

N_vDEx实验进展与计划

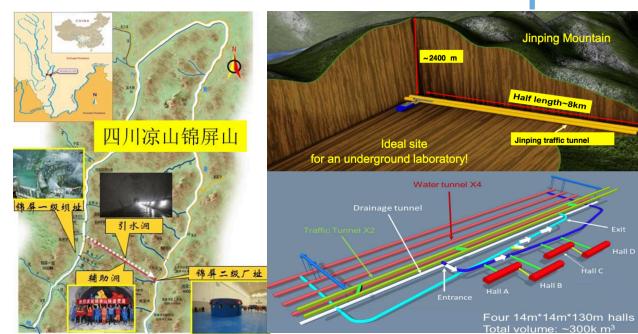
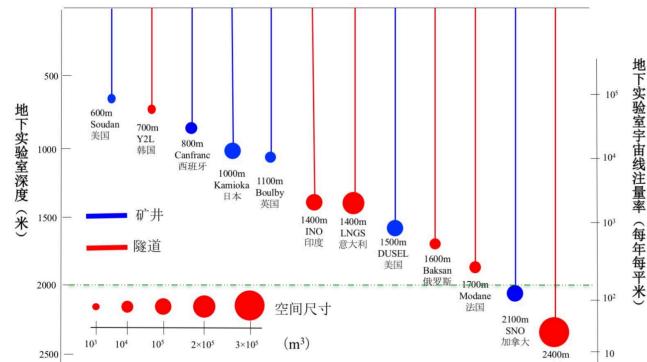
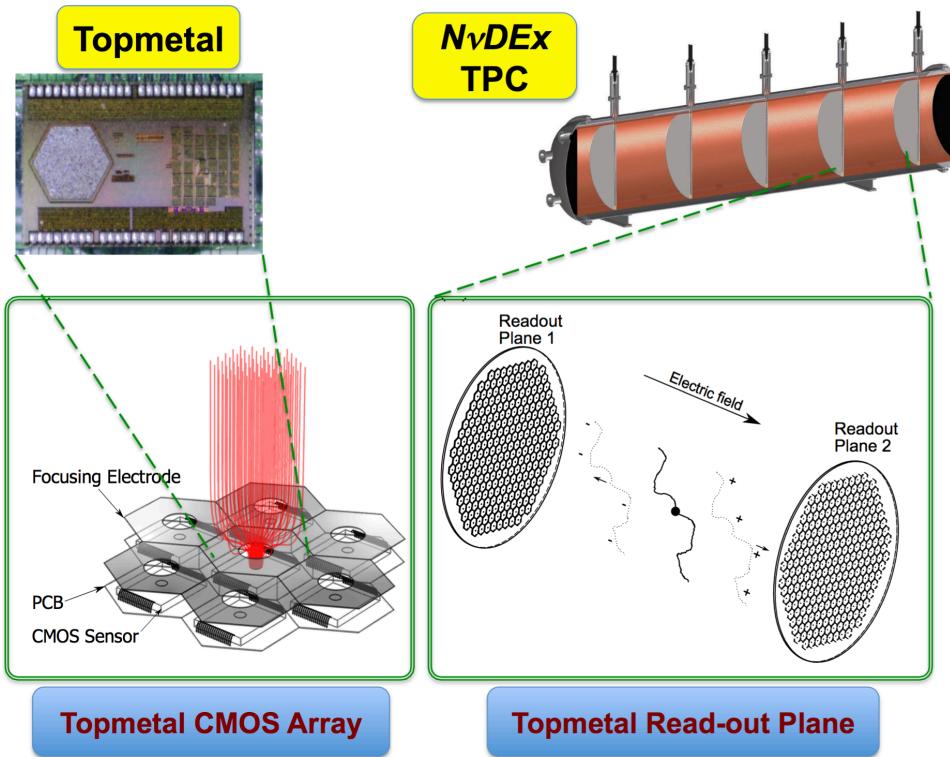
仇浩

中科院近代物理研究所

报告内容

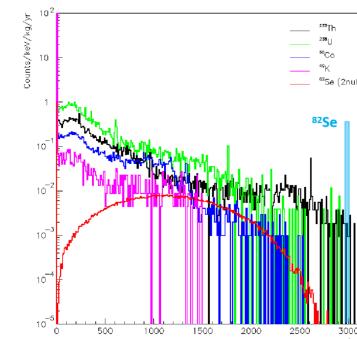
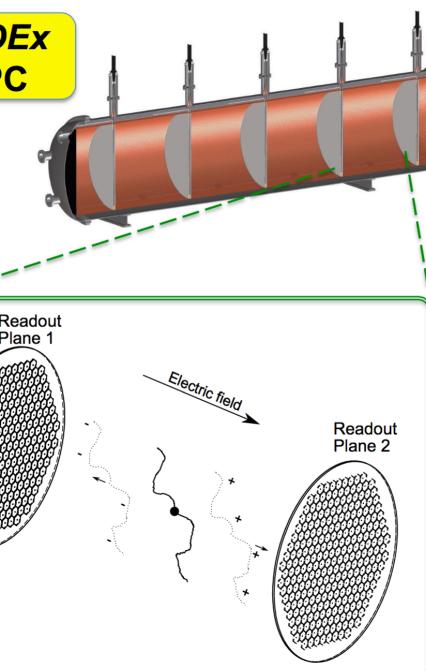
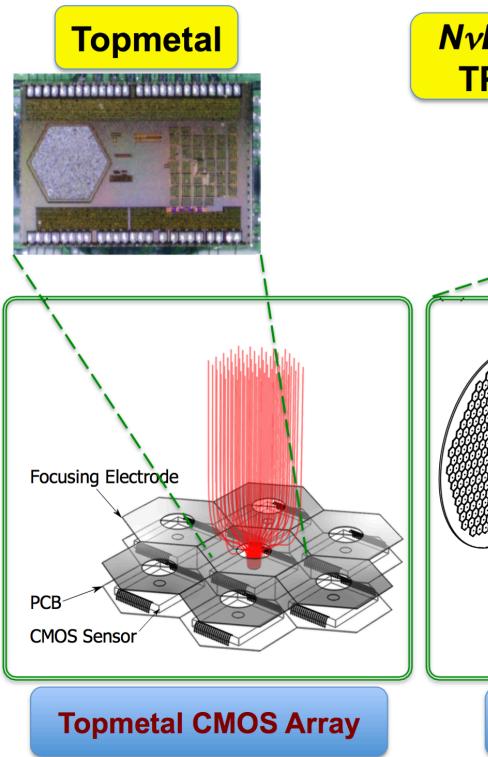
- NvDEx实验概念
- Topmetal-S芯片研制进展
 - 测试结果
 - 第一版芯片的问题与解决方案
- NvDEx-100地面样机进展
 - 高压气腔、铜屏蔽层、绝缘层
 - TPC场笼
 - 气体系统
 - 地面实验室
 - 模拟
 - 本底控制
- 未来计划

NvDEx实验概念

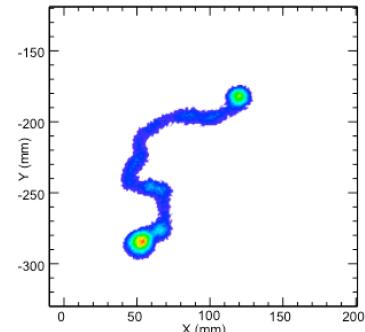


- 高压 $^{82}\text{SeF}_6$ 气体TPC，使用Topmetal CMOS芯片直接读出
 - CJPL世界最深的地下实验室

N ν DEx实验概念



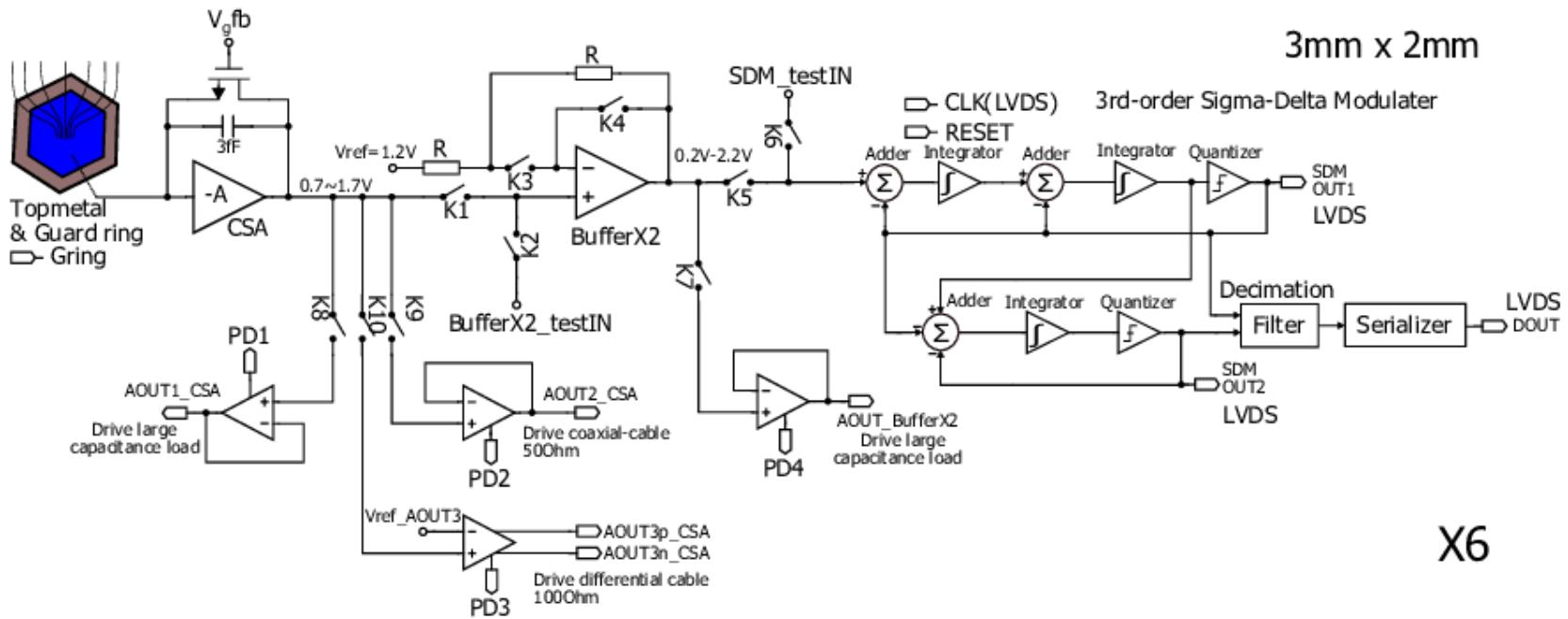
辐射本底能谱



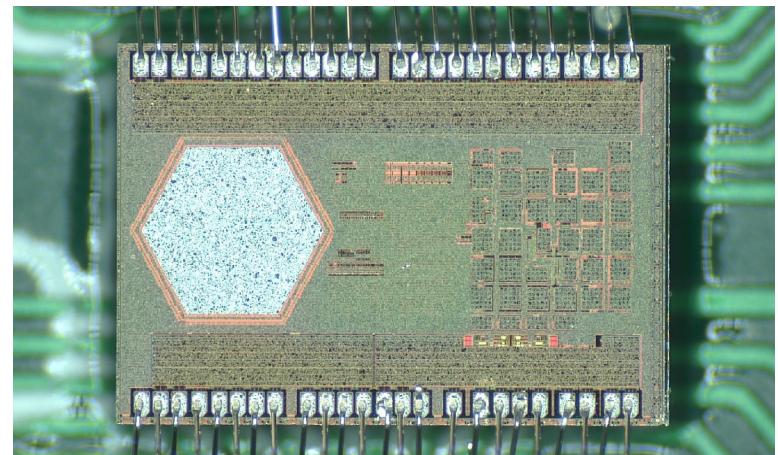
$0\nu\beta\beta$ 事例能量沉积

- 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(~1% FWHM)

