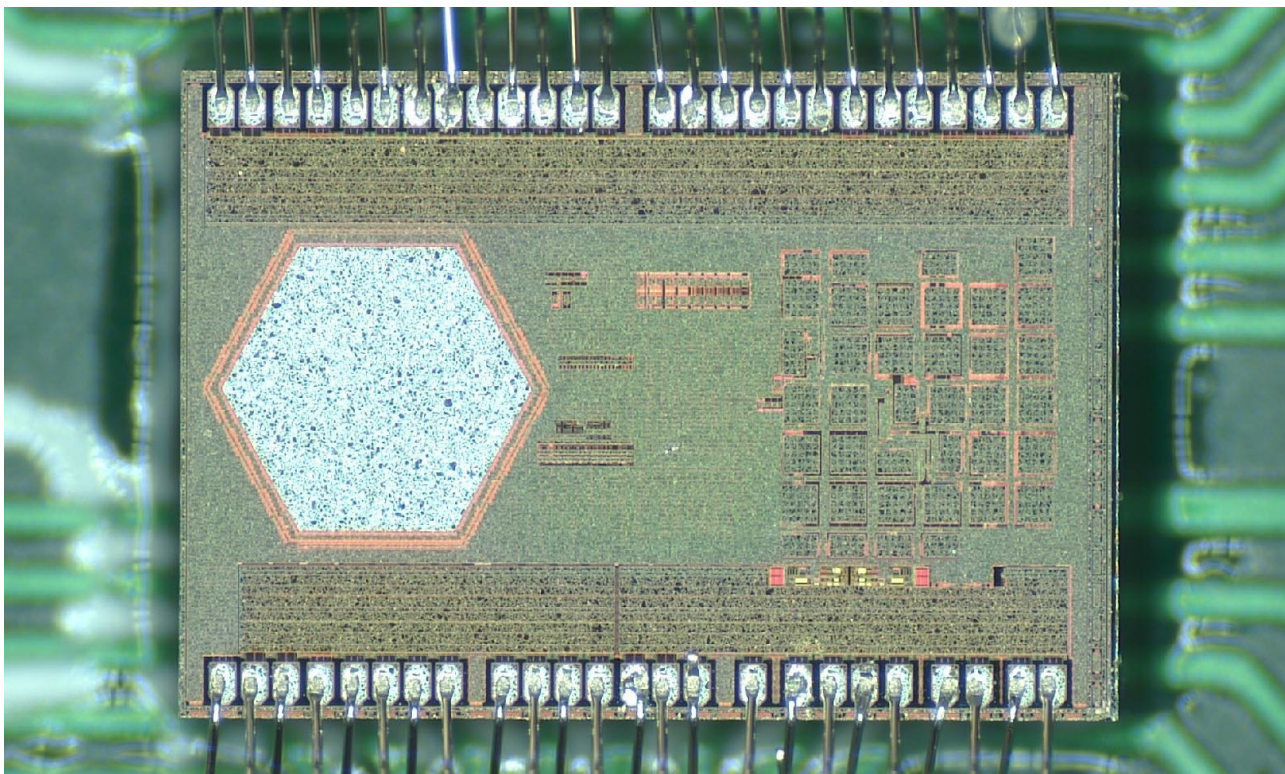
0 ν $\beta\beta$ 事例能量沉积

N_vDEx-100



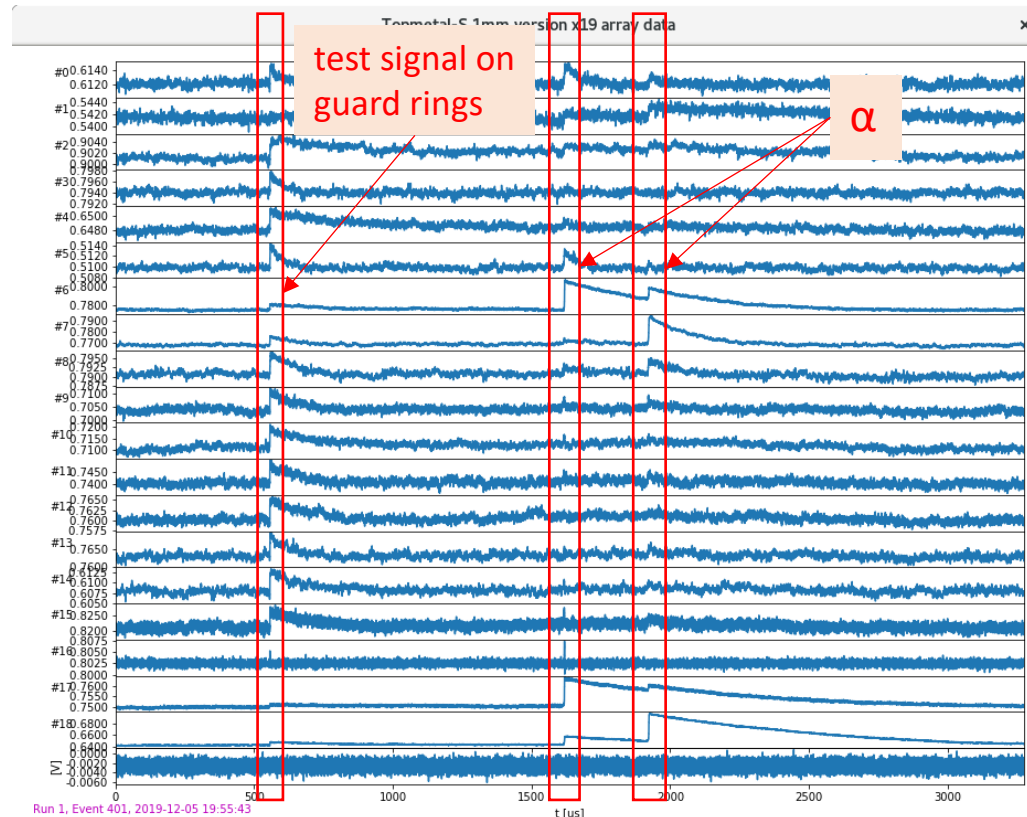
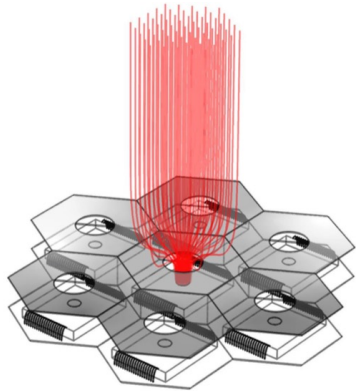
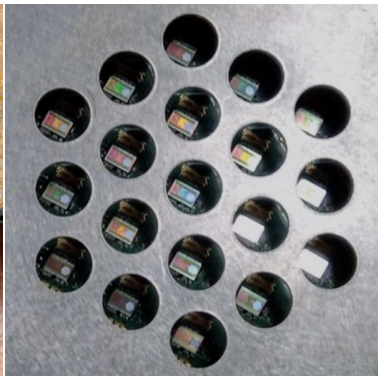
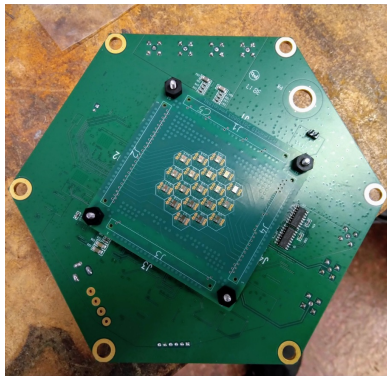
- 灵敏体积含有~100kg 10 atm $^{82}\text{SeF}_6$ 气体
- 桶部长160cm，气腔内径120cm
- 首先使用无毒的 SF_6 气体
 - 摸索、验证高压气腔、铜屏蔽体、TPC场笼、气体系统制造工艺
 - 检验10 atm气压下长期运行气密性—— SeF_6 有毒，环境含量要求<0.05 ppm

