

中微子年度进展报告

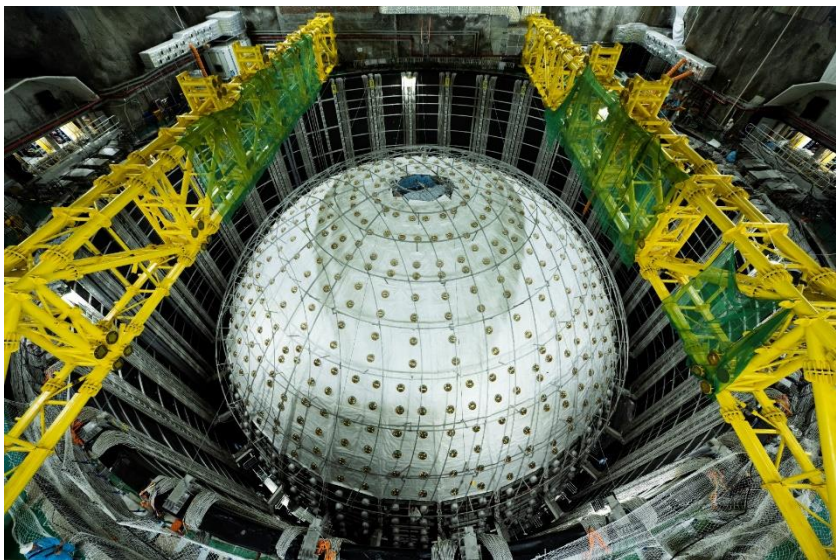
赵 洁

高能物理研究所

2024年11月1日

江门中微子实验 (JUNO)

2



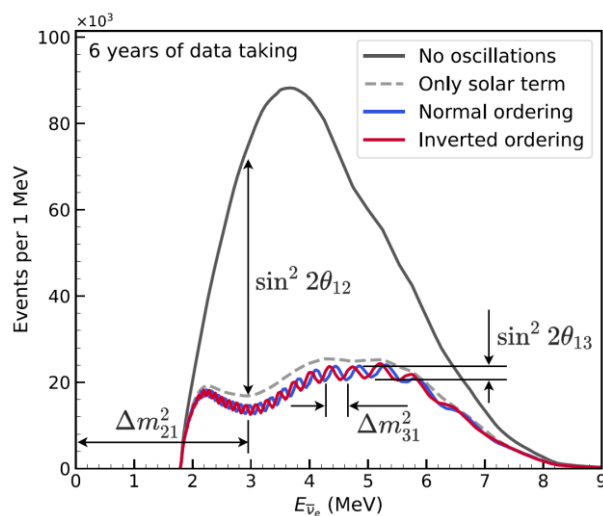
- 中微子是组成物质世界的基本粒子，是**粒子物理、天体物理与宇宙学的交叉与热点**。中微子振荡是**唯一证实超出粒子物理标准模型的实验现象**，证明中微子有质量，是发现新物理的突破口。
- 江门中微子实验预计2025年建成并运行取数
 - 国际上体积最大、能量分辨率最好的液闪探测器
 - 与日本顶级神冈、美国沙丘实验并称国际三大旗舰装置
- 基础物理平台依托江门中微子实验
 - 探测反应堆中微子，精确测量中微子振荡参数
 - 观测地球中微子，研究地球内部结构
 - 发展极低放射性本底探测技术
 - 寻找核子衰变，检验大统一理论

建设中的JUNO，广东省江门市地下700米

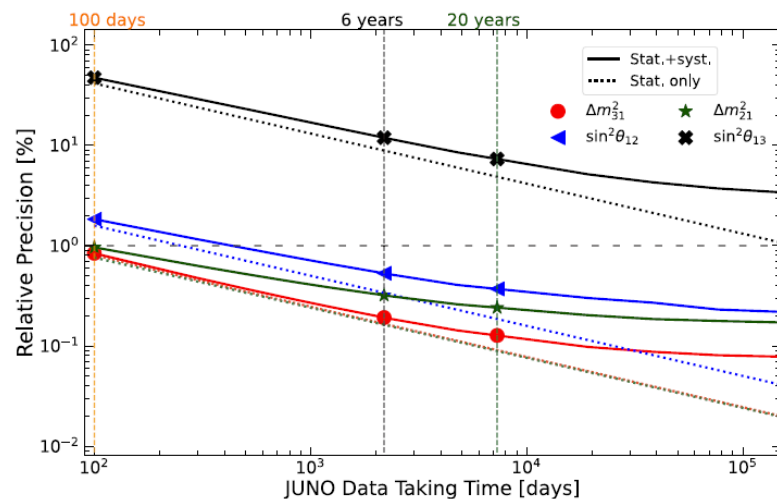
JUNO反应堆中微子的物理研究

3

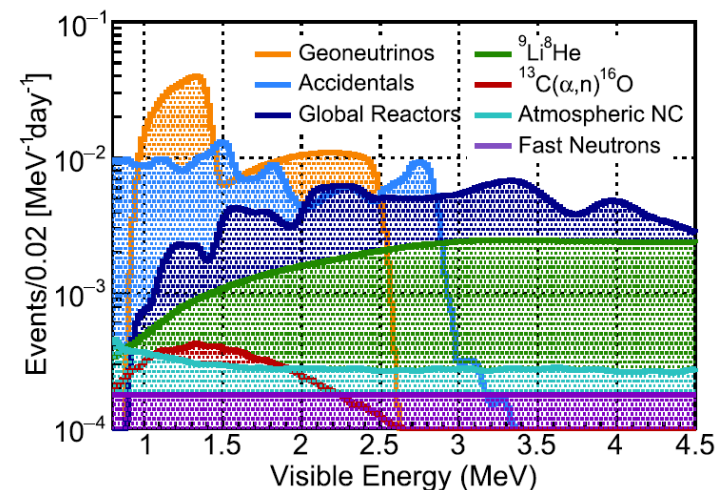
- 中微子振荡由6个参数描述。JUNO通过探测反应堆中微子，可以将其中3个振荡参数测量到**好于1%**的精度，将国际最好的测量精度提升**5-8倍**。
- 重点研究其中两种本底：
 - ①天然放射性本底（原子核自发放出 α 、 β 、 γ 射线，与中微子信号特征相似）；
 - ②地球中微子本底（地球内部放射性核素 β 衰变产生，与反应堆中微子类型相同）。



观测反应堆中微子能谱的精细结构，研究中微子振荡。



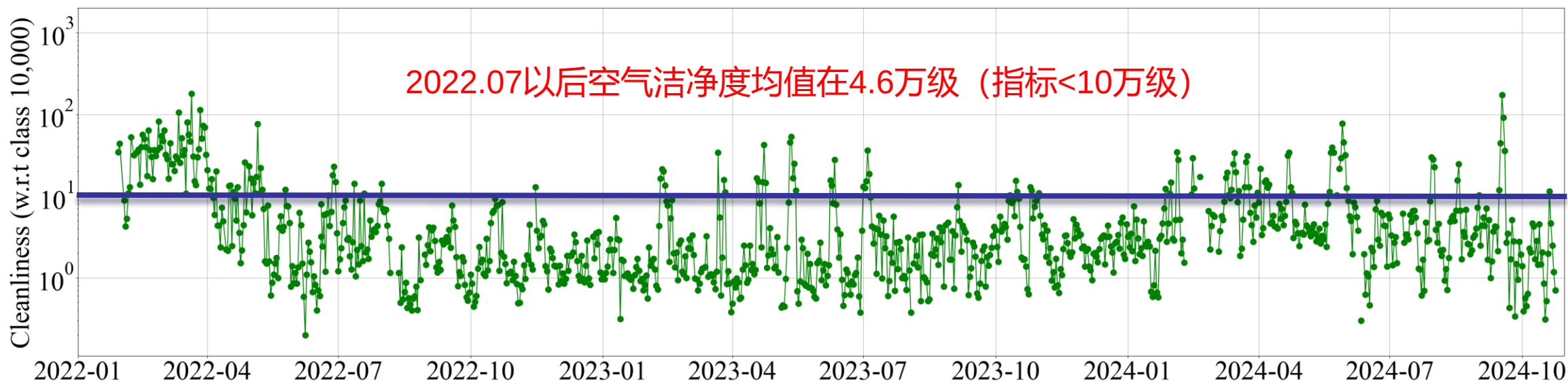
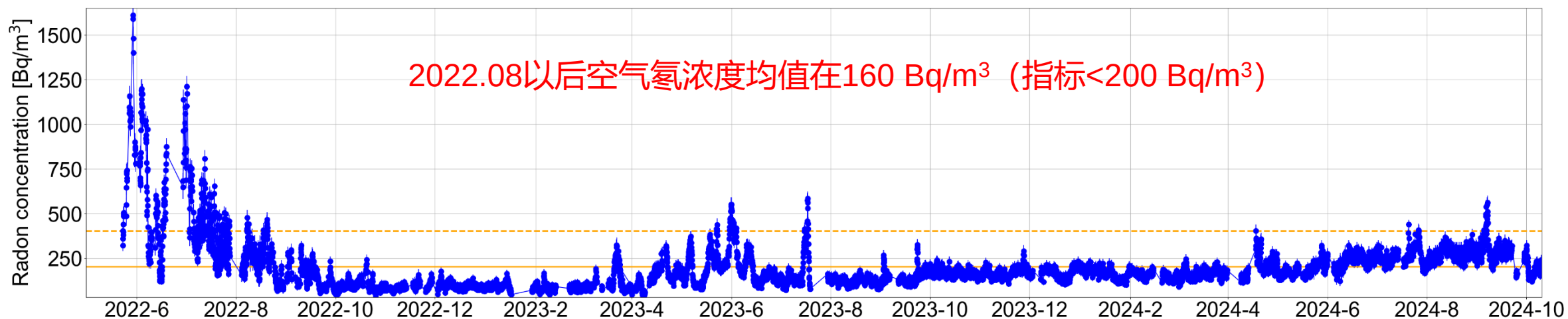
JUNO测量中微子振荡参数的精度随取数时间增长而提高。