Topmetal-S芯片 (Version 1)

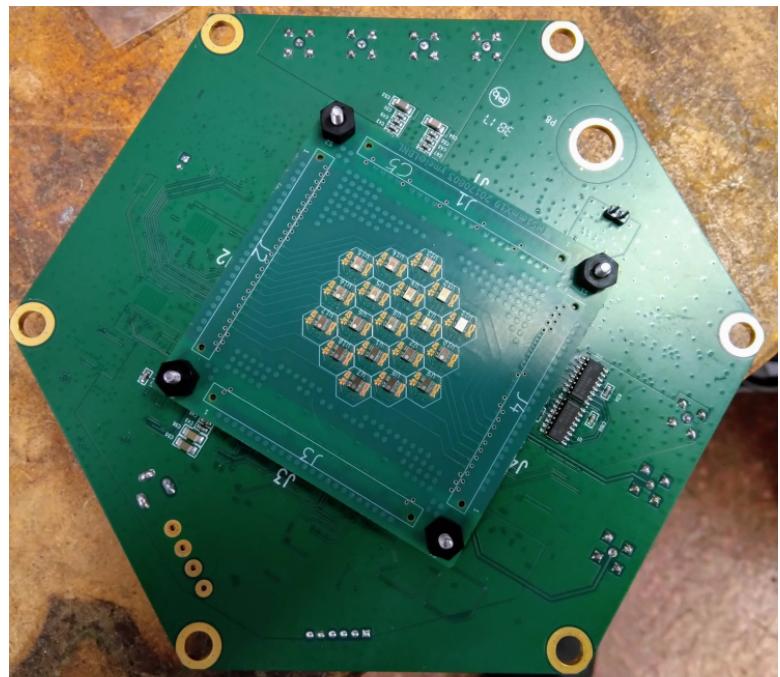
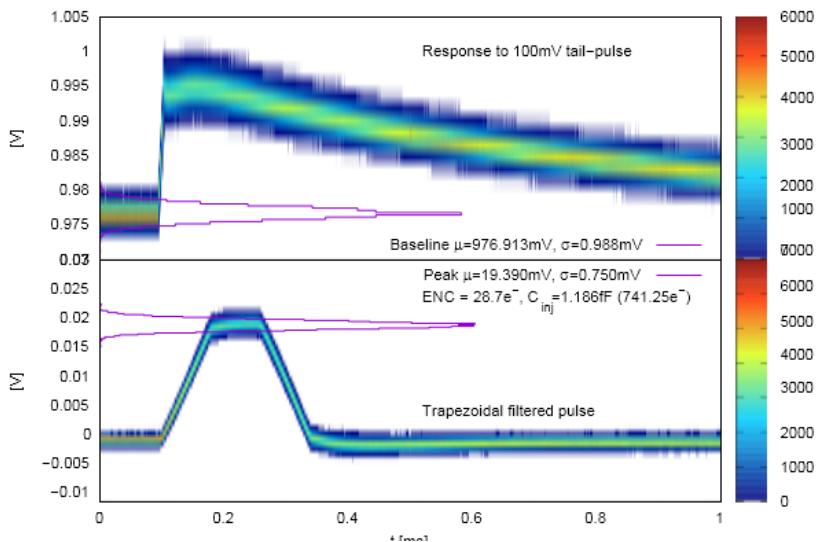


- Topmetal-S芯片可实现无放大离子漂移探测
- 预期电子学噪声达到 $30e^-$, 是NvDEx实验实现1% FWHM能量分辨率的关键
- $2\text{ mm} \times 3\text{ mm}$



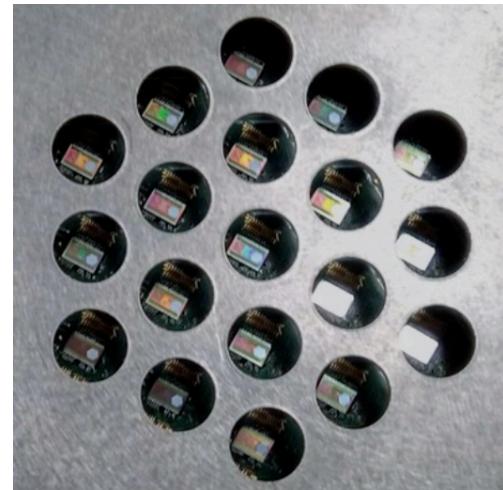
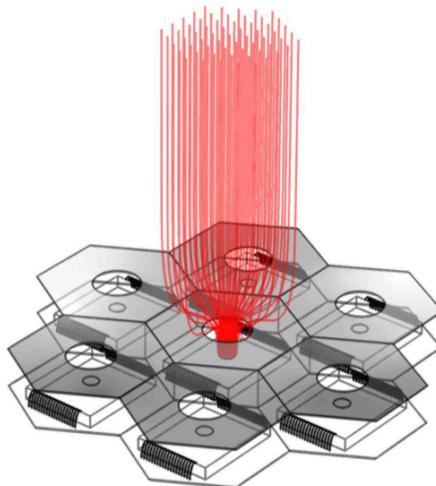
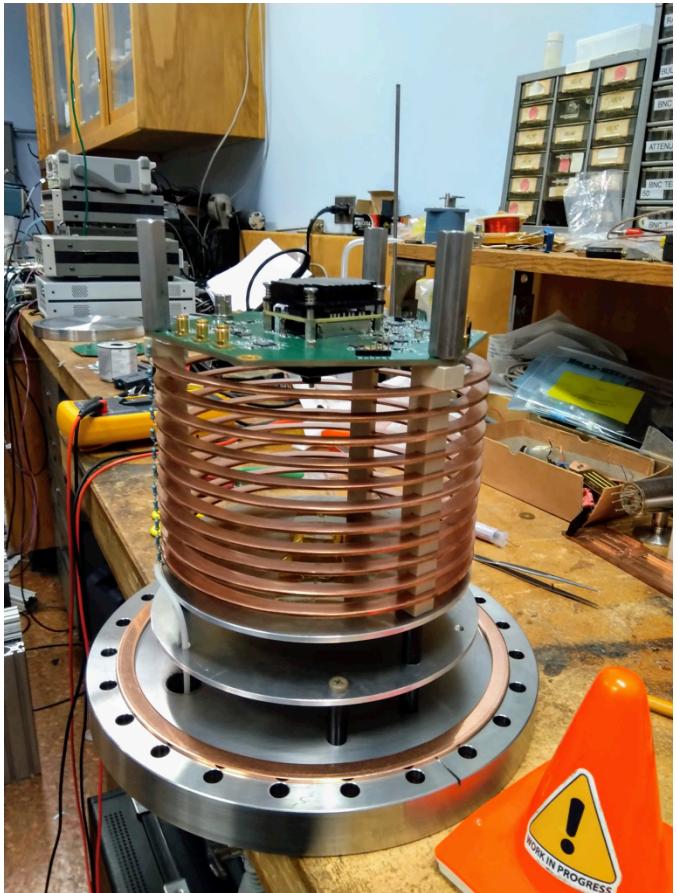
Topmetal-S测试