Topmetal-S芯片



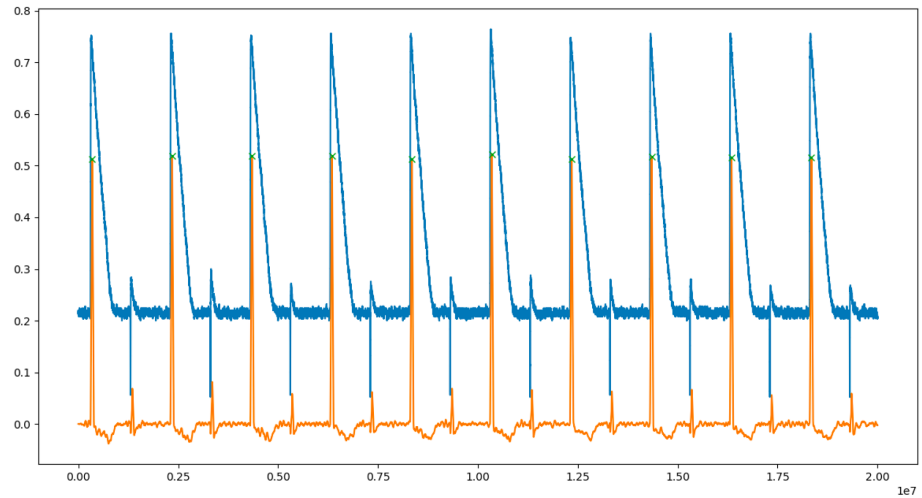
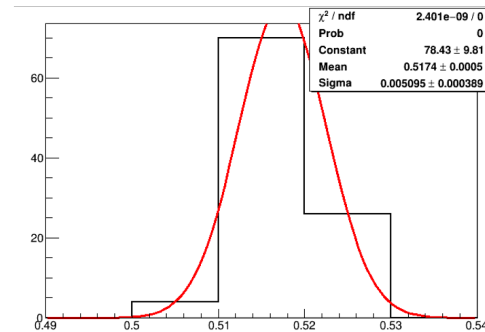
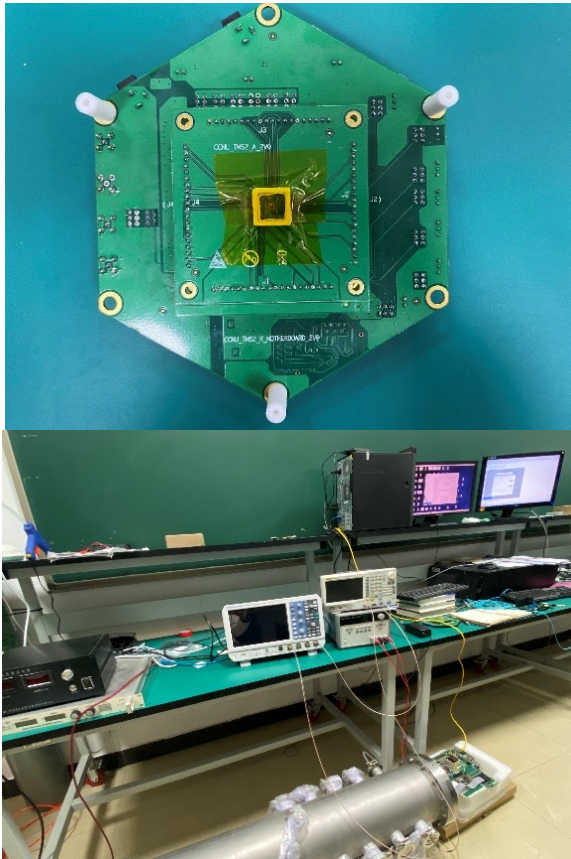
- Topmetal-S芯片可实现无放大离子漂移探测，是NvDEx技术方案实现的关键技术
- 预期电子学噪声达到 $30e^-$ ，是实现1% FWHM能量分辨率的关键
- $2\text{ mm} \times 3\text{ mm}$
- 已流片两次，即将进行第三次流片

19 Topmetal-S芯片阵列（第一版）



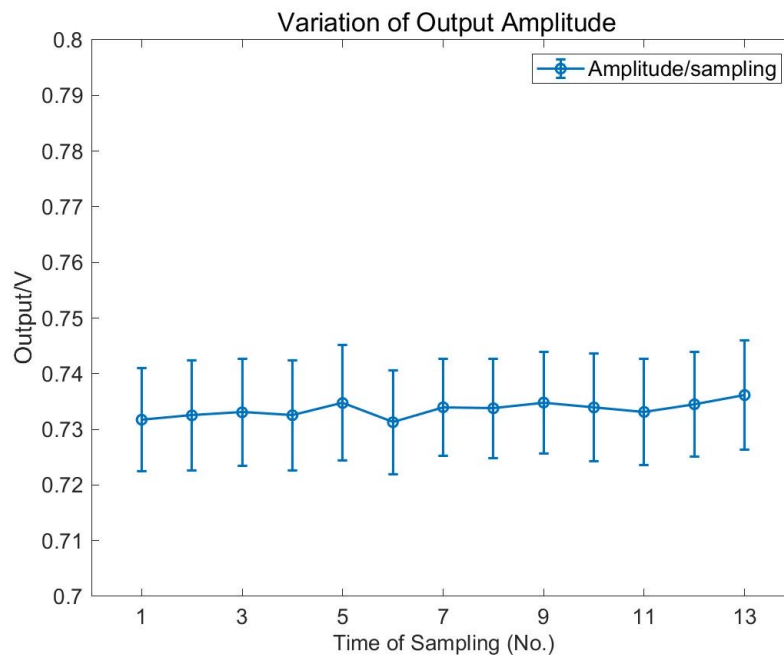
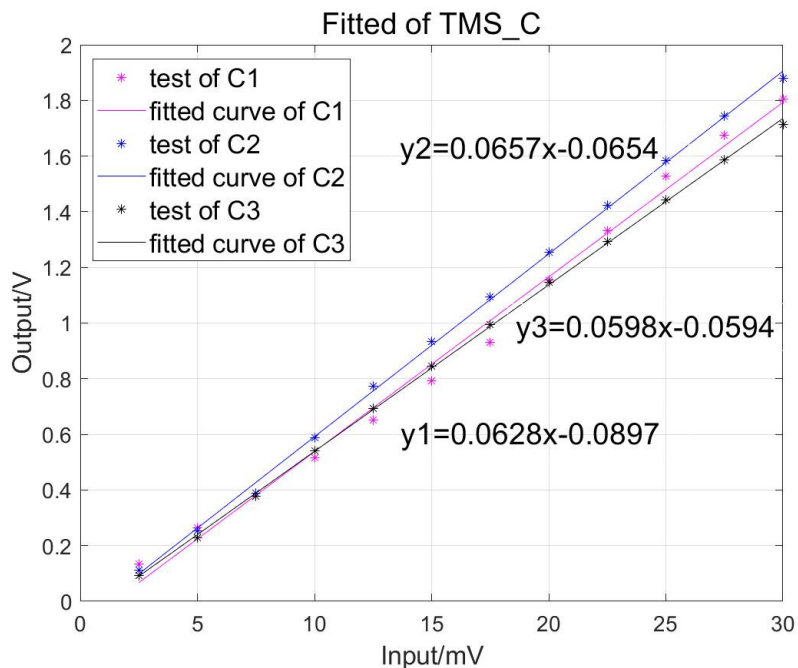
- 使用 ^{241}Am α 源测试了19个Topmetal-S芯片的阵列（第一次流片）
- 观察到 α 源的信号，但幅度仅为预期值的5%
- 因为高增益时偏置电压无法稳定工作，CSA中的放大倍数不够高

