

数十吨级液氙探测计划 PandaX-xT

刘江来 上海交通大学

代表PandaX合作组

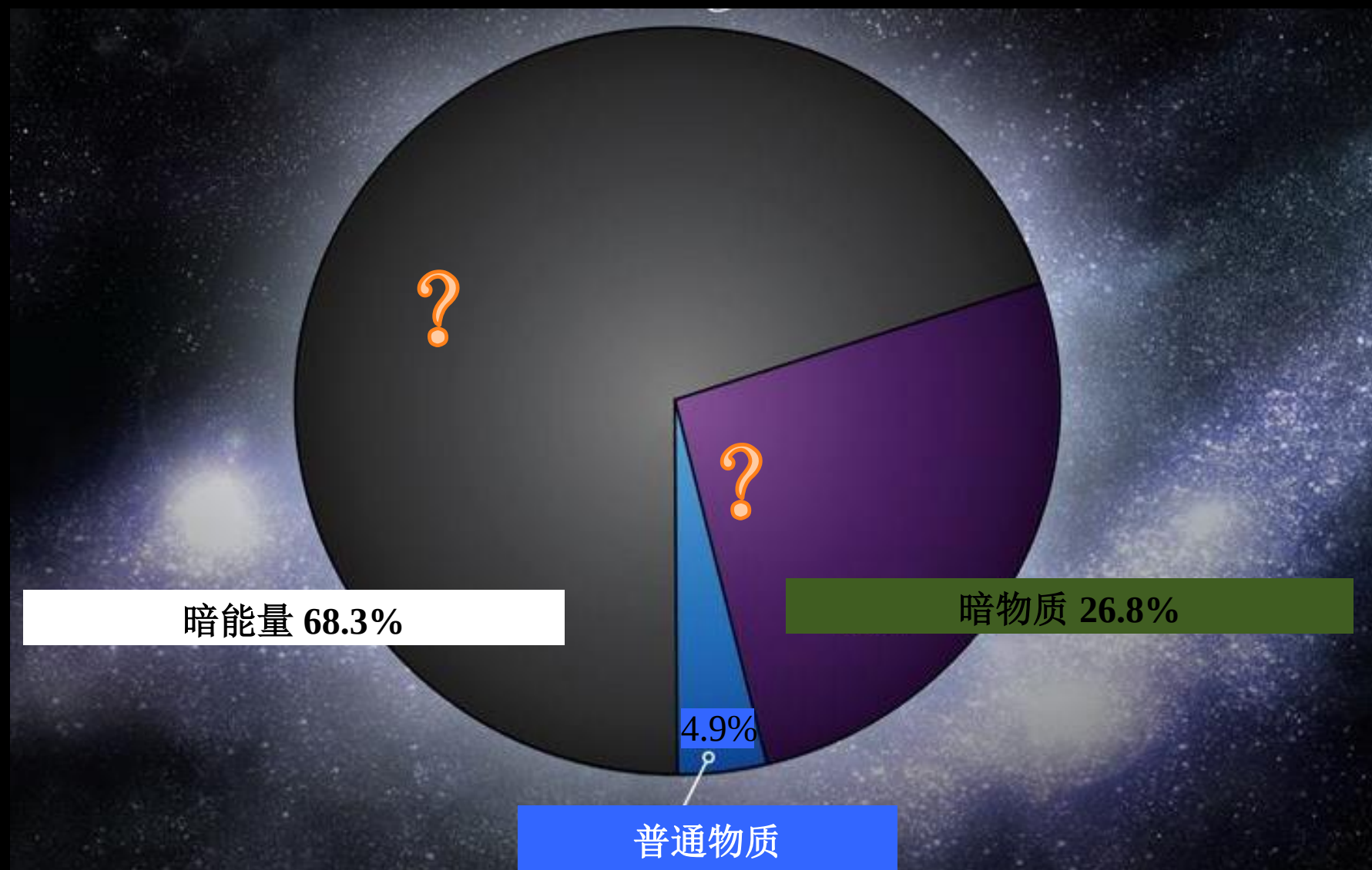
2022.10.18



汇报提纲

- 科学意义、国内外研究动态
- 研究基础和前期成果
- 整体研究计划、研究方案、可行性分析等
- 预期成果
- 国际竞争和合作
- 项目团队和已有支持
- 经费预算和执行情况

暗物质之谜



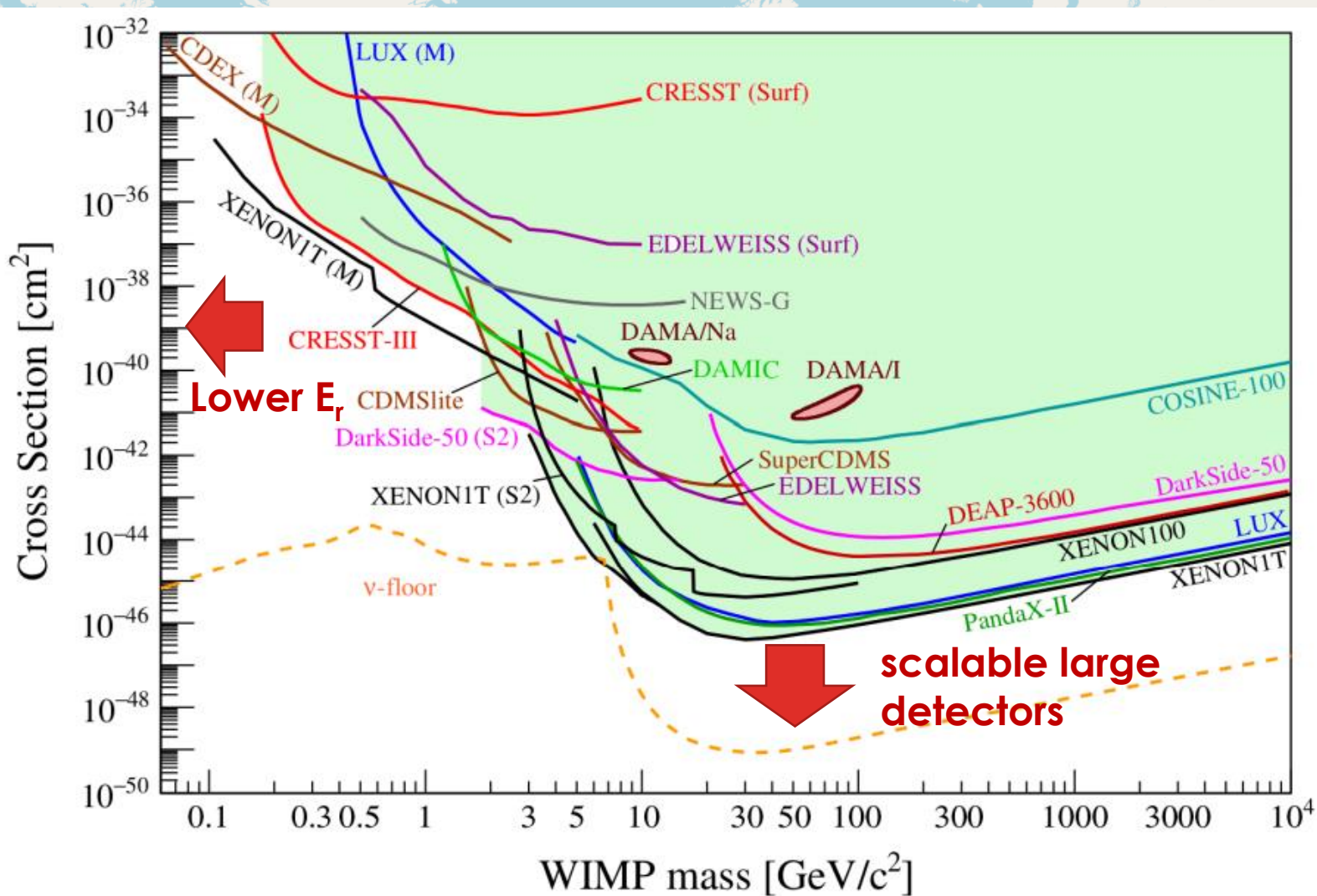
国际上三大液氙暗物质实验 激烈竞争

Sanford Lab

3

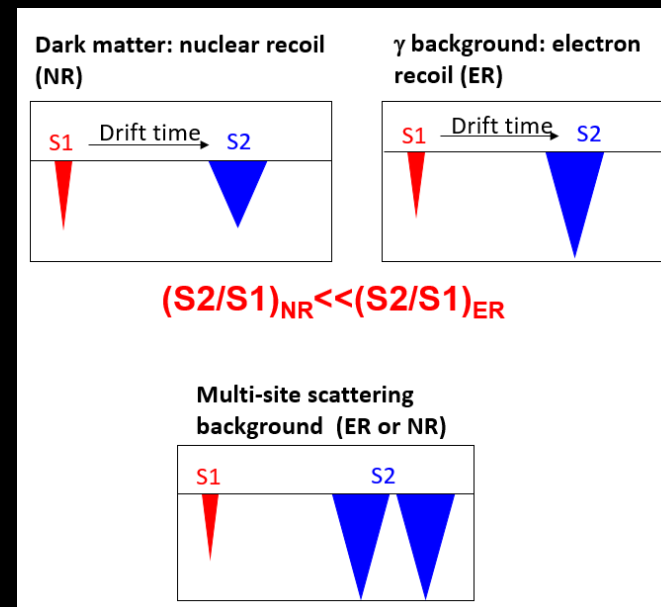
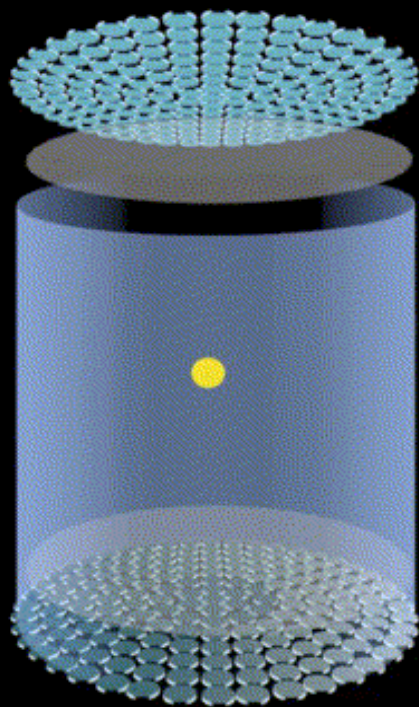
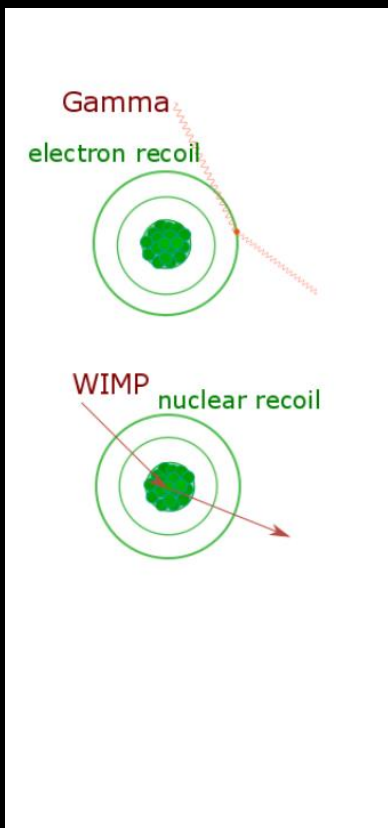
United States

México



4T, 3.7 ton

两项型液氦时间投影室

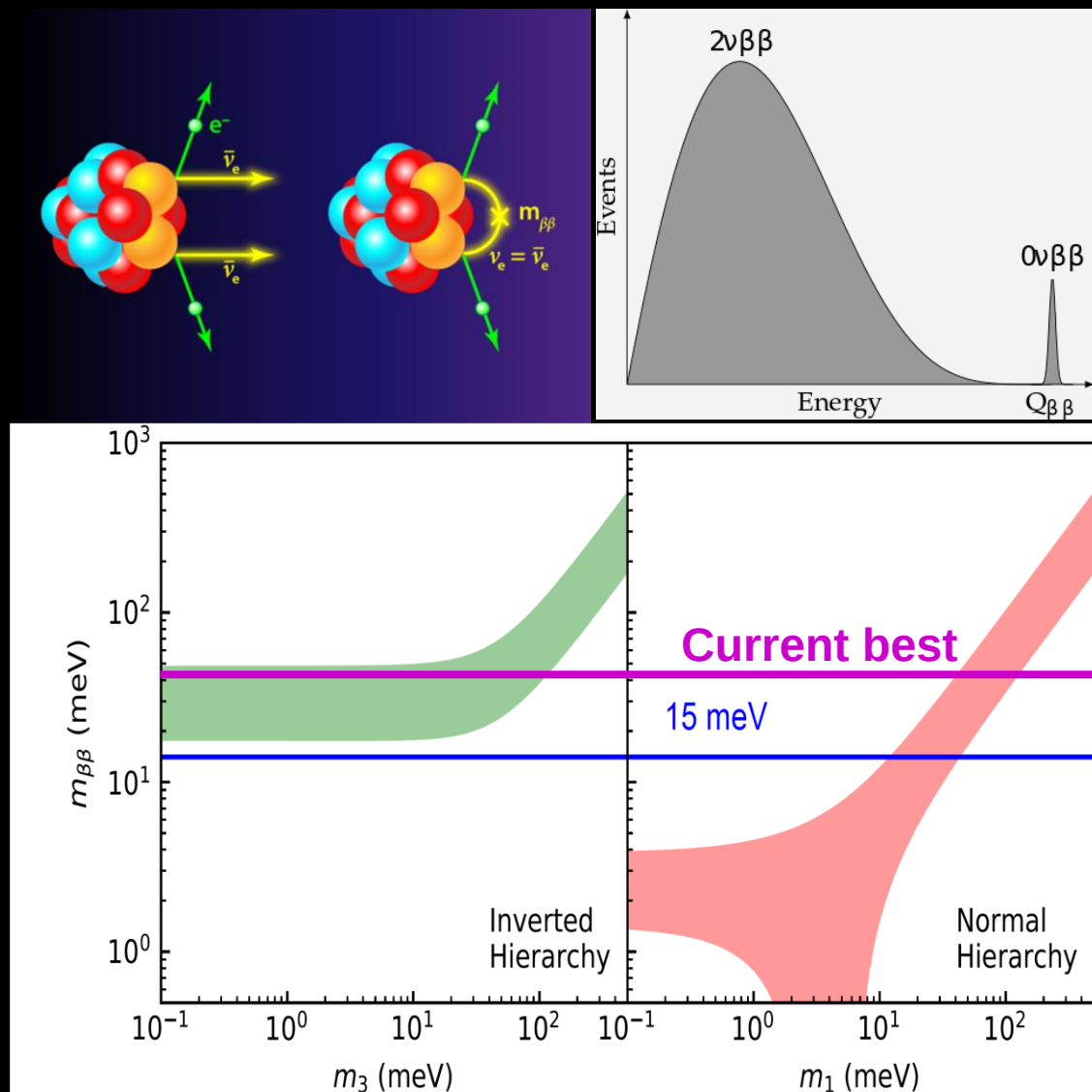


Detector capability:

- Large scalable target
- 3D reconstruction and fiducialization
- **Good ER/NR rejection**
- Calorimeter from 100 eV to few MeV

马约拉纳中微子：实验证据？

- 无中微子双贝塔衰变 ($0\nu\text{DBD}$)
- 发现 $0\nu\text{DBD}$ 意味着：
 - ✓ 首次观察到基本马约拉纳费米子
 - 很多理论中暗物质也是马约拉纳粒子
 - ✓ 观察到轻子数不守恒
 - ✓ 对中微子绝对质量提供信息
 - ✓ 为“轻子创世纪”提供重要依据！



