

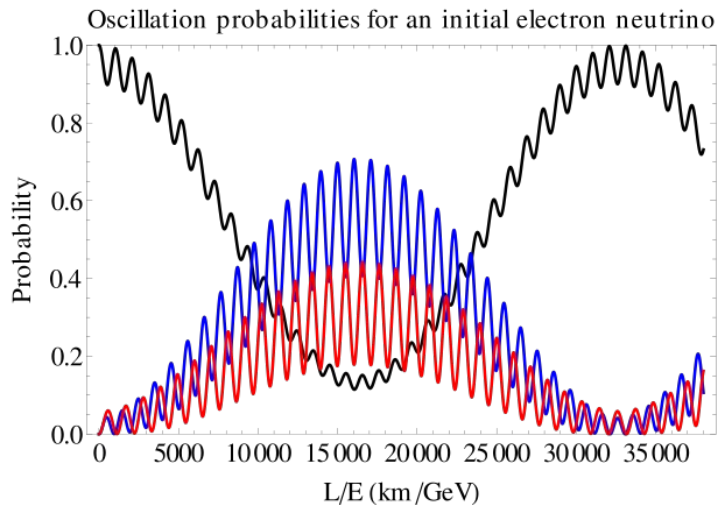
无中微子双贝塔衰变实验 $N\bar{\nu}DEx$

仇浩

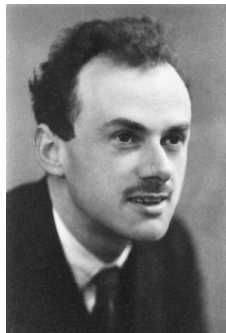
重离子科学与技术全国重点实验室

中科院近代物理研究所

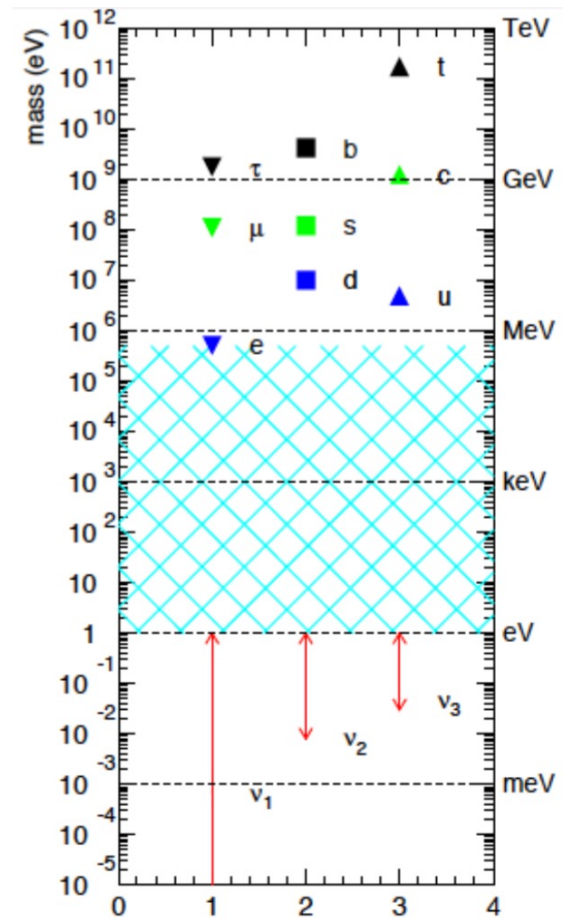
中微子



or

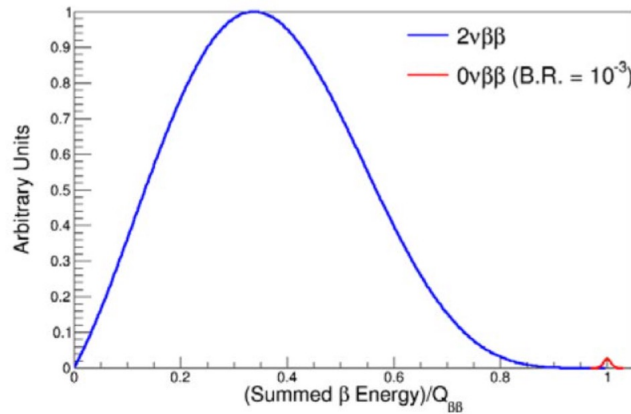
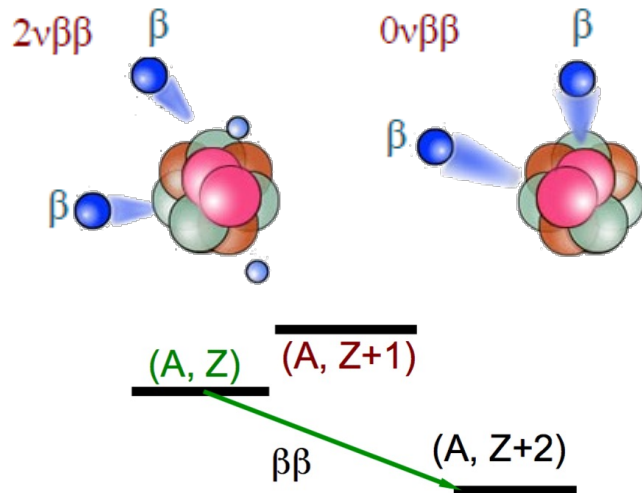


?

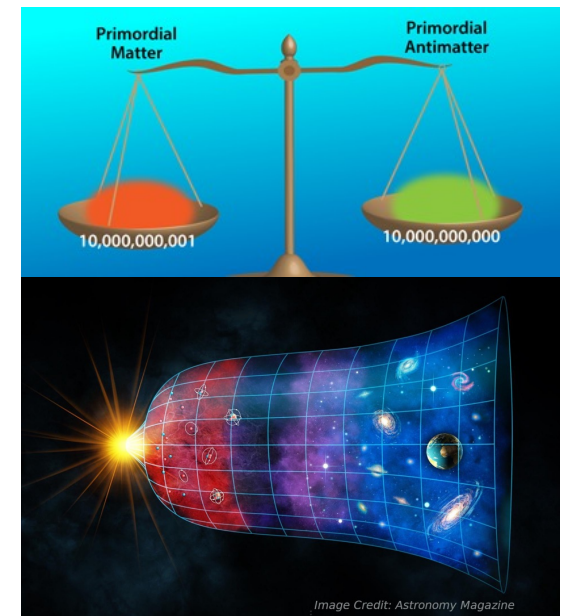


- 中微子震荡 $\Rightarrow$ 有质量 $\Rightarrow$ 超出标准模型
 - 中微子可能是Majorana或Dirac费米子, 即可以是自己的反粒子
 - 质量远小于其它标准模型费米子
- $\Rightarrow$ 可能是探索超出标准模型新物理的关键

$0\nu\beta\beta$ 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



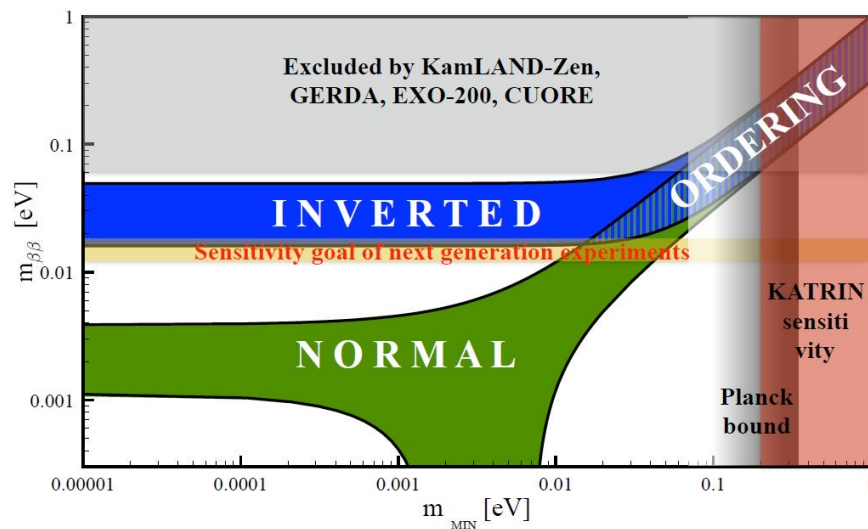
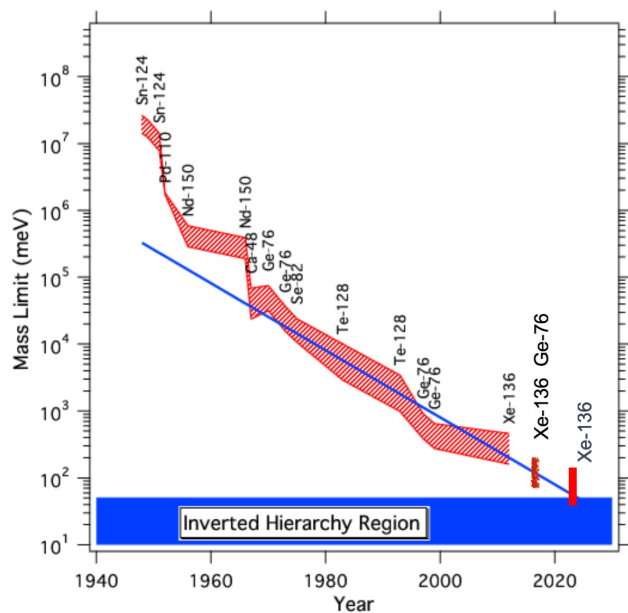
半衰期 & $m_{\beta\beta}$

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

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 $\rightarrow m_i$

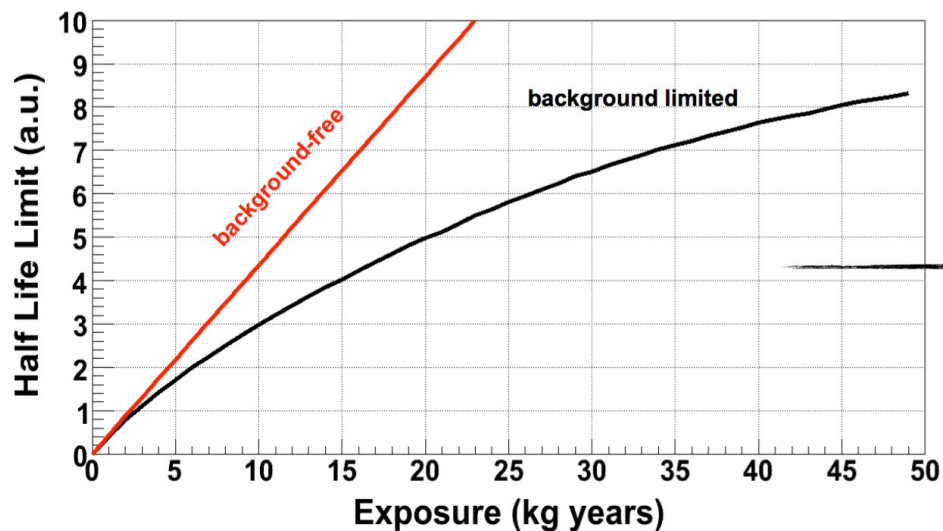


- 过去~70年, $0\nu\beta\beta$ 衰变实验敏感度一直在提高
- $m_{\beta\beta} < 100 \text{ meV}$ $T_{1/2} > 10^{26} \text{ y} \Rightarrow$ 难度很大
- 下一代实验将覆盖反常质量排序情况下所需敏感度

实验敏感度

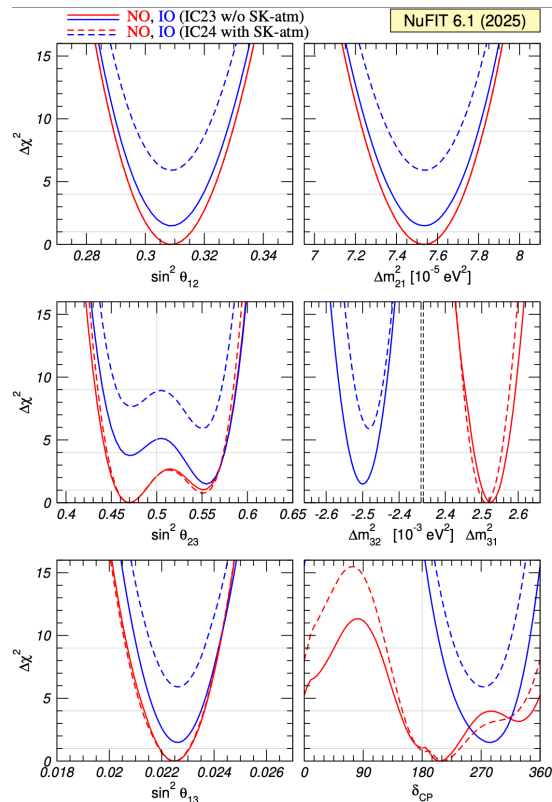
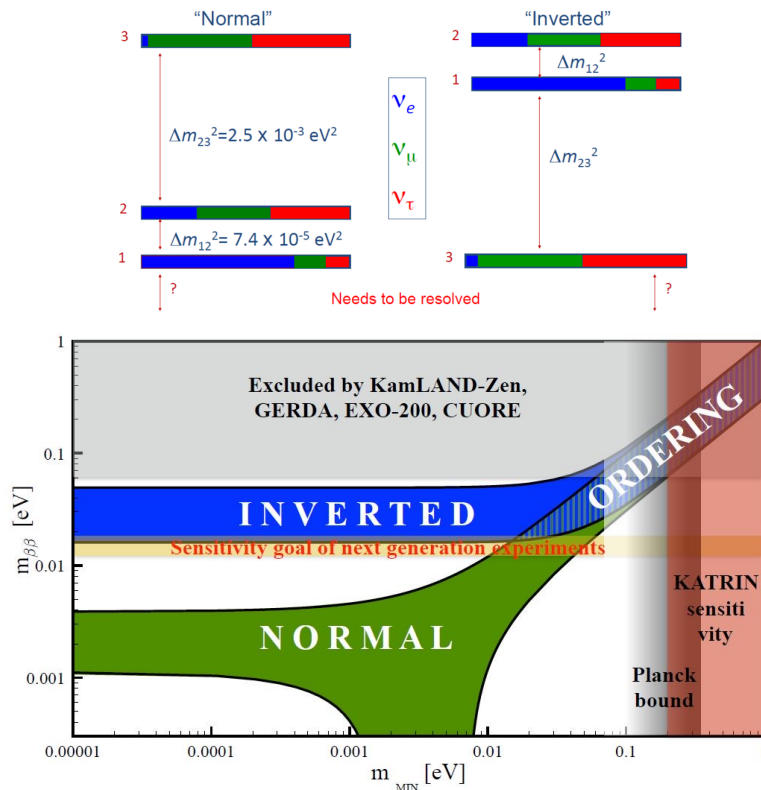
0本底情况: $T_{1/2}^{0\nu}(\text{exp}) = (\ln 2) N_a \frac{a}{A} \varepsilon \frac{MT}{n_{CL}}$ ← 曝光量: 质量 × 实验时间

