无中微子双贝塔衰变实验

NνDEx

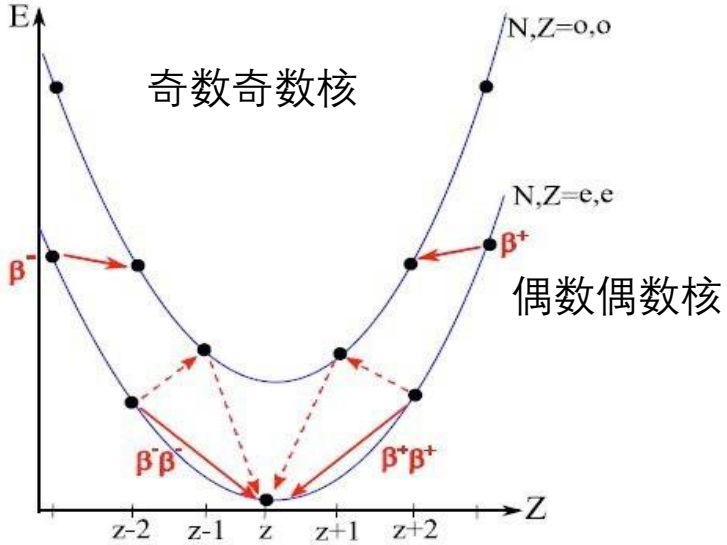
孙向明
华中师范大学

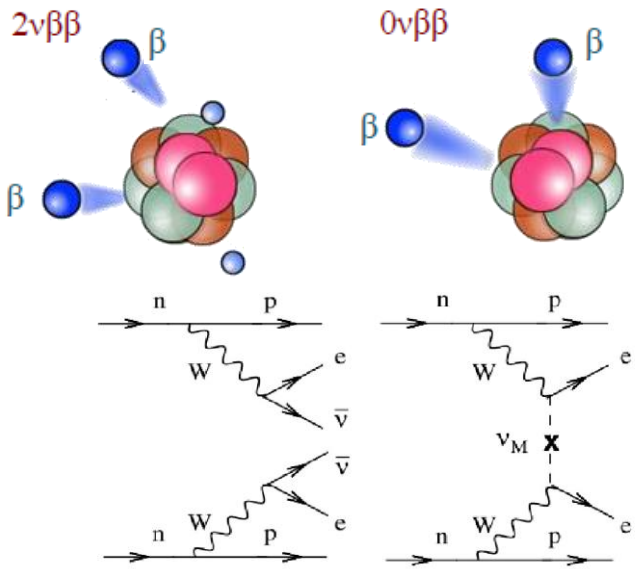
主要内容

1. 无中微子双贝塔衰变介绍
2. NνDEx实验介绍
3. NνDEx研究进展
4. NνDEx团队与总结

1 无中微子双贝塔衰变

无中微子双贝塔衰变





- 如果单β衰变在能量上被禁止，不稳定原子核可能发生ββ衰变
- 如果观察到0νββ衰变，它
  - 将证明ν是马约拉纳粒子⇒超出标准模型
  - 用扩展标准模型的机制来解释有限但微小的ν质量
  - 会约束绝对ν质量和ν质量排序
  - 也许可以解释宇宙中物质和反物质的不对称，因为它违反了CP对称和轻子数守恒

实验寻找：灵敏度

0 本底情况:

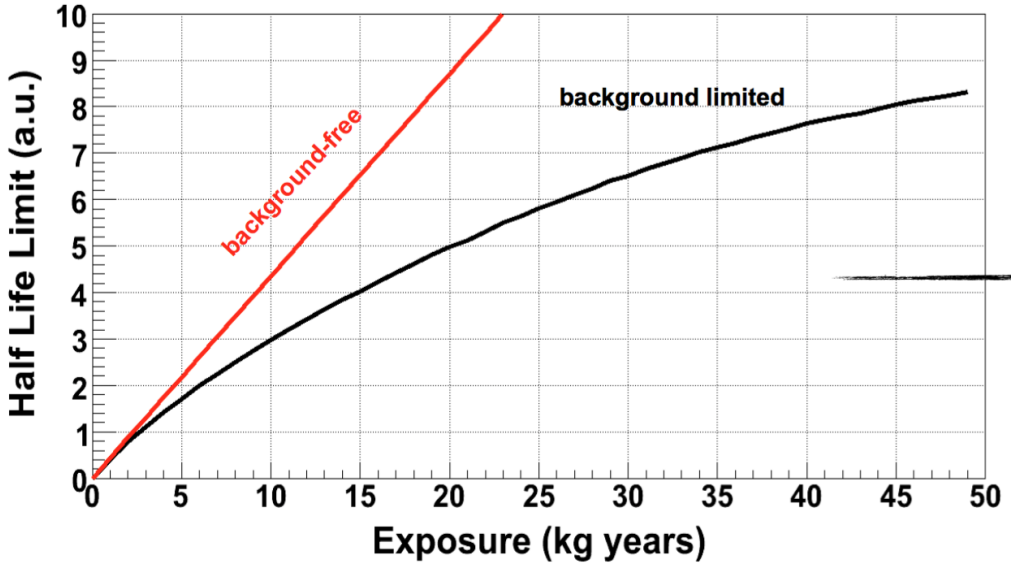
$$T_{1/2}^{0\nu}(\exp) = (\ln 2) N_a \frac{a}{A} \varepsilon \frac{MT}{n_{CL}}$$

质量*时间

高本底情况:

$$T_{1/2}^{0\nu}(\exp) = (\ln 2) N_a \frac{a}{A} \varepsilon \sqrt{\frac{MT}{b\Delta E}}$$