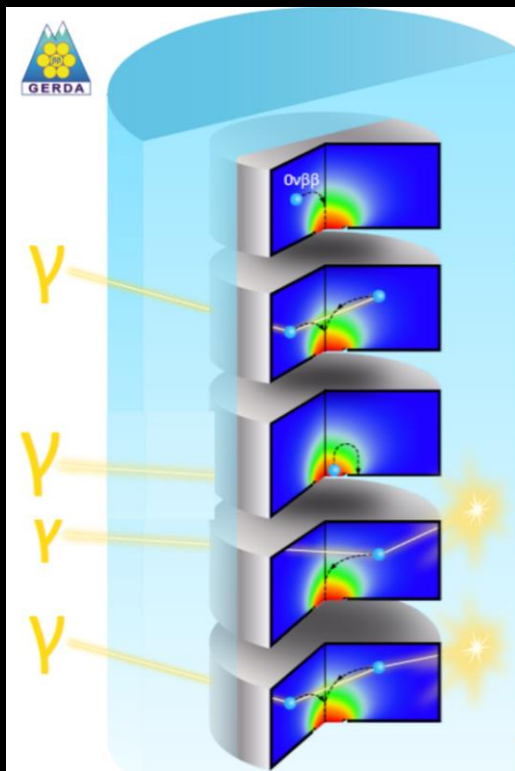
国际领先的0 ν DBD实验



$^{130}\text{Te}/^{100}\text{Mo}$

CUORE/CUPID

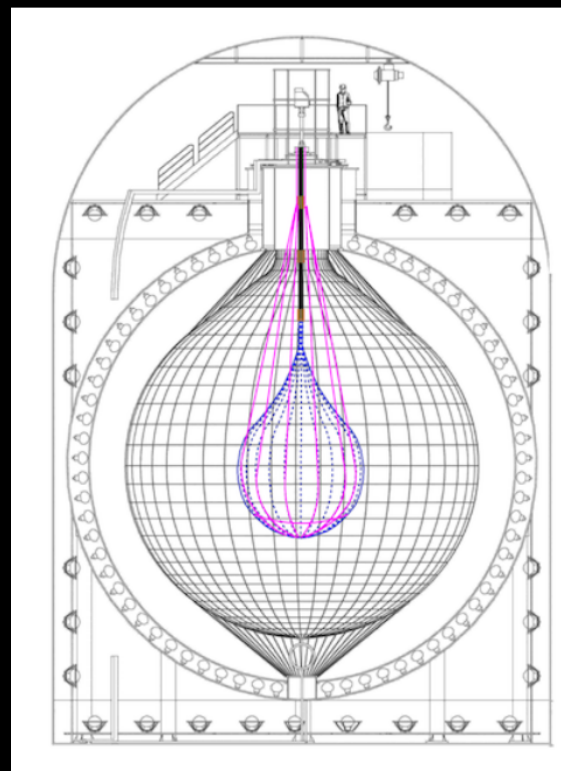
Bolometer



^{76}Ge

LEGEND family

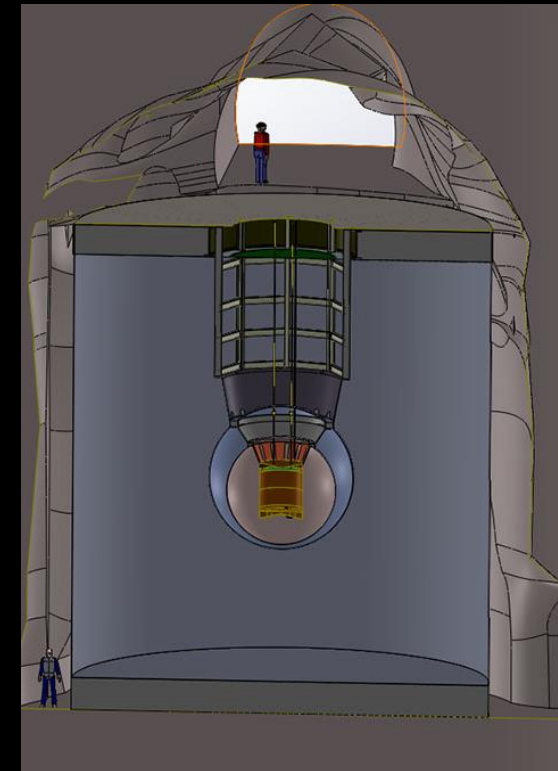
HPGe



^{136}Xe (8.7% natural abd.)

KamLAND-ZEN

Doped LS



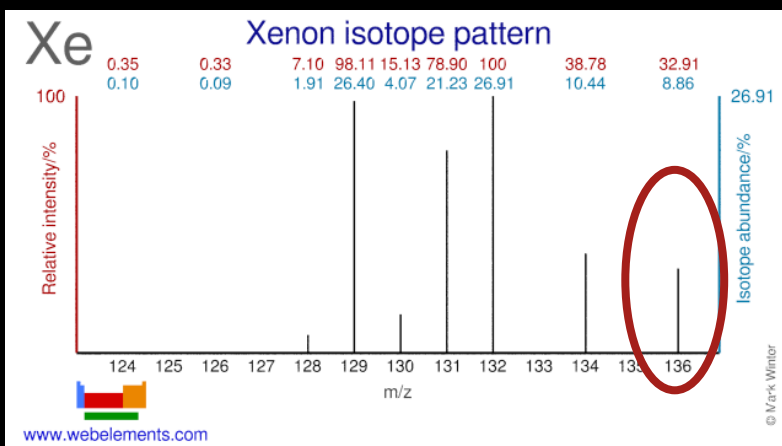
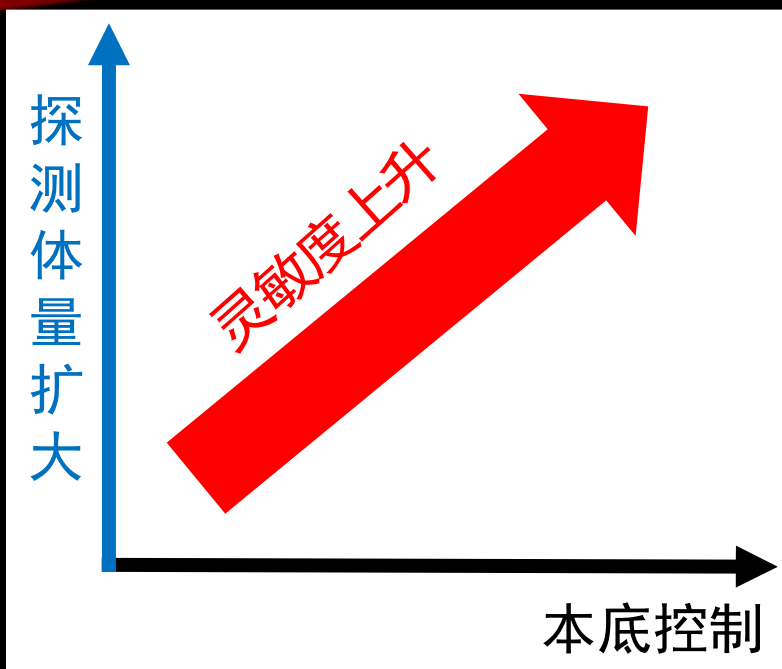
EXO/nEXO

LXe TPC

我们的实验规划

在锦屏实验室二期B2实验厅，开展下一代数十吨级PandaX-xT实验计划：

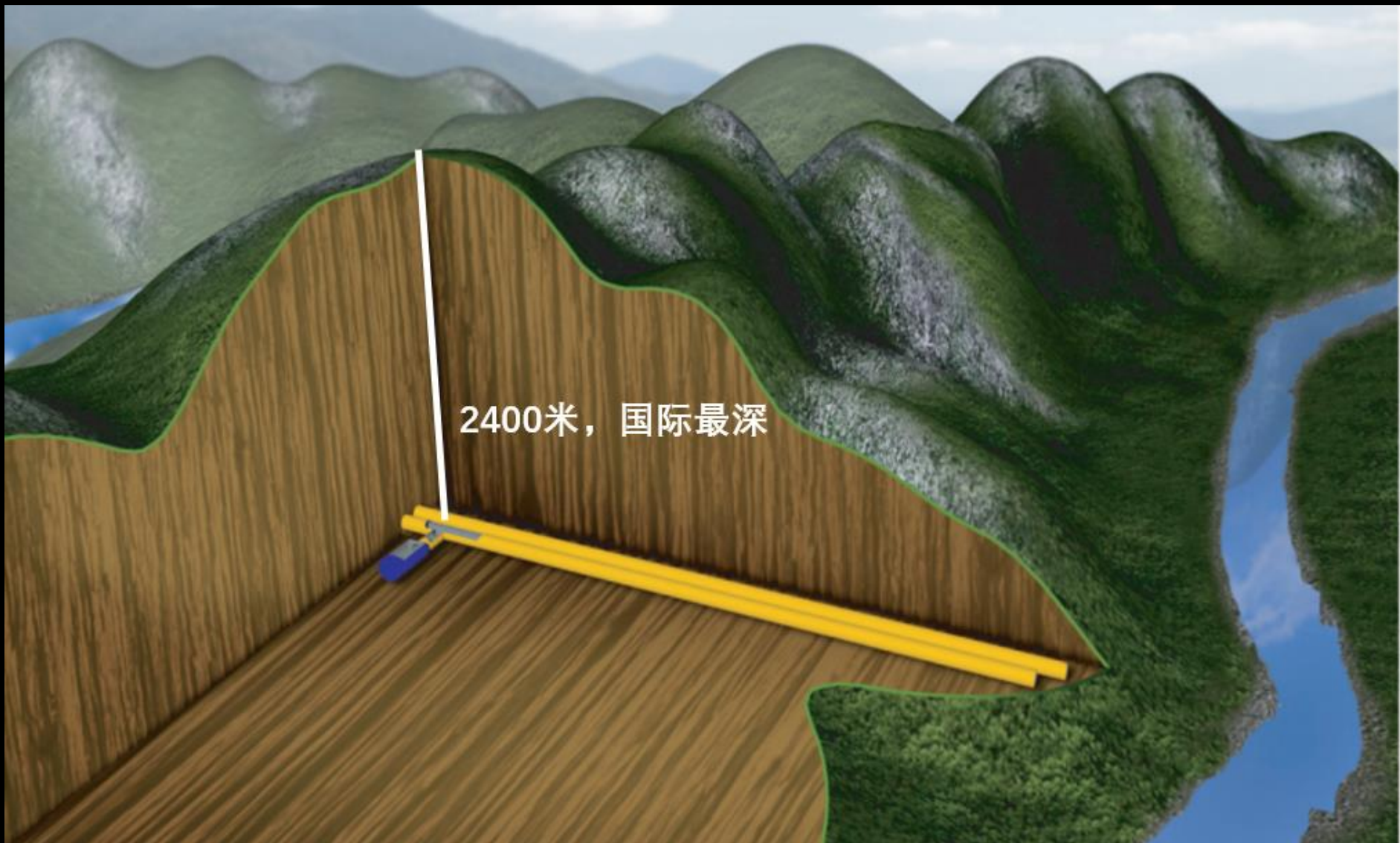
1. 将暗物质探测的灵敏度较当前实验提升两个数量级，接近“中微子地板”，对WIMP模型做出决定性判断；
2. 搜寻氙-136同位素的无中微子双贝塔衰变，全面覆盖中微子质量反序对应的参数空间；
3. 探测太阳中微子、大气中微子等天体中微子及其他稀有信号，寻找新物理现象。



汇报提纲

- 科学意义、国内外研究动态
- 研究基础和前期成果
- 整体研究计划、研究方案、可行性分析等
- 预期成果
- 国际竞争和合作
- 项目团队和已有支持
- 经费预算和执行计划

