



# PandaX

## 无中微子双贝塔衰变探测

王少博 (上海交通大学)

2021-05-22

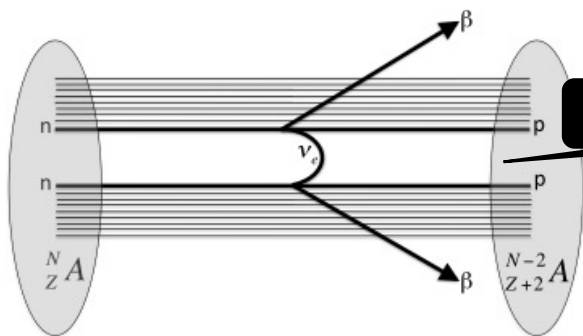
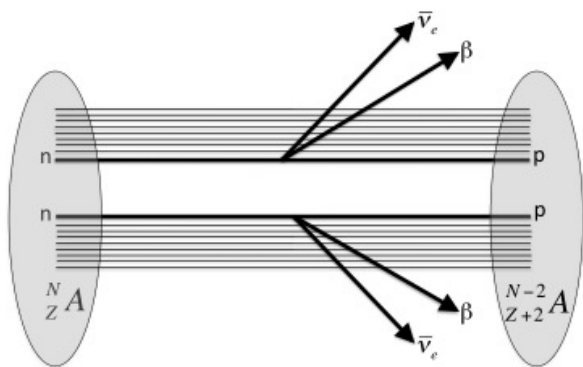
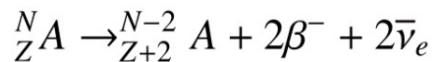
代表PandaX合作组

无中微子双贝塔衰变研讨会-中山大学 (珠海)

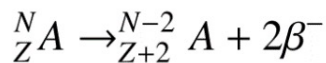
## 报告内容

- $0\nu\beta\beta$  与PandaX项目简介
- PandaX-II 实验 $0\nu\beta\beta$ 物理结果
- PandaX-4T实验
- 下一代PandaX-xT实验规划

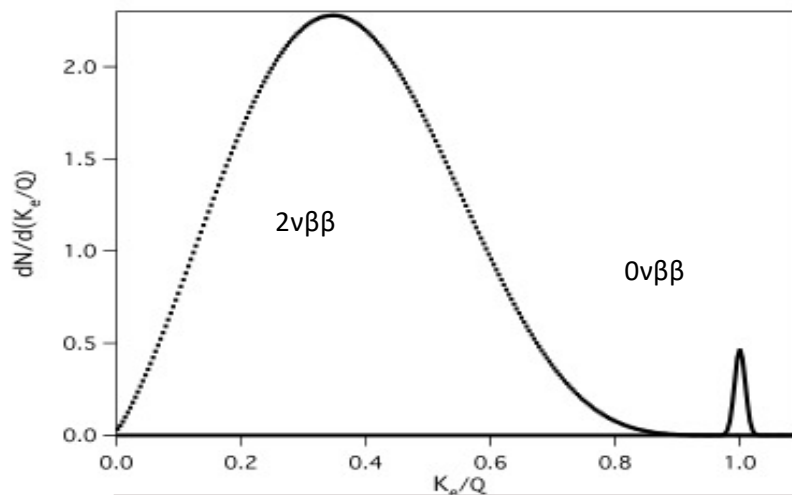
# 无中微子双贝塔衰变



Majorana Neutrino



Lepton Number Conservation Violated



Q value of  ${}^{136}_{56}\text{Xe} \rightarrow {}^{136}_{58}\text{Ba}$  :

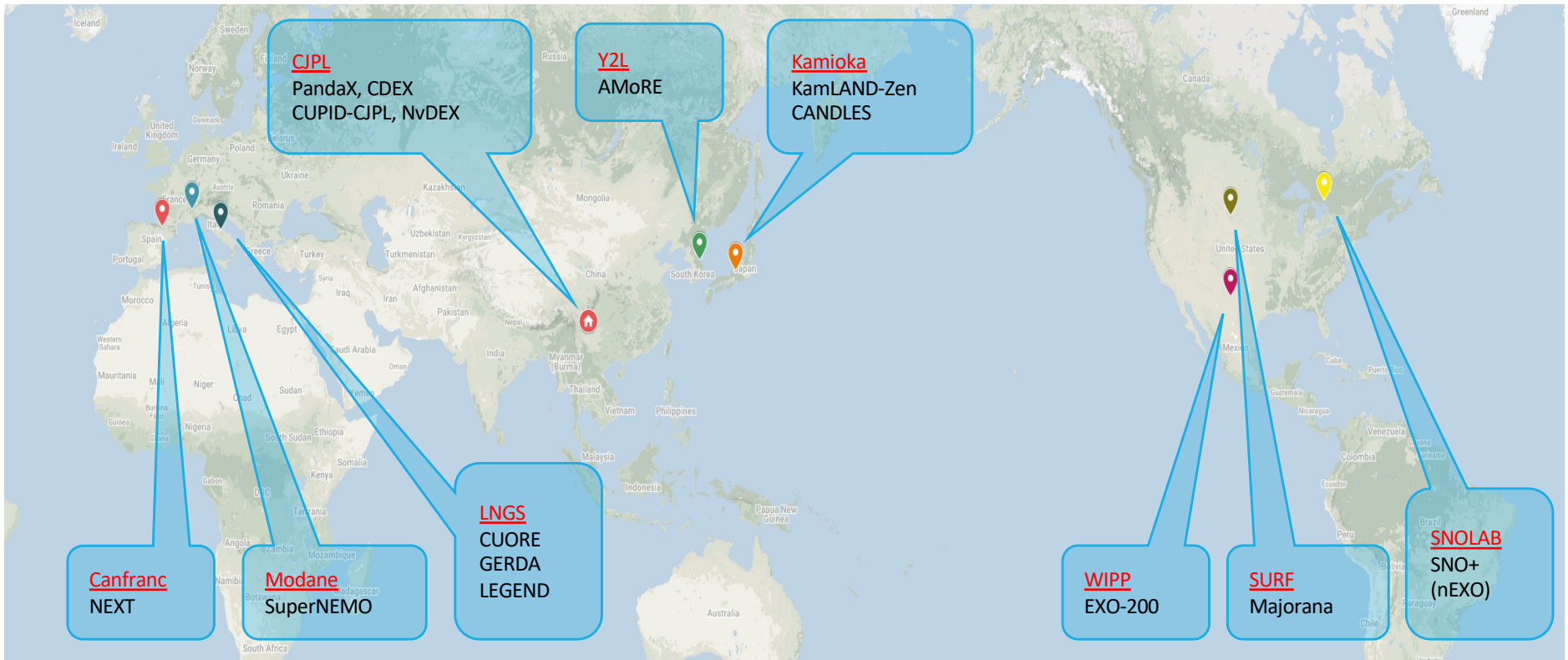
2457.83(37) keV [PRL 98, 053003\(2007\)](#)

- $2\nu\beta\beta$ : 发现11种核素
- $0\nu\beta\beta$ : 探测衰变模态双电子携带的能量，双电子的径迹
- PandaX: 寻找氙-136  $0\nu\beta\beta$

# 无中微子双贝塔衰变实验

- $0\nu\beta\beta$  研究国际国内竞争异常激烈

- GERDA、Kamland-Zen和CUORE等实验分别对锗-76、氙-136和碲-130等同位素的 $0\nu\beta\beta$ 半衰期给出了最强限制
- 国内CDEX、CUPID-CJPL、NvDEX、JUNO、PandaX等实验都在积极推动





# PandaX项目

暗物质WIMP 直接探测

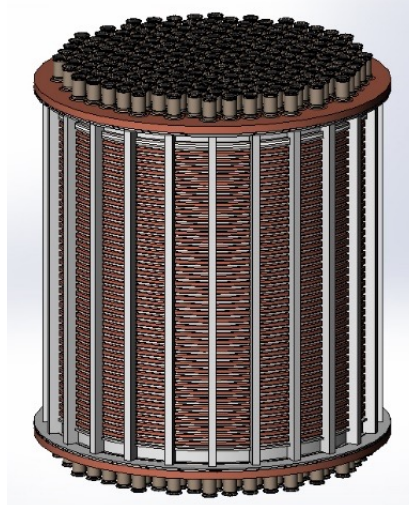
$0\nu\beta\beta$  探测



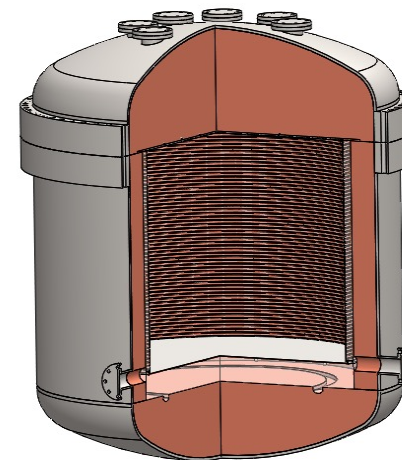
PandaX-I:  
120kg LXe  
(2009 -  
2014)



PandaX-II: 500kg  
LXe  
(2014 -  
2019)



PandaX-4T: 4T LXe



PandaX-III: HPXe  
140kg - 1 ton (future)

液氙探测器

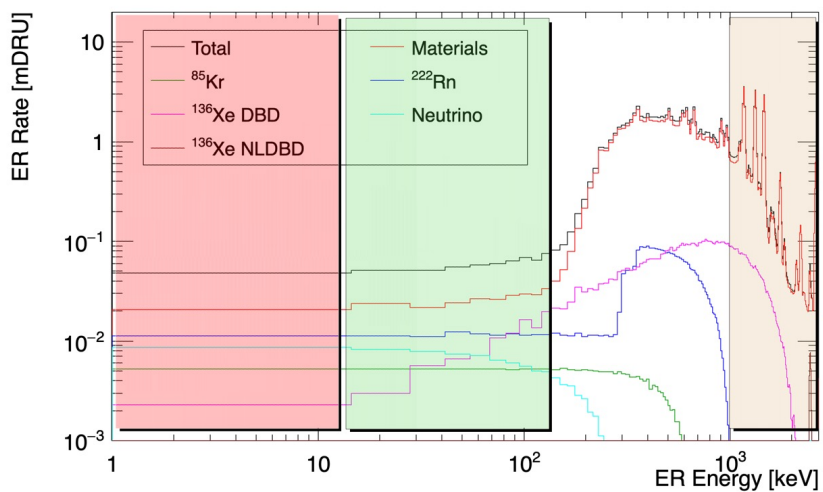
高压气氙探测器

# PandaX多物理目标实验平台

暗物质粒子直接探测器

马约拉纳中微子研究

太阳中微子

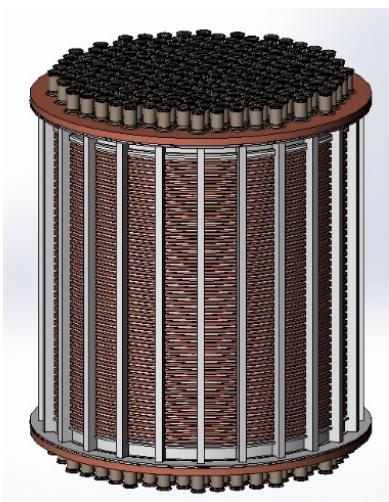


暗物质  
信号区

太阳中微子  
信号区

马约拉纳  
中微子信号区

PandaX  
基于液氙时间投影室



PandaX-4T: LXe



PandaX-xT: 30 FV LXe (Future)