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

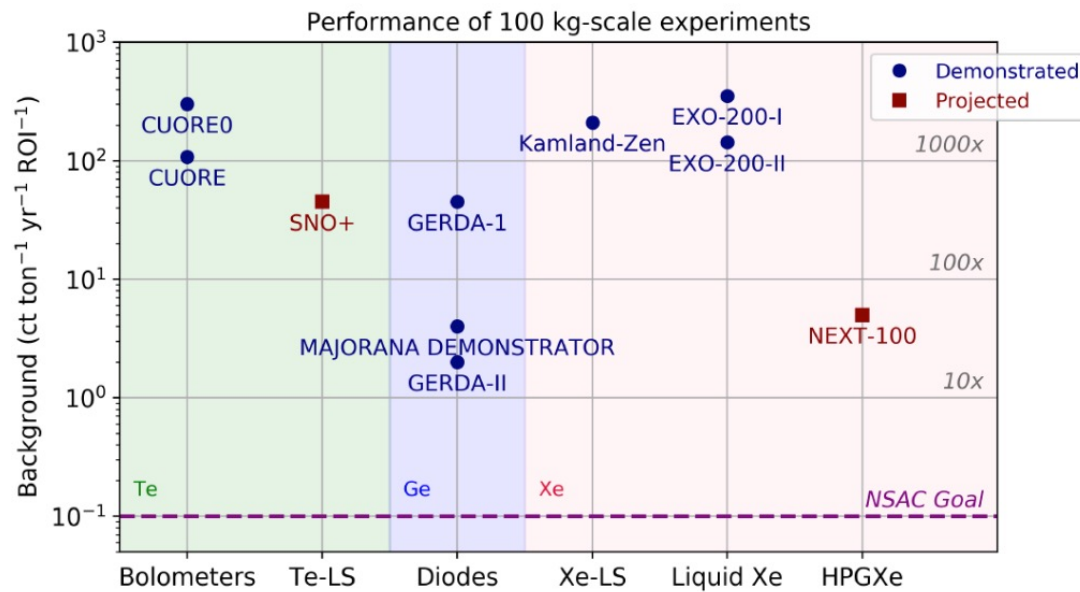
实验敏感度



- 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 $\ll 1 \text{ ct / ton yr ROI}$

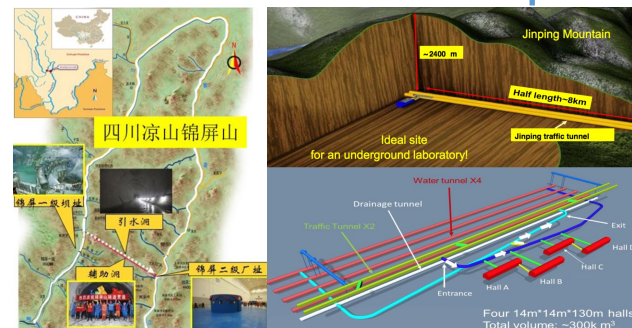
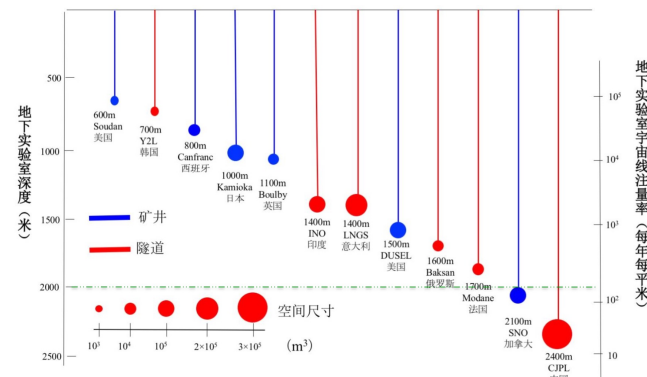
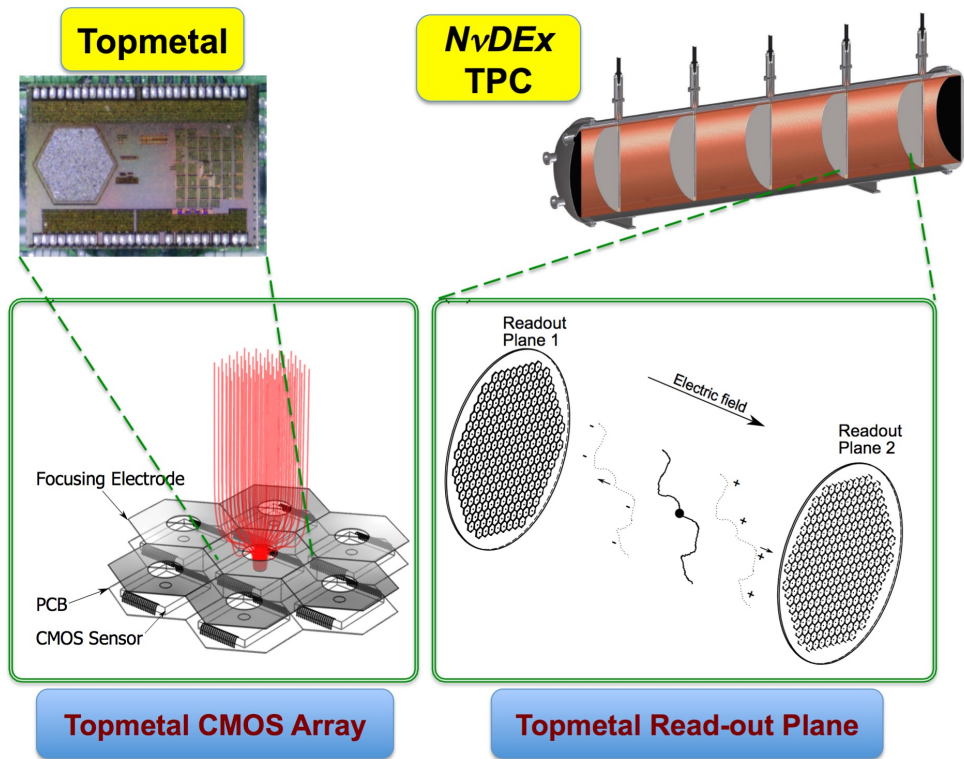
实验敏感度

“100kg-class” experiments:



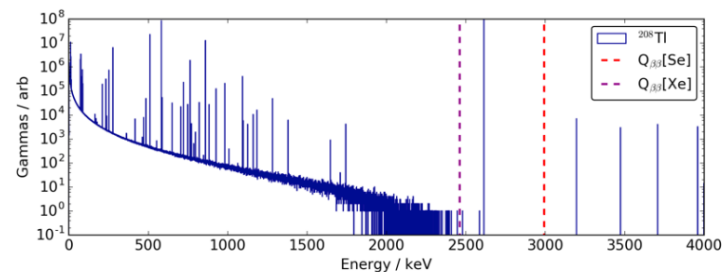
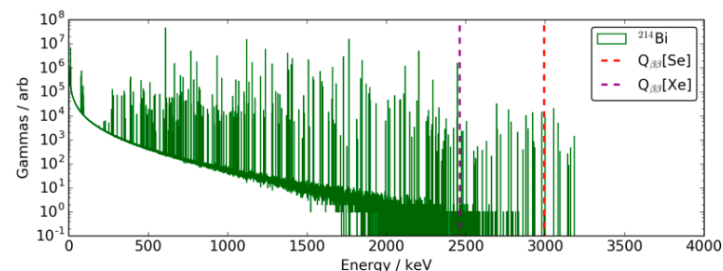
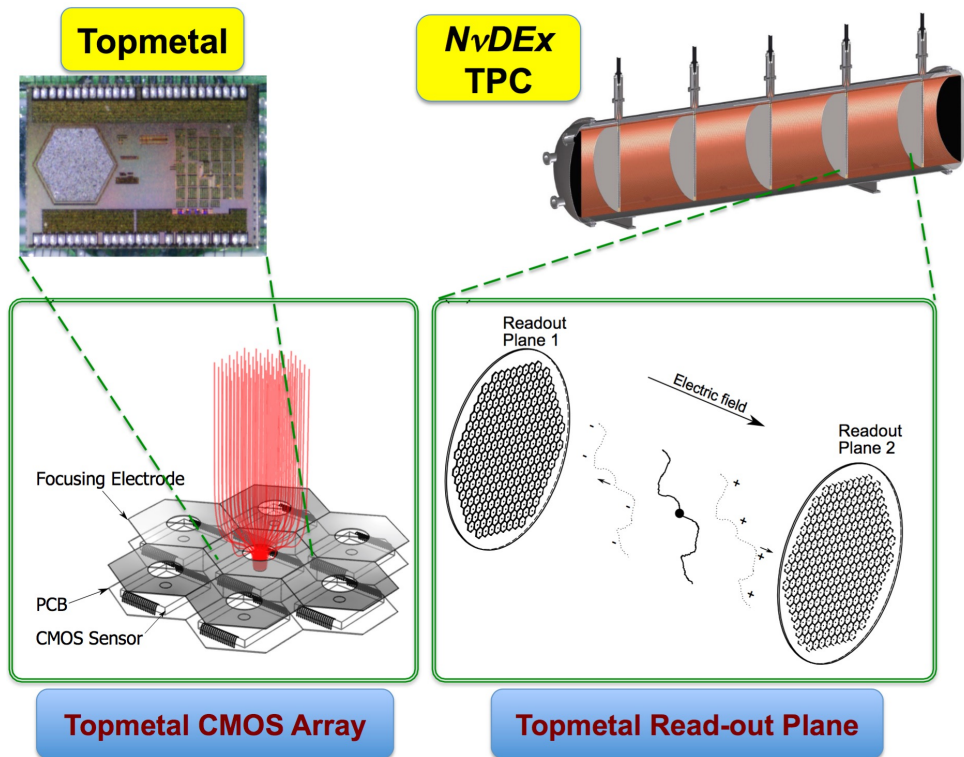
- 美国NSAC提出的 $0\nu\beta\beta$ 实验目标本底水平 $\sim < 0.1$ ct / ton yr ROI
- 现有实验本底水平高一个量级以上

NvDEx实验概念



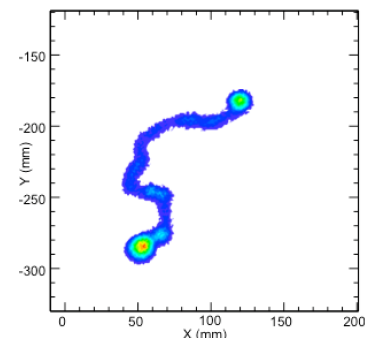
- 高压 $^{82}\text{SeF}_6$ 气体TPC，使用自研CMOS芯片直接读出
 - CJPL世界最深的地下实验室