Topmetal-S芯片电学测试（第二版）



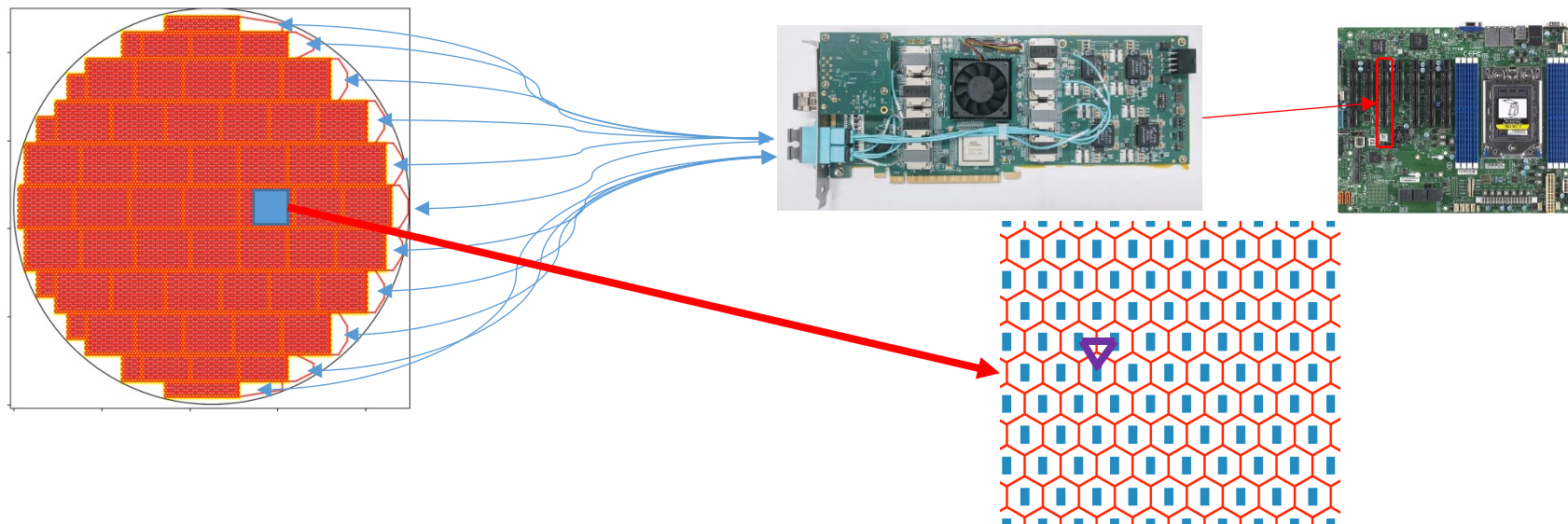
- 每个芯片都能对信号正确响应
- 第一版芯片CSA中放大倍数的问题解决
- 已实现了等效输入噪声 $< 130e^-$ （NvDEx目标：45e-）

Topmetal-S芯片电学测试（第二版）



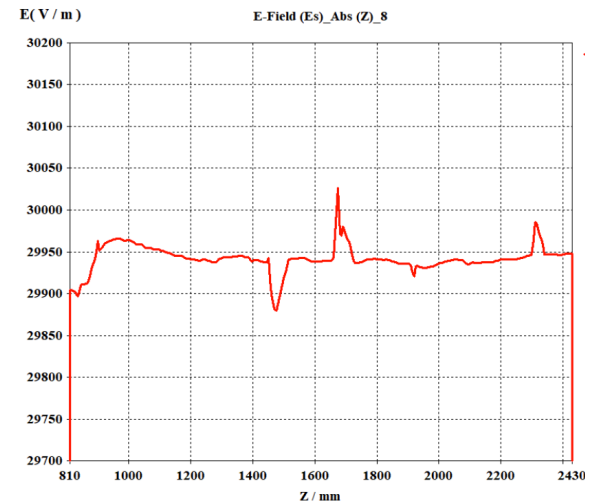
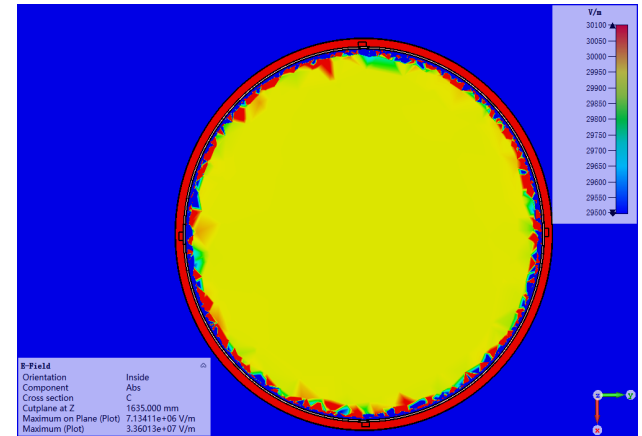
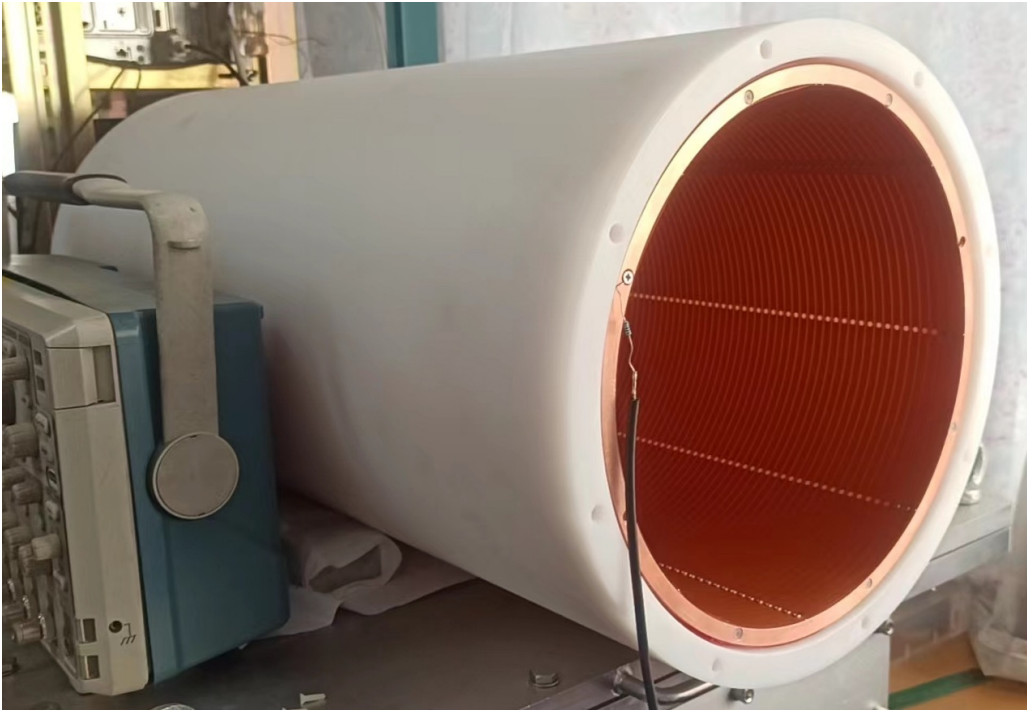
- 线性度、稳定性达到要求
- 即将进行 α 源信号测试