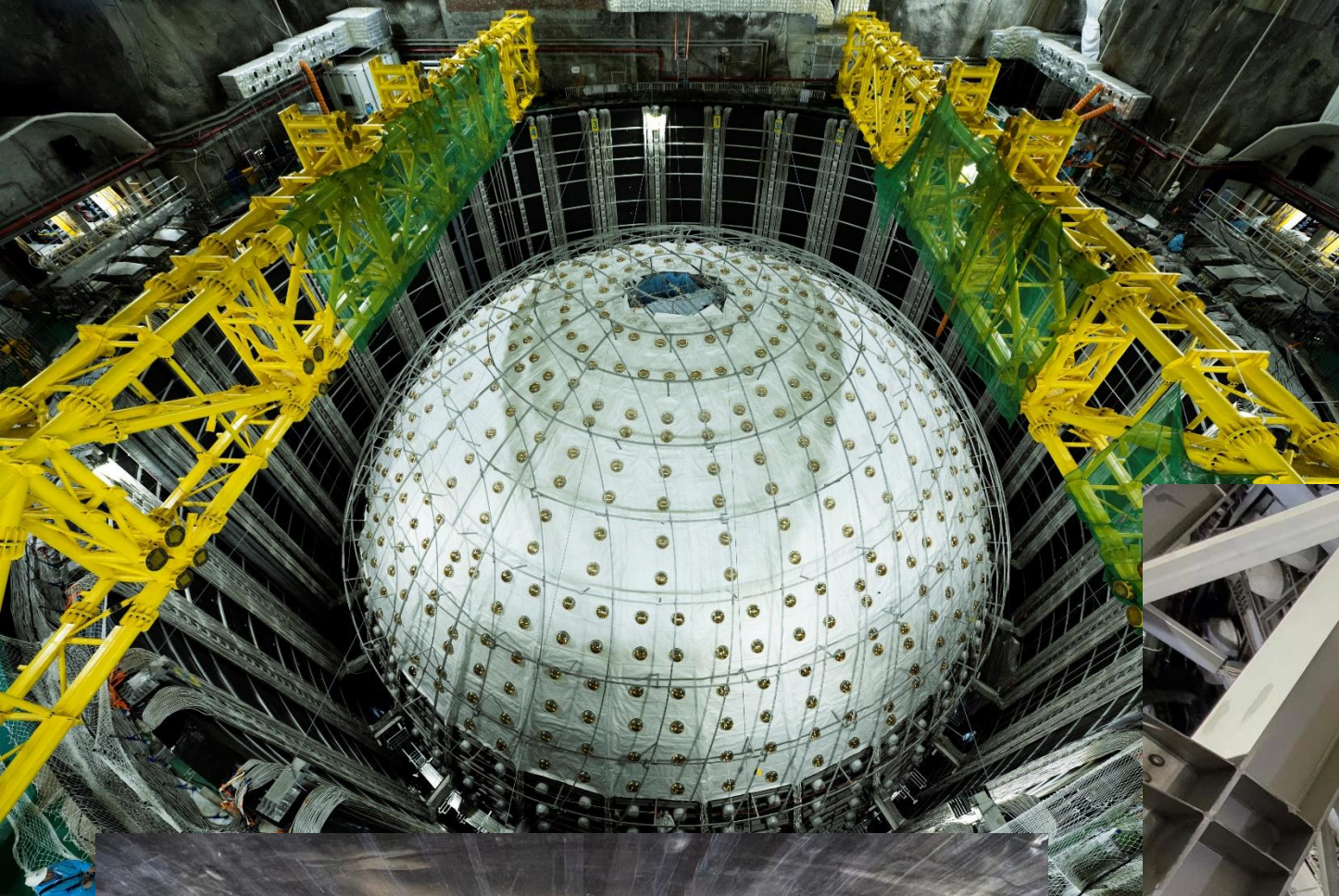


反应堆中微子本底分解，蓝线和红线主要来自**天然放射性**，桔线来自**地球中微子**。

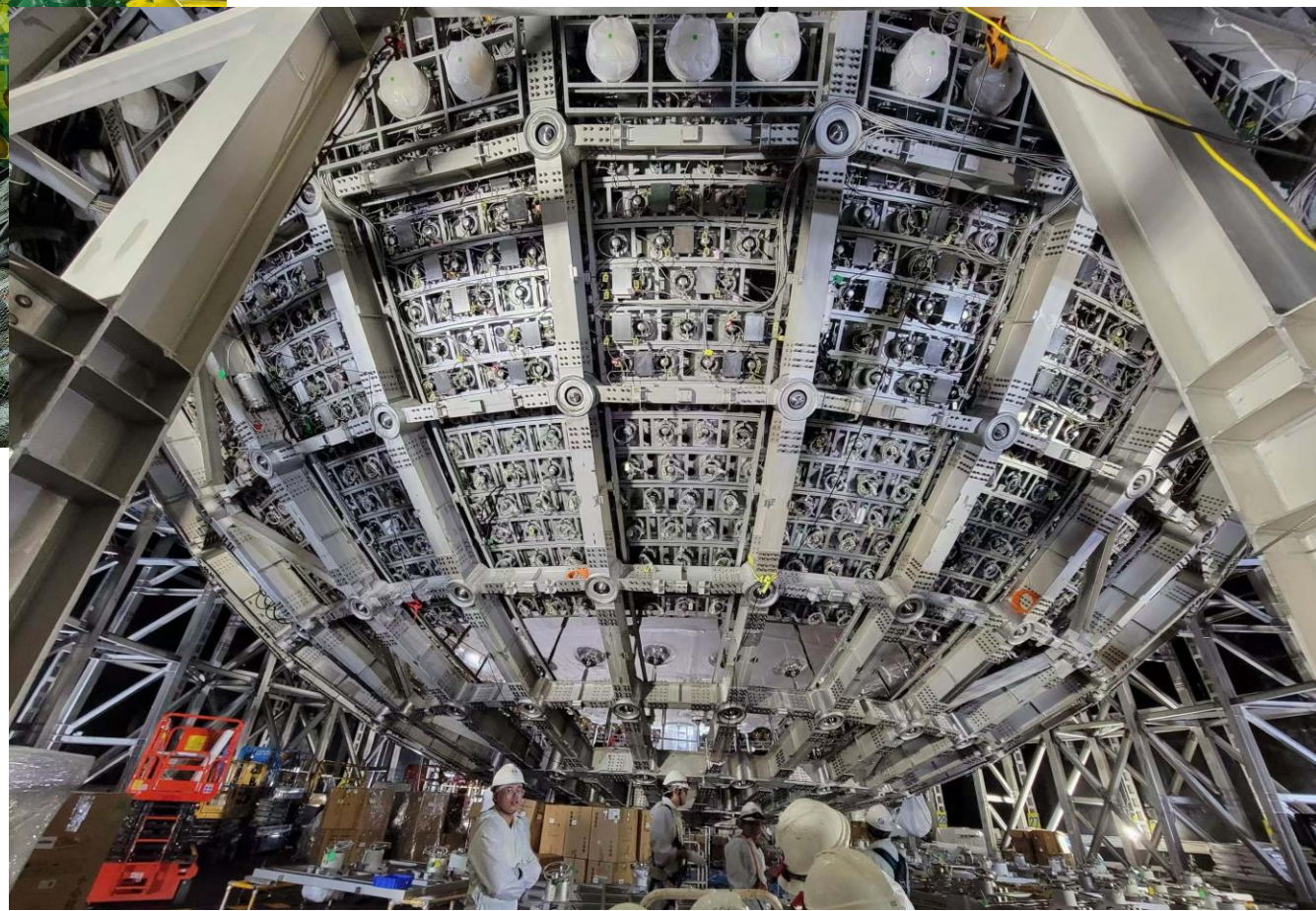
探测器安装时期环境本底控制

4





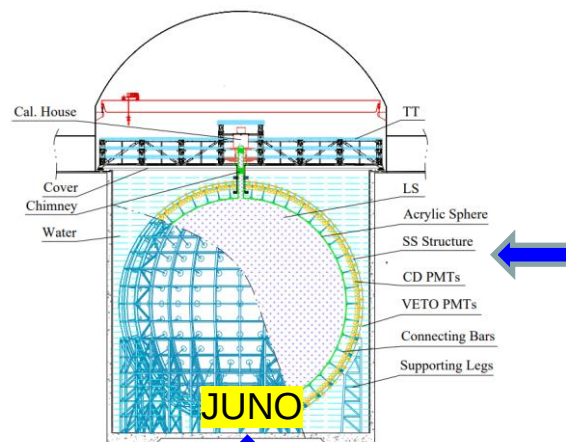
探测器安装进入收尾阶段！
探测器清洁工作持续进行！



中微子的靶——2万吨液体闪烁体

6

Four purification plants to achieve target radio-purity 10^{-17} g/g U/Th and 20 m attenuation length at 430 nm.