PandaX合作组：2009年成立，目前~70人

## Particle and Astrophysical Xenon Experiment



Universidad Zaragoza



# PandaX液氙实验的历史进程

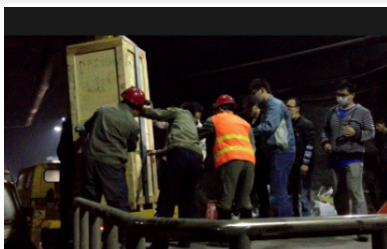
2009 PandaX 合作  
组成立



2014. 3 PandaX-I  
实验启动



2016. 7-2019. 7 PandaX-II (580公  
斤液氙) 运行



2012. 7 PandaX-I  
(120公斤  
液氙) 实验入驻锦  
屏



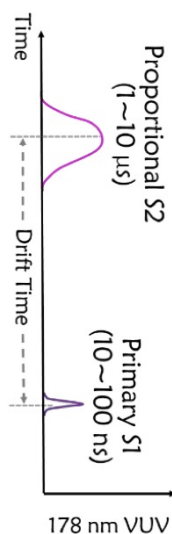
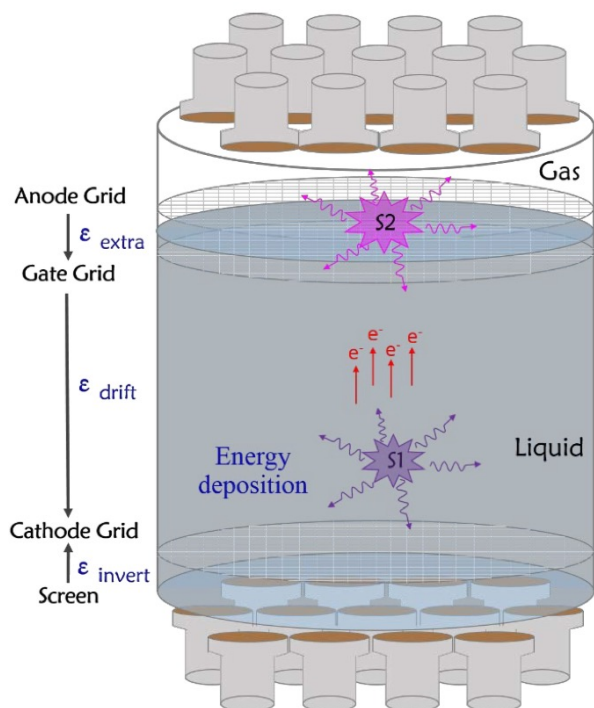
2014. 5-10  
PandaX-I 运行



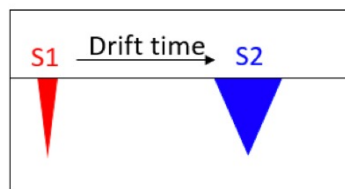
2019. 8- PandaX-  
4T

## PandaX实验探测的原理

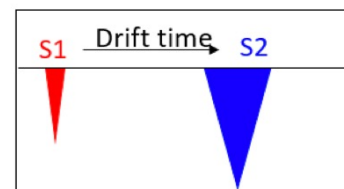
- 利用气液两相氙时间投影室（TPC）技术，同时记录瞬时的闪烁光信号(S1)和对应的漂移电子信号(S2)
- 利用S1及S2信号：甄别本底/信号，重建3D位置



Dark matter: nuclear recoil (NR)

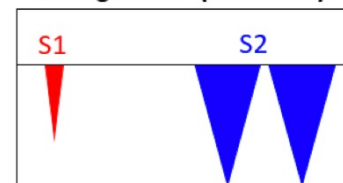


$\gamma$  background: electron recoil (ER)



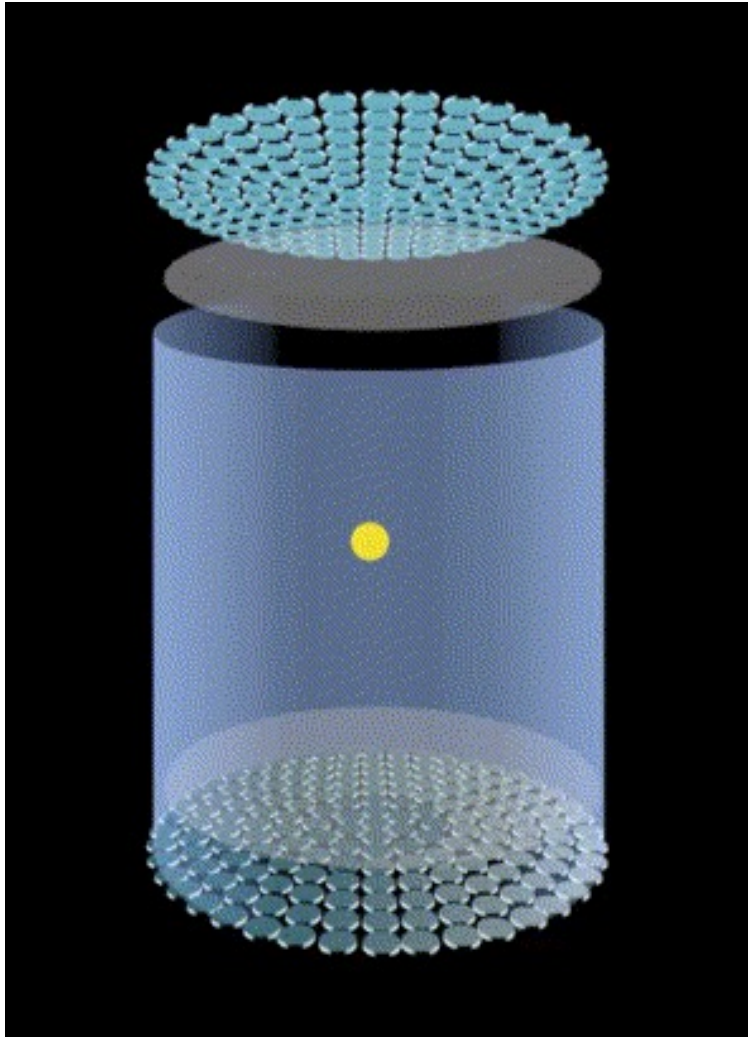
$$(S2/S1)_{NR} \ll (S2/S1)_{ER}$$

Multi-site scattering background (ER or NR)

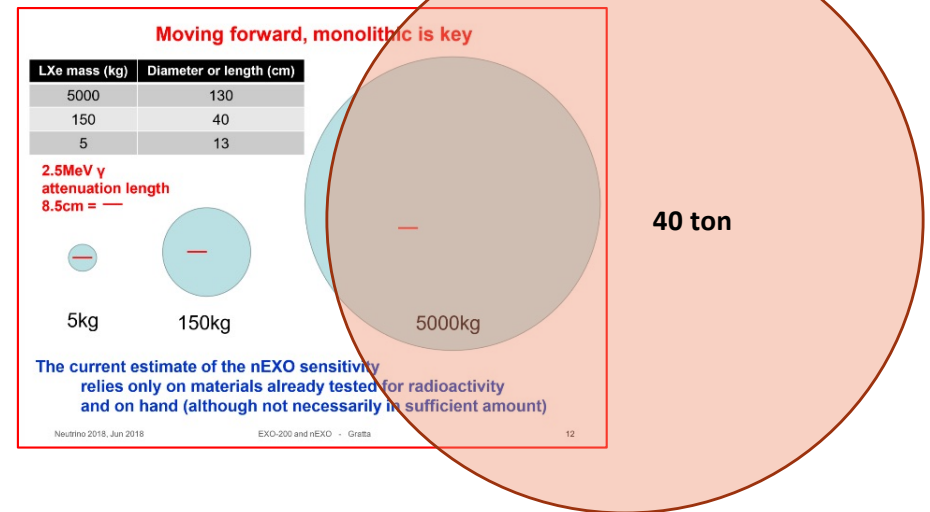


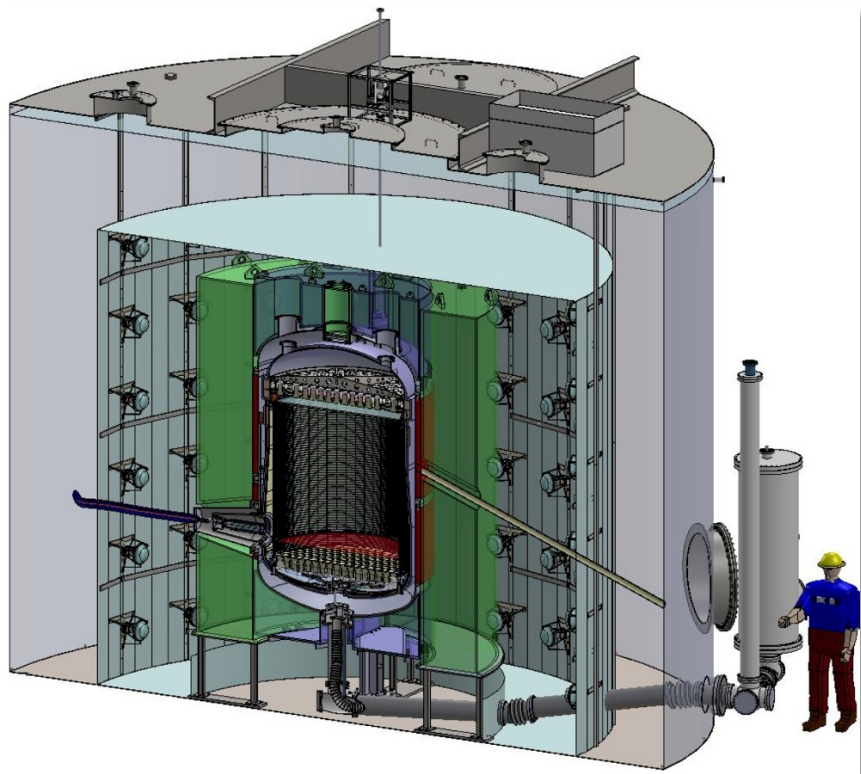


## PandaX寻找氙-136的无中微子双贝塔衰变的优势



- 利用自然氙，无需氙-136富集
- 无长寿命放射性同位素，CJPL极低宇宙线通量，氙-137可以忽略
- 增加液体靶材料，实验方案机动性强
- 8.9% 氙-136可以用于无中微子双贝塔衰变研究
- 事件三维位置重建: single-site 和 multi-site event
- 自屏蔽效应可以有效抑制本底提高目标核素的利用率和信号效率





美国下一代探测器：LZ，7吨，  
2020年-

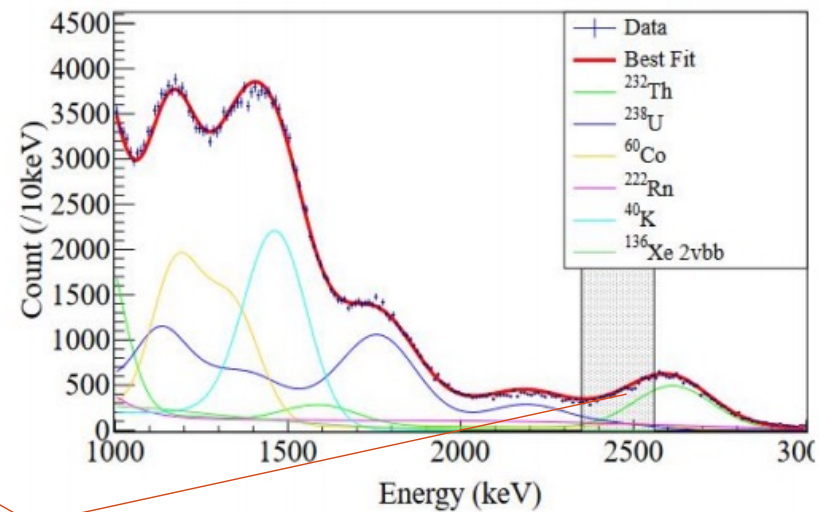
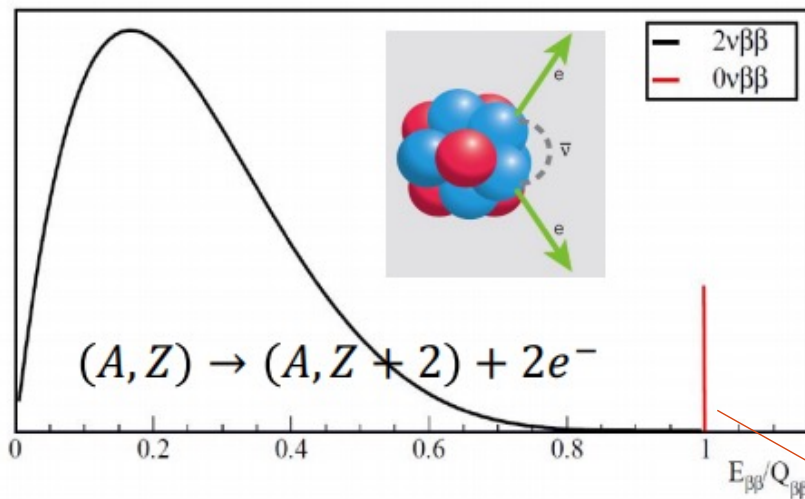