< 30e⁻ noise CSA

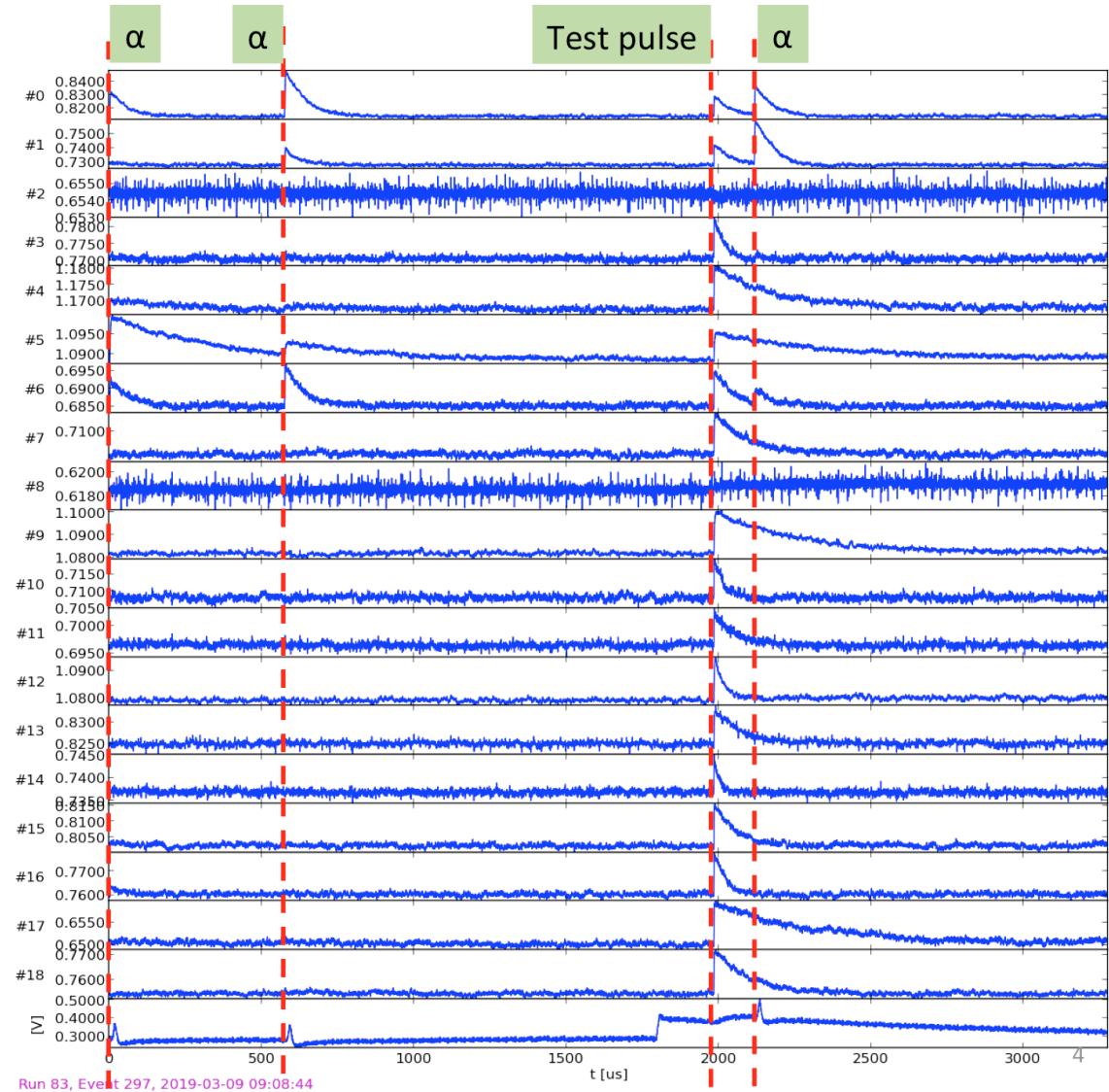


- 单芯片电学测试
 - 假设guard ring电容为设计值，噪声达到30e⁻要求
- 19个芯片组成阵列，进行能量分辨率测试

LBNL测试系统

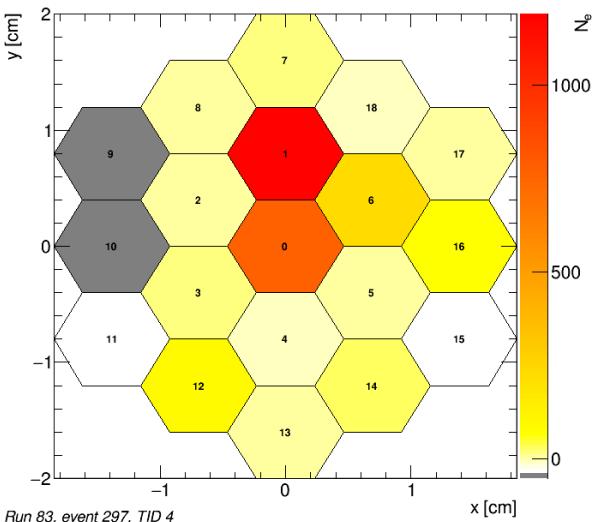
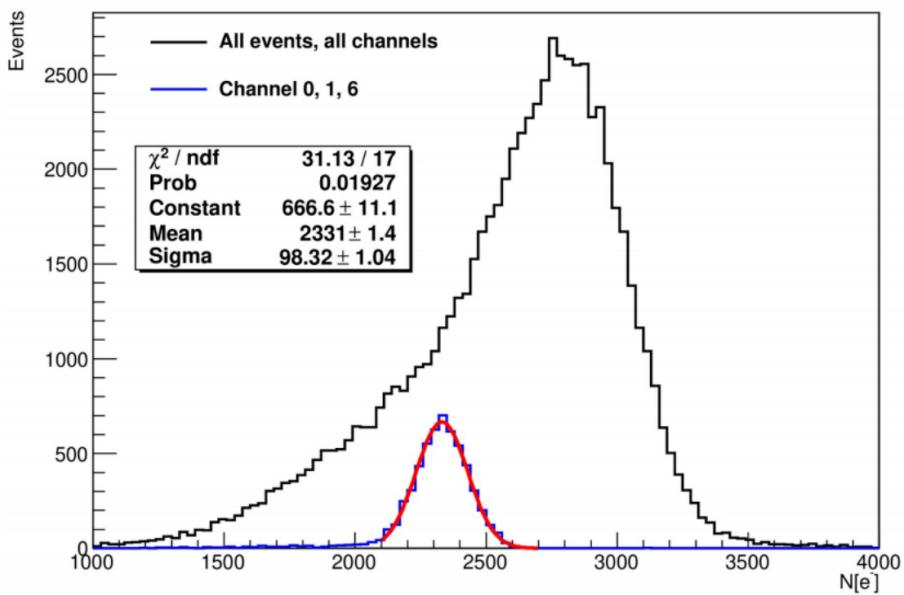


LBNL测试-信号

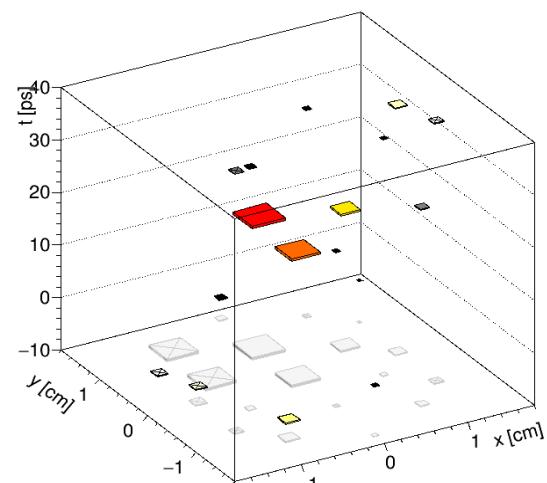


- ^{241}Am $E_\alpha = 5.5 \text{ MeV}$
- 明显的物理信号

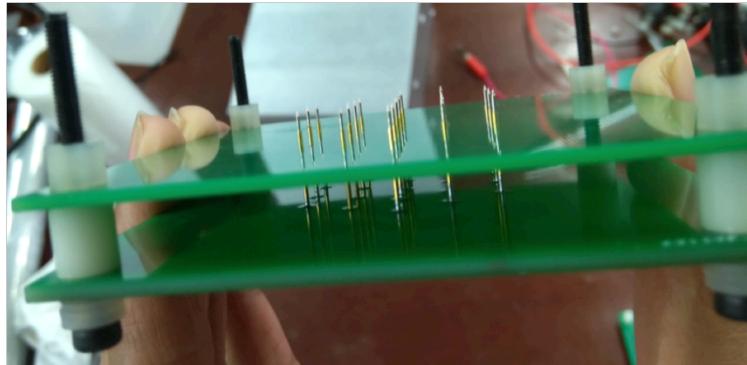
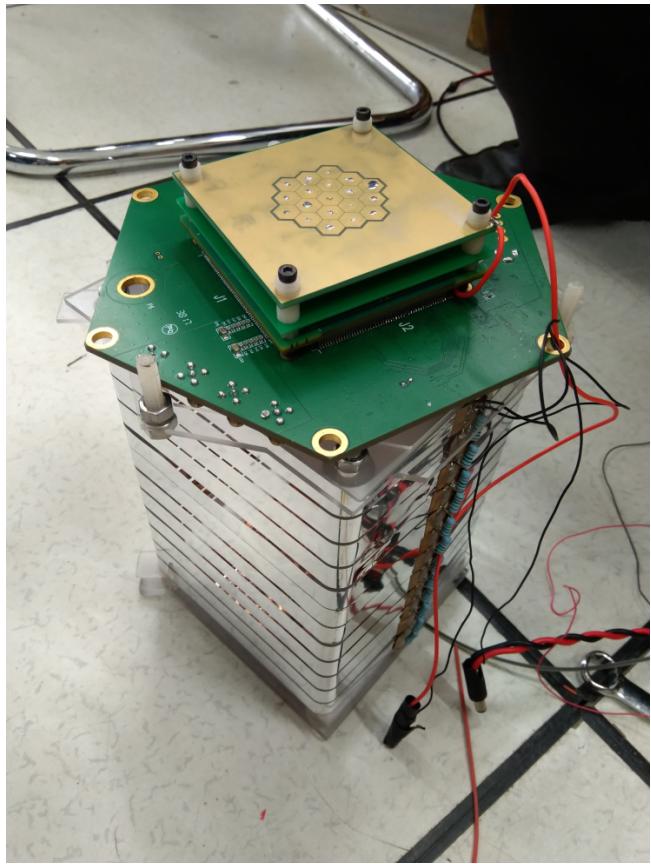
LBNL测试-能谱



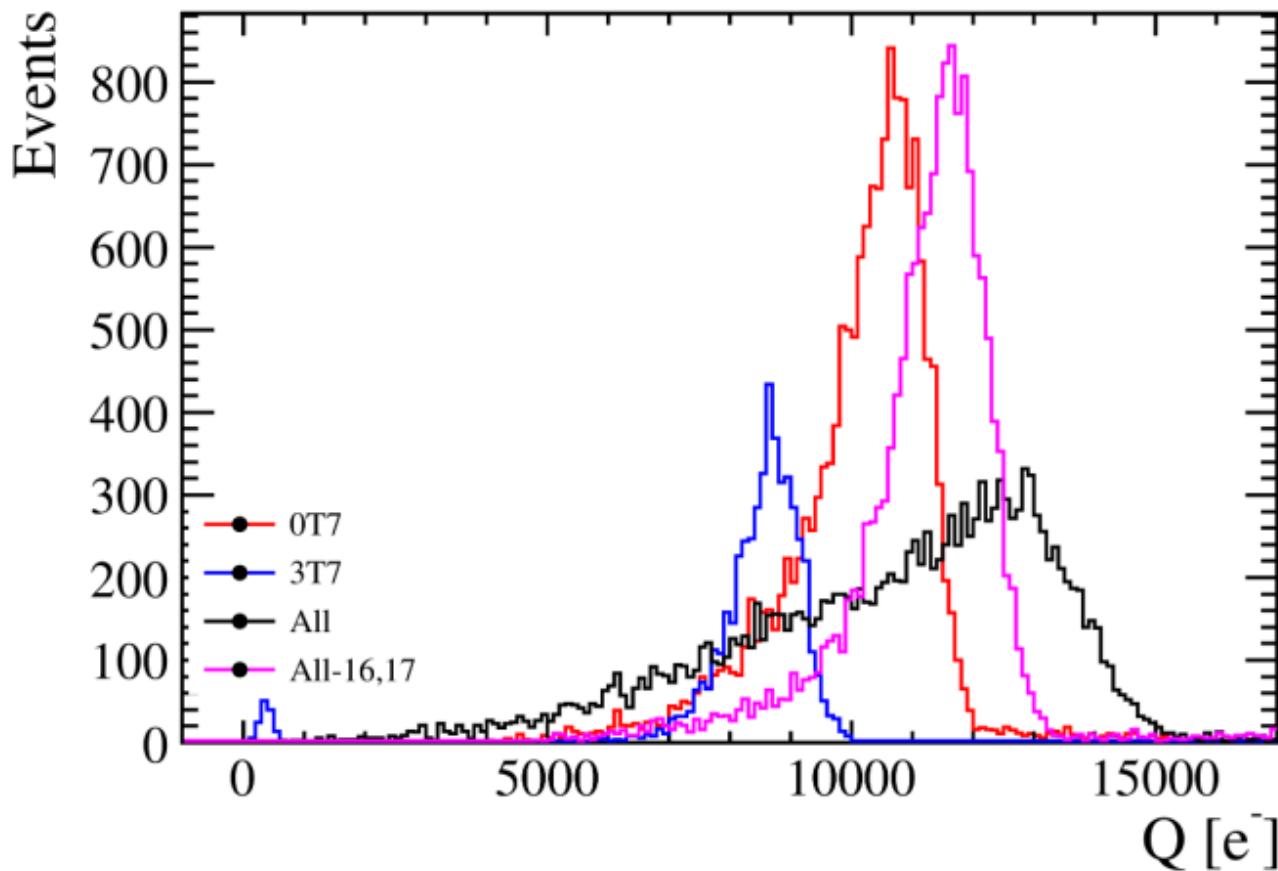
- ~1%预期电子数
 - 漂移电场低：电子与离子复合？
 - 电荷聚焦收集效率？



