

PandaX实验最新结果和未来展望

杨勇（上海交通大学）

On behalf of  PANDA X Collaboration

NED2018, 衡阳

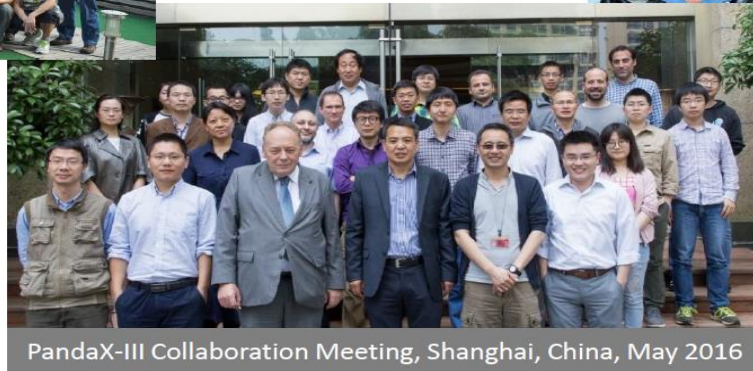
报告提纲

- PandaX实验和锦屏地下实验室
- PandaX-II实验最近的主要物理结果
- PandaX未来计划
 - PandaX-4吨暗物质实验
 - PandaX-III无中微子双贝塔实验
- 总结

PandaX合作组



2018



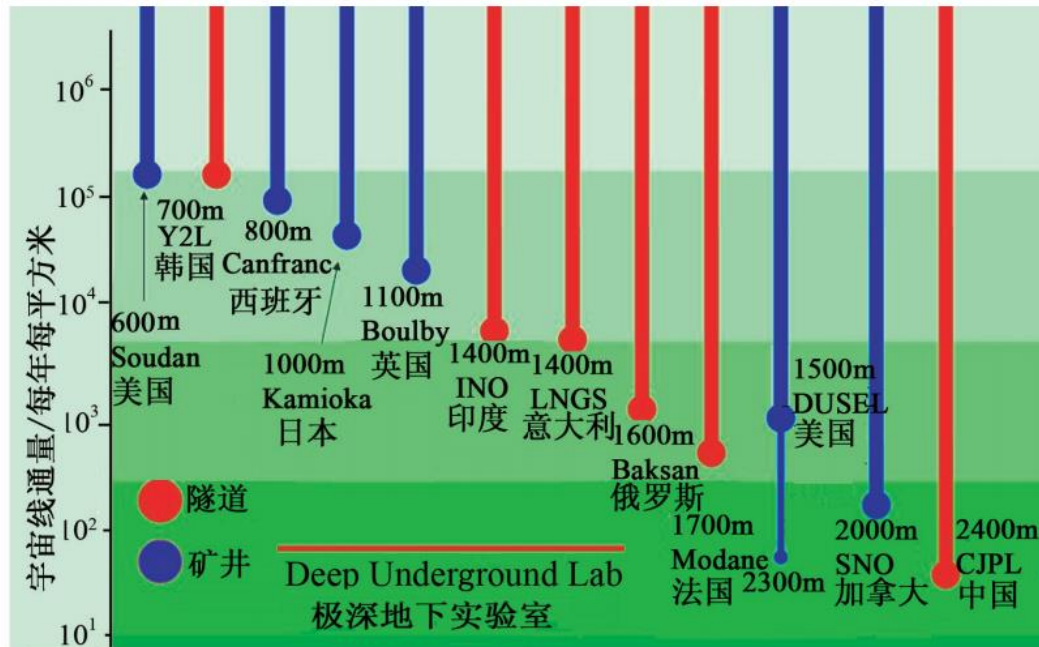
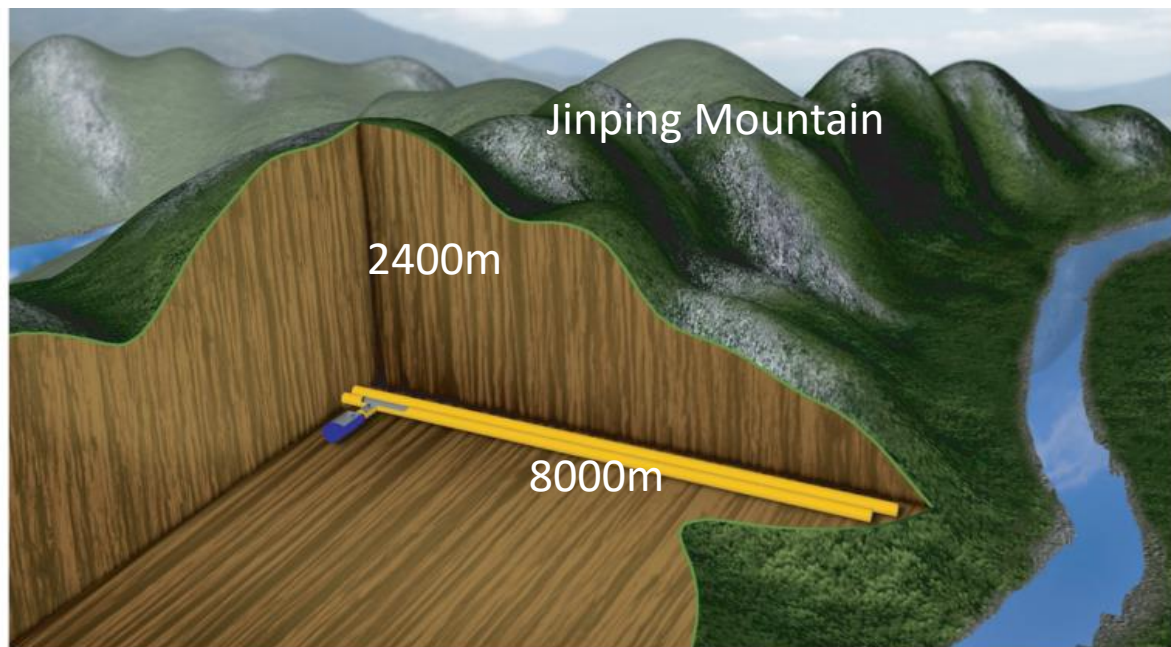
PandaX-III Collaboration Meeting, Shanghai, China, May 2016

- 🇨🇳 上海交通大学
- 🇨🇳 山东大学
- 🇨🇳 中国科技大学
- 🇨🇳 北京大学
- 🇨🇳 南开大学
- 🇨🇳 中国原子能科学研究院
- 🇨🇳 上海应用物理研究所

- 🇨🇳 中山大学
- 🇨🇳 华中师范大学
- 🇨🇳 上海理工大学
- 🇺🇸 美国 University of Maryland
- 🇺🇸 美国 Berkeley Lab
- 🇫🇷 法国 CEA Saclay
- 🇪🇸 西班牙 University of Zaragoza
- 🇹🇭 泰国苏拉那里技术大学 SUT

中国锦屏地下实验室

- 2009–2010清华大学和雅砻水电在四川锦屏山隧道开发了全球最深地下实验室 (2400m), 宇宙线通量最低 $1\mu/\text{week}/\text{m}^2$
- 极佳稀有事件探测地
- 两个暗物质团队, PandaX (液氙, 较重暗物质, $>5\text{GeV}$) 和 CDEX (高纯锗技术, 较轻暗物质, $1-5\text{ GeV}$)



PandaX 实验

PandaX = Particle and Astrophysical Xenon Experiments

 PANDA X 系列实验：基于氙的时间投影室



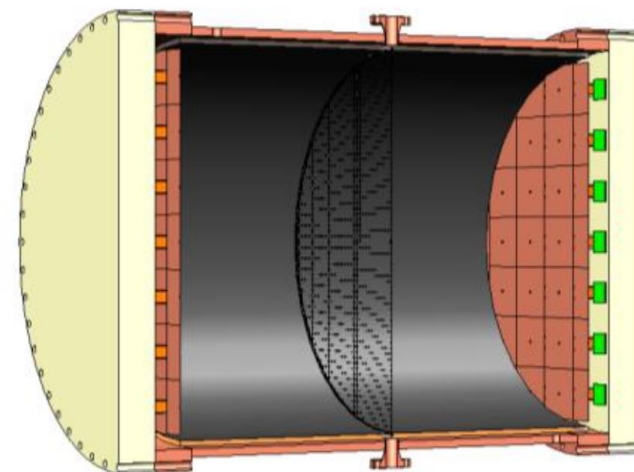
PandaX-I:
120公斤液氙
(2009–2014)



PandaX-II:
580公斤液氙
(2014–2018)



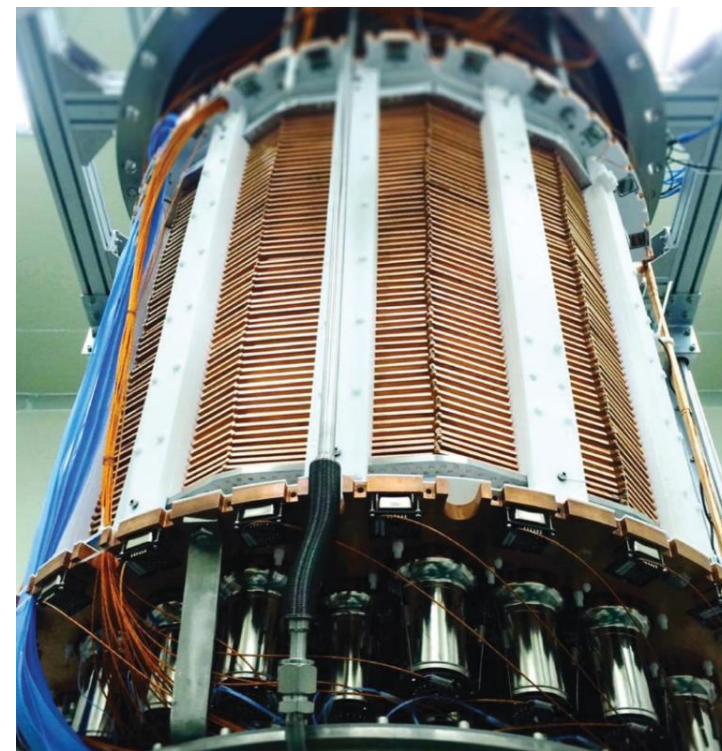
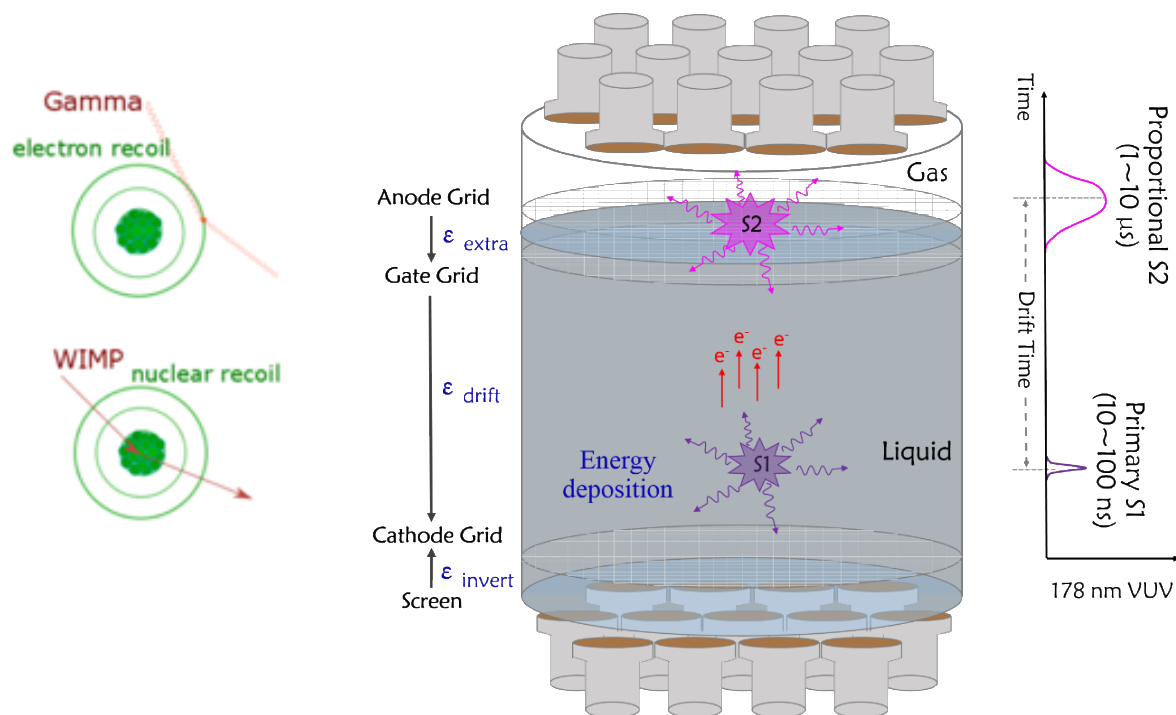
PandaX-xT:
4吨–30吨液氙
(future)



PandaX-III: 百公斤级
到吨级高压气氙
(future)

PandaX-II 时间投影室

- 60x60cm 圆柱体两相氙时间投影室
- 反冲能量转换为闪烁光 (S1) 和电离电子，后者漂移到气氙中再次发光 (S2)
- 利用顶部和底部PMT阵列，测量S1和S2信号
- 利用S2-S1时间差以及S2在顶部PMT阵列的分布，定位粒子在液氙中的位置
- 利用S2/S1的比值，鉴别核反冲（信号）和电子反冲（本底）

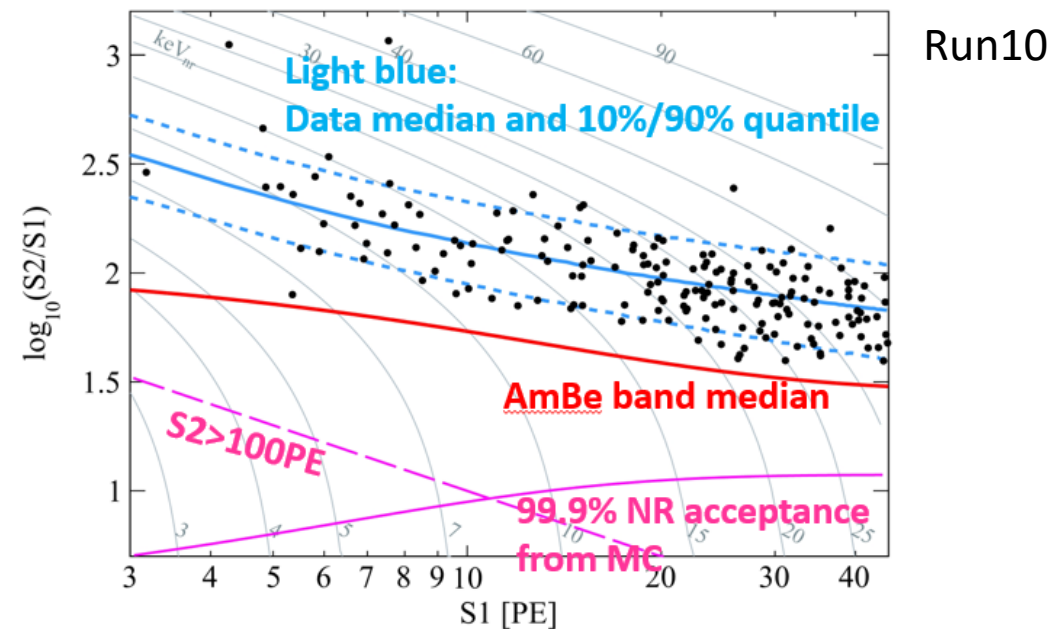
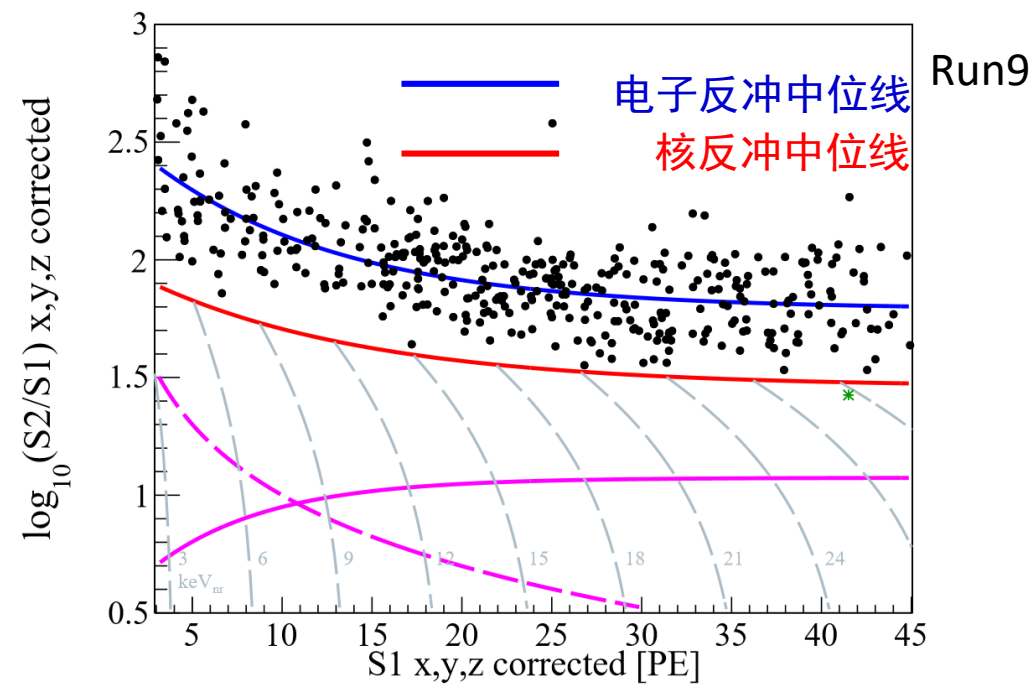