15%

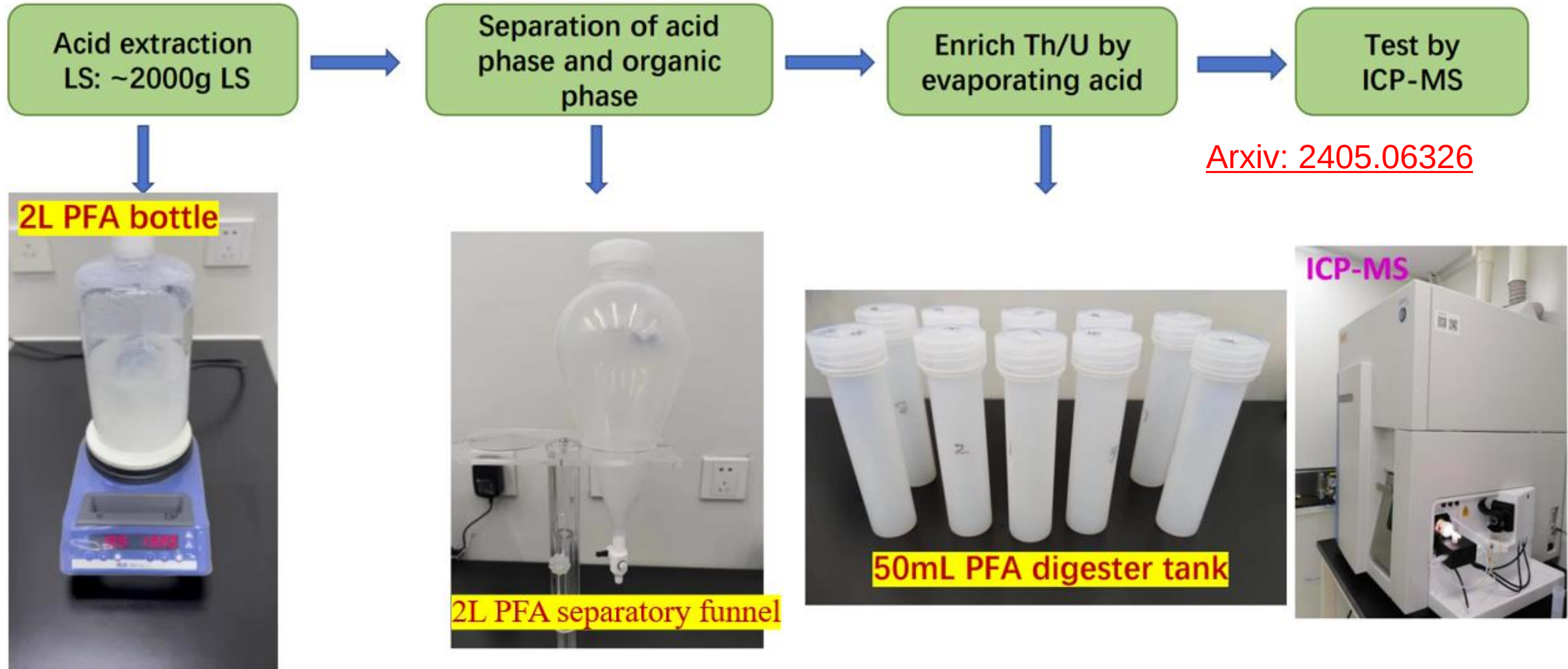


SS pipes to underground

OSIRIS的局限性：测量时间长（~3周，等氡衰变），U/Th灵敏度到 10^{-15} g/g，难以查找污染源

液闪U/Th本底质检方法

7



Clean vessel (PFA), simple pre-treatment (only acid extraction), high sensitivity (ICP-MS)

回收率、空白、时间

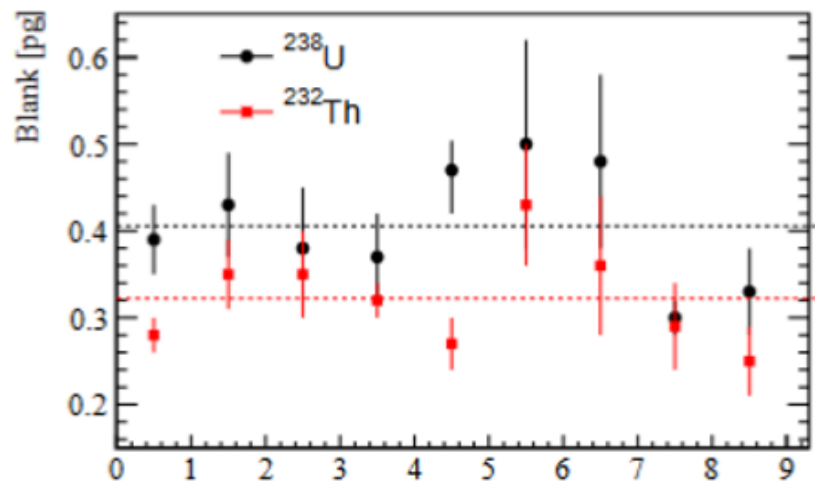
8

- 回收率：体现整个样品处理过程中U/Th的损失。尝试了三种类型的标样检测方法

	Concentration	Recovery efficiency
^{220}Rn (^{212}Pb) loading in LS	10^{-17} g/g	$98.2\% \pm 0.3\%$ (stat) $\pm 2\%$ (sys)
$^{229}\text{Th}/^{233}\text{U}$ standards in LS	10^{-16} g/g	$106\% \pm 10\%$ (stat) $\pm 3\%$ (sys)
Dissolving PPO in LAB	10^{-16} g/g	$106\% \pm 31\%$ / $123\% \pm 43\%$

MDL Ref: U.S. EPA, Appendix B, Definition and Procedure for the Determination of Method Detection Limit, in: U.S. EPA, (Ed.), 40, Vol. 24, part 136-Rev1.11, United States Environmental Protection Agency, Washington, DC.

- 空白：体现整个样品处理过程中的外在污染



- 检出限@99% C.L.

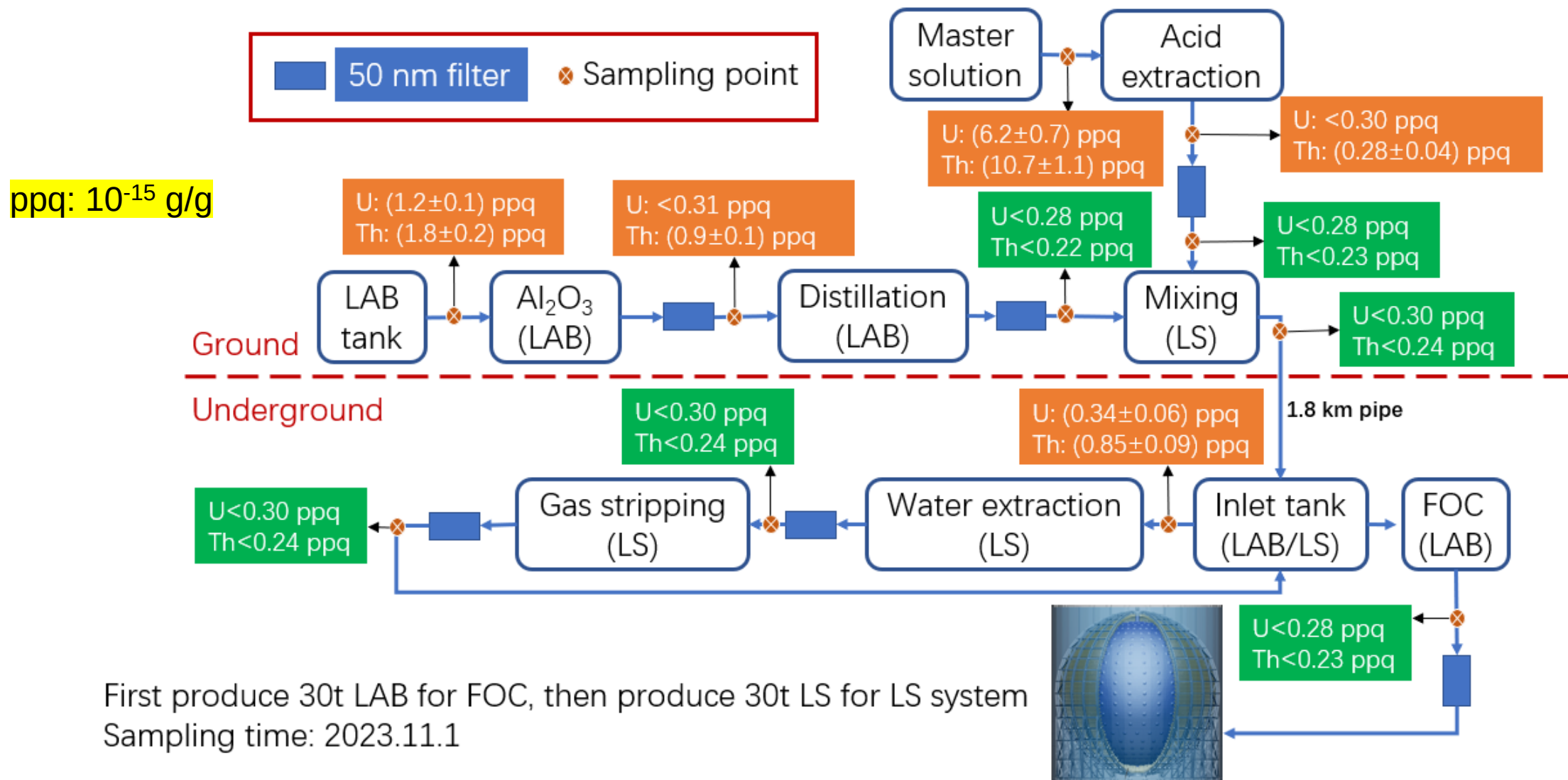
□ For 2kg LS, U: 3.0×10^{-16} g/g,
Th: 2.4×10^{-16} g/g

- 时间

□ Sensitivity 10^{-15} g/g: 1.5 days
□ Sensitivity 10^{-16} g/g: 3.5 days
□ Sensitivity 5×10^{-17} g/g: next plan, ~2 weeks