华中师大测试系统



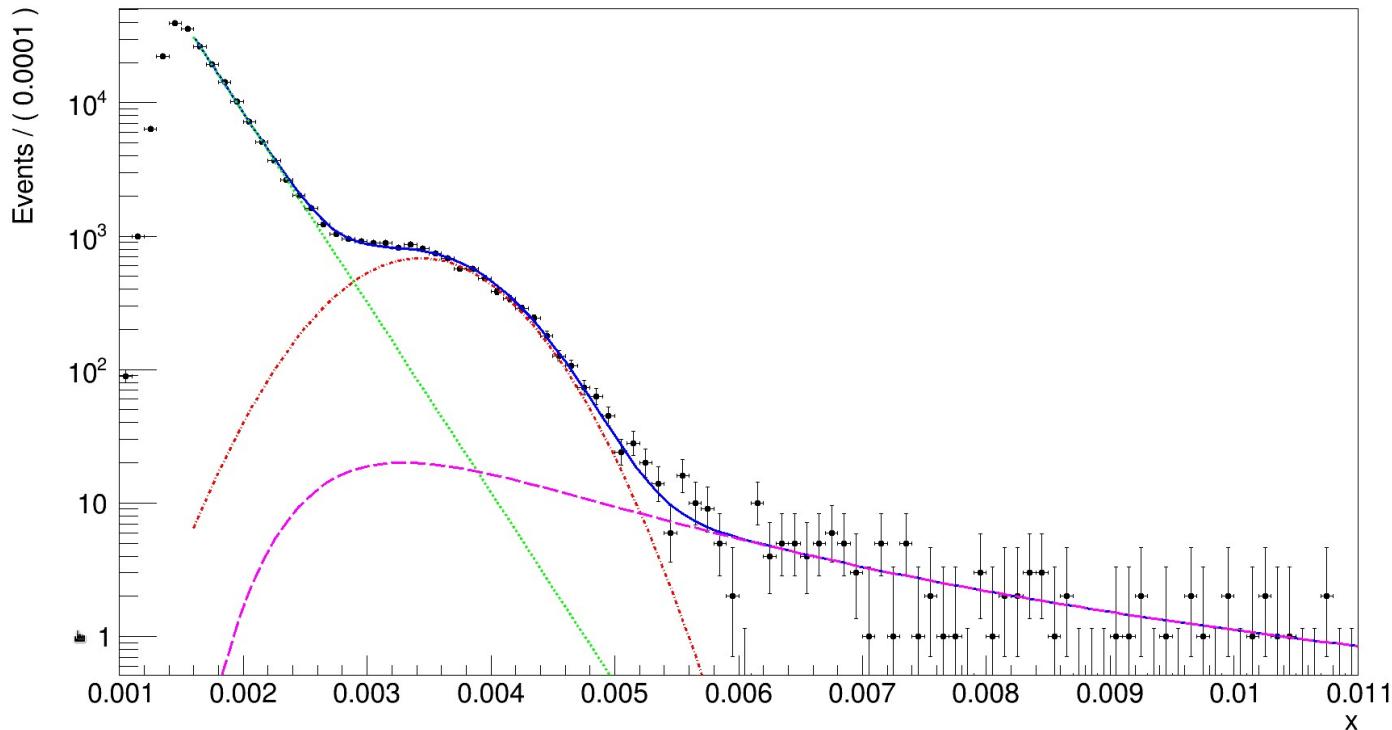
华中师大测试- ^{241}Am α 能谱



- $^{241}\text{Am} E_\alpha = 5.5 \text{ MeV}$
- $\sim 5\%$ 预期电子数
- 为了理解测得的“低电子数”，进行了大量的测试工作：
 - 使用皮安表、外接CSA
 - 检验了HV、 α 源、气体、聚焦。。

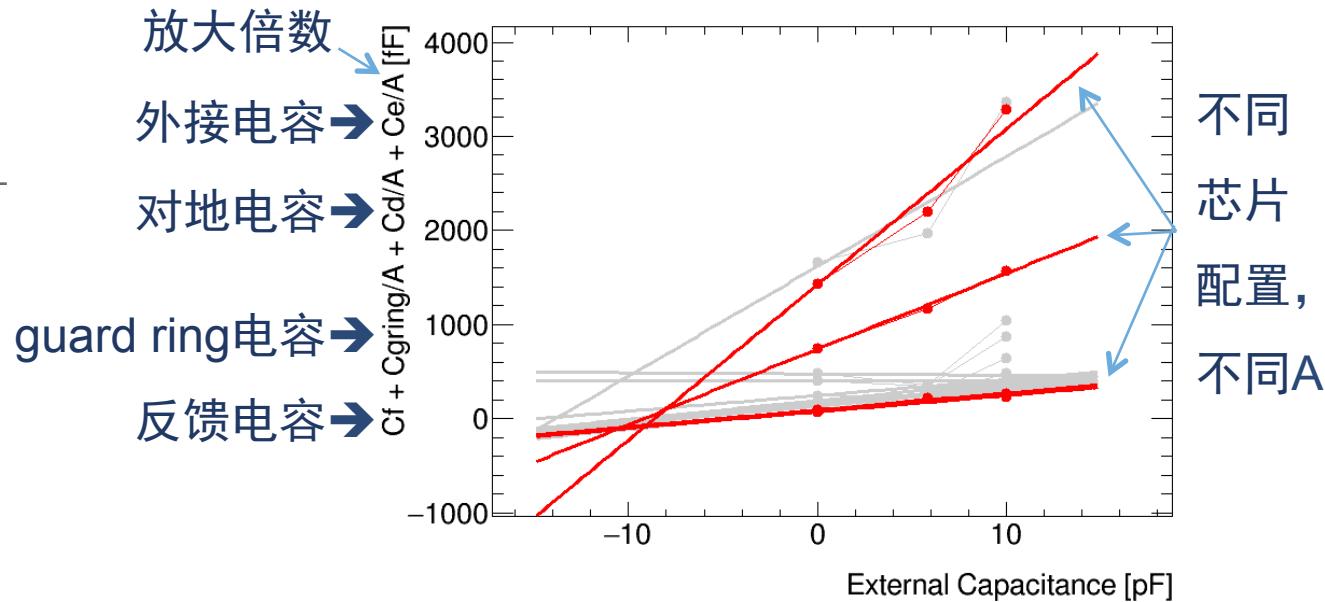
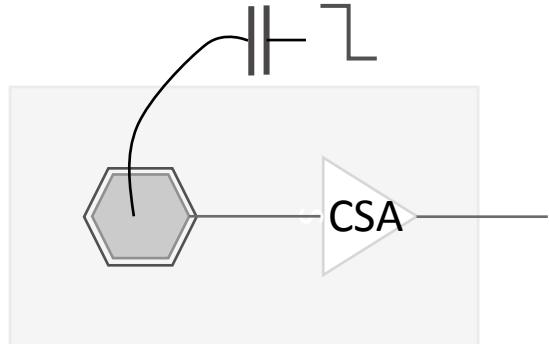
华中师大测试- ^{241}Am γ 能谱

A RooPlot of "x"



- $^{241}\text{Am} E_{\gamma} = 59.5 \text{ keV}$
- 相对于 α 源的优势：电离区域小 → 单个芯片，不用担心进入灵敏体积前的能损
- ~5%预期电子数 → 芯片读出本身的问题

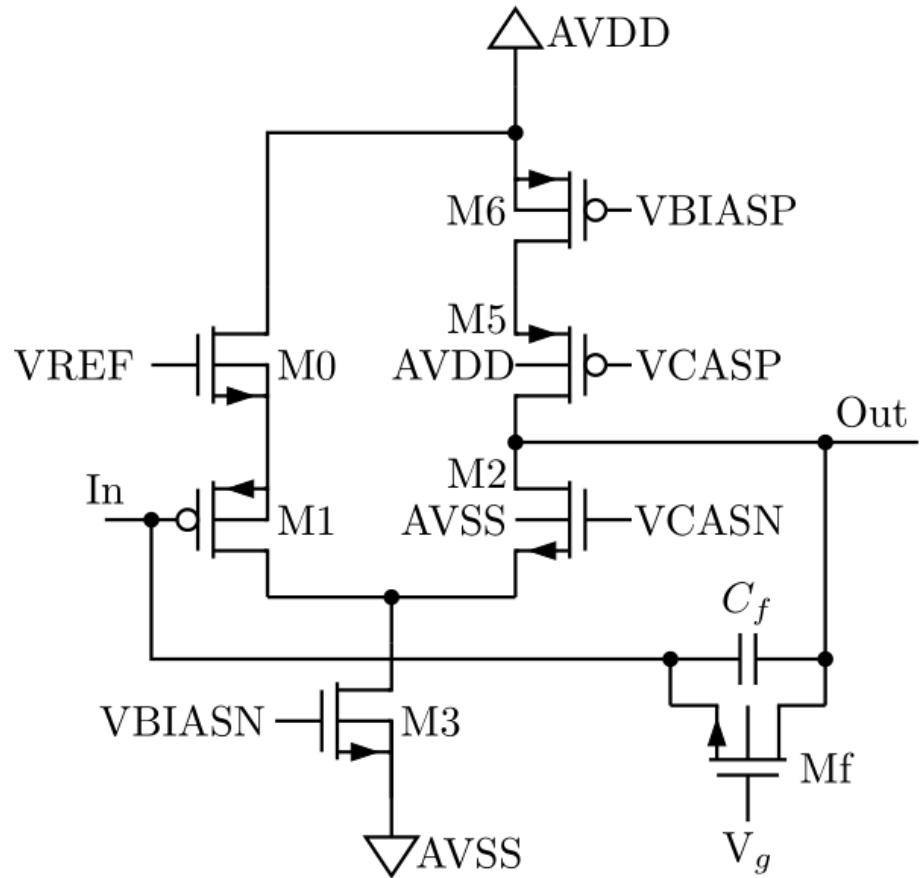
电学测量



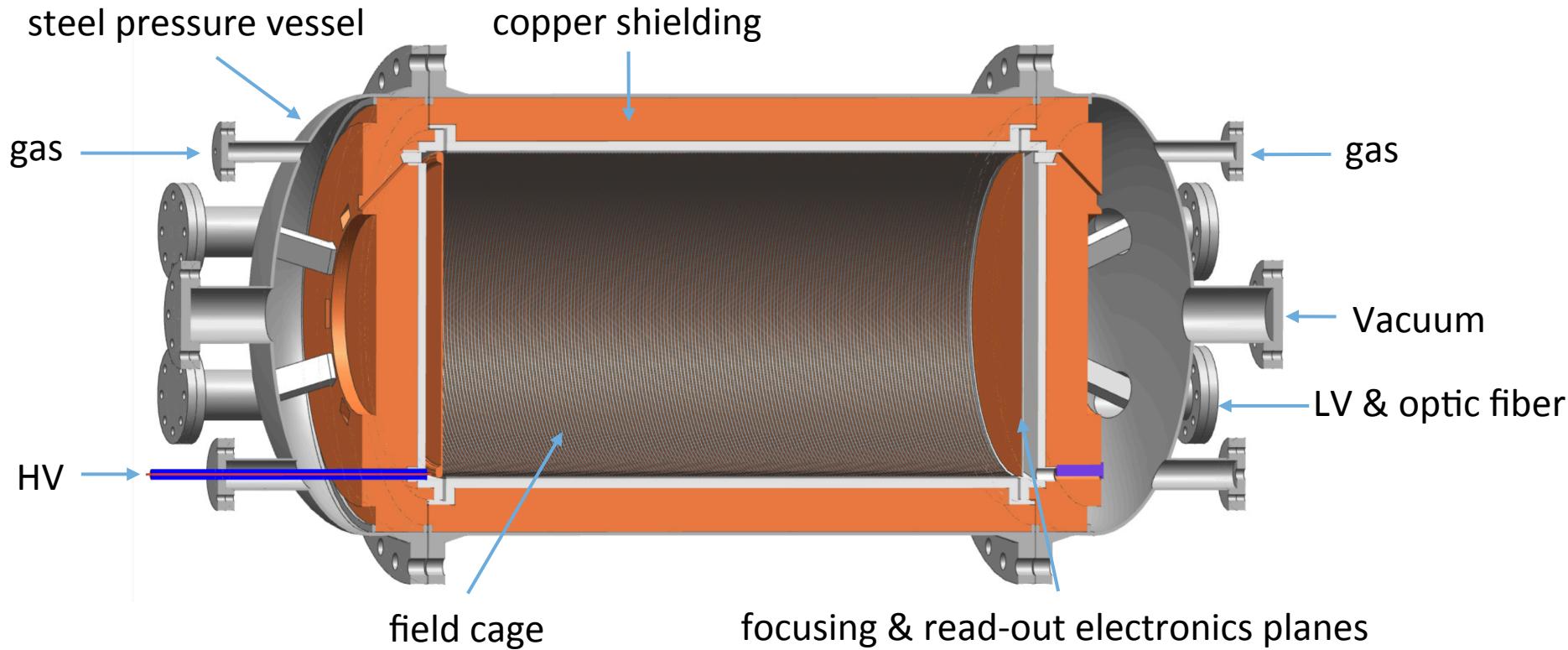
- 进行了不同芯片配置（不同放大倍数A）、不同外接电容的测量
- 结果分析发现：无论怎样改变芯片配置，能正常工作时A始终不够大