锦屏地下实验室



PandaX-II, 580 kg operation



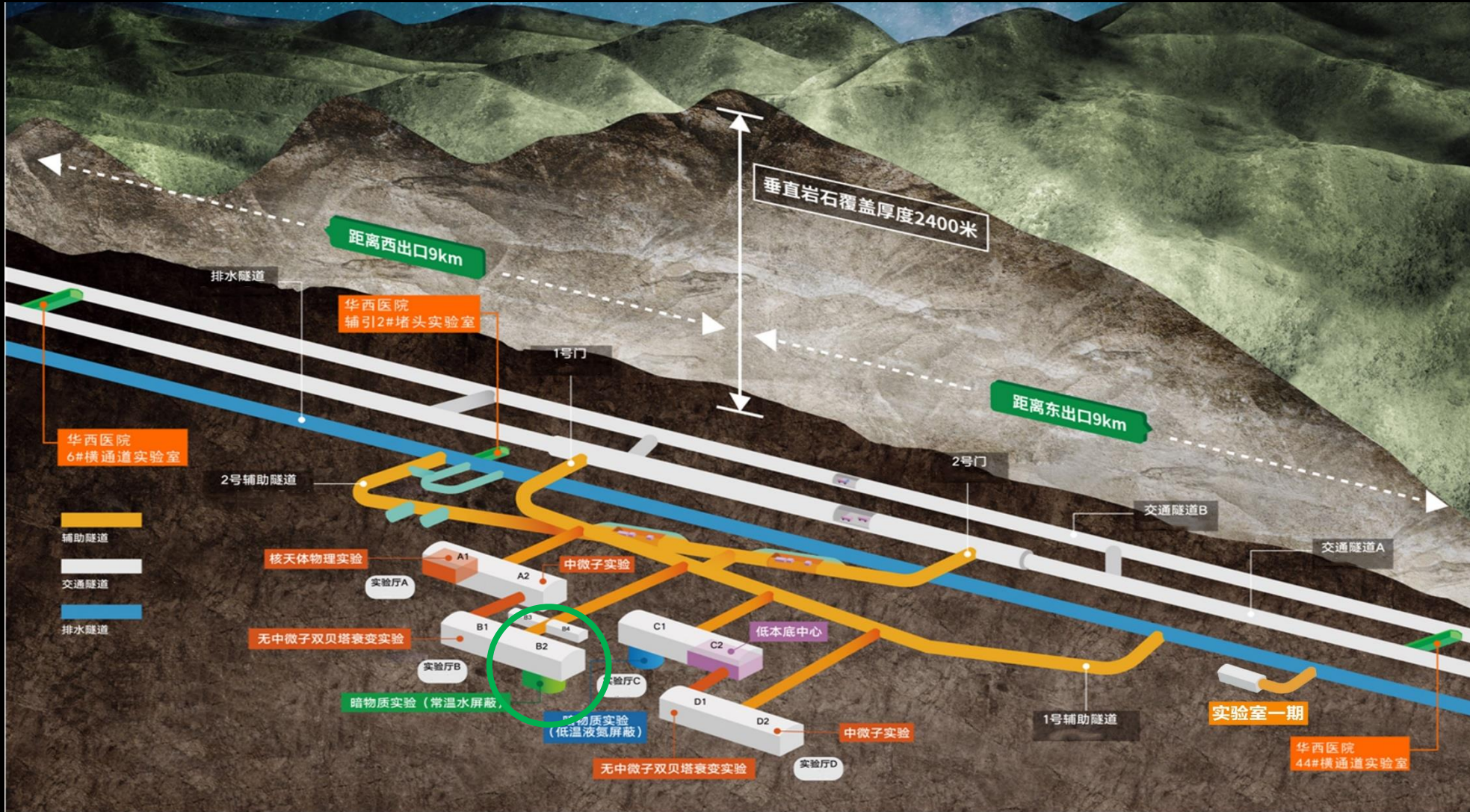
2019.8-

2016.7-2019.7



PandaX-4T
moved to CJPL-II

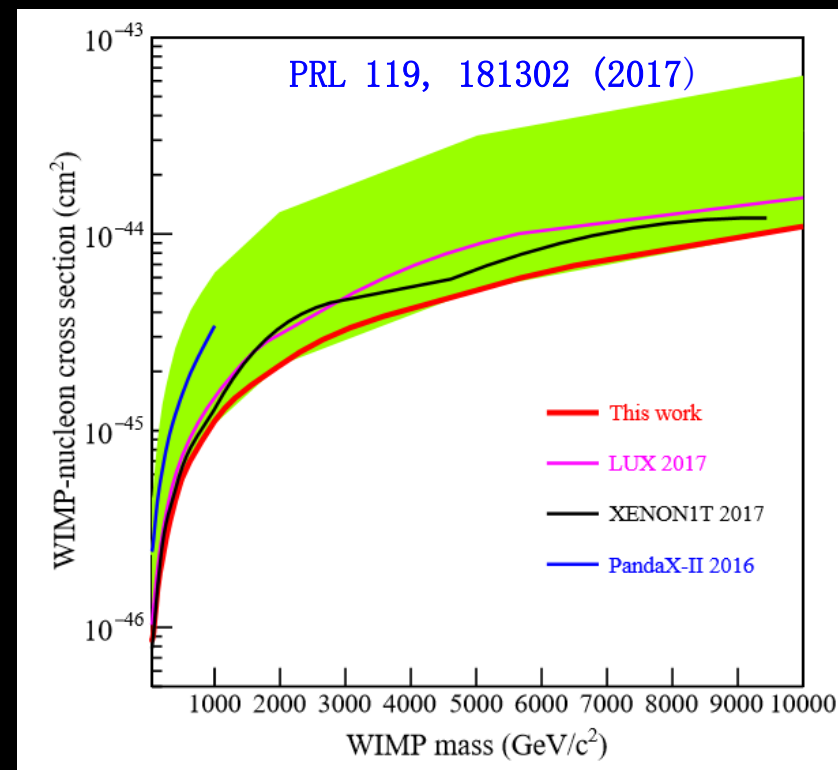
PandaX-4T @ CJPL-II



PandaX-4T @ CJPL-II



PandaX-II实验暗物质探测灵敏度 数度国际领先

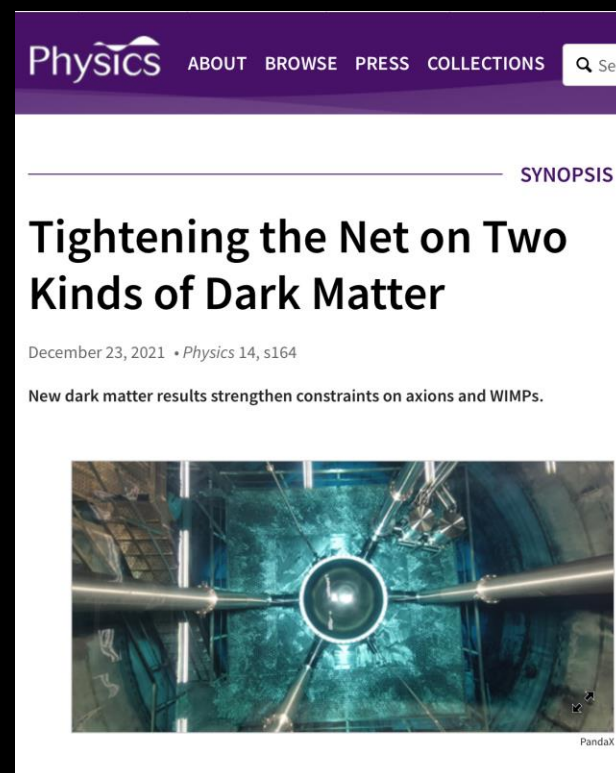
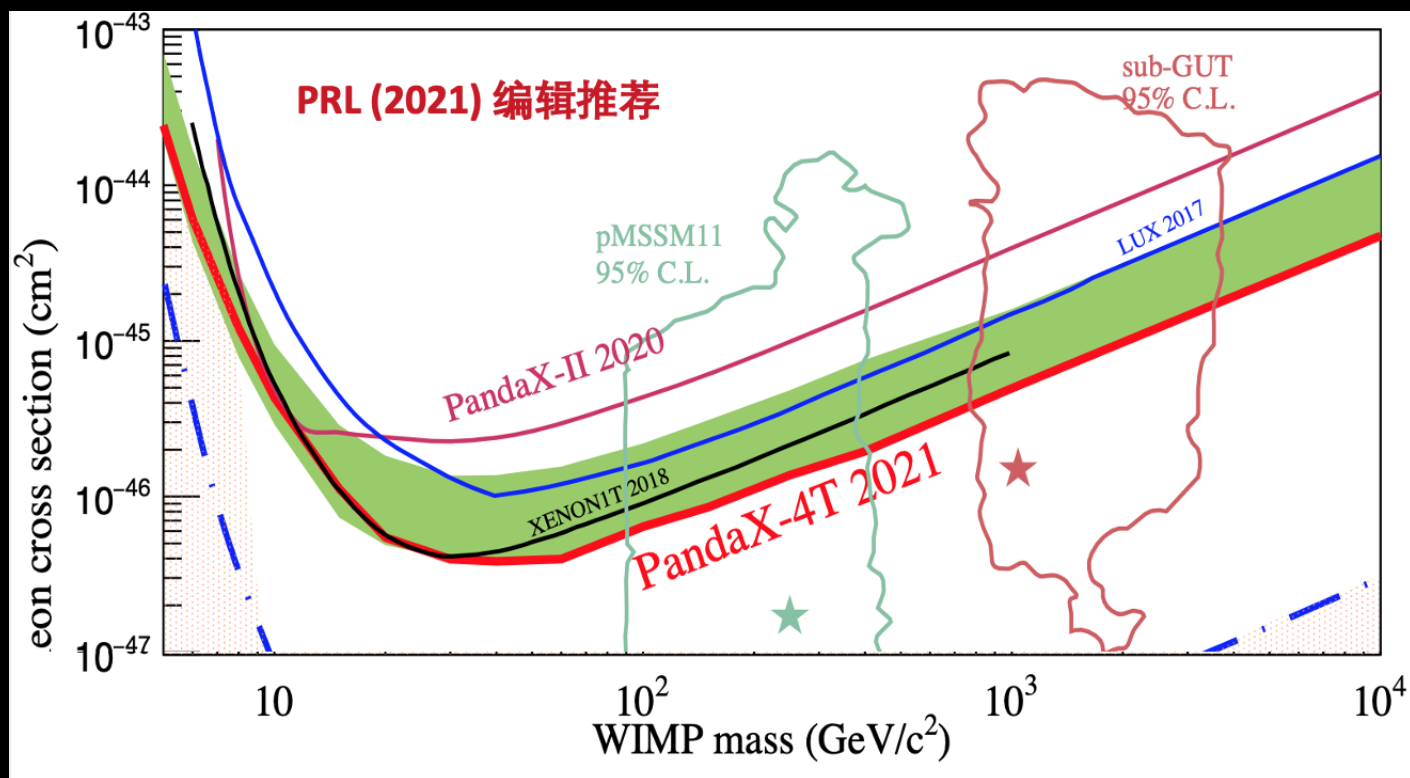


- 2016、2017年连续两年，PandaX团队先后超越美国的LUX和欧洲的XENON1T实验，取得年度国际最灵敏的暗物质探测结果（截面上限）
- 两篇文章他引用共1600余次，标志着中国在暗物质探测领域跨进世界领先行列

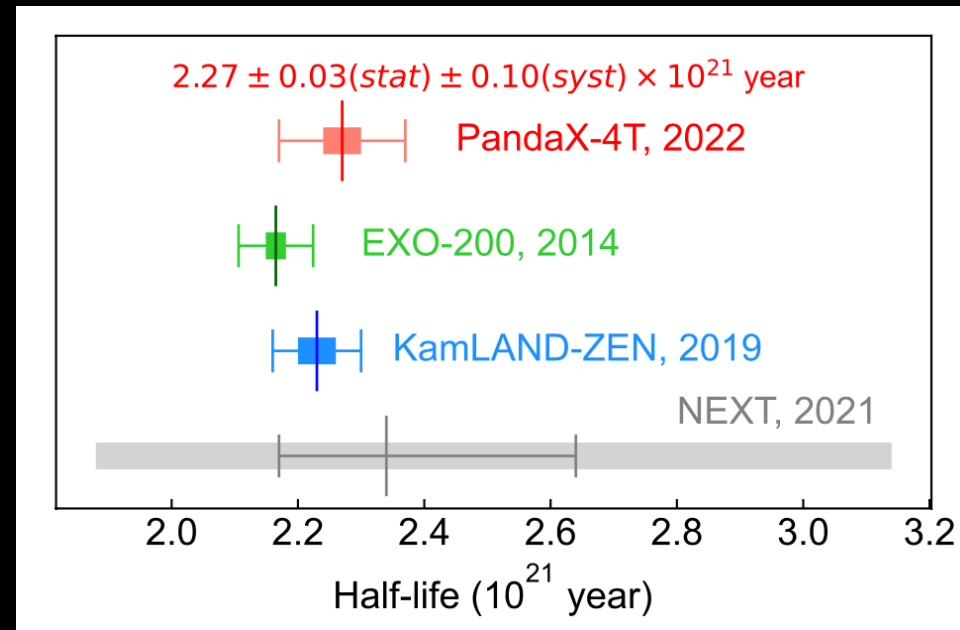
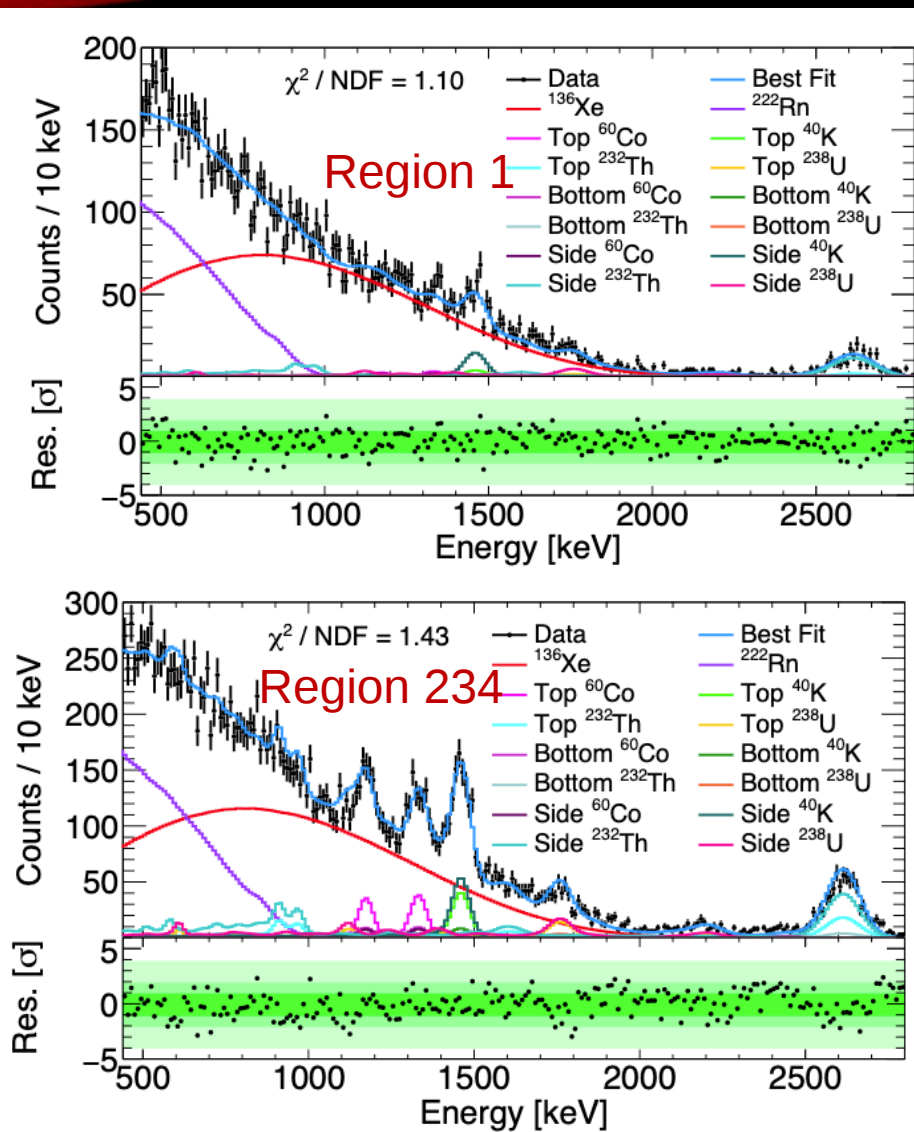
PandaX-4T率先开展高灵敏暗物质探测

- 采用多种新型技术，实现低本底高灵敏度暗物质探测
- 试运行95天结果再次领先世界，散射截面的最强限制达到 $3.8 \times 10^{-47} \text{cm}^2$
- 深入暗物质理论中心区域

美国物理学会《Physics》专题报道



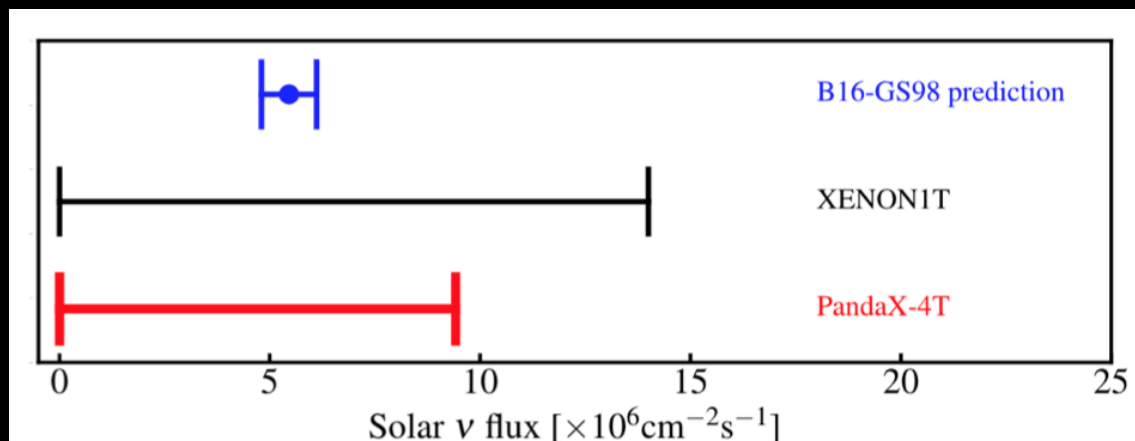
对 ^{136}Xe 双贝塔衰变的测量



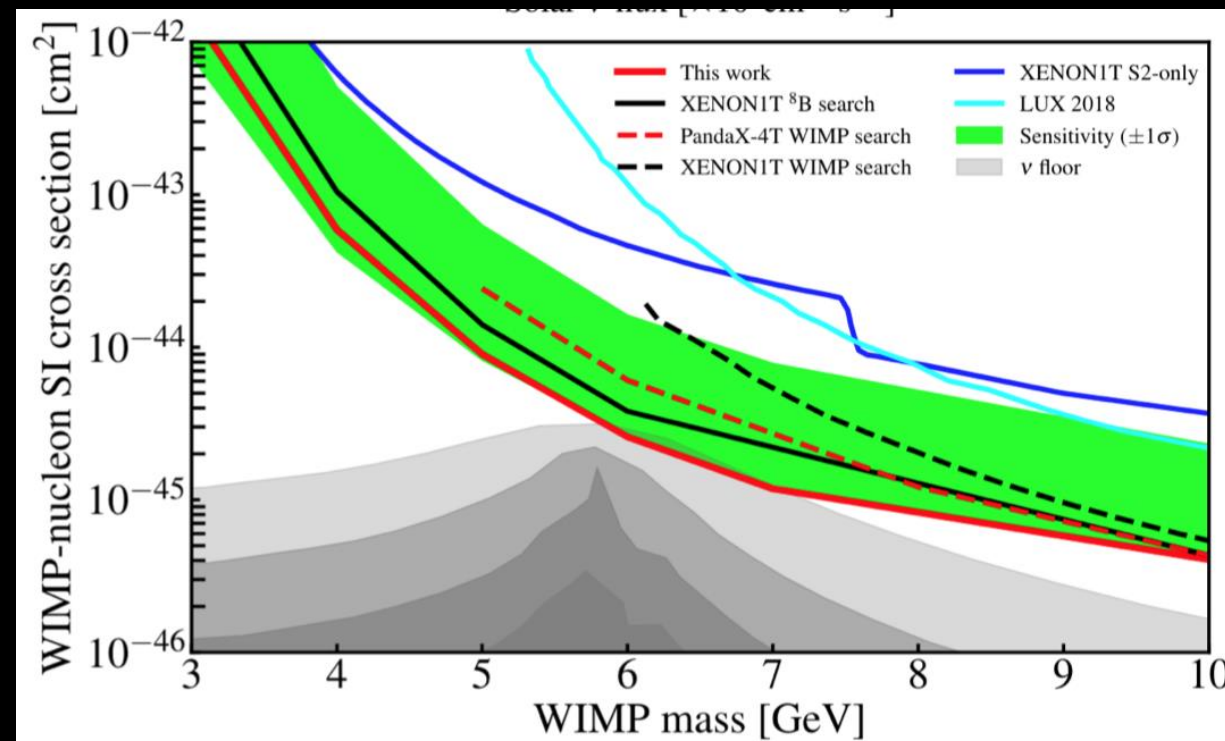
- 国际上首次利用暗物质、自然氙探测器精确测量 ^{136}Xe 双中微子贝塔衰变半衰期
- 最完整双贝塔衰变能谱，未来结合暗物质能区，有望率先完成全能谱测量
- 测量精度与专有双贝塔衰变实验利用富集 ^{136}Xe 结果相比拟

探测硼8中微子“地板”

- 国际领先的利用液氙测量硼8中微子相干散射过程结果，**探测低质量区中微子地板**
- 在3-10GeV暗物质和原子核散射，世界最强的探测结果，达到 $10^{-42}-10^{-45}\text{cm}^2$