读出平面 & DAQ



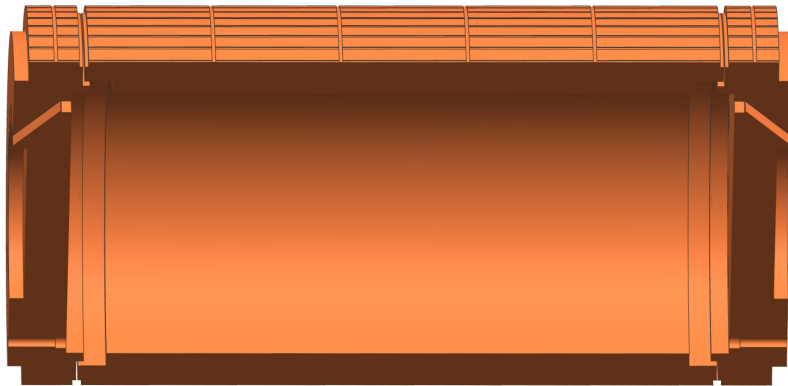
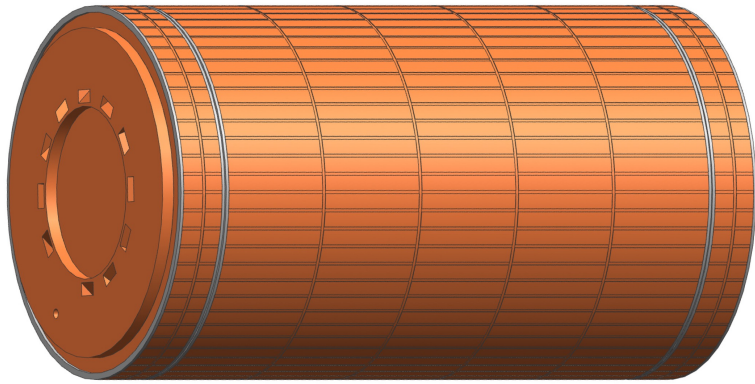
- 芯片间距：8mm
- 采样率：0.5~20 kSps
- 基于 PCIe 的数据采集系统：FELIX（用于 ATLAS、DUNE、sPHENIX 和 CBM）
 - 首个原型机已制作完成
- 固件和软件开发中

TPC场笼



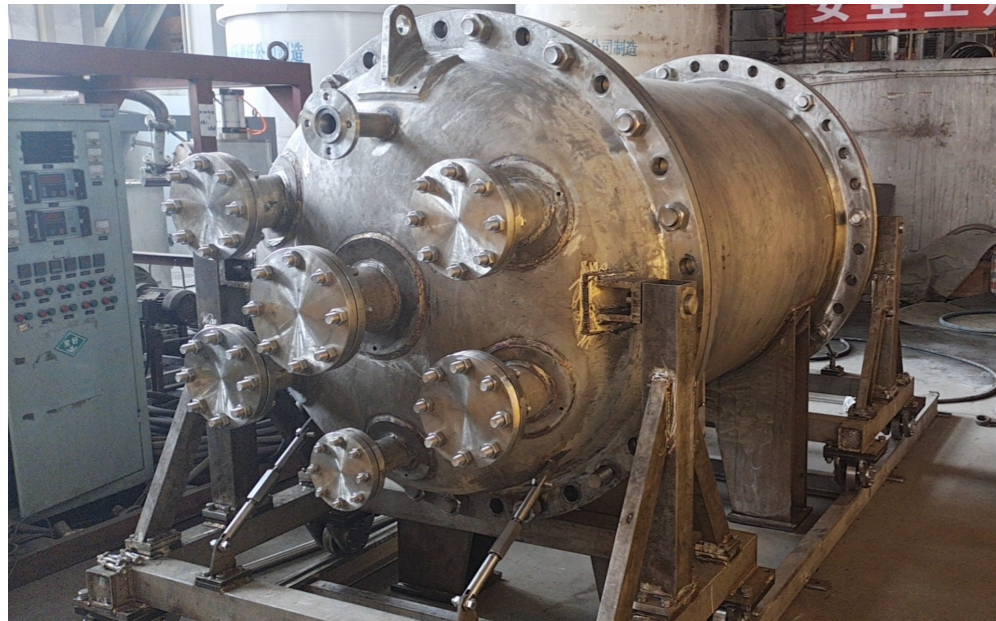
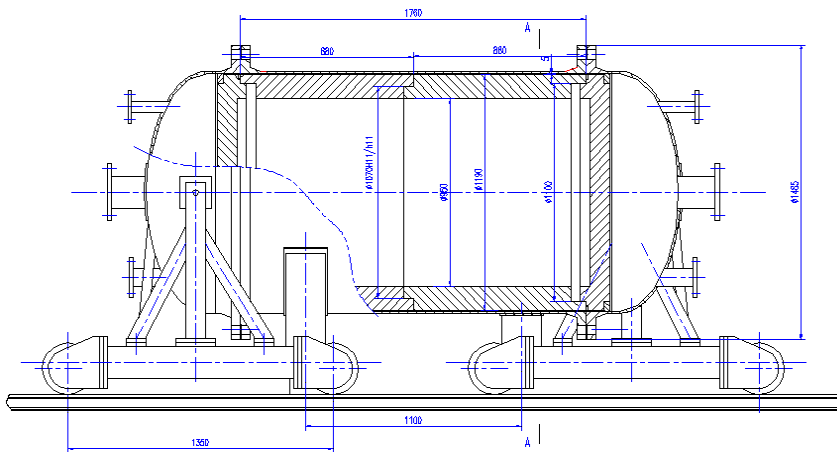
- 2.5cm厚聚甲醛(POM)绝缘层+POM支撑结构+FPCB
- 完成初步设计，直径30 cm的原型机加工完成，正在进行测试

铜屏蔽体



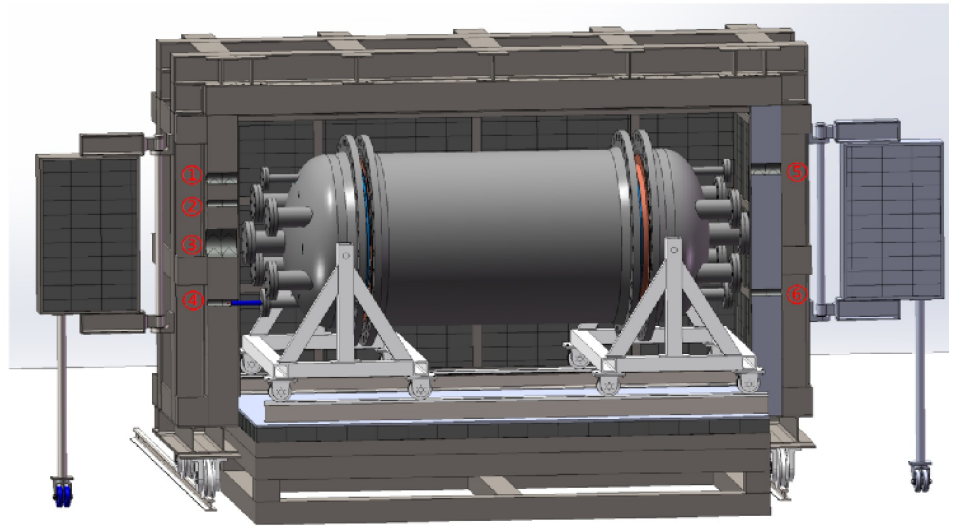
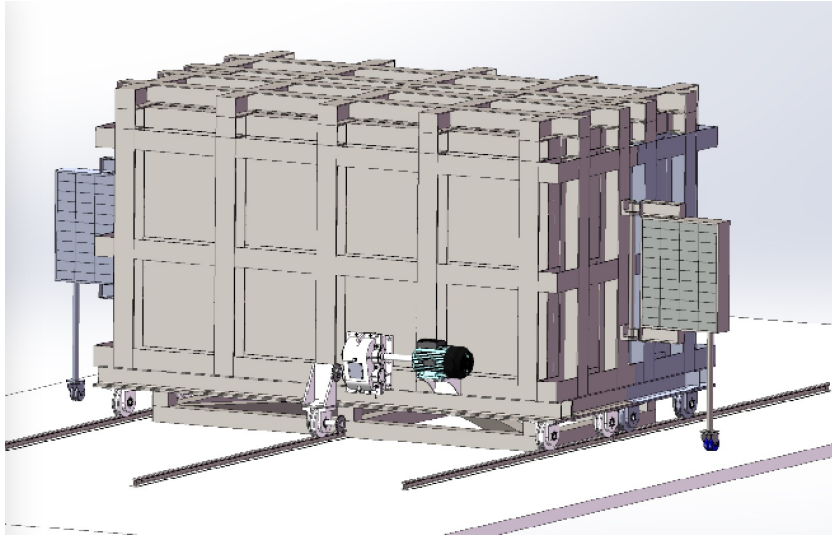
- 低本底无氧铜
- 厚12 cm
- 完成加工

