



锦屏中微子实验研究进展

李进京

邮箱: lijinjing@hnu.edu.cn

湖南大学物理与微电子科学学院

代表锦屏中微子合作组

2025年9月20日于武汉，第七届粒子物理天问论坛



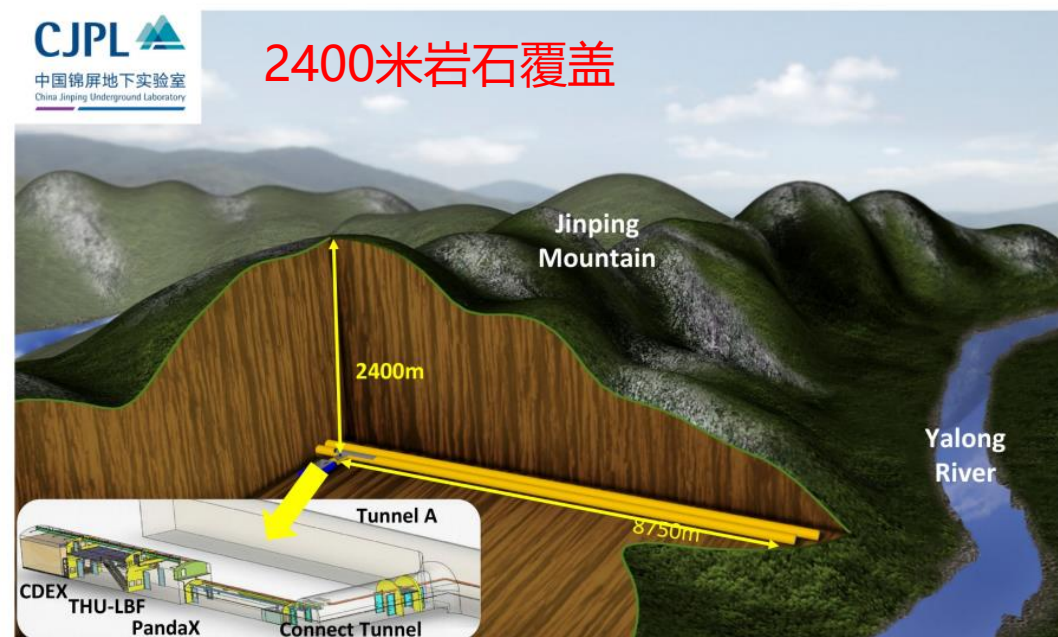
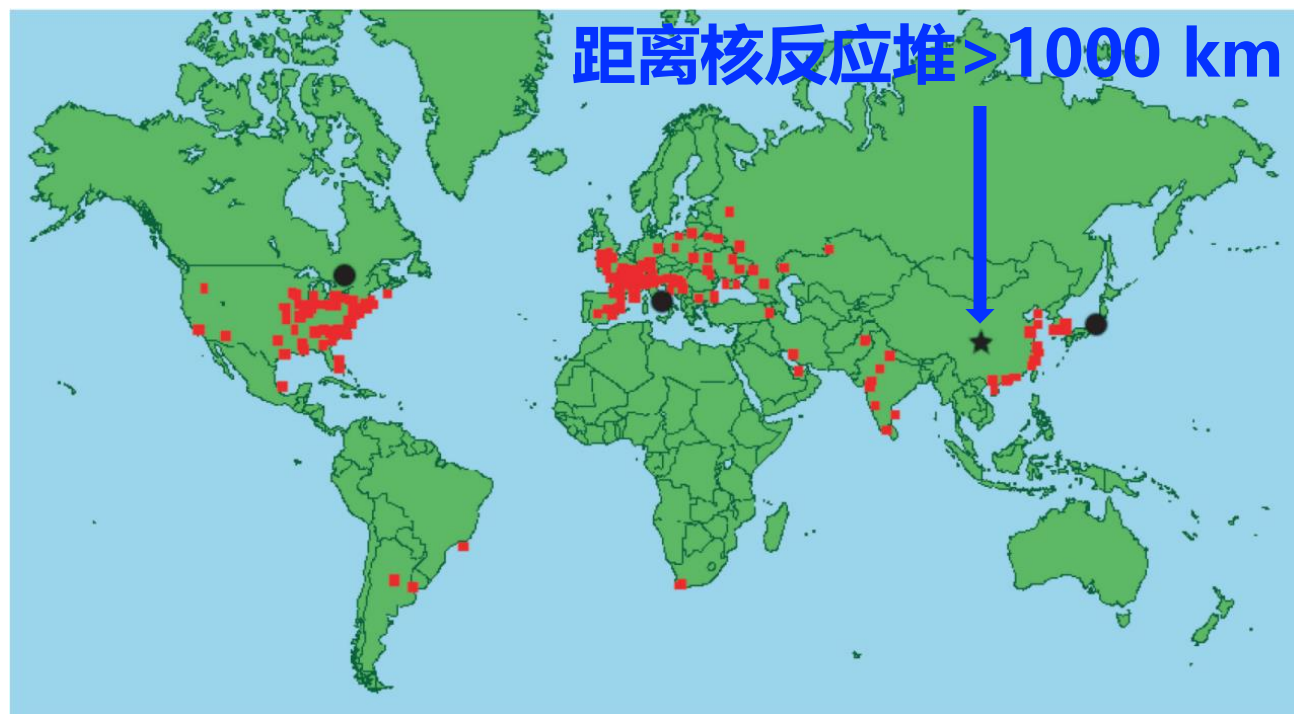
目录

- 简介
 - 中国锦屏地下实验室
 - 锦屏中微子实验
- 一吨原型机
- 五百吨探测器
- 总结

锦屏中微子实验简介

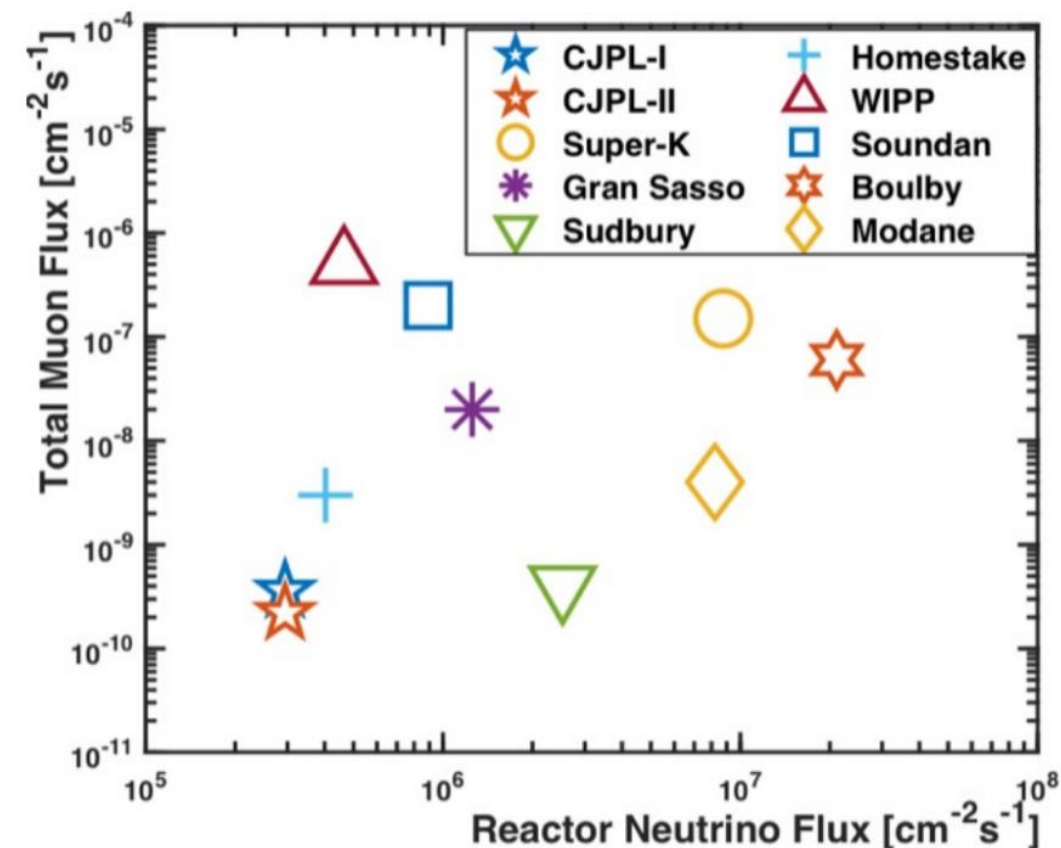
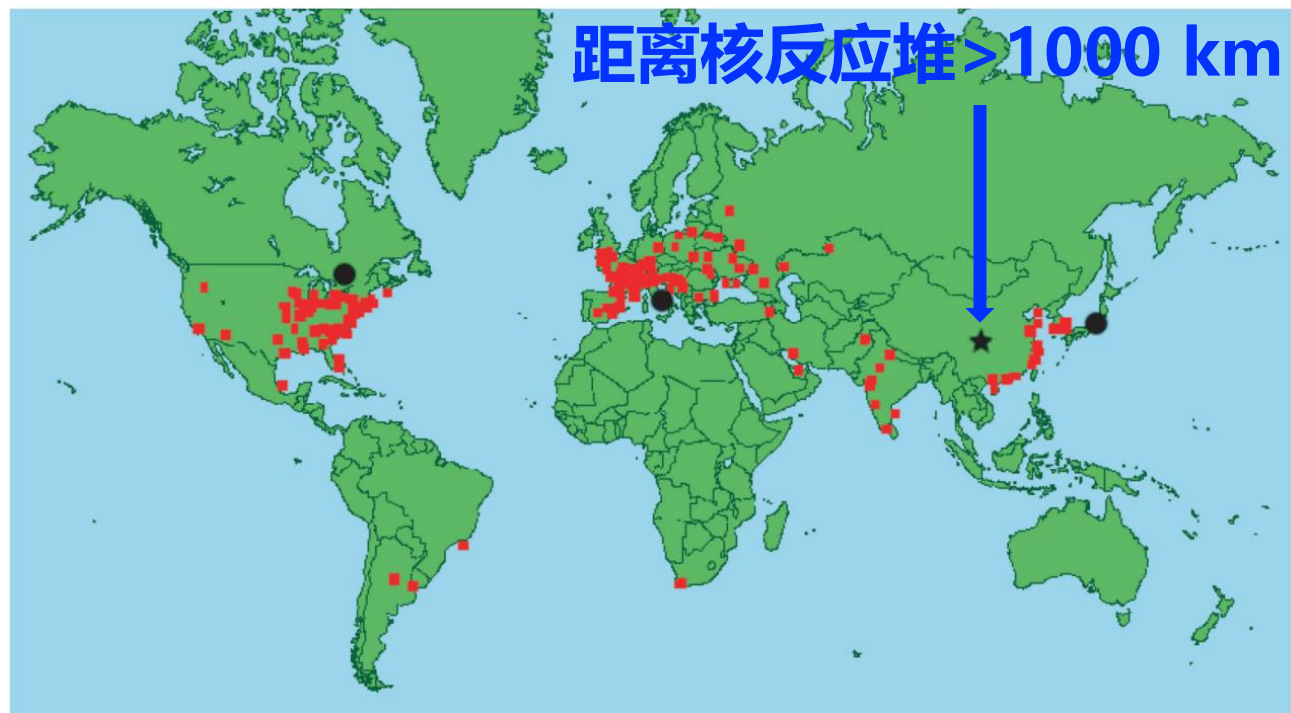
中国锦屏地下实验室 CJPL