欧洲下一代探测器：XENONnT，  
6吨，2020年-



## PandaX-II 实验寻找 $0\nu\beta\beta$

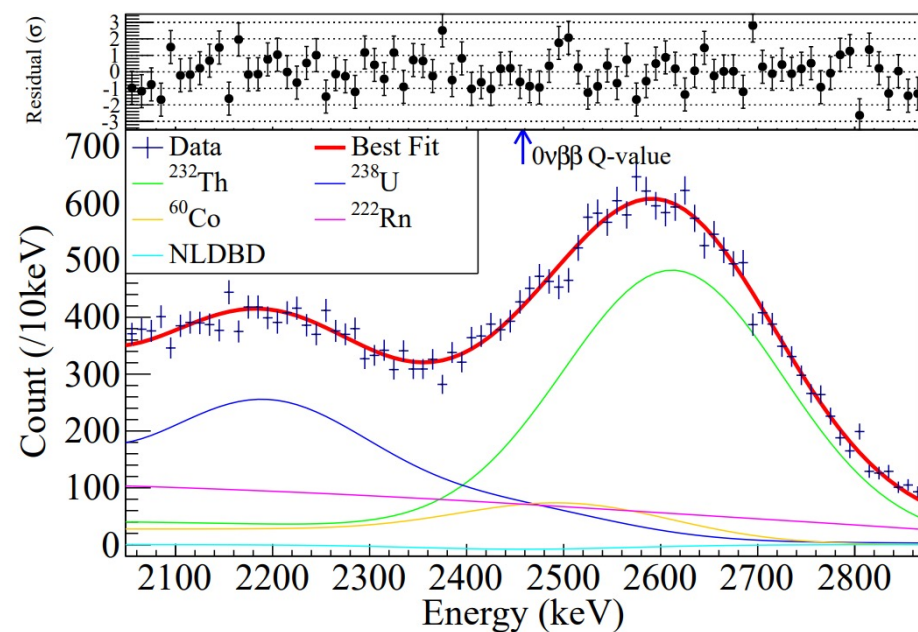
- 580公斤自然氙中 51.6 公斤氙-136
- 403.1天的暗物质探测物理数据
  - 8.1吨天氙-136数据
- 能量重建：钍-232外刻度



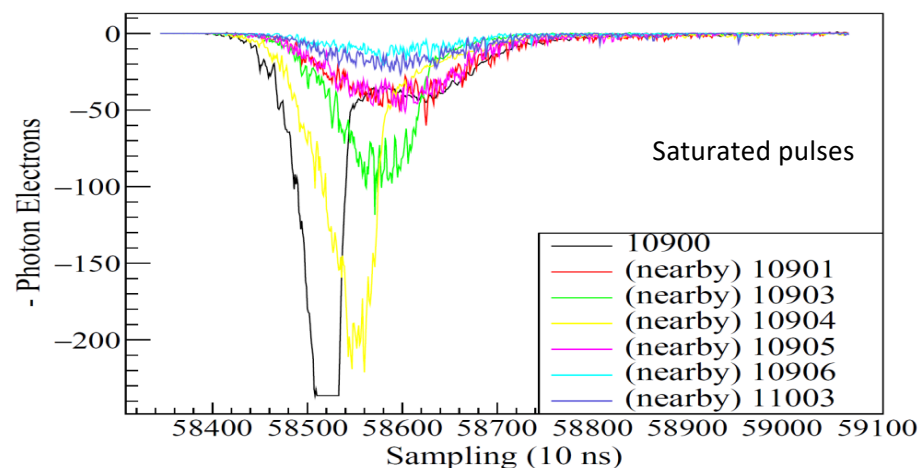
氙-136的 $0\nu\beta\beta$ 的Q值：2458keV

## PandaX-II 实验寻找 $0\nu\beta\beta$

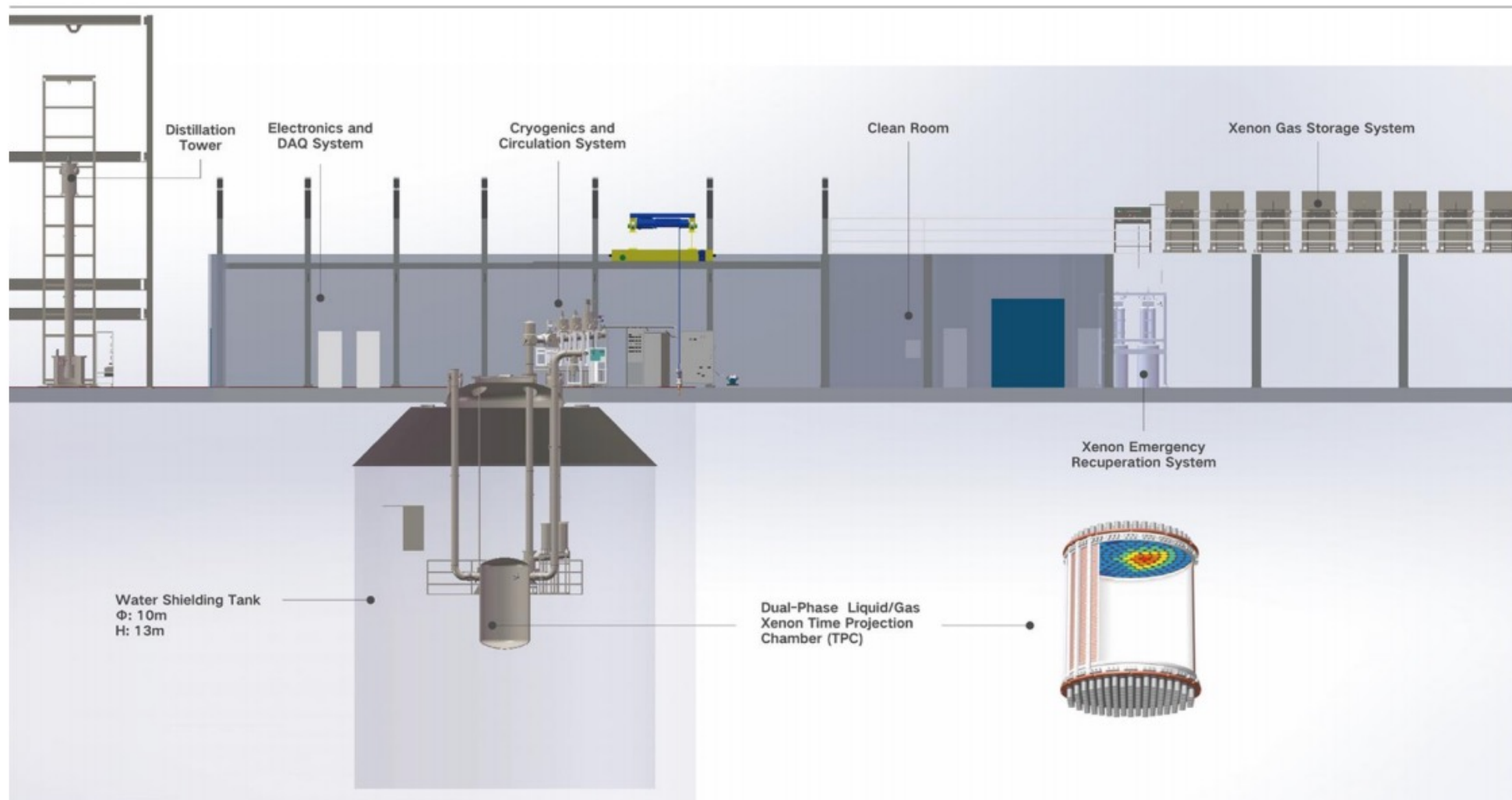
- 半衰期下限为 $2.4 \times 10^{23}$  yr at 90% CL, 对应的中微子马约拉纳有效质量上限1.3-3.5 eV
- 首个利用双相自然氙实验探测器给出 $0\nu\beta\beta$  结果
- 验证了此类实验在寻找 $0\nu\beta\beta$  上的可行性
- 面临的主要挑战：MeV宽能谱范围内的本底水平和探测器的能量分辨率



Chinese Physics C 43, 113001 (2019)



# PandaX-4T实验

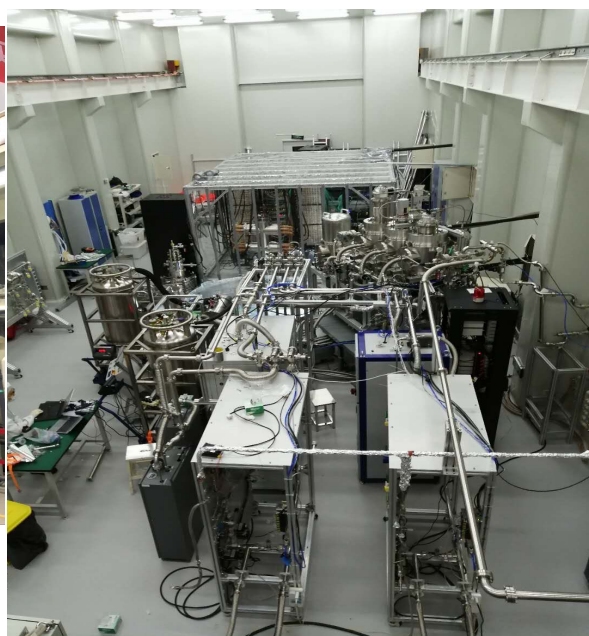


# CJPL B2 实验大厅

大厅入口



万级洁净间



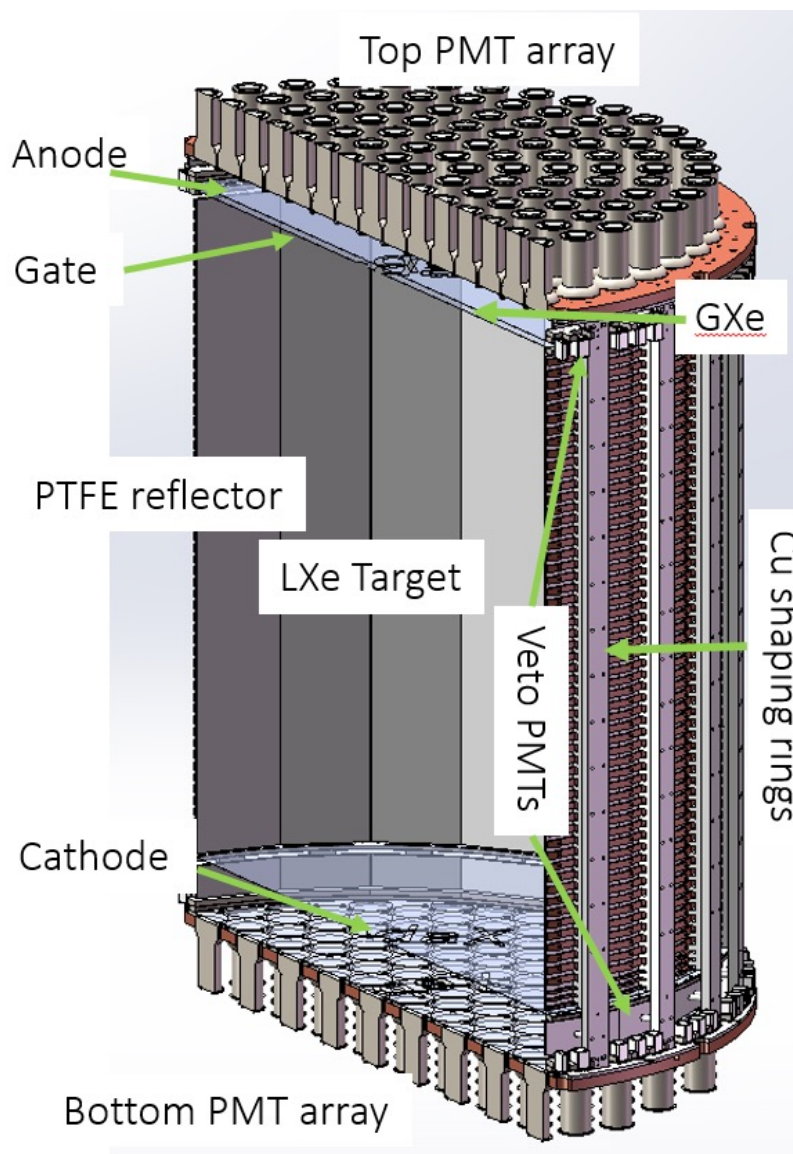
13m(H)x10m(D) 地下空间  
~900 m<sup>3</sup> 水屏蔽体 (PandaX-4T)