本底水平*能量分辨率



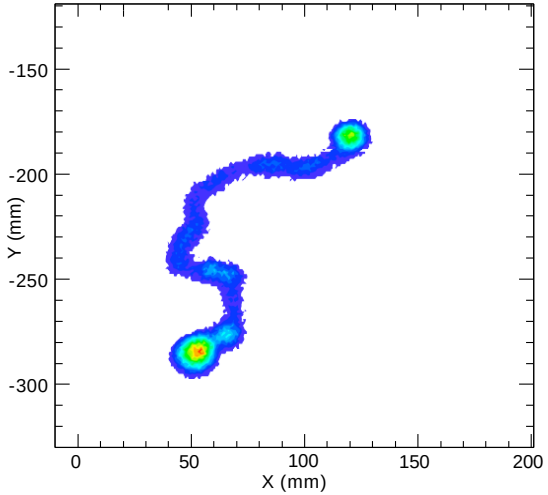
- 降低bΔE是有效利用衰变同位素和提高实验灵敏度的关键

实验寻找：信号特征

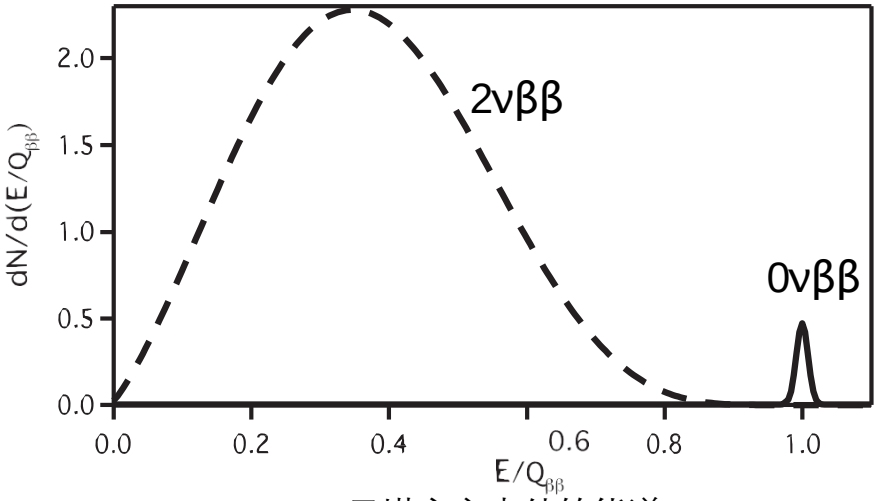
- 质量窗
- 双电子Brag峰

- 衰变产物标记

10倍大气压Xe气中 ^{136}Xe 0νββ 事件



两个布拉格峰



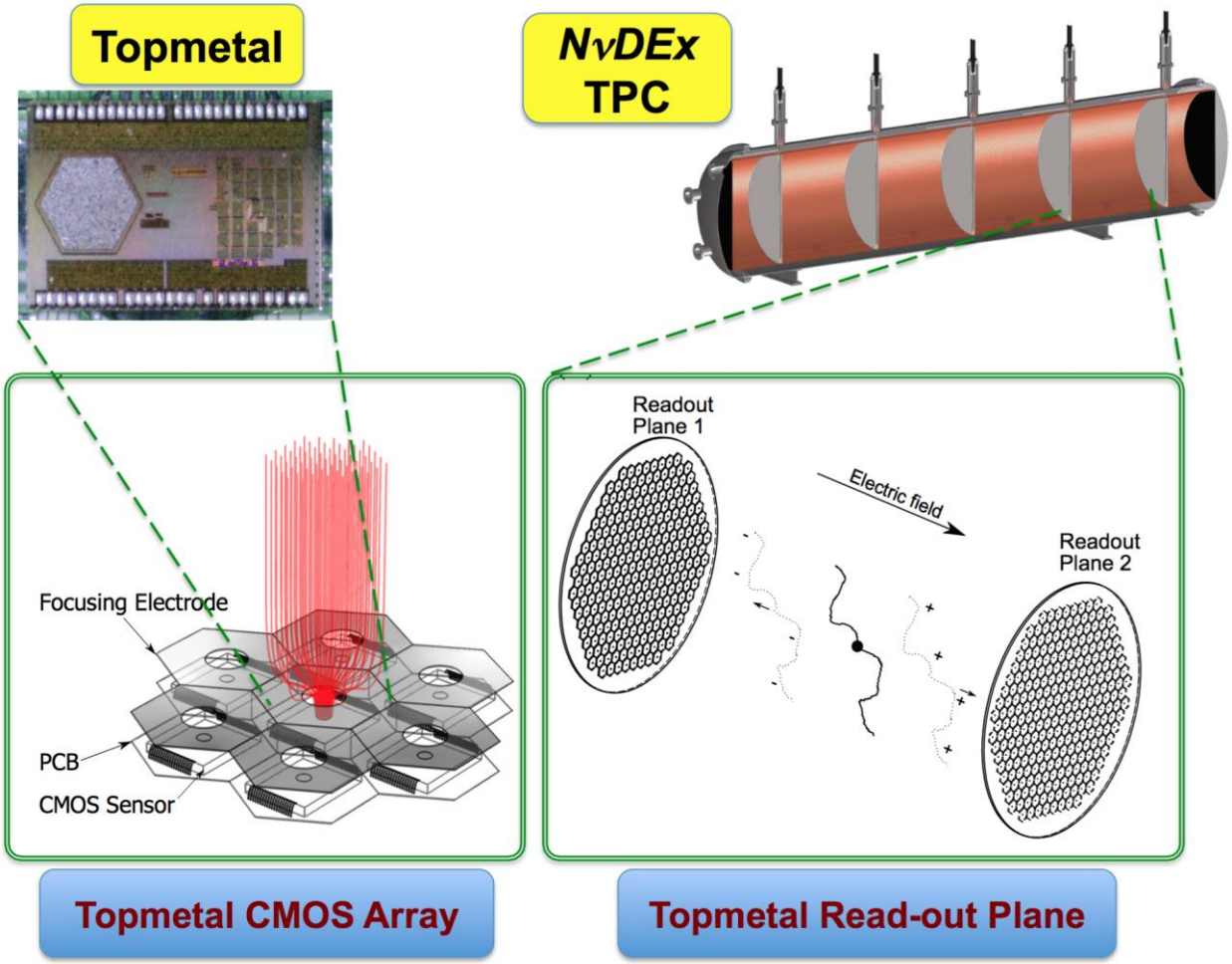
双贝塔衰变事件的能谱

2

NνDEx实验

NνDEx

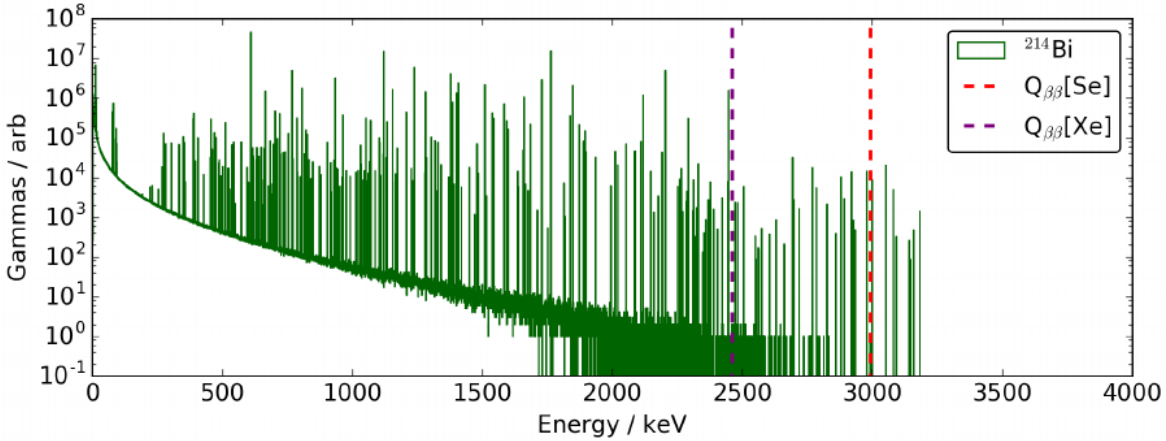
- No ν Double beta decay Experiment
- 关键部分
  - ^{82}Se
  - 高压气体TPC
  - Topmetal-S
  - 锦屏实验室

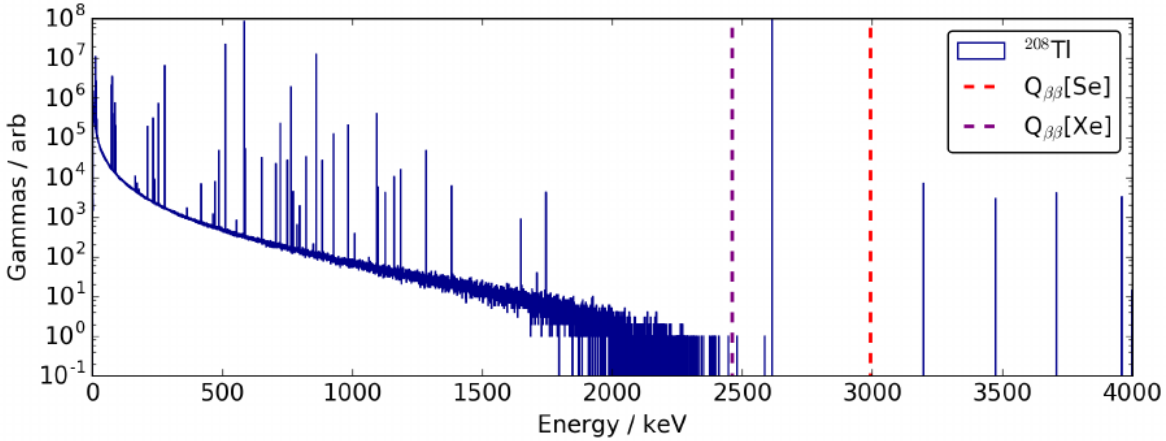


NνDEx：^{82}Se+TPC+Topmetal+CJPL

- 高Q值：Q=2.996 MeV
- 较高的丰度：~9%
- $^{82}SeF_6$
  - 提纯简化
  - 电负性气体
  - 有毒气体
  - 遇水具有强腐蚀性