PandaX-II 物理结果汇总

物理模型	曝光量 (吨-天)	发表期刊
WIMP 自旋无关相互作用	33	PRL 117, 121303 (2016) 封面文章，编辑推荐
WIMP 自旋相关相互作用	33	PRL 118, 071301 (2017) 编辑推荐
非弹性散射	27	PRD 96, 102007 (2017)
轴子和类轴子粒子	27	PRL 119, 181806 (2017)
WIMP 自旋无关相互作用	54	PRL 119, 181302 (2017) 编辑推荐
轻传播子暗物质，自相互作用暗物质模型(*)	54	PRL 121, 021304 (2018) 编辑推荐
有效场论和自旋相关(*)	54	arXiv:1807.01936

- 本次报告：54吨-天数据的物理结果
- (*) 和理论学家Hai-bo Yu (UCR) and Wick C. Haxton (UCB&LBNL)合作

PandaX-II 54吨天WIMP暗物质搜寻结果

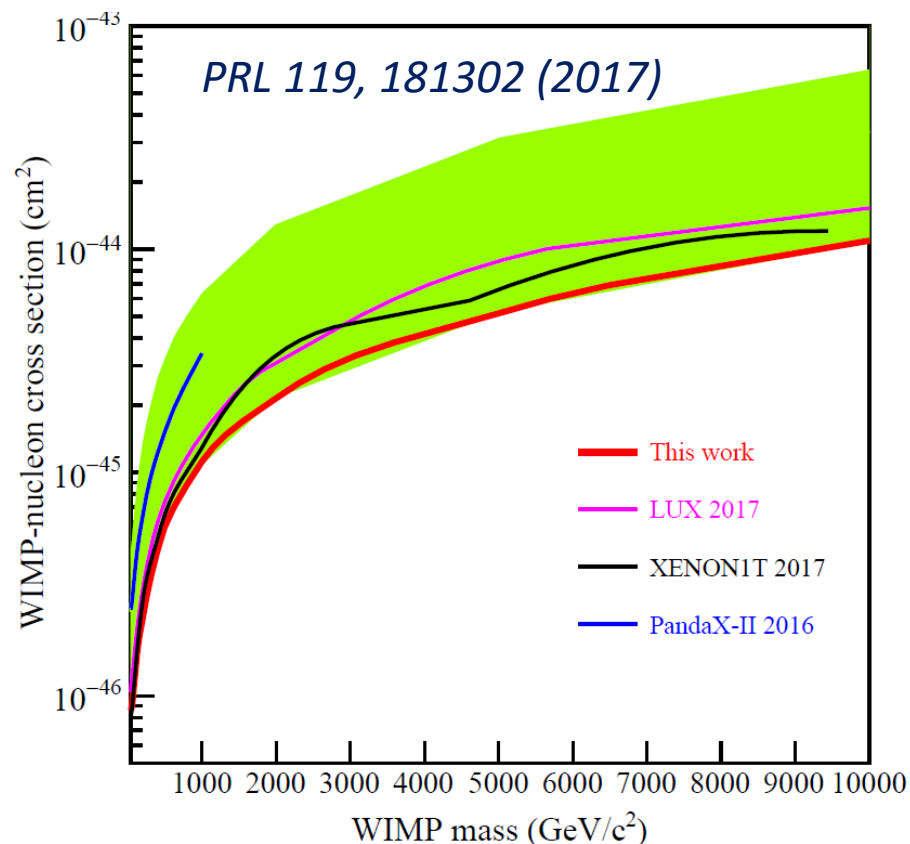
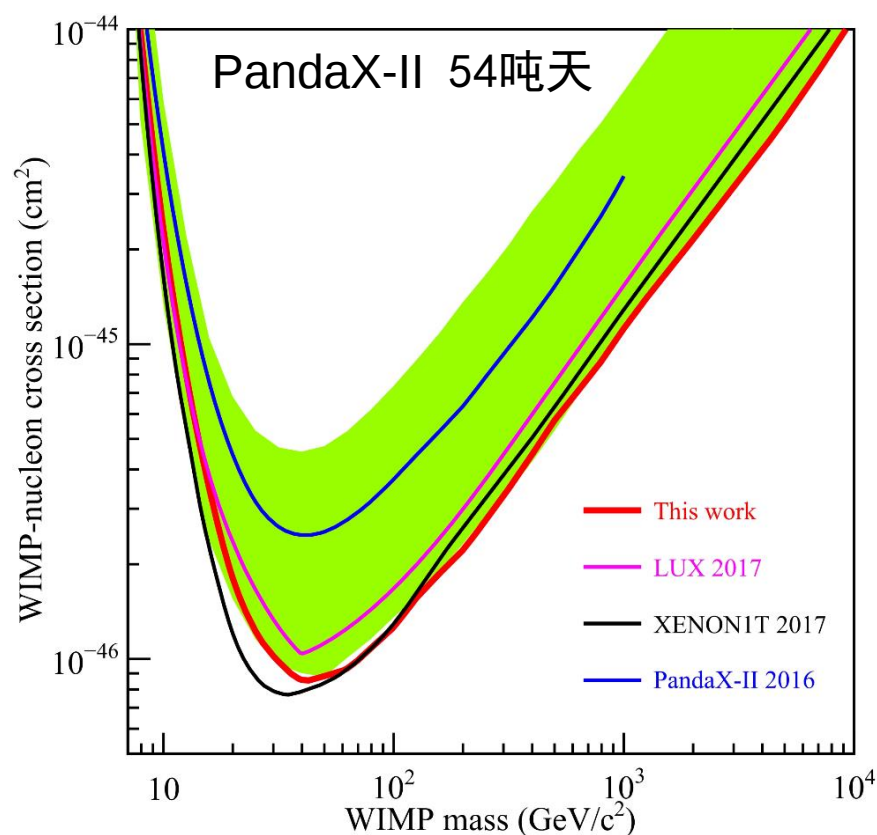


	ER	Accidental	Neutron	Total Fitted	Total Observed
Run 9	376.1	13.5	0.85	390 ± 50	389
Below NR median	2.0	0.9	0.35	3.2 ± 0.9	1
Run 10	172.2	3.9	0.83	177 ± 33	177
Below NR median	0.9	0.6	0.33	1.8 ± 0.5	0

Item	Run 9 (mDRU)	Run 10 (mDRU)
^{85}Kr	1.19 ± 0.20	0.20 ± 0.07
^{127}Xe	0.42 ± 0.10	0.021 ± 0.005
^3H	0	0.27 ± 0.08
^{222}Rn	0.13 ± 0.07	0.12 ± 0.06
^{220}Rn	0.01 ± 0.01	0.02 ± 0.01
ER (material)	0.20 ± 0.10	0.20 ± 0.10
Solar ν	0.01	0.01
^{136}Xe	0.0022	0.0022
Total	1.96 ± 0.25	0.79 ± 0.16

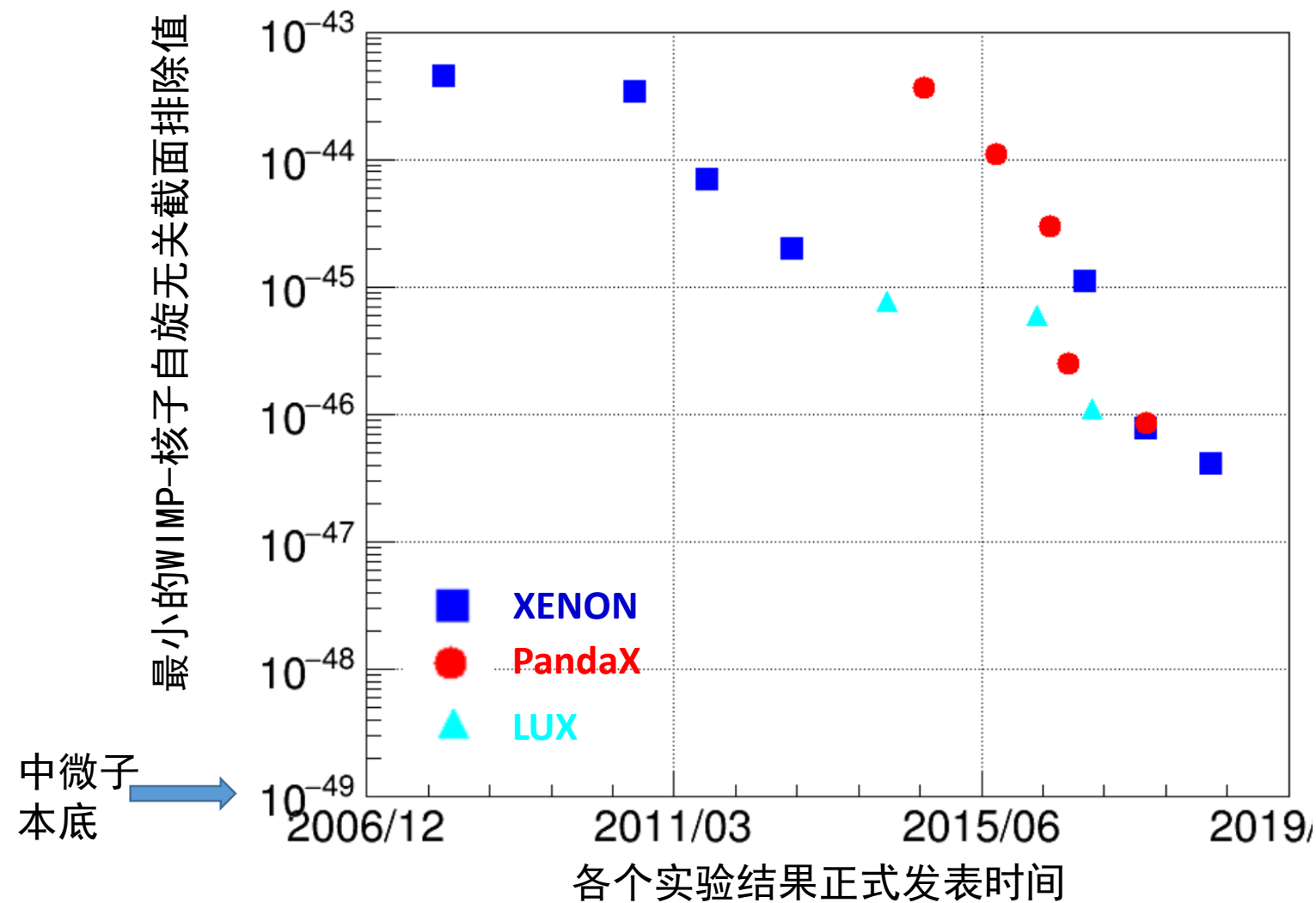
电子反冲本底
水平0.8 mDRU
(10^{-3} evts/kg/day/
keV)

PandaX对WIMP-核子散射截面的上限



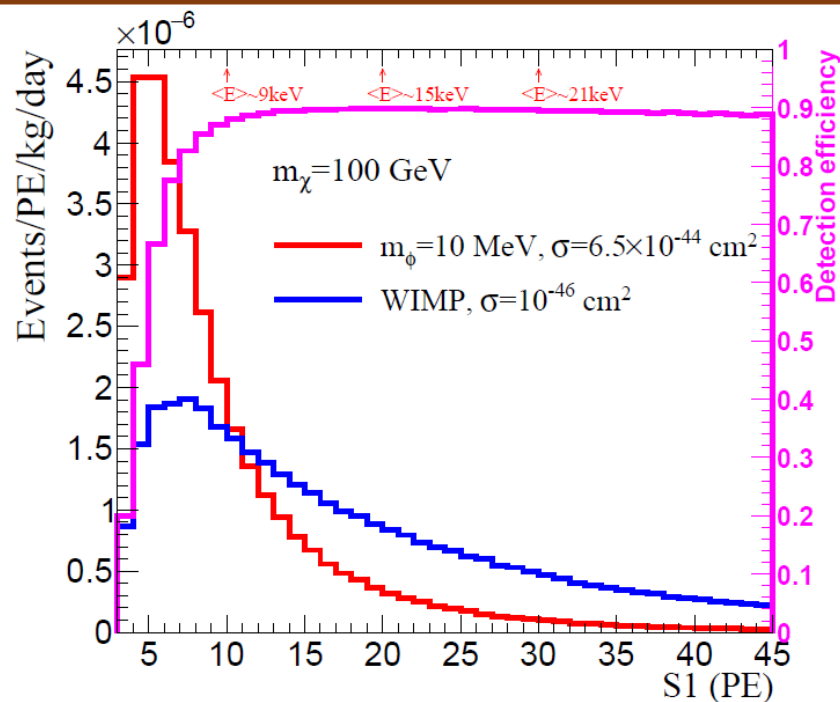
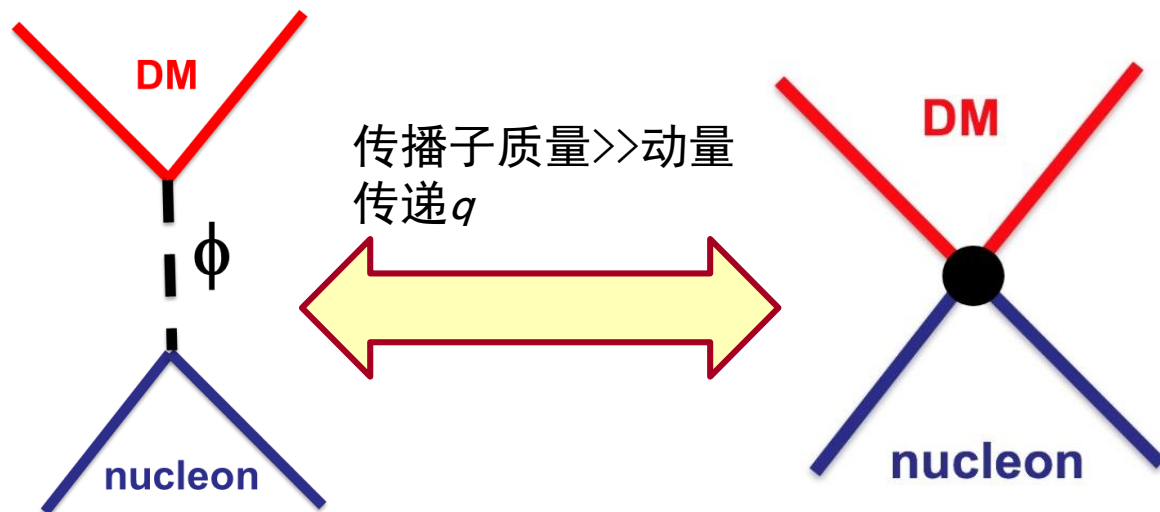
- 最低排除到 $8.6 \times 10^{-47} \text{cm}^2$ @40 GeV, 2017年结果发表时在WIMP质量大于100GeV 区间世界领先
- 同2016年发表的结果相比, 提升2.5倍