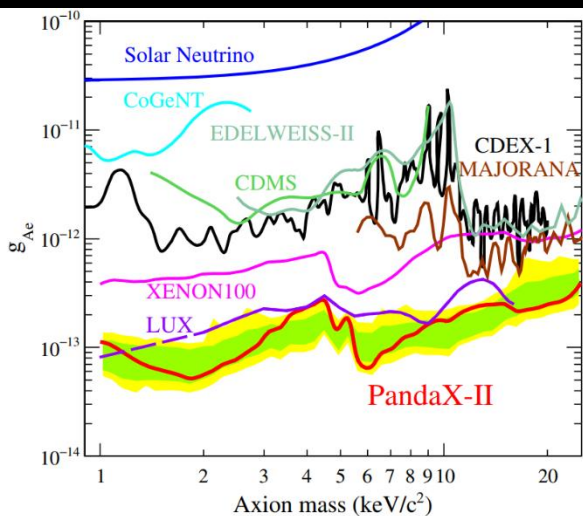
arXiv:2207.04883



对多种新物理理论进行检验

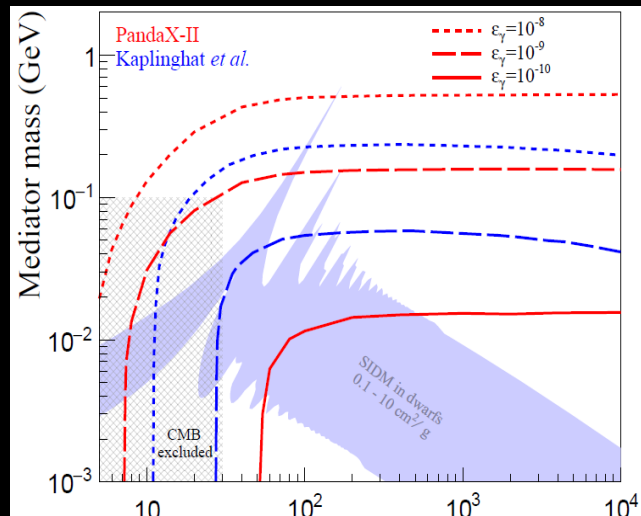
轴子

PRL 119, 181806
(2017)



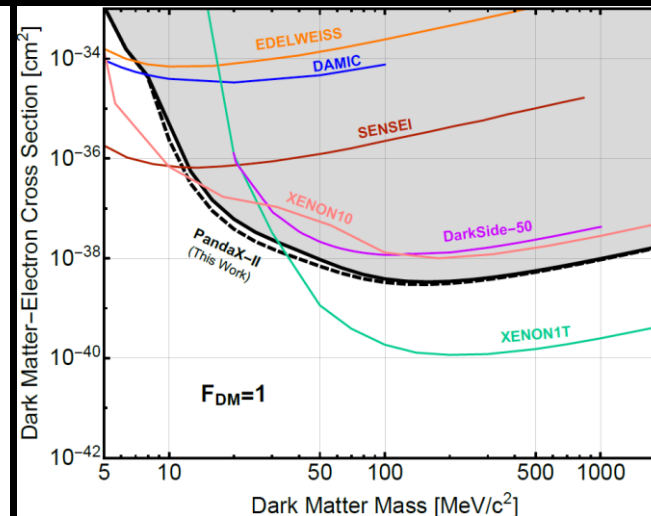
自相互作用暗物质

PRL 121, 021304
(2018)



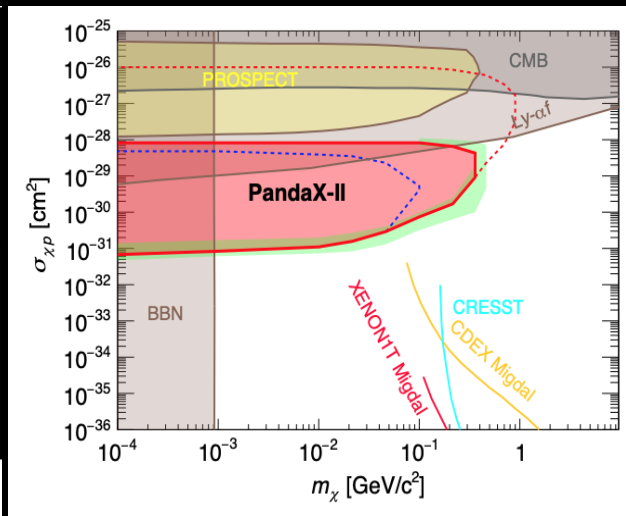
轻暗物质-电子散射

PRL 126, 211803
(2021)



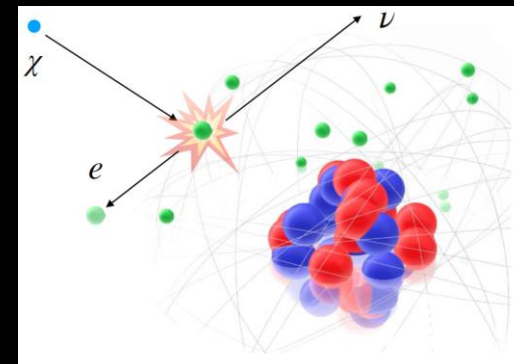
宇宙线加速轻暗物质

PRL 128, 171801
(2022)

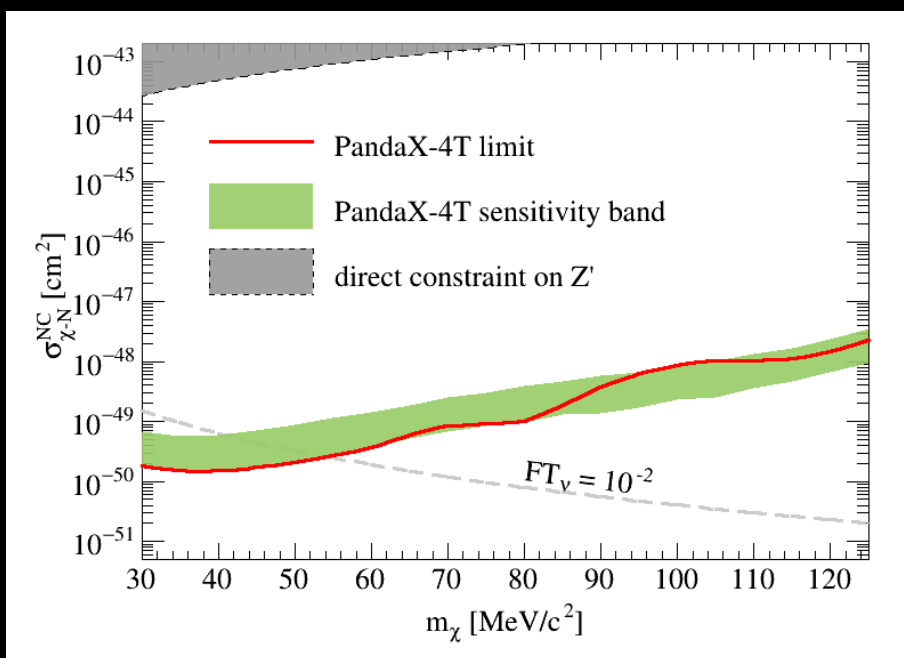


吸收型暗物质探测

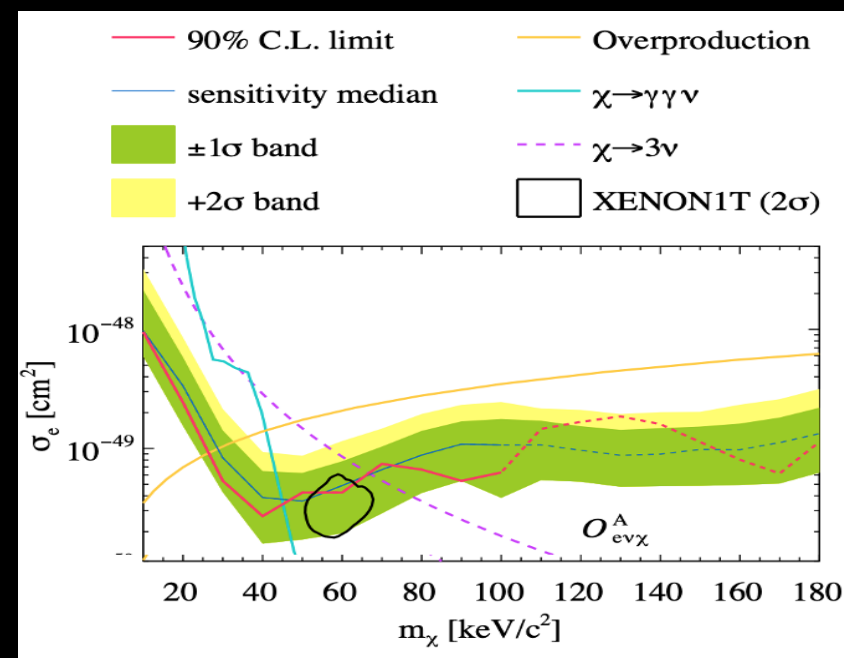
- 首次实验搜寻原子核或电子吸收型暗物质（类惰性中微子）
- 产生新型单能量信号特征
- 对于几十MeV质量暗物质给出极强的限制



PRL 129, 161803 (2022), **Editors' Suggestion**



PRL 129, 161804 (2022), **Editors' Suggestion**



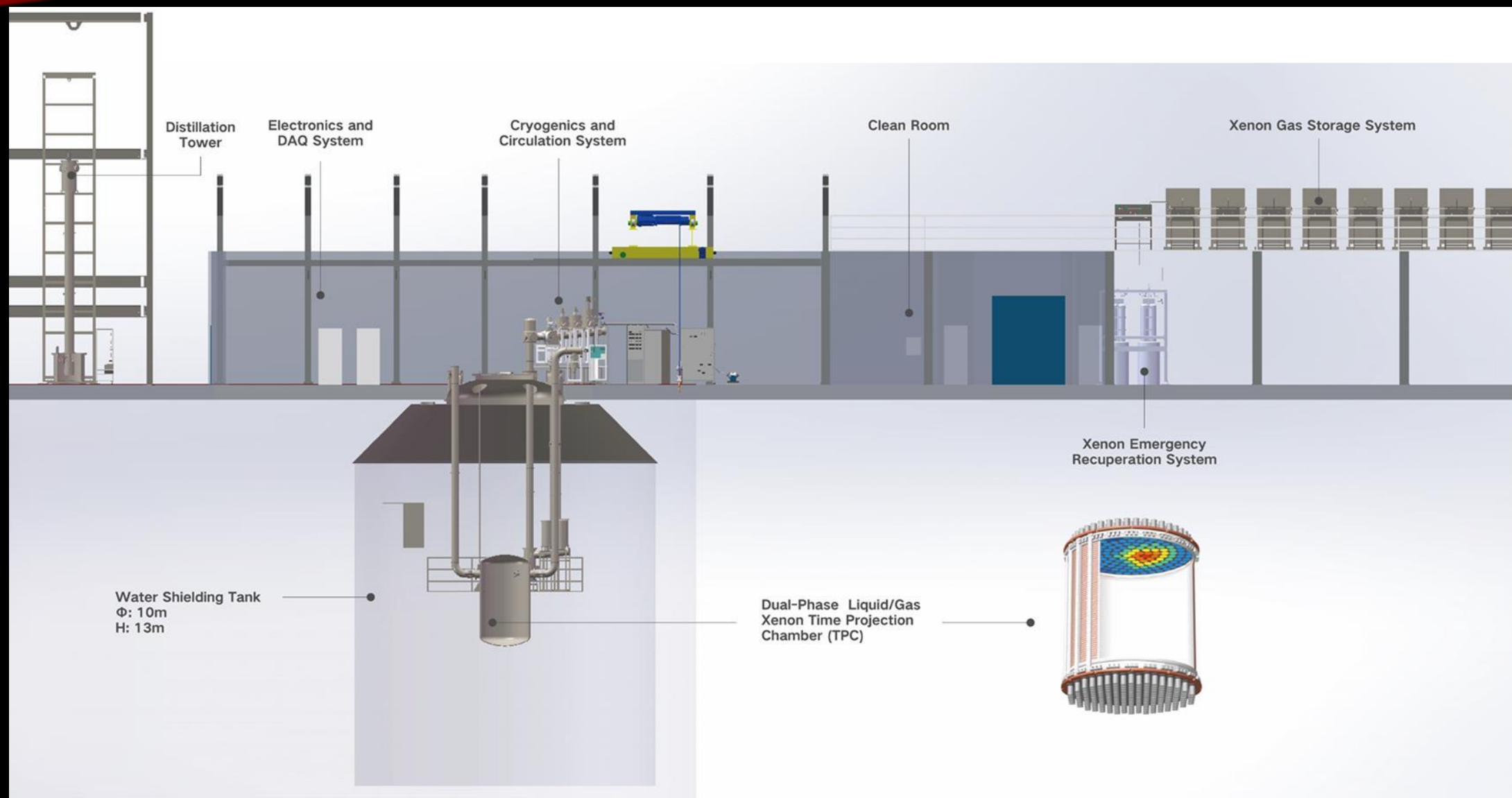
小结： 高端杂志论文

Journal	Impact Factor	PandaX Publications	Reference
Phys. Rev. Lett.	9.161	11 篇 (8篇选为“编辑推荐”)	Dark matter physics: 7 from PandaX-II, 1 Pheno, and 3 PandaX-4T
Nature Physics	20.113	1篇	Review of dark matter direct detection
Research	11.036	1篇	PandaX-4T on ^{136}Xe DBD

汇报提纲

- 科学意义、国内外研究动态
- 研究基础和前期成果
- 整体研究计划、研究方案、可行性分析等
- 预期成果
- 国际竞争和合作
- 项目团队和已有支持
- 经费预算和执行计划