第一版Topmetal-S芯片的问题与解决方案

- 进一步分析和仿真研究发现：放大倍数不够高，是由于偏置电压由高阻抗的电压源提供，放大倍数调高时无法稳定工作
- 解决办法：重新设计了芯片的偏置电压部分
- 第二版芯片
 - 即将在国产工艺流片
 - 预计将于5月底投版流片
 - 8月底返回展开测试
 - 年底完成初步测试

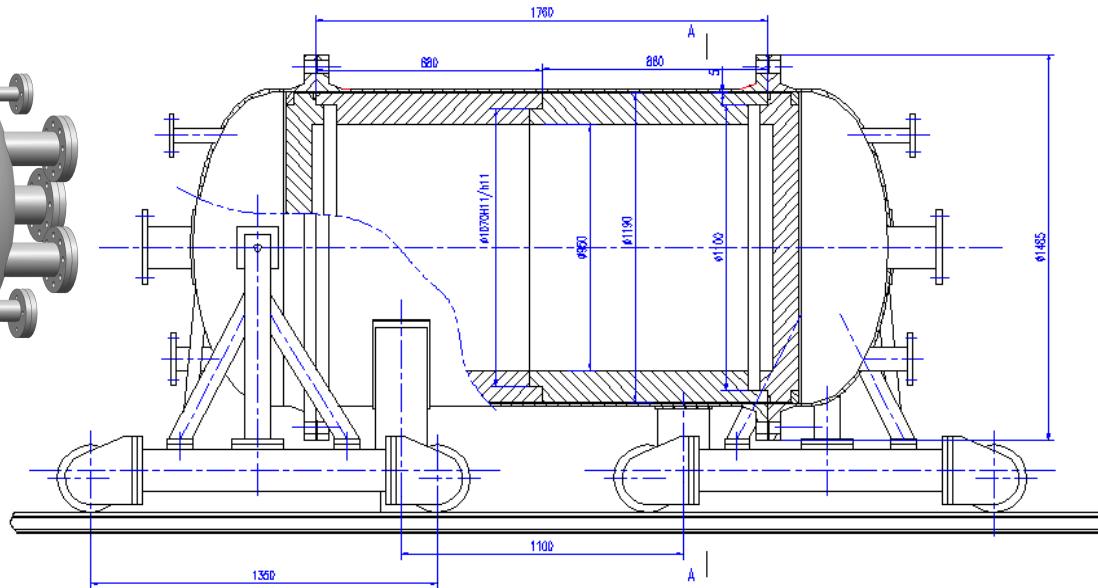
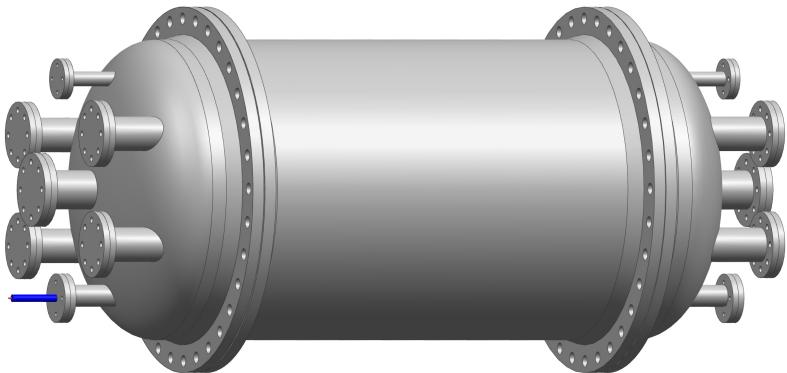


NvDEEx-100



- 灵敏体积含有~100kg 10 atm $^{82}\text{SeF}_6$ 气体
- 首先使用无毒的SF₆气体研制地面样机
 - 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——SeF₆有毒，环境含量要求<0.05 ppm
- 与读出平面联合测试：电子漂移（地面）、离子漂移（地下）

高压气腔



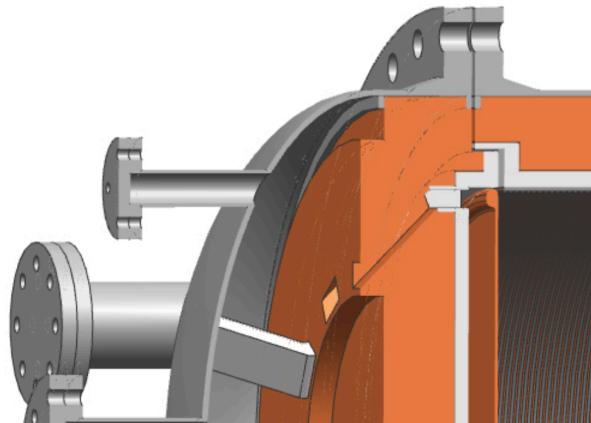
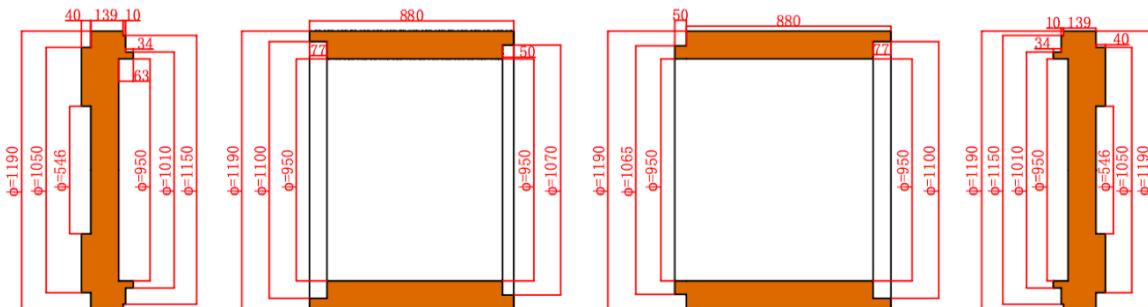
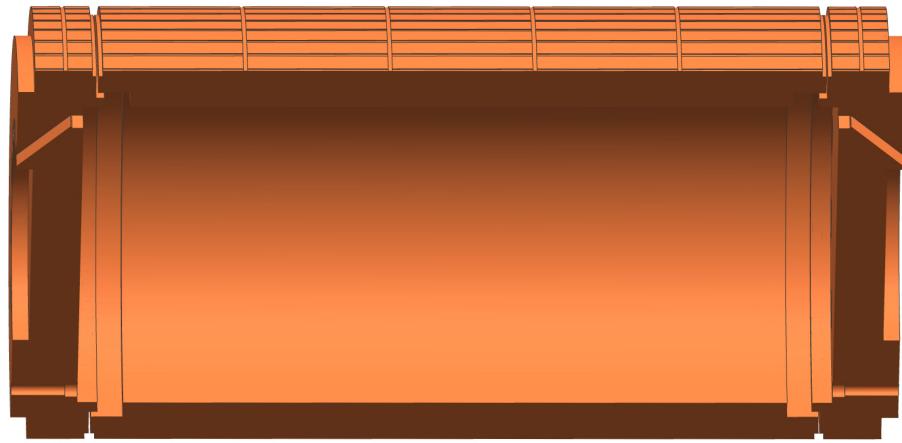
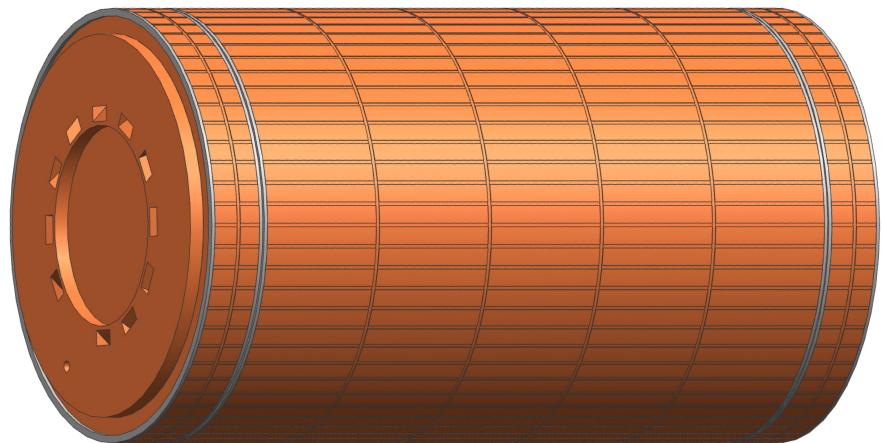
- (低本底) 316L不锈钢
- 桶部长度: 176 cm, 内径: 120 cm, 厚: 1 cm
- 漏率不大于 1×10^{-10} mbar .L/s
- 完成设计, 开始采购部件、加工

高压气腔



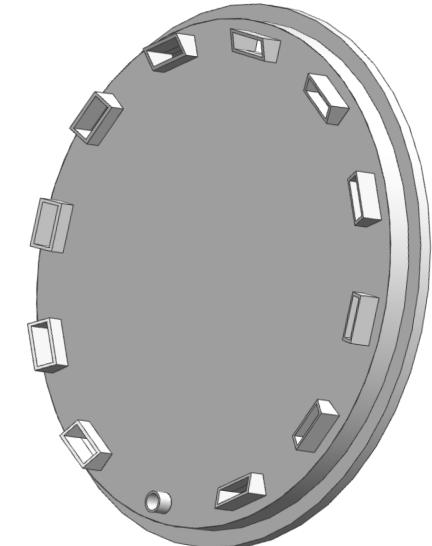
- (低本底) 316L不锈钢
- 桶部长度: 176 cm, 内径: 120 cm, 厚: 1 cm
- 漏率不大于 1×10^{-10} mbar .L/s
- 完成设计, 开始采购部件、加工