具有国际实验室中最低的宇宙线本底和反应堆本底

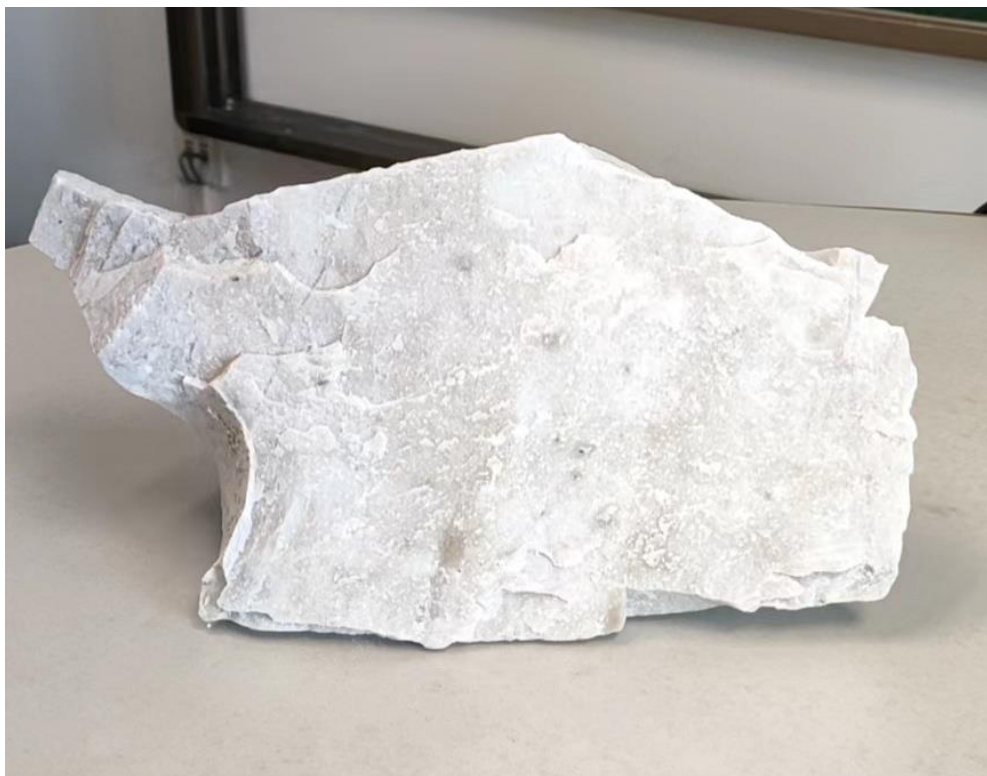


中国锦屏地下实验室 CJPL

具有国际实验室中最低的宇宙线本底和反应堆本底



中国锦屏地下实验室 CJPL



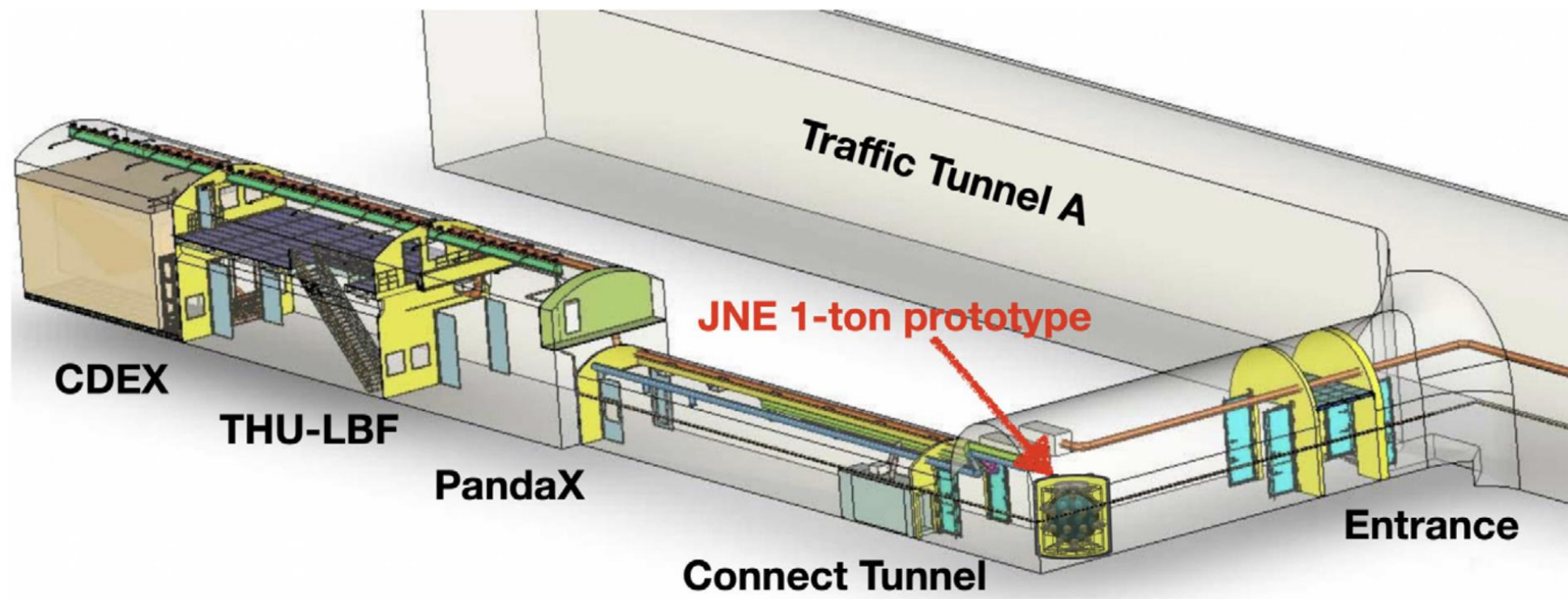
锦屏D2厅基坑岩石样本

- 周围岩石以大理岩为主
- 主要岩石放射性核素含量低于北京地表正常环境的约几十分之一到几百分之一



CJPL一期

- 锦屏中微子一吨原型机自2017年开始在CJPL-I运行采数

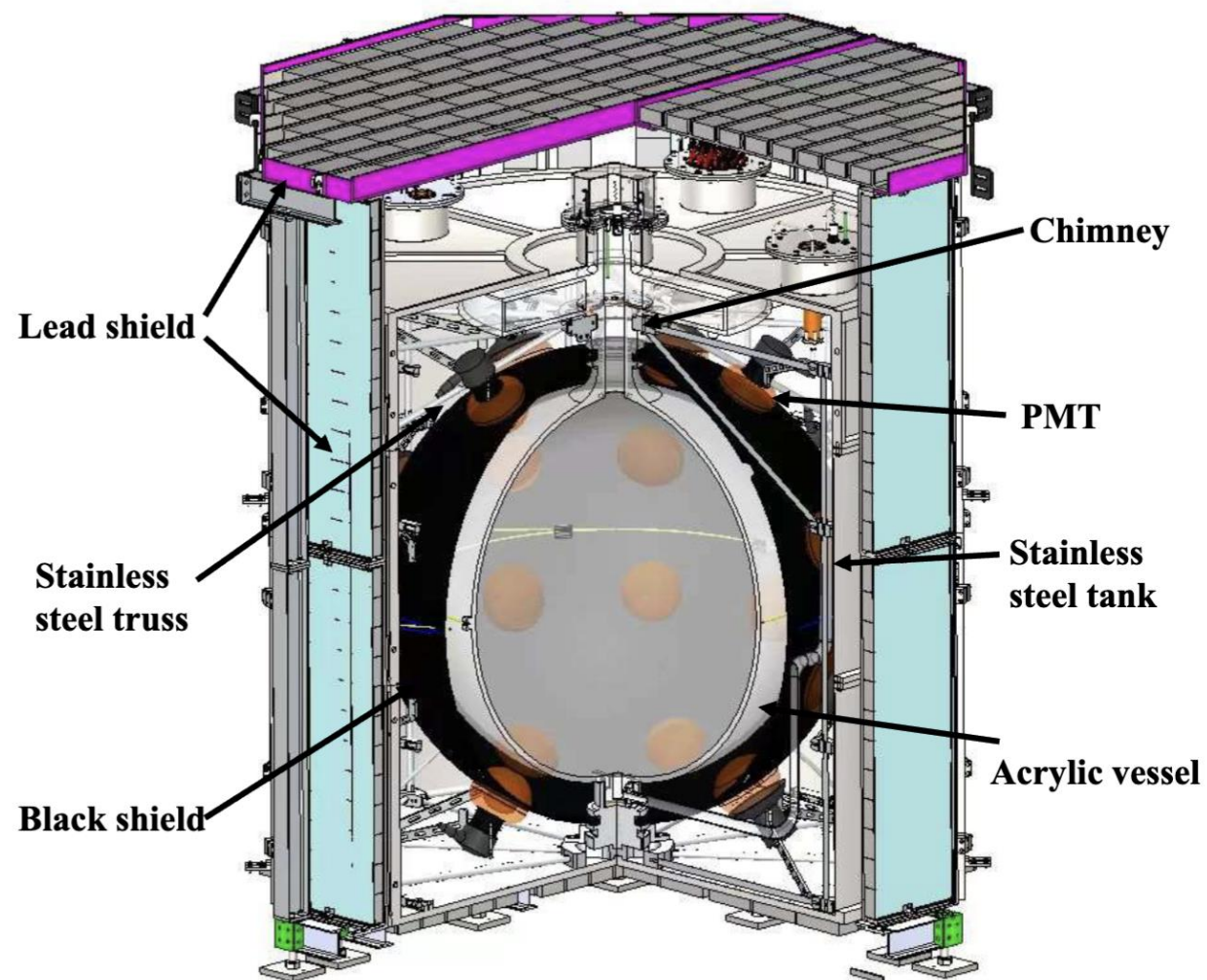


一吨原型机



- 中心亚克力球装载1吨慢液闪
- 测试硬件
 - 包括电子学和PMT等等
- 测试慢液闪性能
- 实地测量本底
 - 宇宙线、天然放射性
- ...

一吨原型机



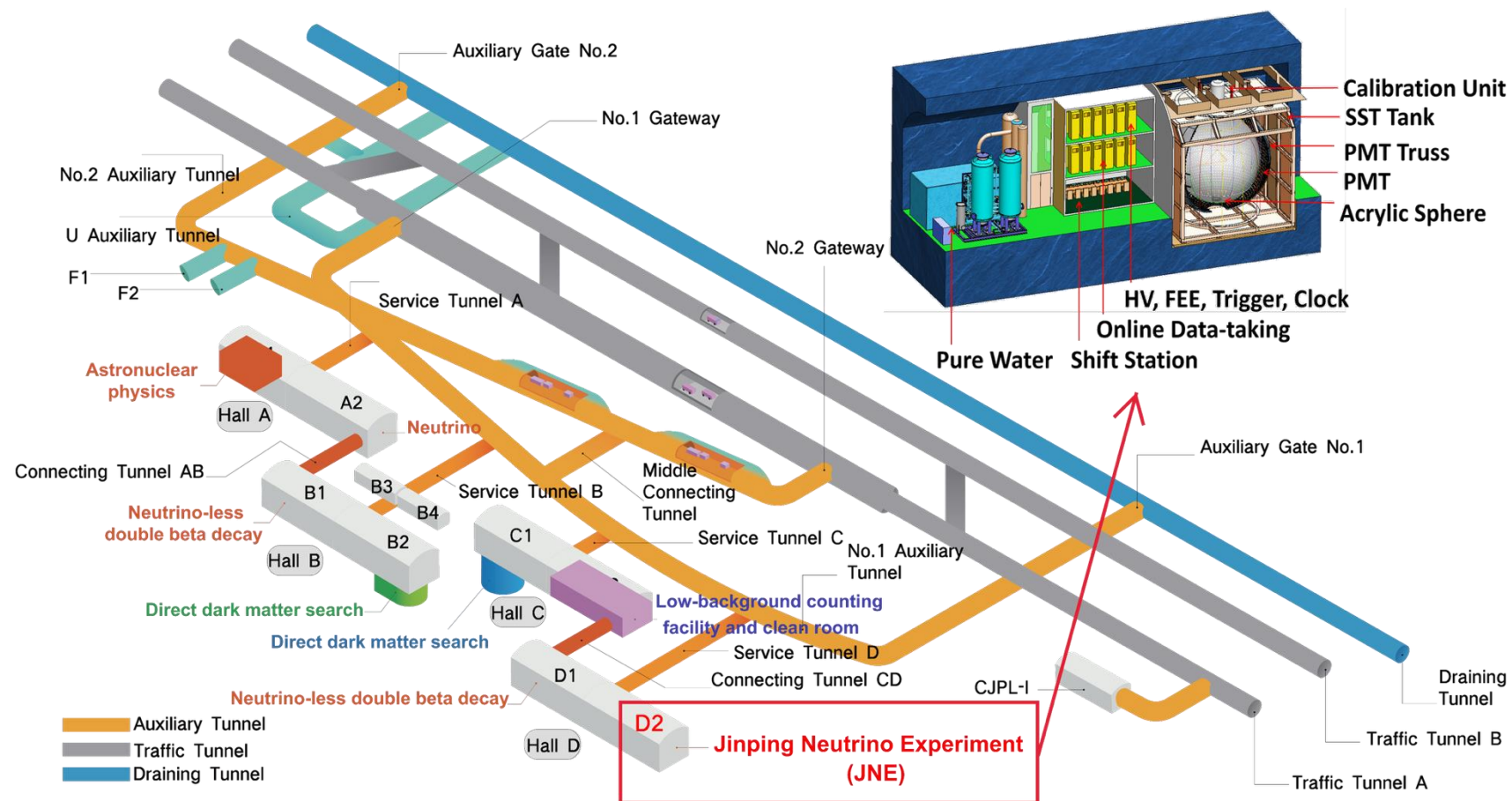
- 中心亚克力球装载1吨慢液闪
- 测试硬件
 - 包括电子学和PMT等等
- 测试慢液闪性能
- 实地测量本底
 - 宇宙线、天然放射性
- ...