N ν DEx实验概念



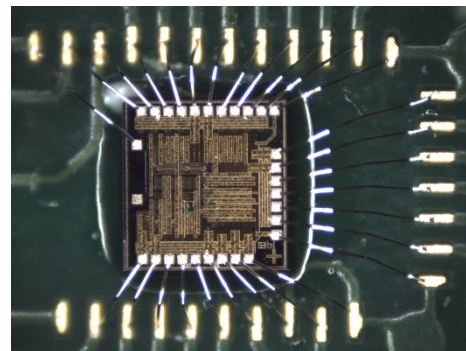
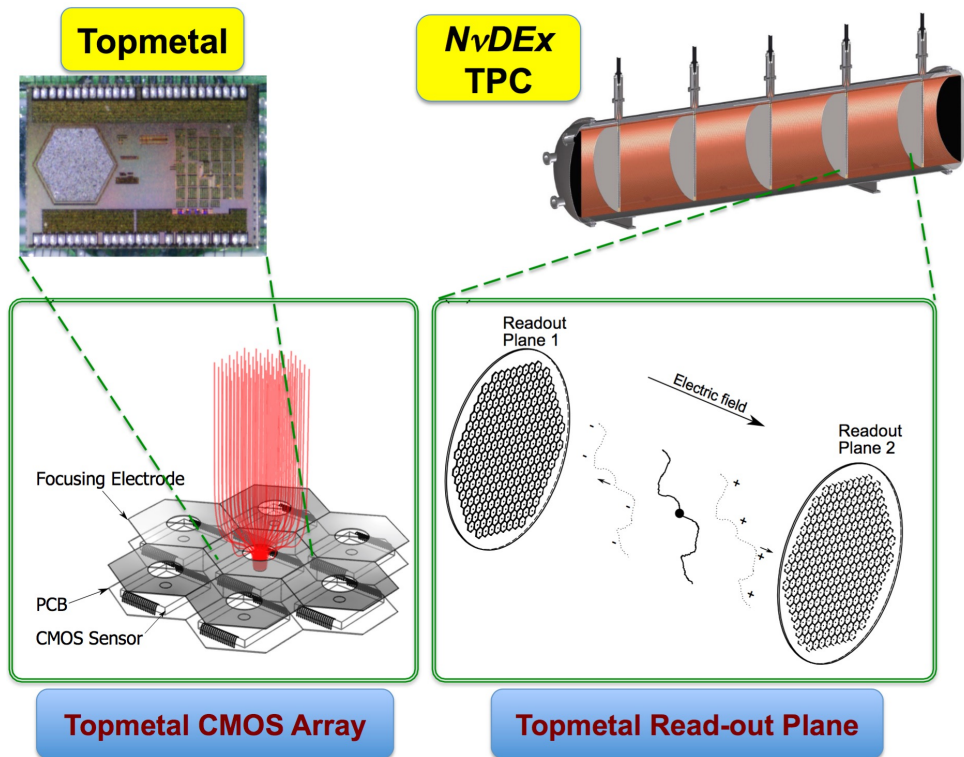
天然放射性 γ 本底能谱

- 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(~1% FWHM)



$0\nu\beta\beta$ 事例能量沉积

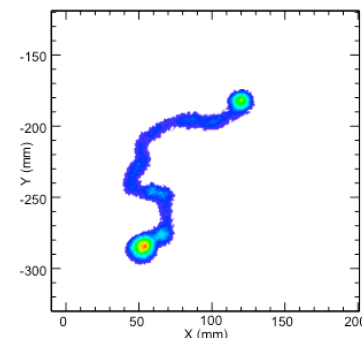
NvDEx实验概念



自研读芯片



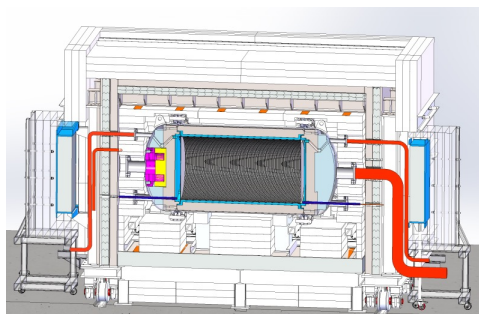
- 高压 $^{82}\text{SeF}_6$ 气体TPC，使用自研CMOS芯片直接读出
 - CJPL世界最深的地下实验室
 - ^{82}Se 衰变Q值高(2.996 MeV)，高于绝大多数自然本底
 - TPC可使用事例几何特征鉴别信号本底
 - 无雪崩放大直接读出，能量分辨率更好($\sim 1\%$ FWHM)



$0\nu\beta\beta$ 事例能量沉积

NvDEX实验路线图

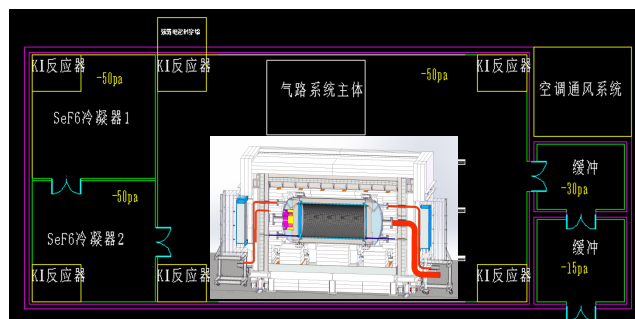
2027



NvDEX-50Xe

- $\sim 50\text{kg } ^{136}\text{Xe}$
- 验证探测器技术
- 取得初步物理成果

~ 2032



NvDEX-100

- $\sim 100\text{kg } ^{82}\text{SeF}_6$
- 结合 ^{82}Se 高Q值与TPC探测事例几何特征的优势
- 瞄准世界本底最低的 $0\nu\beta\beta$ 实验

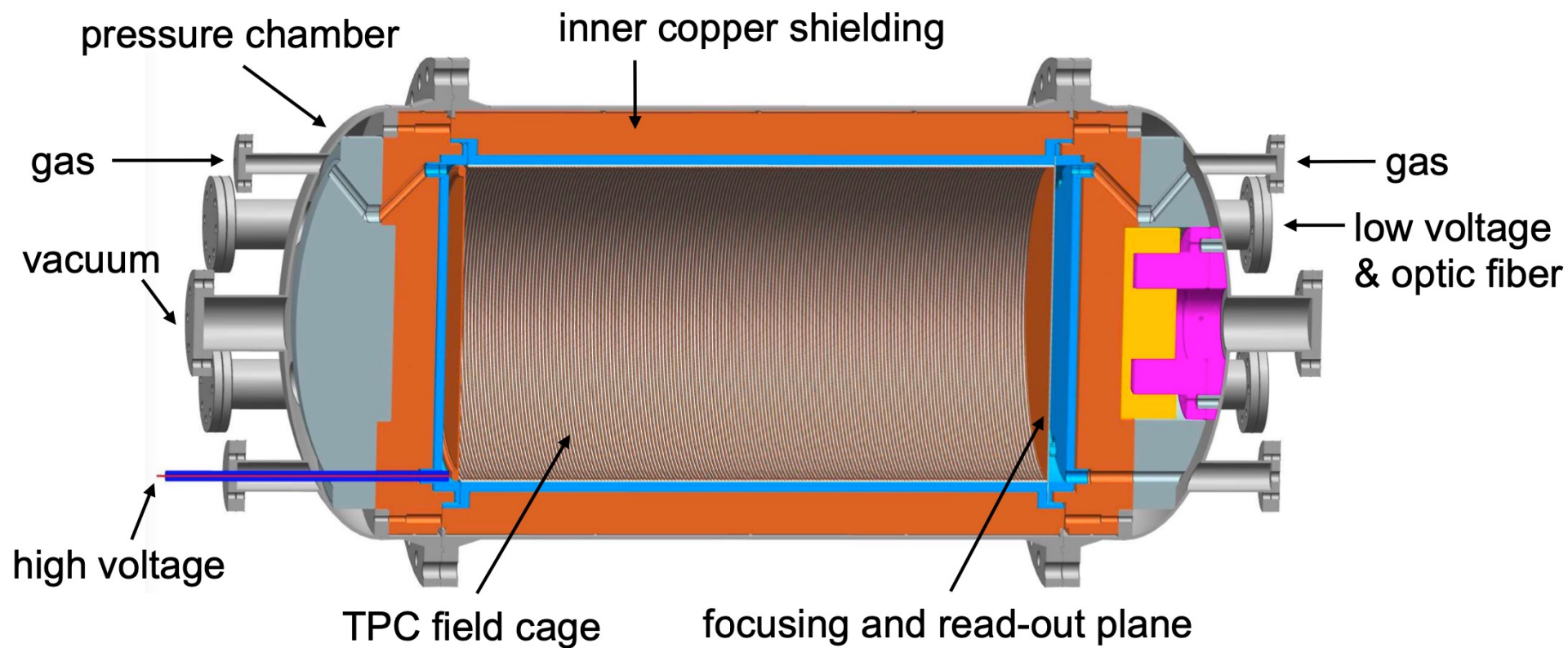
$\sim 203X$



NvDEX-nt

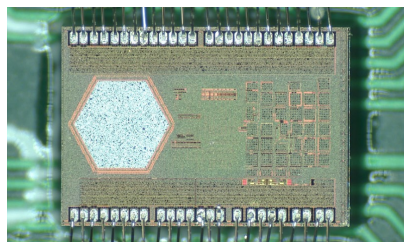
- nt $^{82}\text{SeF}_6$
- 冲击 $0\nu\beta\beta$ 的发现

N_vDEx-50Xe / N_vDEx-100



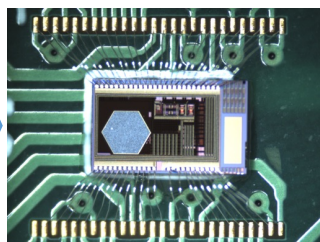
- 灵敏体积含有~50kg的10 atm ^{136}Xe 气体 或 ~100kg $^{82}\text{SeF}_6$ 气体
- 桶部长160cm, 气腔内径120cm