两相氙暗物质实验的激烈国际竞争



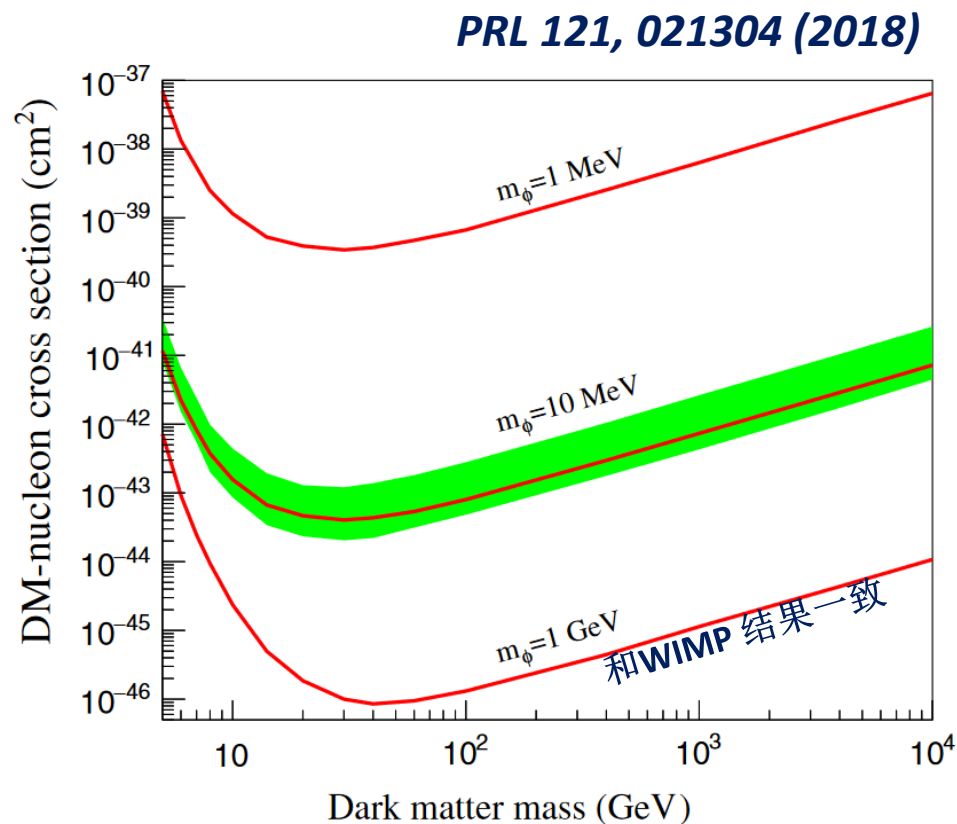
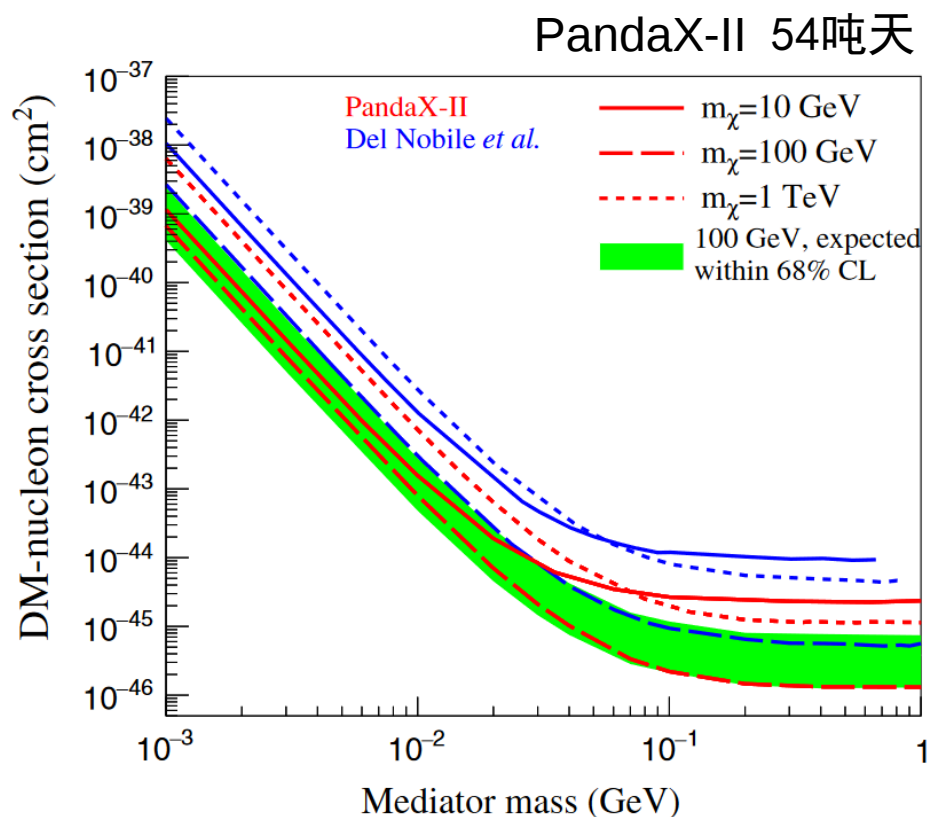
- 各个实验组你追我赶，竞争非常激烈
- PandaX实验经过近10年，两代探测器的发展，在液氙探测领域取得了一席之地
- 下面汇报PandaX在物理分析上的两个最新的拓展
- 然后再介绍PandaX未来计划

最新结果一：轻传播子暗物质



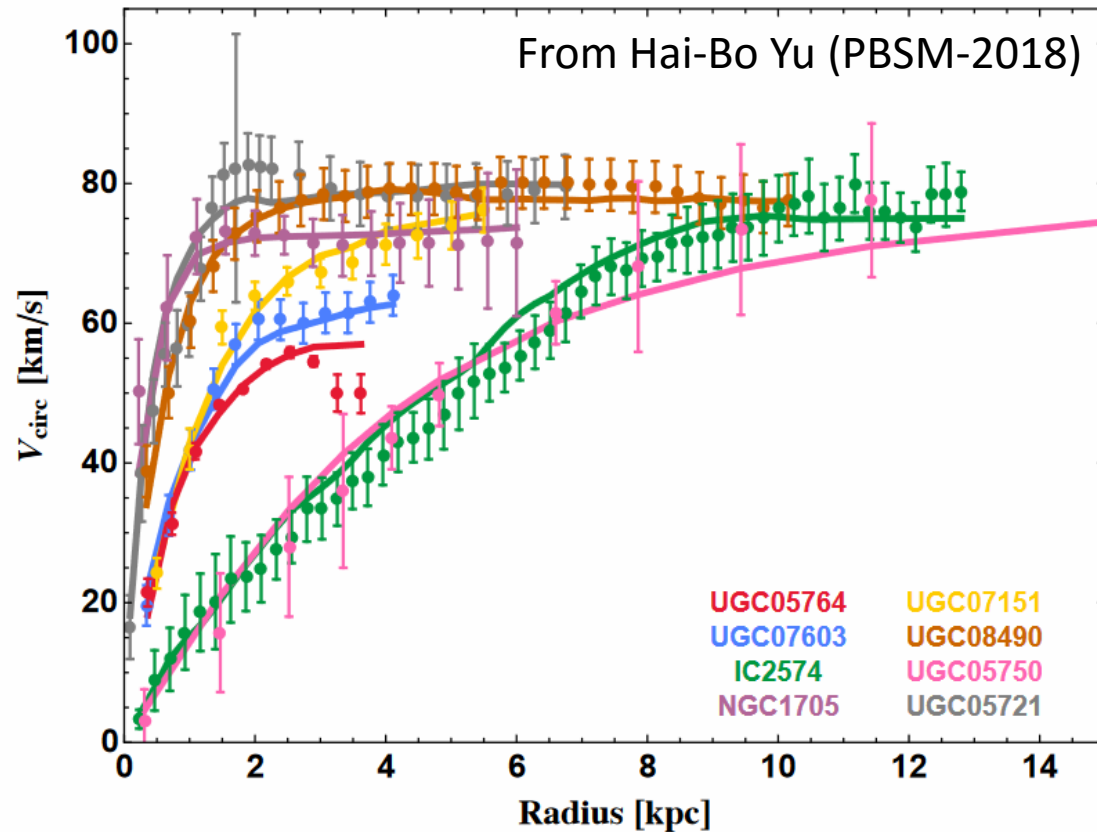
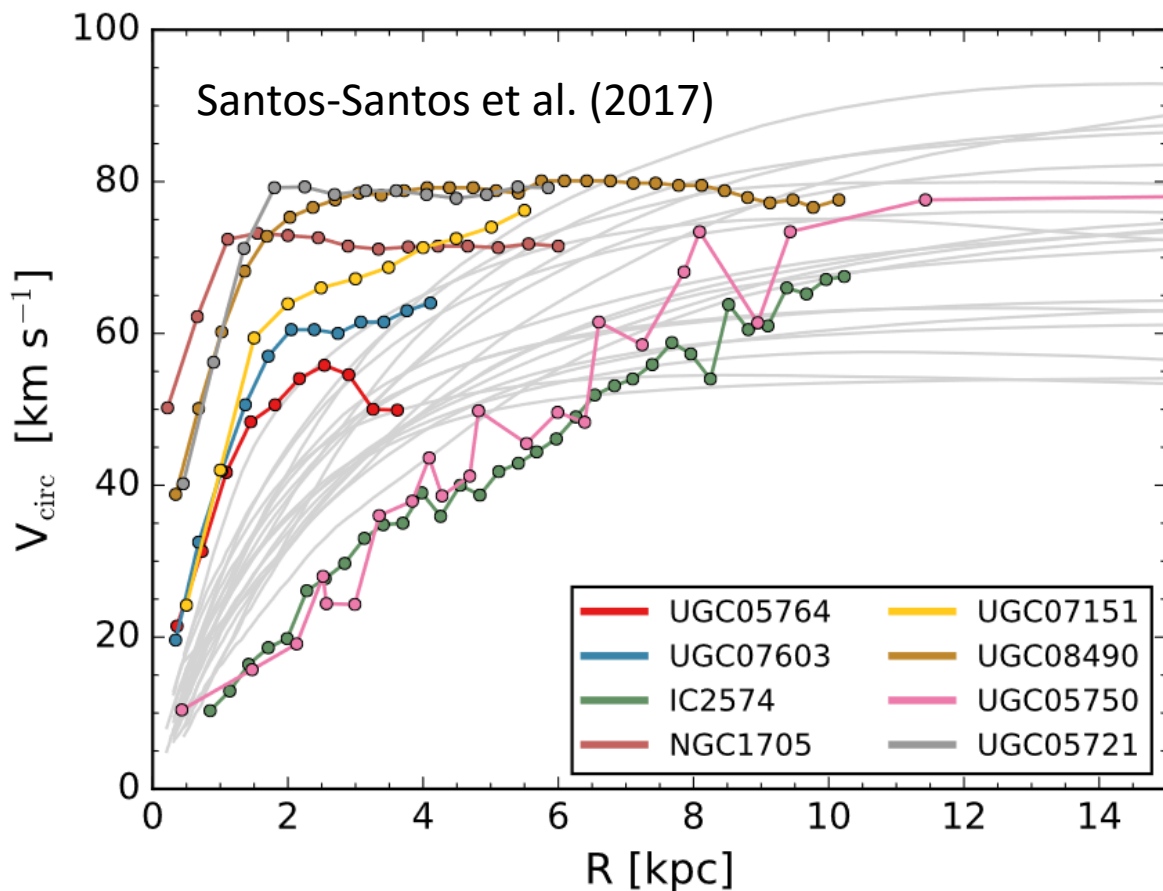
- 直接探测实验中，暗物质反冲过程典型的动量传递约10–50 MeV
- 因此，传统WIMP暗物质模型假设重传播子（有效场相互作用）
- 但是，当传播子质量很小的时候0(10) MeV，有效场作用并不能适用
 - 轻传播子造成的核反冲能谱也和WIMP有很大区别

轻传播子下，PanaX对暗物质-核子截面的限制



- 考虑标量/矢量传播子，和WIMP自旋无关的结果可直接比较
- 国际上首次由直接探测合作组给出的轻传播子暗物质的结果
- 2018年7月PRL编辑推荐发表

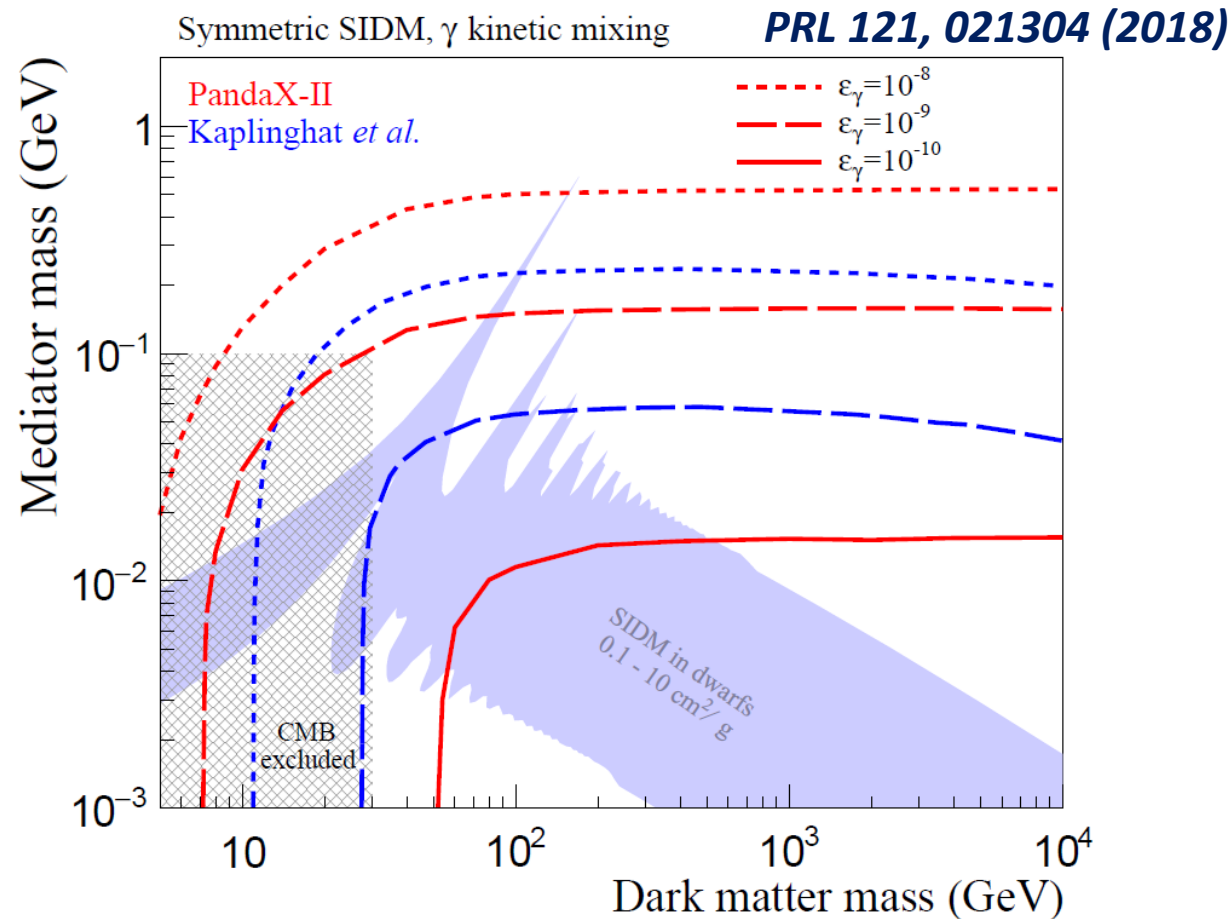
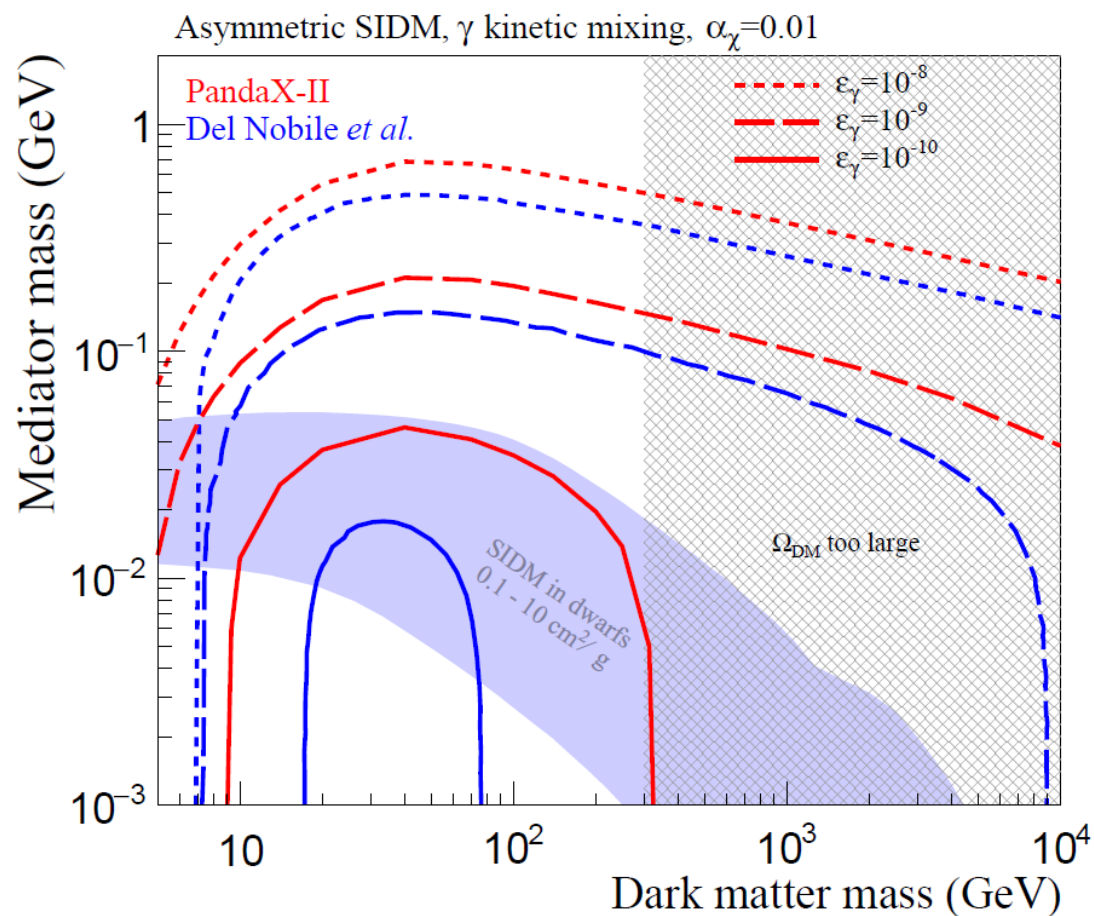
自相互作用暗物质：“小尺度危机”的解决方案