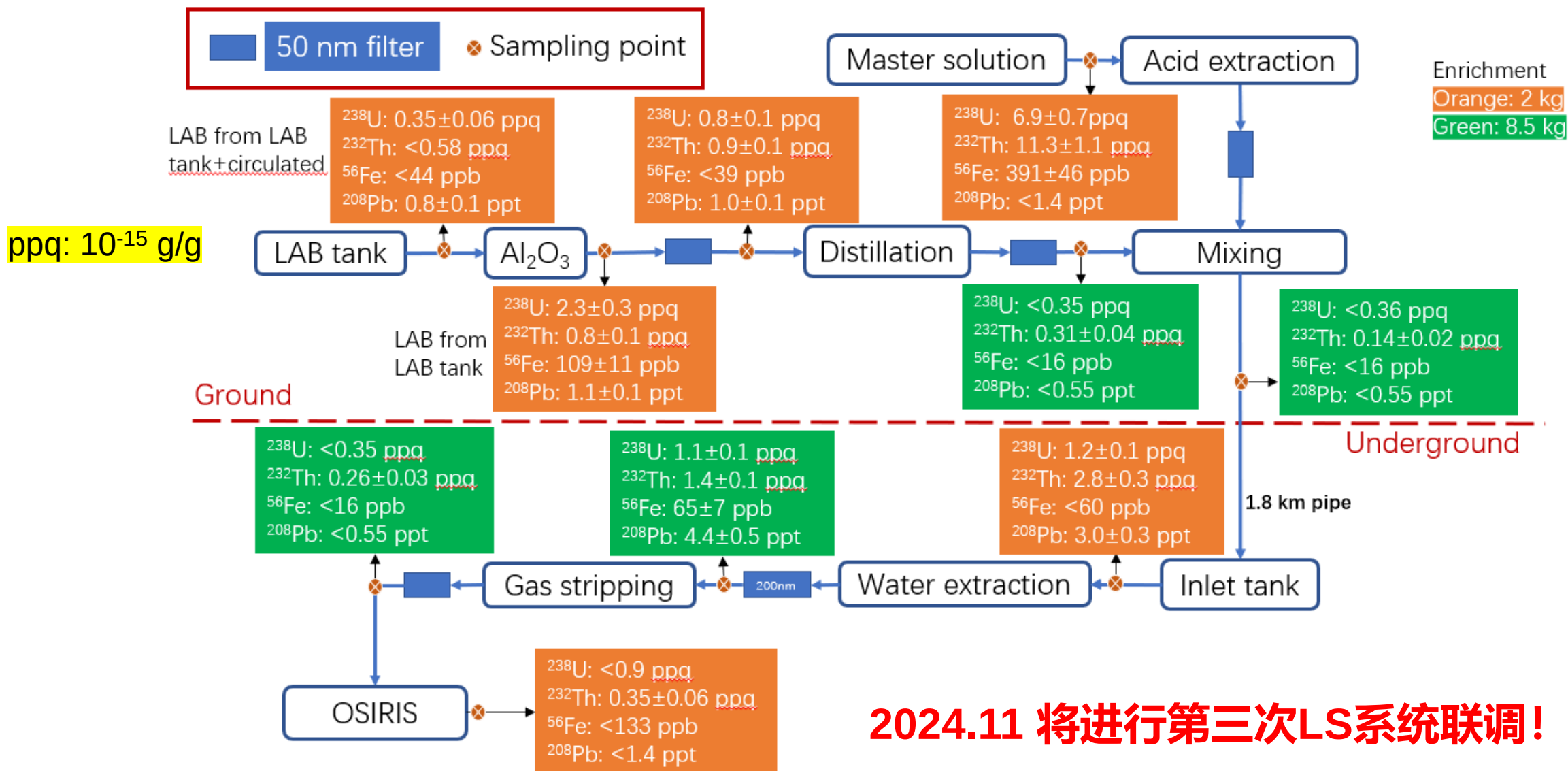
2023.11 第一次LS系统大联调

9



2024.07 第二次LS系统大联调

10

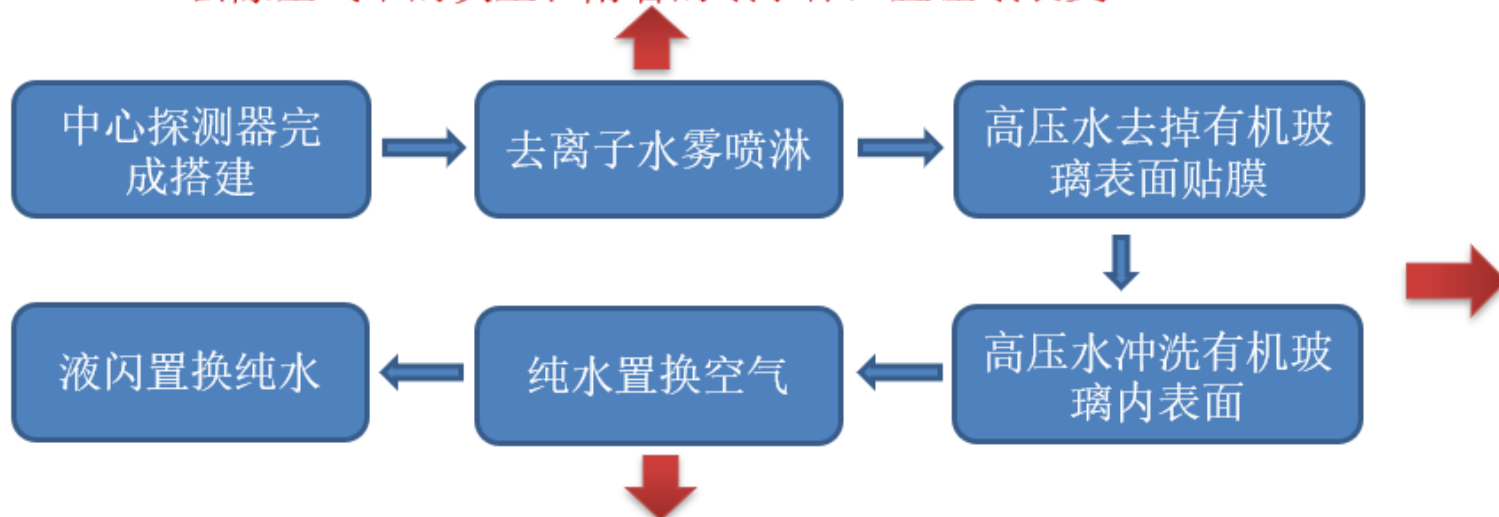


2024.11 将进行第三次LS系统联调!

液闪灌装方案

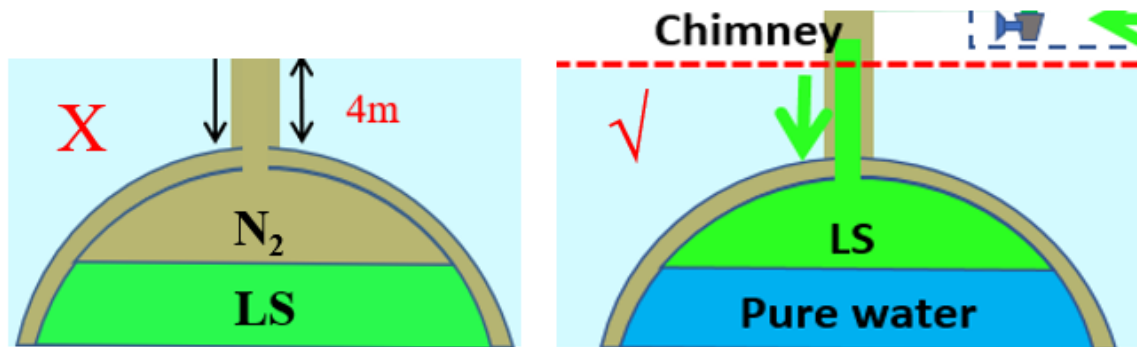
11

去除空气中的灰尘和附着的氦子体，且让氦衰变



总和考虑本底和工程风险，选择水置换方案。

水质要求提升: $U/Th < 10^{-15} \text{ g/g}$, $^{226}\text{Ra} < 0.1 \text{ mBq/m}^3$.



3 m prototype中做高压水冲洗实验



■ 灌装时期的本底研究

- 水相：定量水中氡、U/Th等天然放射性含量
- 水油混合相：
 - 1、50t、100t、1000t等关键节点氡、U/Th定量，以便灌装决策
 - 2、在线实时显示液闪中天然放射性含量水平，及时预警
 - 3、离线精细重建和挑选，理解探测器各组分本底贡献
- ICP-MS：对LS相关系统实时质检