CJPL二期



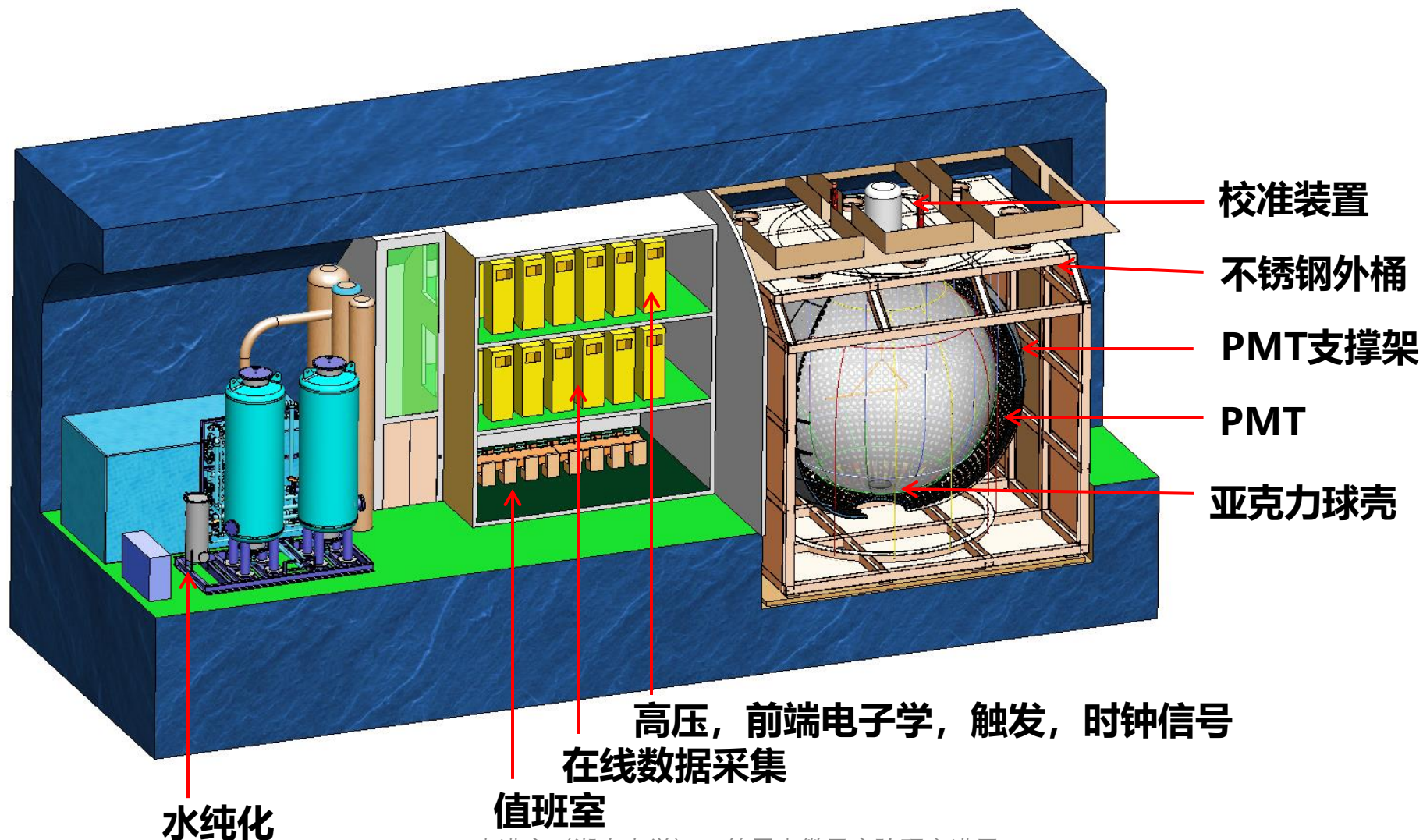
CJPL整体布局

- CJPL-I
 - 2010.12投入使用
 - 4000立方米空间
- CJPL-II
 - 2023.12交付
 - 33万立方米
- 国际最大最深实验室



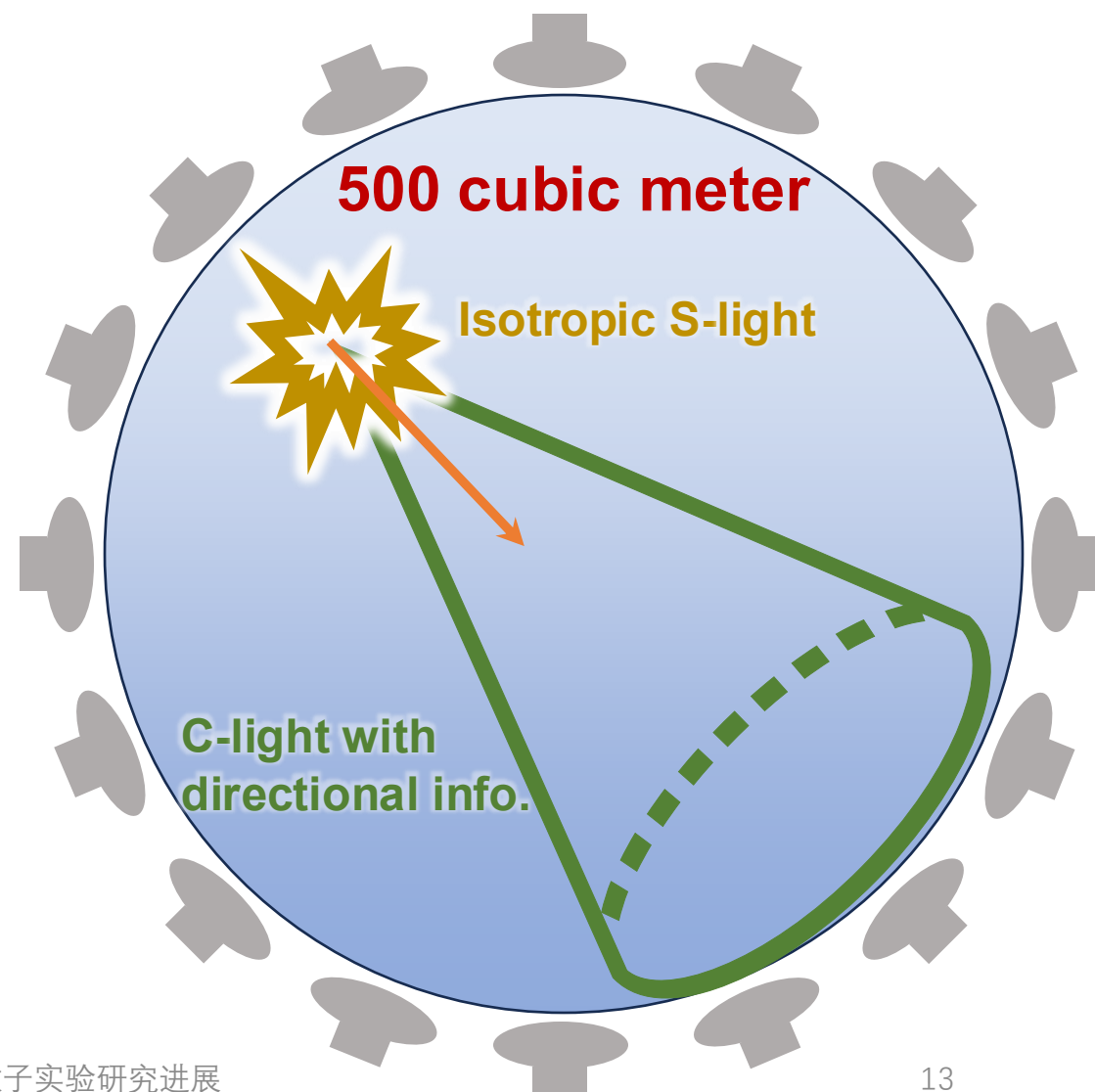


锦屏中微子五百吨探测器规划



锦屏中微子实验的最大特色

- 使用慢液闪作为靶物质
 - “慢” → 区分切伦科夫光和**闪烁光**
 - 同时重建粒子的能量和方向
 - **达到极低本底的目标**
- 对物理课题的帮助
 - 粒子鉴别（切伦科夫光强度）
 - 利用太阳角剔除太阳中微子信号中的天然放射性本底
 - 获得超新星中微子的方向
 - 获得地球中微子的方向

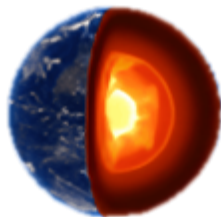


物理目标



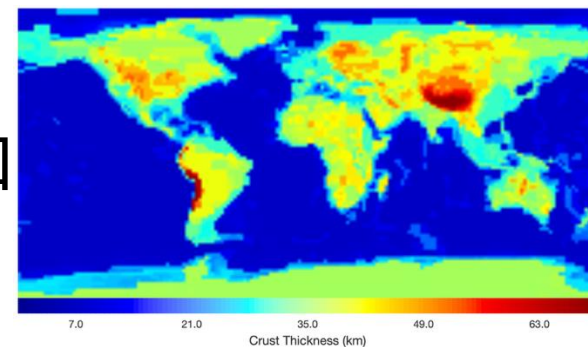
- **太阳中微子观测站**

- 极低宇生本底，通过太阳角排除天然放射性本底
- 真空-物质振荡过渡
- CNO中微子精确测量，高低金属丰度...



- **地球中微子**

- 临近青藏高原，提供地质迁移研究窗口
- 流强测量，U/Th比，放射性产热贡献



- **超新星中微子**

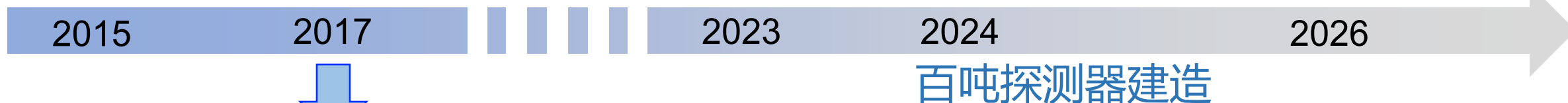
时间规划

- 😄 • 百吨探测器结构设计
- 😄 • 逐事例方向重建与粒子鉴别
- 😄 • FADC和读出电子学设计与测试
- 😄 • 8-inch MCP-PMT研发

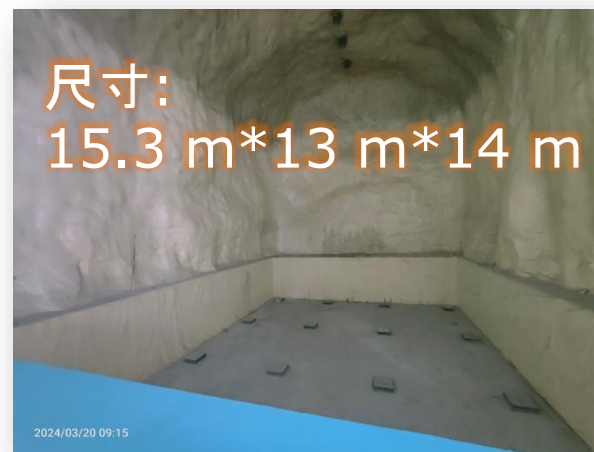
Letter of Intent

→ ArXiv:1602.01733

百吨探测器安装与采数



2025/9/20



李进京 (湖南大学) 锦屏中微子实验研究进展



15

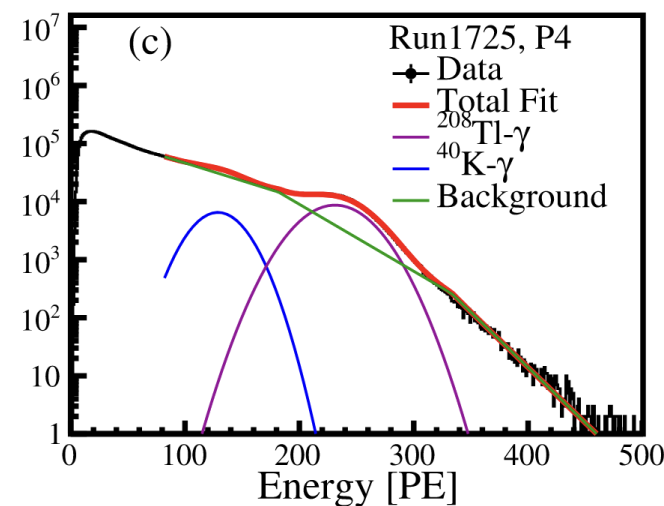
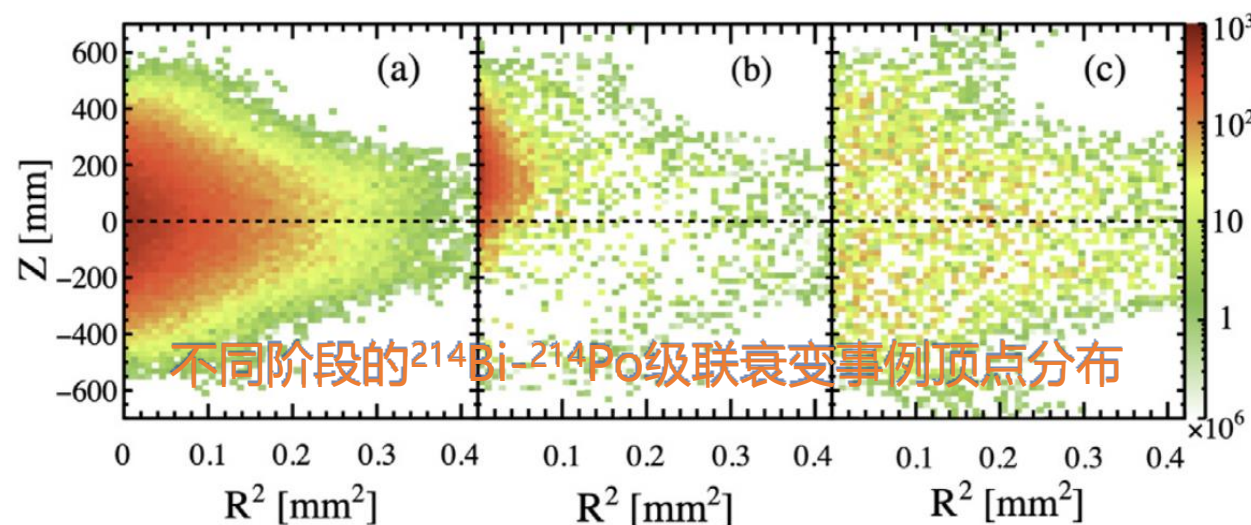
一吨原型机研究进展