## PandaX-4T探测器

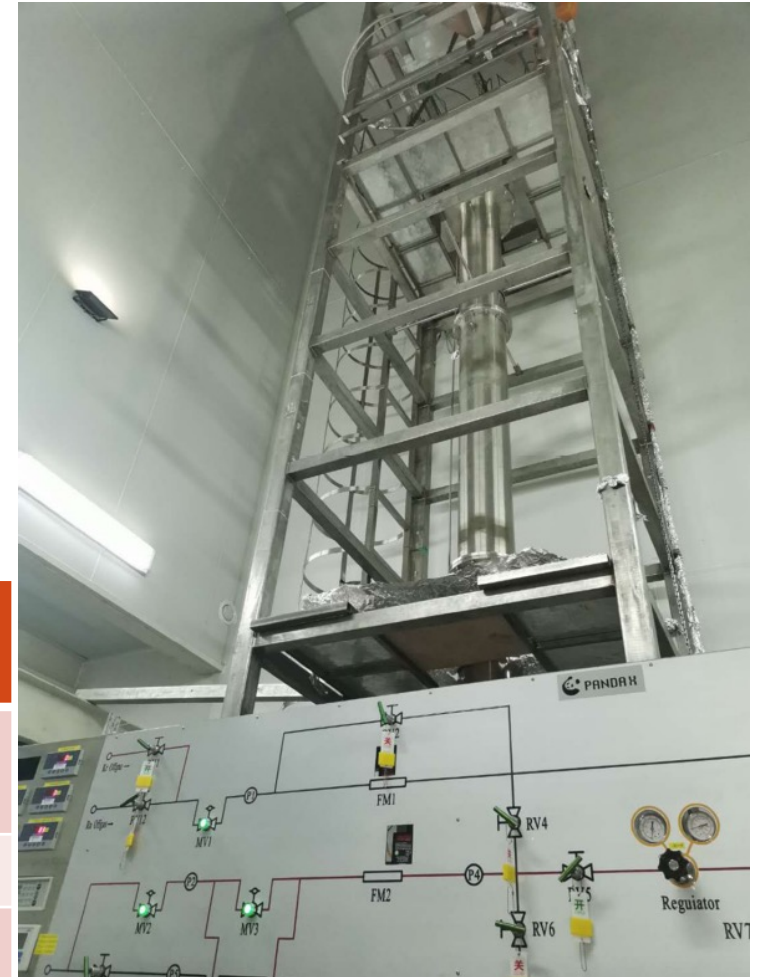
- 电子漂移区：1.2米（高）x 1.2米（直径）
- 总用氙量6吨，漂移区氙总量4吨（Fiducial Volume 大约2.8吨）
- 上/下 169/199支3英寸PMT用于信号收集
- 126支1英寸反符合PMT
- 所有光电管安装前都经过严格测试



# 氙的精馏

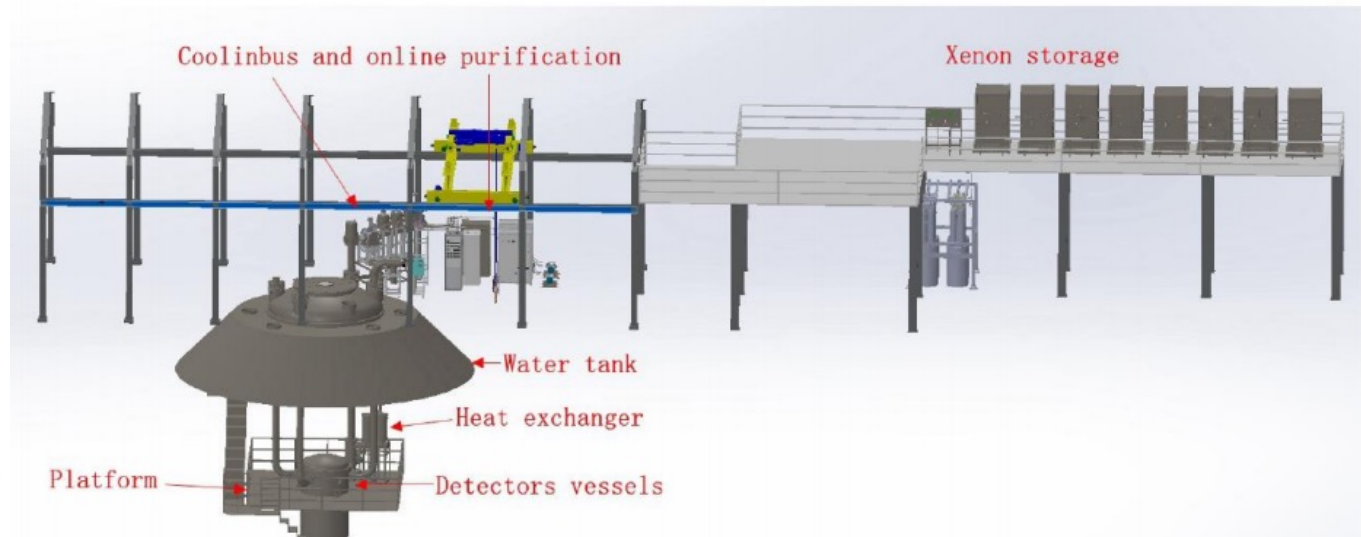
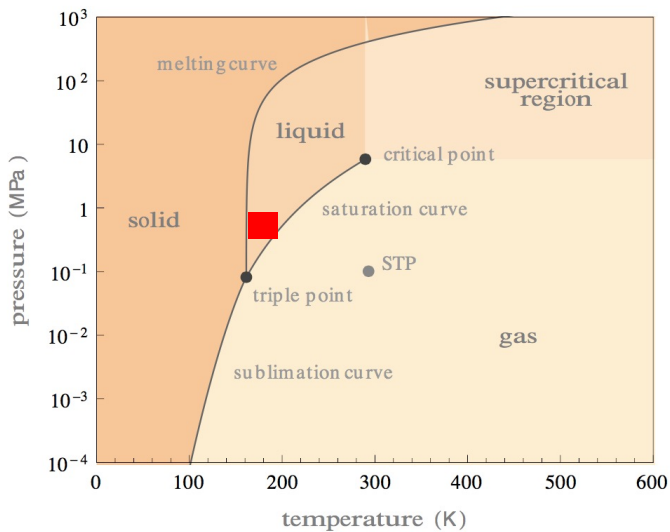
- 精馏塔：8m高，125mm直径
- $^{85}\text{Kr}$ 和 $^{222}\text{Rn}$ 是液氙探测器中两个最重要的内在本底
- 要求Kr/Xe 0.1ppt,商业氙Kr的含量高达0.5ppm
- 精馏系统设计指标：0.01ppt ( $10^{-14}$ )
- 精馏后的产品氙中Kr含量小于8 ppt

精馏塔Distillation Tower	PandaX-II	PandaX-4T
Kr 含量	Kr/Xe~ 6 ppt (1ppt= $10^{-12}$ mol/mol)	0.1 ppt
Rn 含量	Rn222 ~ 25 $\mu\text{Bq/kg}$	Rn222<1 $\mu\text{Bq/kg}$
运行模式	离线	离线(除Kr), 在线(除Rn, Kr)



# 制冷与循环系统

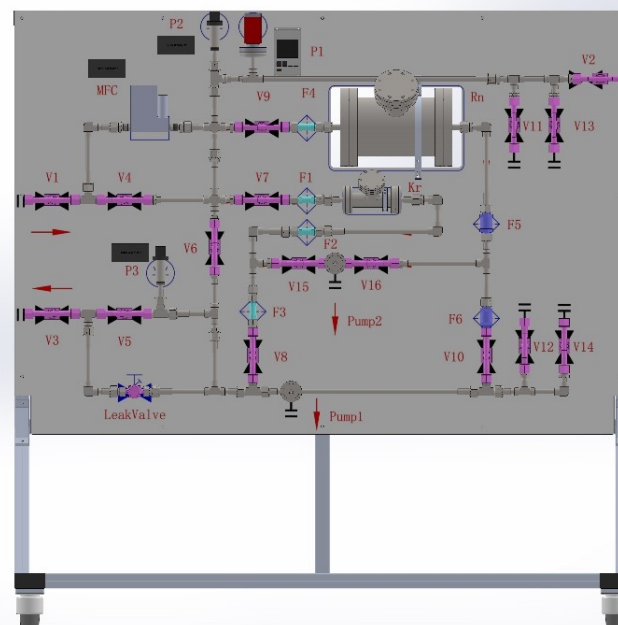
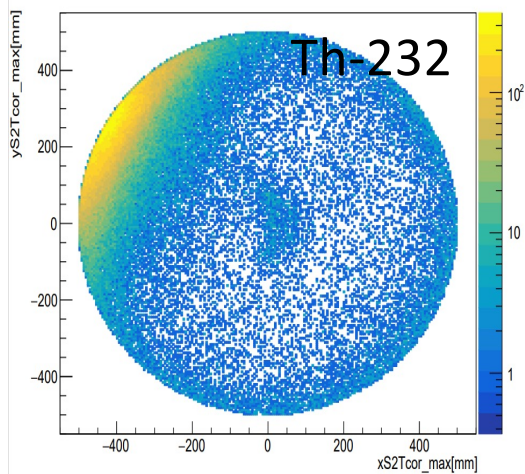
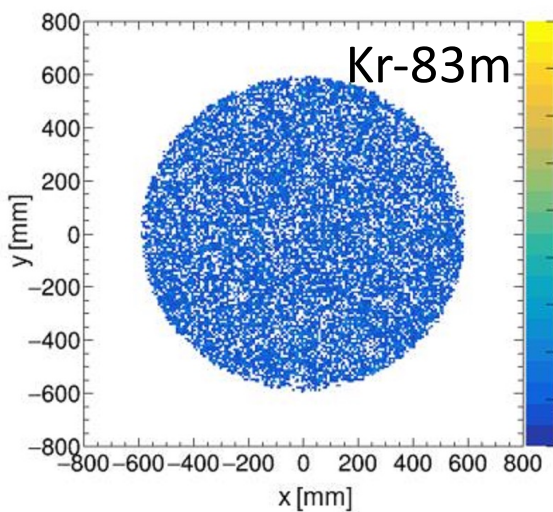
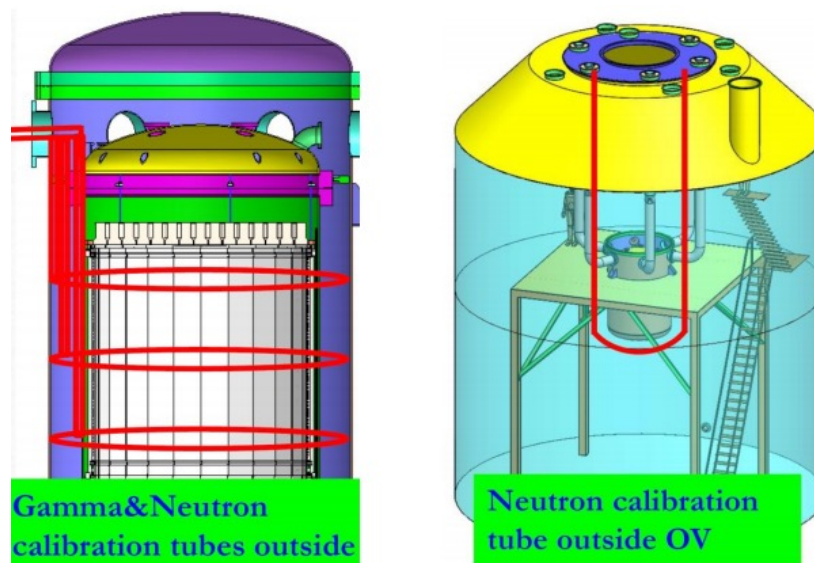
- PandaX-4T总共需要6吨液氙
- 三个冷头可提供580 W (178K) 的制冷功率
- 液氙注入探测器内罐速率达到~700kg/day
- 双循环Loop的在线氙气纯化系统(流速100+55slpm)