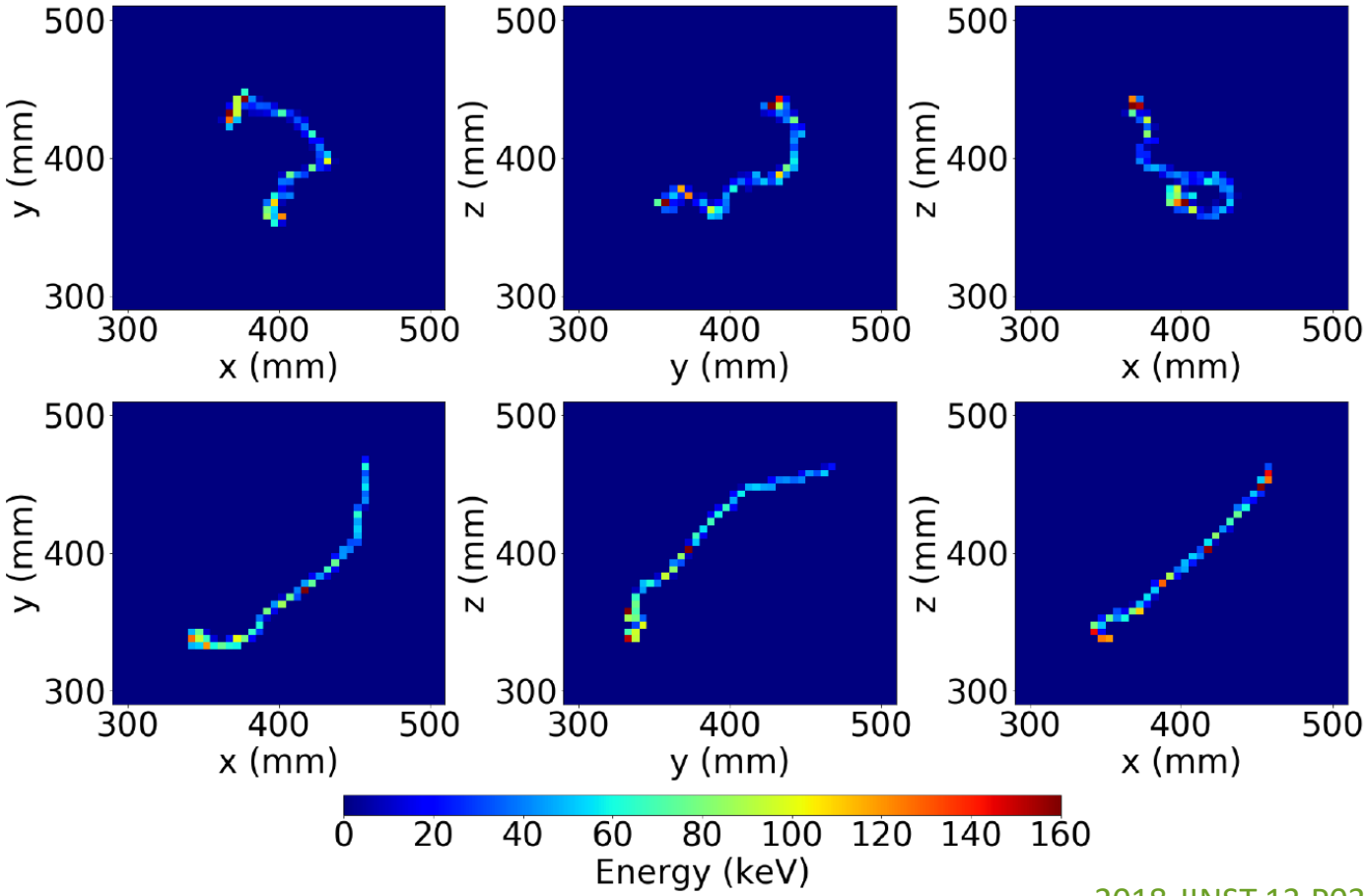
2018 JINST 13 P03015





NνDEx: ^{82}Se+TPC+Topmetal+CJPL

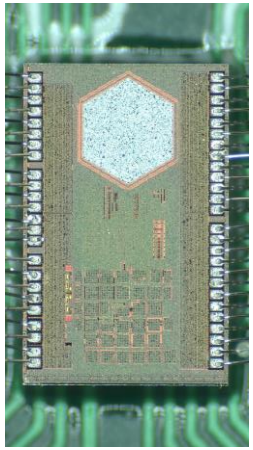
- 径迹探测，逐事件区分本底
- 气体 TPC，可以在不增加材料背景的前提下增加介质的总量

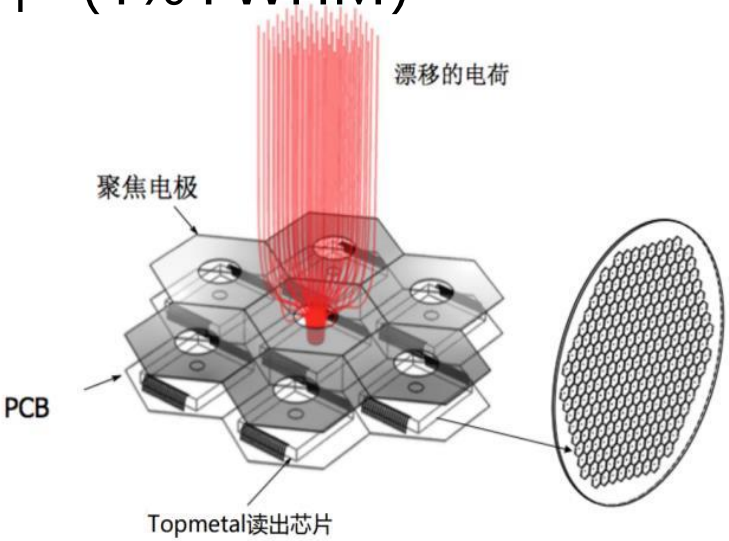


2018 JINST 13 P03015

NνDEx：^{82}Se+TPC+Topmetal+CJPL

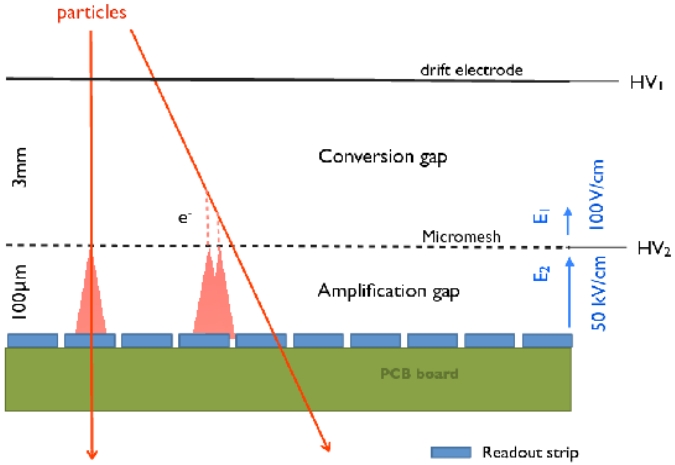
- 无雪崩放大读出，可实现高能量分辨率（1% FWHM）
- 离子漂移探测
- CMOS工艺
- 低辐射本底
- 阵列组网读出