一吨原型机：放射性本底

详见期刊论文

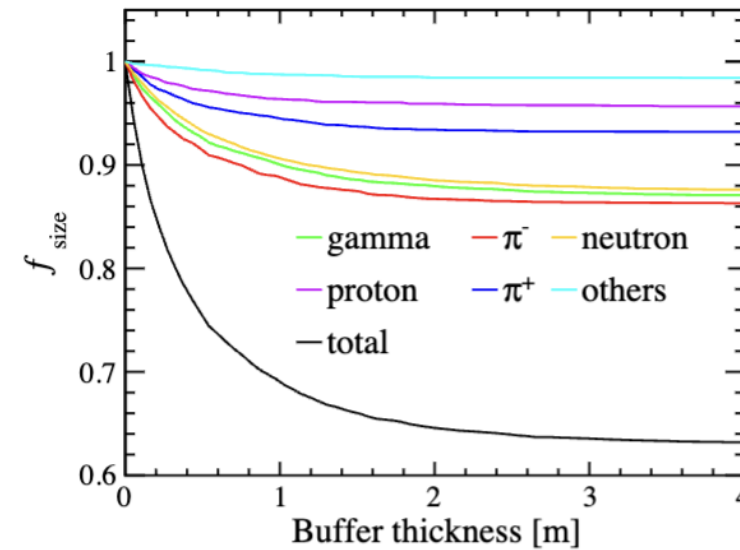
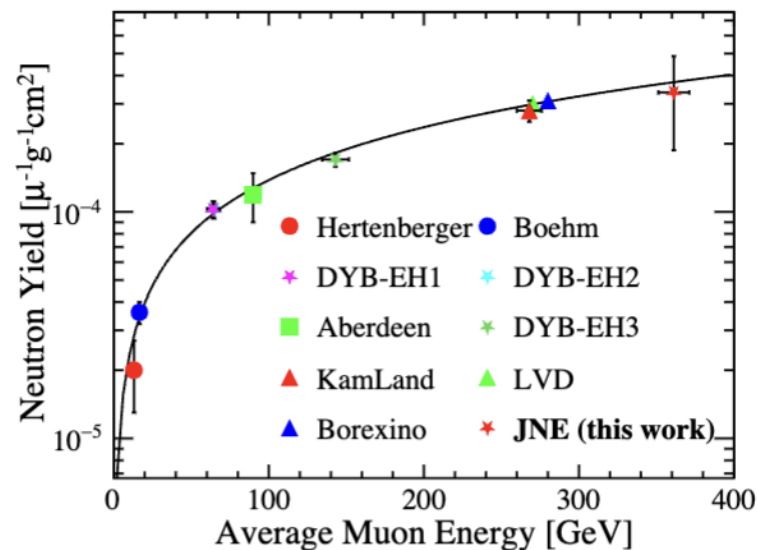
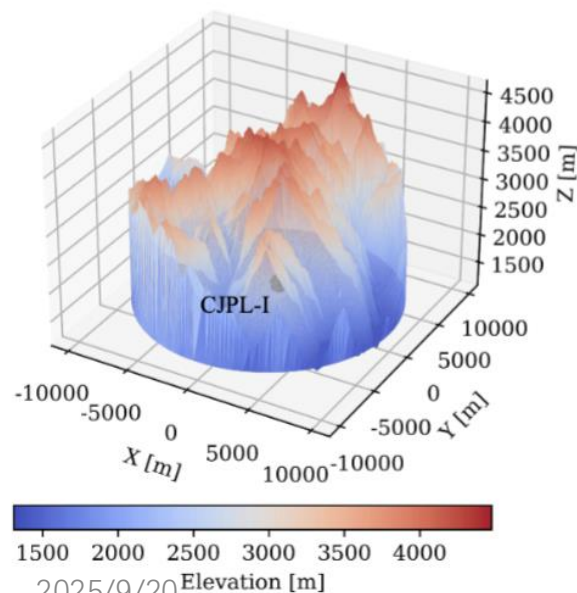
• NIM-A 1054 (2023) 168400

- 在无外源情况下利用暗噪声和天然放射性完成PMT刻度，和事例重建
- 利用 ^{214}Bi - ^{214}Po 的 β - α 级联衰变监测氦气泄漏，安装氮气系统
- 利用 β - α , γ 等信号测量PMT和液闪的放射性污染水平
 - PMT: $^{232}\text{Th} \rightarrow (1.12 \pm 0.32) \times 10^{-6} \text{ g/g}$; $^{40}\text{K} \rightarrow (4.67 \pm 1.35) \times 10^{-8} \text{ g/g}$
 - 液闪: $^{238}\text{U} \rightarrow (1.28 \pm 0.16) \times 10^{-12} \text{ g/g}$; $^{232}\text{Th} \rightarrow < (2.49 \pm 0.50) \times 10^{-13} \text{ g/g}$



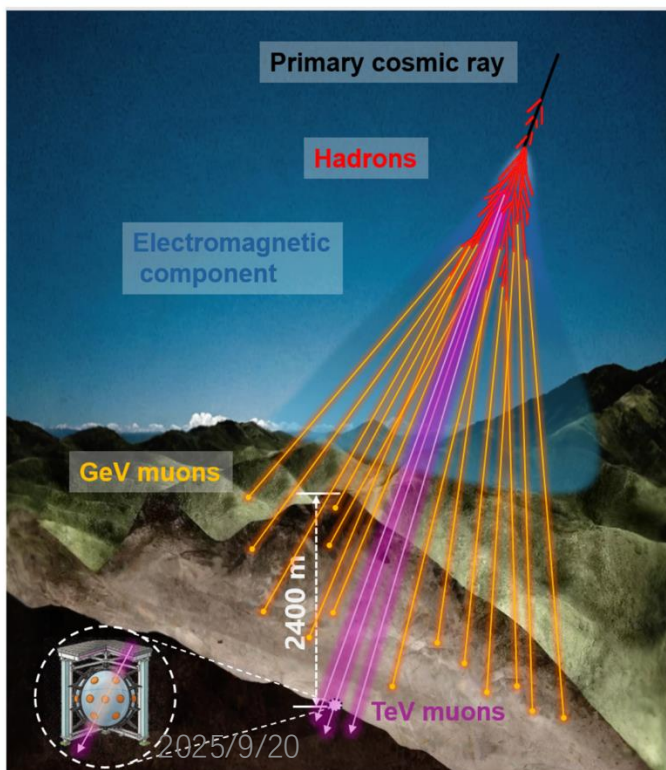
一吨原型机：宇宙线缪子及其本底

- 使用1178天数据对缪子通量和缪致中子产额展开详细研究
- 缪子通量： $(3.56 \pm 0.16_{\text{stat}} \pm 0.10_{\text{syst}}) \times 10^{-10} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$
 - ~ 0.4 个缪子每天
- 提供国际上在液闪中缪子平均能量 ($\sim 360 \text{ GeV}$) 最高的缪致中子产额点： $(3.37 \pm 1.41 \pm 0.31) \times 10^{-4} \mu^{-1} \text{g}^{-1} \text{cm}^2$,
 - 针对小型探测器，提出尺寸修正因子，并分析了不同次级粒子的贡献



一吨原型机：宇宙线缪子流强预测

- Muon Puzzle:
 - 基于现有QCD模型对大气簇射模拟得到的缪子通量与测量相比存在明显缺失 (≥ 100 PeV)
- 物理研究：锦屏山体屏蔽提高了测量到的“原初”缪子能量：3 TeV-0.1 PeV
 - 目前观测到40%的流强偏差，可以限制QCD和大气模型，间接研究Muon Puzzle



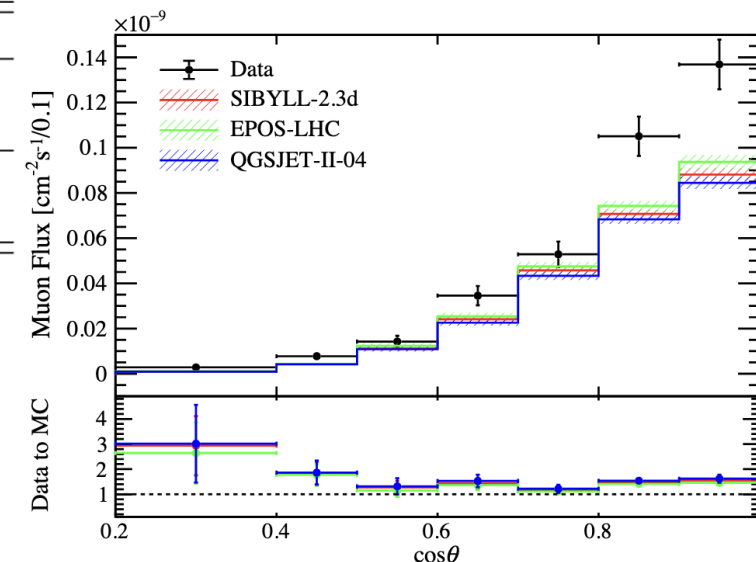
误差研究

		Uncertainty [%]
Measurement	Statistics	4.2
	Systematics	2.2
Prediction	Seasonal variation	0.5
	Detector position	1.6

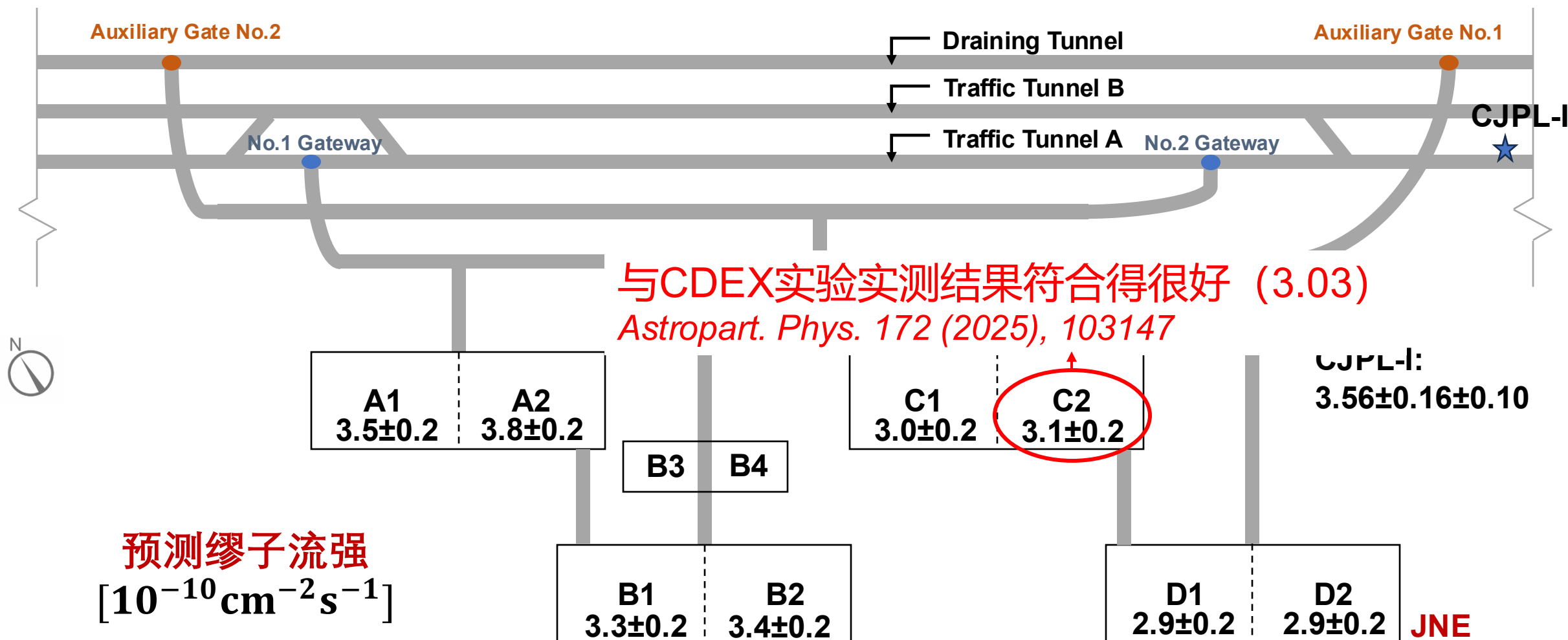
和常用QCD模型结果比较

Model	Flux ratio	Excess significance
SIYBLL-2.3d	1.44 ± 0.07	6.0σ
EPOS-LHC	1.38 ± 0.07	5.5σ
QGSJET-II-04	1.51 ± 0.08	6.7σ