读出芯片



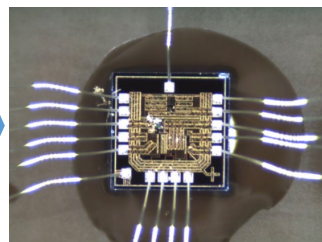
V0

信号幅度远小于预期



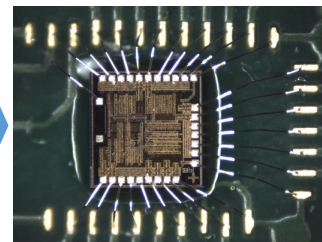
V1-B

ENC~130e⁻



V2-TB

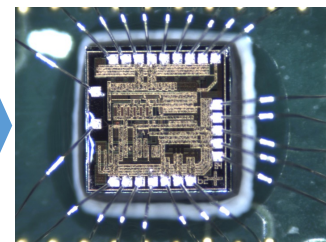
ENC~49e⁻



V3-TB1

ENC~36e⁻

达到关键指标



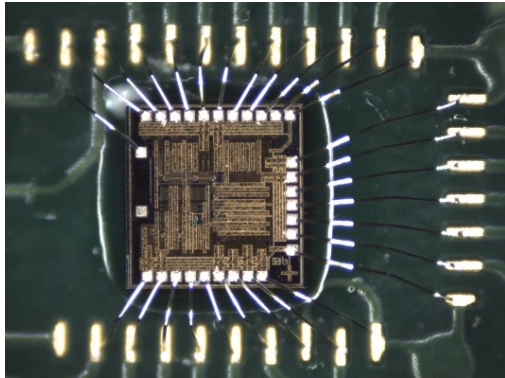
V4-TB2

测试中

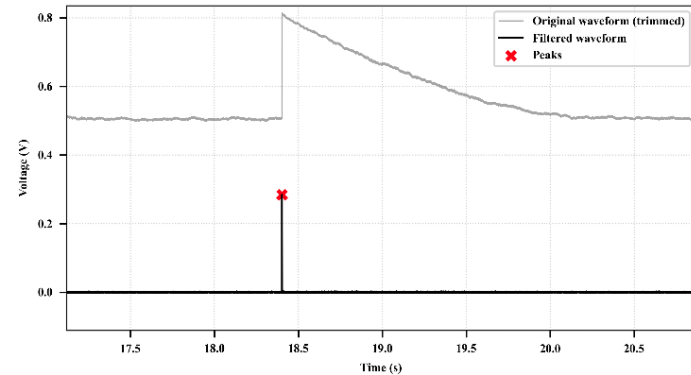
工程批验证

- 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
- 已进行五次流片

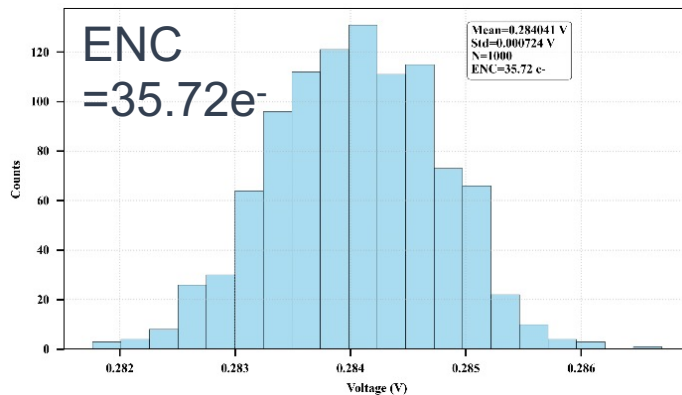
读出芯片



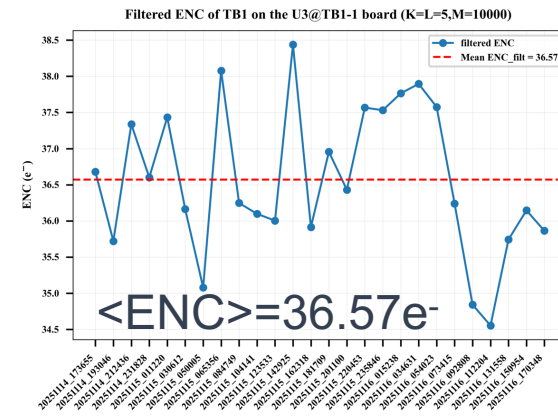
V3.TB1芯片



输出信号



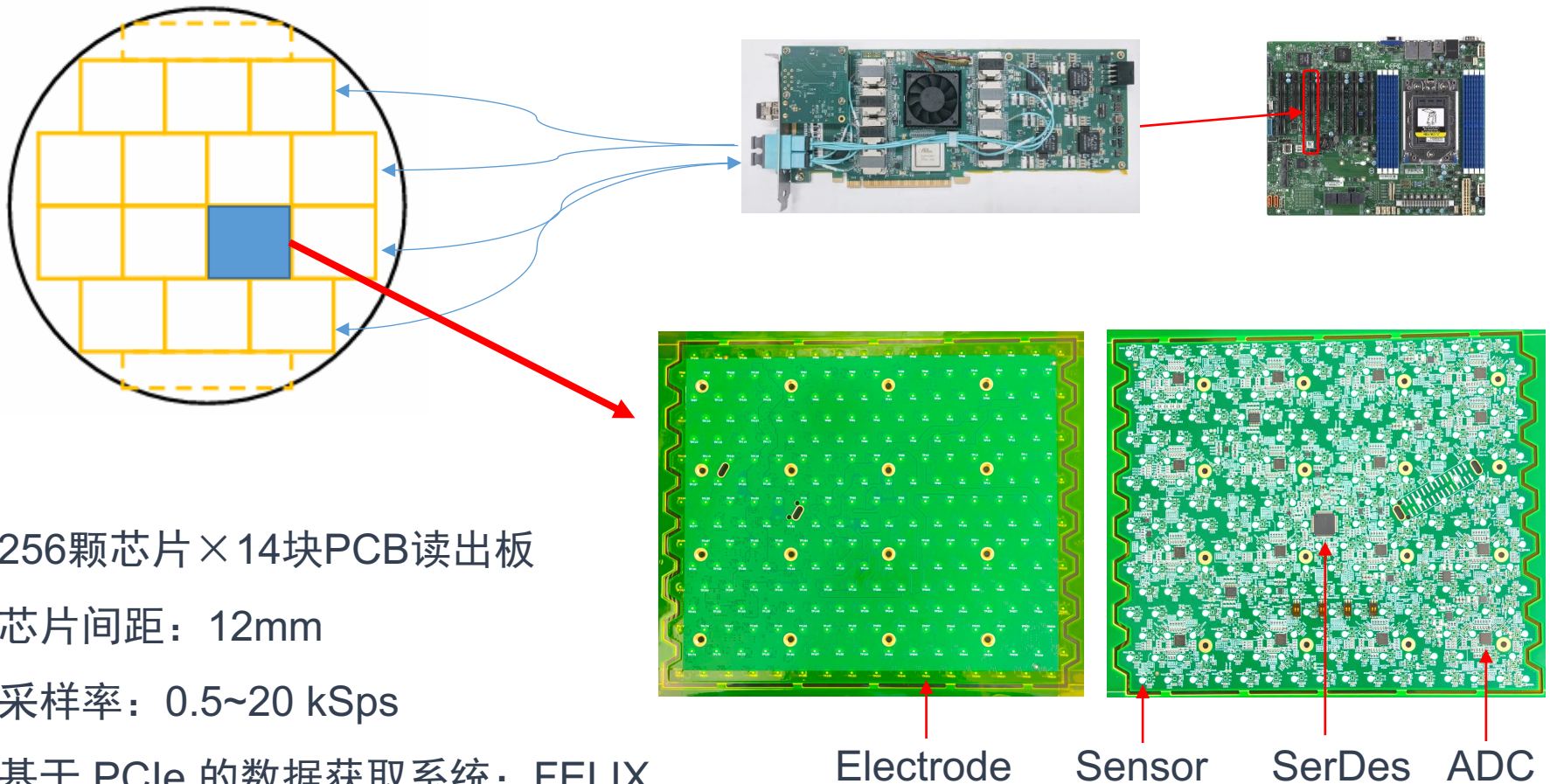
相同注入信号对应输出电压分布



长时间测试噪声变化

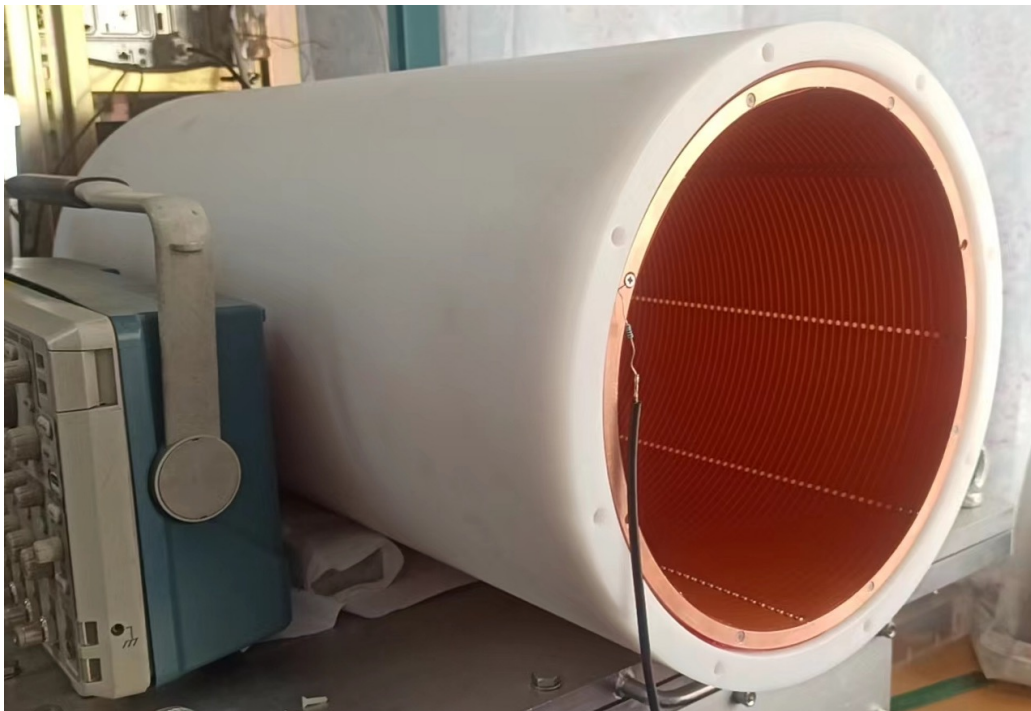
- V3.TB1实现了等效电子噪声 $ENC=35e^- - 45e^-$
- 满足ENC指标： $<45e^- \Leftarrow$ 实验最核心的指标之一

读出平面 & 数据获取系统

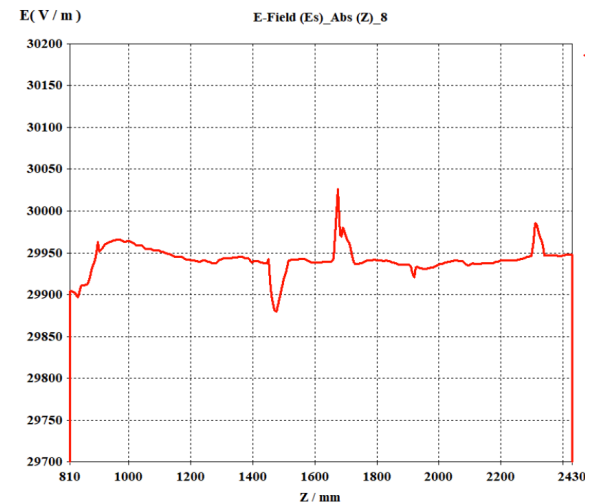
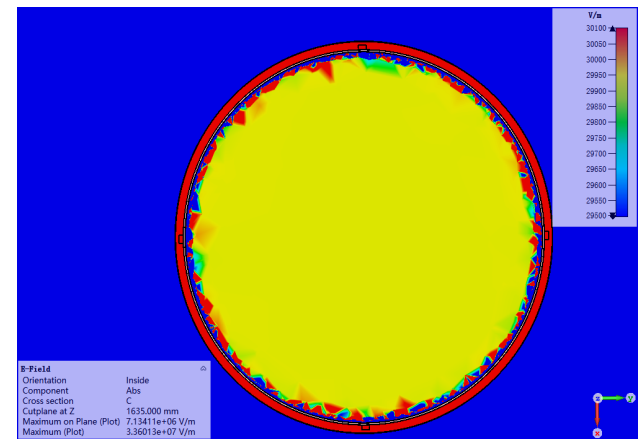


- 256颗芯片 × 14块PCB读出板
- 芯片间距：12mm
- 采样率：0.5~20 kSps
- 基于 PCIe 的数据获取系统：FELIX
- 制作了读出电路板原型机
 - 已绑定98颗V3·TB1读出芯片，其中91颗正常工作，85颗ENC<70e⁻

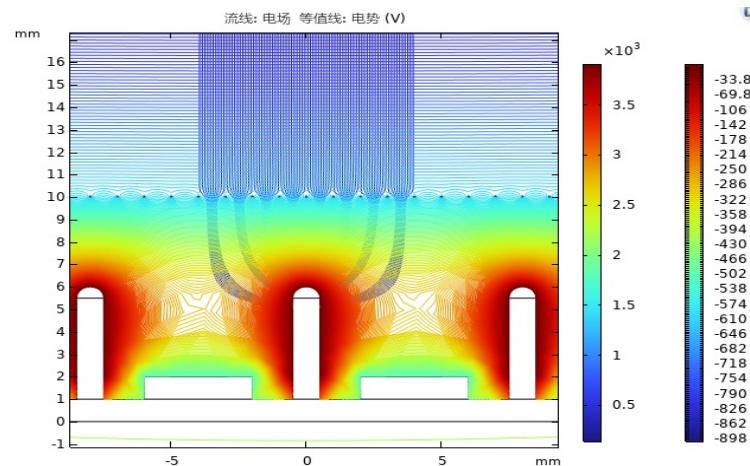
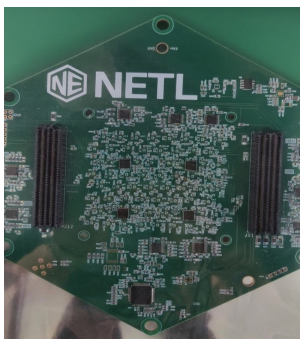
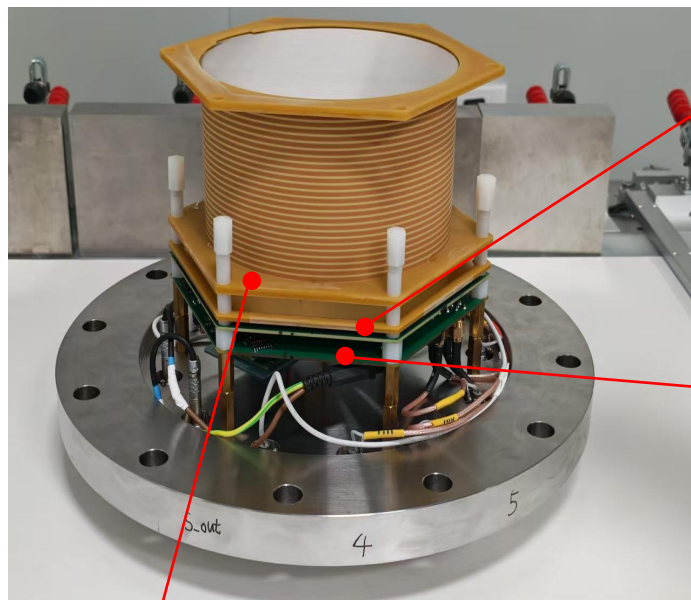
TPC场笼



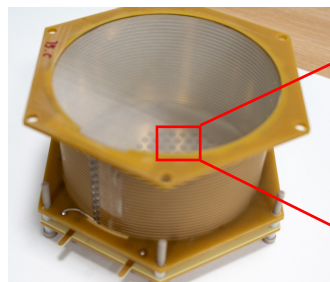
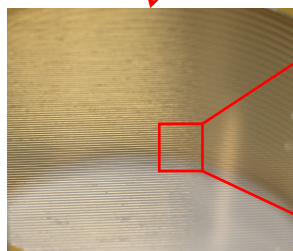
- 聚甲醛绝缘层、支撑结构 + 柔性PCB
- 完成初步设计，直径30 cm的原型机加工完成



时间投影室原型机

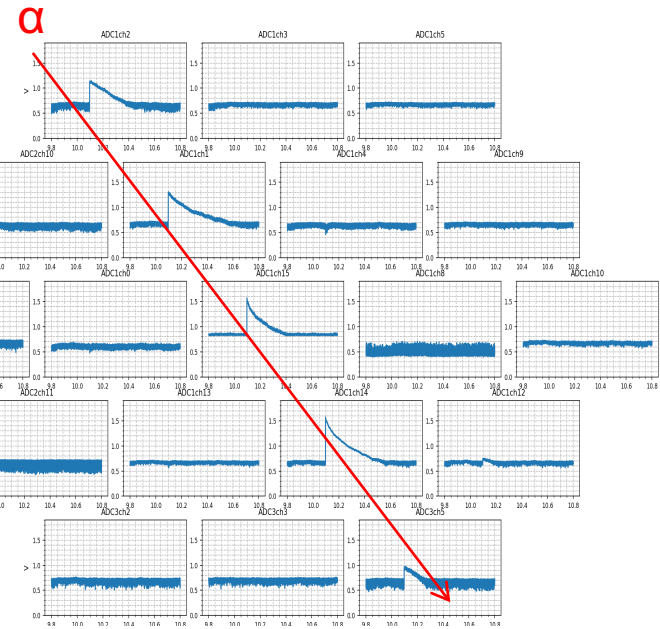
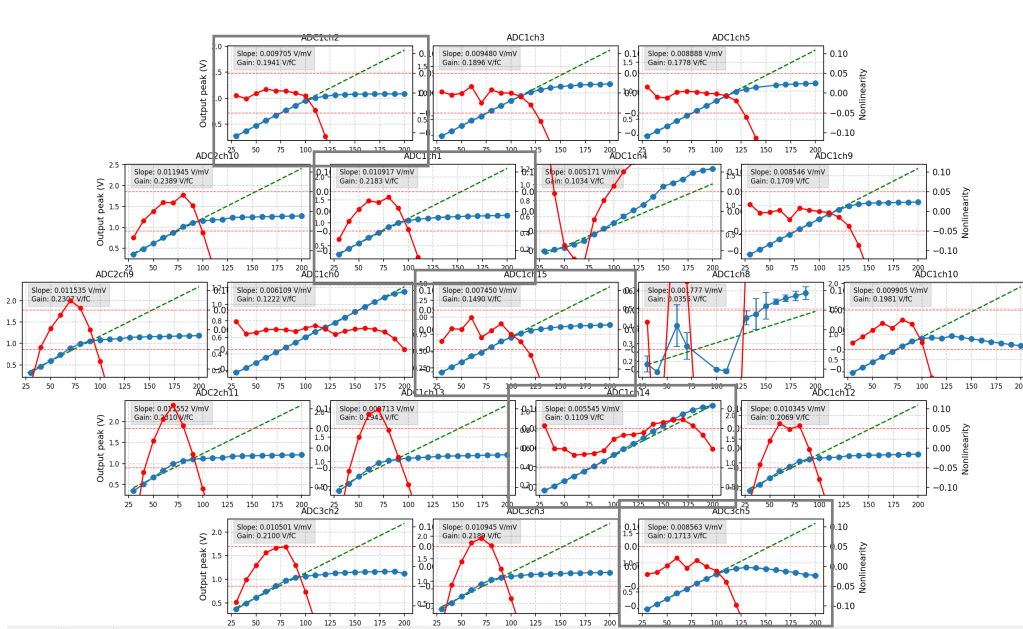