铜屏蔽体

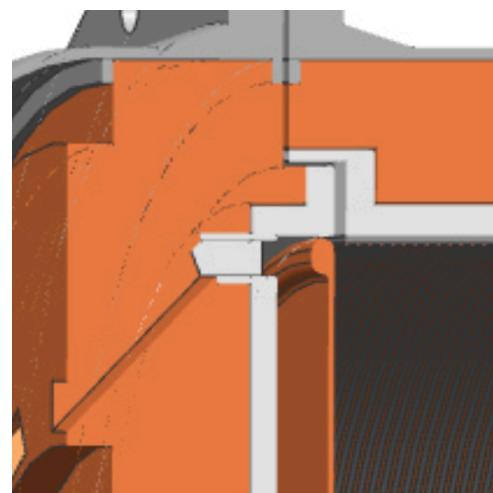


- (低本底) 无氧铜
- 厚12 cm
- 倾斜电缆、光纤、气体通道，避免外部粒子直射灵敏体积
- 完成设计，即将开始采购原料、加工

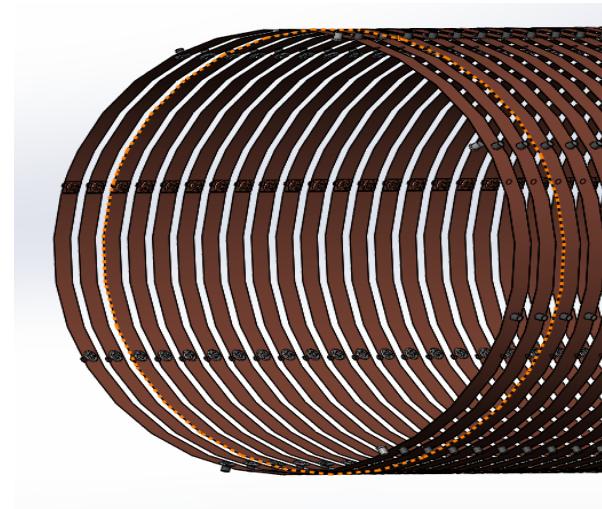
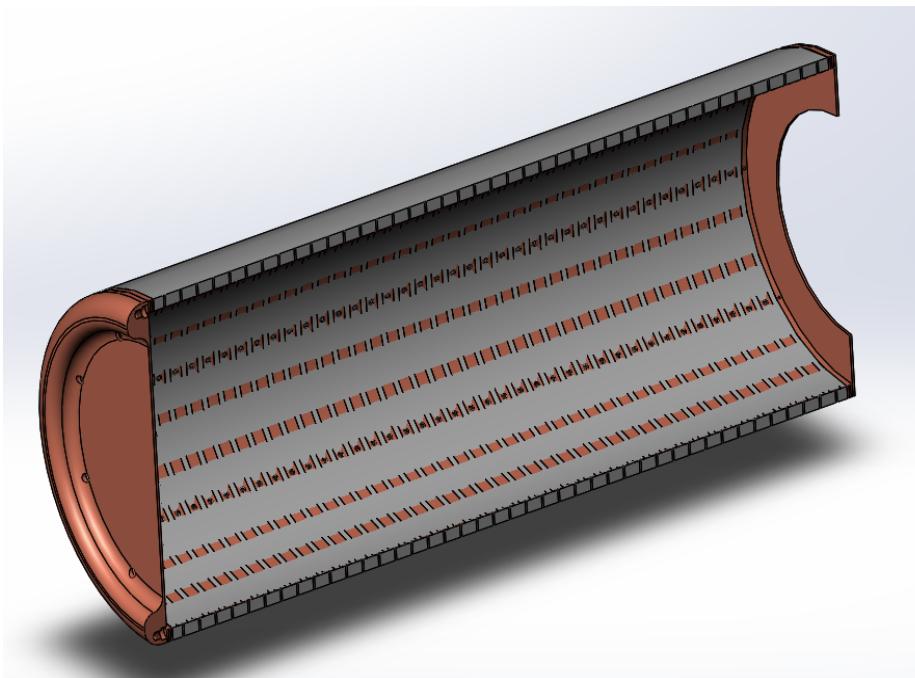
绝缘层



- 高密聚乙烯HDPE
- 厚2.5cm
- 为满足绝缘要求，高压极板、场笼到铜屏蔽体的任何间隙距离不小于5cm



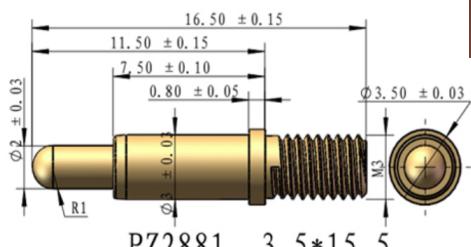
TPC场笼



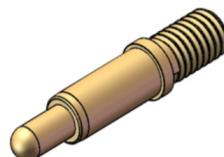
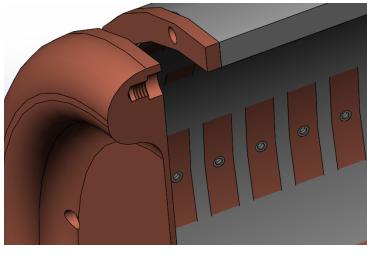
- 首先研制一个小样机，检验设计的可靠性、合理性
- 内径260mm，长620mm
- HDPE 作为支撑
- 电极：FPC(宽度22cm) 铜纯度好于99.9% 或 0.1mm铜带 (TU1)
- 铜螺钉连接电阻串，HDPE螺钉固定

TPC场笼-电连接件

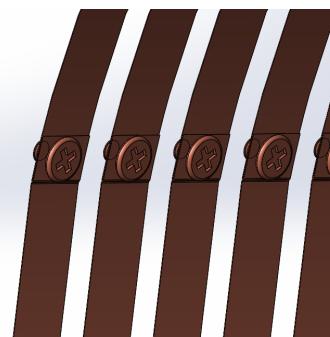
高压顶板与场笼弹性连接件
材质可定制



PZ2881 3.5*15.5
黄铜镀金 电流1A
行程3mm
弹力2.5mm=50gf

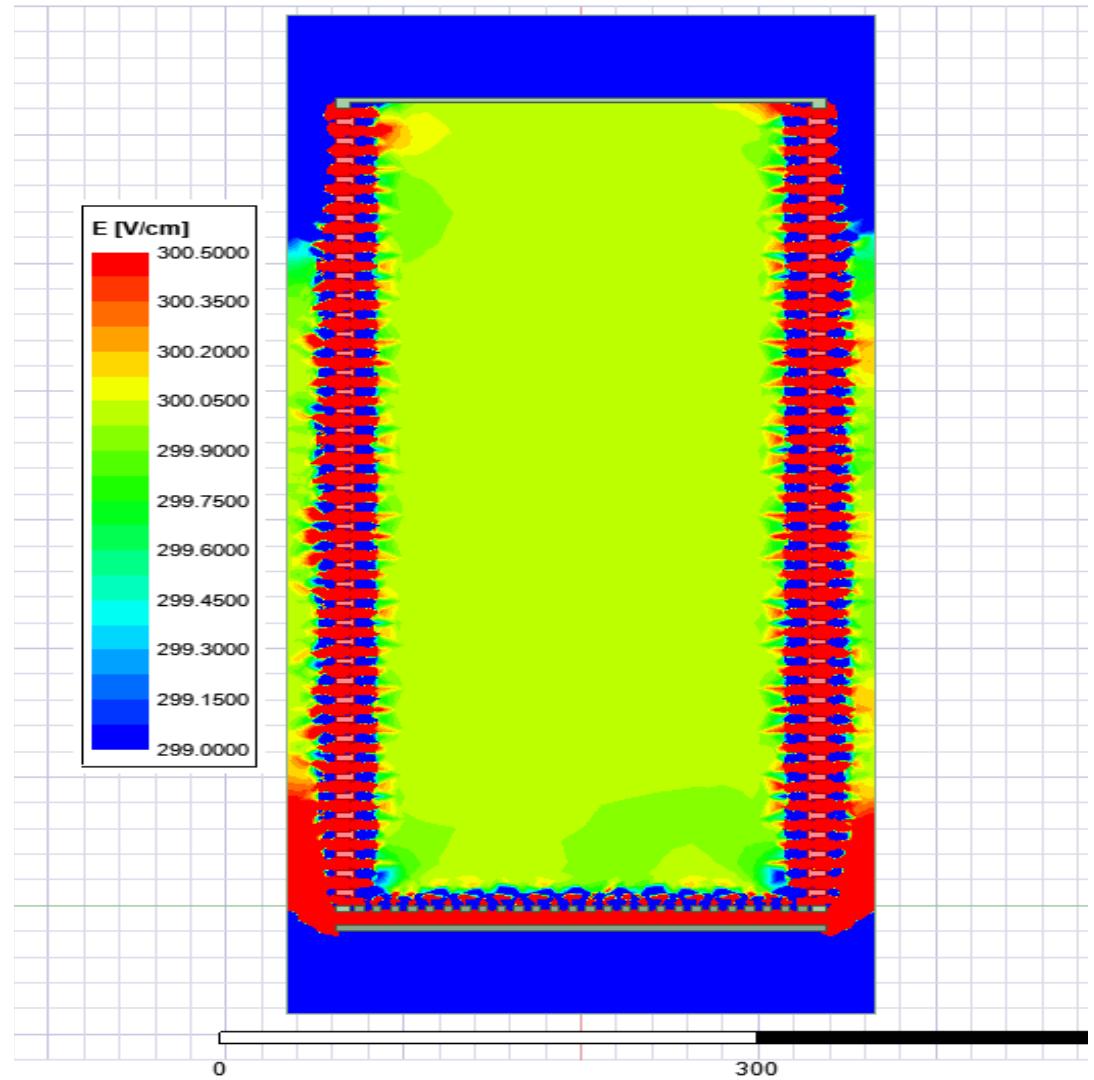


电极接头对接螺钉
材质可定制

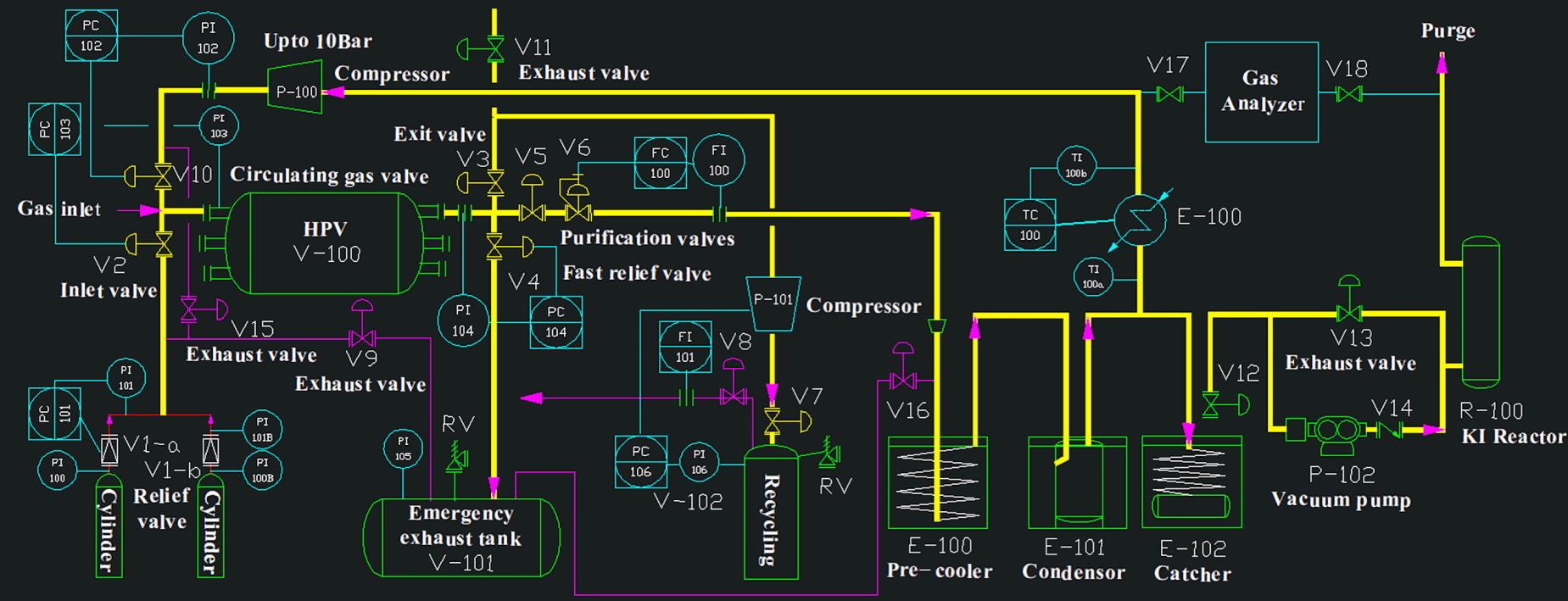


TPC场笼-电场模拟

- 设定电场强度300V/cm
- 初步模拟显示，HDPE及对接螺钉对电场一致性影响可忽略

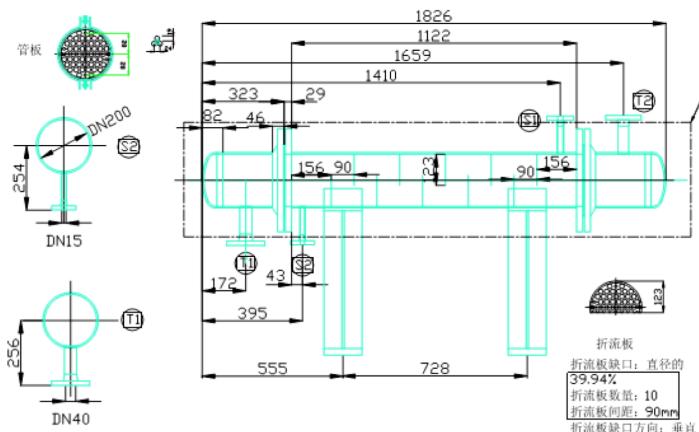


气体系统

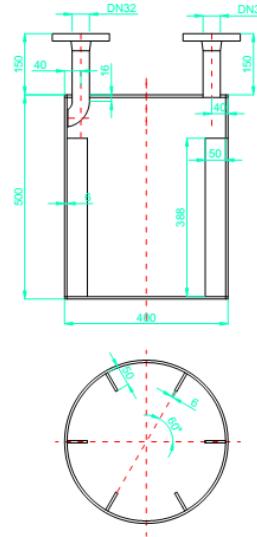


- 真空 → 充Ar/He到10atm → 检查气密性 → Ar/He泵入回收罐 → 真空 → 充SF₆/⁸²SeF₆ 到10 atm → 检查气密性, 实验取数 → 冷凝SF₆/⁸²SeF₆ → 系统吹空气至尾气反应器
- 在紧急情况下（如检测到漏气），将⁸²SeF₆排入紧急排放罐，再冷凝
- 整个系统置于负压室中，设置气体监测系统和SeF₆反应器，作为第二道安全防线