气腔



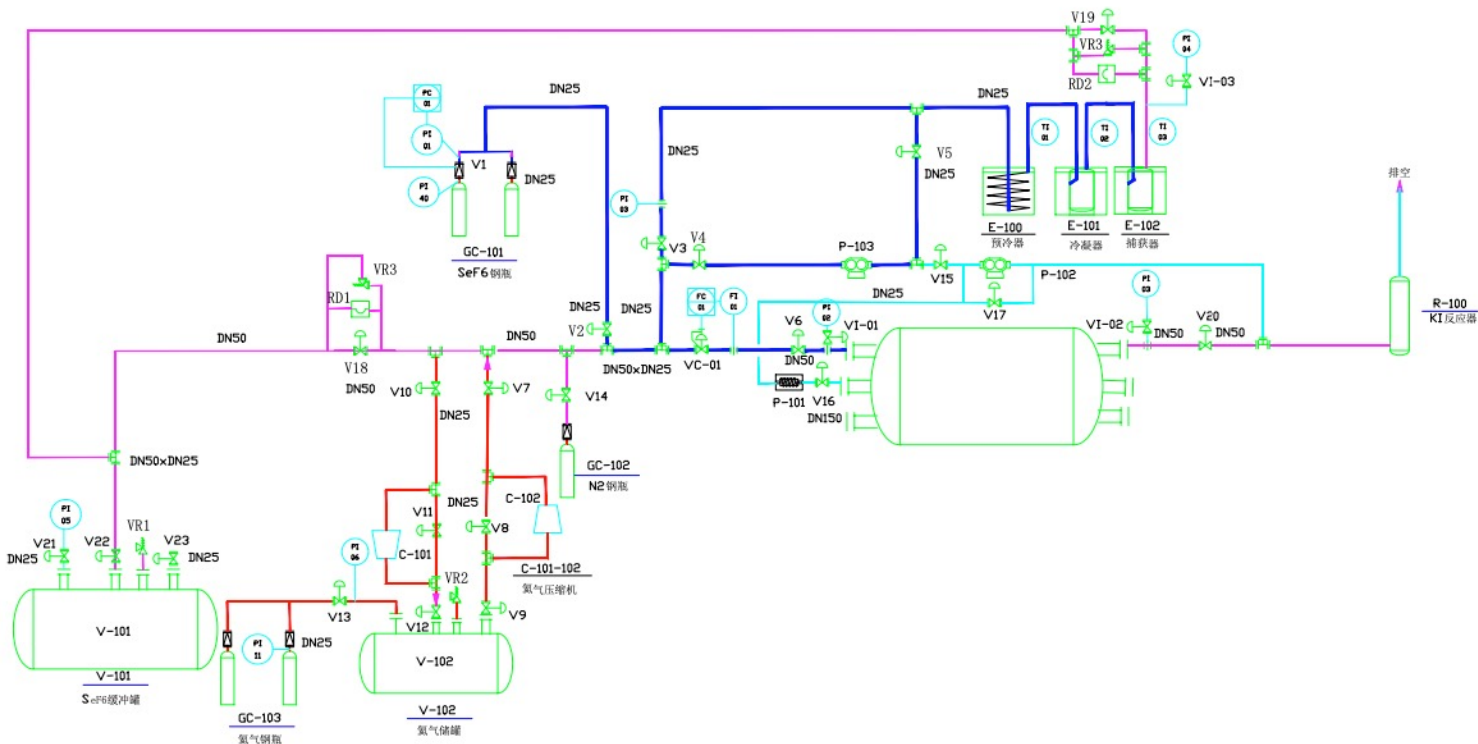
- 316L不锈钢
- 桶部长度：176 cm， 内径：120 cm， 厚：1 cm
- 漏率不大于 1×10^{-10} mbar L/s
- 加工完成，即将与铜屏蔽体组装

外屏蔽



- 20 cm厚铅
- ~60 cm厚高密聚乙烯
- 设计中

气路系统



- SeF₆ 有毒：环境中 < 0.05 ppm ⇒ 多层安全措施
- 冷阱用于长期储存SeF₆
- 紧急情况下，向紧急泄压罐泄压至低于一个大气压
- SeF₆ 冷凝、抽真空后，微量余气吹扫至SeF₆ 反应器
- 每次充SeF₆前先用SF₆测试系统气密性