电荷收集结构电场模拟



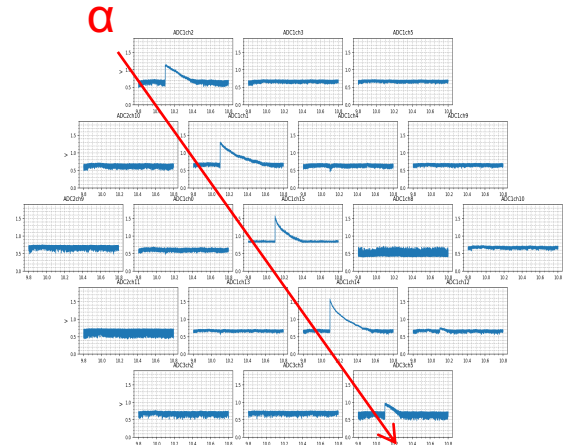
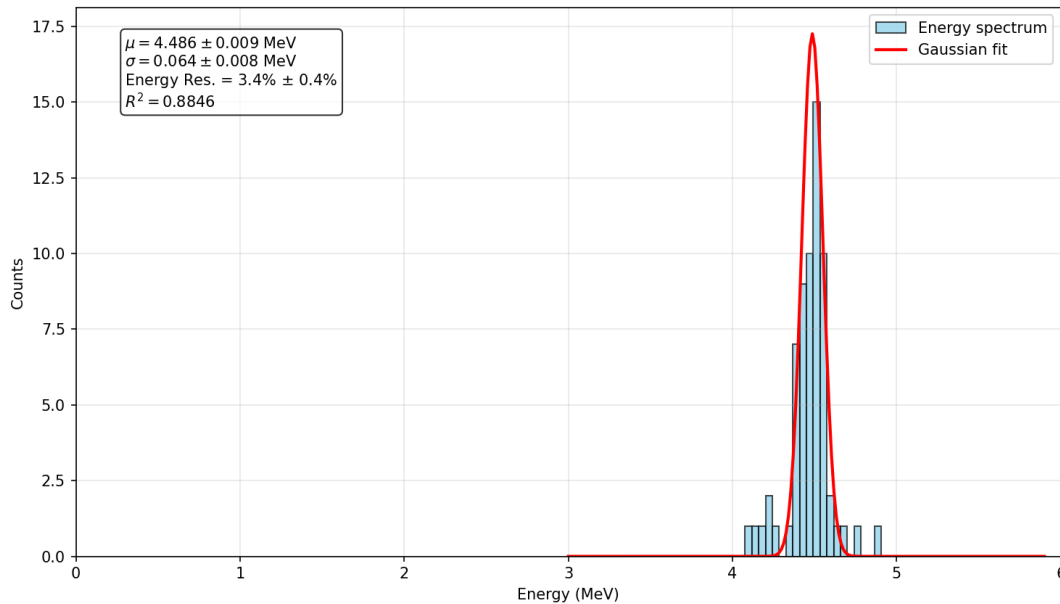
- 屏栅电离室 + 聚焦板 + 插针板 + 读出板（19颗V2·TB芯片）
- 模拟收集效率~100%

时间投影室原型机



- 使用信号源注入电荷，对各芯片的增益、量程、响应非线性、ENC进行了刻度
- 将 α 源对准有效面积边缘的一颗芯片，以30度角斜入射，可以观测到 α 粒子径迹
- 使用1370mbar Ne气， $w = 36.4 \text{ eV} \Rightarrow$ 使用较小灵敏面积测量完整的 α 粒子径迹
- 进行能量分辨分析时，选取一系列芯片有信号，其它芯片没有信号的事例，并去除含有超量程信号的事例

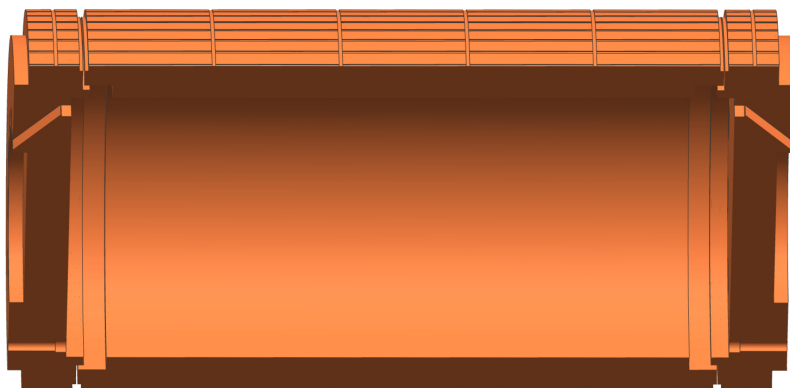
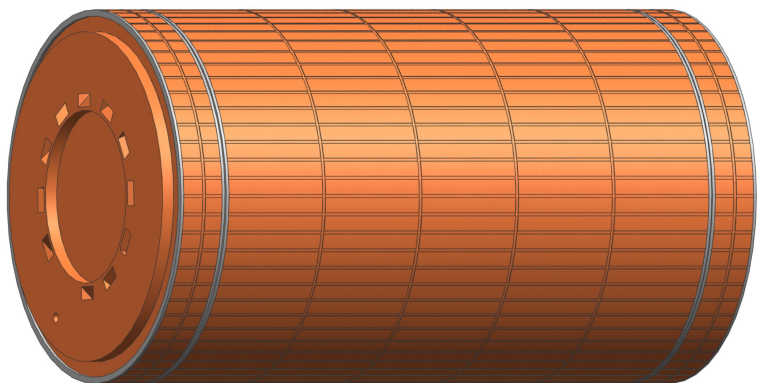
时间投影室原型机



通道	ENC (e ⁻)
ADC1ch1	536.6
ADC1ch14	307.2
ADC1ch15	95.6
ADC1ch2	757.4
ADC3ch5	1100.6

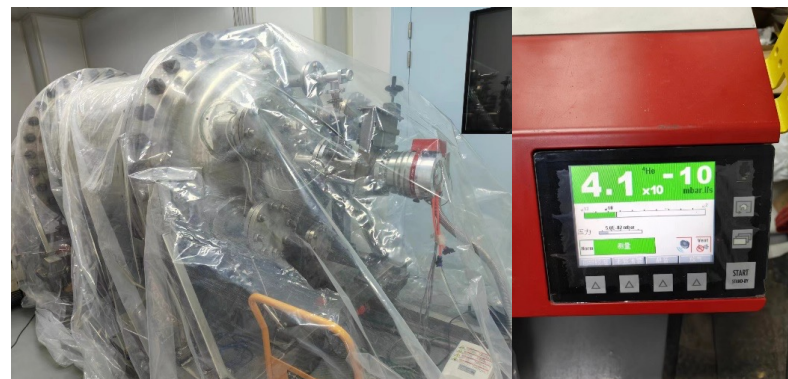
- 能量分辨率测试最优结果 FWHM = 3.4%
- 使用70mV (~2ke-)注入信号测得的ENC: 95~1100e⁻
 - 推算能量分辨率FWHM = 2.7%
- 下一版读出平面ENC普遍小于70e⁻，预期得到更好的能量分辨率

铜屏蔽体

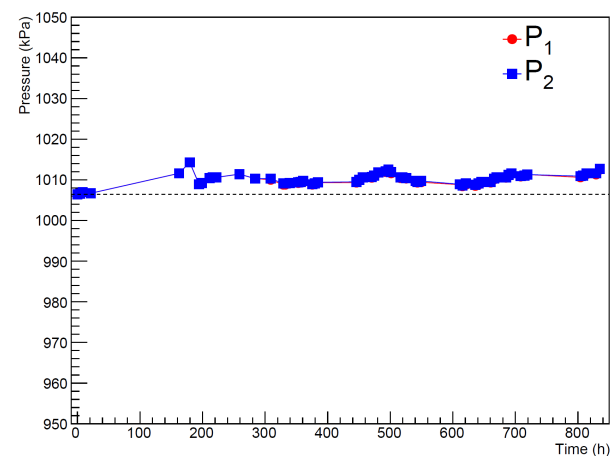


- 低本底无氧铜
- 完成加工

气腔



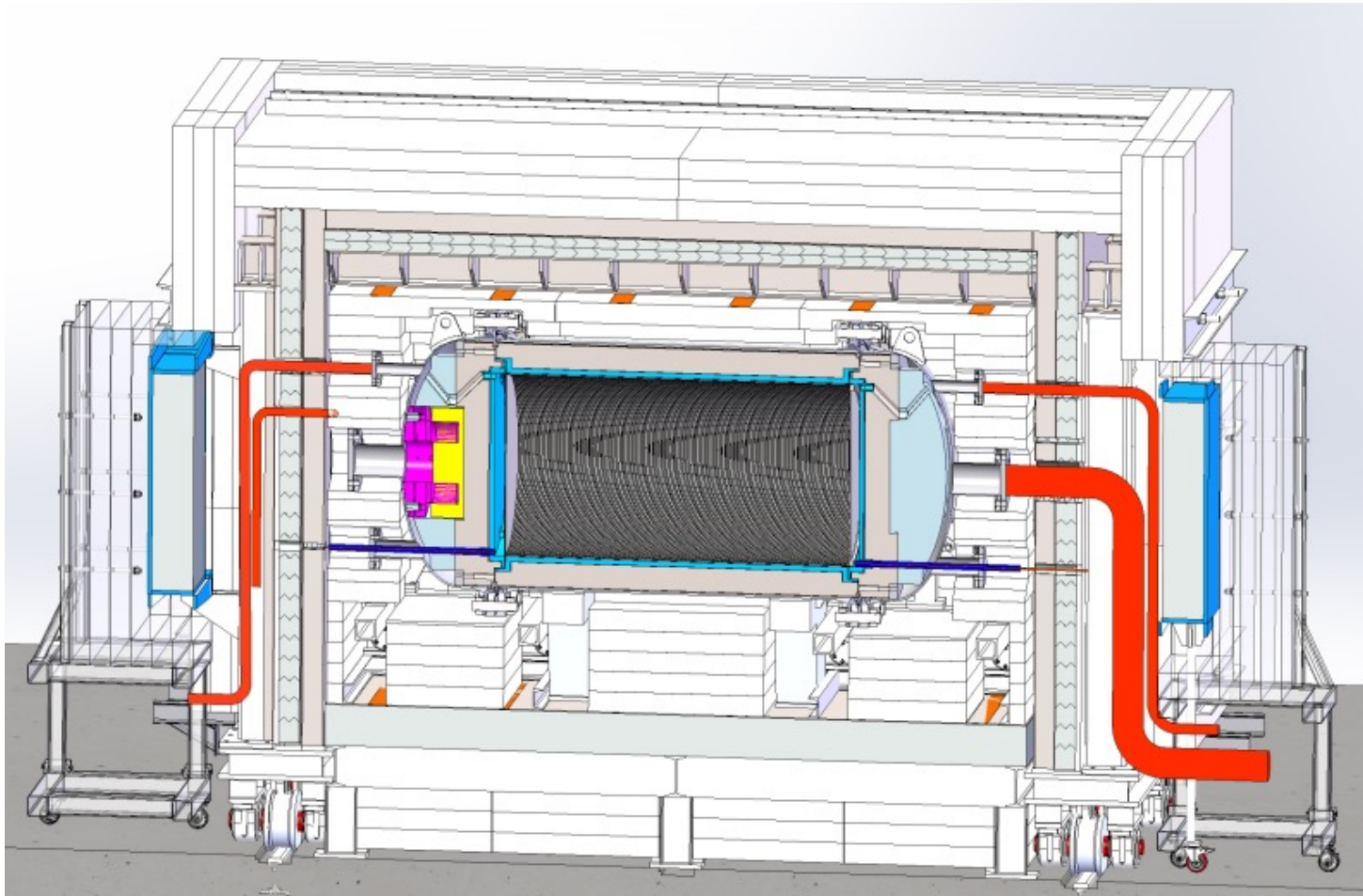
真空氦罩法检漏



保压测试

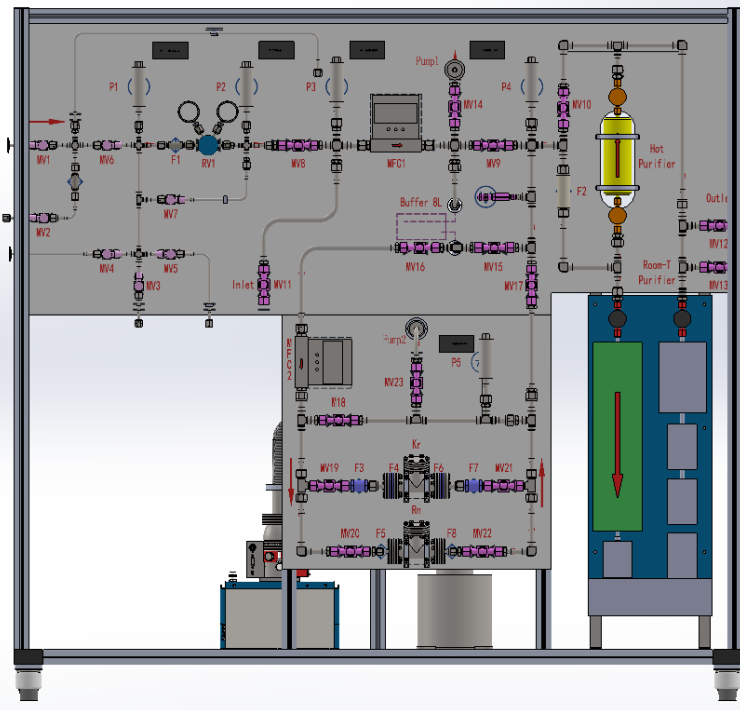
- 316L不锈钢
- 气腔加工完成、与铜屏蔽体组装完成
- 通过了真空氦气检漏、1MPa一个月高压气密性检测