- 冷暗物质模拟（灰色曲线）不能解释观测的星系旋转曲线（数据点）
- 冷暗物质模型的“小尺度危机”之一

- “小尺度危机”的一个解决方案就是假设暗物质有相互作用

PandaX对自相互作用暗物质的最新限制

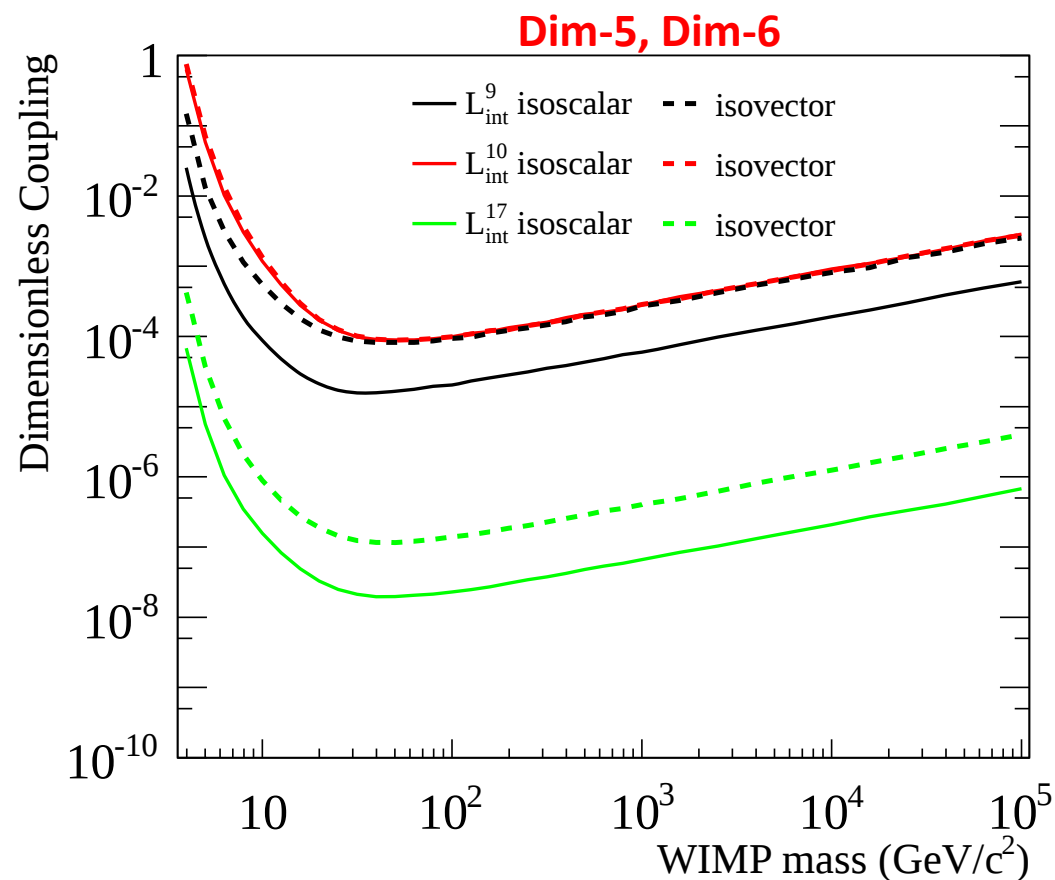
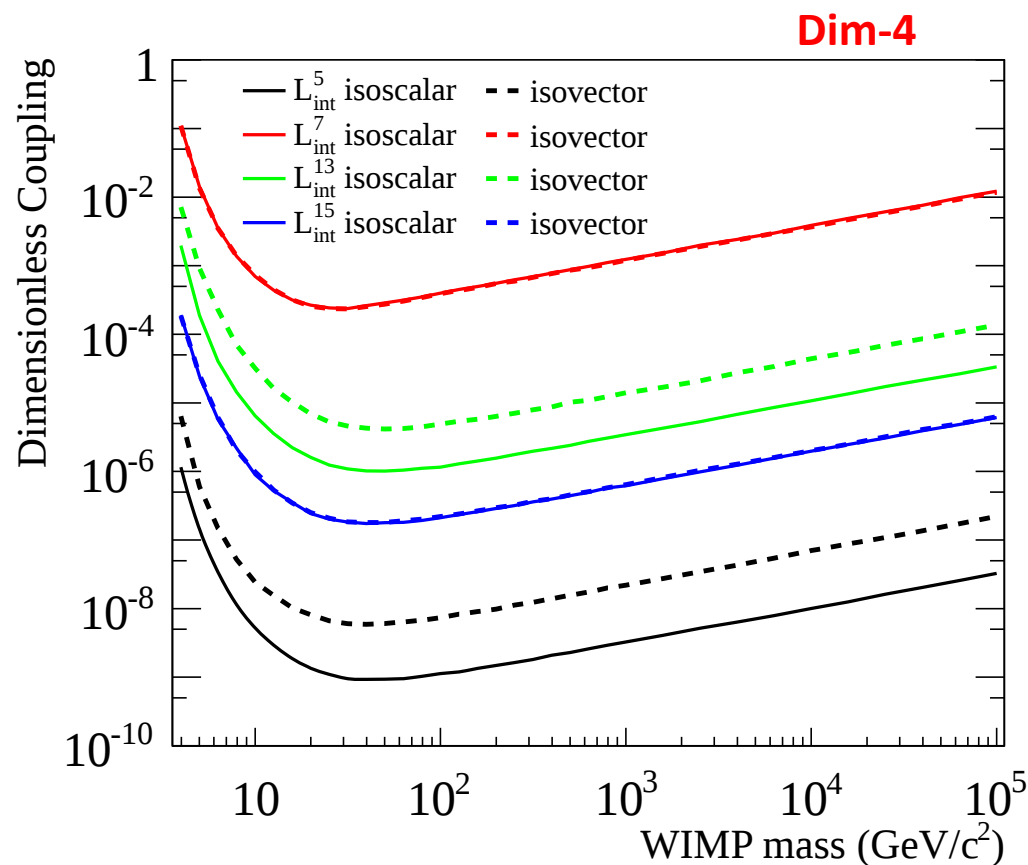


- 天文观测对自相互作用暗物质模型下的质量区间做出了很强的限制（阴影部分）
- 在天文观测偏好的区间内，PandaX-II数据对混合参数的限制达到 10^{-10} 量级
- 是迄今为止最强烈的实验限制

最新结果二：有效场论的暗物质模型

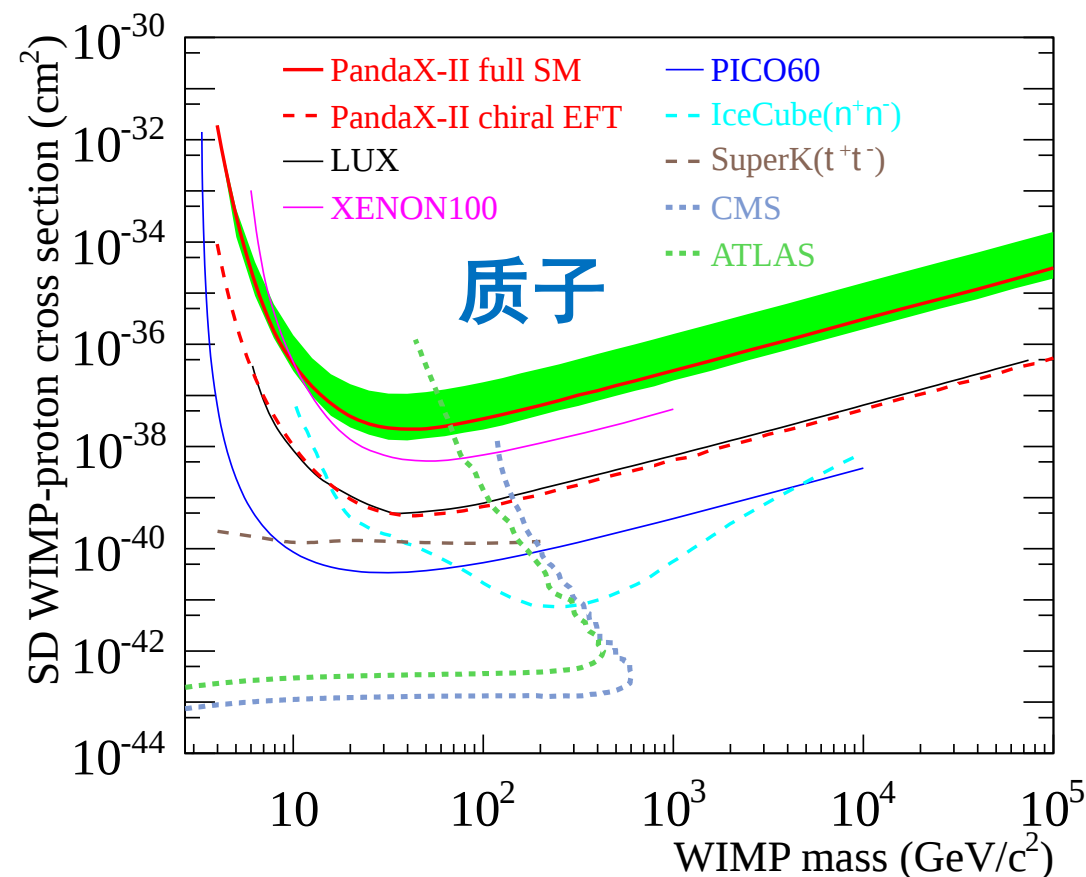
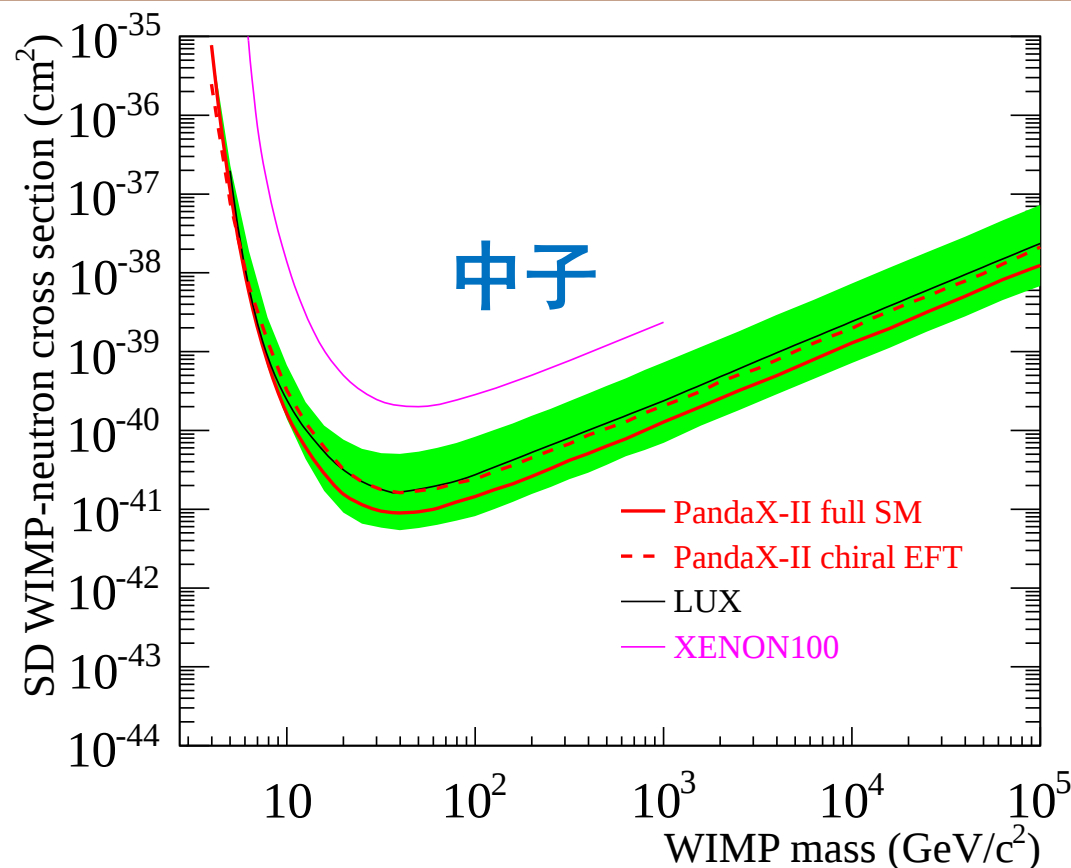
维数	有效场算符	描述的相互作用
4	$\begin{aligned}\mathcal{L}_{\text{int}}^5 &\equiv \bar{\chi}\gamma^\mu\chi\bar{N}\gamma_\mu N \\ \mathcal{L}_{\text{int}}^7 &\equiv \bar{\chi}\gamma^\mu\chi\bar{N}\gamma_\mu\gamma^5 N \\ \mathcal{L}_{\text{int}}^{13} &\equiv \bar{\chi}\gamma^\mu\gamma^5\chi\bar{N}\gamma_\mu N \\ \mathcal{L}_{\text{int}}^{15} &\equiv \bar{\chi}\gamma^\mu\gamma^5\chi\bar{N}\gamma_\mu\gamma^5 N\end{aligned}$	矢量/赝矢量流耦合 (L5/15: 标准自旋无关/相关)
5	$\begin{aligned}\mathcal{L}_{\text{int}}^9 &\equiv \bar{\chi}i\sigma^{\mu\nu}\frac{q_\nu}{m_M}\chi\bar{N}\gamma_\mu N \\ \mathcal{L}_{\text{int}}^{17} &\equiv i\bar{\chi}i\sigma^{\mu\nu}\frac{q_\nu}{m_M}\gamma^5\chi\bar{N}\gamma_\mu N\end{aligned}$	WIMP磁矩或电偶极矩和核子的矢量流耦合
6	$\mathcal{L}_{\text{int}}^{10} \equiv \bar{\chi}i\sigma^{\mu\nu}\frac{q_\nu}{m_M}\chi\bar{N}i\sigma_{\mu\alpha}\frac{q^\alpha}{m_M}N$	WIMP和核子的磁矩耦合 <i>Phys. Rev. C89, 065501 (2014)</i>

- 研究了7个典型的相对论的有效场论相互作用模型
- PandaX-II数据可以对每个模型的耦合系数做出限制



- 对每个相互作用模型，分别考虑了暗物质和质子，中子的耦合系数是否同号
- 耦合系数的限制强烈依赖于相互作用模型
- 对传统的WIMP自旋无关模型的又一重要的系统性的拓展

自旋相关的WIMP-核子截面的限制



- 分别考虑了两个“核矩阵元”理论计算：
 - Full basis shell-model GCN5082, J. Mendende et al., Nucl. Phys. A818, 139 (2009)
 - Chiral EFT matrix element, P. Klos, Phys. Rev. D 88, 083516 (2013)
- 在质量高于40GeV的区间，得到了最强烈的WIMP-中子截面的限制