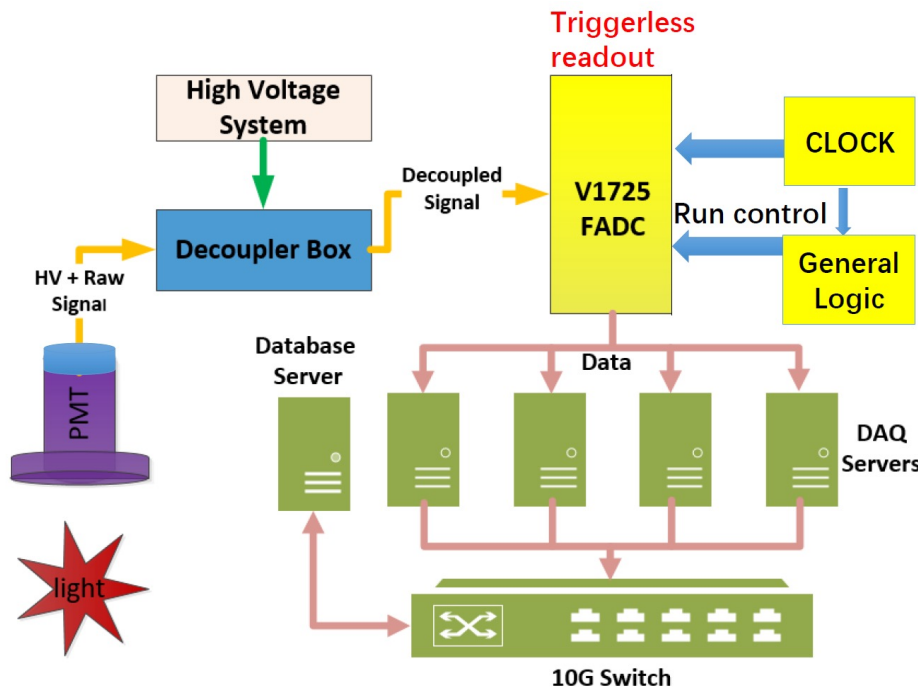
# 刻度系统

- 外刻度系统
  - 外部gamma放射源
  - 外部中子放射源 AmBe和DD
- 内刻度系统
  - Kr-83m
  - Rn-220



## 电子学与数据采集

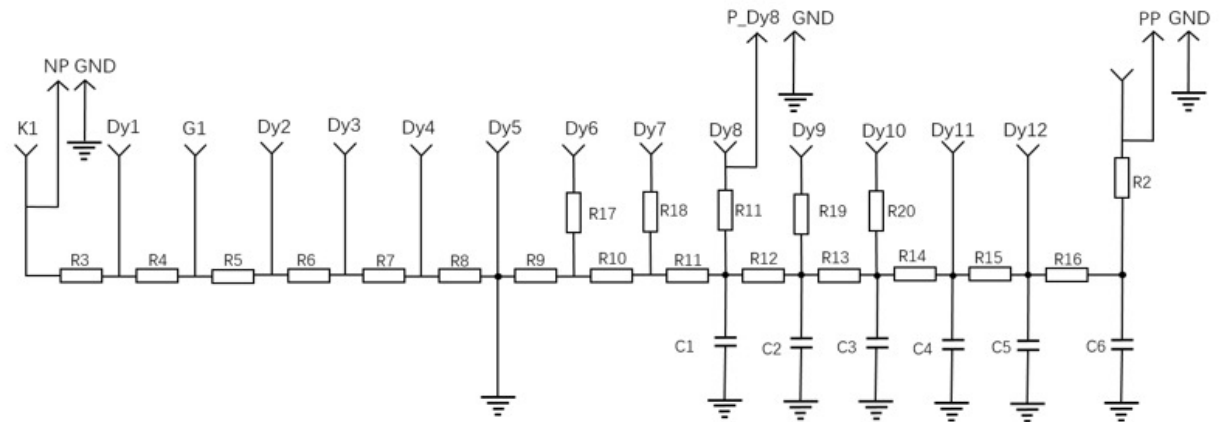
- 实现了单通道自触发读出（不依赖于外部触发信号）
- 多数据传输通道，多服务器并行读出数据，汇总写入磁盘



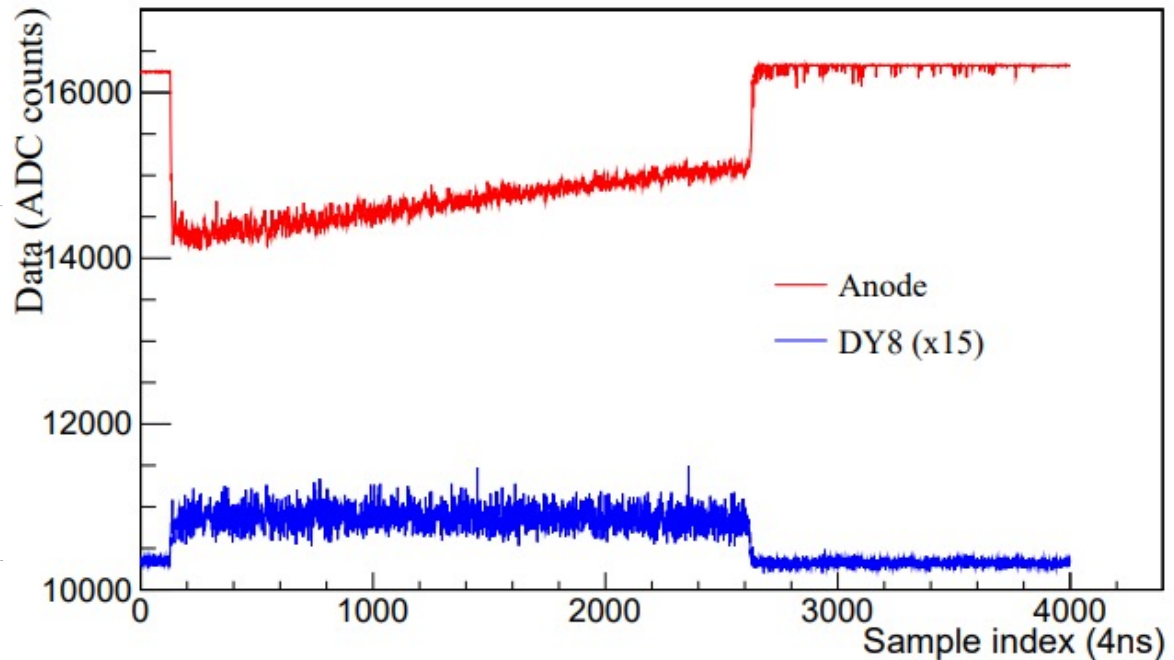
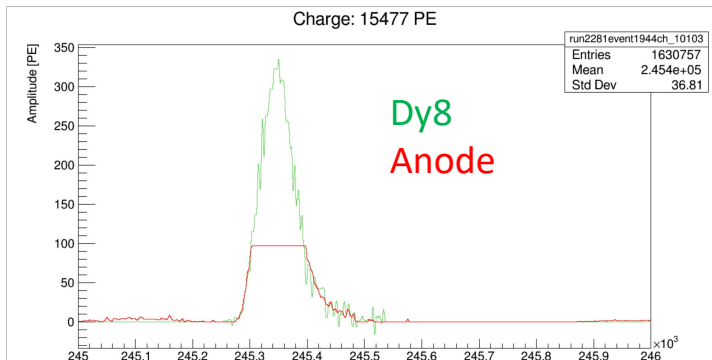
# PMT信号饱和抑制

中心7个PMT采用双读出设计：

- 信号从中间Dy8和阳极同时引出
- 饱和抑制：Dy8信号与阳极信号的线性关系



JINST 15 (2020) 12, T12006

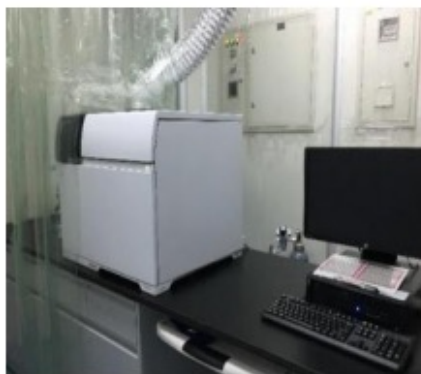




## 本底控制



HPGe  
Sensitivity: ~mBq/kg



ICPMS @PKU  
Sensitivity: ~ppt



Radon emanation measurement system  
Sensitivity: ~2mBq



Kr counting station  
Sensitivity: ~10ppt

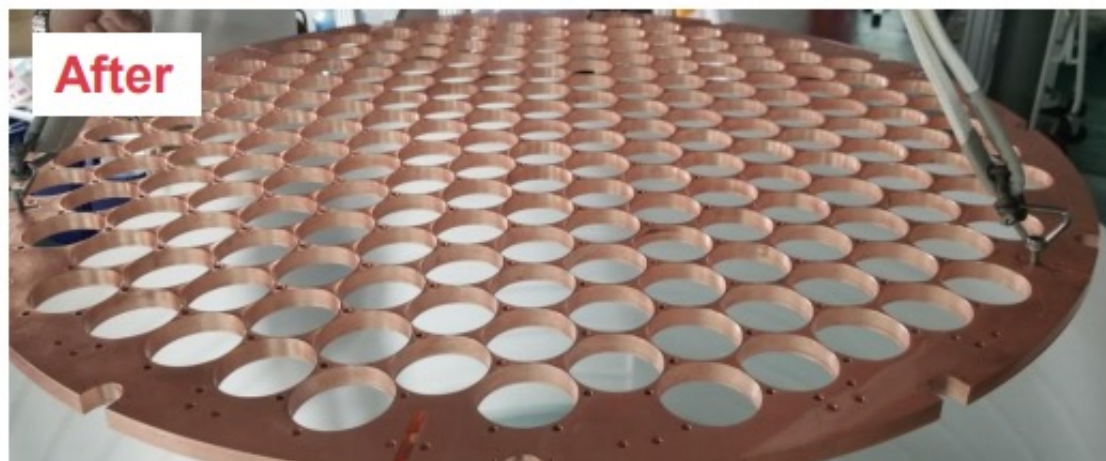
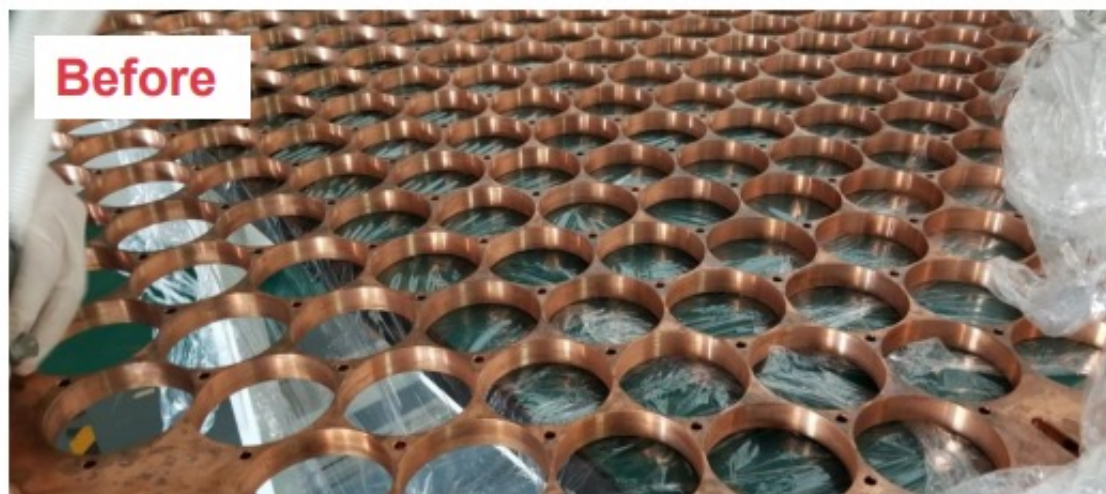