外屏蔽



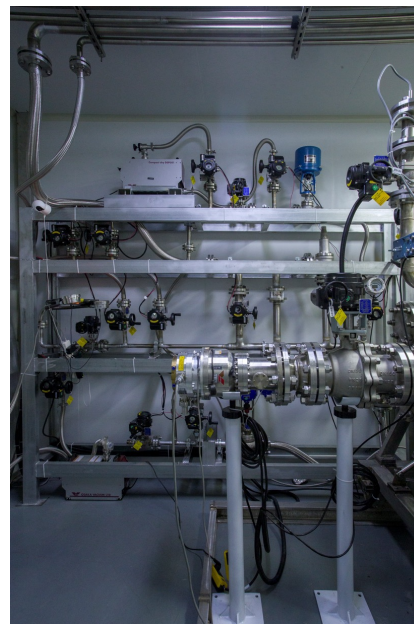
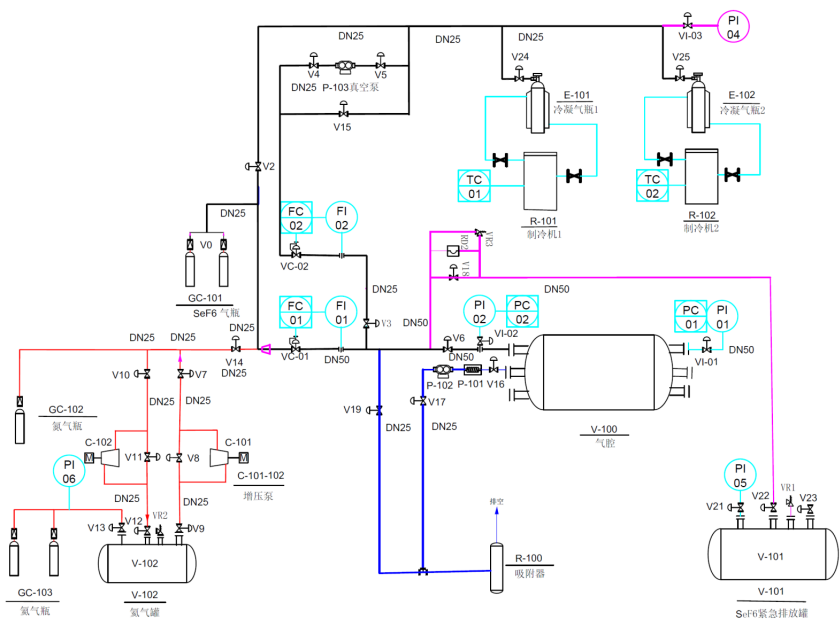
- 铅+高密聚乙烯外屏蔽体，阻挡、吸收 γ 、中子
- 完成设计，采购加工中

^{136}Xe 气路



- PandaX-III实验的气路系统
- 闭路循环除水、氧，保证气体电子寿命

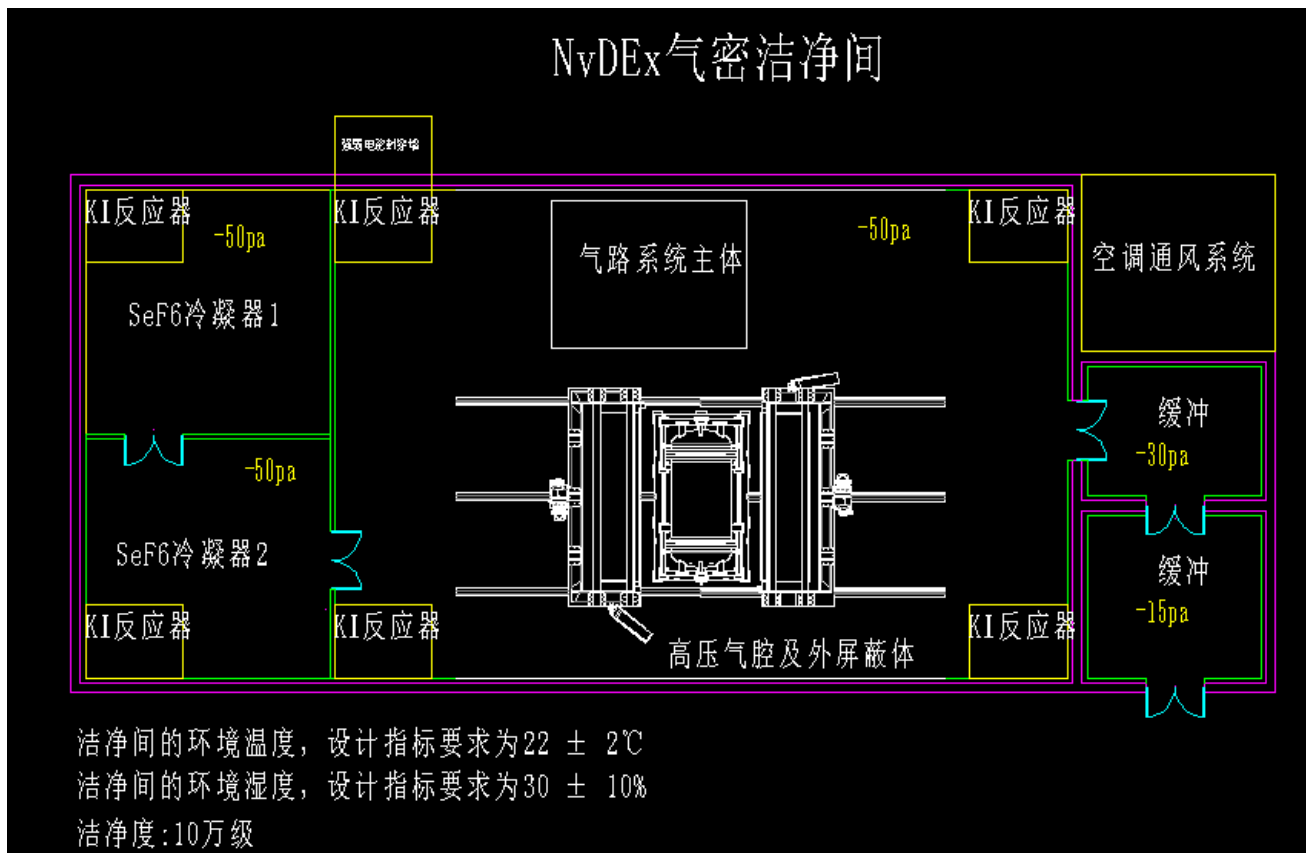
SeF₆气路



- SeF₆ 有毒：环境中 < 0.05 ppm $\Rightarrow$ 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
- 完成了气路系统配管、控制软件开发及调试

气密洁净间

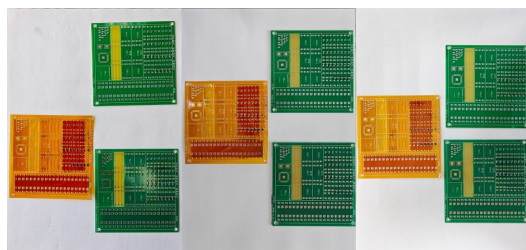
NvDEx气密洁净间



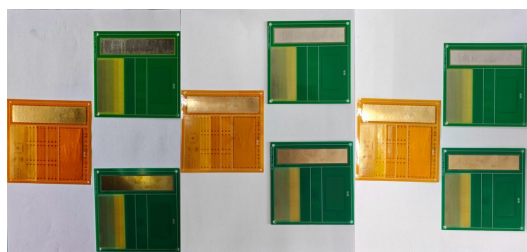
- 将实验装置和气路系统置于气密负压洁净间中
- 实验运行期间（气体处于常温高压状态时）保持气密——第三道安全防线
- 内部布置 SeF_6 气体反应器（熔融 NaOH ），吸收万一泄漏的气体

气体性质测量

不同材料的腐蚀性测试



腐蚀前 腐蚀1周 腐蚀2周
正面

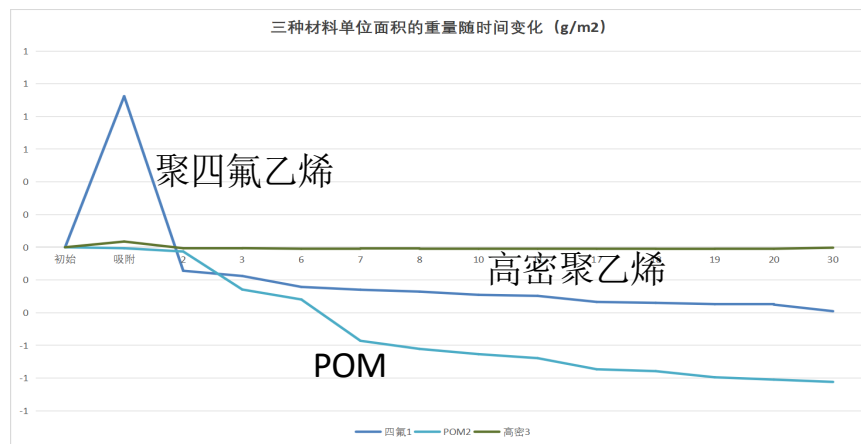


腐蚀前 腐蚀1周 腐蚀2周
反面

SeF₆: 1 MPa, 水180 ppm, HF 15 ppm

- 对不同材料进行了腐蚀性研究
- 对不同材料进行了吸气性研究
- 验证了高温NaOH可以有效吸收SeF₆；KI的丙酮溶液亦可以与SeF₆迅速反应

不同材料的吸气性研究

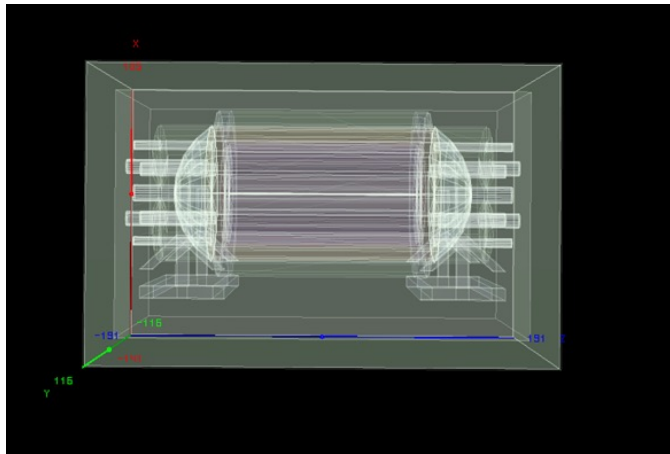


不同材料单位面积质量随时间的变化曲线

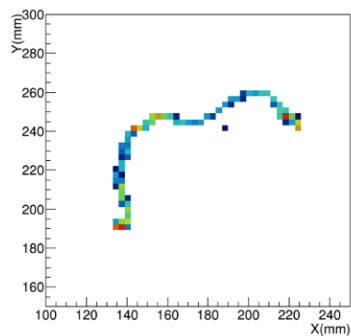
NaOH吸收SeF₆气体的研究

	进气浓度	温度 (°C)	进气速率	出气速率	吸收效率
1	99%	100	1.5 L/min	300 mL/min	80%
2	99%	150	1.5 L/min	0 (无气泡)	100%
3	99%	320	1.5 L/min	0 (无气泡)	100%