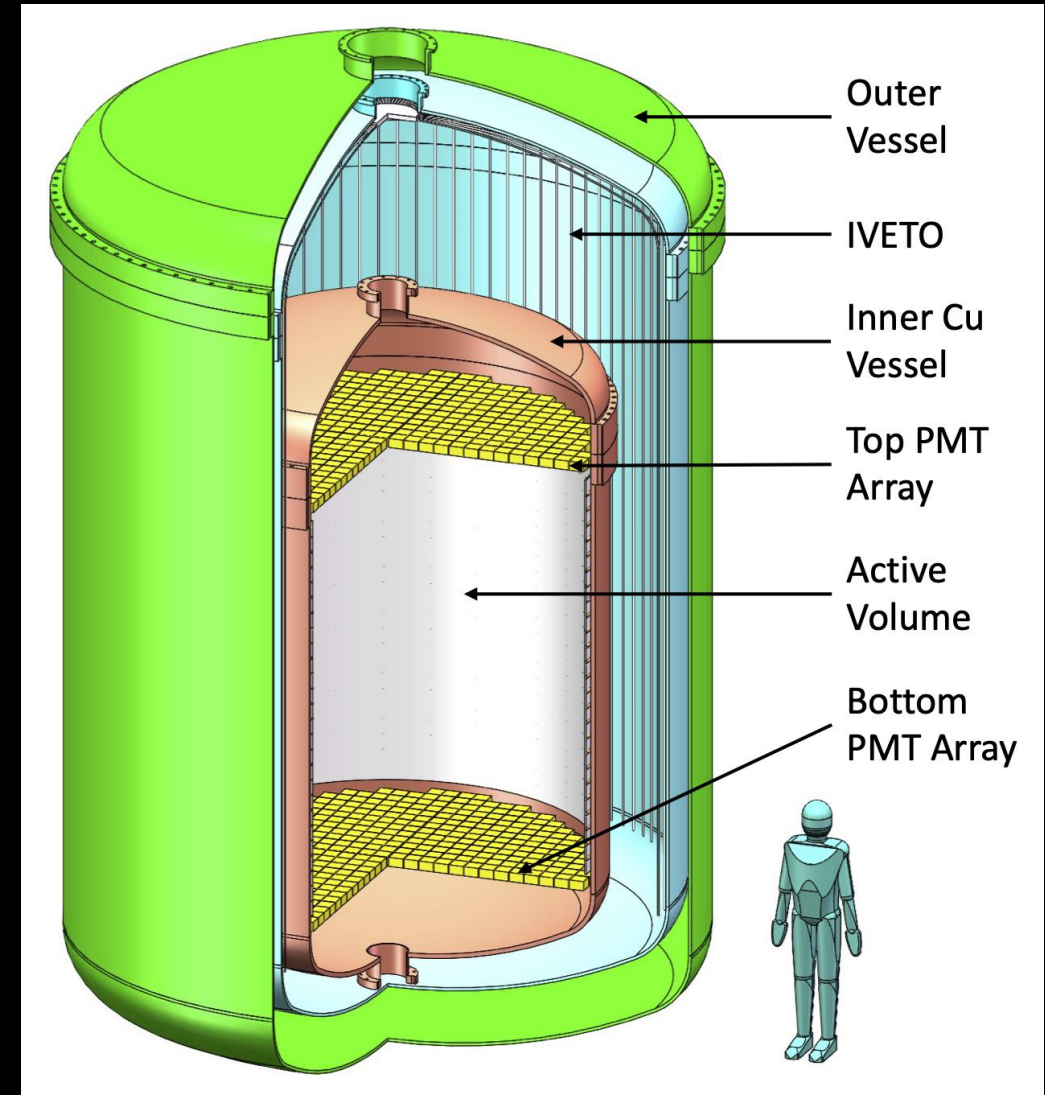
基于PandaX-4T的基础设施



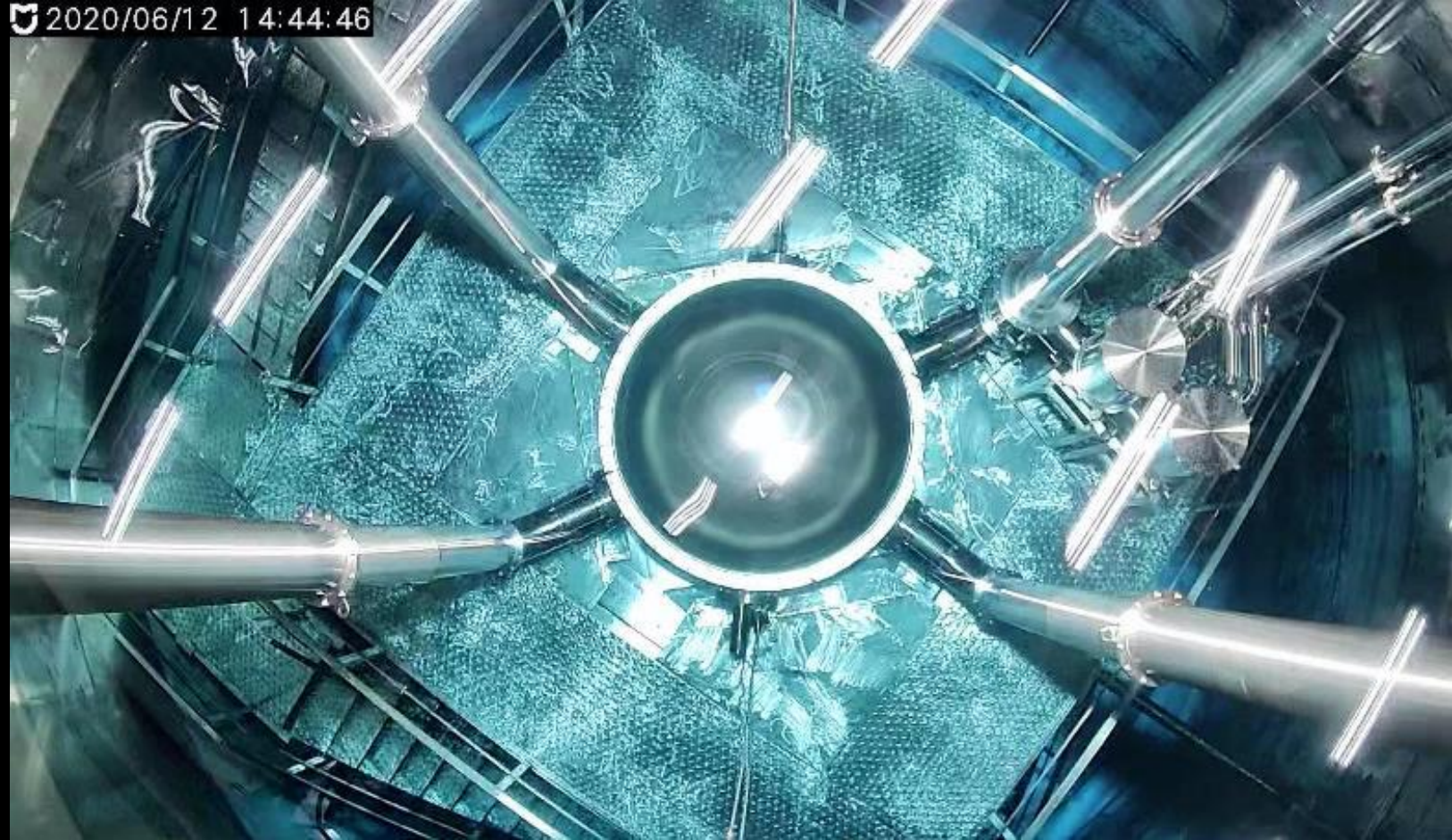
PandaX-xT设计方案

- 47-ton xenon, including 43-ton sensitive volume
- Eight hardware subsystems
 - 1) Outer water shield/veto
 - 2) Inner veto
 - 3) Cryostat and TPC
 - 4) Photosensors
 - 5) Readout & Electronics
 - 6) Liquid xenon storage and handling
 - 7) Cryogenics & recirculation
 - 8) Distillation system

李所暗物质中微子平台建设经费已经支持



外屏蔽体



900 m³ ultrapure water. Can be upgraded to an active Cerenkov veto detector

IVETO系统

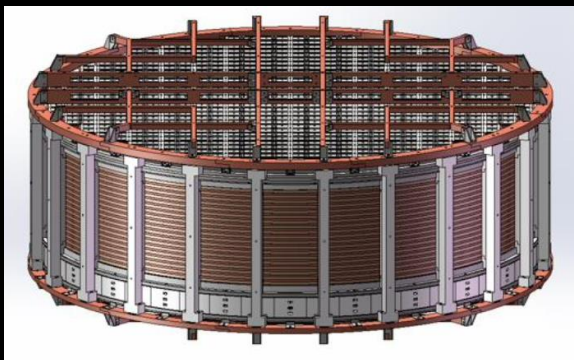


0.5 m thick LS right outside the thin inner vessel

- Cold (LAB-based translucent fluid)
- Thermal buffer
- Pressure balance
- Veto
- Photons readout via wavelength shifting fibers or light guide
- 200 keV threshold, 90% veto efficiency for neutrons

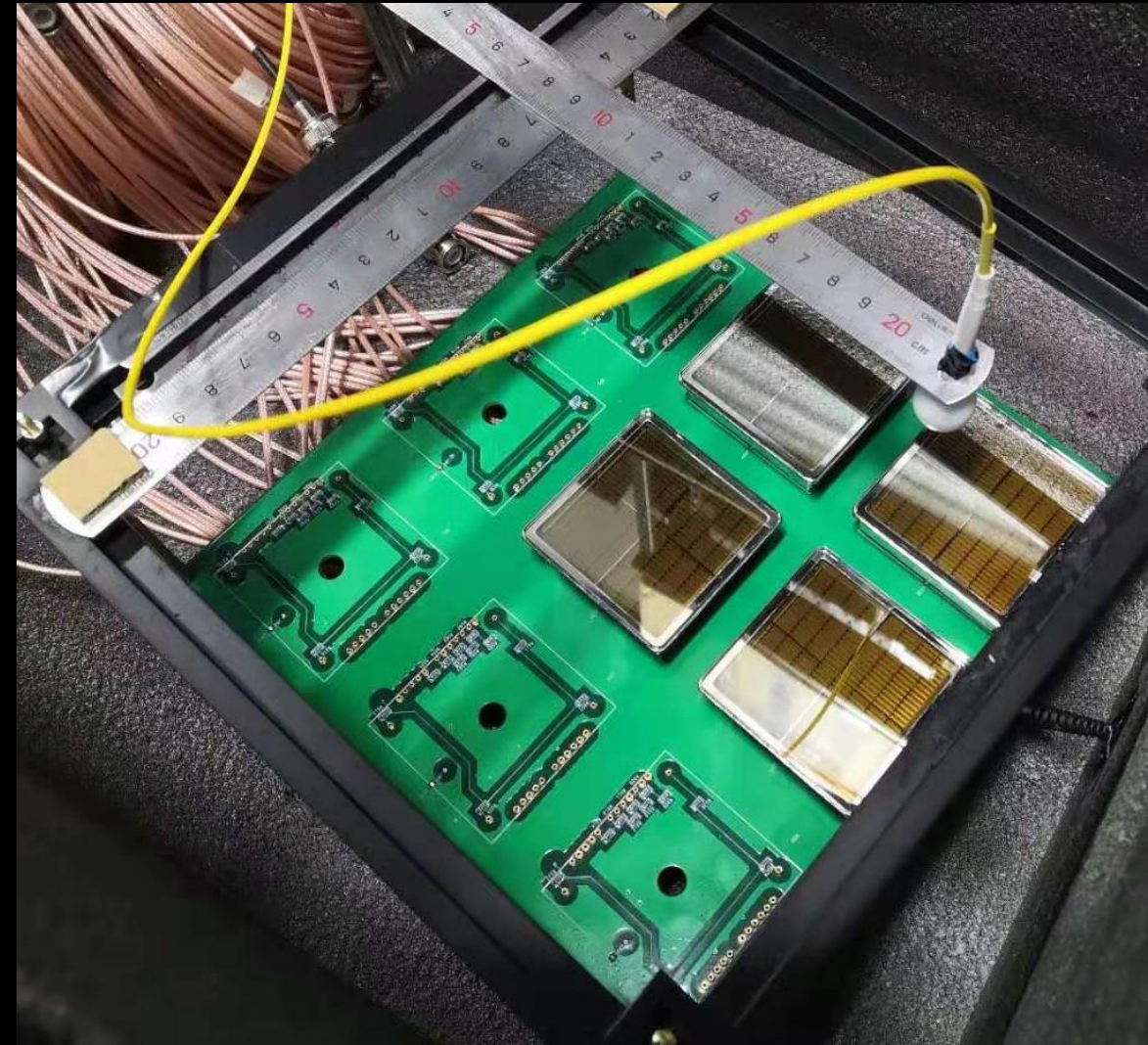
时间投影室

- 2.7 meters in diameter and height
- Active xenon mass of 43 tonnes
- Upgradable based on the xenon amount in possession



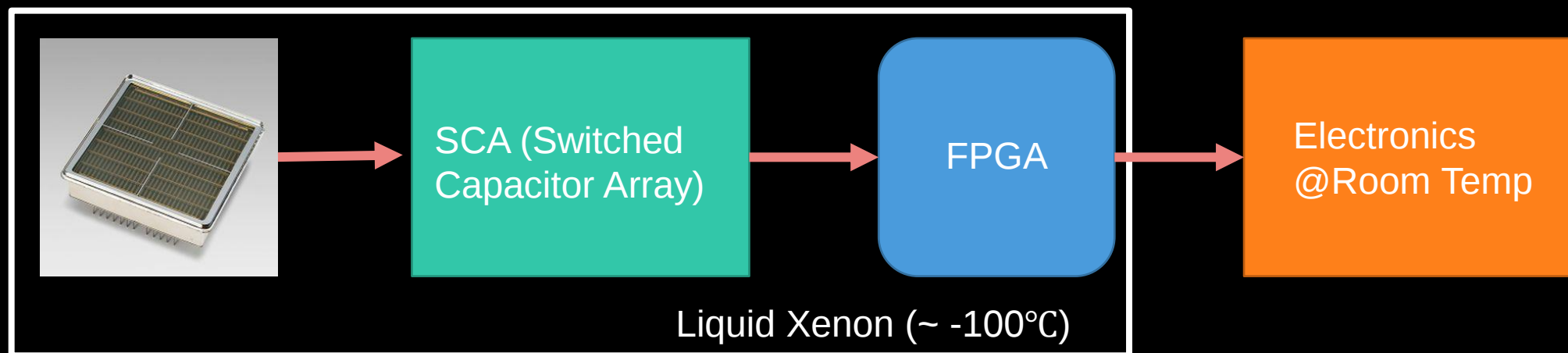
光电阵列

- 10 m² top/bottom coverage
- QE > 30% (178 nm)
- Dark noise <10 Hz/channel
- Candidate: Hamamatsu R12699 (2"x2")
U/Th/K = 0.02/0.01/1.5 mBq/cm²
(x5-10 better than R11410)



读出电子学

- A large number of readout channels with waveform digitization (~15000 channels)
- Readout electronics @ LXe, reducing coaxial cables and feedthroughs



SCA ASIC for low temperature applications
(IEEE TNS, vol. 68, no. 8, pp. 2315-2322, Aug 2021)

Altera Cyclone IV
(Applied for DUNE & ATLAS)



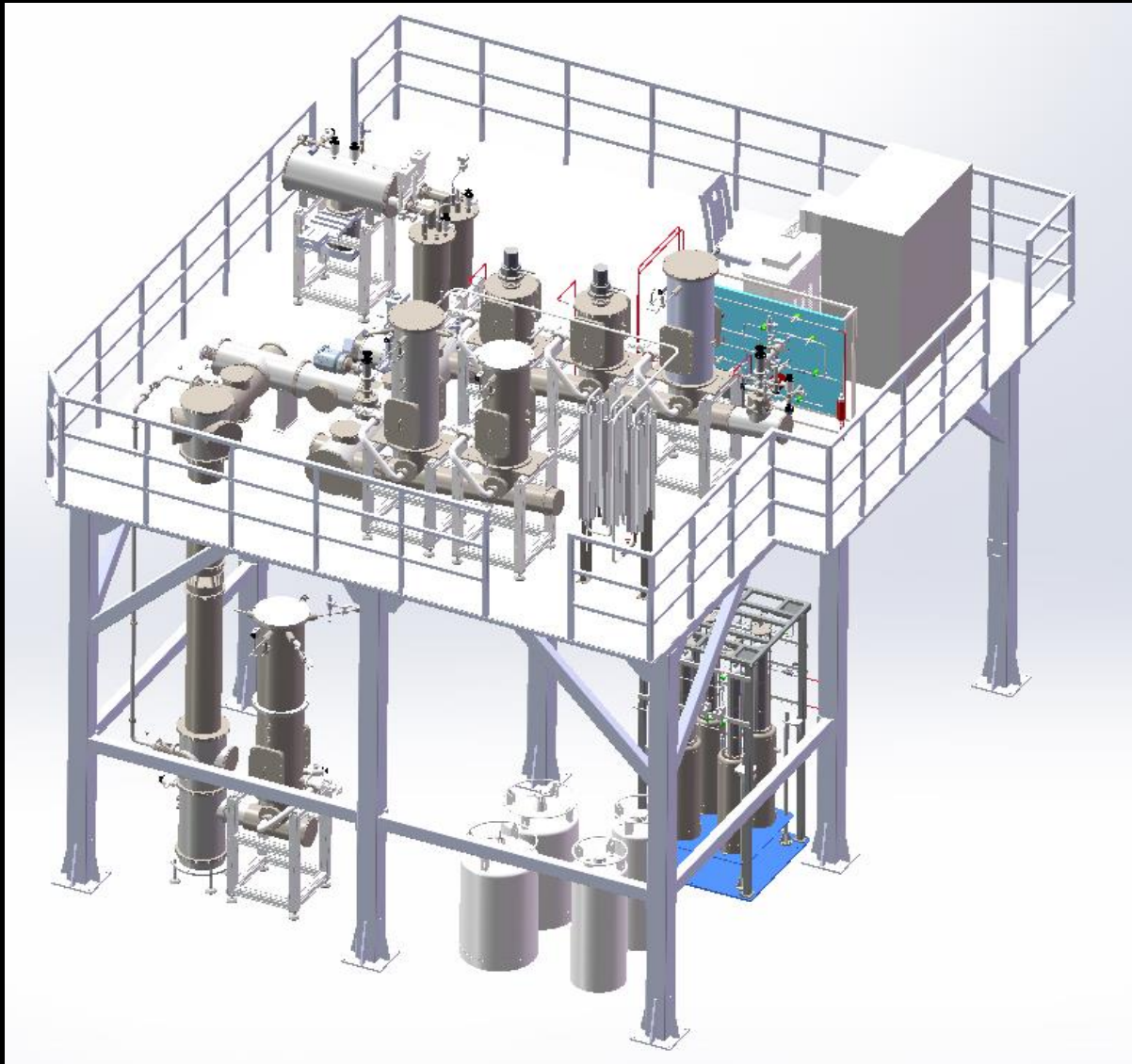
液氙存储和运输系统



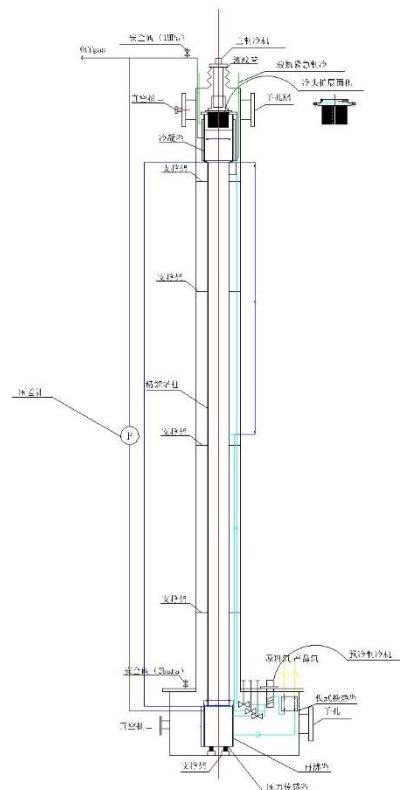
Each storage tank: 6-ton of LXe even under the loss of power
Cryogenic pump: filling/emptying detector @ 1.5 ton/hour.