■ 灌装完成后的本底研究

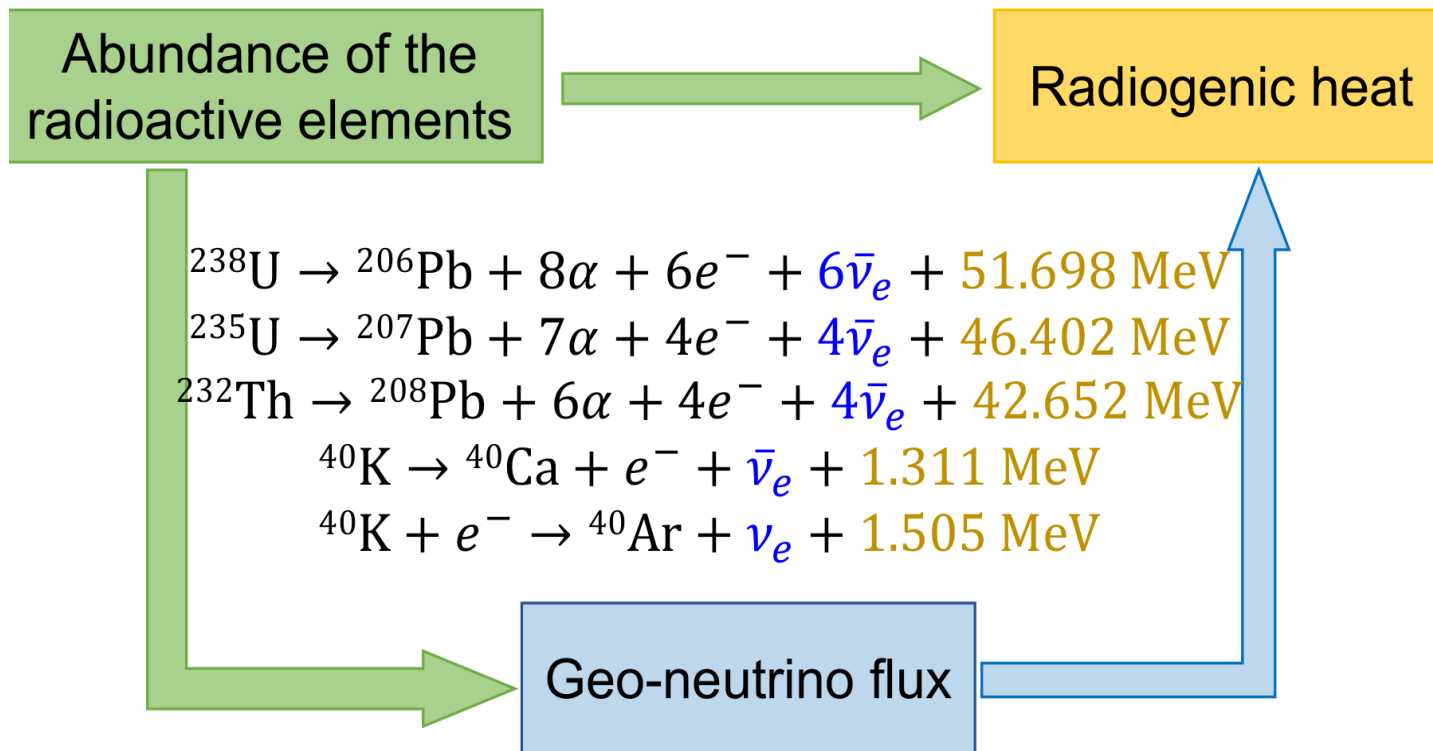
- 充分理解探测器本底水平，制定天然放射性事例鉴别算法和压低策略
- 计算反应堆中微子、地球中微子课题的天然放射性偶然符合本底事例率和能谱
- 研究JUNO有优势的太阳中微子产生道

JUNO: 世界领先的地球中微子实验

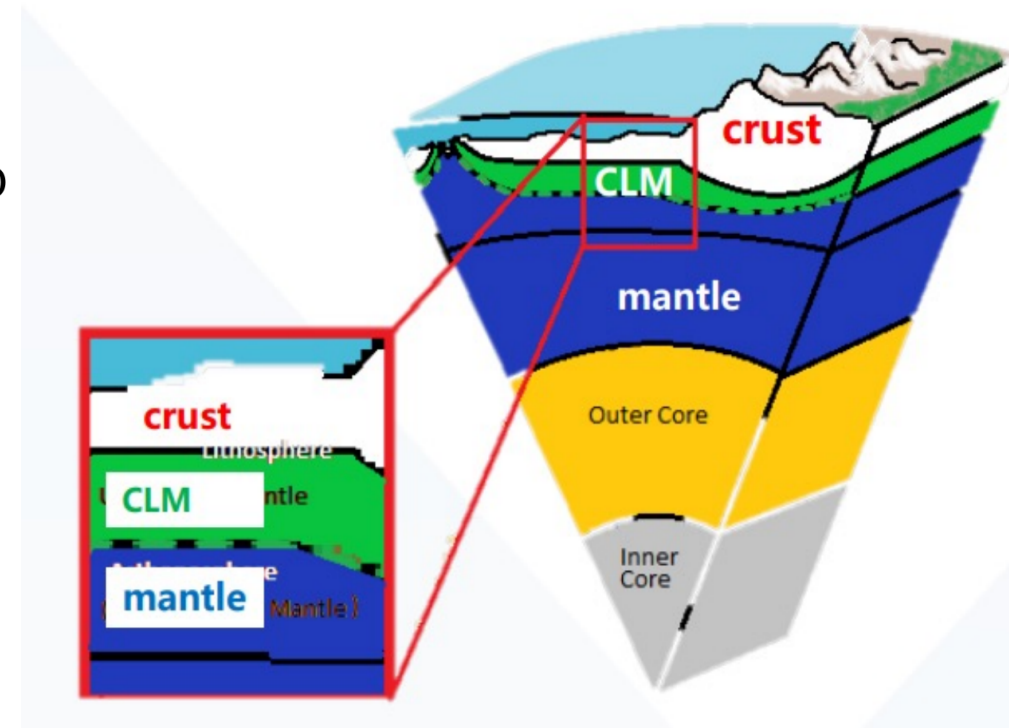
13

Geoneutrino is one of central topics of JUNO

- The intersection of **particle physics** and **geophysics**
- An independent method to study the matter composition deep within the Earth



$$S_{\text{Total}} = S_{\text{Crust}} + S_{\text{CLM}} + S_{\text{Mantle}}$$



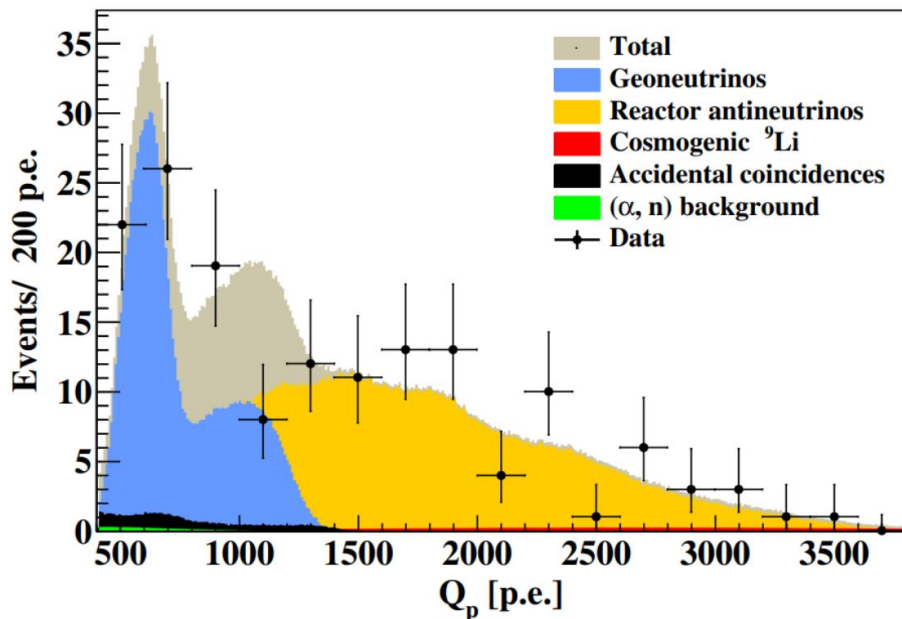
- **Crust**: high U & Th
- **CLM (Continental Lithospheric Mantle)**: relatively low U & Th
- **Mantle**: very low U & Th, large volume

JUNO: 世界领先的地球中微子实验

14

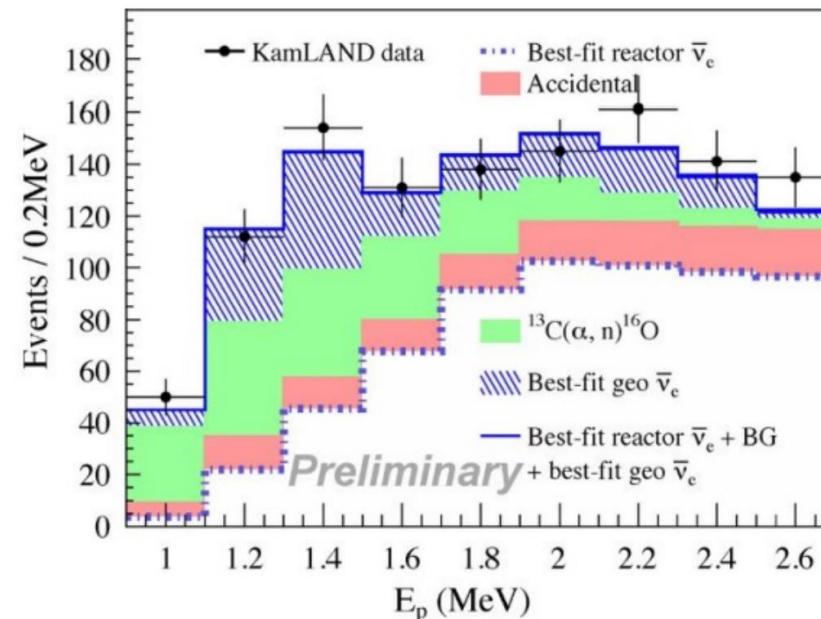
Borexino (2020) [Phys. Rev. D 101, 012009](#)

- Located in Gran Sasso, Italy
- Liquid Scintillator ~ 0.3 kton
- In 10 years ~ 50 geoneutrinos
- Precision $\sim 17\%$
- Favors **high** U and Th abundances BSE models



KamLAND (2022) [Phys. Rev. C, 80, 015807](#)

- Located in Hida, Gifu, Japan
- Liquid Scintillator 1 kton
- In almost 18 years ~ 170 geoneutrinos
- Precision $\sim 15\%$
- Favors **medium** U and Th abundances BSE models