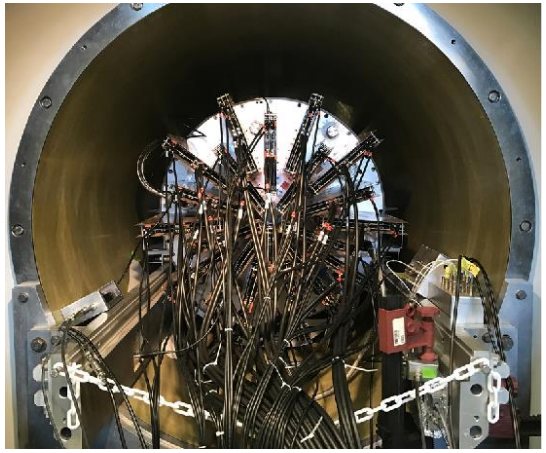




~~雪崩放大导致分辨率变差~~

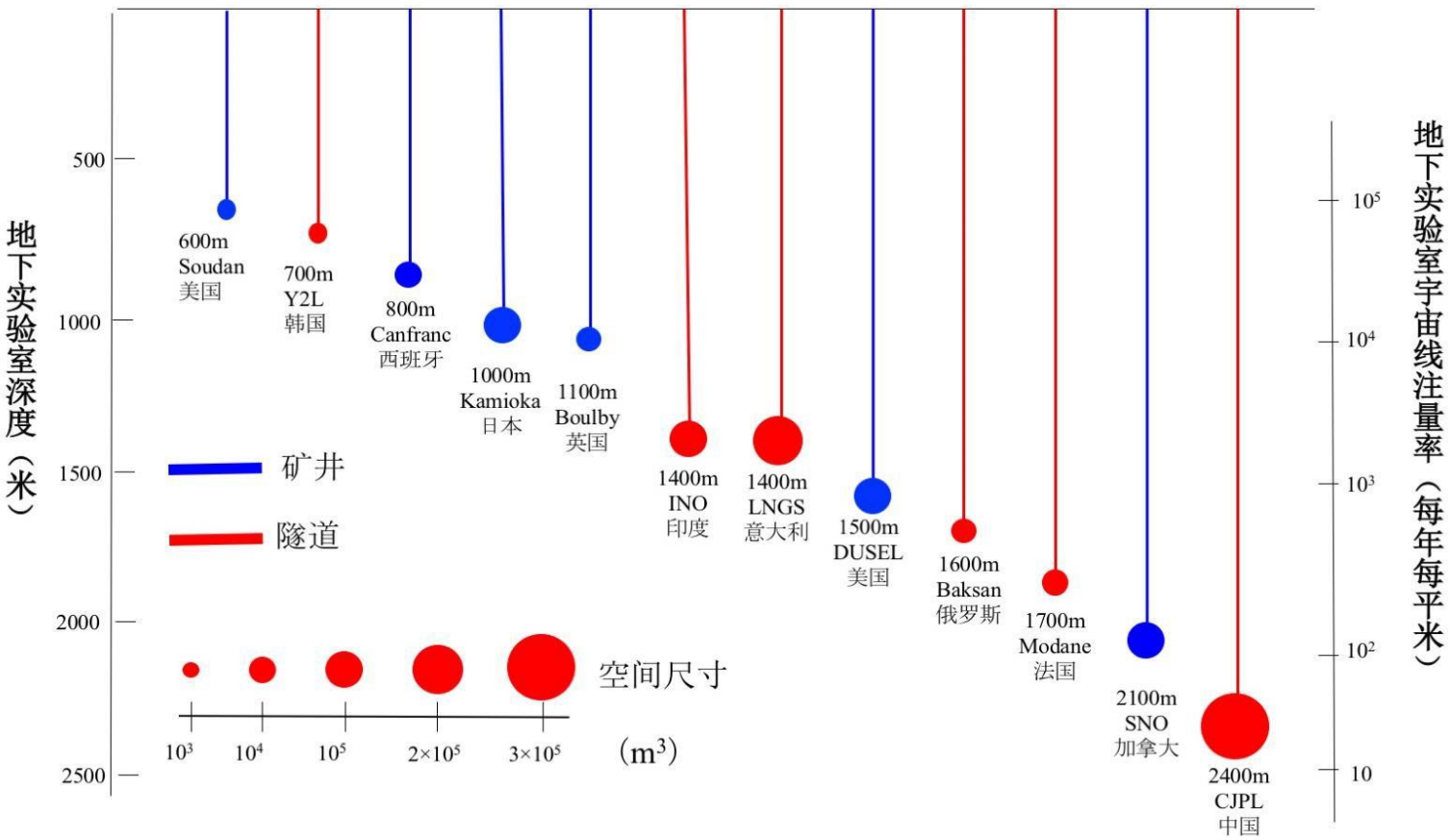
~~大量接线带来本底~~





NνDEx：^{82}Se+TPC+Topmetal+CJPL

- 世界上最深的地下实验室： 低宇生本底



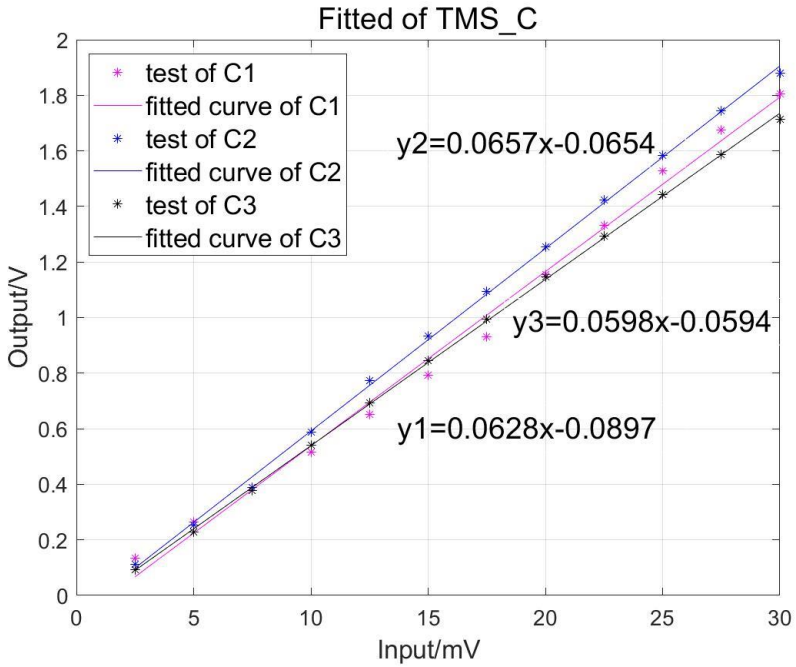
3 NνDEx研究进展

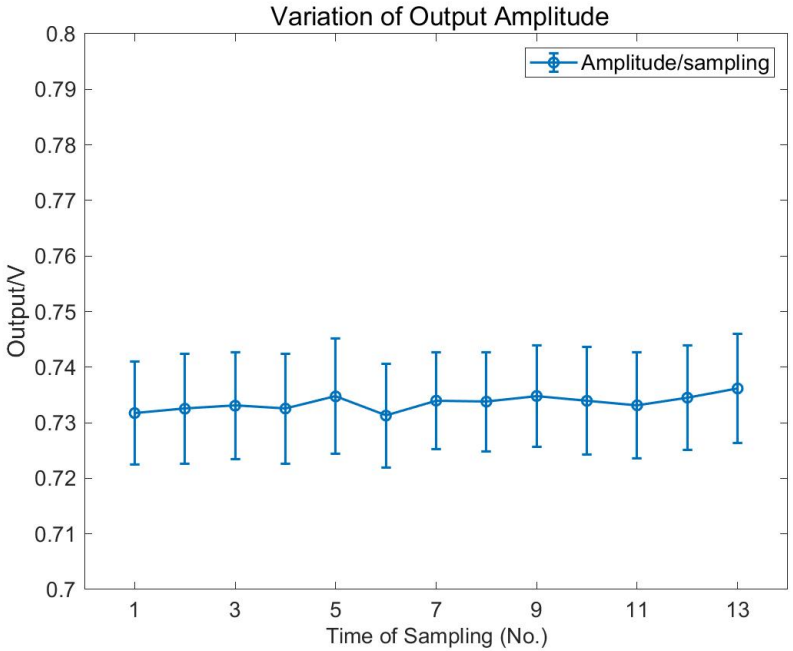
NνDEx研究方向

- Topmetal-S芯片研制
  - 实现低噪声，ENC<45e
  - 组网读出功能
- DAQ和数据分析软件
  - DAQ方案
  - 模拟数据研究
- NνDEx-100样机研制
  - 本底屏蔽方案和低本底材料选取
  - 气体控制和安全系统
  - $^{82}SeF_6$气体性质的研究
  - 高收集效率、稳定的TPC系统