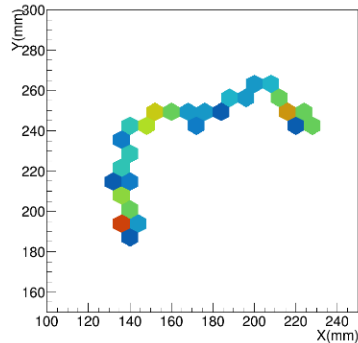
模拟软件



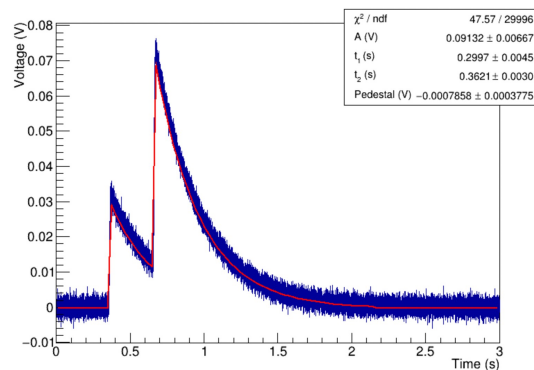
GEANT几何模型



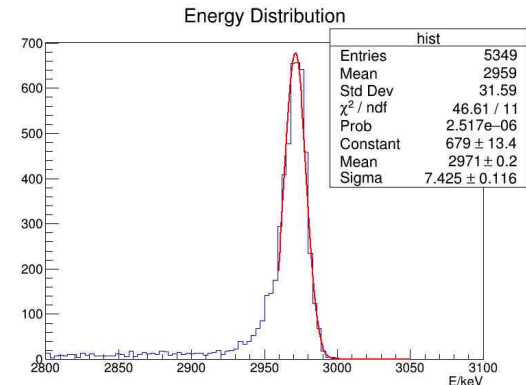
模拟信号分布



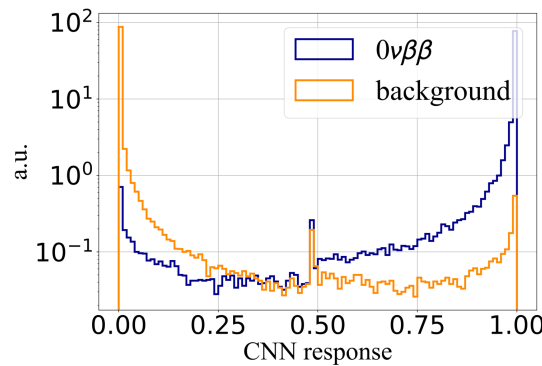
重建信号分布



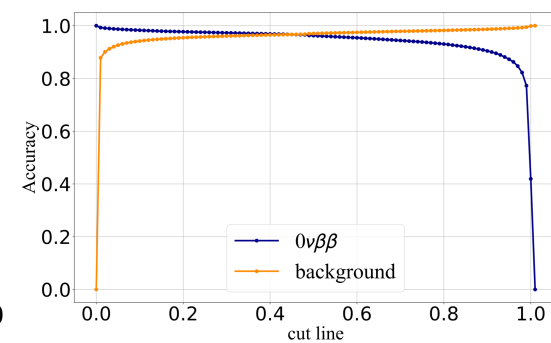
芯片输出信号与拟合重建



$0\nu\beta\beta$ 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

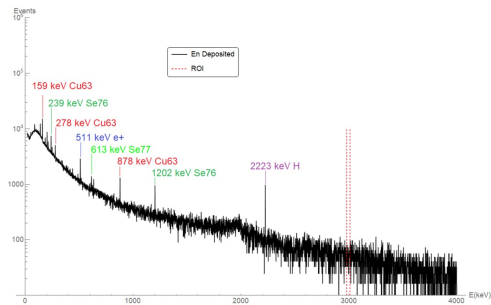
本底模拟与估计

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

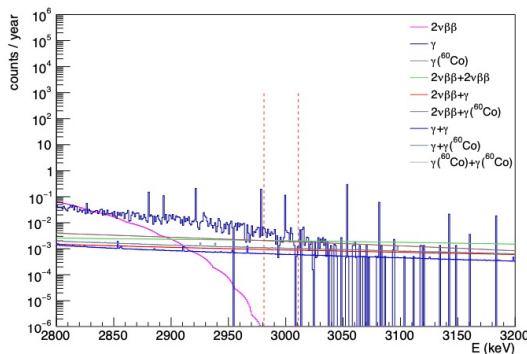
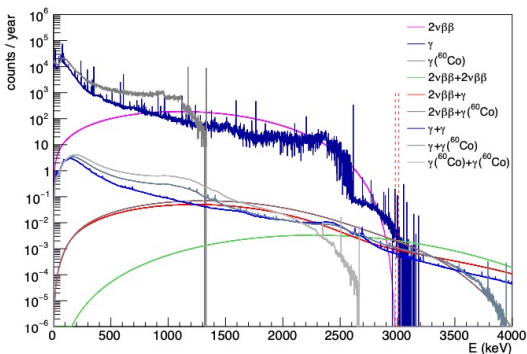
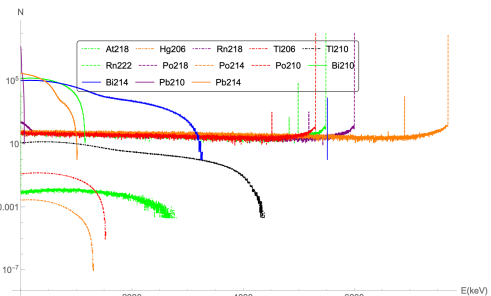


图 14. 采用天然 SeF_6 气体且无单事件几何信息抑制的 NvDEx -100 实验中不同单事件和堆积事件的本底能谱

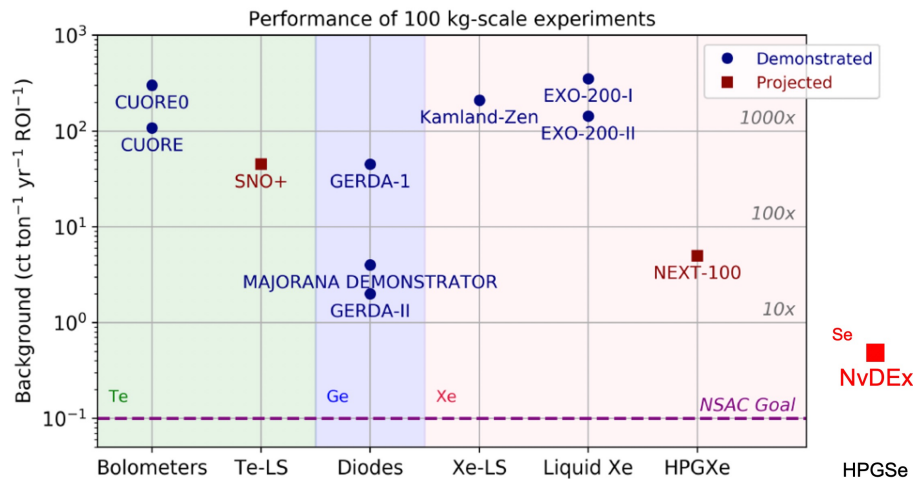


^{222}Rn 衰变链产生的本底能谱

- 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 、 $2\nu\beta\beta$

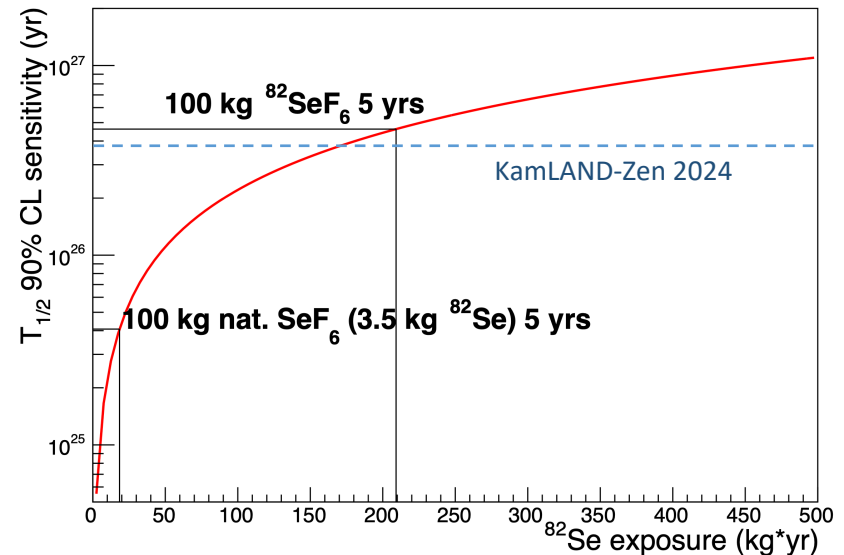
本底水平与敏感度估计

“100kg-class” experiments:

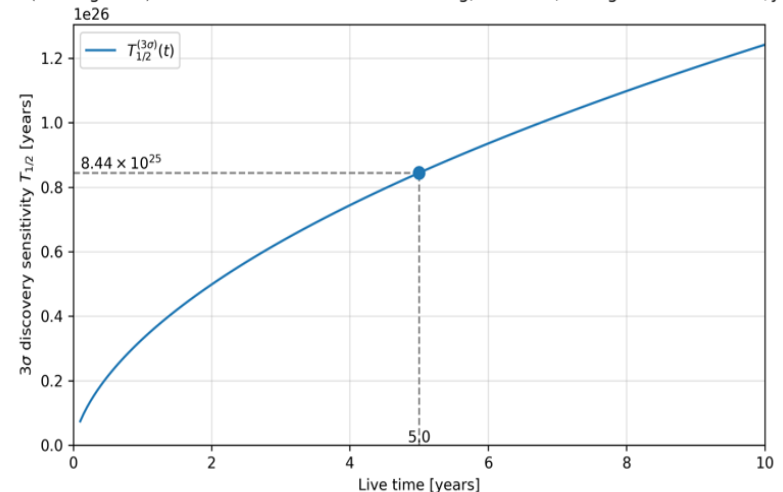


- 本底~<0.5 ct / (ton yr ROI)
 - 低于世界上主要现有和规划中的实验
- 仅用100kg提纯⁸²SeF₆气体，运行5年，即可超过当前世界最高半衰期敏感度 - KamLAND-Zen（近吨级实验）
- 使用~50kg ¹³⁶Xe，运行五年，半衰期敏感度接近10²⁶yr

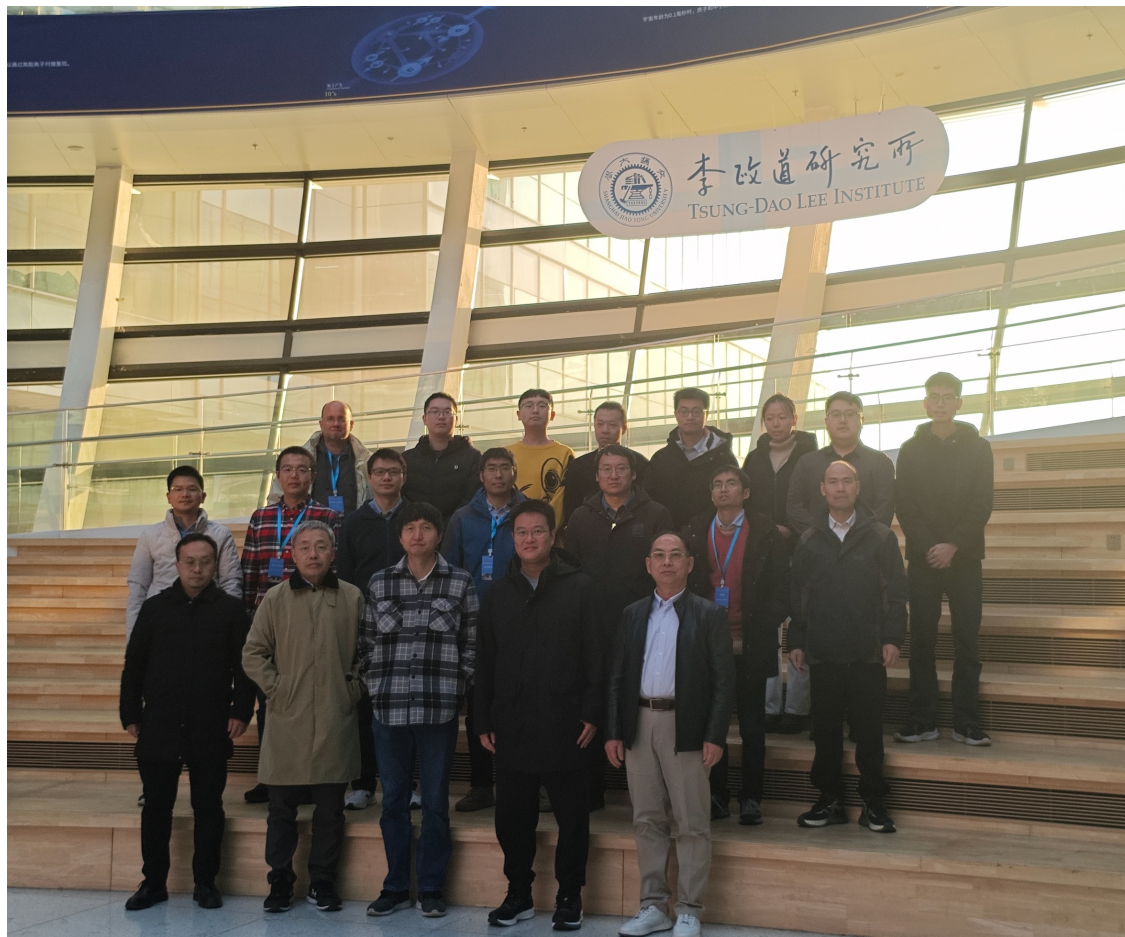
$$\log(2) * 6.02e23 / 82 * 1.e3 * x / (-\log(1-0.9))$$