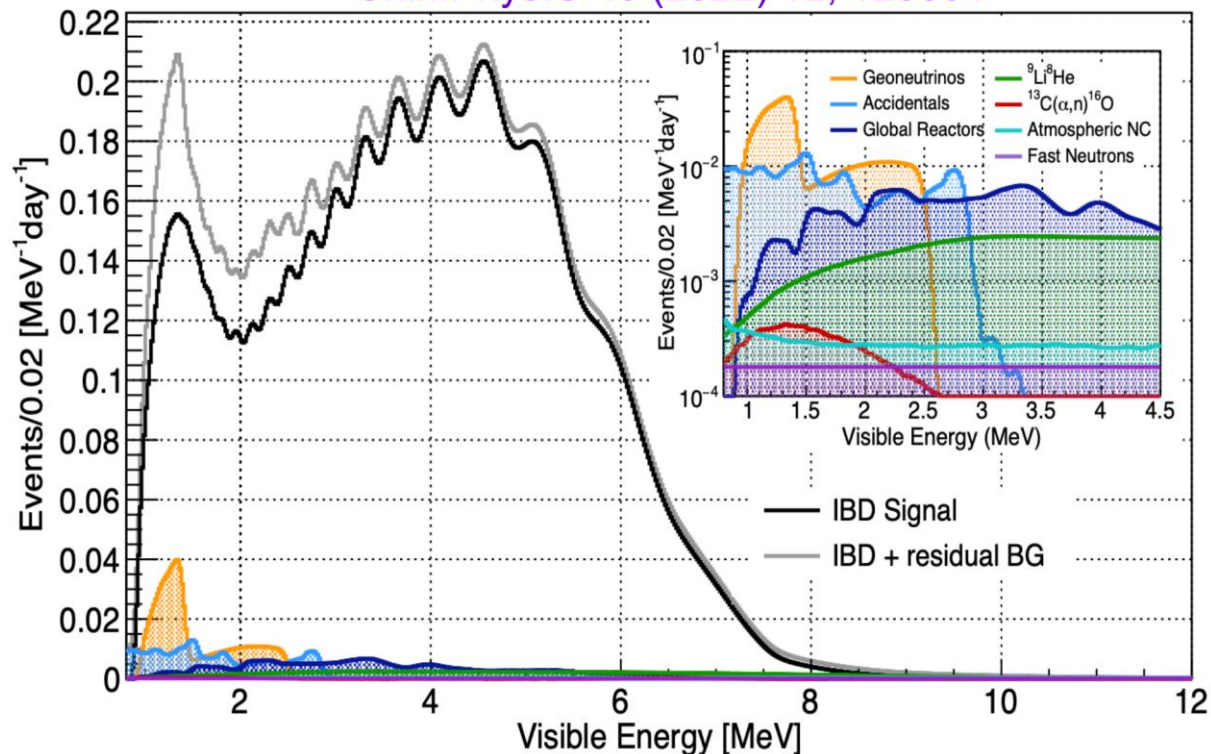


- JUNO will collect more geo-neutrino events than all the other experiments with 1 year data !

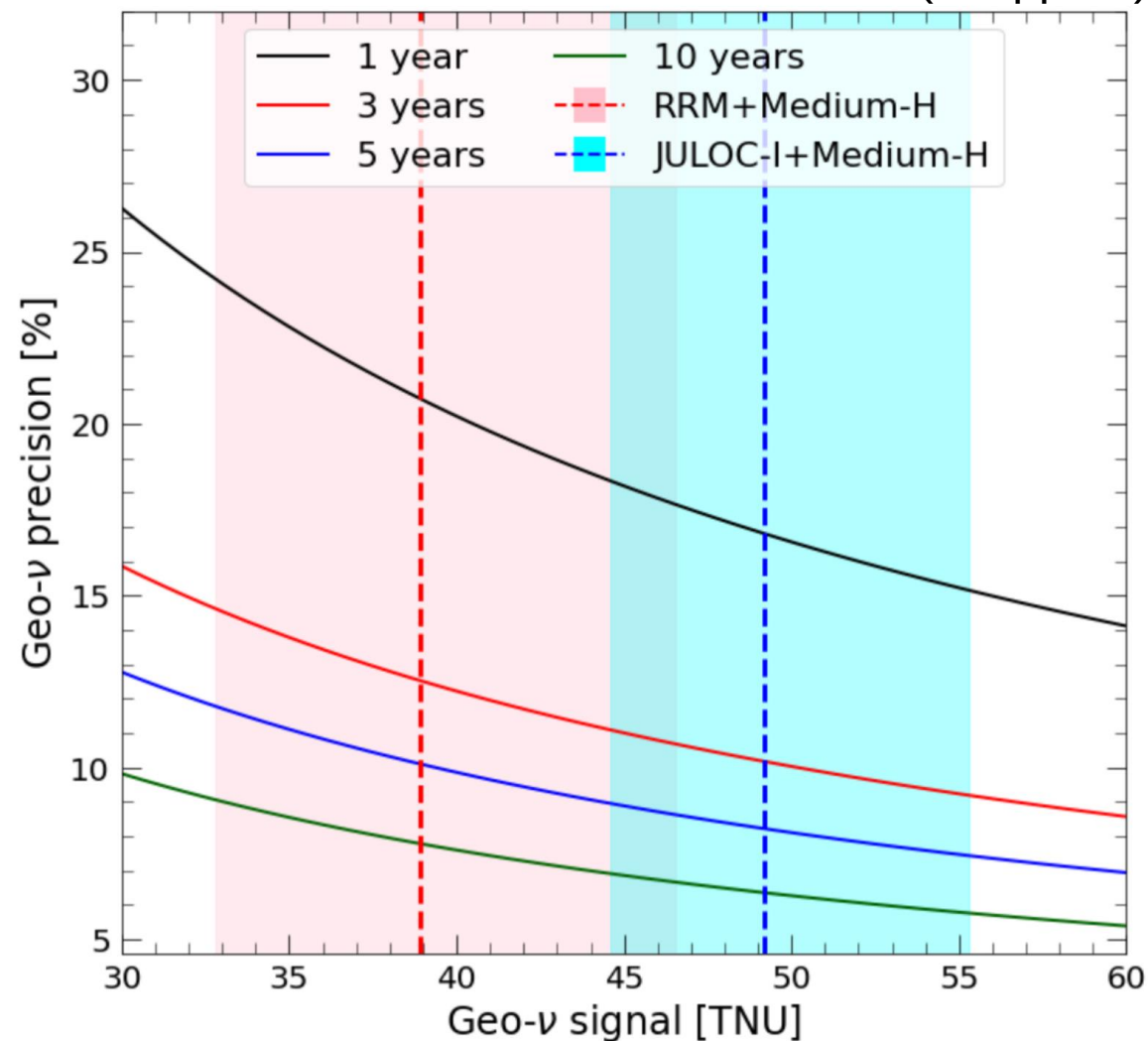
JUNO的地球中微子灵敏度

15

Chin.Phys.C 46 (2022) 12, 123001



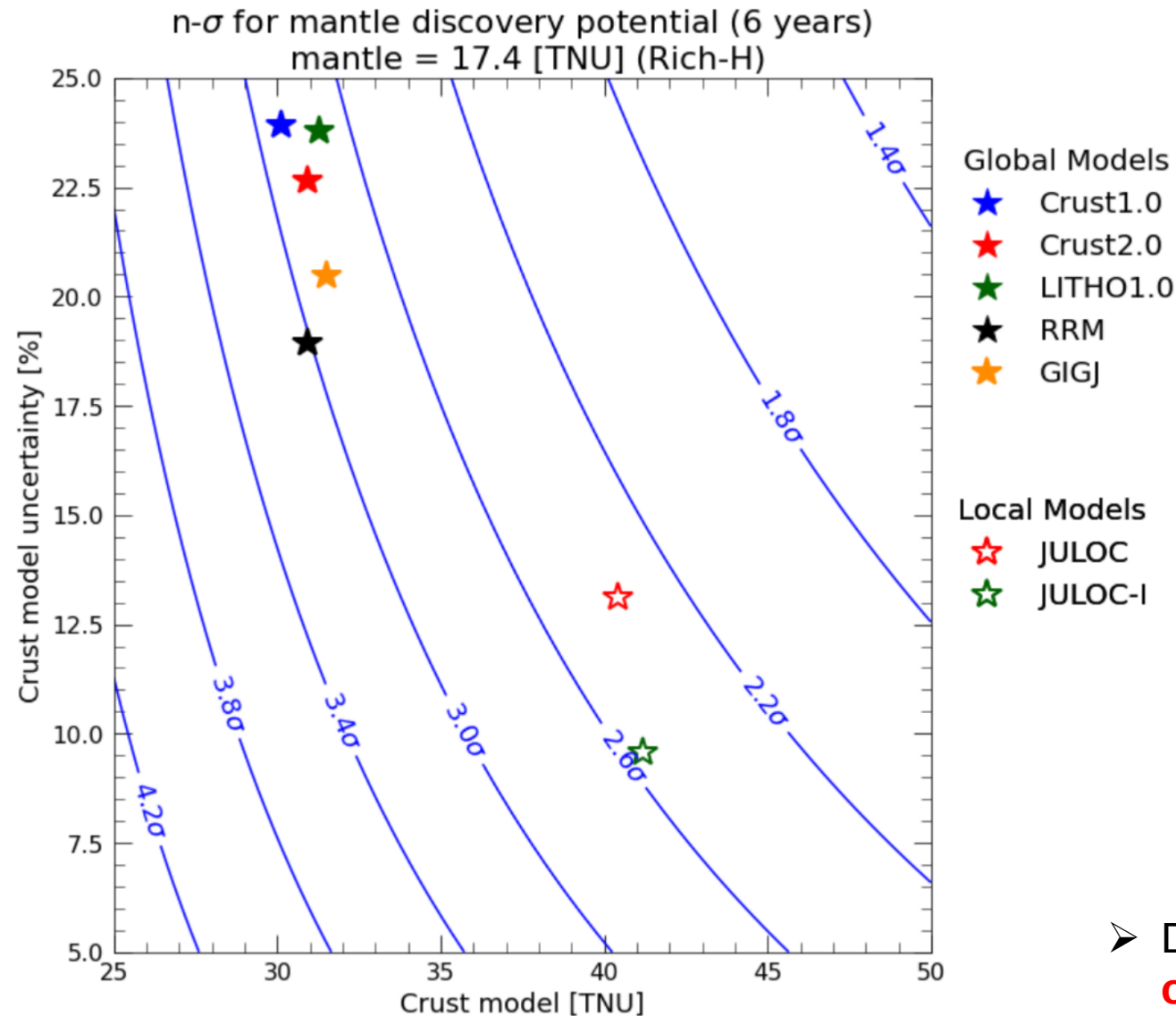
JUNO collaboration (to appear)