在角分布上的比较无明显趋势

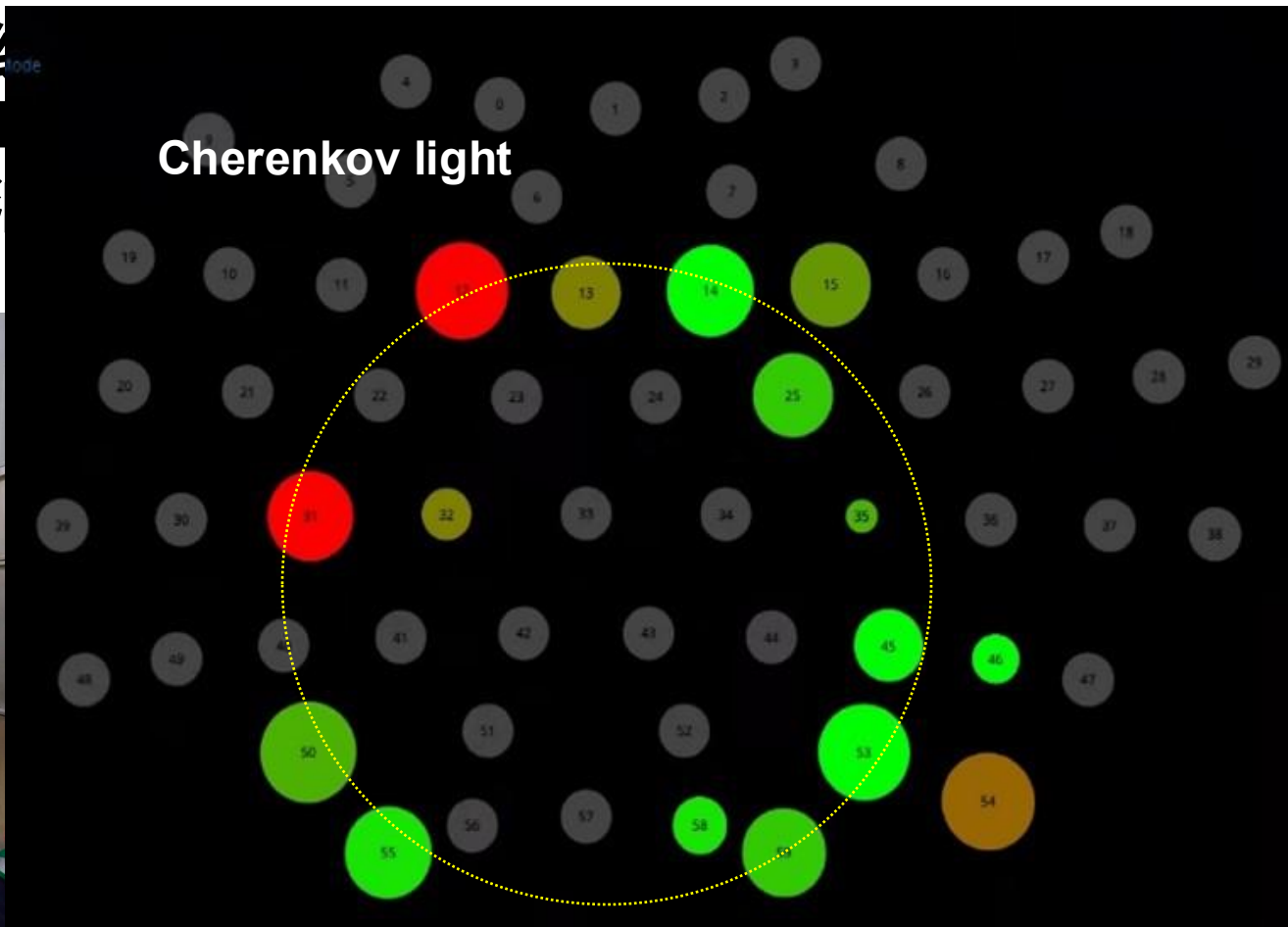


一吨原型机：宇宙线缪子流强预测



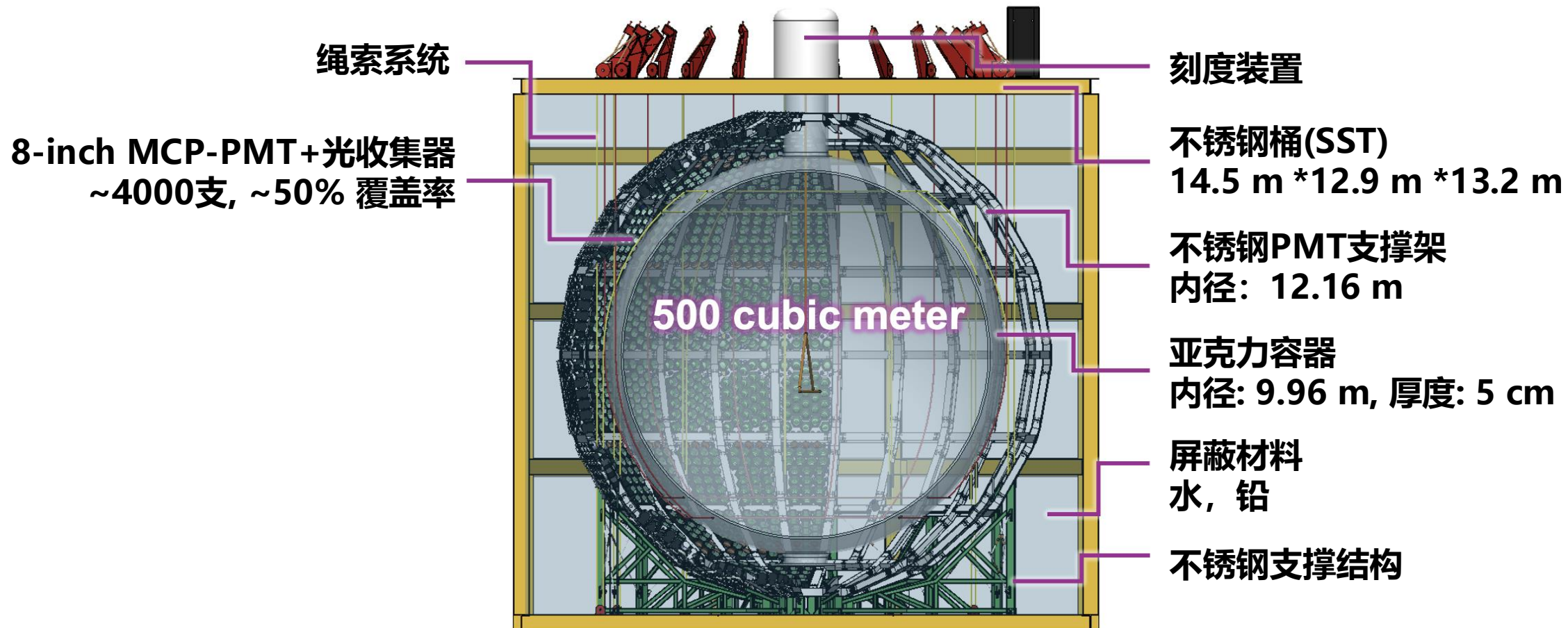
一吨原型机升级

- 主要升级
- 作为百吨
- 目前以



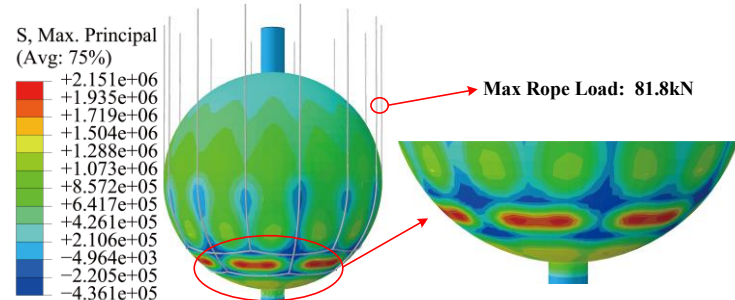
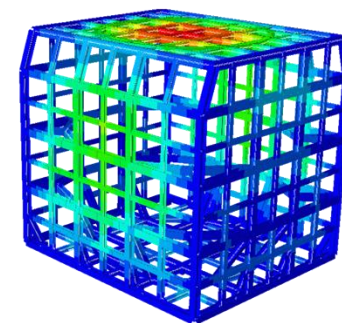
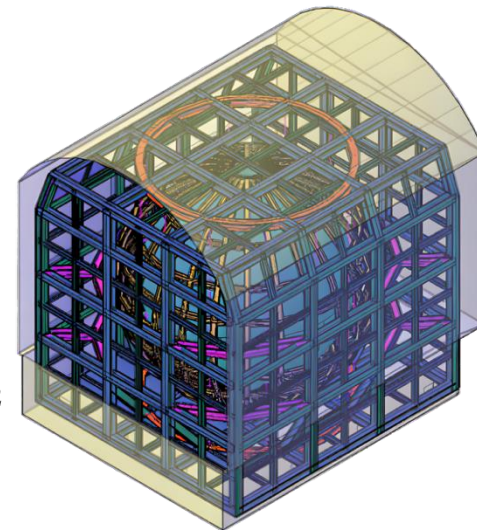
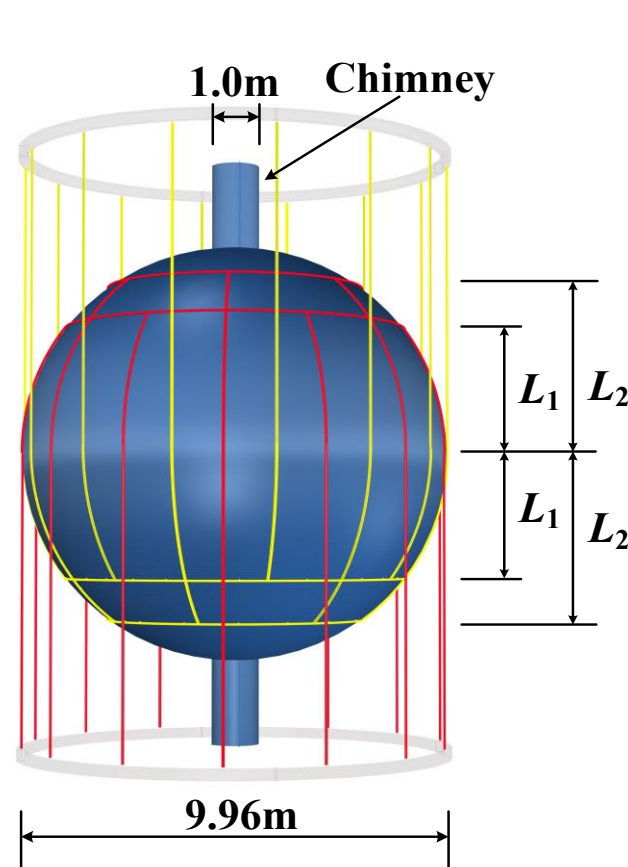
五百吨探测器研究进展

五百吨探测器概念图



中心探测器

- 9.96 m **直径球形亚克力容器**, 500 立方米
 - 可更换靶介质, 水, 液闪, 掺杂
- 绳索支撑亚克力球
 - **与水相比的密度变化: $\pm 20\%$ (重力或者浮力)**
 - 低本底材料, 高强度, 低蠕变
- 不锈钢架和亚克力球的力学分析已经完成

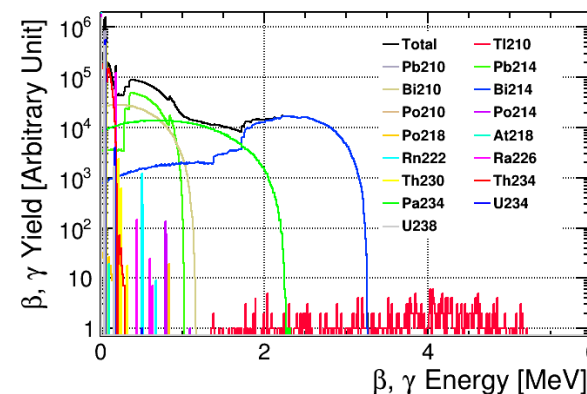


最大主应力: **2.15 MPa**
JINST 19 P07041 (2024)

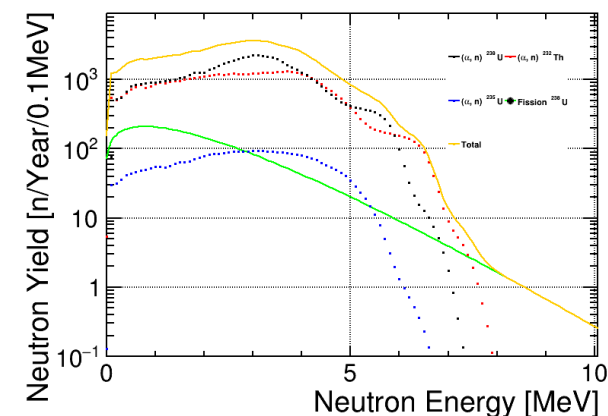


放射性本底

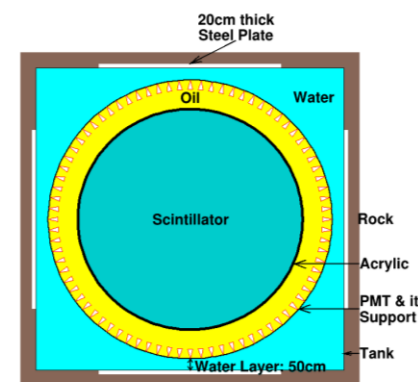
- 天然放射性衰变: β , γ
- 中子本底
 - (α, n) 和 ^{238}U 自裂变
- 研究策略
 - 输入本底能谱 $\rightarrow$ 在不同屏蔽方案下模拟 $\rightarrow$ 本底事例率 $\rightarrow$ 确定最优屏蔽方案
- 最优方案
 - 50 cm 水层
 - 7 m $\times$ 7 m $\times$ 20 cm 钢板
 - 使用掺硼聚乙烯封装PMT