PandaX 未来计划

- PandaX-xT 暗物质实验
- PandaX-III 无中微子双贝塔实验

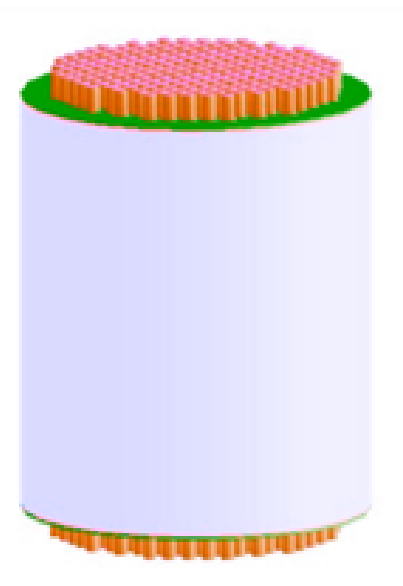


PandaX-I: 120 kg DM
experiment
2009-2014

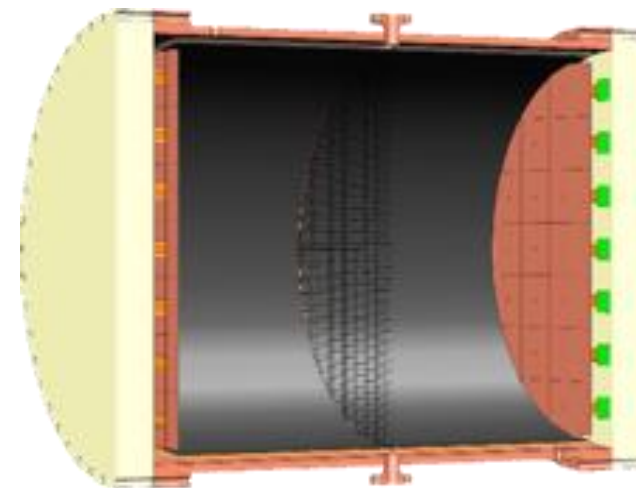


PandaX-II: 500 kg DM
experiment
2014-2018

锦屏-I期实验室



PandaX-xT: multi-ton
(~4-T) DM experiment
Future

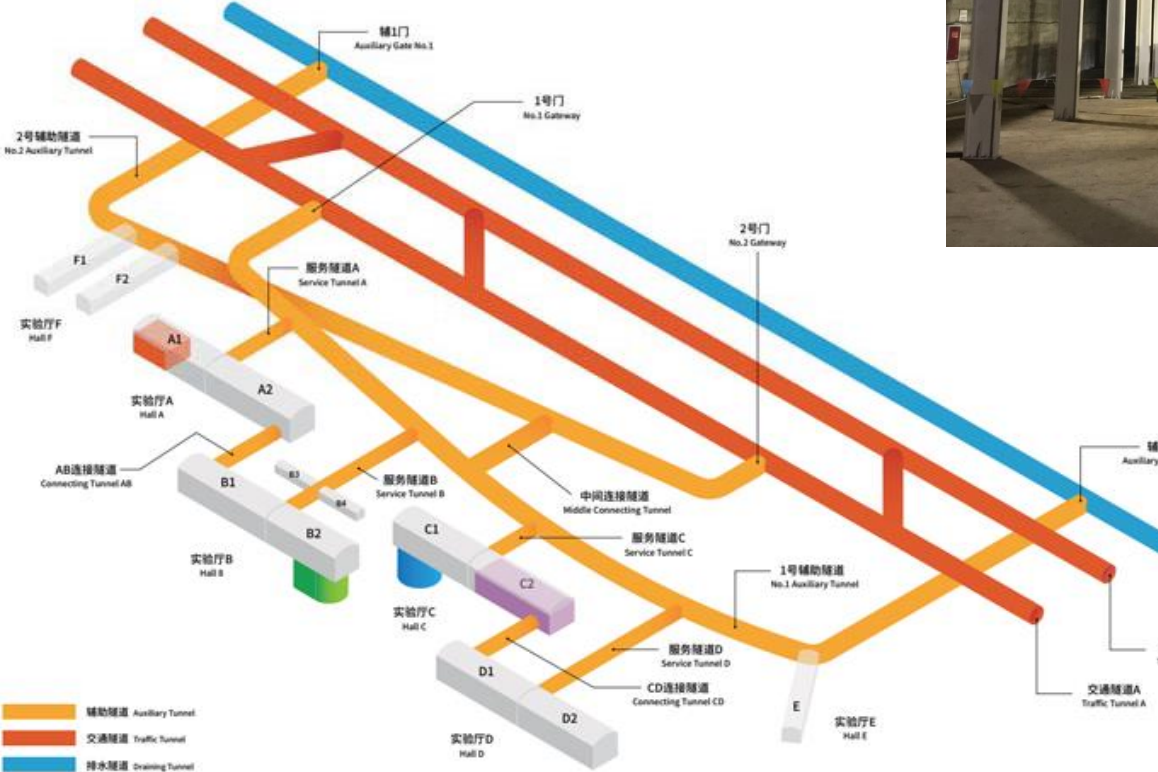


PandaX-III: 200 kg to 1 ton HP
gas ^{136}Xe 0vDBD experiment
Future

锦屏-II期

B2基础设施建设进展

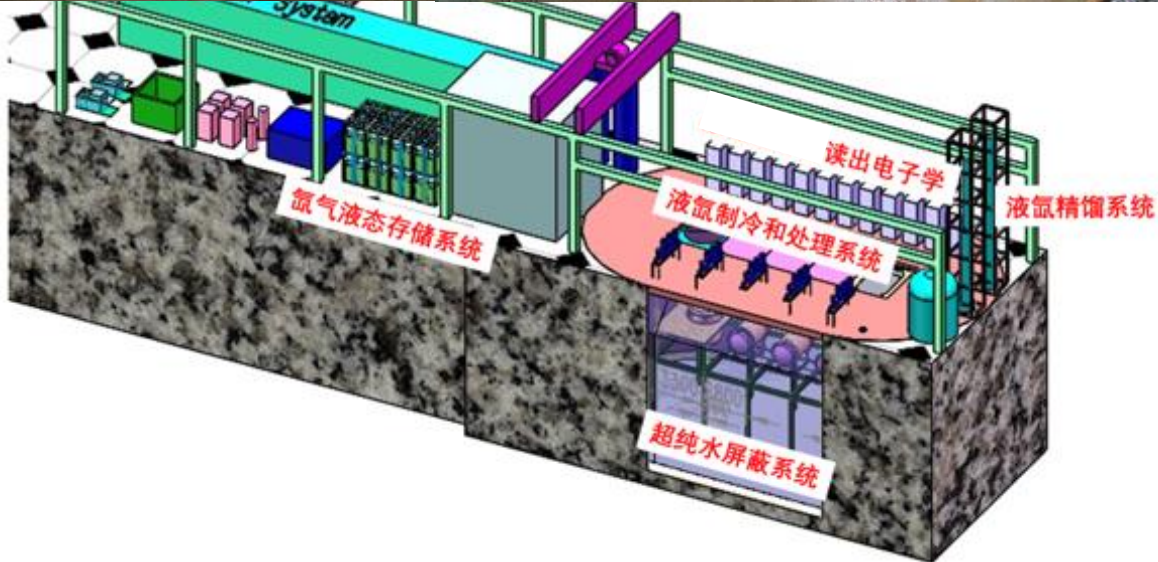
- B2: 约900平米面积
- 液氦气氦共享
- 大型水屏蔽基坑已经开挖完毕



实验钢平台建设



超纯水不锈钢罐体建设



PandaX-4吨探测仪子系统

三、探测仪信号收集单元

前端电子学系统（科大，上交，上理）

触发和数据获取系统（上交，南开）

二、探测仪运行环境单元

气体存储与处理系统（上交，北大）

低温系统（上交）

探测器高纯罐体（上交）

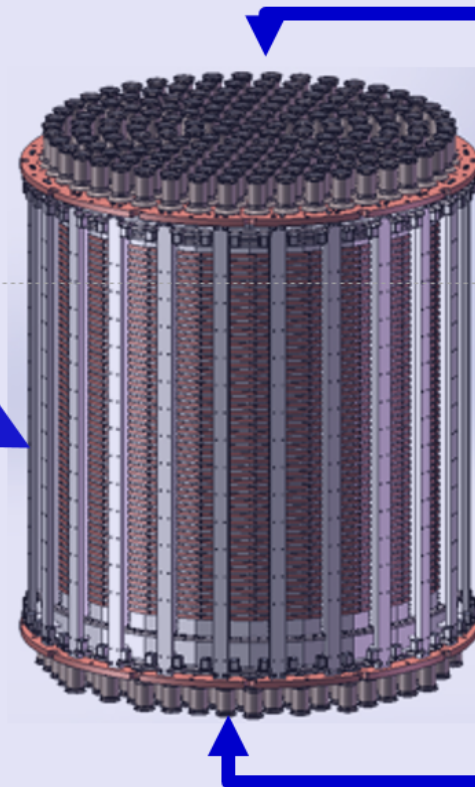
一、探测仪中心单元

光电探测系统（山大）

368主+
144反符合
光电管

时间投影室和高压系统（上交）

高1.2米
直径1.2米



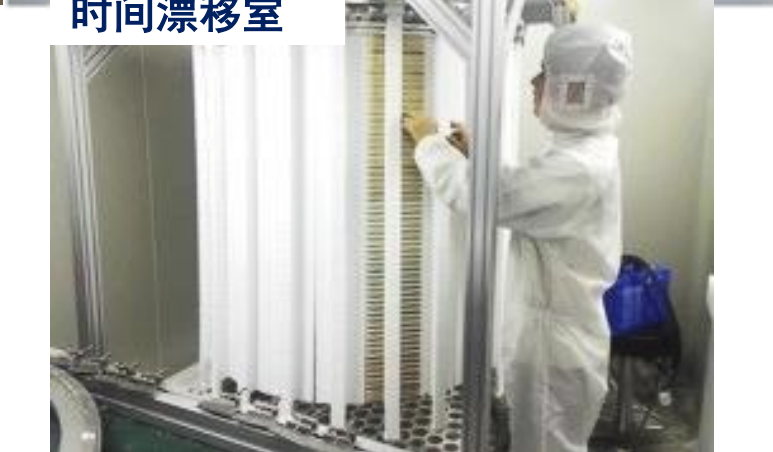
PandaX-4T子系统研发状态



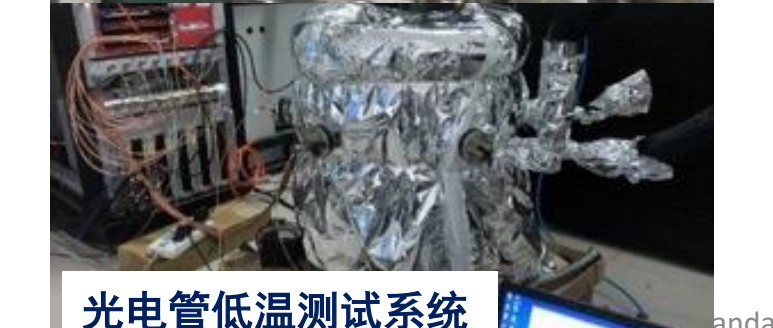
低本底不锈钢罐



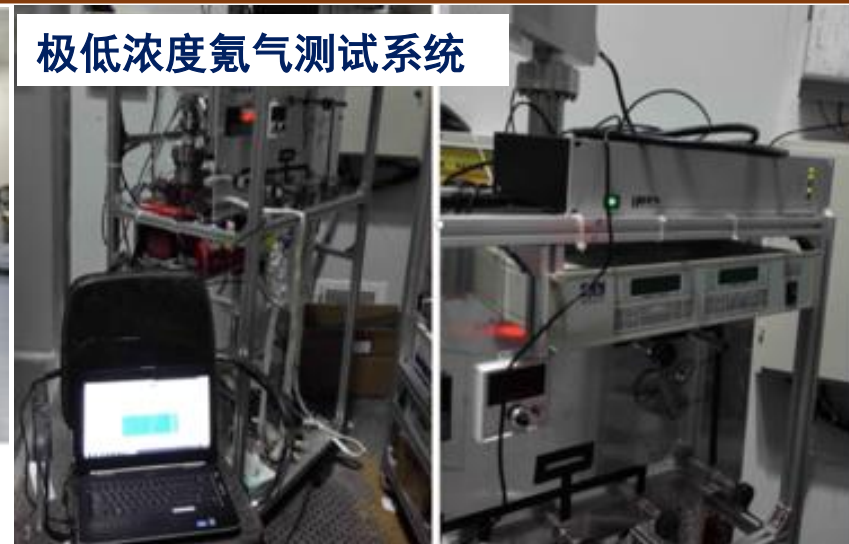
制冷系统



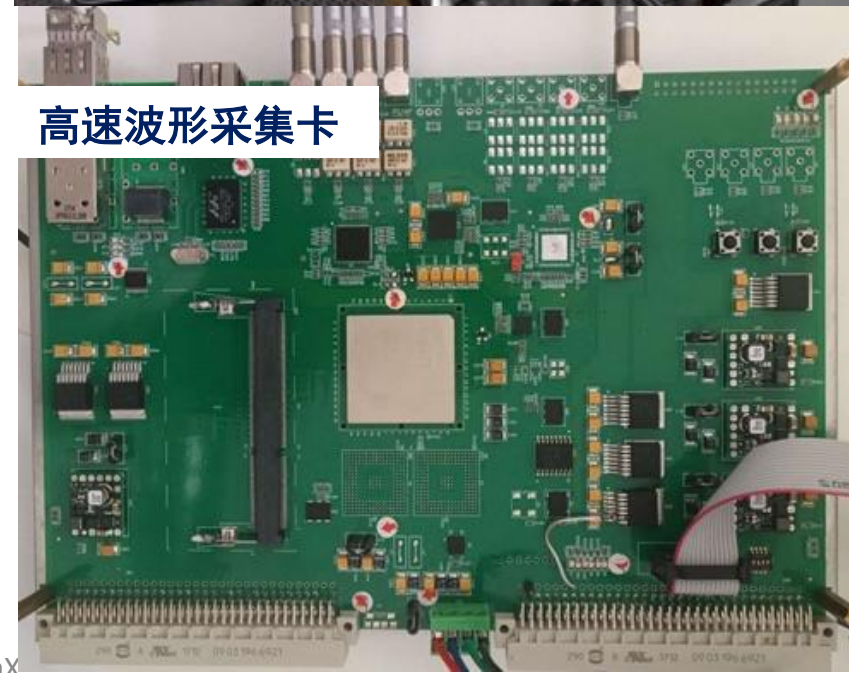
时间漂移室



光电管低温测试系统



极低浓度氮气测试系统

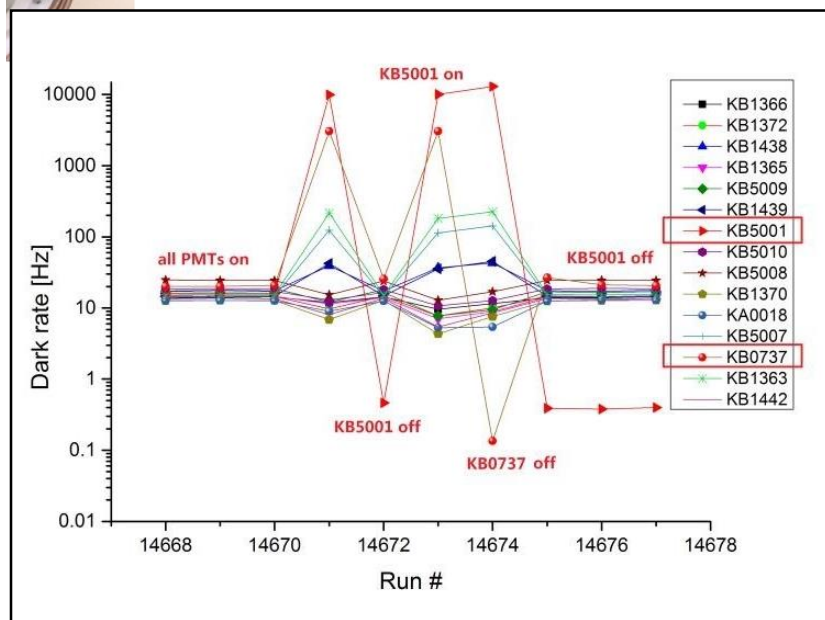
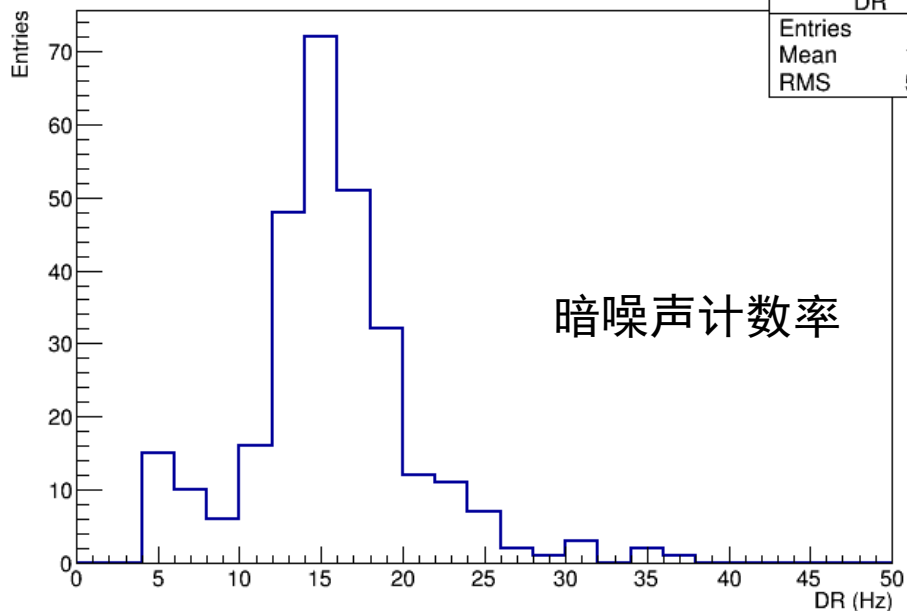
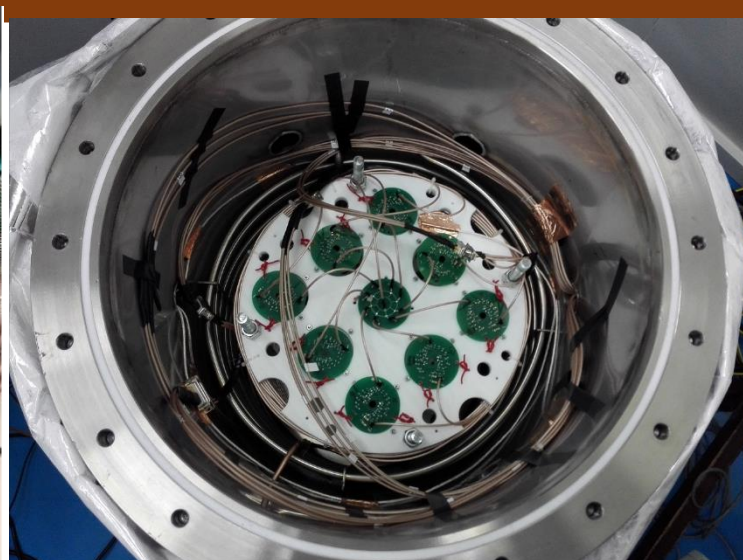


高速波形采集卡

光电倍增管测试 (山大+交大)