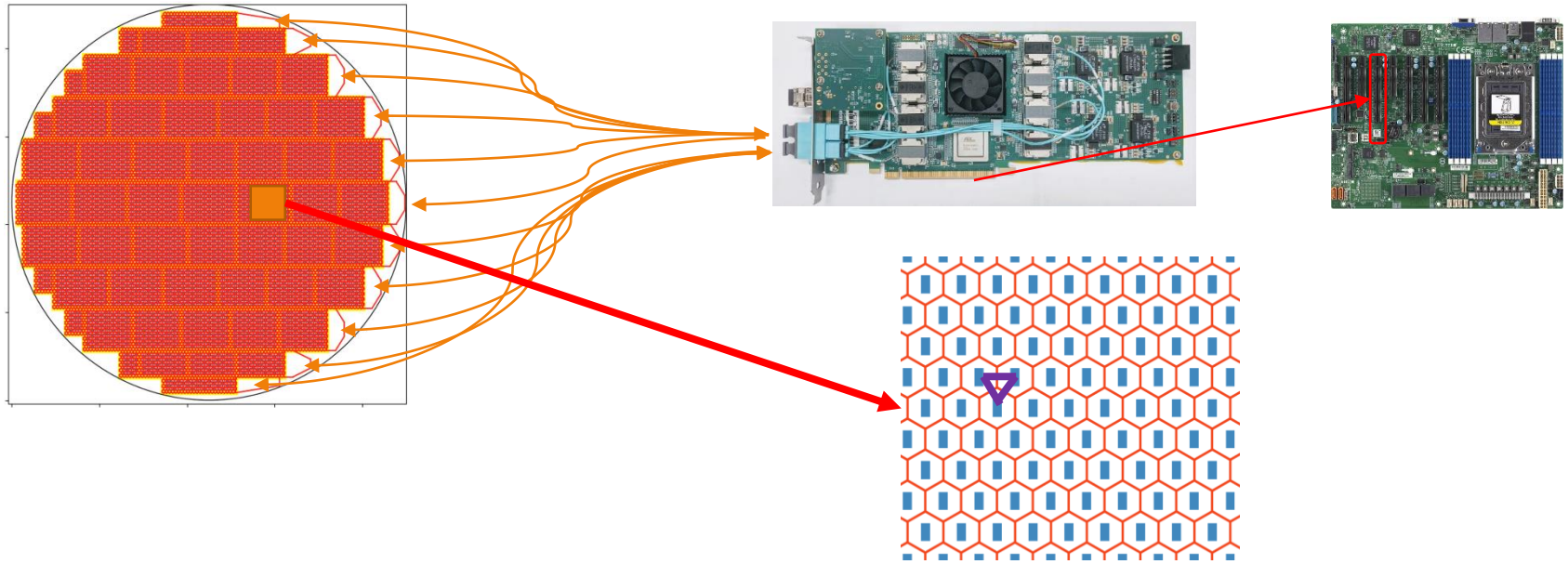
Topmetal-S芯片

- 第二版Topmtal-S芯片的测试
  - 解决了第一版芯片测试中发现的问题
- 性能较好
  - ENC在100-130e （4个不同的子版本）
  - 线性度
  - 稳定性





读出阵列及DAQ



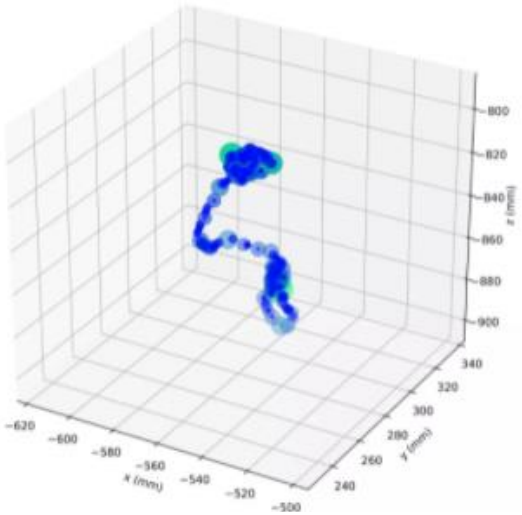
- 13k-15k芯片组成的读出阵列
- Topmetal-S芯片阵列组网读出
  - 芯片集成CSA、ADC及组网互传接口
  - 最右侧模块对外连接DAQ系统
  - 备用方案：CSA与数字电路分开

- 完成全数字链路数据传输测试

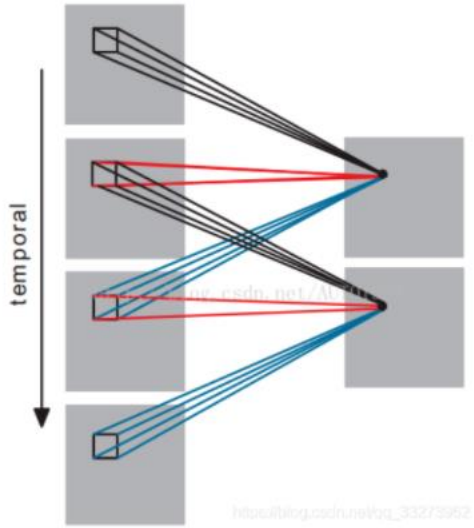
数据分析算法研发和系统集成

- **实现 NνDEx -100实验装置稳定工作，本底排除率大于10**

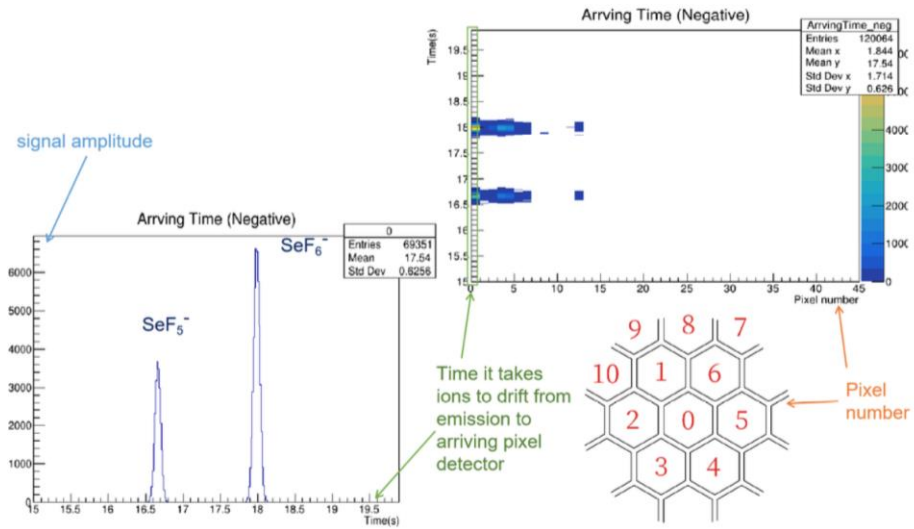
  - **双贝塔衰变径迹模拟和数据分析**
    - 模拟^{82}Se的0νββ信号和本底
    - 建立数据分析软件，基于3D卷积神经网络技术来区分和识别有效信号

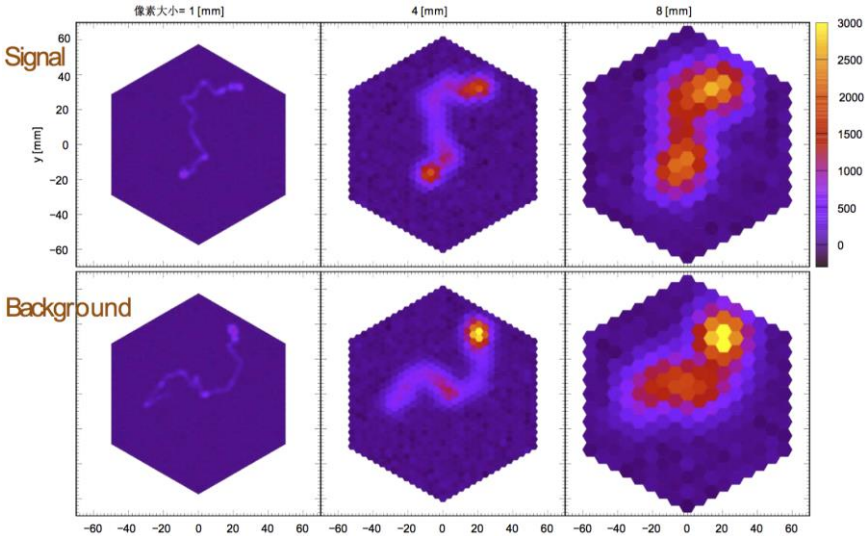


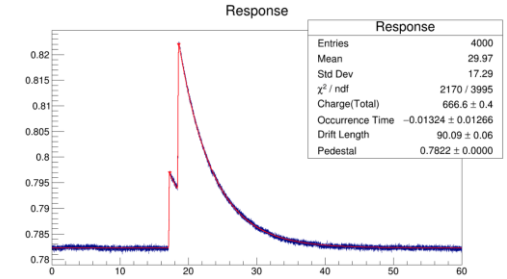
  - **NνDEx -100系统集成方法**
    - 建立一套性能刻度和分析方法，优化集成和流程
    - 建立可视化监测和控制系统，实时监测和控制装置运行状态