- Geo-neutrino flux can be measured **with high precision (~5% in 10 yrs)**, thanks to a high statistics determination of the reactor and geo neutrino spectra.
- However, predictions of crustal geo-neutrino signal suffer from large variations → **lack of local crust information, future efforts of geo-sciences !**

JUNO的地幔中微子探测潜力

16

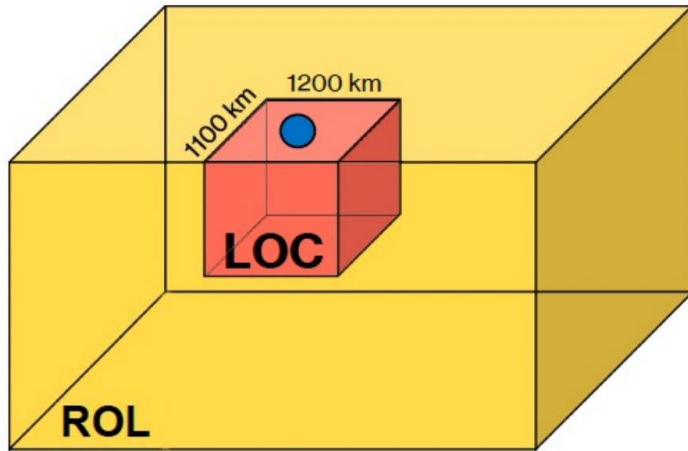


Lithosphere model		Total lithosphere [TNU]
Global	Crust 1.0	$31.7^{+8.4}_{-6.6}$
	Crust 2.0	$32.0^{+8.2}_{-6.6}$
	LITHO 1.0	$30.7^{+8.1}_{-6.4}$
	RRM	$30.9^{+6.5}_{-5.2}$
	GIGJ	$31.5^{+7.2}_{-5.7}$
Local	JULOC	$40.4^{+5.6}_{-5.0}$
	JULOC-I	$41.2^{+4.6}_{-3.3}$

Mantle model	Signal [TNU]
Poor-H	$2.8^{+2.3}_{-1.9}$
Medium-H	$8.0^{+4.0}_{-3.2}$
Rich-H	$17.4^{+5.6}_{-4.7}$

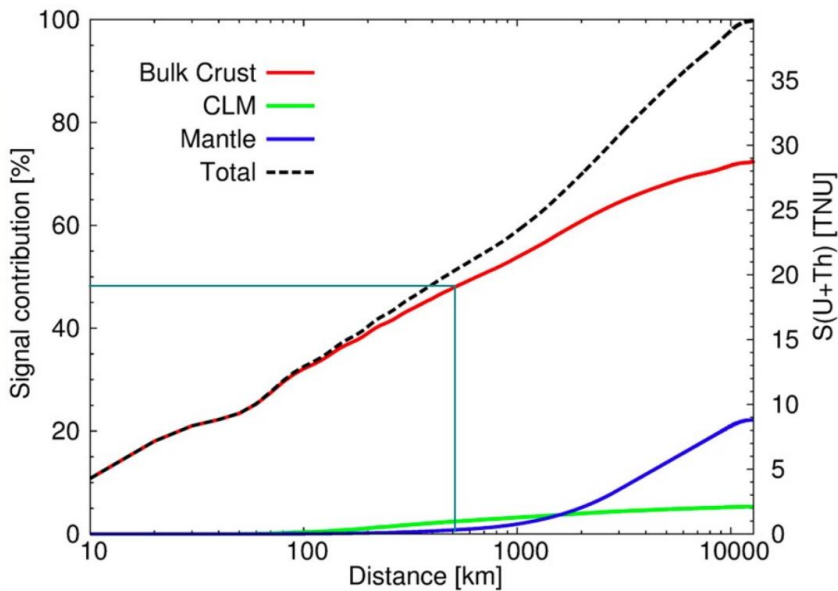
- Discover potential of the mantle signal **strongly depends on the geo-neutrino predictions and uncertainties.**

JUNO collaboration (to appear)



LocalCrust(LOC): the portion of crust centered in JUNO

Rest Of Lithosphere (ROL): the remaining crust subtracting the Local crust + the Continental Lithospheric Mantle *Reference Earth model, Huang et al. 2013*

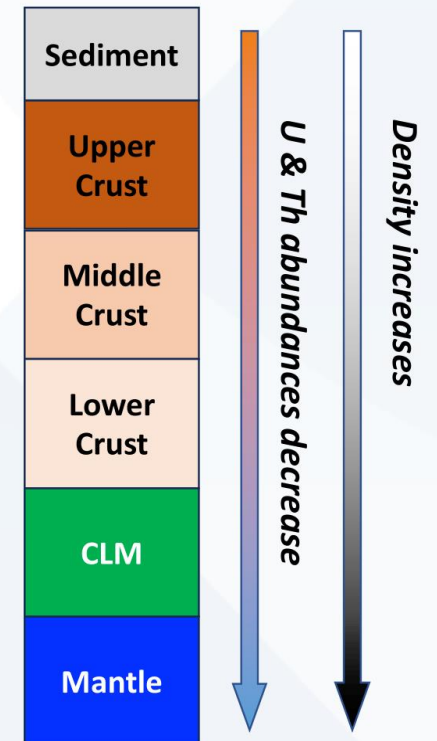


- **Geophysical models**

- **Density** of source unit
- **Crustal structure**

- **Geochemical models**

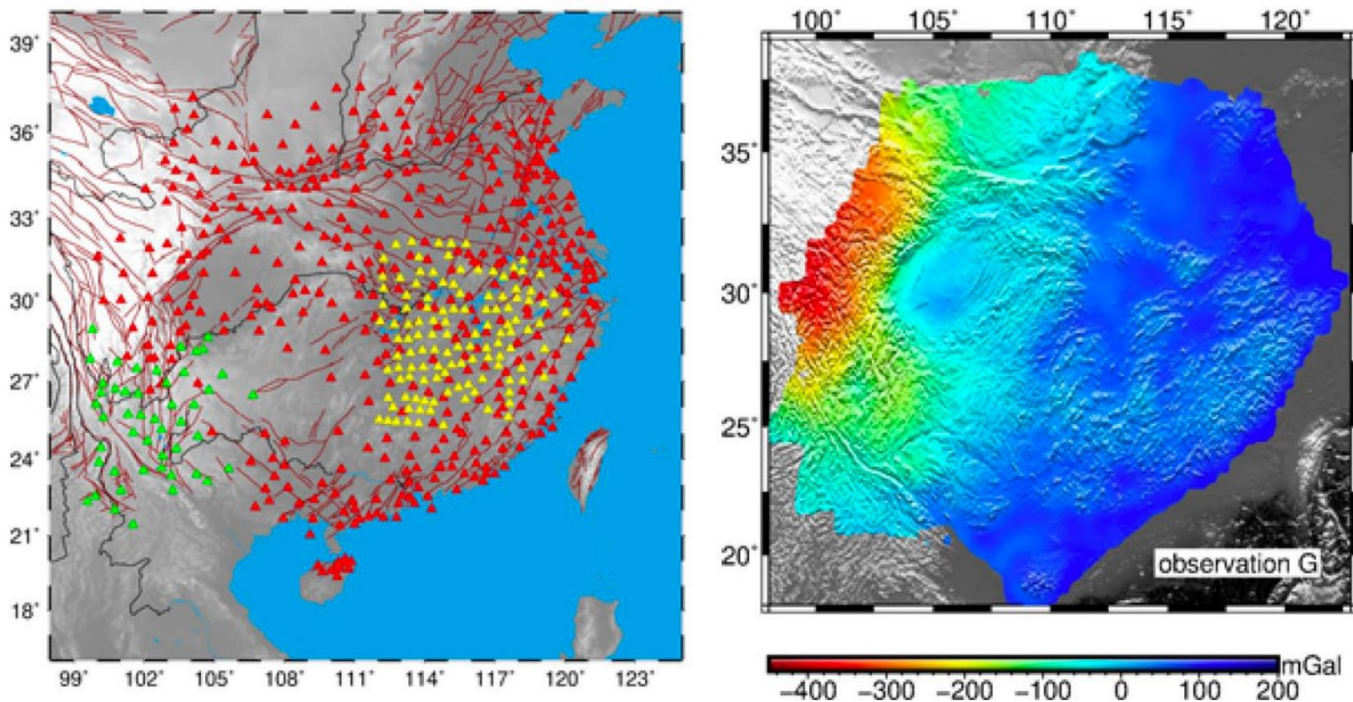
- **U and Th abundances** of source unit



➤ We should know the **3-dimentional details** of the density and abundances.