气体系统



预冷换热器设计



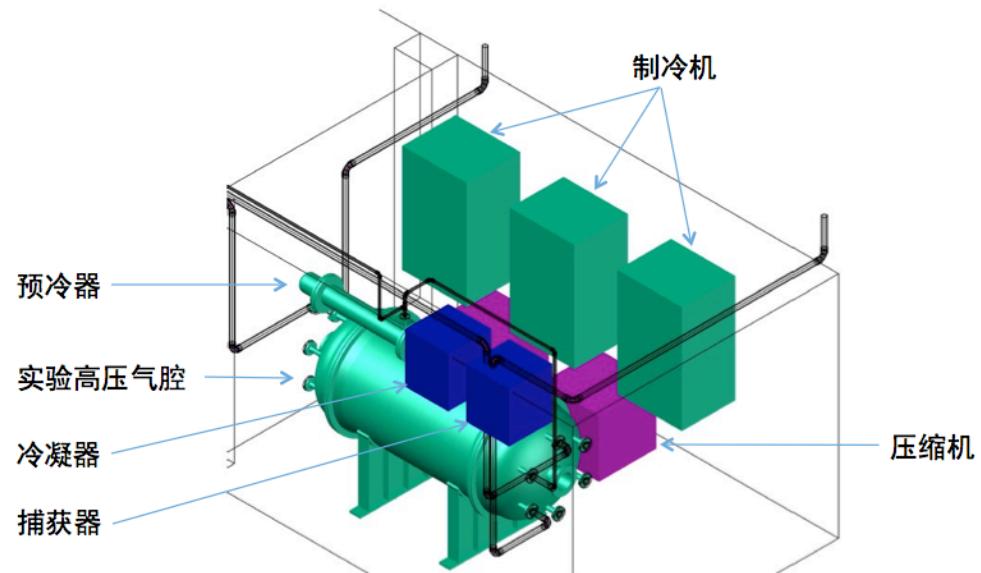
冷凝器设计



制冷机

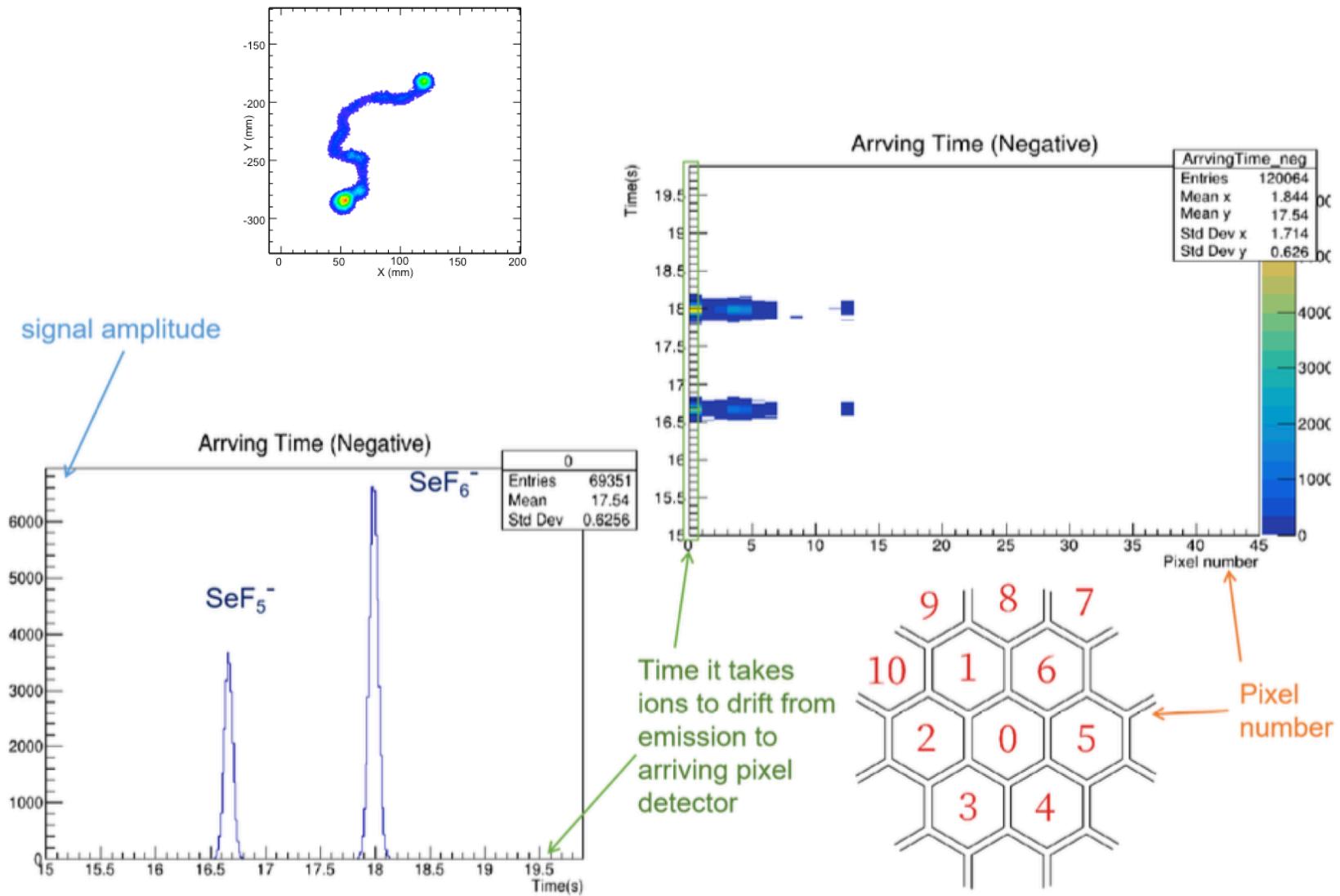
- 气体系统完成概念设计，开始采购、加工部件

地面实验室



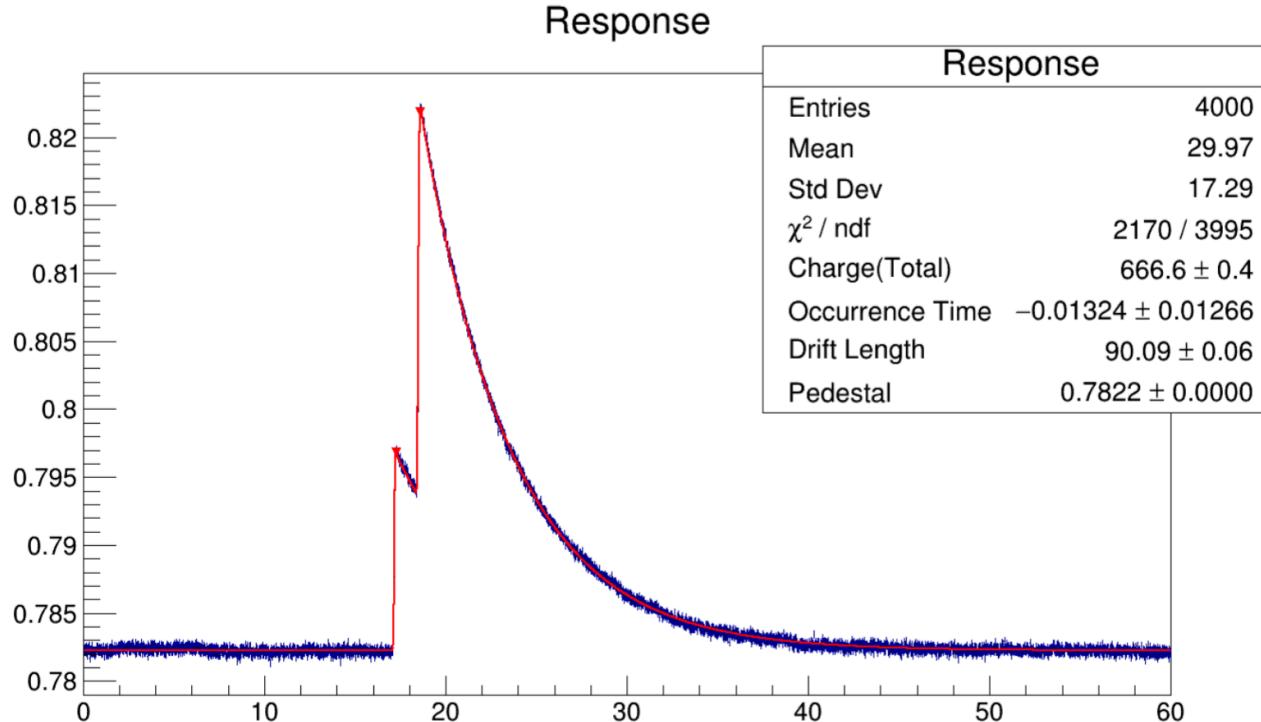
- 20 m²的地面实验室已装修完毕，用于100 kg地面样机

模拟



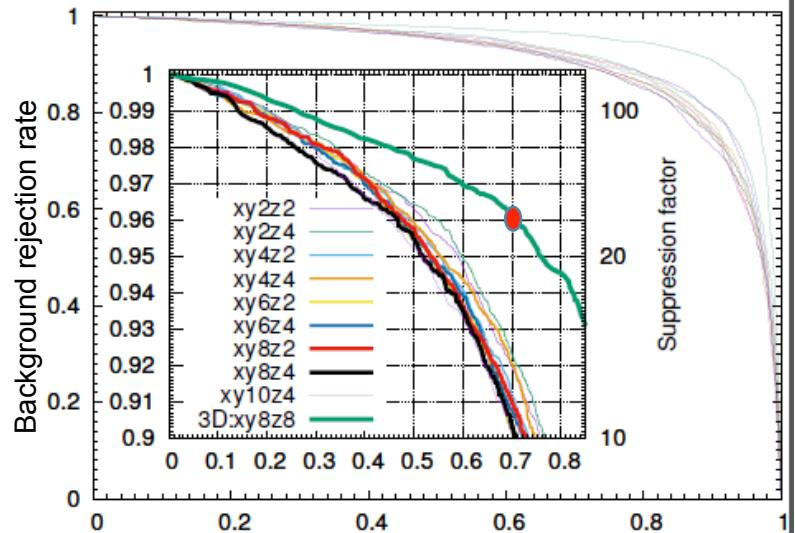
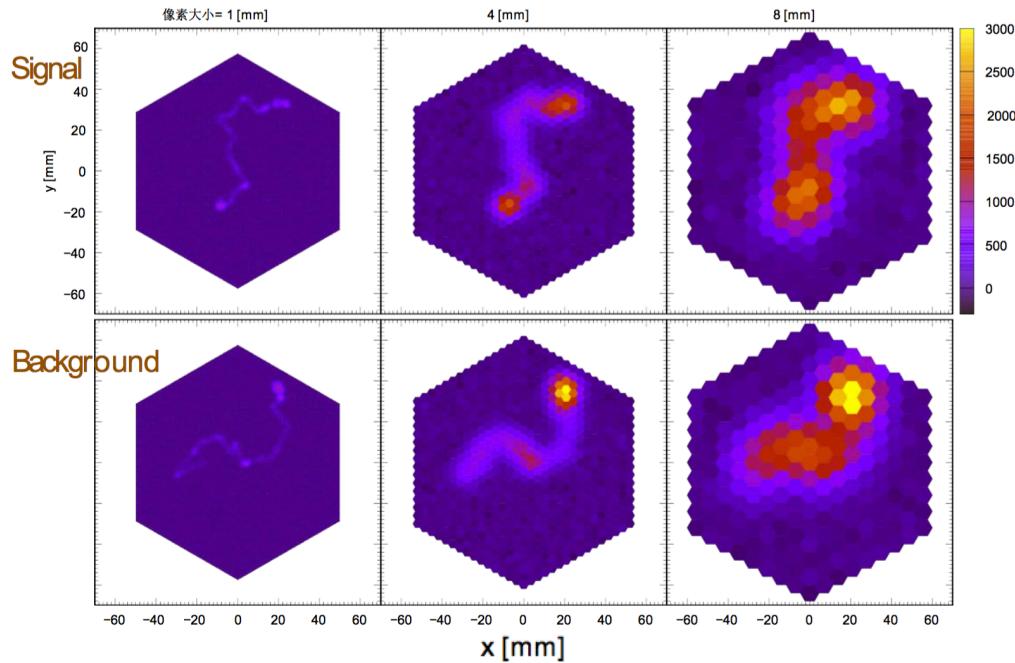
- 衰变、电离、离子漂移、扩散模拟

模拟



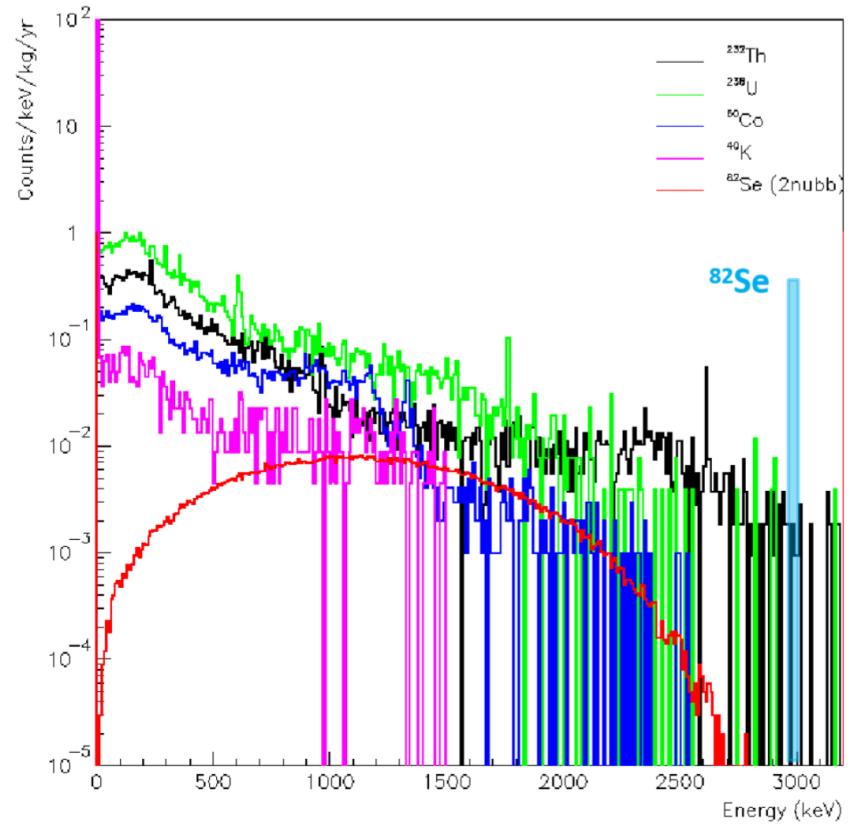
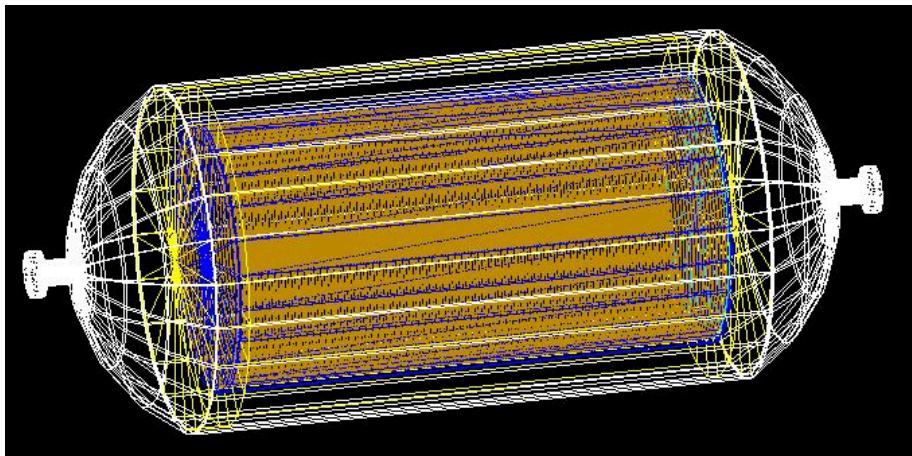
- 单个芯片读出信号模拟
- 函数拟合还原电离时间、漂移距离信息

模拟



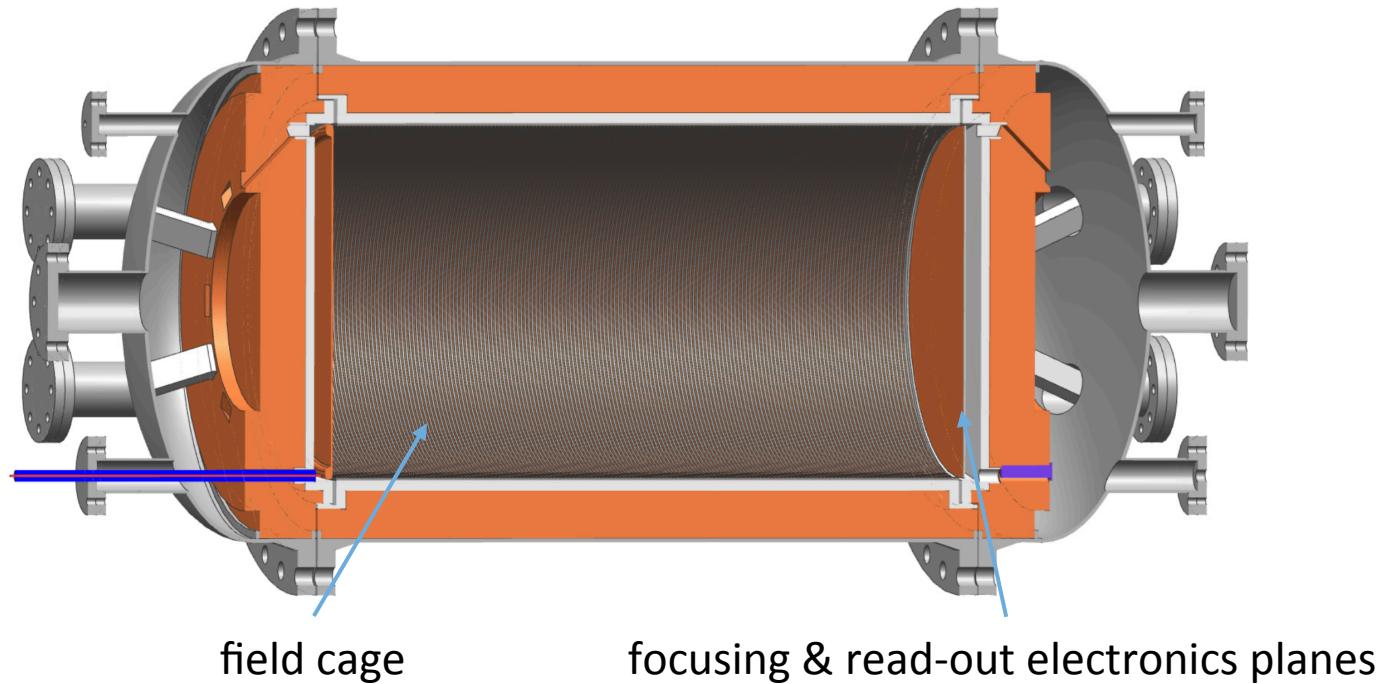
- 初步模拟不同像素间距时，信号、本底分辨情况
- 像素间距 8mm，效率 70%，本底排除率 95%

模拟



- 本底模拟研究进行中

本底控制



field cage

focusing & read-out electronics planes

- 对于高压气腔、铜屏蔽层、TPC场笼等，我们将学习PandaX、CDEX、CUPID-China等实验的经验
- 读出和电子学的本底控制是NvDEx特别需要注意的地方
 - 与灵敏体积之间没有屏蔽