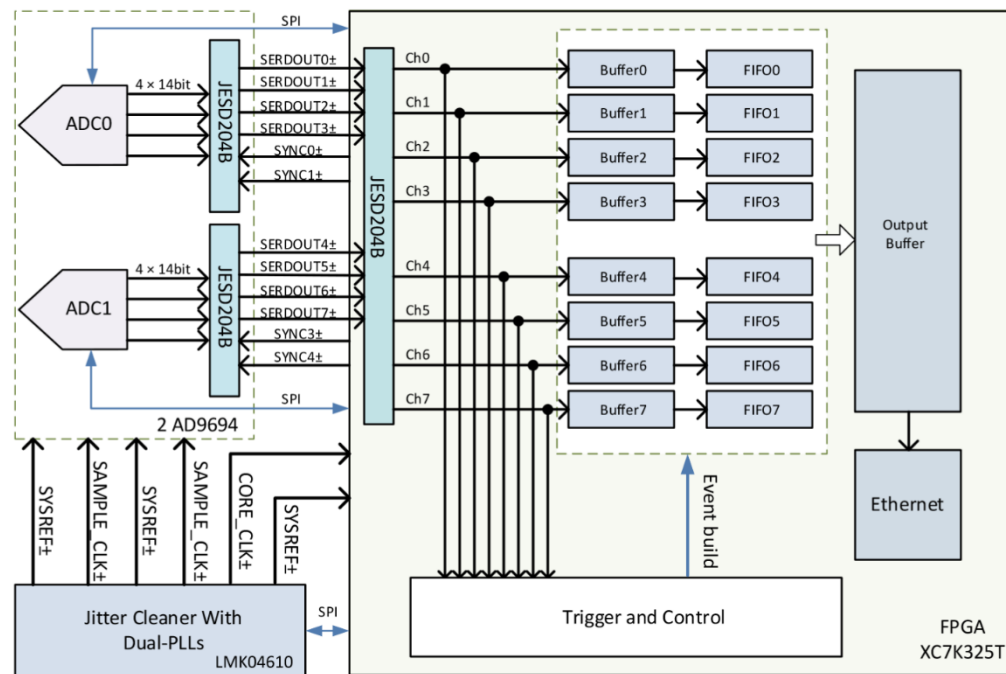
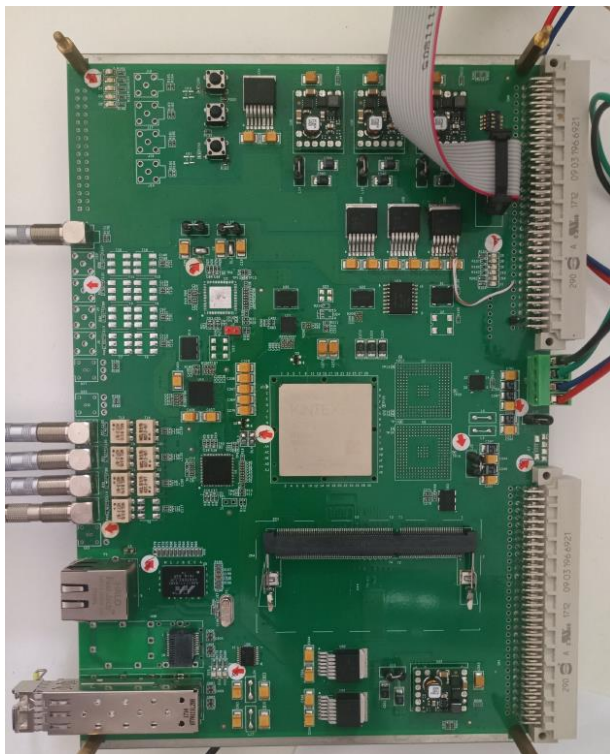
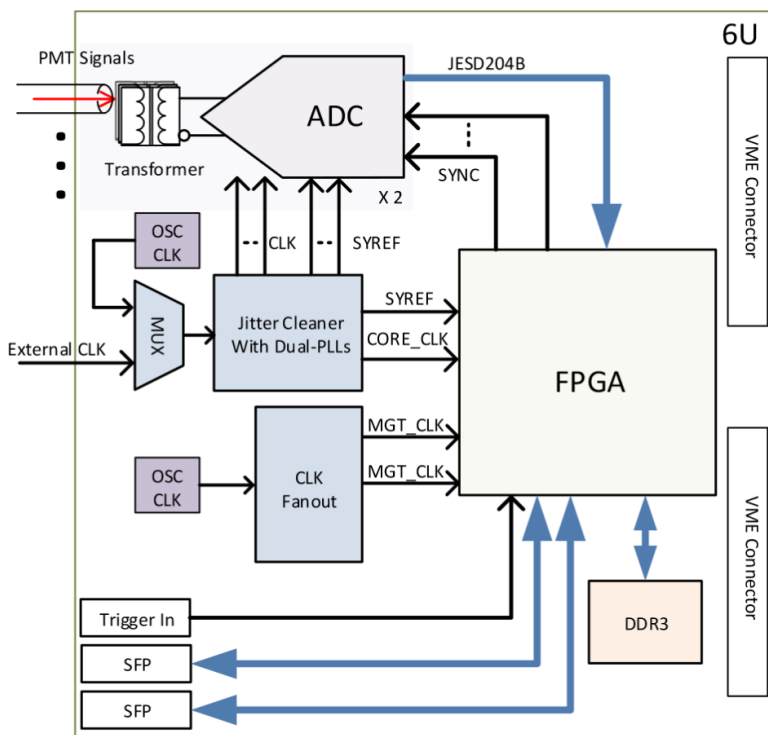
袁鞠敏, CHEP18报告

3-inch R11410-23



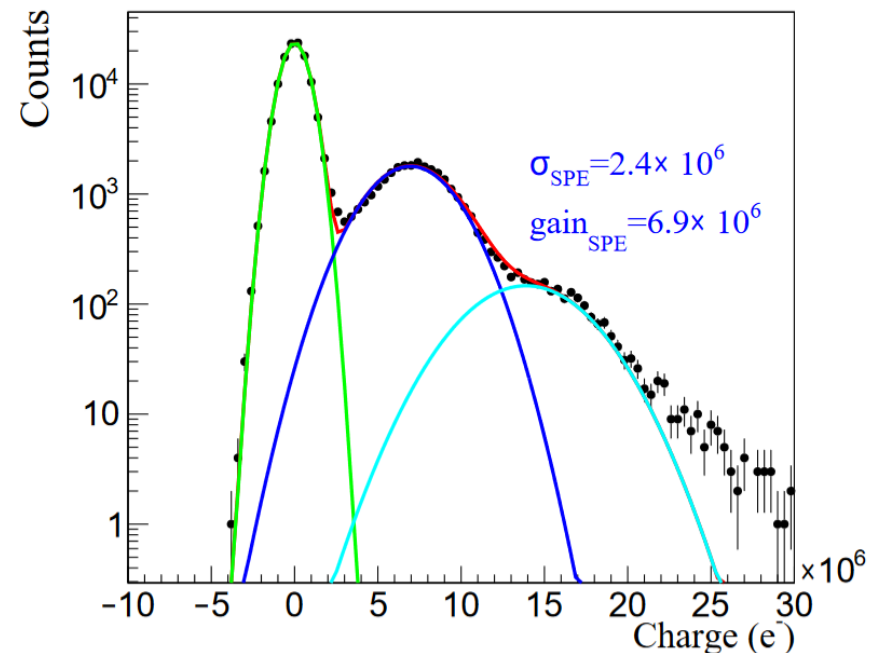
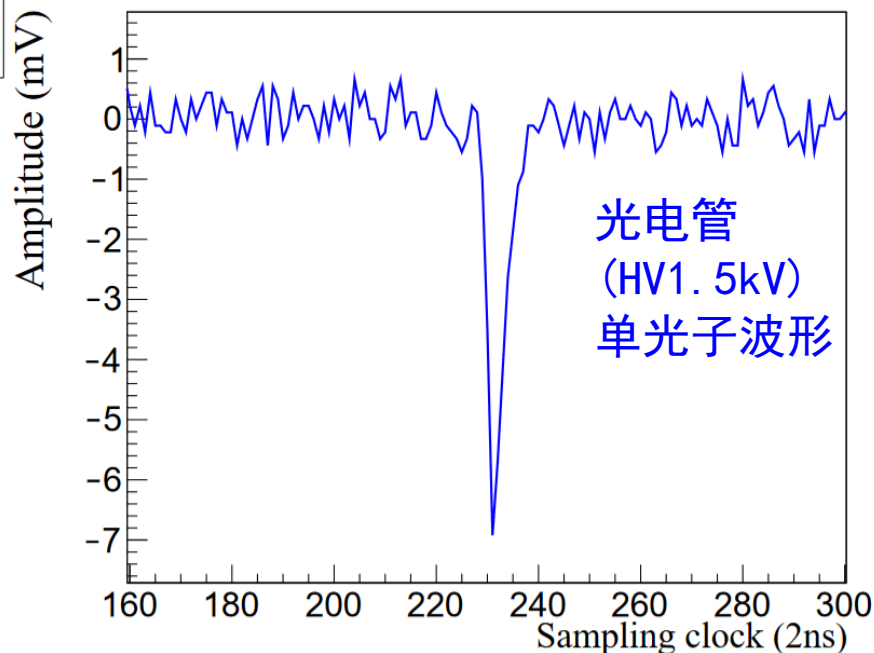
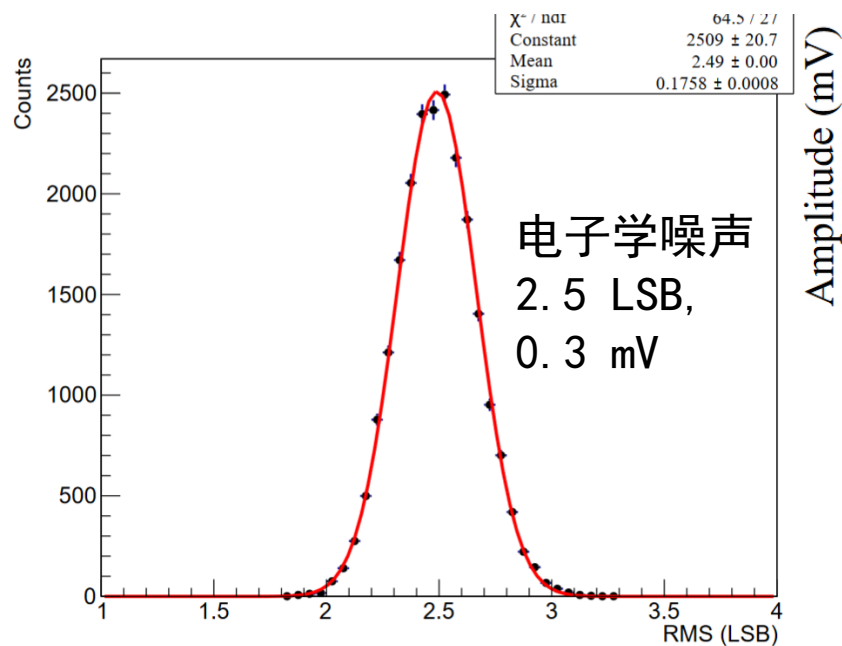
- 13支/300支 (5%) 有发光问题, 返回滨松
- 低于XENON-1T 报告的53/248 (R11410-20)

高速ADC+FPGA波形采样插件（交大上理科大）



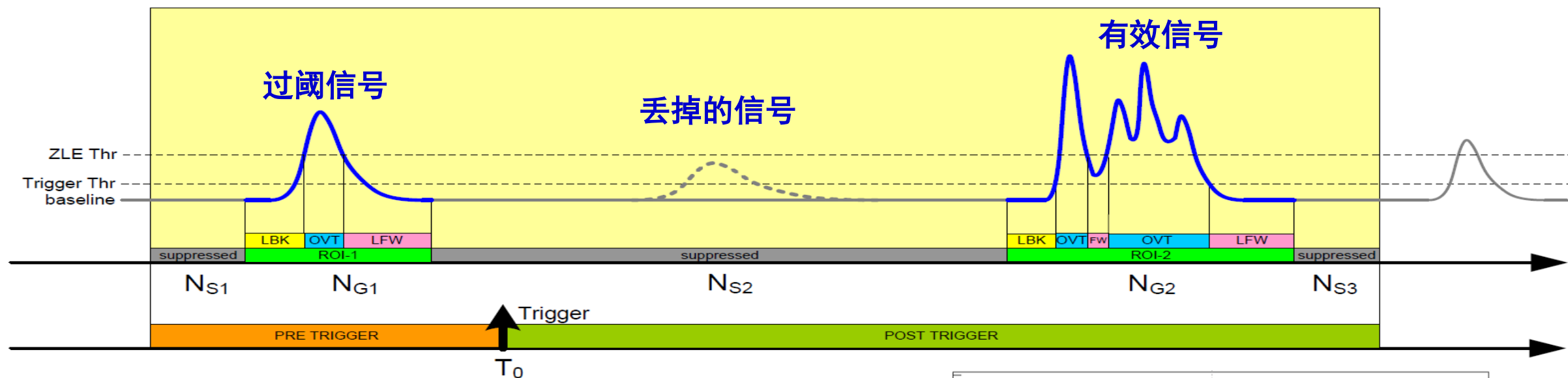
- 目前为止，PandaX暗物质实验采用的都是进口的商业化插件（14-bit, 100–250MS/s）
- 上交上理以及科大联合研发了一款8通道，14-bit，500MS/s 采样率的波形采样插件
- 科大同步推进测试一款国产ADC（1G/s）芯片

500MS/s 采样模块的研发进展

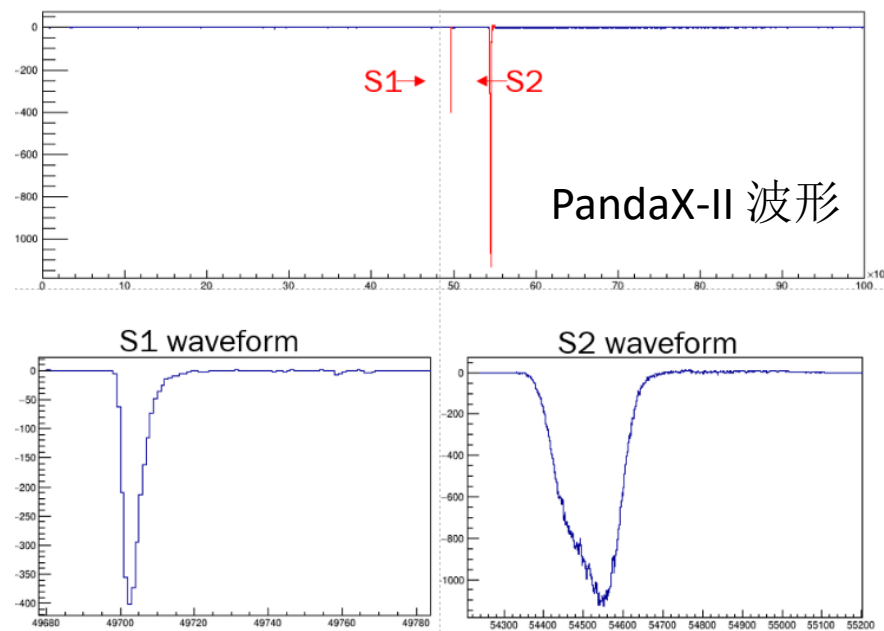


- 第一版硬件和固件设计和调试完成
- 成功采集和重建了光电倍增管的单光子信号（实验的最小信号）
- 未来重点是改版的基础上规模化和工程化测试

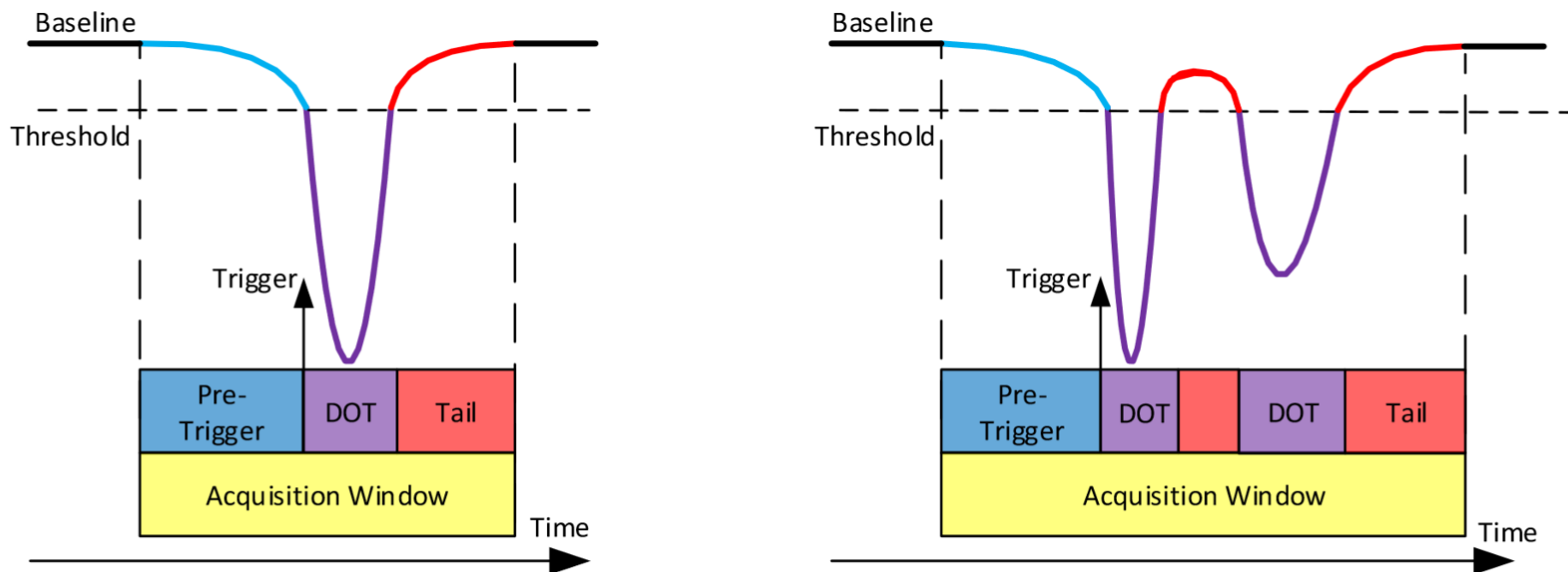
PandaX-4T 触发方式一：外部触发+零压缩



- 一个事件的长度由电子的漂移时间决定，在 PandaX-4T 中可达 0.7ms，但有效的 S1 和 S2 信号长度一般不超过 10 μ s
- 必须对对波形进行零压缩
- PandaX-I&II 实验的数据采集方式