气路系统



预冷器



冷凝器



制冷机



真空泵



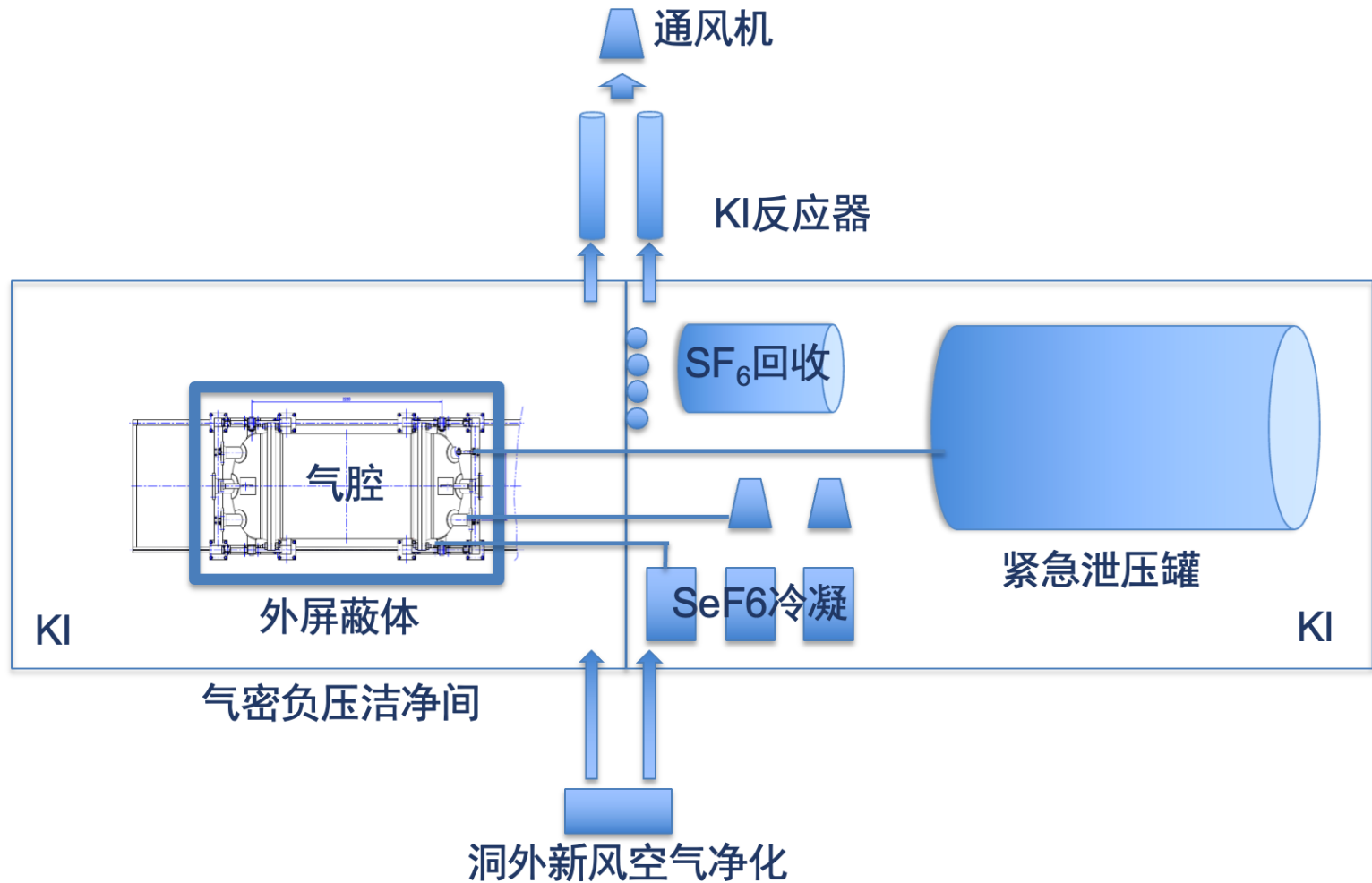
紧急泄压罐



SF₆ 储气罐

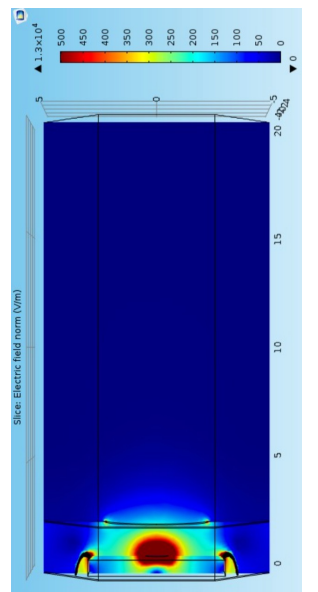
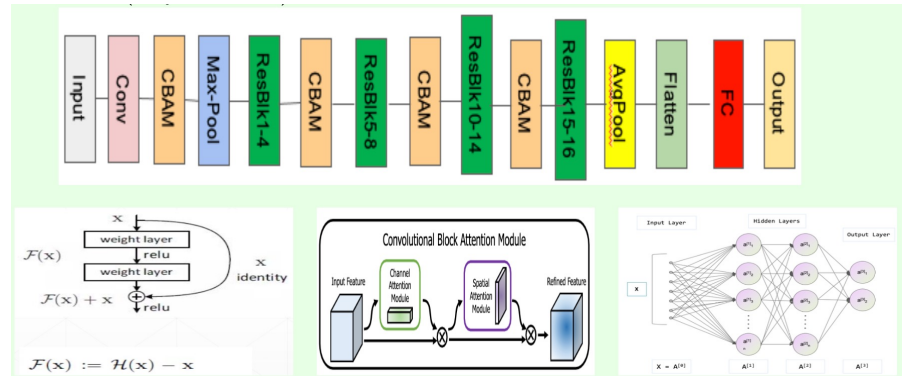
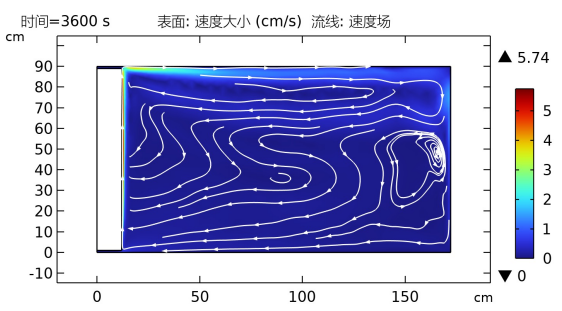
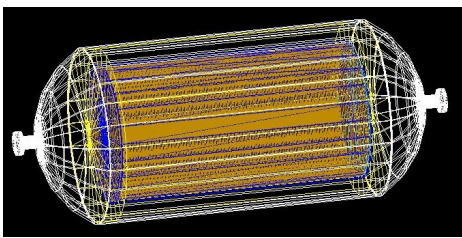
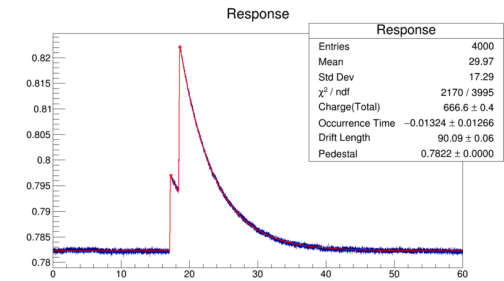
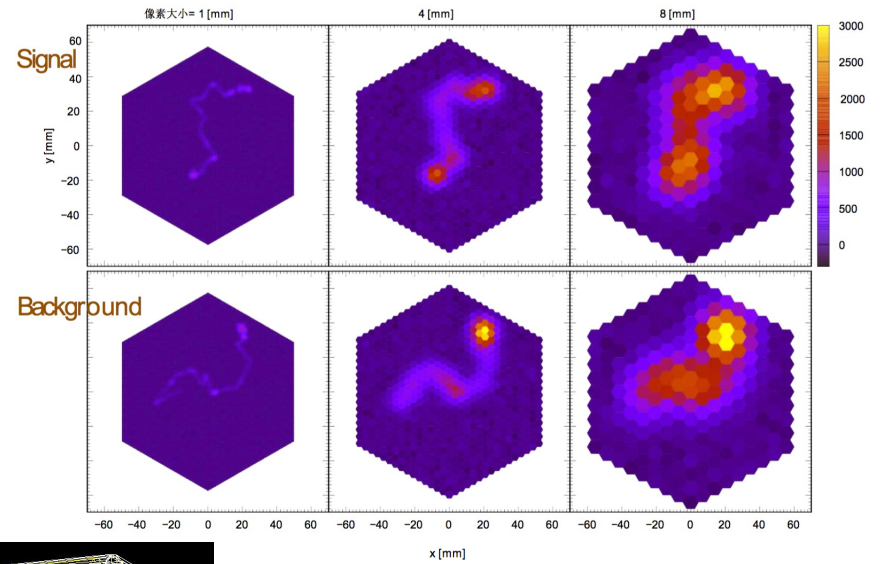
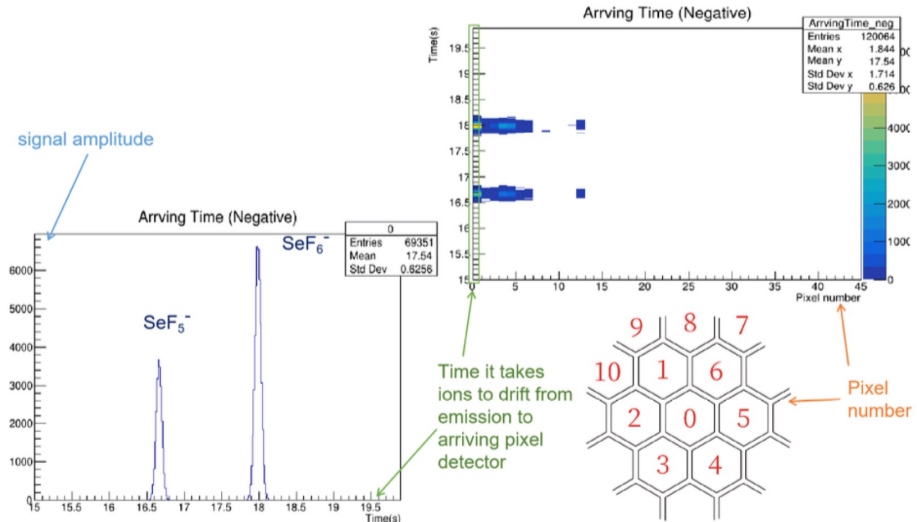
- 气路系统大部分部件已经制造、采购
- 等待与气腔组装