Alpha Mega detector

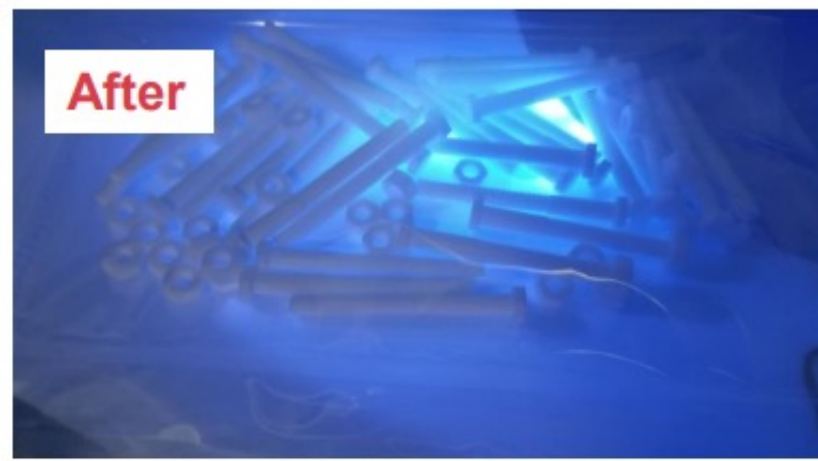


Radon emanation trap system  
Sensitivity: ~0.05mBq

## 本底控制



Copper plate



Teflon bolts/nuts



# PandaX-4T 实验进程

2018/1 超纯水  
屏蔽体施工开始



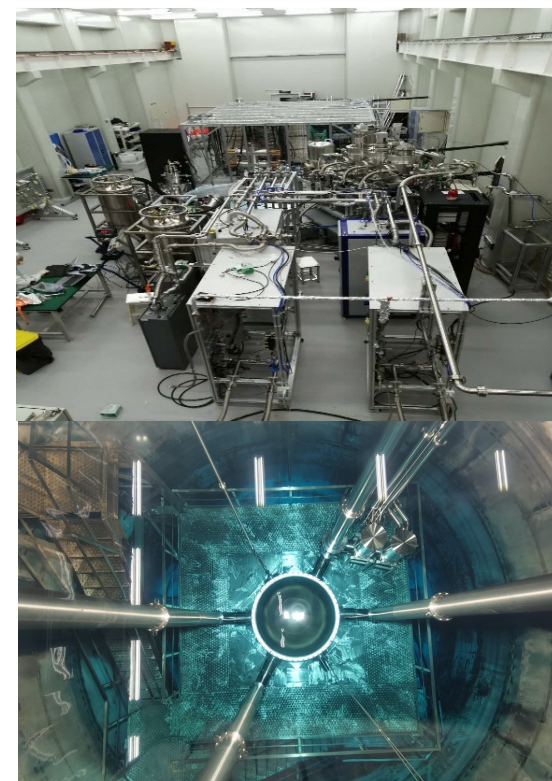
2019/9 PandaX-4T 配套  
设施移交，各子系统入场



2020/5 外罐封装

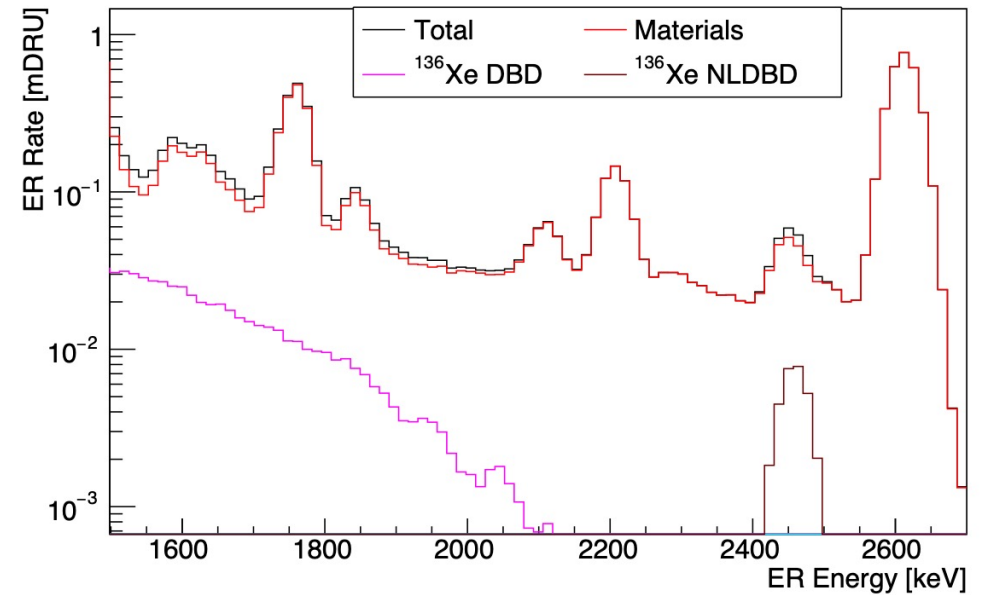


2020/6-系统测试



## PandaX-4T 实验寻找 $0\nu\beta\beta$

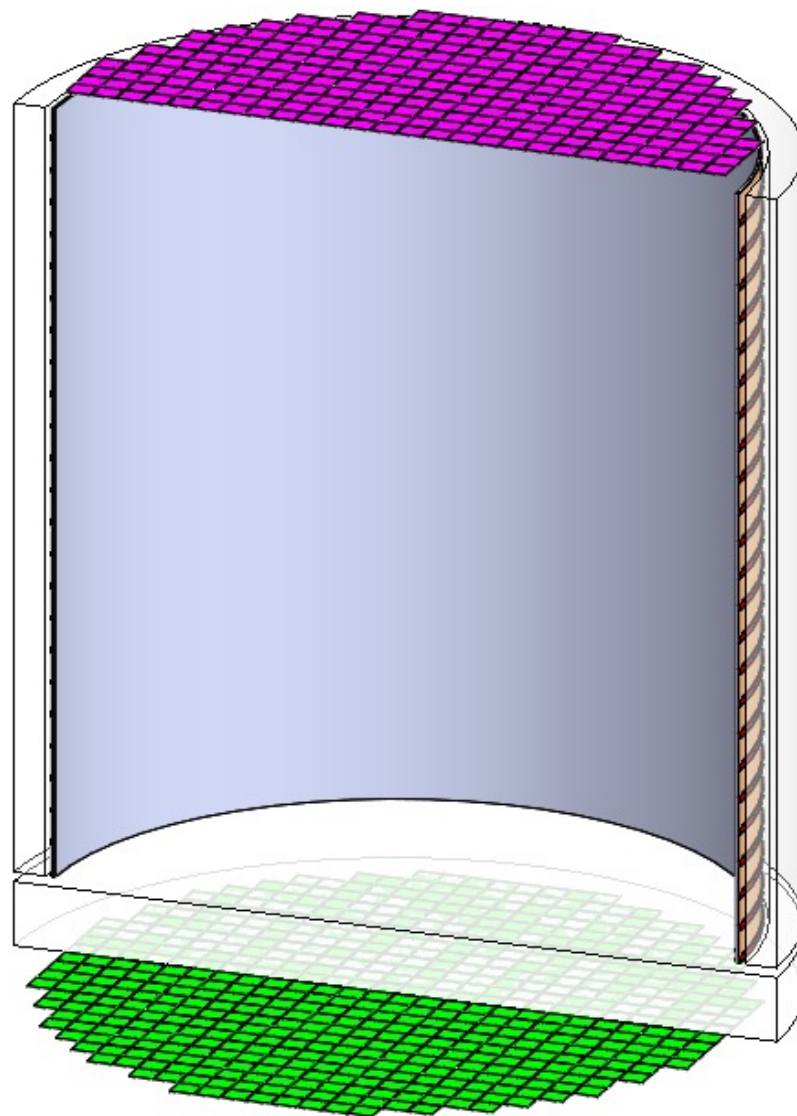
- PandaX-4T探测器灵敏体积内含有350 公斤氙-136
- 材料的放射源是本底的主要来源
- $0\nu\beta\beta$  探测灵敏度接近EXO-200的 $10^{25}$ yr水平，中微子马约拉纳有效质量上限 **$0.2-0.5\text{eV}$**
- 为下一代PandaX-xT实验平台提供参考



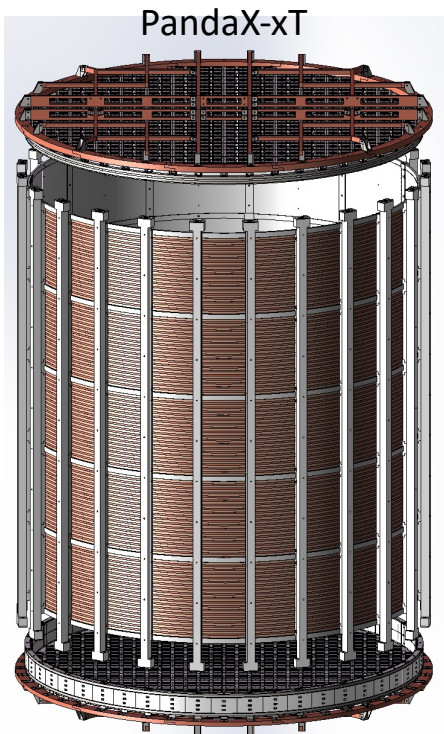


## PandaX-xT $0\nu\beta\beta$ 探测规划

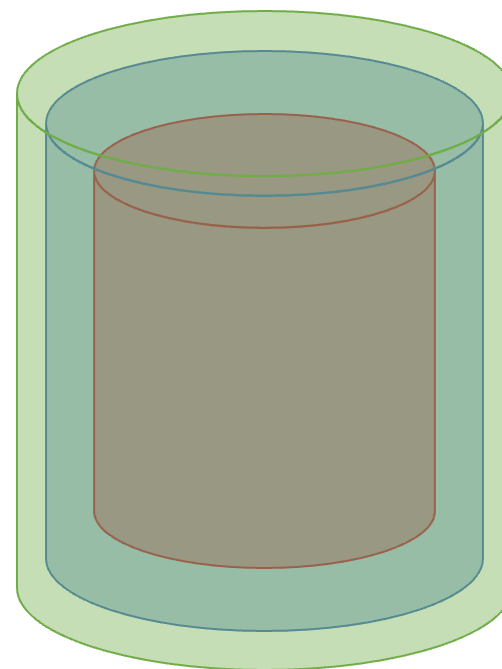
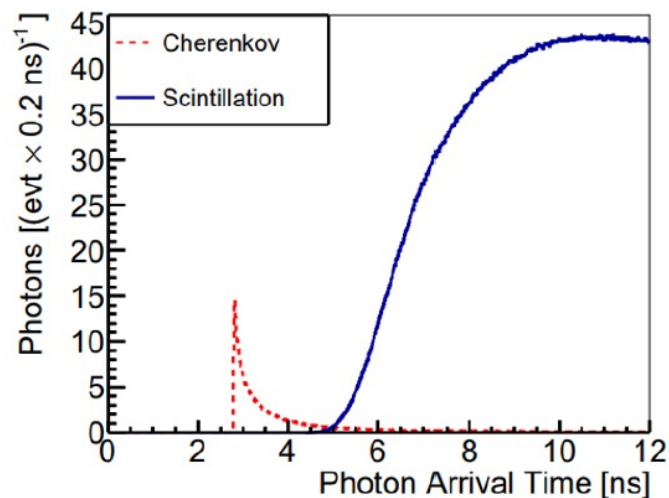
- 灵敏体积内30吨量级有效质量
  - 2.5x2.5米 TPC
  - 47(37)吨总(靶)氙量
  - 10平方米光电覆盖
  - keV-20MeV能区覆盖
- CJPL-II B2厅：目前探测器配套设施大部分可以用于下一代液氙实验 (PandaX-xT)
- 李政道研究所暗物质和中微子平台：数十吨级液氙探测器的研究平台



# PandaX-xT $0\nu\beta\beta$ 探测规划



- 多级灵敏体积分析：优化本底模型与核素利用率
- 闪烁-切伦科夫光子的区分 ( $0\nu\beta\beta$ 本底抑制)
- $0\nu\beta\beta$ 探测灵敏度达到 $10^{27}$ 年量级
- 开展氙-136的 $0\nu\beta\beta$ 、 $2\nu\beta\beta$ -ES, 以及氙-124的 $0\nu 2EC$ 等研究



	灵敏体积内氙的质量[ton]			
	5	5-10	10-15	15-20
BKG[C/ke V/ton/yr]	$1.61 \times 10^{-3}$	$7.61 \times 10^{-3}$	$3.06 \times 10^{-2}$	$8.06 \times 10^{-2}$