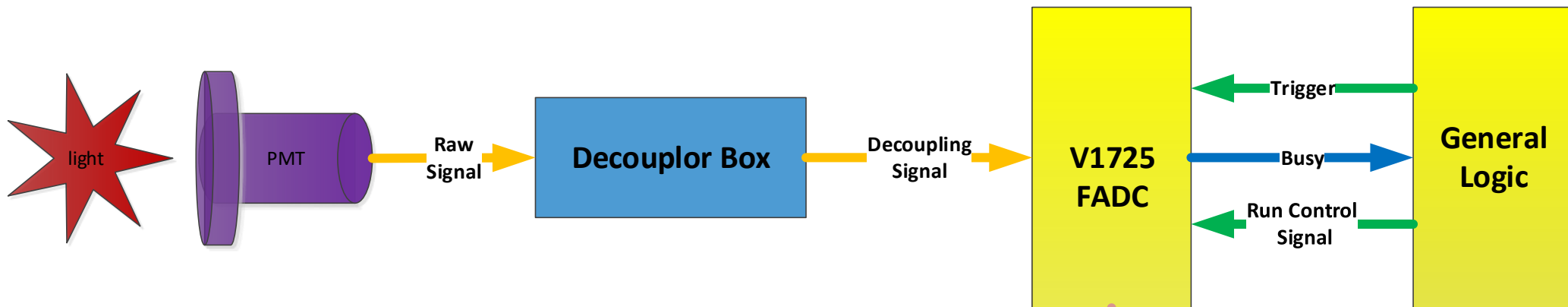


PandaX-4T 触发方式二：波形自触发

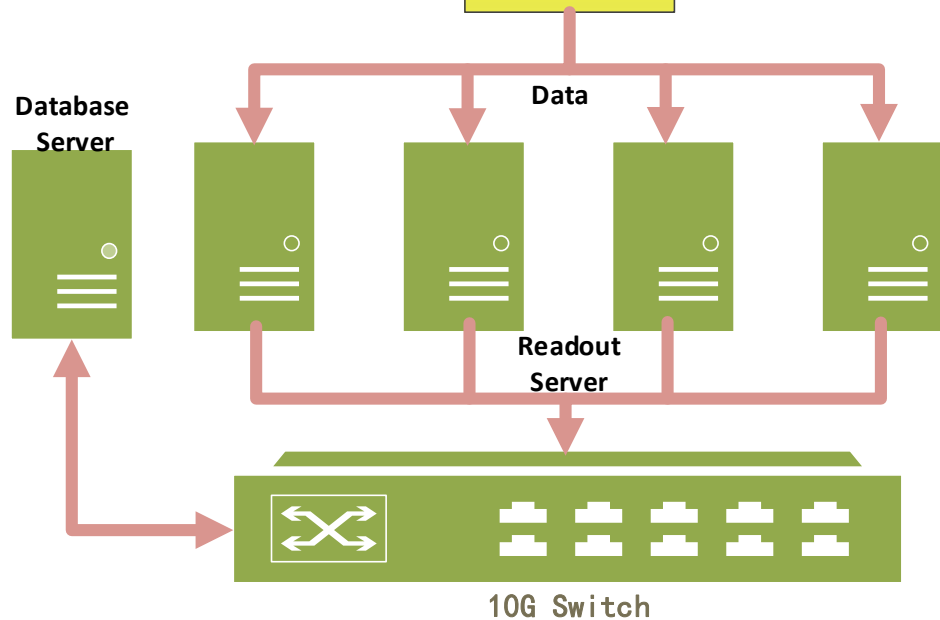


- 每个通道独立判断波形是否超过触发阈值(单光子触发), 独立采集波形。不依赖于外部触发, 阈值最低
- 有助于提升低质量暗物质, 轻传播子等暗物质模型探测灵敏度
- PandaX-4T 首选的数据采集方式

基于商业ADC搭建的PandaX-4T电子学系统



- 多模块，多服务器，多光纤并行读出。
 - PandaX-II采用多模块单服务器单光纤读出
- 数据通过高速交换机汇总到MongoDB数据库
- 在线软件事件重建



基于网页的PandaX-4T DAQ控制系统

PandaX-xT DAQ Manager

Controller Main

Settings

Configs

DAQ Controller

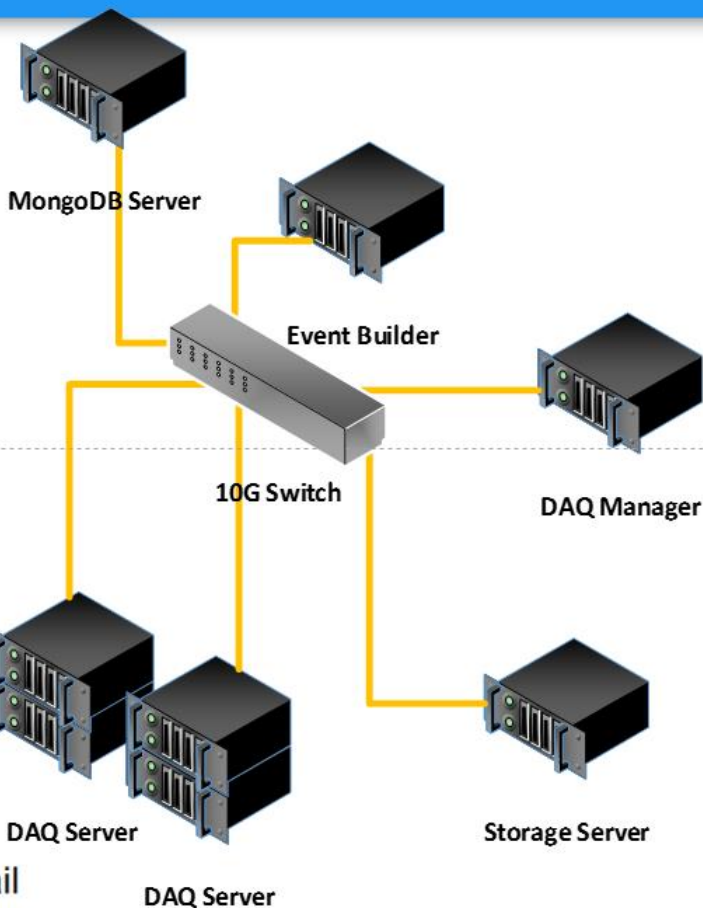
Status: DAQ_RUNNING

Updated On: 2018-06-20 21:47:35 GMT+0800

STATUS

STOP

r930 RUNNING 2018-06-20T21:47:44+08:00
r730-link1 RUNNING 2018-06-20T21:47:44+08:00
r730-link2 RUNNING 2018-06-20T21:47:44+08:00
r730-link3 RUNNING 2018-06-20T21:47:44+08:00
r730-bridge RUNNING 2018-06-20T21:47:44+08:00



Status Detail

R930

R730-LINK1

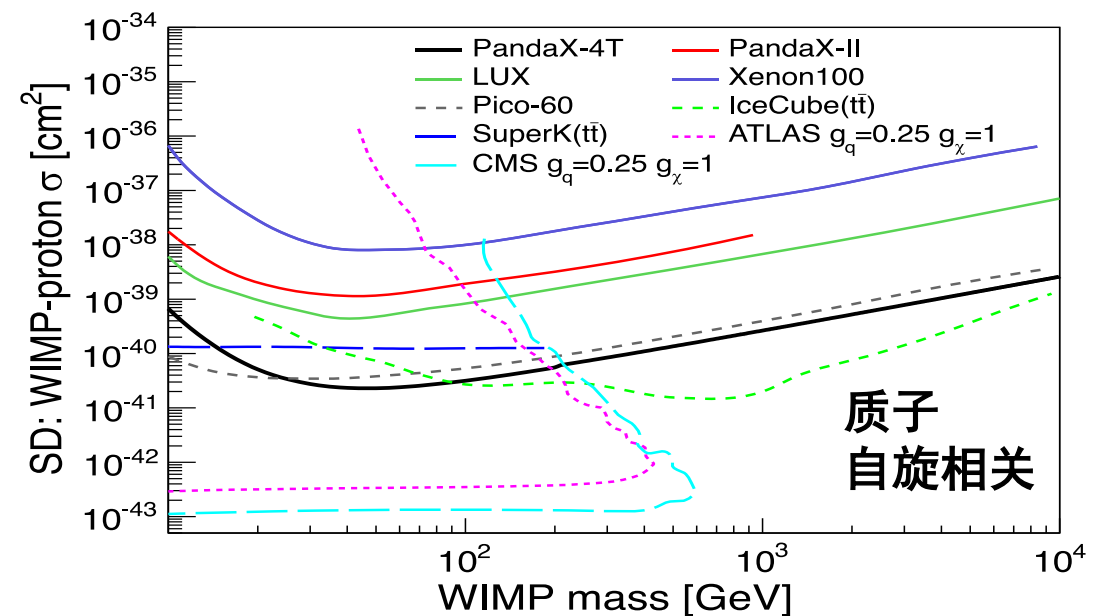
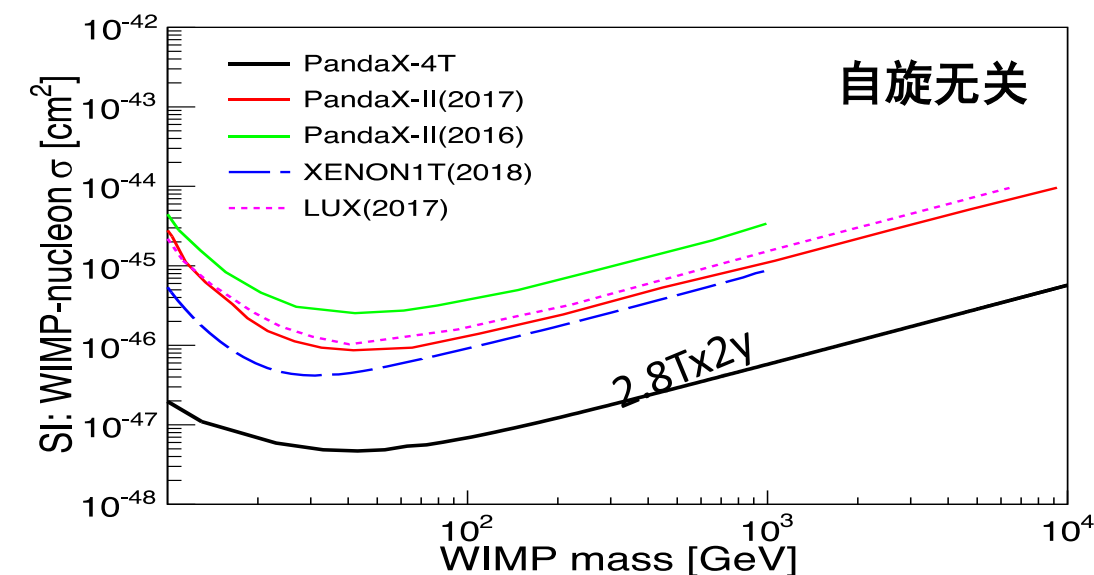
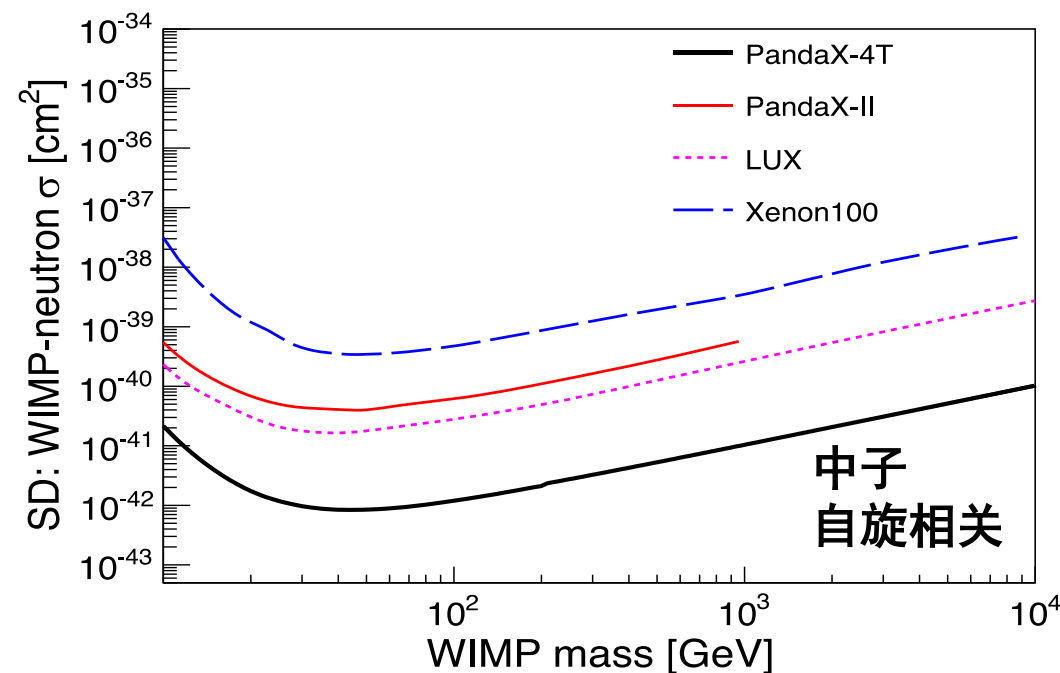
R730-LINK2

R730-LINK3

R730-BRIDGE

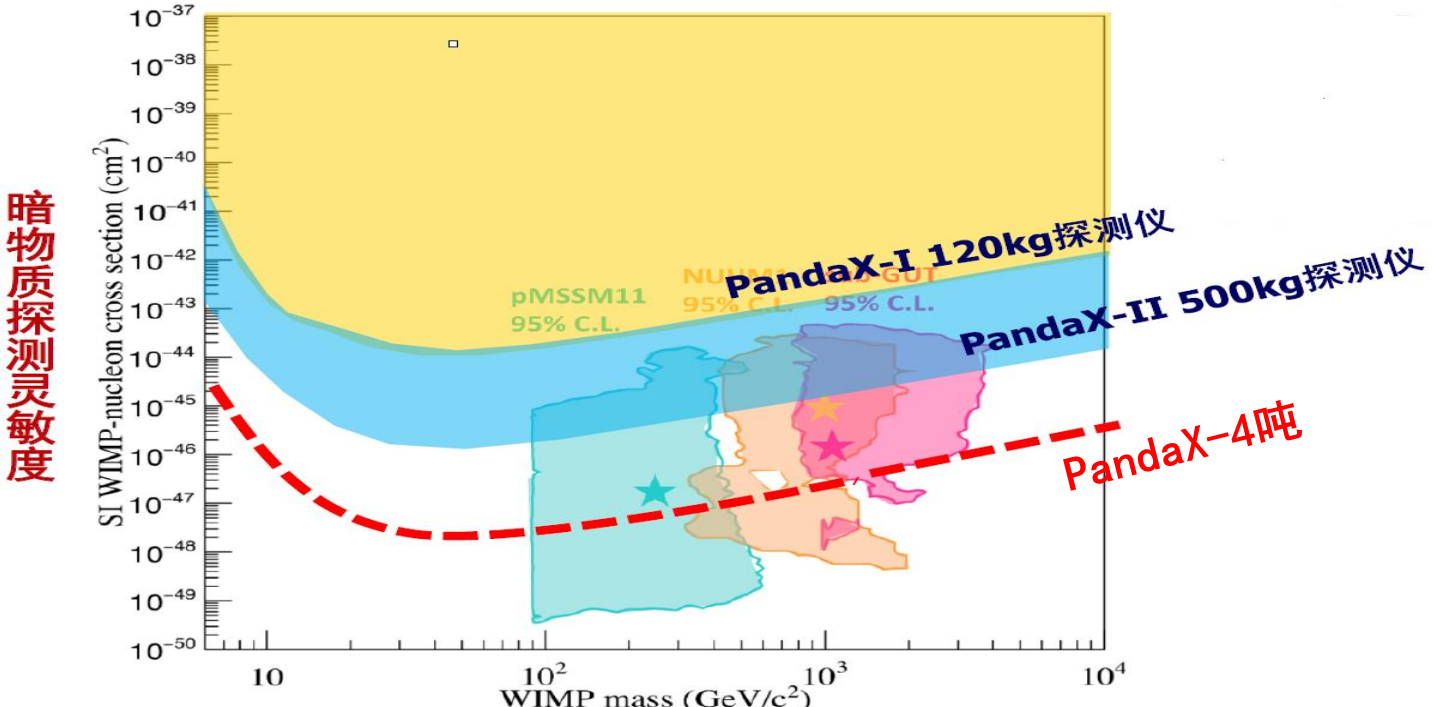
PandaX-4T 实验灵敏度的展望

- 和PandaX-II相比，PandaX-4T 运行两年，灵敏度可以提升一个数量级
- 自旋无关截面： 10^{-47}cm^2
- 中子自旋相关截面： 10^{-42}cm^2



n吨级液氙暗物质实验

实验项目	地点	状态	灵敏靶质量(吨)	曝光量（吨年）	灵敏度 (cm ⁻²)
LZ	美国	建设中，预计2020-2021开始	7	5.6吨x3年	1.6x10 ⁻⁴⁸
XENON-nT	意大利	建设中，预计2020-2021开始	6	4吨x5年	4.1x10 ⁻⁴⁷
PandaX-4T	中国	建设中，预计2019-2010开始	4	2.8吨x2年	6.0x10 ⁻⁴⁸