制冷和循环系统

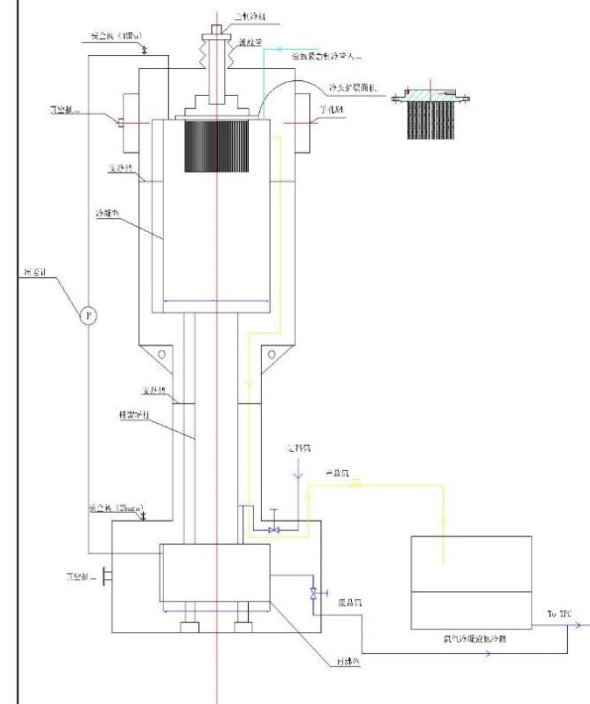
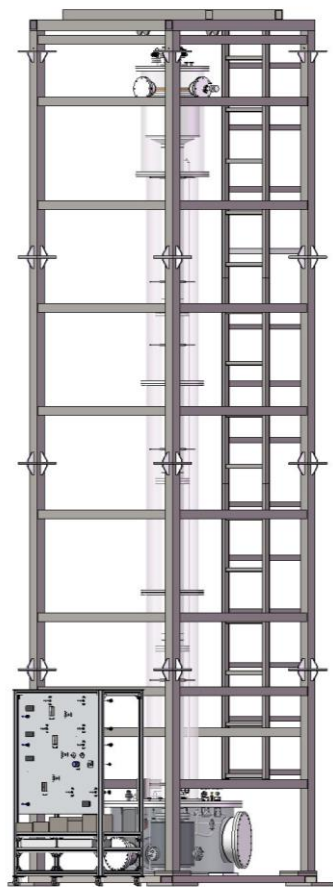
- Cooling Power:
 $\geq 1500\text{W}@178\text{K}$
- Online purification speed:
4-ton/day



精馏系统



图名	Pandak-30T氪氙低温精馏塔示意图	图号		装配图序号		材料	SS304
单位						数量	1
审核						设计/校核	施工/用
设计						设计日期	2021年2月
数量						第 1 页	共 1 页
				Xe 去除 Kr 精馏塔			
				上海交通大学			



图名	Pandak-850T氡氙低温精馏塔示意图	图号		装配图序号		材料	SS304
单位						数量	1
审核						设计/校核	施工/用
设计						设计日期	2021年3月
数量						第 1 页	共 1 页
				Xe 去除 Rn 精馏塔			
				上海交通大学			

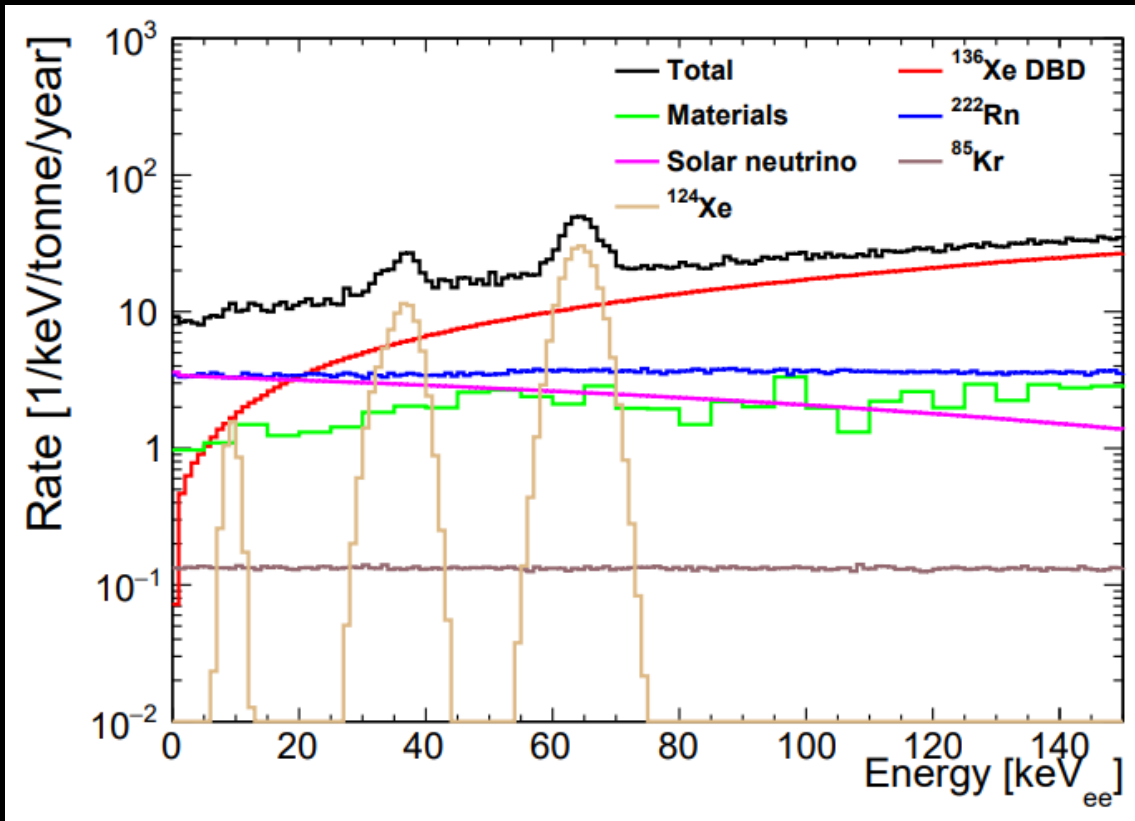
Kr distillation tower : 30 kg/hour.
Target Kr concentration in Xe: 0.01 ppt

Rn distillation tower : 850 kg/hour.
Rn reduced by one orders (Target: 0.5 uBq/kg)

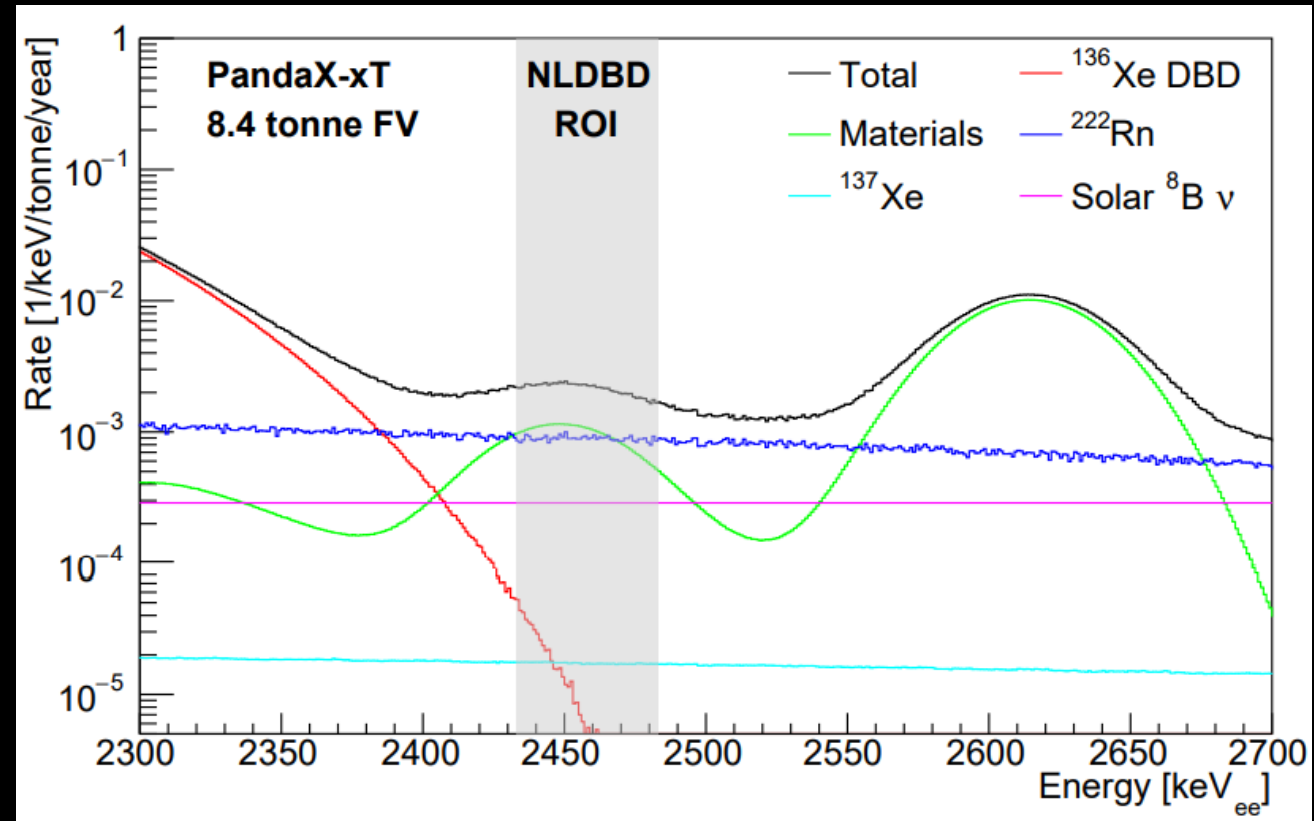
本底来源与假设

Component		Background assumption
1	Photosensors	U/Th/K = 0.02/0.01/1.5 mBq/cm ² Hamamatsu R12699 prototype
2	Inner vessel	U/Th/K 5 ppt (g/g)
3	Kr	0.01 ppt (mol/mol)
4	Rn222	0.5 uBq/kg

中微子成为主要的本底



Low energy: dominated by ^{222}Rn ,
pp neutrino, ^{136}Xe (34.2 ton FV)



High energy: dominated by ^{222}Rn , ^8B
neutrino, and ^{238}U in material (8.4 ton FV)
Note ^{137}Xe (4 min $T_{1/2}$) after muon, key
background for LNGS

技术成熟度

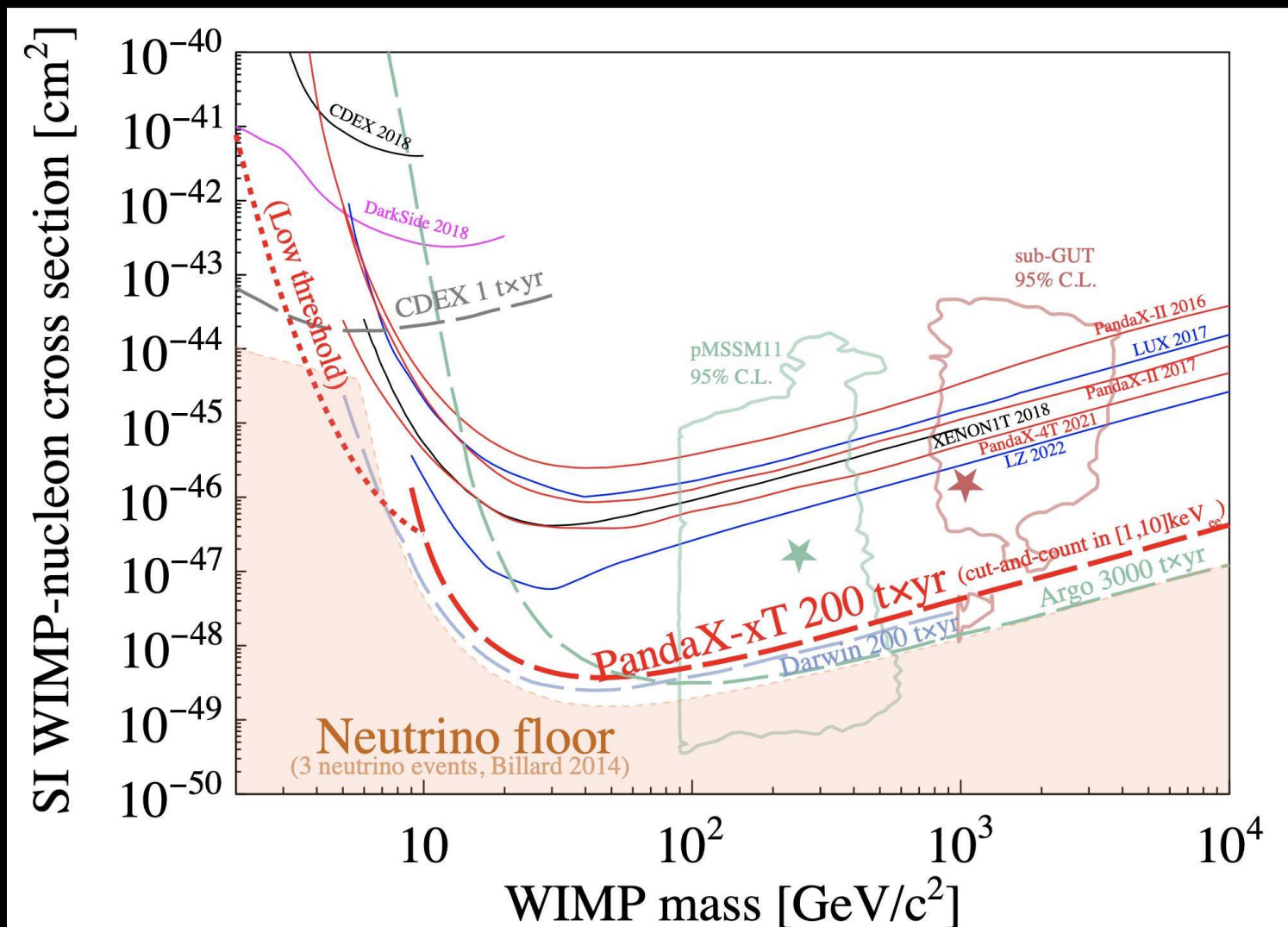
Item	Need	Now	Challenge level
低本底罐体	Cu	Low background SS	***
时间投影室	2.7 m x 2.7 m	1.2 m x 1.2 m	**
光电探测阵列	10 m ² , high QE, low noises, fast	3 m ² , R11410 3" PMT	*
读出电子学	Cold and low background	Custom digitizers 500 MS/s	***
2.5 MeV能量分辨率	1%	1.9%	*
⁸⁵ Kr	0.01 ppt	0.3 ppt	***
²²² Rn	0.5 uBq/kg	5 uBq/kg	***
制冷和循环	500 slpm	150 slpm	**

Key advantage: PandaX will be continuously upgraded, so technological levels will be improved along the way and be tested in real experiment!