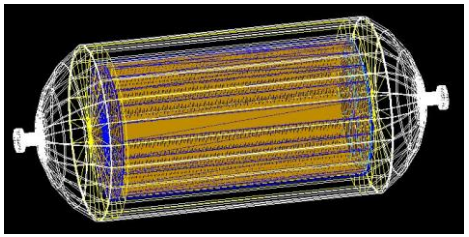


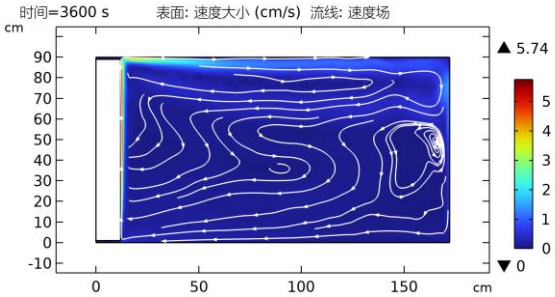
模拟研究

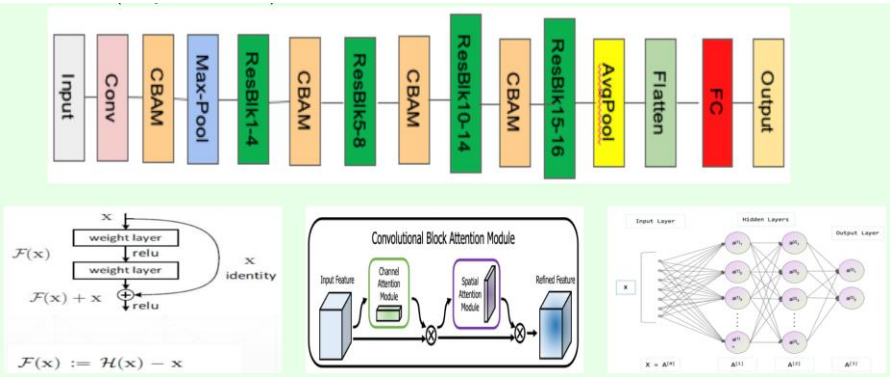

signal amplitude
Arrving Time (Negative)
SeF$_6^-$
SeF$_5^-$
Time(s)
Arrving Time (Negative)
Pixel number
Time it takes ions to drift from emission to arriving pixel detector
Pixel number

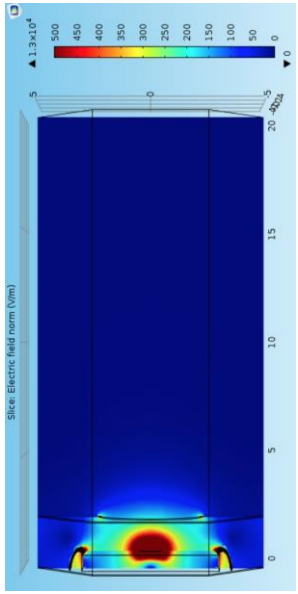

像素大小= 1 [mm]
4 [mm]
8 [mm]
Signal
Background
y [mm]
x [mm]


Response
Entries 4000
Mean 29.97
Std Dev 17.29
χ² / ndf 2170 / 3995
Charge(Total) 666.6 ± 0.4
Occurrence Time −0.01324 ± 0.01266
Drift Length 90.09 ± 0.06
Pedestal 0.7822 ± 0.0000



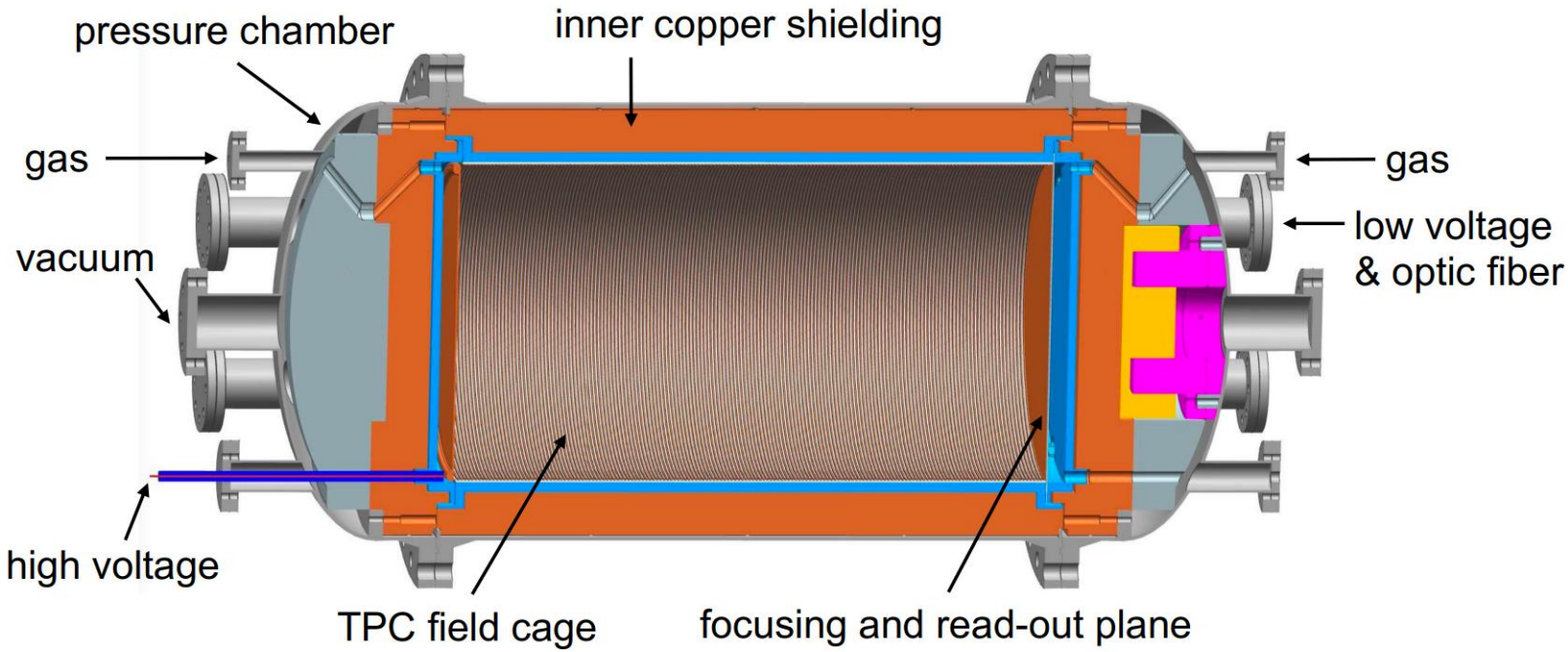

时间=3600 s
表面: 速度大小 (cm/s) 流线: 速度场
cm
▲ 5.74
▼ 0


Input
Conv
CBAM
Max-Pool
ResBlk1-4
CBAM
ResBlk5-8
CBAM
ResBlk10-14
CBAM
ResBlk15-16
AvgPool
Flatten
FC
Output
weight layer
relu
weight layer
identity
Convolutional Block Attention Module
Input Feature
Channel Attention Module
Spatial Attention Module
Refined Feature