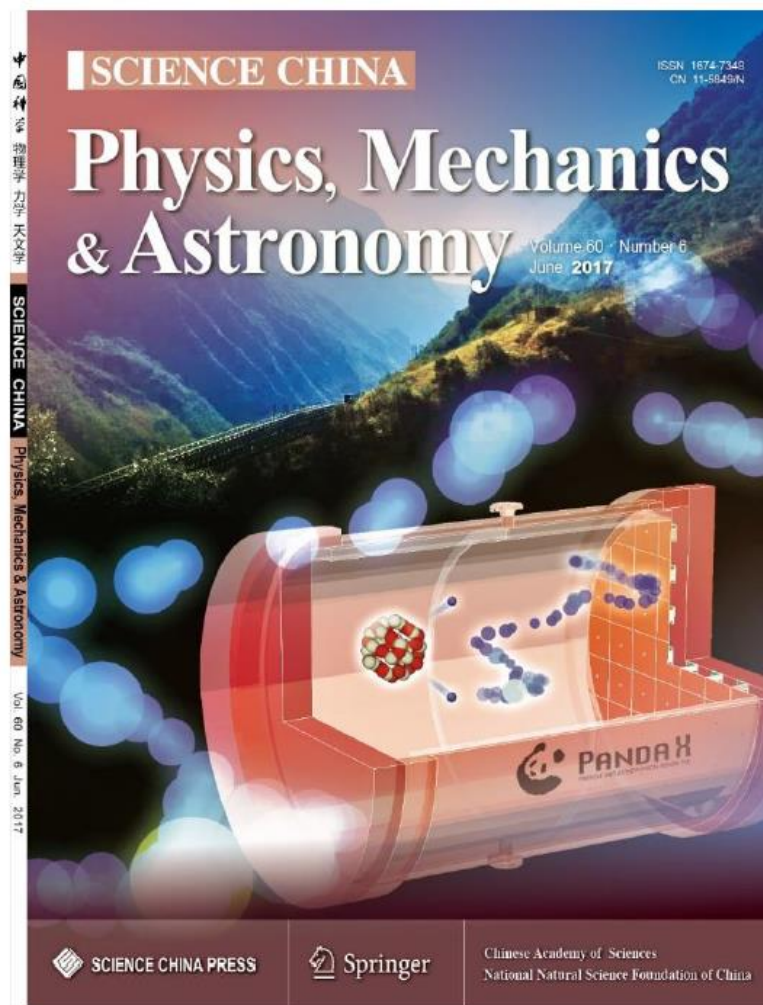
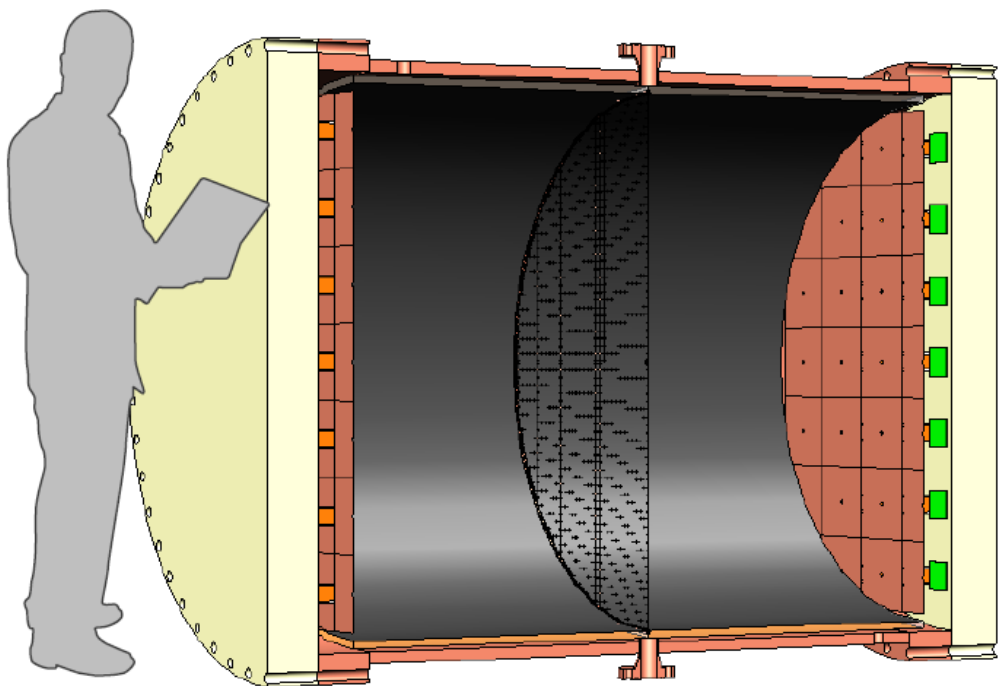


暗物质粒子质量 (GeV~质子质量)

- 暗物质探测逐渐进入理论预测的核心区域
- 国际竞争非常激烈
- PandaX-4T需大力支持

PandaX-III: 无中微子双贝塔衰变

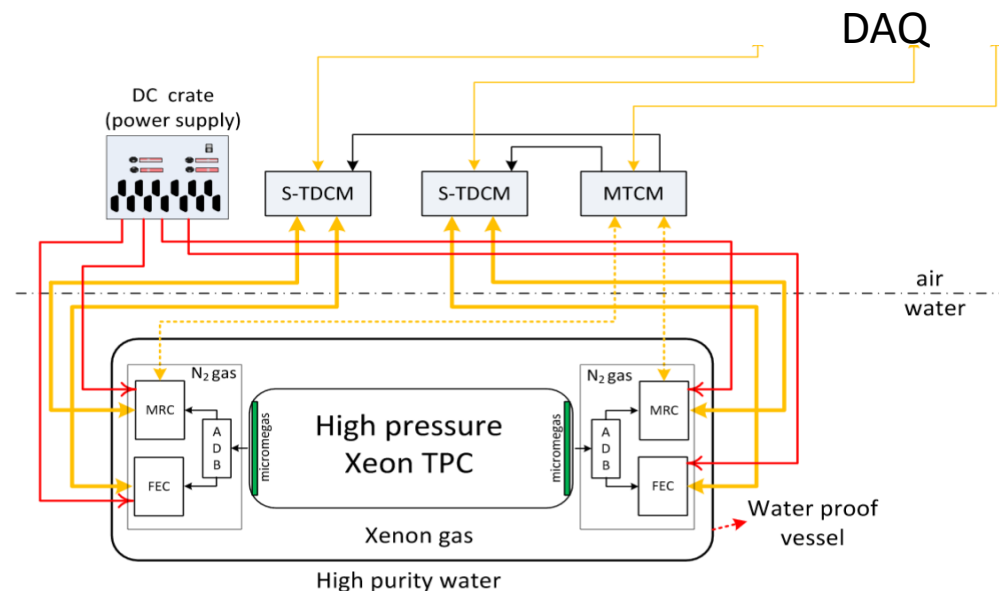
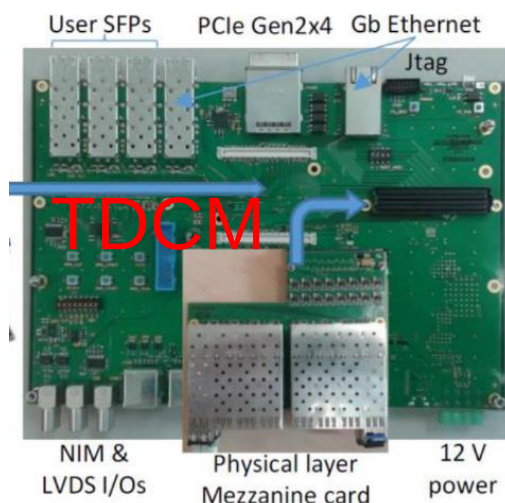
- 高压 (10大气压) 气氙时间投影室
- 200公斤富集 Xe^{136}
- 双边对称电荷读出平面
- 概念设计2016年底中国科学发表
- 多个模块实现吨级实验



Sci. China Phys. Mech.
Astron. (2017) 60: 061011

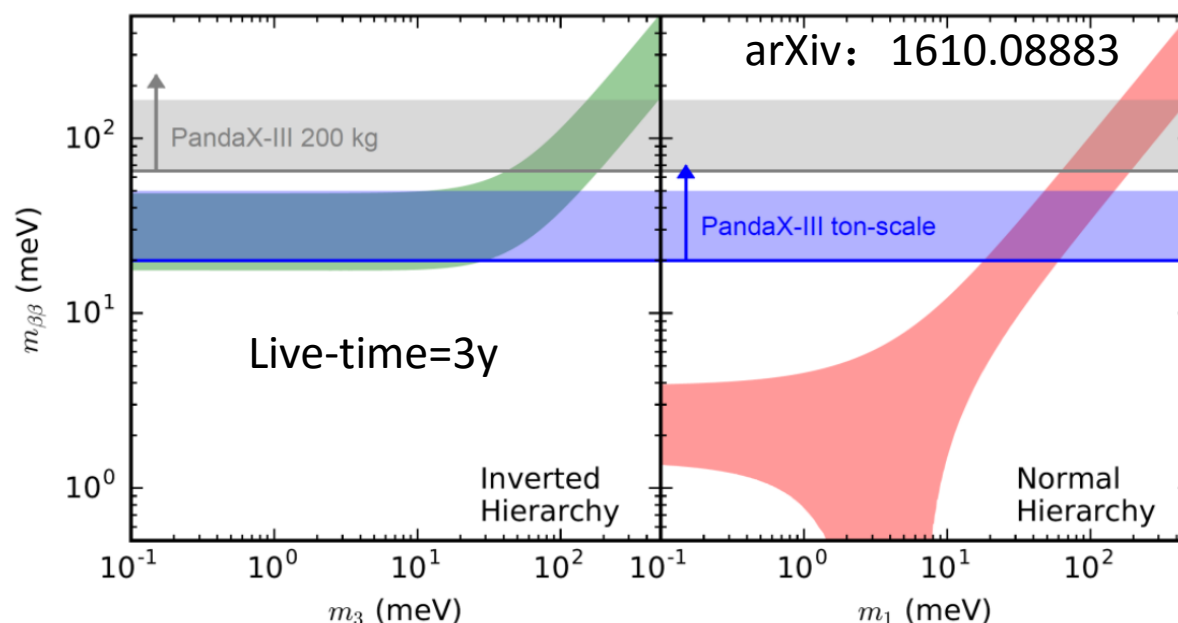
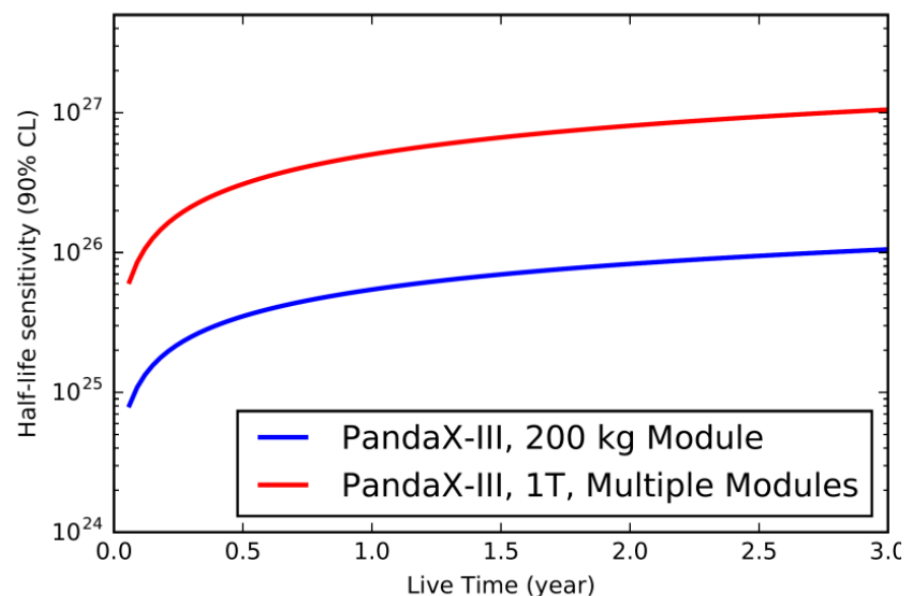
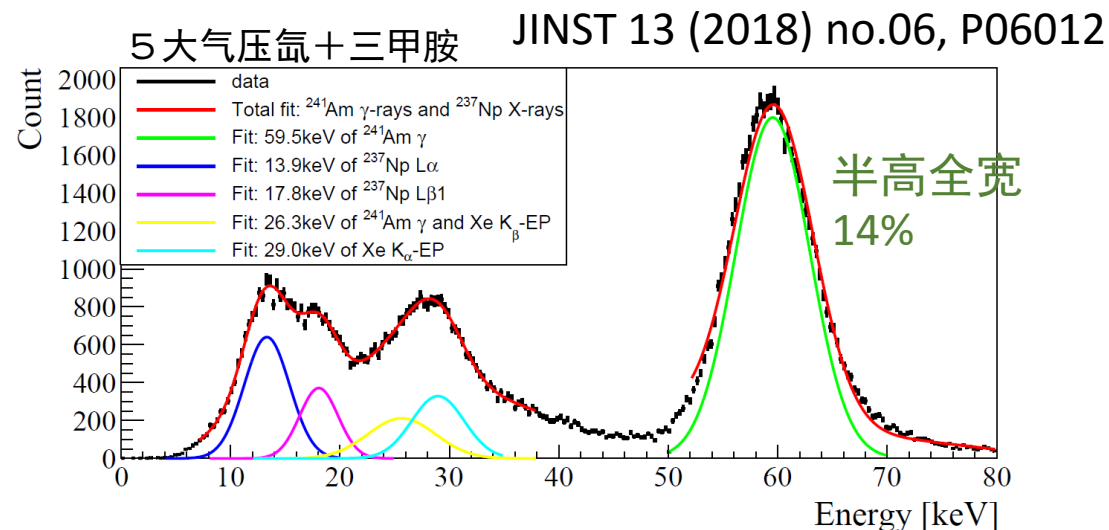
PandaX-III 电子学系统

- 前端读出Micromegas信号并数字化 (arXiv:1806.09257)
 - 约10000道读出
 - 科大主导, 2016年科技部重点专项
 - FEC: 4x 64-道 AGET, 120fC-10pC动态范围, 上升时间0.1-1 μ s
1-100MHz, 12-bit 采样
- 后端提供触发, 连接前端和DAQ (arXiv:1806.07618)
 - 法国Saclay



PandaX-III 预期灵敏度

- 首个200公斤级探测器
 - 利用Microbulk Micromegas 信号读出
 - 3% FWHM 能量分辨率@2.5MeV
 - 1×10^{-4} c/keV/kg/y in ROI
- 多个探测器组成吨级
 - 1% FWHM @2.5MeV
 - 1×10^{-5} c/keV/kg/y in ROI



国际同类实验项目比较

实验项目	地点	状态	靶质量	暗物质灵敏度 (cm ²)	¹³⁶ Xe 0vDBD 半衰期灵敏度 (年)
LZ	美国	建设中, 2021年	7吨天然氙	2x10 ⁻⁴⁸	1x10 ²⁶
XENON	意大利	1吨运行中, 2021年 升级至6吨	6吨天然氙	2x10 ⁻⁴⁸	1x10 ²⁶
nEXO	美国	筹划中	5吨氙136	无	5x10 ²⁷
KamLAND-Zen	日本	运行中	800公斤氙136	无	1x10 ²⁶
PandaX-III	中国	建设中	200公斤氙136	无	1x10 ²⁶
PandaX-4T	中国	建设中	4吨天然氙	6x10 ⁻⁴⁸	3x10 ²⁵
PandaX-30T	中国	筹划中	30吨天然氙	3x10 ⁻⁴⁹	1x10 ²⁷

总结

- 经过多年的努力PandaX暗物质实验在激烈国际竞争中占取了一席之地
 - 2016, 2017年发表的WIMP结果都是国际领先
- 在拓展传统WIMP模型中, 也保持着国际领先的步伐
 - 最新的两个物理结果: 轻传播子, 有效场作用
 - 得益于和理论学家的积极合作
- 新一轮第二代(吨级)液氙暗物质实验国际竞争拉开序幕, PandaX正推进4吨级实验。
 - 未来, 终极第三代(30吨)达到中微子本底
- 同时推进高压气氙(无中微子双贝塔)实验

谢谢！