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，内部布置足量KI反应剂
- 发生SeF₆泄露时紧急锁死——第三道安全防线

模拟

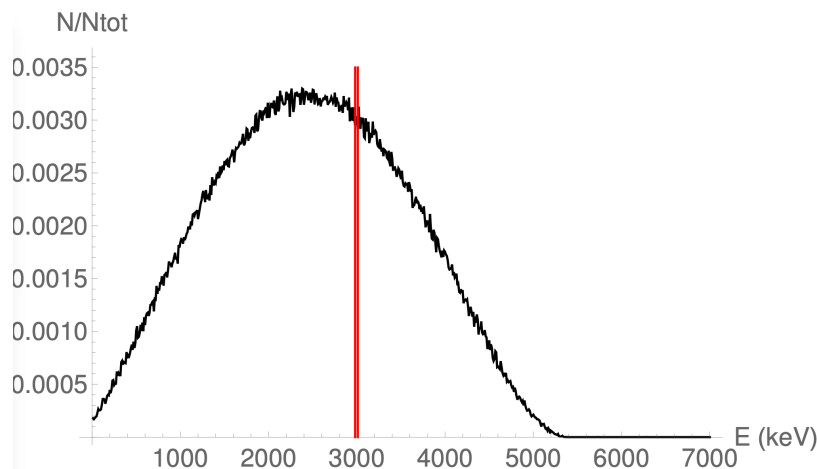


本底估计- γ

Source		Background in ROI	
Material	Subsystem	evts/yr	10^{-5} evts/(keV kg yr)
Concrete	Experimental hall	0.004	0.12
Lead	External shielding	0.003	0.09
HDPE	External shielding	0.005	0.16
Steel	Pressure vessel	0.026	0.86
Copper	Inner copper shielding	0.050	1.67
POM	Field cage	0.330	10.99
Total		0.42	13.9

- 假设天然放射性核素含量与NEXT相同，对于100kg气体，不使用事件拓扑性质进行本底压低时，ROI本底~0.4 evts/yr
- 使用事件拓扑性质进行本底压低时，ROI本底 ~< 0.04 evts/yr

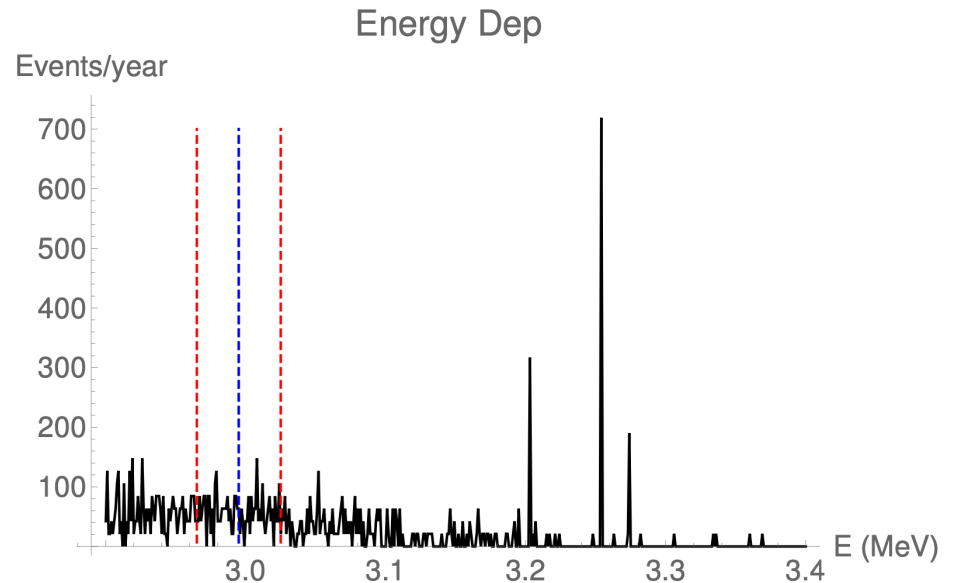
本底估计-中子



- $n + {}^{82}\text{Se} \rightarrow {}^{83}\text{Se} \rightarrow {}^{83}\text{Br} + e + \bar{\nu}_e \rightarrow {}^{83}\text{Kr} + e + \bar{\nu}_e$ Q 值: 3.7, 0.95 MeV
- $n + {}^{19}\text{F} \rightarrow {}^{20}\text{F} \rightarrow {}^{20}\text{Ne} + e + \bar{\nu}_e$ Q 值: 7.0 MeV
- $n + {}^{207}\text{Pb} \rightarrow {}^{208}\text{Pb} + \gamma$
- 计划在铅屏蔽层外加足够厚度(~60cm)的HDPE屏蔽层, 使中子本底 \ll 天然放射性 γ 本底

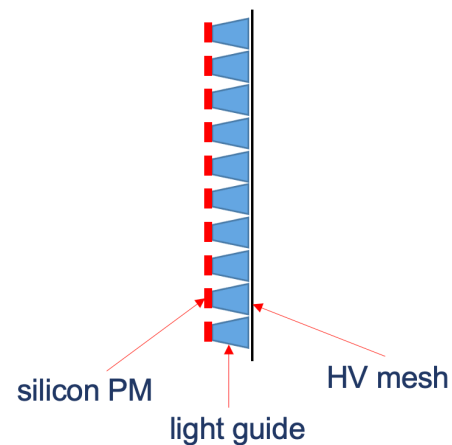
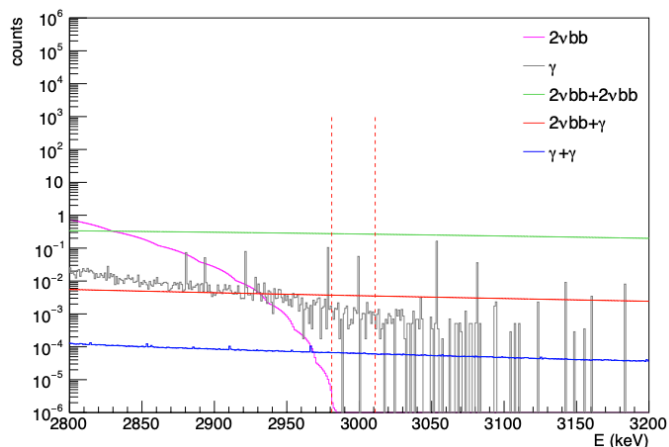
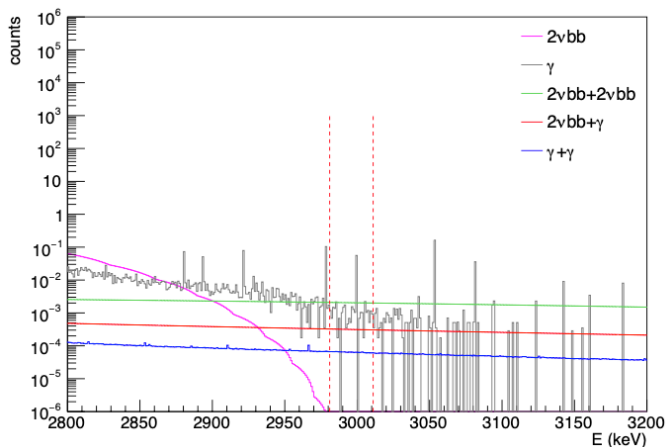
本底估计-宇生本底

isotope	Q (MeV)	$T_{1/2}$
^{54}Mn	1.4	312d
^{56}Co	4.6	77d
^{57}Co	0.8	272d
^{58}Co	2.3	71d
^{60}Co	2.8	5.3yr