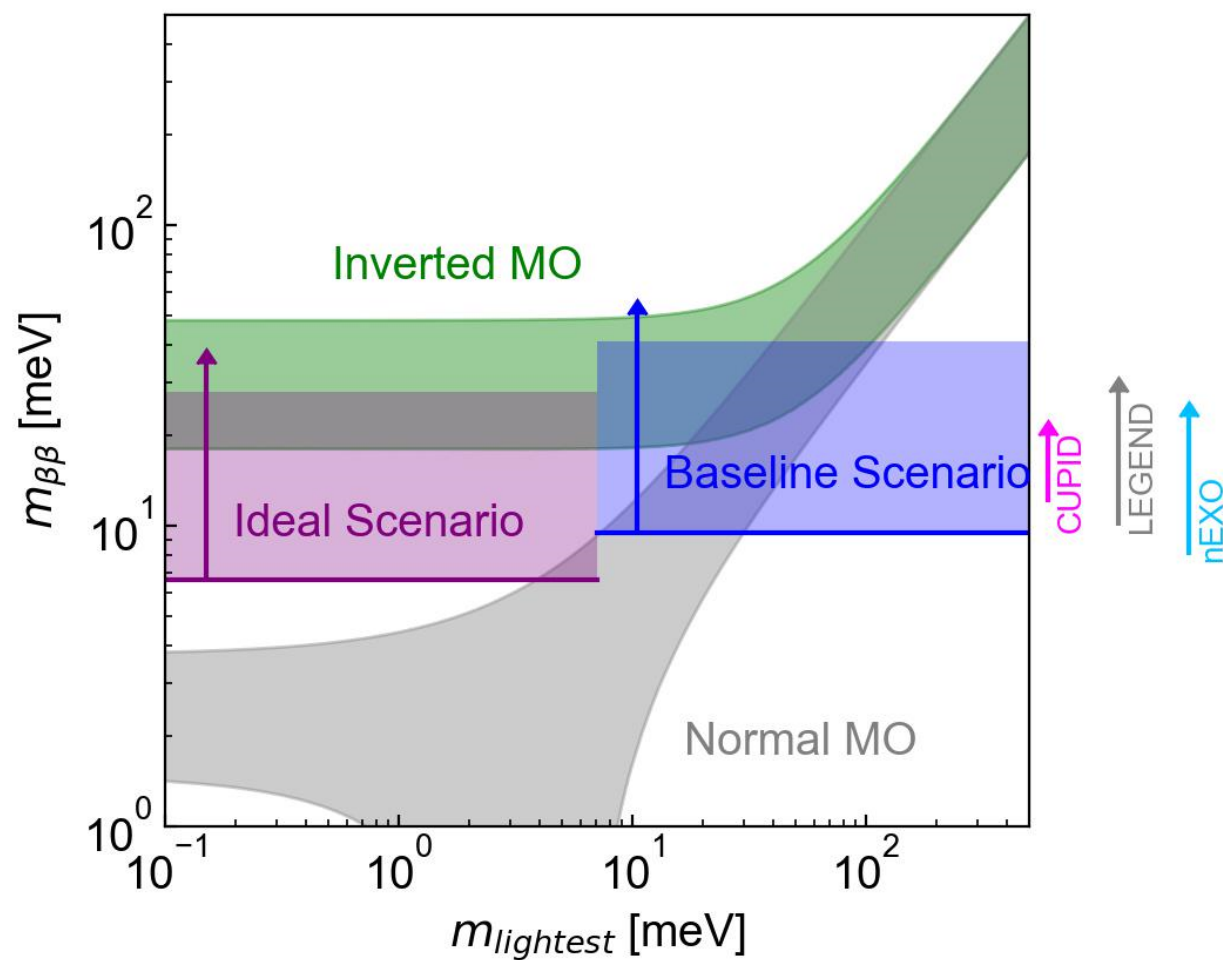
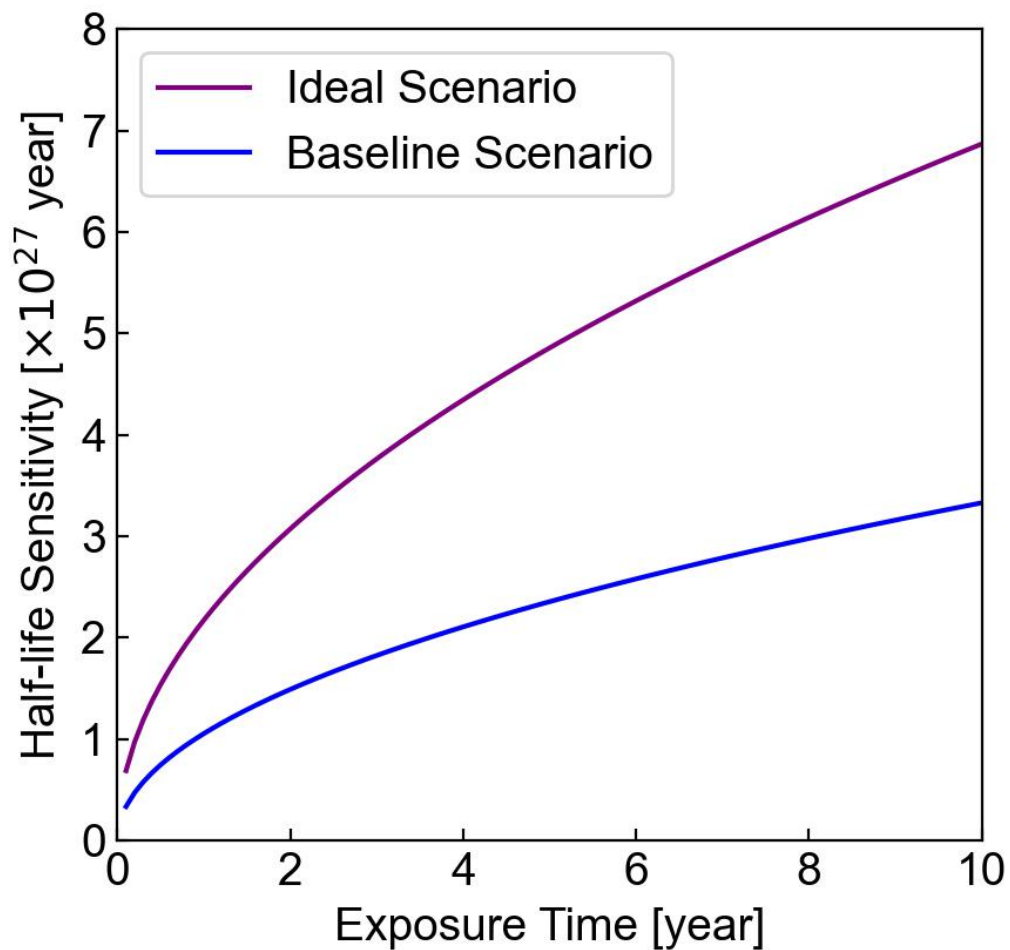
汇报提纲

- 科学意义、国内外研究动态
- 研究基础和前期成果
- 整体研究计划、研究方案、可行性分析等
- 预期成果
- 国际竞争和合作
- 项目团队和已有支持
- 经费预算和执行计划

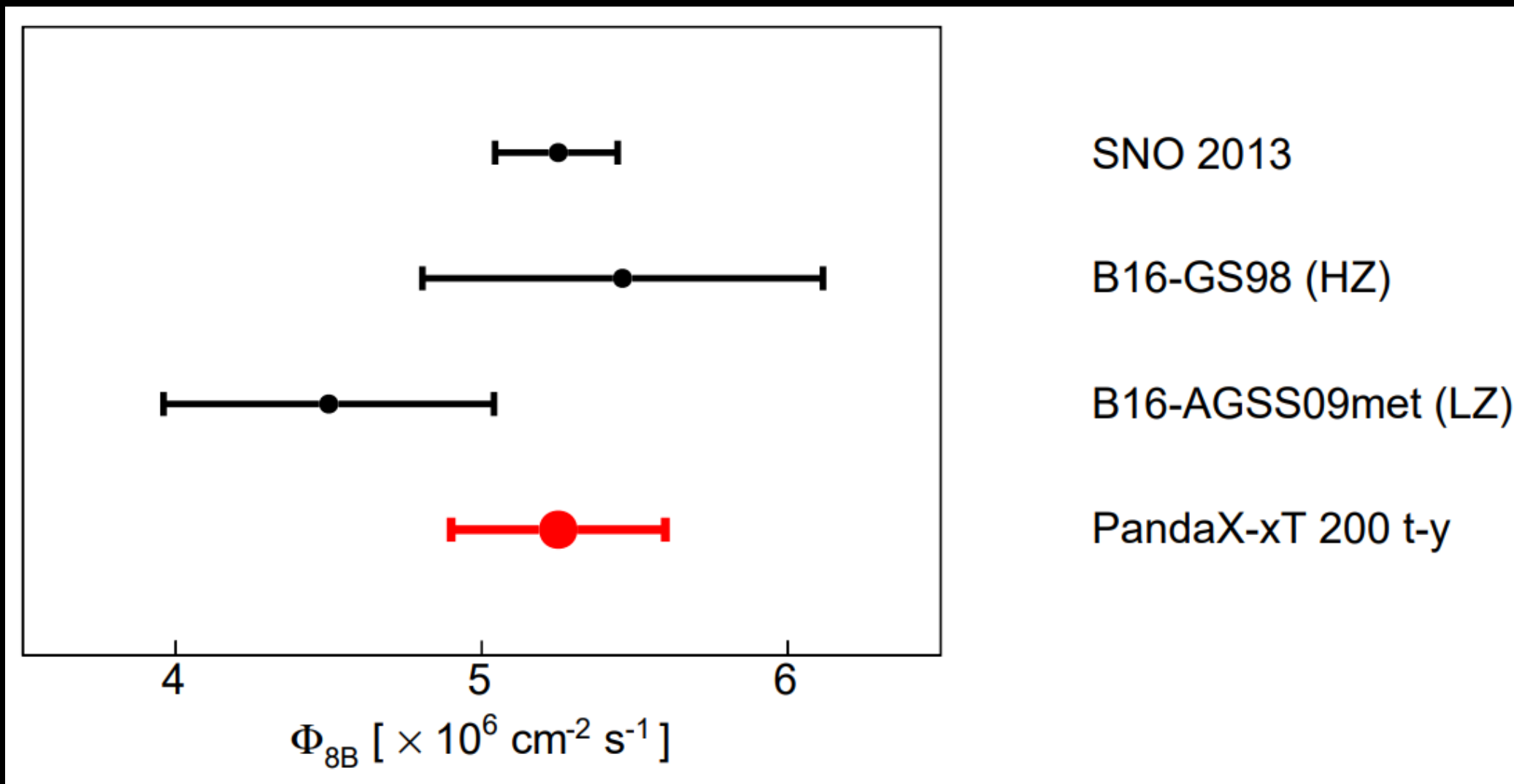
PandaX-xT科学潜力



PandaX-xT科学潜力

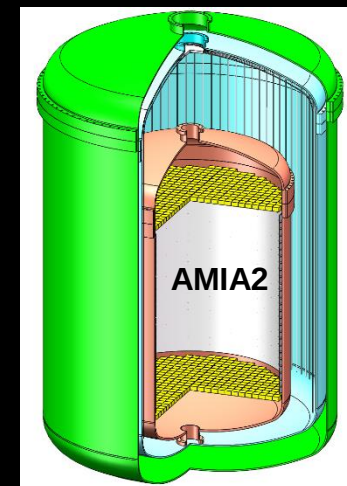
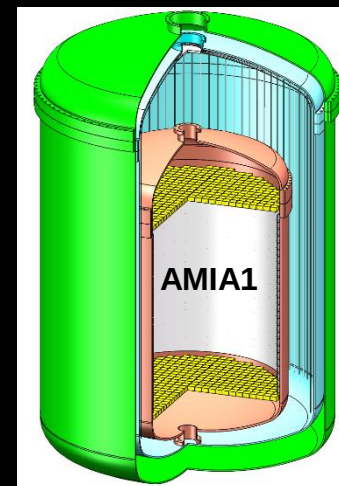
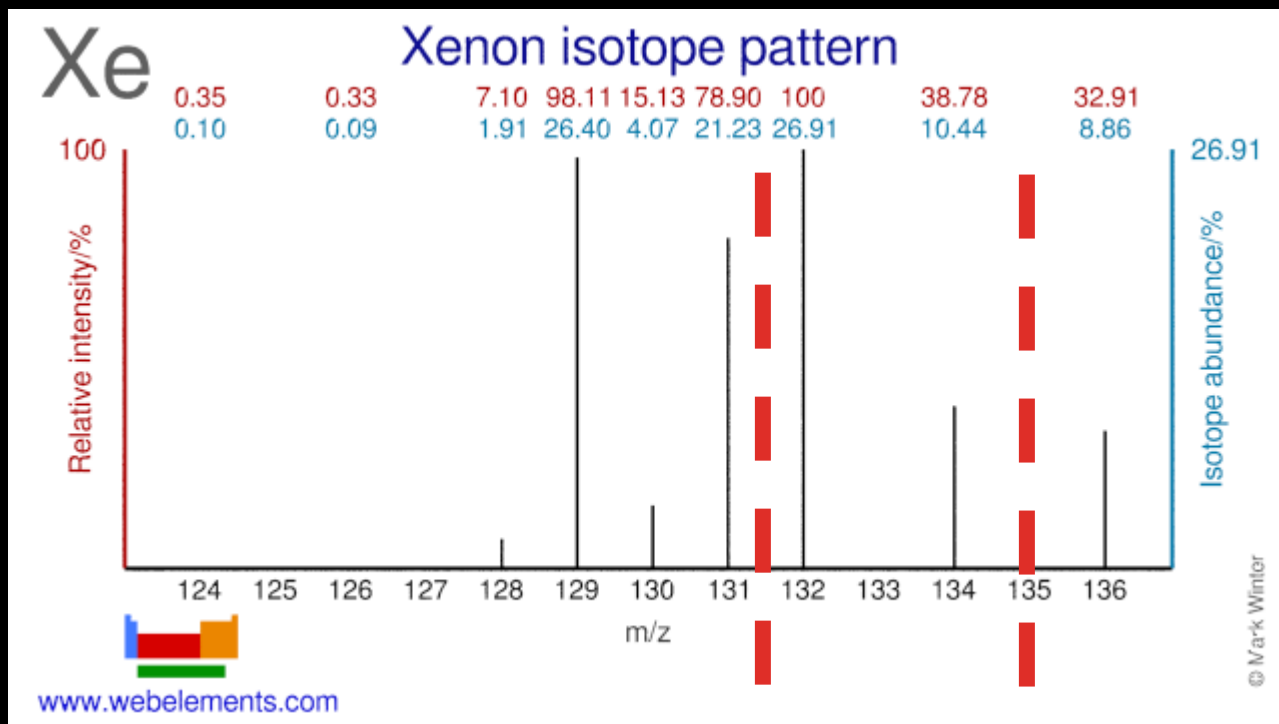


PandaX-xT科学潜力



未来发展规划

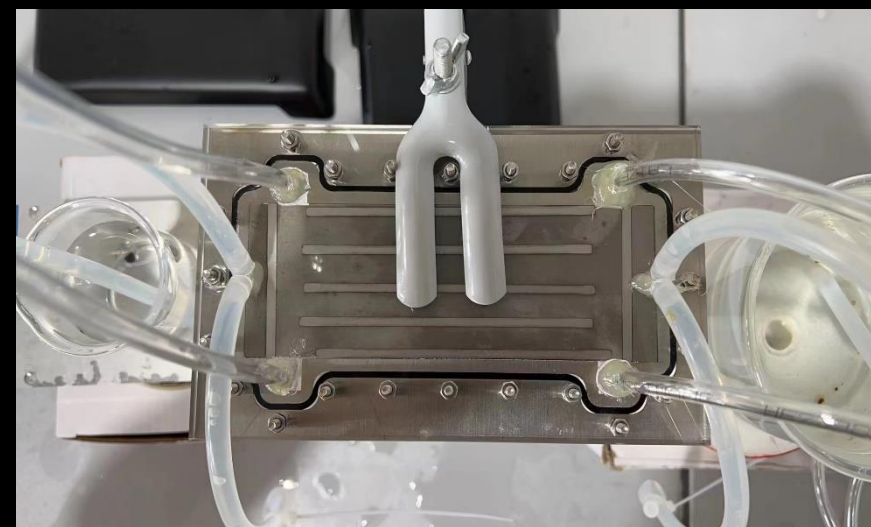
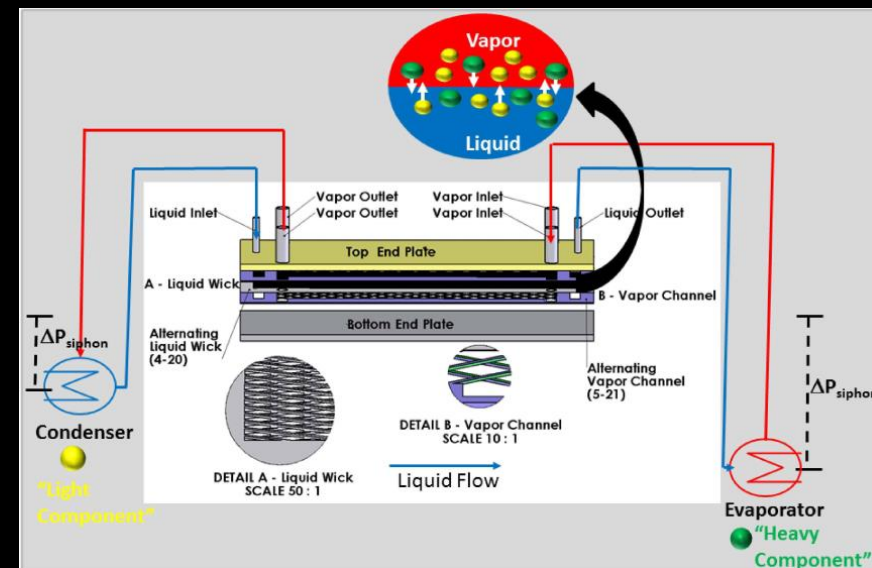
Xenon with artificially modified isotopic abundance (AMIA), either via a split of odd and even nuclei, or further enrichment of ^{136}Xe , **to improve sensitivity to spin-dependence of DM-nucleon interactions and NLDBD**



两个功能全同、不同AMIA的探测器的比对测量可成为发现的 smoking gun!