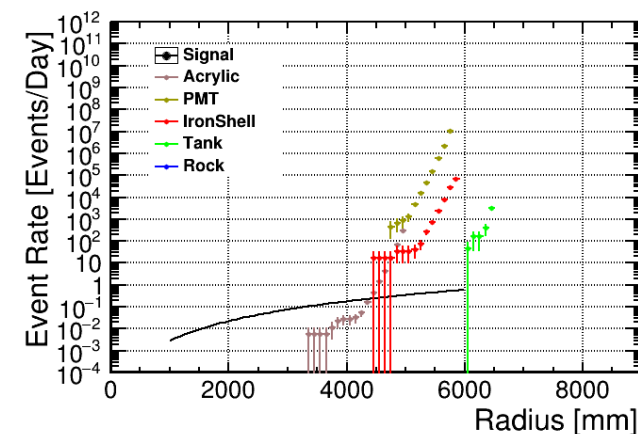
β , γ 能谱 (^{238}U 链)



来自PMT玻璃的中子能谱



最优屏蔽方案结构图



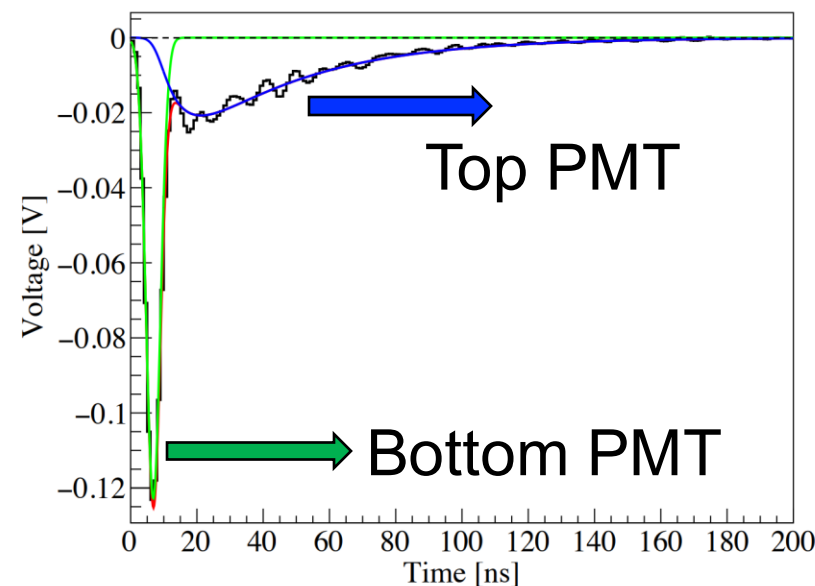
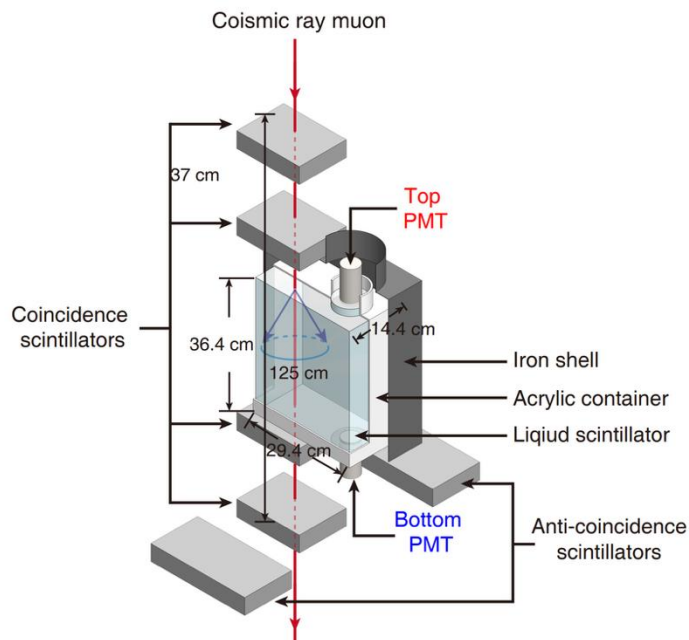
最优方案下本底事例率

慢液闪 (LAB+PPO+bis-MSB)

- 角度分辨和能量分辨
 - 角度：切伦科夫光，具有方向性，
 - 能量：闪烁光为主，各向同性，
- 减少闪烁光干扰 → 重建方向
 - 调整闪烁光发光时间 (油基液闪)

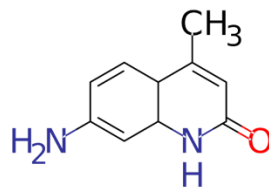
瞬发，产额低
发光慢，产额高

详情参见：
NIM-A 830 (2016)
Astroparticle Physics 109 (2019) 33–40

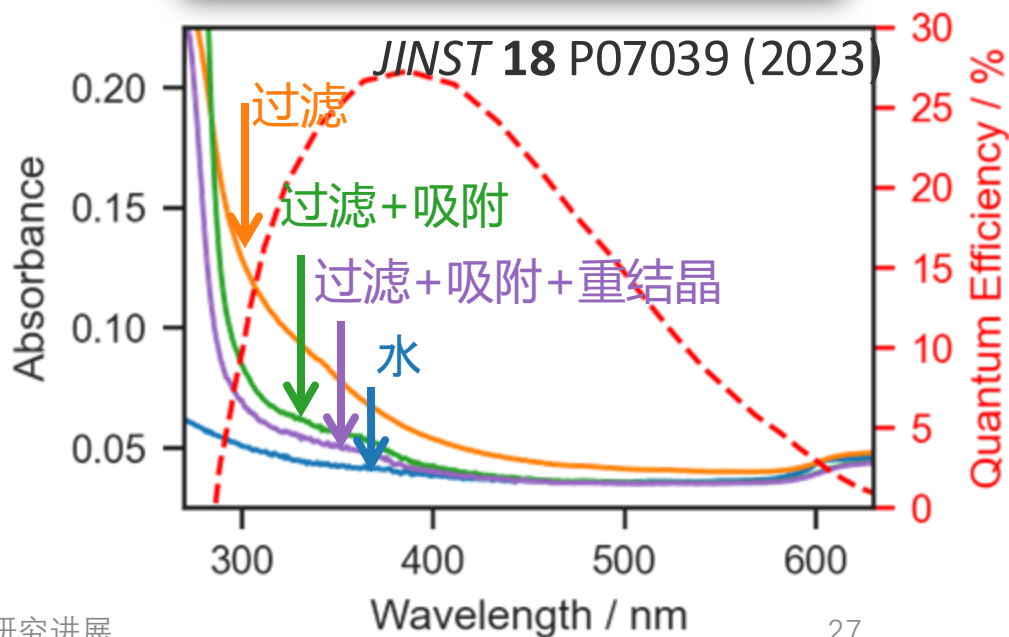


LiCl方案

C-124

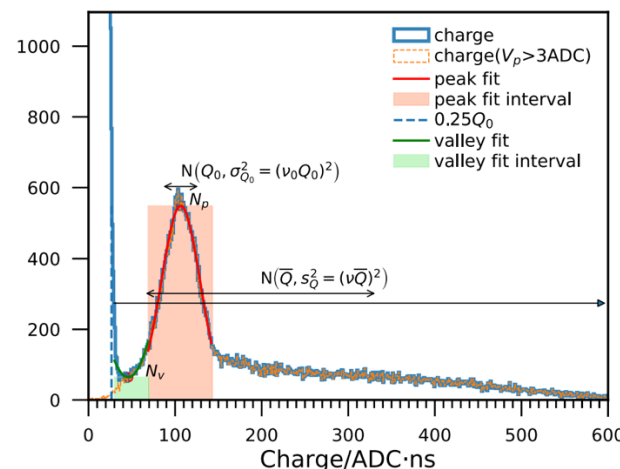
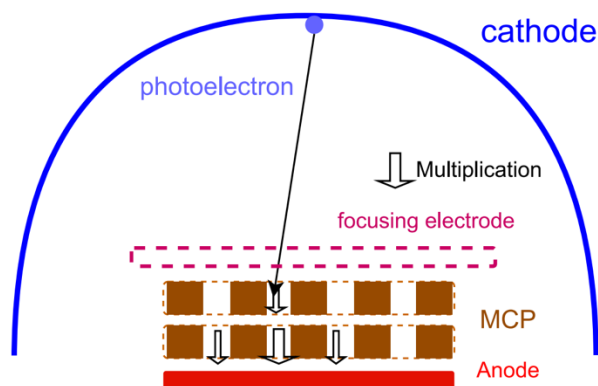


- LiCl水溶液 + C-124作为探测介质
- **对中微子**: $\nu_e + {}^7\text{Li} \rightarrow {}^7\text{Be} + e^- (+\gamma)$
 - 对低能太阳中微子具有较高截面
 - 对太阳⁸B中微子总截面是 ν -e弹性散射的约60倍
- **对反中微子**: 反贝塔衰变
 - ³⁵Cl高中子俘获截面 (43 barn)
 - 释放高能量gamma: ~8.6 MeV
- 高天然丰度
 - ⁷Li: 92%, ³⁵Cl: 76%
- 高溶解度: 100 g 水可溶80 g LiCl
- 430 nm处的光衰减长度可以达到50 m

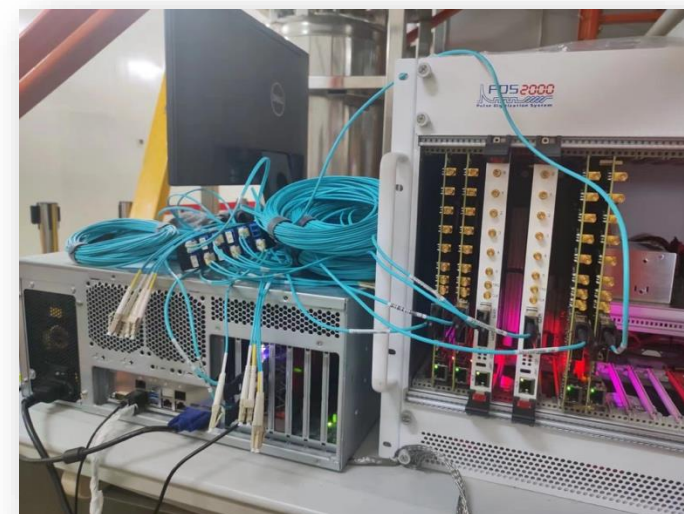


MCP-PMT和电子学

- ~4,000 支新型 8-inch MCP-PMT
 - U/Th: $<4 \times 10^{-8}$ g/g, K-40: $<4 \times 10^{-9}$ g/g
 - 高量子效率: ~30%
 - 镀膜: 提升探测效率和MCP寿命
 - TTS: <1.8 ns
- 600 支MCP-PMT已经生产完成
- 集光罩可以将光收集效率提高~40%