## PandaX-xT的潜力

- CJPL地下实验室优势明显：

- 宇宙线本底 $1/m^2/\text{week}$

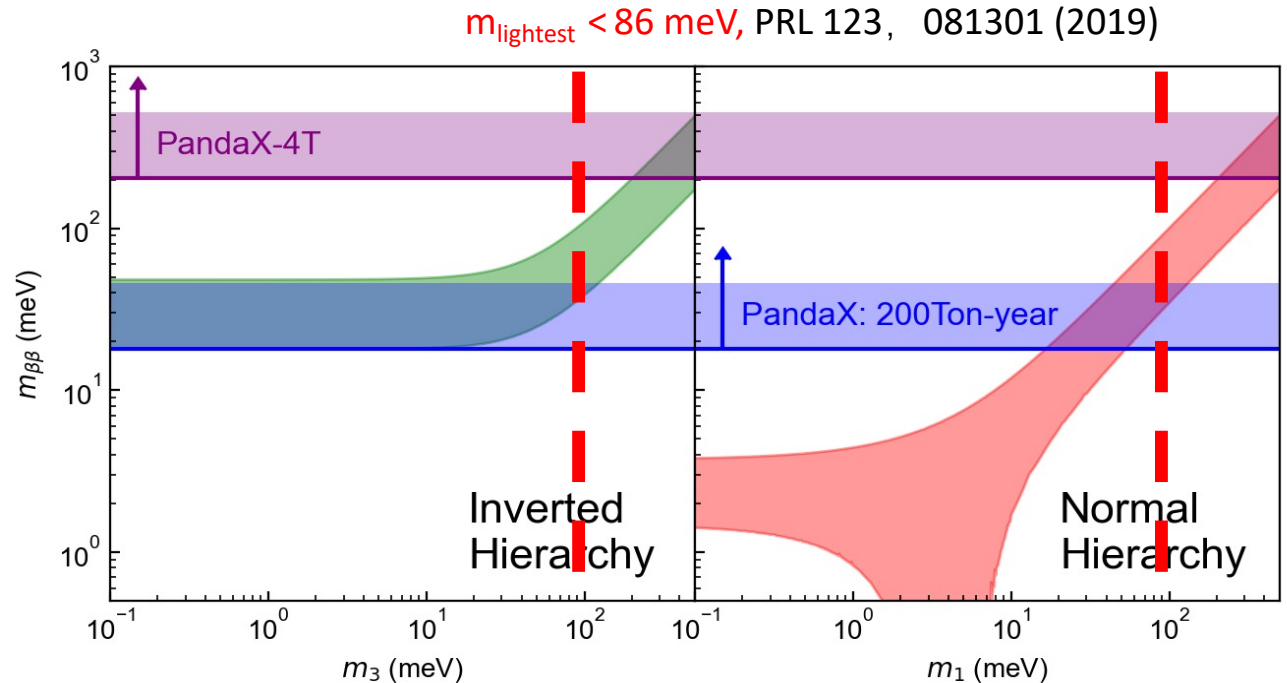
- 氙-137本底相比于LNGS低2个数量级可以忽略不计 ( $10^{-5} \text{ C/keV/Ton/yr}$ )

- 氙-136无中微子双  
贝塔衰变：

- 对马约拉纳中微子  
有效质量测量至  
15meV的灵敏度

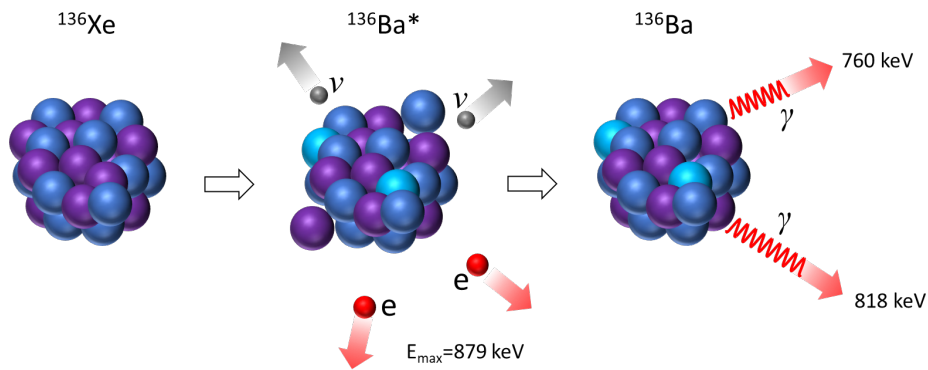
- 覆盖中微子反序参  
数空间

- 中微子正质量序下,  
还可以检验准简并区



## PandaX-xT的潜力

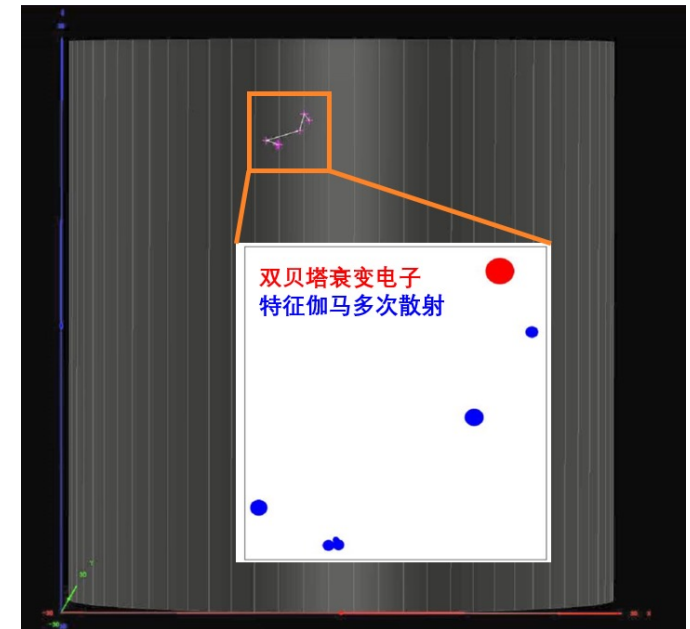
- 无（双）中微子双贝塔衰变到子核激发态
  - 双贝塔+若干特征 $\gamma$ s
  - 利用与 $\gamma$ s的耦合提高灵敏度



- 氙-134的双贝塔衰变
  - 自然氙中含有10.4%氙-134
  - 无中微子双贝塔衰变Q值825.8keV
  - EXO-200 (29.6 公斤年):

$$T_{1/2}^{2\nu\beta\beta} > 8.7 \cdot 10^{20} \text{ yr and } T_{1/2}^{0\nu\beta\beta} > 1.1 \cdot 10^{23} \text{ yr}$$

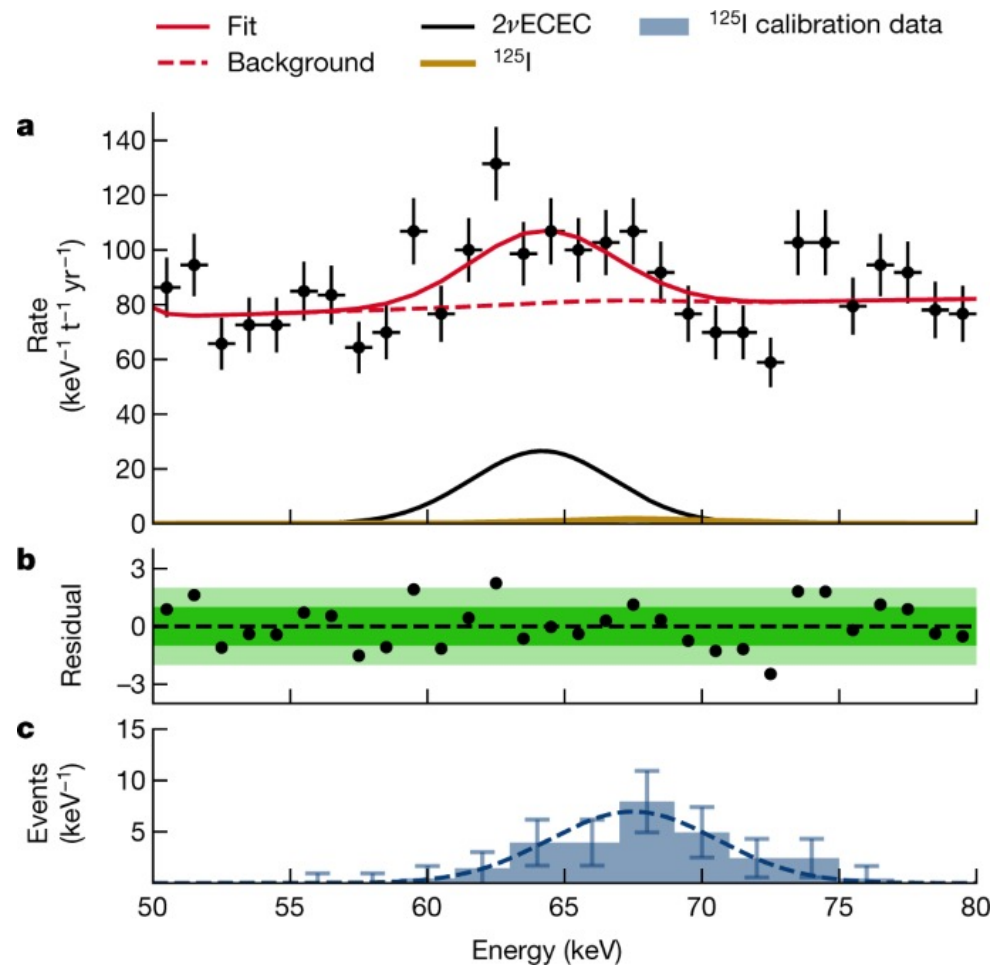
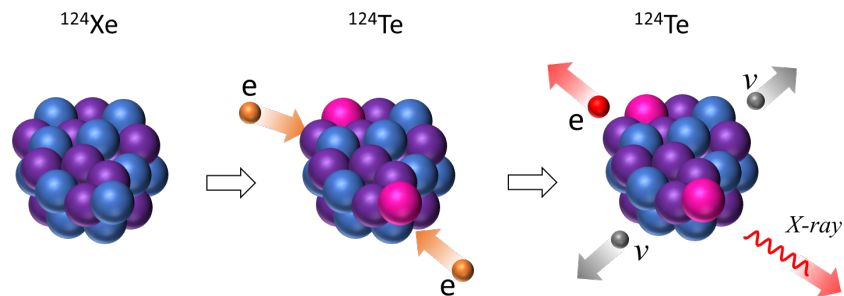
*Phys.Rev.D 96 (2017) 9, 092001*



# PandaX-xT的潜力

## 氙-124双电子俘获过程的寻找

- 自然氙含有0.1%的氙-124
- 2019年XENON1T首次发现末态含双中微子过程
- 共振增强能够提高无中微子双电子俘获的过程发生概率



XENON1T 氙-124双中微子双电子俘获实验结果，  
半衰期为 $1.8 \times 10^{22}$ 年



## 未来的变革性技术：氙同位素分离

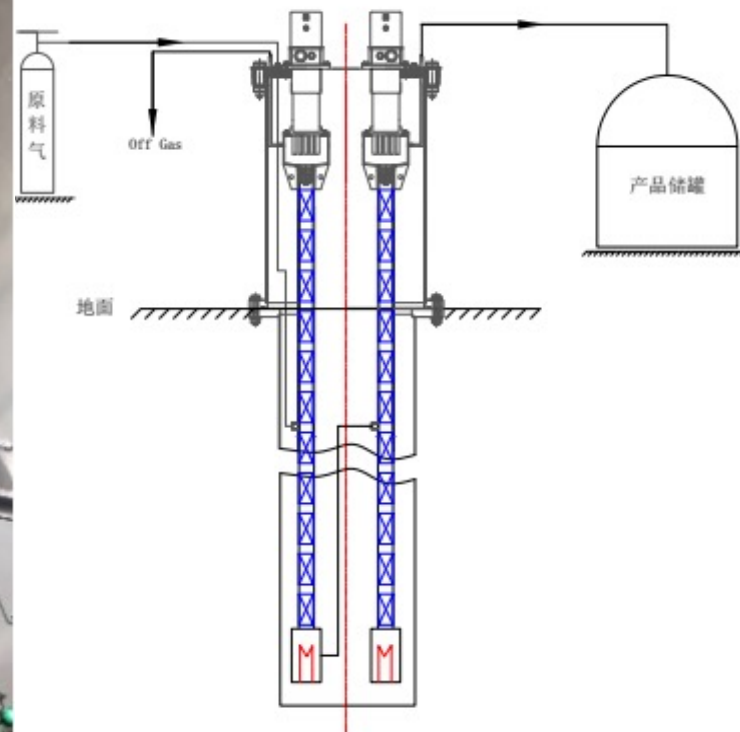
### 超规格精馏塔：

- 多个内塔级联组成，总塔高约1600米
- 超纯气体：有效去除氦、氩等本底，提升信噪比
- 超强的分离能力：氙-136同位素分离(90%以上)，打破国外垄断地位
- 两个探测器开展“beam-on”，“beam-off”探测
- 富集氙-136无中微子双贝塔衰变实验