- 铜中产生的 ^{56}Co 是最重要的宇生本底核素
 - 在兰州被宇宙线辐照后，活度 $\sim 300 \mu\text{Bq/kg}$ ，ROI本底 $\sim 3400 \text{ evts / yr}$
 - 需要约 3 年的时间地下放置，使其低于天然放射性 γ 本底

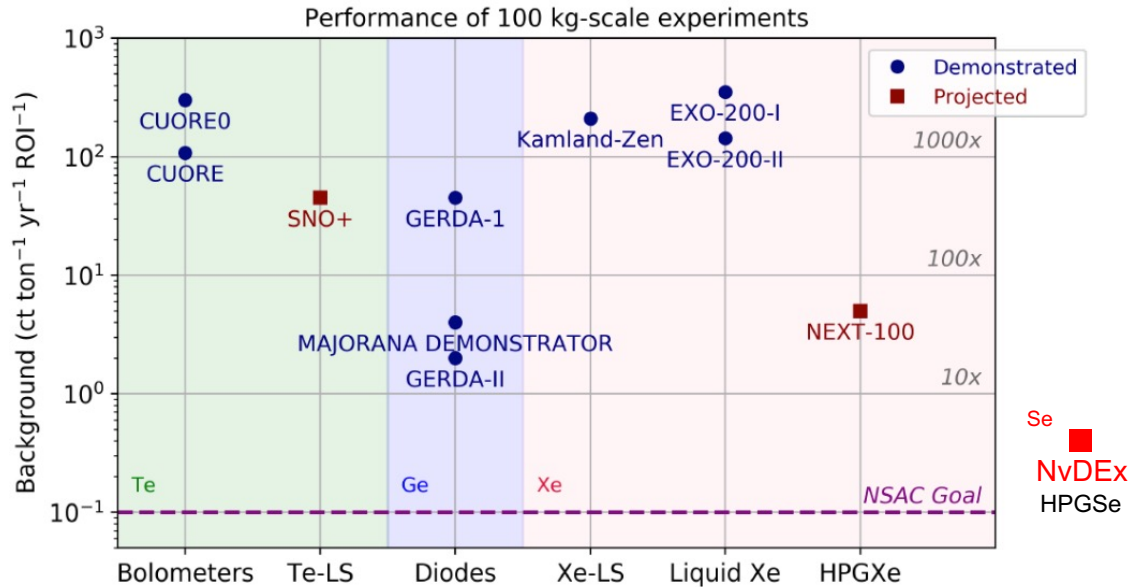
本底估计-其它 & 堆积本底



- 其它本底来源可忽略
 - 天然放射性 α 和 β 、氦、宇宙线 μ 、 ν 、 $2\nu\beta\beta$
- 离子漂移速度慢，可能产生堆积事例本底
 - 160cm最大漂移长度对应的漂移时间~7s
 - 假设10cm*10cm*10cm 远的事例可以分开
 - 对于天然 SeF_6 ， $2\nu\beta\beta + 2\nu\beta\beta$: ROI本底~0.06 evts / yr < γ 本底
 - 对于 $^{82}\text{SeF}_6$ ， $2\nu\beta\beta + 2\nu\beta\beta$: ROI本底~8.1 evts / yr > γ 本底
 - 可以通过在高压端加硅PM闪烁光读出来排除

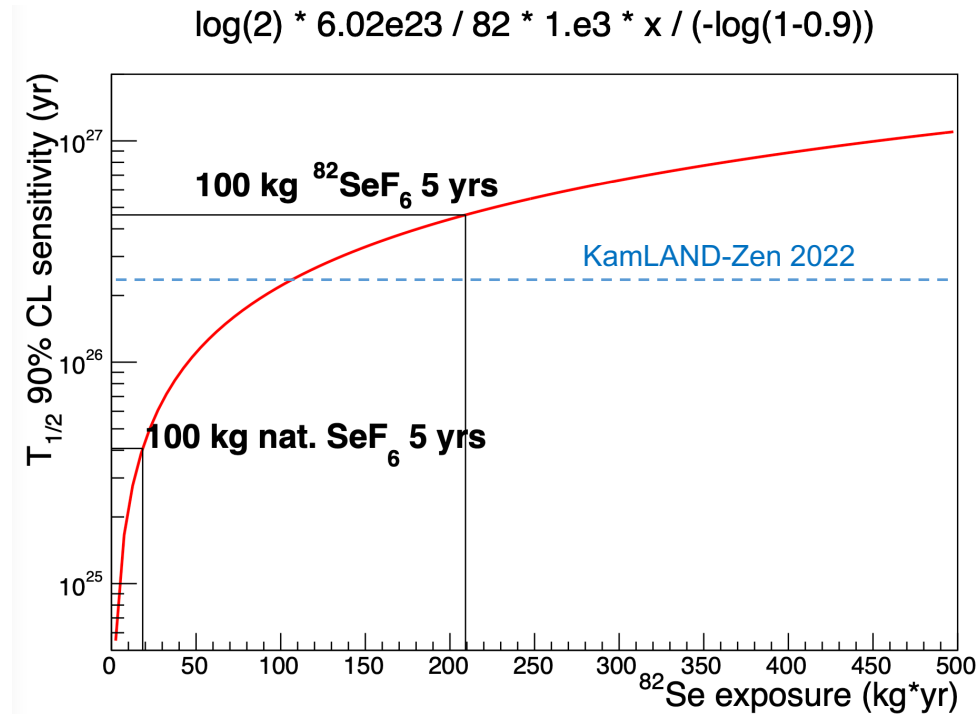
本底估计

“100kg-class” experiments:



- 天然放射性 γ 是 NvDEx 的主要本底来源
- ROI 本底 $\sim < 0.04$ counts / year $\Rightarrow 0.4$ ct / (ton yr ROI)
- 未来几吨级实验有很大的潜力达到正常质量排序 $m_{\beta\beta}$ 所需敏感度

敏感度估计



- 5年ROI本底~<0.2，几乎零背景
- 使用100 千克天然 SeF₆（仅 3.7 千克 ⁸²Se）5 年， $T_{1/2} > 4 \times 10^{25}$ 年(90% CL)
- 使用100 kg ⁸²SeF₆ 5 年， $T_{1/2} > 4 \times 10^{26}$ 年(90% CL)
 - 好于KamLAND-Zen的目前世界最高敏感度结果

NvDEx合作组



- 2019年，第一次NvDEx年会



- 现有来自7家单位的>30位合作者
- 急需低本底实验人才——欢迎加入！

仇浩 – 中科院近代物理所

未来计划

- 2023: 提交CDR, 验证topmetal芯片阵列读出放射源信号的能量分辨率
- 2024: 进入CJPL, topmetal芯片噪声降至45e-
- 2025: 工程批流片, 系统组装调试, 开始数据采集
- 2026: 获得物理结果

小结

- NvDEx实验概念使用全新的topmetal芯片技术，实现了 ^{82}Se 的高Q值与TPC事件拓扑重建能力这两大优势的结合
- NvDEx-100正在研制中，计划2025年开始取数
- 进行了两次Topmetal-S芯片流片
- 预期极低的本底水平：~0.4 ct / (ton yr ROI)
- 未来几吨级实验具有达到正常质量排序 $m_{\beta\beta}$ 敏感度的潜力
- 使用 100kg 天然 SeF_6 / $^{82}\text{SeF}_6$ 气体时，预期 $\sim 4 \times 10^{25/26}$ 年的敏感度

谢谢😊 欢迎加入！