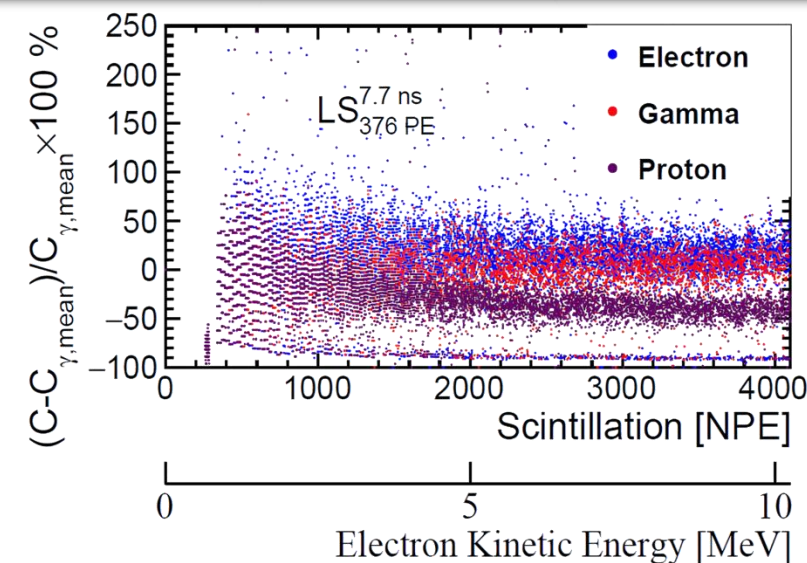
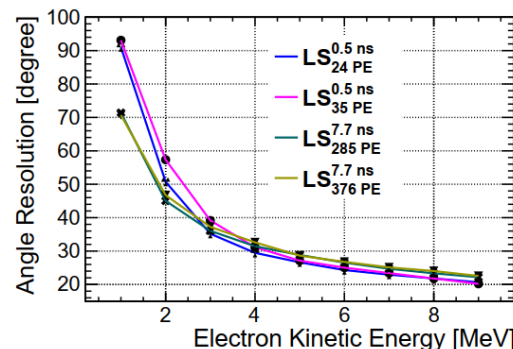
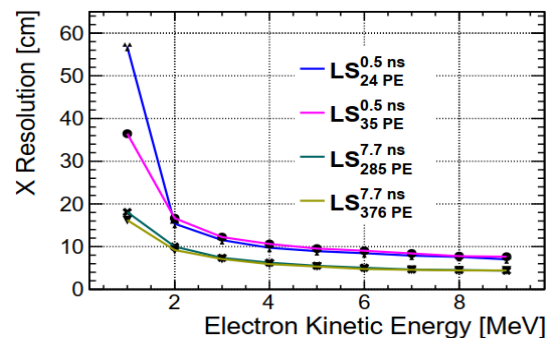
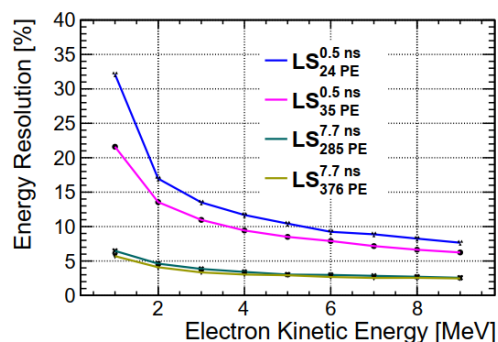
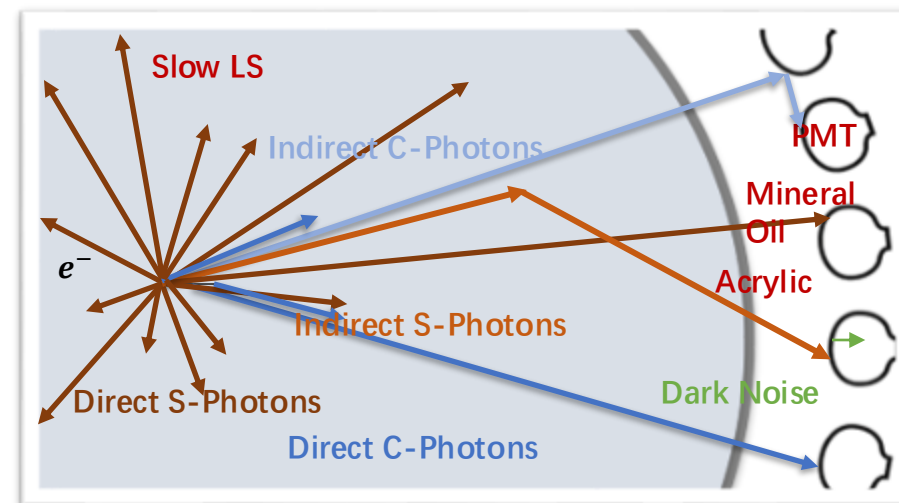
- 清华自研PMT波形数字化板
 - 14 bit, 1 GSps, 800 mW/ch
 - 数据传输带宽与之前CAEN相比
 - 提升3个量级到128 Gbps
 - 触发率上限随之提升到 ~193.5 k
- 在一吨原型机中测试
 - 与CEAN读出对比
 - 未来可能测试5 GSps/12 bit电子学



参见: *NIM-A 1055 (2023) 168506, NIM-A 1080 (2025) 170755*

重建算法

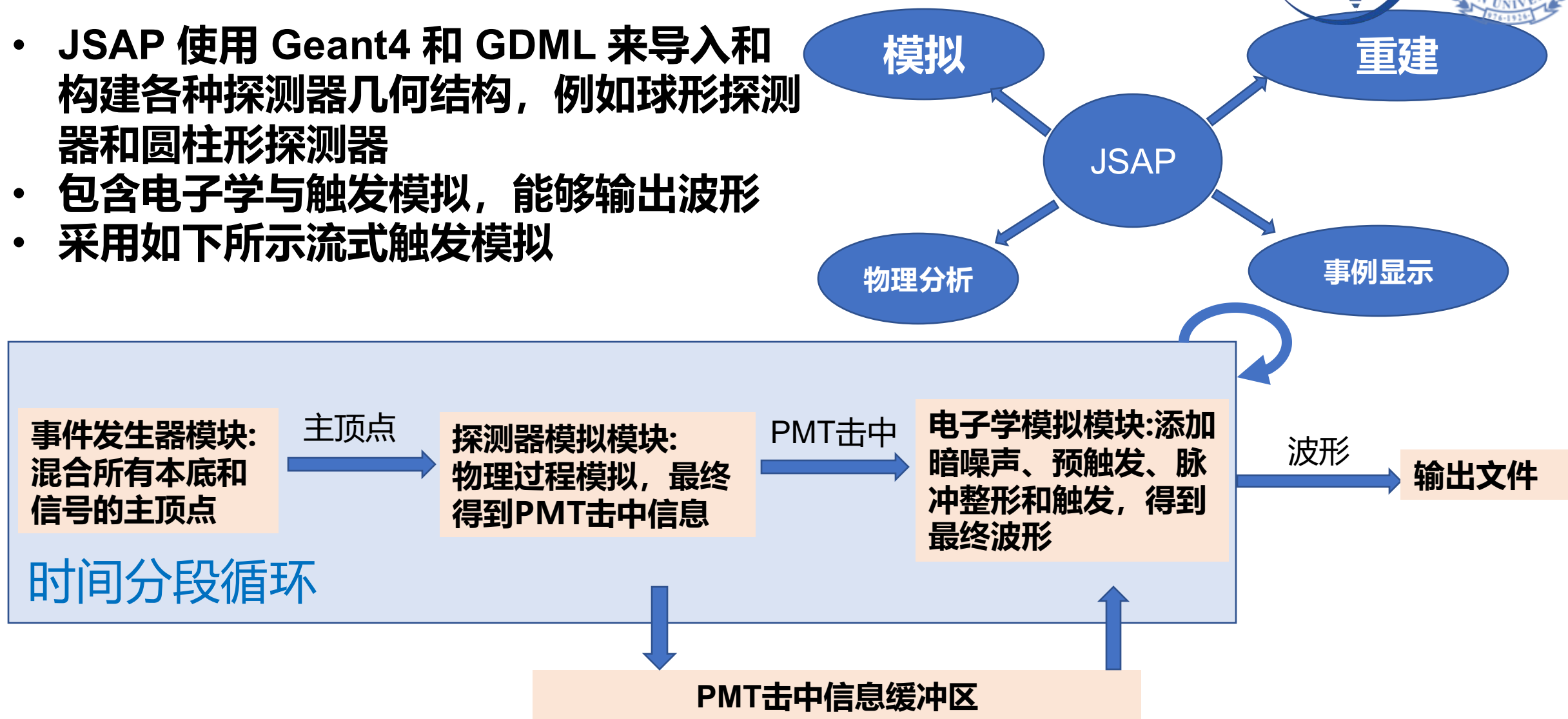
- 利用慢液闪重建切伦科夫光和闪烁光
- 逐事例的方向、能量和位置重建
- 切伦科夫光发光能力:
 - $e > \gamma > p \approx \alpha$, 粒子鉴别
 - 参见: *JINST* 18 (2023) 02, P02004



Jinping Sim. & Ana. Package (JSAP)



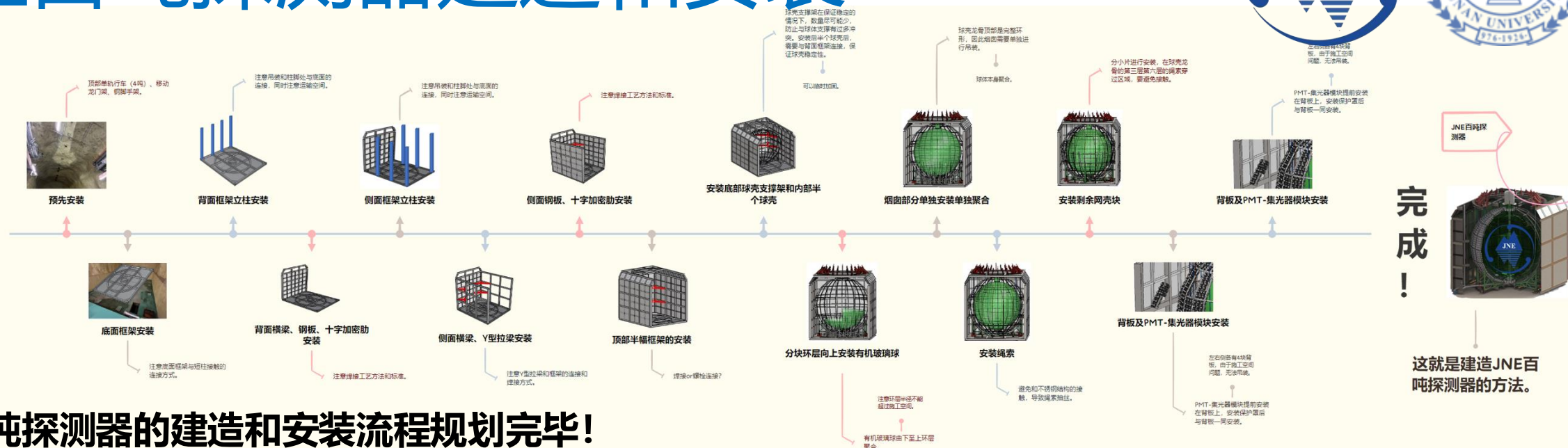
- JSAP 使用 Geant4 和 GDML 来导入和构建各种探测器几何结构，例如球形探测器和圆柱形探测器
- 包含电子学与触发模拟，能够输出波形
- 采用如下所示流式触发模拟



五百吨探测器建造和安装



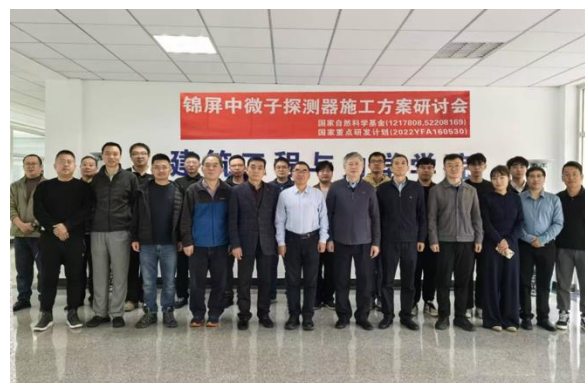
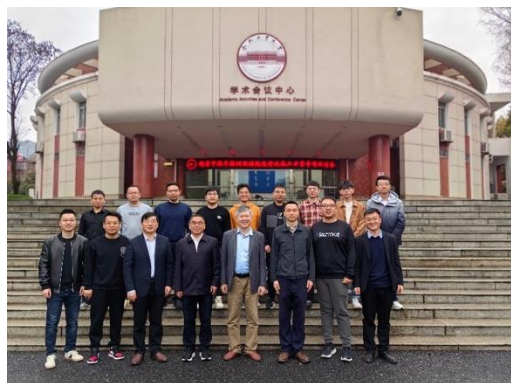
JNE百吨探测器施工安装流程



五百吨探测器的建造和安装流程规划完毕!

2024年3月结构设计和施工方案研讨会 2024年10月施工方案研讨会

2024年11月厂家现场勘察

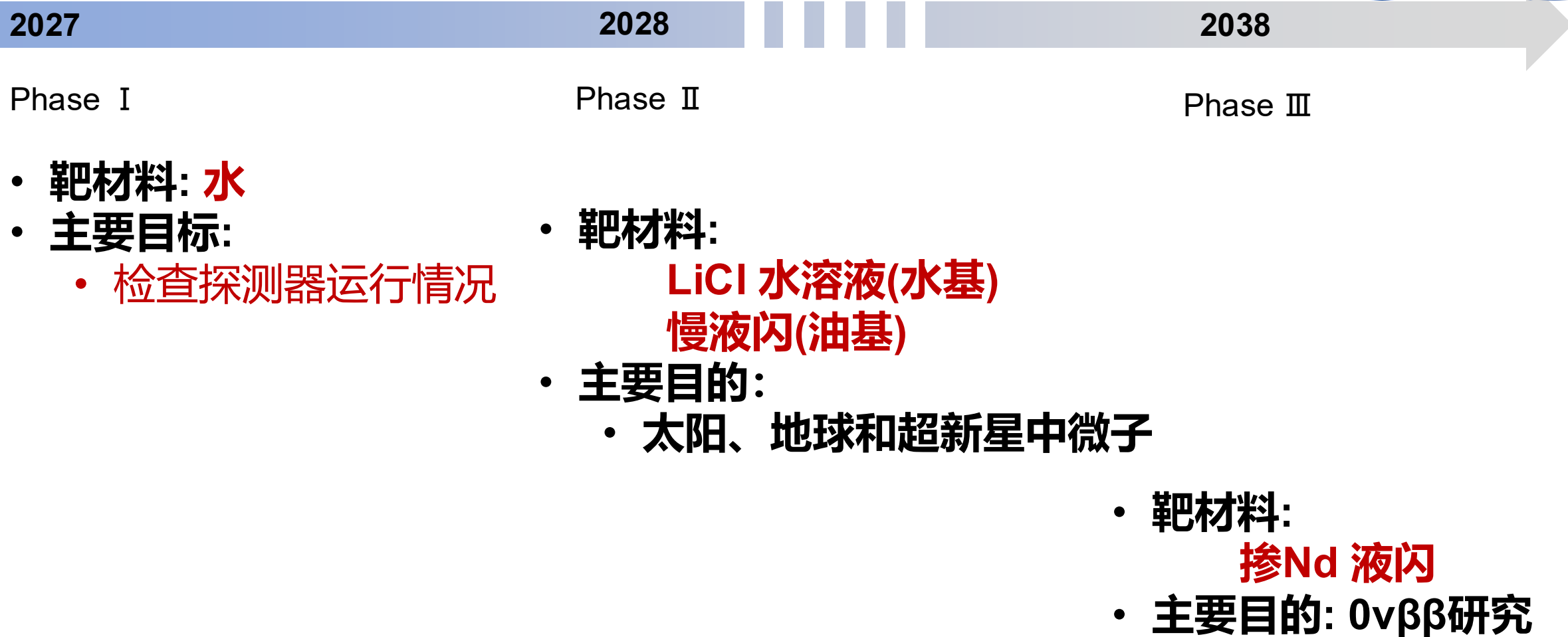


2025/9/20

李进京 (湖南大学) 锦屏中微子实验研究进展

31

五百吨探测器规划



五百吨探测器CDR和TDR

深地兆电子伏能区太阳中微子观测站概念设计报告

—中微子“清心”计划

2024年8月19日：完成了锦屏中微子探测器概念设计报告（CDR）初稿，并通过了科学评审。

2024年10月18日：完成了锦屏中微子探测器技术设计报告（TDR）初稿，并通过了技术评审。

陈少敏 安海鹏 陈晖有 付昊阳 宫 辉 龚光华 郝传晖 姜 林 李福乐
李进京 梁 晔 刘 灵 刘学伟 骆文泰 邵文辉 孙昊哲 王 青 王宇逸
王元清 王 喆 魏昌旭 文敬君 翁 俊 武益阳 徐 闯 徐 彤 续本达
薛 涛 杨玉梓 张爱强 张 彬 张天雄 张昕舜 张志财