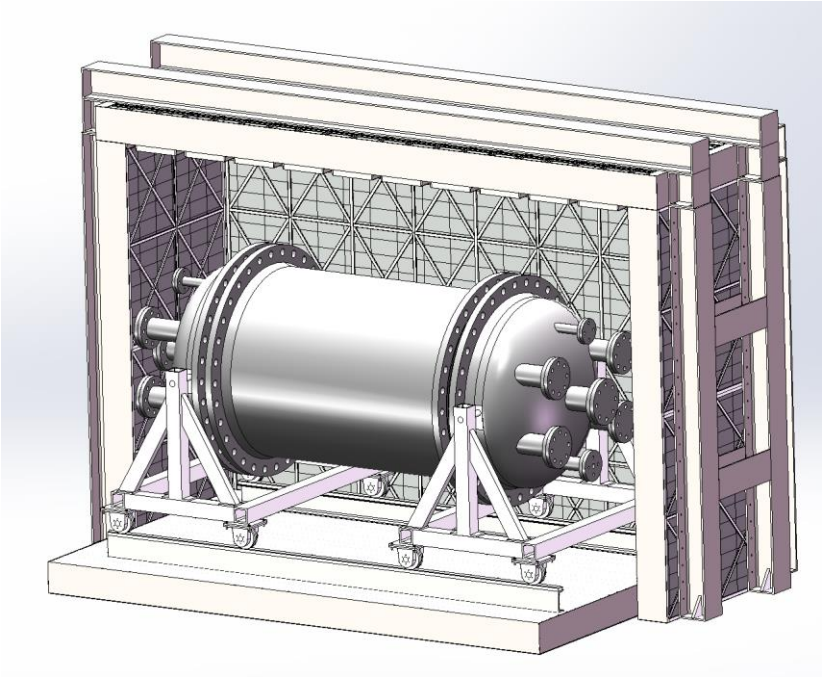
NνDEx-100样机

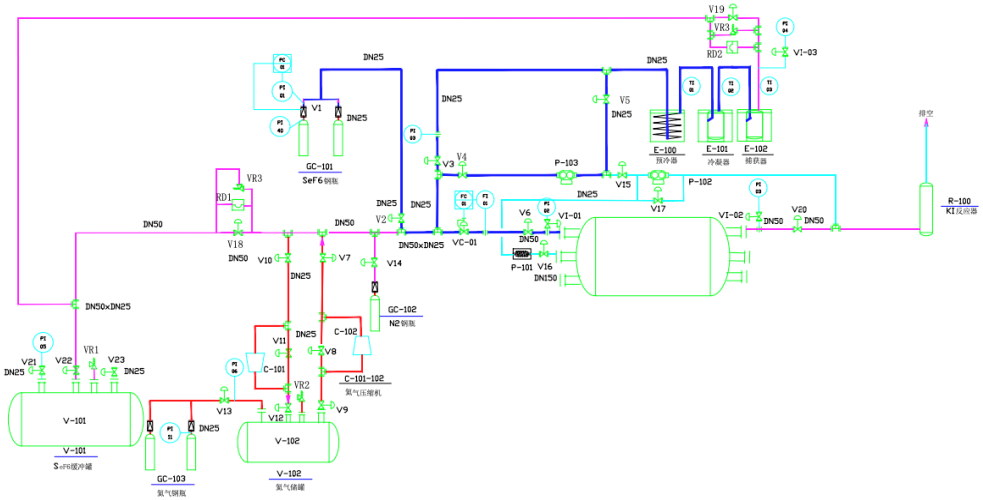
- **研制在锦屏极深地下实验室运行的100kg气体级NνDEx样机**

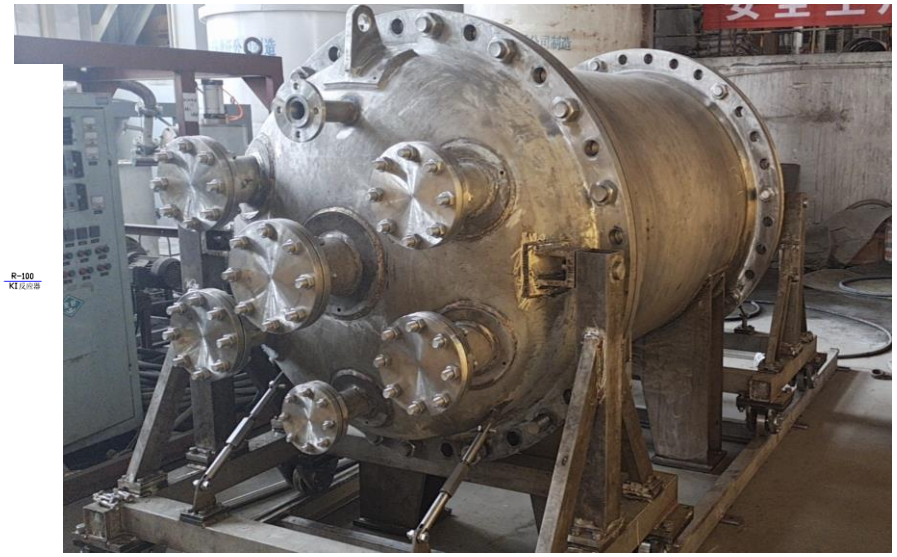


- 100kg SeF_6气体，在10atm的敏感体积中
- 筒体部分长度:176厘米，压力容器内径:120厘米
- 从无毒的SF_6气体开始测试，气密性试验（有毒SeF_6含量需<0.05 ppm）
- 然后切换到SeF_6气（最终使用提纯的$^{82}SeF_6$ 气体）

NνDEx实验样机




V19
VR3
RD2
VI-03
DN25
V1
GC-101
SeF6钢瓶
V5
E-100
预冷器
E-101
冷凝器
E-102
捕获器
V3
V4
P-103
V15
P-102
V17
VI-01
VI-02
V20
DN50
R-100
KI反应器
排空
VR3
RD1
V18
V2
VC-01
V6
V16
P-101
DN150
DN50×DN25
V10
V7
V14
GC-102
N2钢瓶
C-102
V11
V8
C-101
C-101-102
氢气压缩机
VR2
V9
V12
V13
V-101
S-nF6缓冲罐
GC-103
氢气钢瓶
V-102
氢气储罐
VR1
V21
V22
V23



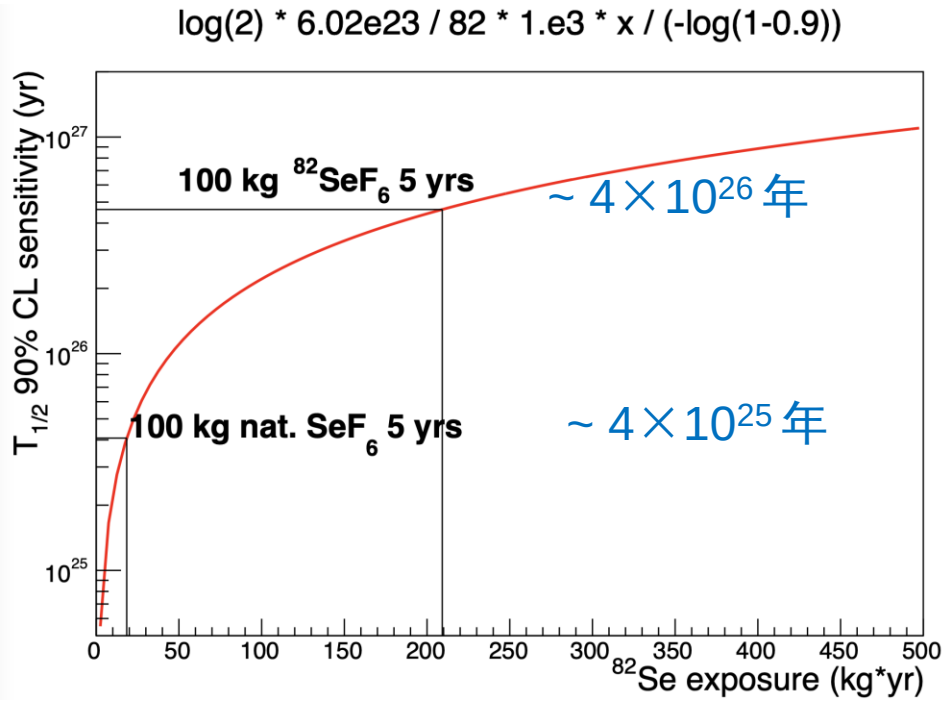
本底研究和预期灵敏度

在ROI内

- 预计γ本底<0.25 evt/yr
  - 加上径迹信息可实现<0.01 evt/yr
- 中子带来的本底<0.1 evt/yr
  - 需要在外屏蔽中增加高密聚乙烯来屏蔽中子
- 宇生本底中主要是^{56}Co
  - 半衰期长，产生的γ能量高
- Pileup本底
  - 对提纯的$^{82}SeF_6$，2v2β的pileup成为比较重要的本底
- 假设0本底，预期90% CL上限

γ background from different sources without suppression using event topology

Source	Background in ROI	
	evts/yr	10^{-5}evts/(keV kg yr)
Concrete walls	0.008	0.27
External lead shielding	0.002	0.07
HDPE shielding	0.004	0.13
Stainless steel pressure vessel	0.038	1.26
Inner copper shielding	0.039	1.31
POM field cage	0.154	5.13
Total	0.245	8.16



4 NvDEx团队和总结

NνDEx合作组

- 2019年召开第一次NνDEx研讨会
- 目前有约30人，7个单位

总结

- NνDEx实验方案结合多方面的优点，有望实现低本底、高灵敏度
  - ^{82}Se + TPC + Topmetal-S + CJPL
- Topmetal-S芯片
  - 第二版有明显的改进，正在进一步测试
  - 完成第三版的设计，探索新的工艺和电路结构
- DAQ、模拟和数据分析研究
- NνDEx-100样机的研制
  - 设计报告CDR（arXiv: 2304.08362）
  - 器件处于不同的设计、制作、完成阶段
  - 通过本底屏蔽和低本底材料选取，预期可将本底降到ROI内~0.1 cnt/吨年
  - 使用未提纯/提纯后的5吨年的曝光量的预期灵敏度可以达到~ $4\times10^{25/26}$ 年