 - 计划将Topmetal芯片布置于柔性版PCB上
- 计划使用高密聚乙烯(HDPE)外屏蔽体，同时作为气体安全负压室

研究团队

- 总体: Yuan Mei (LBNL)、许怒 (近物所 & LBNL)
- 高压气腔: 胡强、仇浩 (近物所)
- TPC: 何周波、鲁辰桂、路坦、邱天力 (近物所)
- 读出芯片及电子学: 陈凯、高超嵩、梁天宇、孙向明、汪虎林、张冬亮
(华中师范)、杨懿琛(近物所)
- 气体系统: 常彦龙 (兰州大学)
- 模拟: Emilio Ciuffoli、Surja Ghorui、肖牧云 (近物所)

未来计划

- 2021年：
 - 验证Topmetal芯片读出：达到~1%能量分辨率
 - 完成高压气腔和气体系统
- 2022年：
 - 完成100-kg级实验地面样机：TPC场笼、读出平面
 - 测试长期运行气体安全性
 - 完成本底研究，为地下实验样机研制做准备
- 2022年底：白皮书
- 希望~2023年，开始在CJPL进行地下实验样机研制

总结

- NvDEx实验概念在降低本底方面有一些独特的优势和潜力
- Topmetal-S芯片研制进展
 - 第一版芯片测试完成
 - 验证了电荷探测能力
 - 偏置电压由高阻抗的电压源提供 → 放大倍数受到限制
 - 第二版芯片
 - 重新设计了芯片的偏置电压部分
 - 预期5月底投版流片
 - 有望突破芯片读出这一NvDEx实验最核心的技术难关
- 100-kg级实验地面样机基本完成设计，正在研制中
- 计划
 - 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

谢谢
😊