稳定同位素精馏分离技术

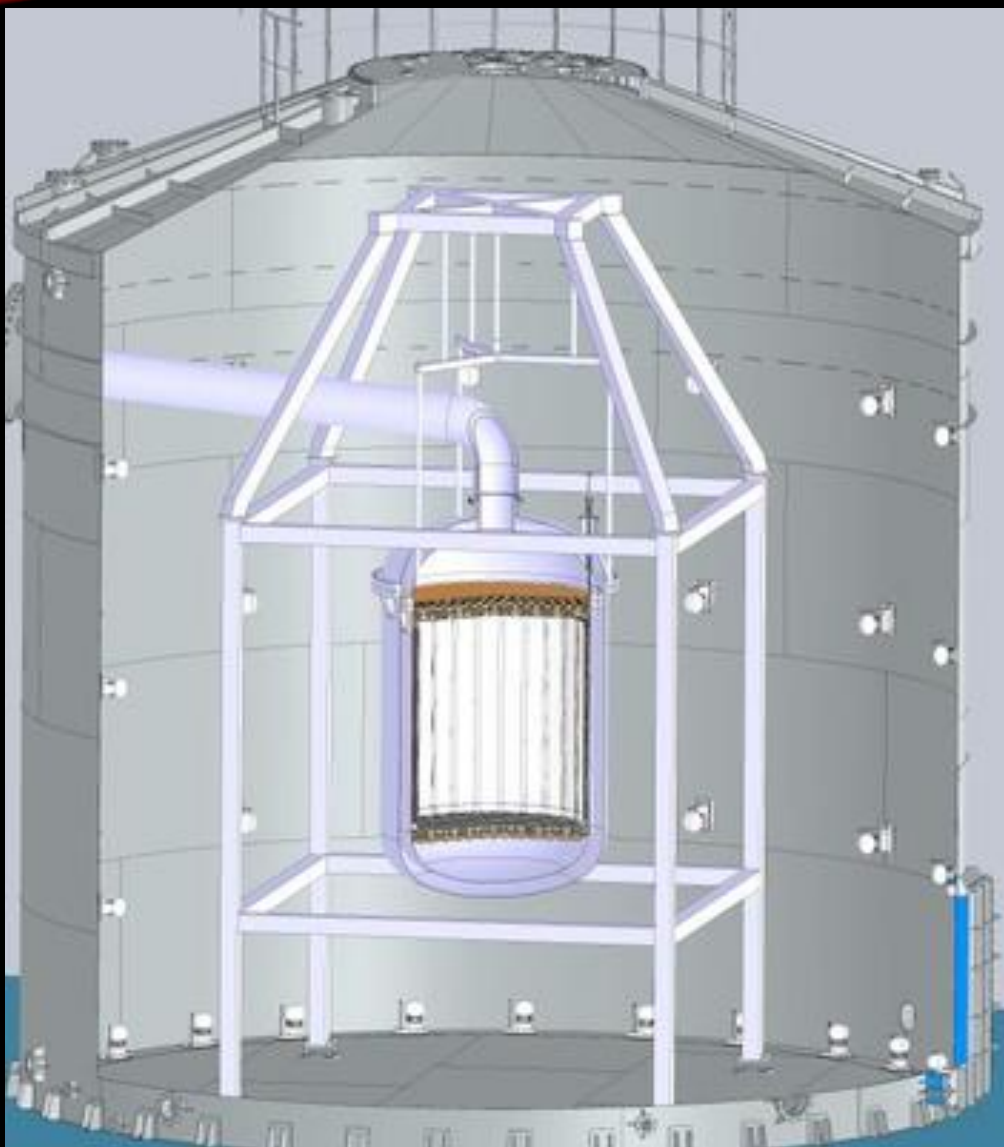
- PandaX合作组在超高纯低温精馏技术研发方面基础雄厚
- 但氙同位素，理论塔高需要千米以上
- 项目组正开发基于微通道精馏（MCD）的高效氙同位素分离技术和设备，实现AMIA
- MCD由微观液相和气相通道组成，**以毛细力代替宏观的重力**，使得精馏塔的运行不再依靠竖直方向的重力提供驱动力，可以水平方向运行
- 目前已经开发出原理样机，正在测试和性能



汇报提纲

- 科学意义、国内外研究动态
- 研究基础和前期成果
- 整体研究计划、研究方案、可行性分析等
- 预期成果
- 国际竞争和合作
- 项目团队和已有支持
- 经费预算和执行计划

国际上类似规划



- XENON和LZ决定完成这一代实验后，共同建设XLZD（40吨级天然液氙）实验
- 美国主导的nEXO目前还是独立于XLZD

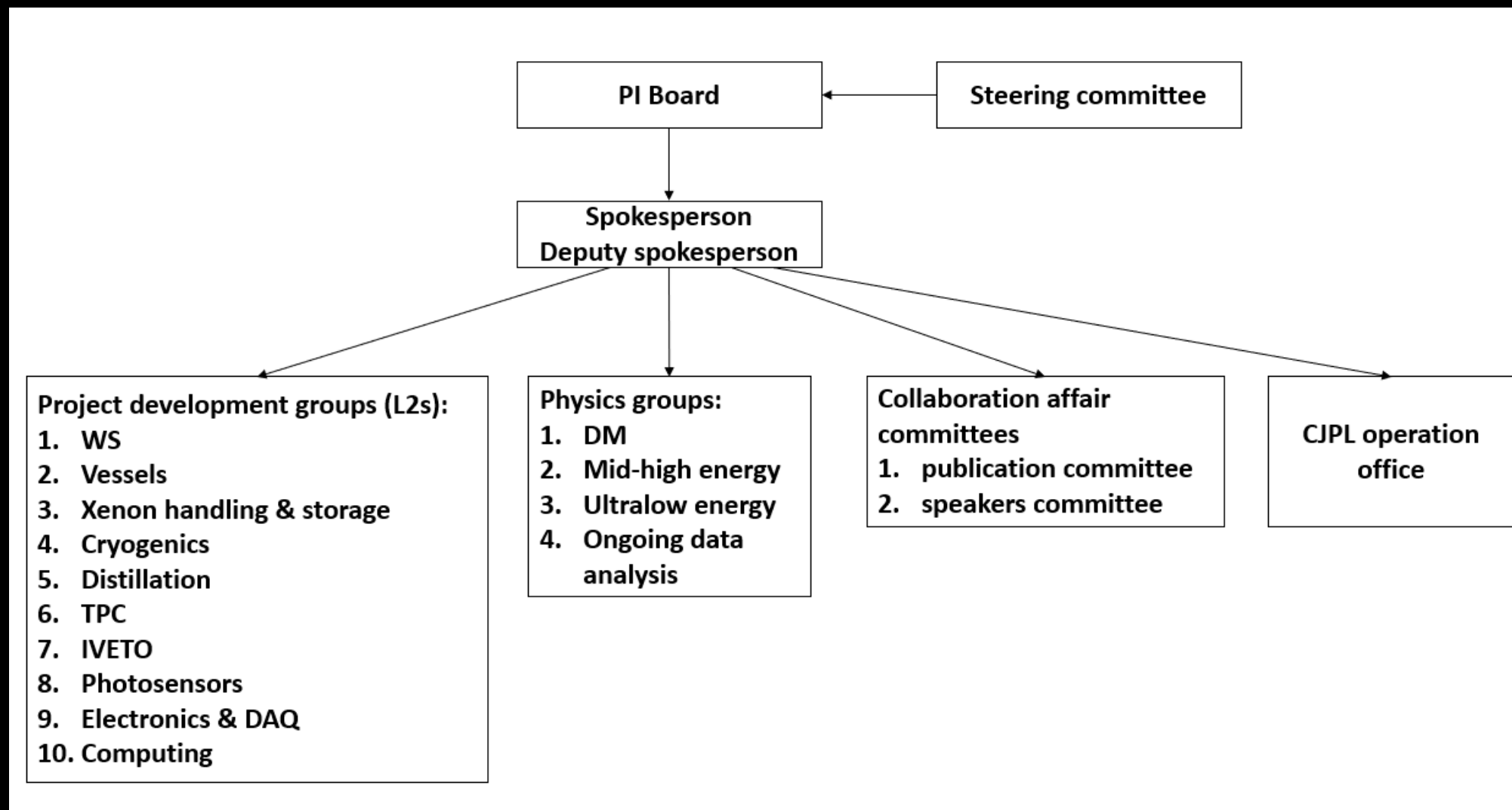
PandaX-xT的特色和创新

1. 逐步升级的发展规划，优化技术成熟度和持续科学产出的需求
2. 锦屏实验室得天独厚的优势
 - 由于地磁场对宇宙线的偏转效应，低纬度的锦屏实验室有着更低的大气中微子本底，是暗物质探测的重要优势之一。
 - 锦屏有着国际最低的宇宙线伴生本底，特别是宇生氡-137，锦屏比意大利的LNGS低了两个数量级，是决定氡136 NLDBD探测灵敏度的关键因素
3. 在氦气供应方面，我国具有巨大的产能优势，使得实验成本更加可控。
4. 通过同位素分离，实现项目长期的引领性

汇报提纲

- 科学意义、国内外研究动态
- 研究基础和前期成果
- 整体研究计划、研究方案、可行性分析等
- 预期成果
- 国际竞争和合作
- 项目团队和已有支持
- 经费预算和执行情况

PandaX合作组



PandaX合作组



PandaX合作组

- China: 9 institutes
- International: 4 institutes
- About one hundred collaborating authors



核心团队



刘江来
教授
马里兰大学博士
发言人



王萌
教授
波恩大学博士
电子学和数据采集



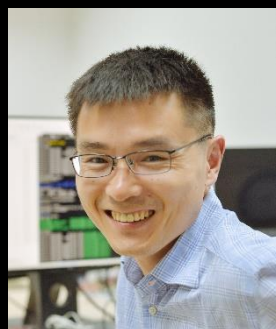
王为
教授
波士顿大学博士
放射性控制



巨永林
教授
中国科学院力学研究所博士
低温精馏



周宁
副教授
哥伦比亚大学博士
液氦时间漂移室研制



韩柯
副教授
耶鲁大学博士
探测器刻度



杨勇
副教授
加州理工博士
电子学和数据采集



孟月
副教授
弗吉尼亚理工博士
低本底技术



邬维浩
长聘教轨特别副教授
中科大博士
核电子学



林箐
特任教授
上海交通大学博士
数据分析



周小朋
副教授
北京大学博士
探测器刻度

牵头单位、已有支持

Tsung-Dao Lee Institute



School of Physics and Astronomy



李所暗物质与中微子平台：1.13亿（发改委）和1千万（上海市科委）

汇报提纲

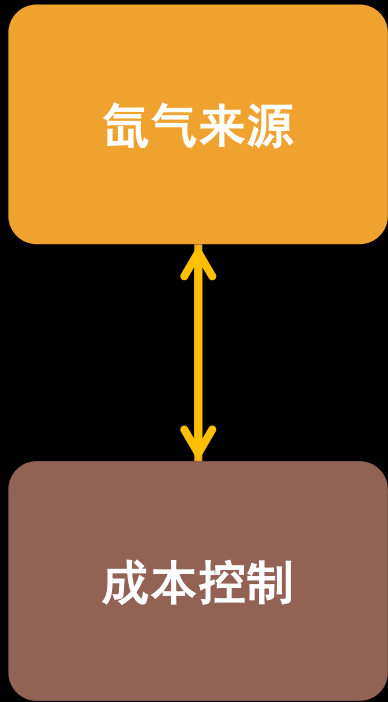
- 科学意义、国内外研究动态
- 研究基础和前期成果
- 整体研究计划、研究方案、可行性分析等
- 预期成果
- 国际竞争和合作
- 项目团队和已有支持
- 经费预算和执行计划

项目预算

子系统	数量/描述	预算（亿）
氙气	45吨	6.75
时间投影室	5（每2年升级一次）	0.5
光电探测系统	10平米，6平方厘米/道，共15000道	1.6
自研电子学（含高压）	15000道高速波形数字化	0.6
极低本底容器	1	0.3
IVETO系统	1	0.05
制冷、循环、精馏、存储系统	1，已有部分支持，需要升级	0.15
超纯水屏蔽体	1，已有部分支持，待升级为反符合和大气中微子探测器	0.5
总计		10.45

氙气

- 本项目第一阶段氙气总量约47吨，其中PandaX-4T实验已有6吨，仍需采购45吨（含10%冗余），价格按照2020年市场价格1.5万/公斤估算。若有新的国际合作团队加入，则根据具体氙贡献量核减。



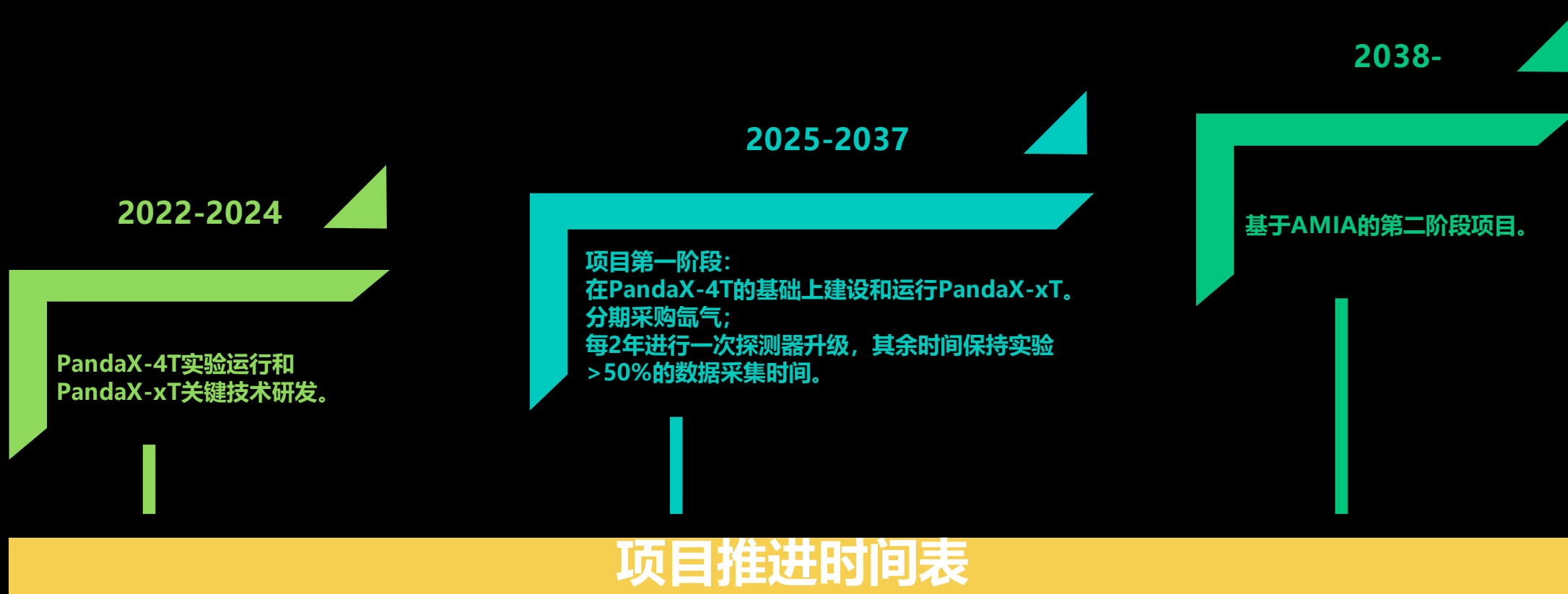
	据初步统计，全球氙气年产量60-80吨，其中国内产能约占50%
	市场短缺和涨价；国际上采用氙的实验同样受到影响
	PandaX合作组已经向国家发改委建议将氙气纳入国家战略资源
	或可以参考SNO向国家租赁的形式？ 或者同生产企业战略合作？
	预期将推动氙气价格回归正常（1.5万/公斤）

氙气大量用于存储芯片蚀刻的载气。
国外半导体公司对国内氙气的收购和囤积。

← 限制出口，控制价格

目前PandaX项目组已有6吨氙气，另外45吨氙气将分期采购。

年度计划



- 为了支持PandaX-xT的预研和实验所需的基础设施，上海交通大学李政道研究所于2019年开始建设暗物质和中微子实验平台，2022年平台将投入运行，正式服务于PandaX-xT的预研工作。

总结

- 我们提出在锦屏实验室二期B2实验厅，开展PandaX-xT实验（43吨液氙靶）。该实验具备更大的科学潜力，有望在暗物质、中微子领域取得重大突破
- 结合和锦屏的优势、PandaX实验的积累和我国氙气资源的优势
- 实施计划采用步步升级计划，降低技术风险，保障持续的科学产出
- 感谢同仁们多年以来对PandaX项目的大力支持！
- 感谢清华大学和锦屏实验室！