PandaX-4T精馏塔



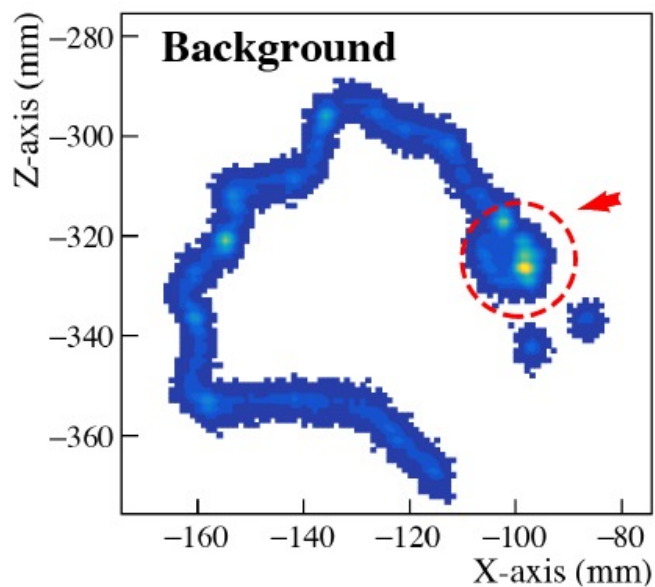
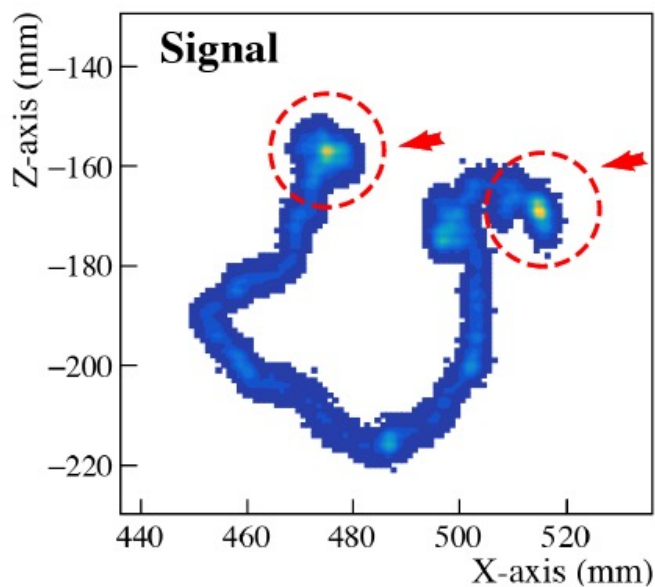
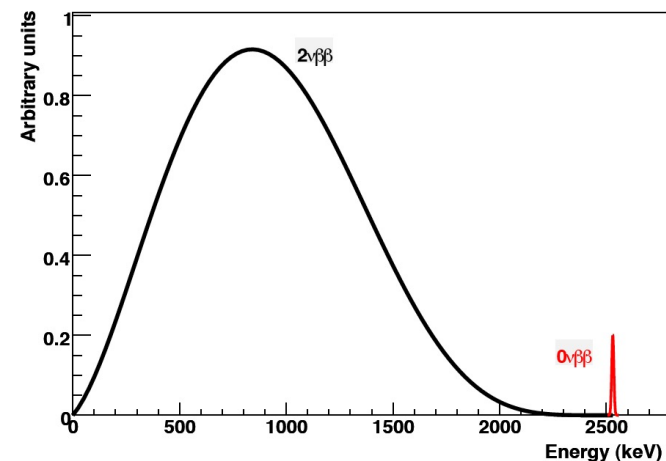
$^{136}\text{Xe}$ 精馏塔设计图（示意）  
内部由多个精馏塔内塔级联组成，总塔高约1600米



对中微子是否为马约拉纳费米子做出决定性判断

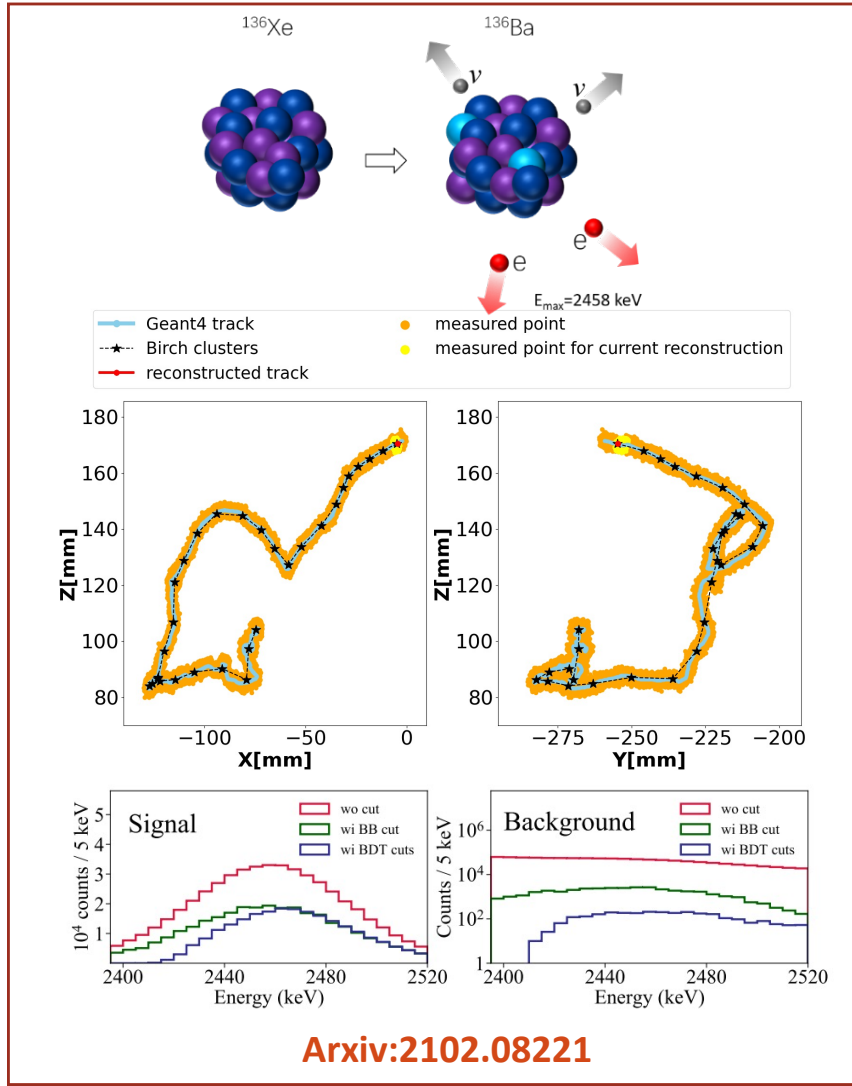
## 未来的变革性技术： $0\nu\beta\beta$ 粒子径迹重建

- 世界范围内运行的百公斤量级实验采用固体和液体探测器技术通过测量衰变模态电子的能量
- 气体时间投影室可以记录粒子的能量和径迹
- 10 bar 氙气中 $0\nu\beta\beta$ 径迹长度20cm，可以用来识别信号和本底
- 重建粒子的径迹有助于衰变Ba子核的寻找，助力零本底实验的实现
- 世界范围内NEXT, PandaX, NuDEX 等实验积极进行气体探测器的研发

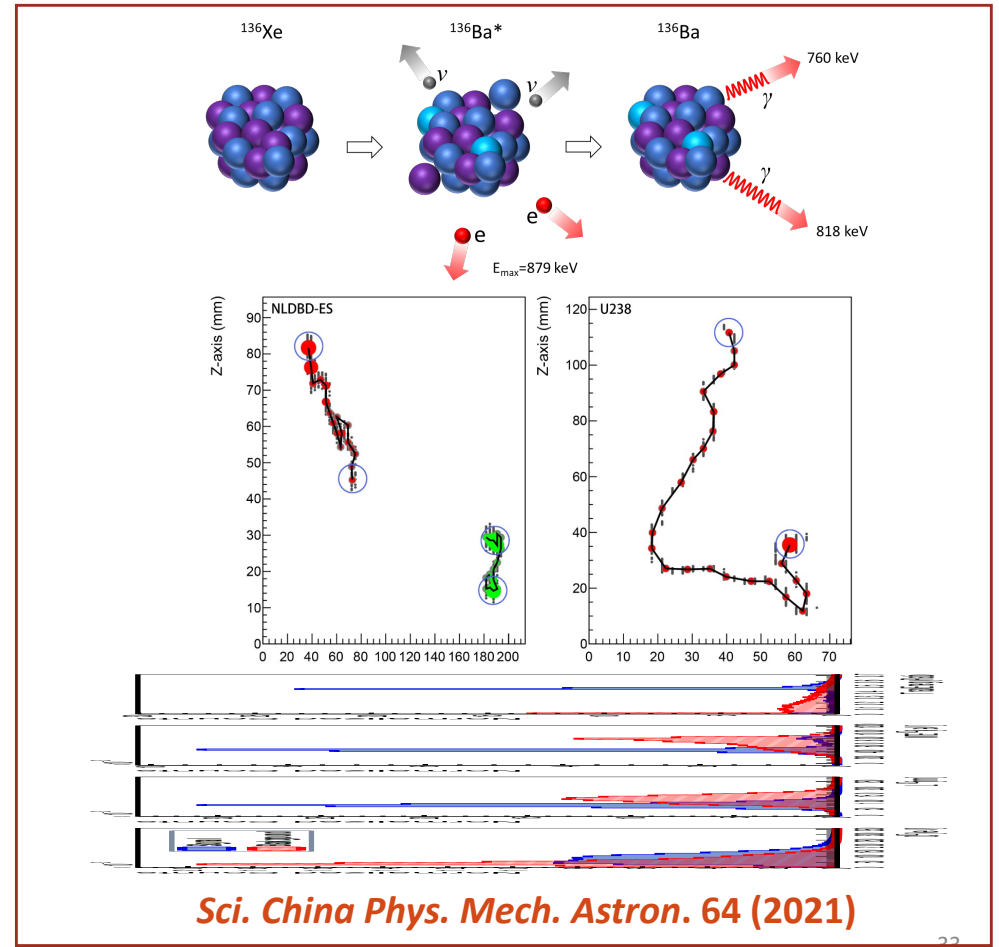




# 基于粒子径迹本底信号识别



- 贝叶斯卡尔曼滤波方法： $2.7 \times 10^{26} \text{ yr}$  (90% CL, 140 kg and 5 yr)
- 增强 $2\nu\beta\beta$ 到子核激发态的探测灵敏度： $4.1 \times 10^{23} \text{ yr}$  (90% CL, 140 kg and 3 yr)

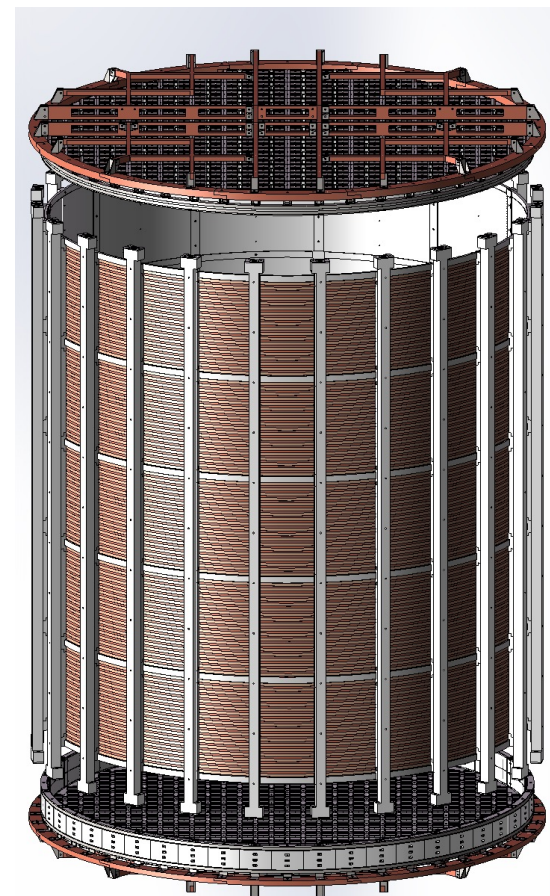


## 总结与展望

- PandaX-4T利用液态自然氙寻找氙-136的 $0\nu\beta\beta$
- 显著的自屏蔽效应提高目标核素的利用率和信号效率
- PandaX-xT正在筹划中
  - 利用自然氙中氙-136无中微子双贝塔衰变，覆盖反质量序
  - 未来可能的变革型技术：
    1. 精馏塔同位素富集，开展beam-on-off测量
    2. 高压气氙径迹探测器：马约拉纳中微子决定性判断



PandaX-4T



PandaX-xT

感谢各位老师聆听