Xe (57.6 kg total) → ¹³⁶Xe effective mass = 51.84 kg, $\epsilon = 90\%$, background = 1.38 cts/yr (ROI)



NvDEx合作组



- 现有来自8家单位的>30位合作者
- 欢迎加入！

未来计划

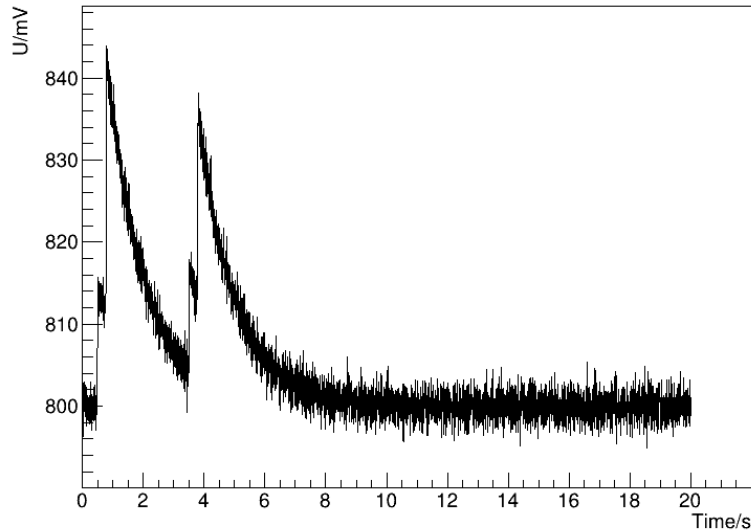
- 2026:
 - 突破能量分辨率 $<1\%$ 关键指标
 - 工程批芯片流片
 - 读出板定型，开始批产
 - 完成外屏蔽体研制
- 2027:
 - NvDEx-50Xe系统组装调试，开始数据采集
- 2032
 - 建成NvDEx-100，本底 $\sim <0.5$ ct / (ton yr ROI)
- 203X
 - 建成NvDEx-nt，冲击 $0\nu\beta\beta$ 的发现

小结

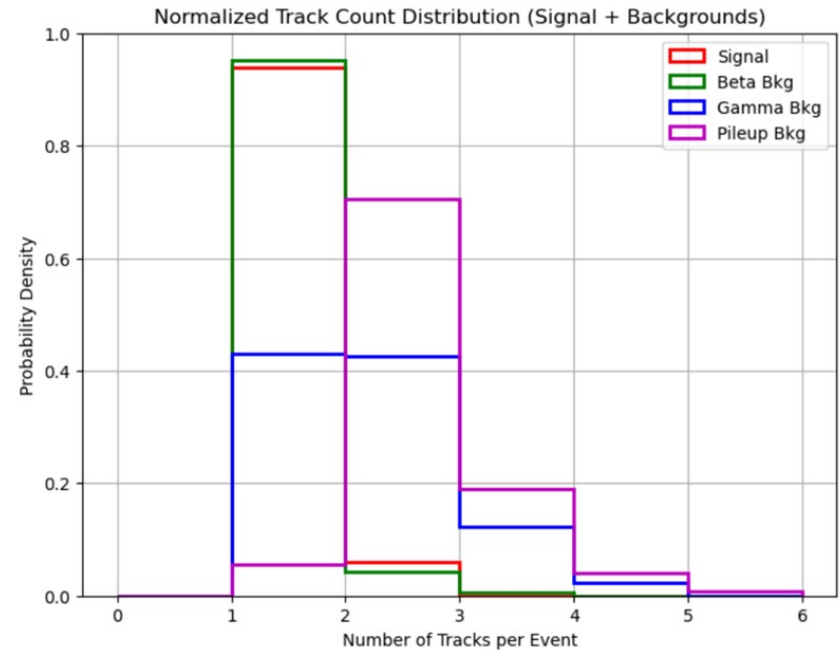
- NvDEx实验概念使用全新的低噪声芯片无放大电荷读出技术，可以实现 ^{82}Se 的高Q值与TPC事件拓扑重建能力这两大优势的结合
- 进行了5次读出芯片流片，得到最小等效电子噪声 $<45e^-$
- 小样机成功探测到了 α 粒子径迹，能量分辨率FWHM = 3.4%
- 气腔、铜屏蔽体加工组装完成，气路接管完成
- 计划2027年完成NvDEx-50Xe系统组装调试，开始实验数据采集

谢谢😊 欢迎加入！

模拟与软件 - 堆积事例本底



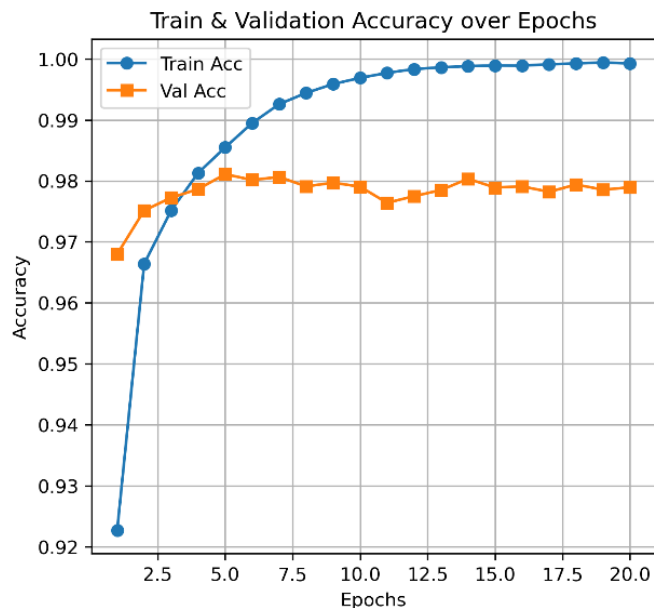
堆积事例信号模拟



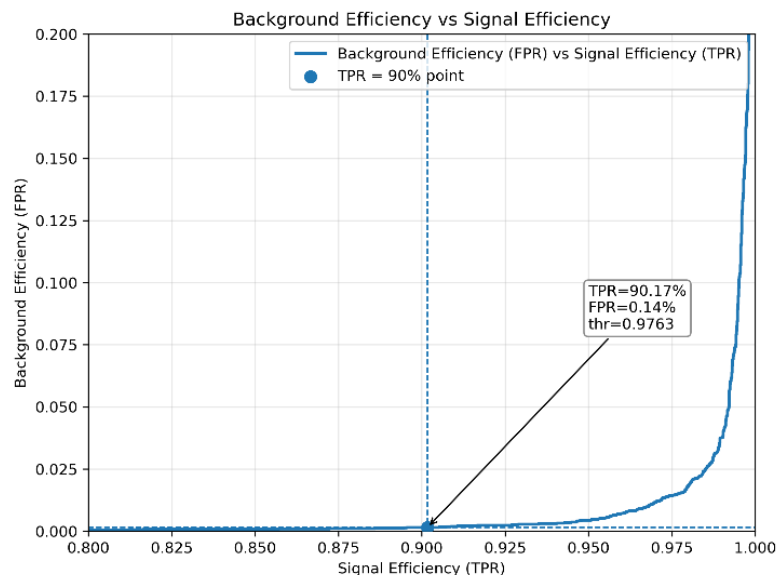
不同类别事例的径迹数分布

- 增加了模拟堆积事例本底的功能
- 使用DBCSAN算法进行堆积事例本底的筛选
- 100kg富集的 $^{82}\text{SeF}_6$ 气体产生的 $2\nu\beta\beta+2\nu\beta\beta$ 堆积本底事例率为10.2 cts/yr

模拟与软件 - 神经网络信号本底甄别



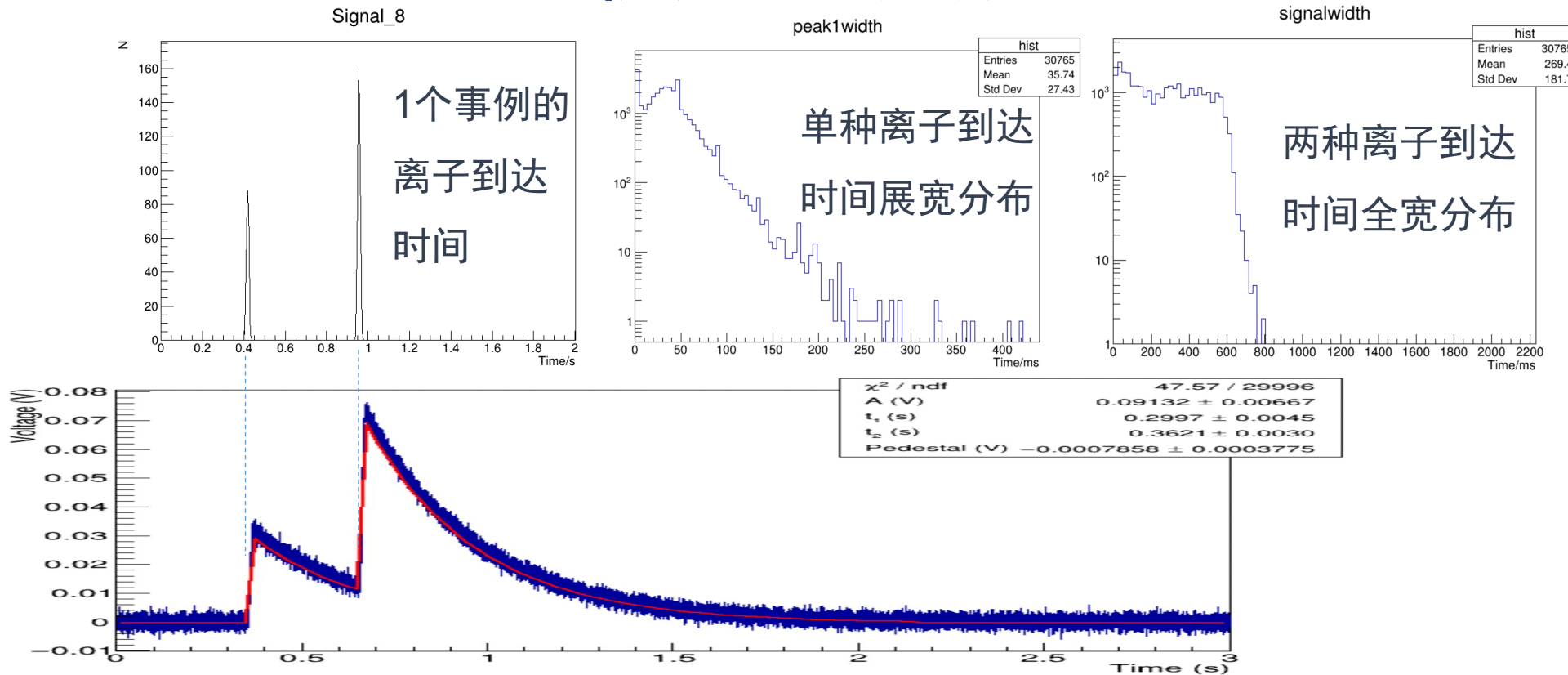
模型训练准确率曲线



信号与本底的效率对比

- 训练后模型区分信号与堆积本底的准确率可达98%
- 90%信号效率时，神经网络本底压低100倍
⇒ 远高于CDR中10倍的保守估计

长积分时间问题

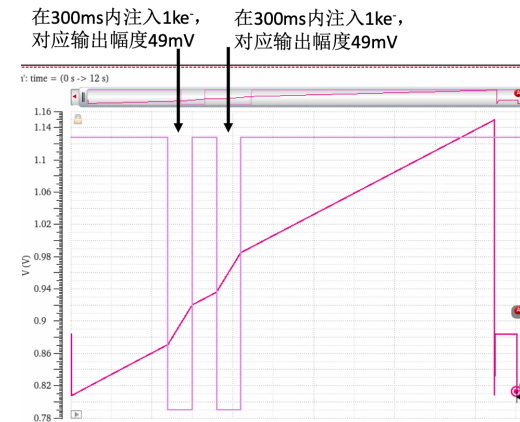


- 离子漂移速度远慢于电子
 - 单种离子到达时间展宽平均36ms，最长~300ms
- 需要s量级的信号衰减时间，或取消反馈电阻，使用开关复位
- 然而芯片内部可实现的反馈电阻范围有限
 - 当前芯片信号衰减时间最长只能调到几十ms，不适用于离子漂移信号读出

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

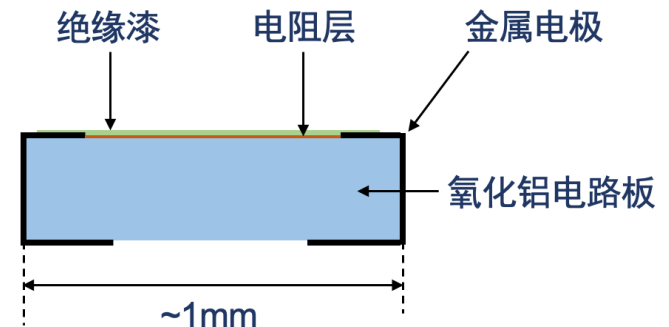
- 衰减时间 $\sim 1\text{s}$ ，反馈电容 $\sim 5\text{fF}$
 - $\Rightarrow$ 反馈电阻值 $\sim 1\text{s}/5\text{fF} = 2 \times 10^{14}\Omega$
- 市面上没有 $\sim 10^{14}\Omega$ 阻值的电阻
- 计划自研或者找公司研发
 - e.g. 绝缘漆混合防静电漆实现电阻层



10TΩ, 6mm



1TΩ, 2mm



解决方案3：片外开关

- MEMS开关尺寸太大



5mm × 4mm