其他NvDEx相关报告

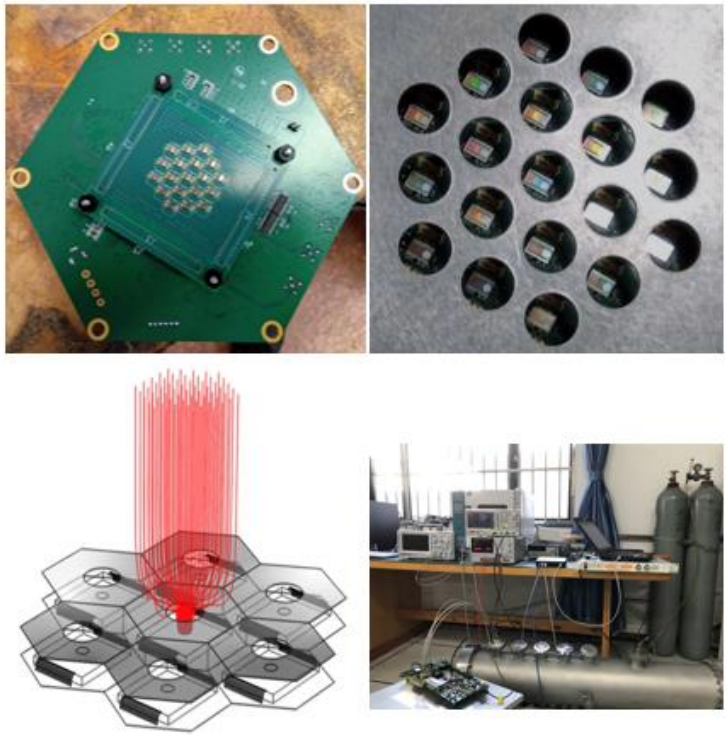
今天（周二）下午:

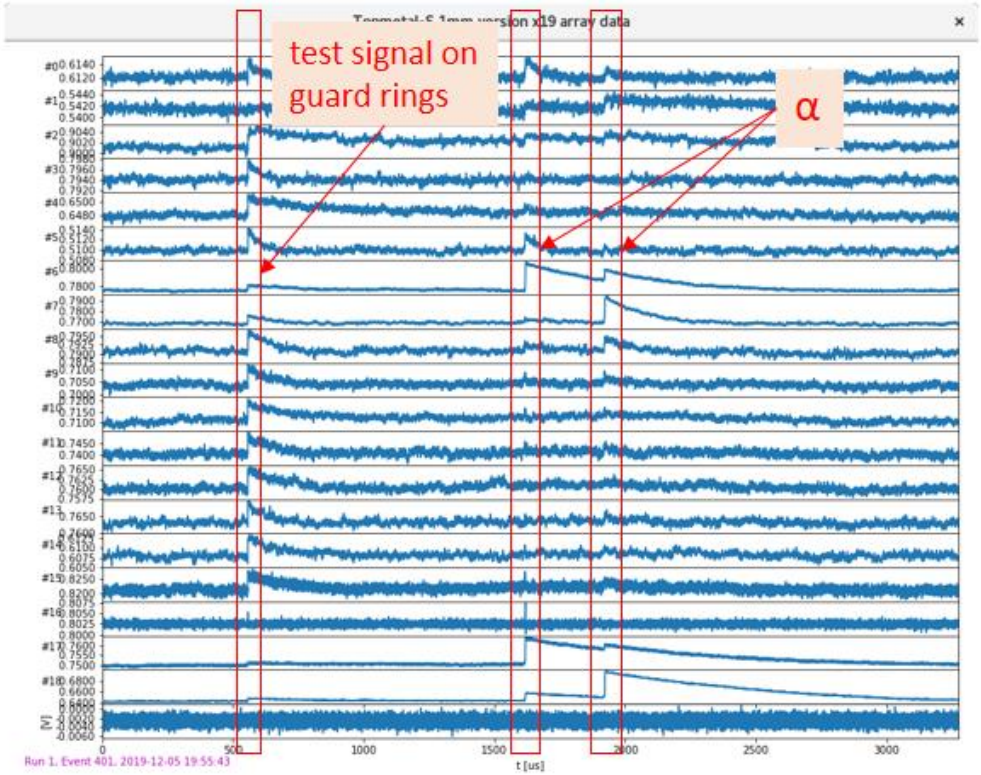
NvDEx实验样机的研究进展	*胡 强*
杭高院基地7号楼3楼报告厅	14:40 - 15:00

Simulations, background and sensitivity estimations for the NvDEx experiment	*Emilio Ciuffoli*
杭高院基地1号楼6楼	15:00 - 15:20

应用于NvDEx实验的前端探测和读出芯片	*杨 懿琛*
杭高院基地7号楼3楼报告厅	17:00 - 17:20

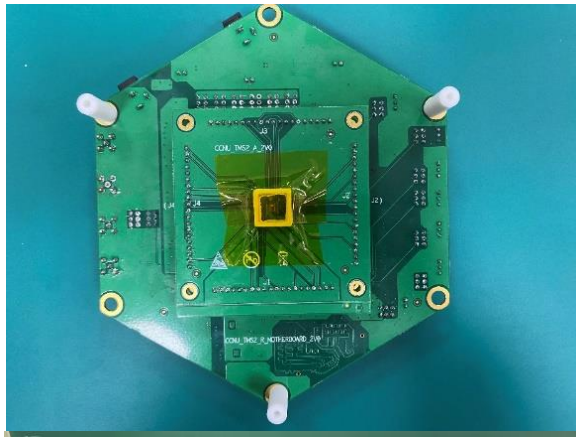
19个Topmetal-S 阵列

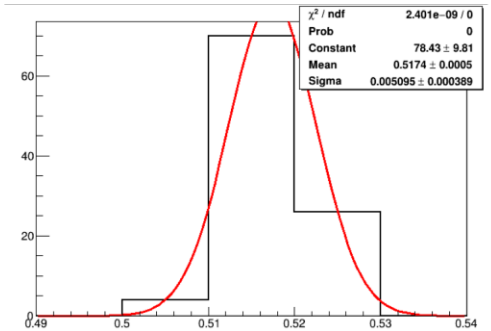


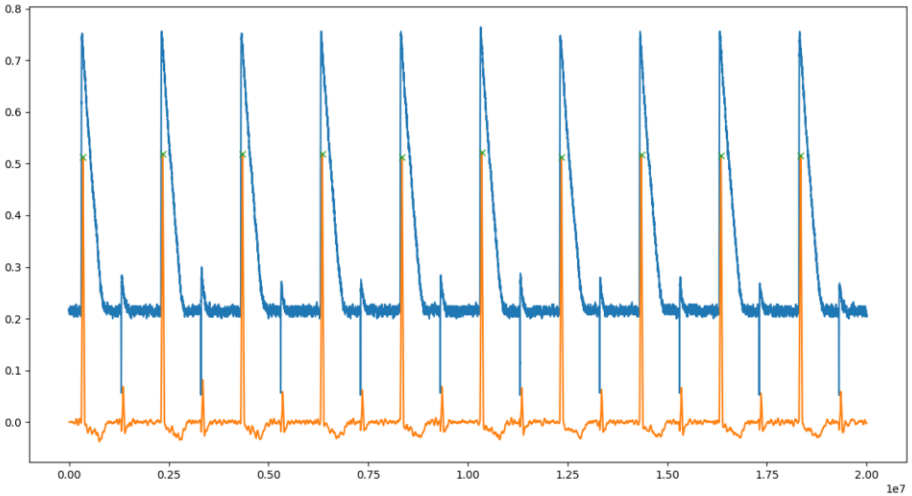


- 用^{241}Am α源测试了19个Topmetal-S传感器阵列(第一次流片)；
- 观测到来自α源的信号，但幅度仅为期望值的5%
- 当放大倍率增加时，偏置电压不能稳定工作，导致CSA的放大倍率不够高

第二次流片的Topmetal-S电气测试







- 每个传感器都能正确响应信号源
- 第一个版本传感器的CSA中的放大问题已经消失
- 目前已实现等效输入噪声<130e- (NnDEx目标:45e-)