清华大学

卜宜都 林子倩

北京工业大学

王综轶 黄 明 刘育豪

华中科技大学

黄性涛 张 洋

山东大学

季向盼

南开大学

李贝贝

合肥工业大学

凌家杰

中山大学

郑阳恒 刘 倩

中国科学院大学

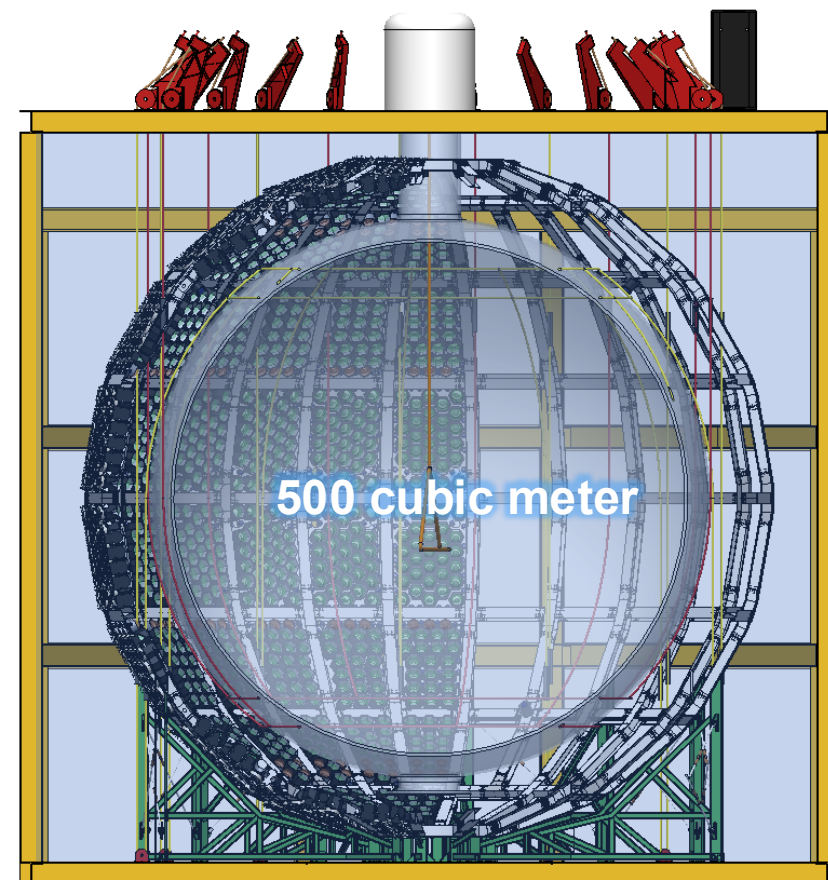


JNE-500 CDR

JNE-500 TDR

总结

- 五百吨太阳中微子观测站预计在**2026-2027**建成
- 使用新型8-inch MCP-PMT
 - 高时间分辨, 高量子效率
- 清华自研高性能电子学在设计和测试中
- 探索氯化锂水溶液探测方案
- 基于慢液闪开发重建算法
 - 实现方向重建和粒子鉴别, 实现极低本底
- 探测器设计和安装已规划完成
- <http://jinping.hep.tsinghua.edu.cn>



谢谢!



BACKUP

Geo-neutrino

- Energy resolution : 500 PE/MeV, 4.4%/Sqrt[Evis]
- SlowLS, IBD, neutron capture on hydrogen

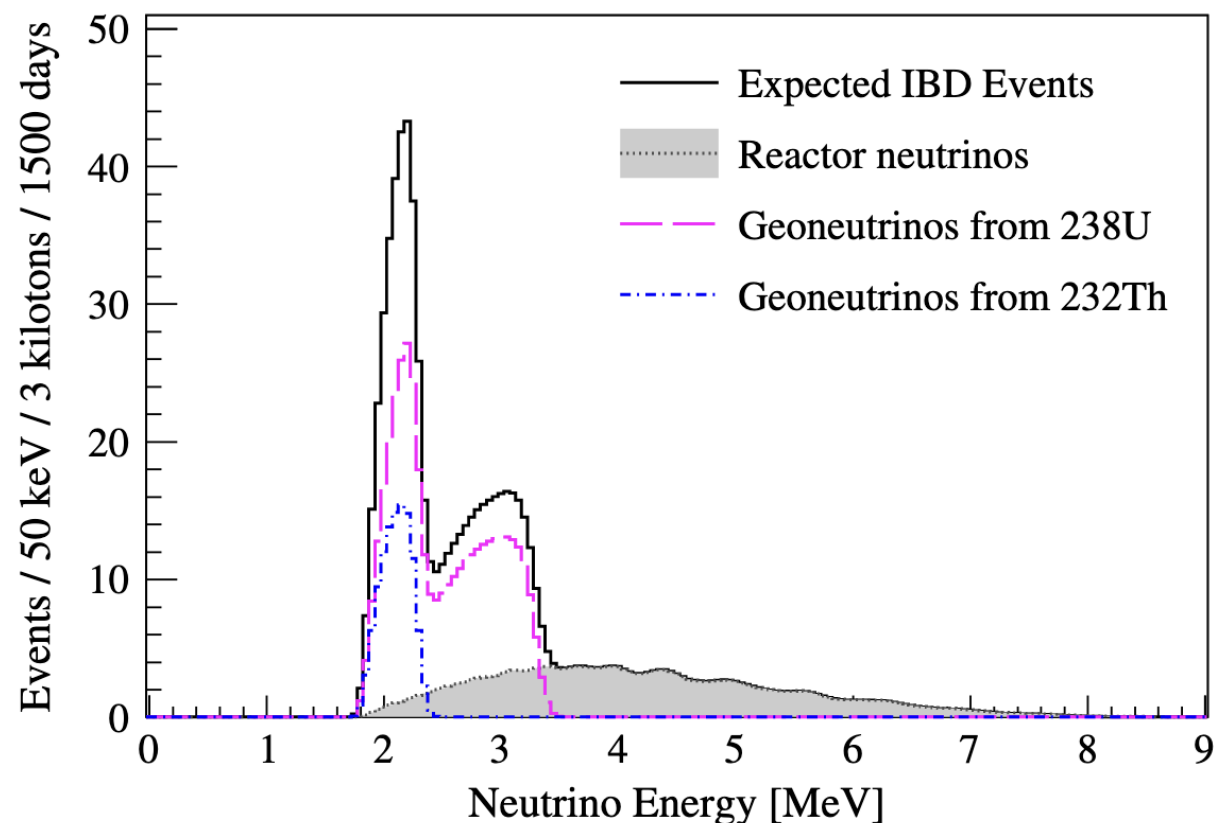


TABLE V. Summary of predicted geoneutrino event rates in TNU at Jinping.

Geo $\bar{\nu}_e$ (TNU)	Crust	Mantle	BSE
Th	10.6 ± 0.8	2.1 ± 0.5	12.7 ± 1.0
U	38.4 ± 6.6	8.3 ± 2.3	46.7 ± 6.7
Th + U	49.0 ± 7.3	10.4 ± 2.7	59.4 ± 7.6

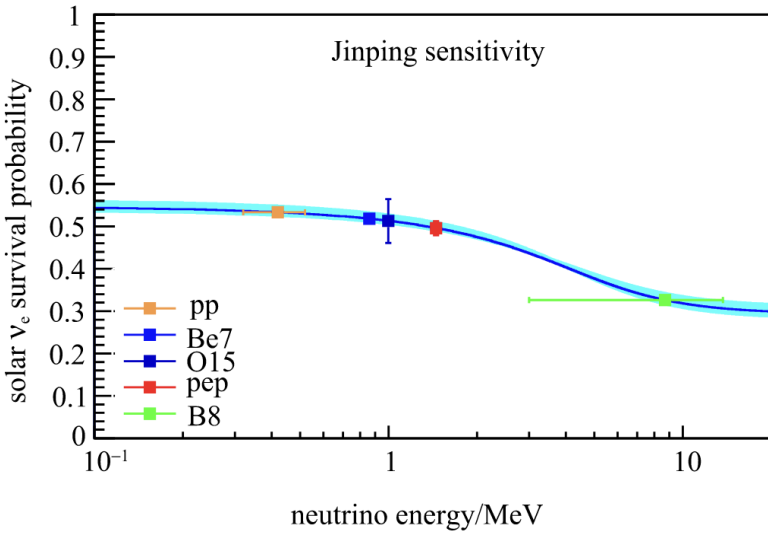
TABLE VI. Geoneutrino and reactor neutrino event rates and total events with an exposure of $3 \text{ kt} \times 1,500 \text{ days}$ at Jinping.

	Geoneutrino			Reactor	
	^{238}U	^{232}Th	Total	FER	SER
Event Rate (TNU)	46.7	12.7	59.4	27.8	6.8
Total Events	414.5	113.6	527.3	246.8	60.4

Sensitivity

Table 11. Expected event rates for the supernova relic neutrinos and the corresponding backgrounds with E_{vis} in the range around 10–30 MeV. For the signal, the ranges of several models' predictions are printed. Background rates are calculated assuming a liquid scintillator target, and the atmospheric CC and NC background rates in parentheses are the results with a slow liquid scintillator target.

event rate	1 kton-year	1 10 kton-year	1 20 kton-year
signal	0.05–0.66	0.5–6.6	1–13
accidental	0	0	0
reactor	0	0	0
fast neutron	0.7×10^{-3}	7×10^{-3}	14×10^{-3}
${}^9\text{Li}/{}^8\text{He}$	1×10^{-3}	10×10^{-3}	20×10^{-3}
atmos. CC	0.2 (0.1)	2 (1)	4 (2)
atmos. NC	0.2 (0.1)	2 (1)	4 (2)
total bkg.	0.4 (0.2)	4 (2)	8 (4)



surements [74, 75, 77]. Bottom plot: We assume a 2000-ton target mass, 1500-day exposure, a resolution of 500 PE/MeV, and the low metallicity hypothesis. The five points with error bars are the simulation results for pp, ${}^7\text{Be}$, pep, ${}^{15}\text{O}$ and ${}^8\text{B}$, in which the central values are set to the true ones, the y-error bars include both statistical and systematic uncertainties and the x-error bars correspond to the range of energy measurement, while the ${}^{15}\text{O}$ x-error is omitted for a clear view.

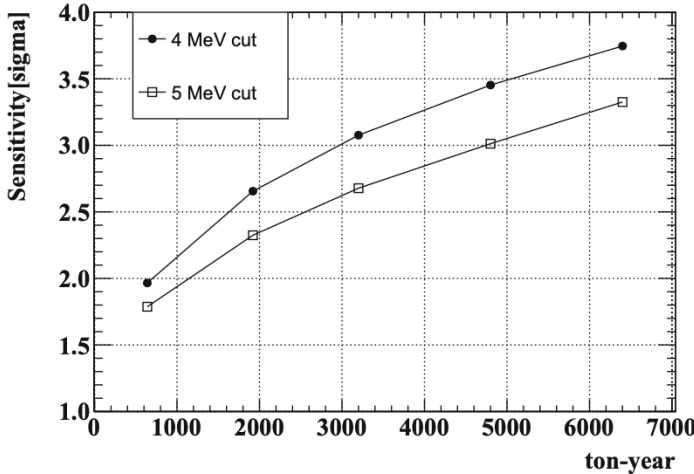


Fig. 11 The sensitivity of rejecting no upturn effect versus the exposure. More detector resolution and signal selection information can be seen in Sect. 4.1