最新的近场地壳模型

18

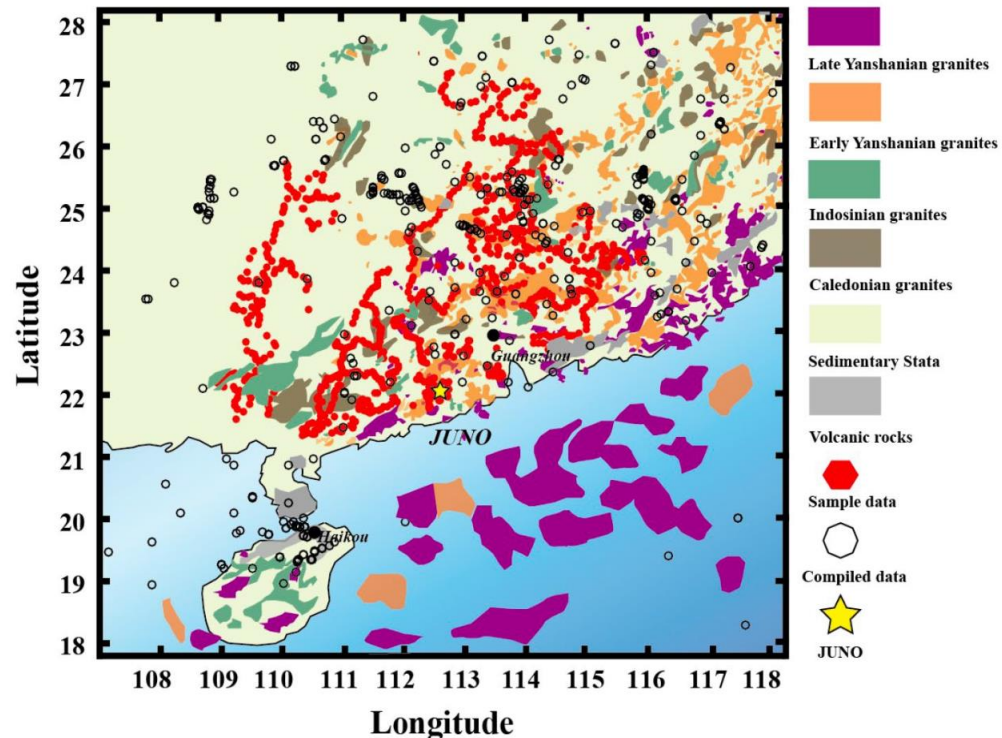


Area: $10^{\circ} \times 11^{\circ}$ almost centered in JUNO
[18° - 28° ; 107.2° - 118.0°]

(Han et al)

Geophysical modeling

- 3D-model是通过对地震环境噪声层析成像和重力数据的联合反演构建的
- 地壳分层和海洋地壳用的CRUST 1.0版本



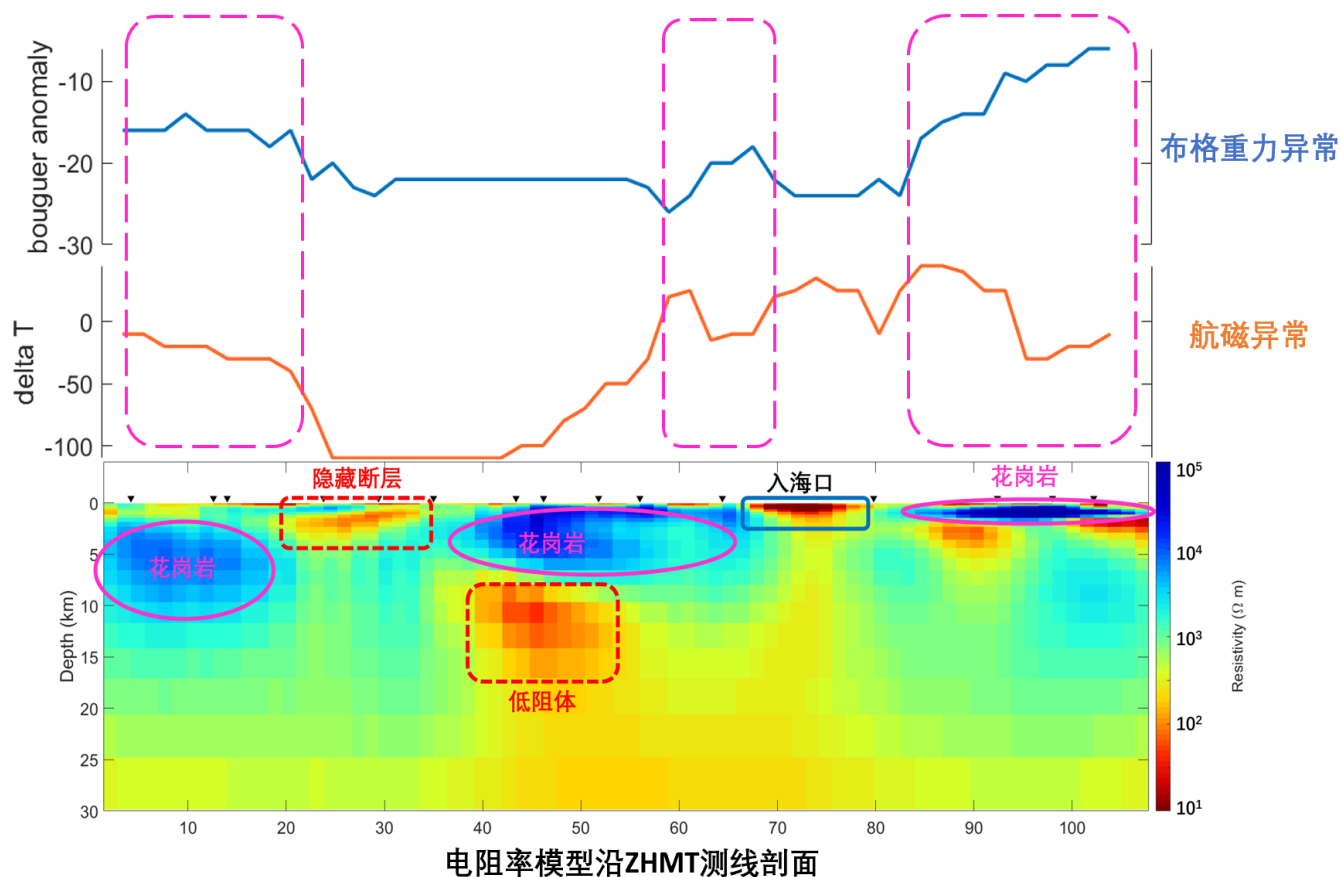
Geochemical modeling

- 500个自测样品, >3000个来自地球化学数据库
- 3D岩石比例图是根据地震数据反演的3D波速结构模型和Bayesian方法得到

未来地球模型的研究重点

19

- The **most important question** for model refinement: **The vertical distribution of granite (花岗岩)!**
- Using complementary probes of geo-physical studies:
Magnetotellurics (大地电磁), Gravity (重力异常), Magnetic Anomaly (磁异常), Seismic data (地震数据)



实测数据

- 增加JUNO附近的大地电磁测线和测点以构建其附近的地下电阻率结构。
- 提高航磁、布格重力数据的分辨率以进行更完善的整合分析
- 研究区域内电阻率和波速的关联关系

数据处理及模型构建

- 发掘区域内波速、电阻率和重磁数据与花岗岩分布的关联关系
- 重、磁、电磁、地震联合反演3维模型

JUNO: 未来三个主要衰变实验之一

20

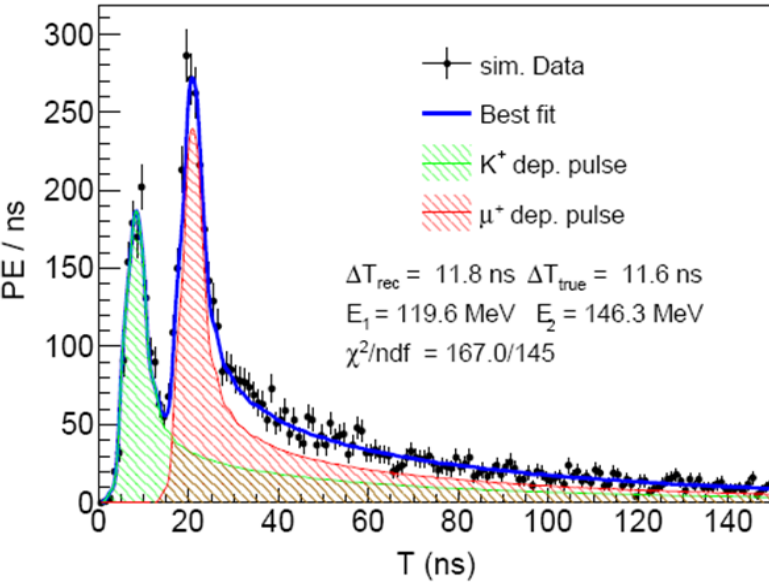
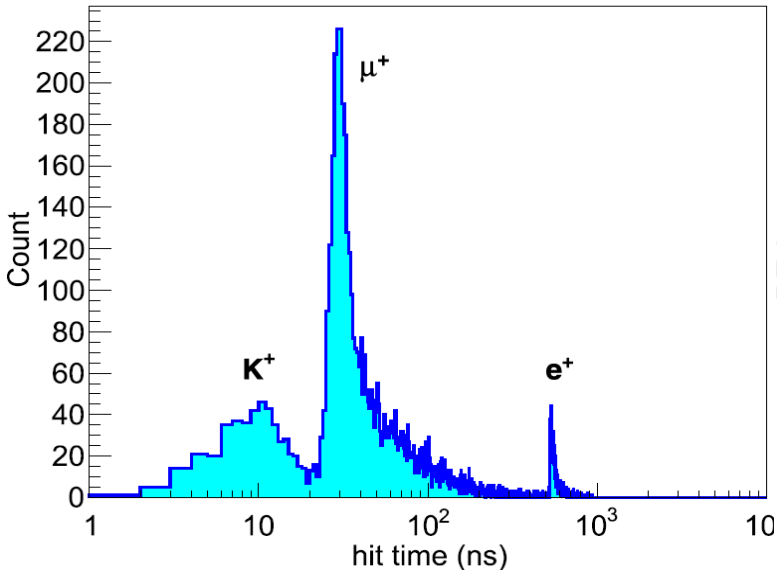
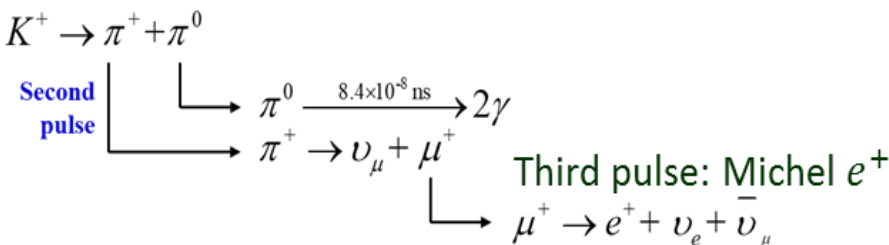
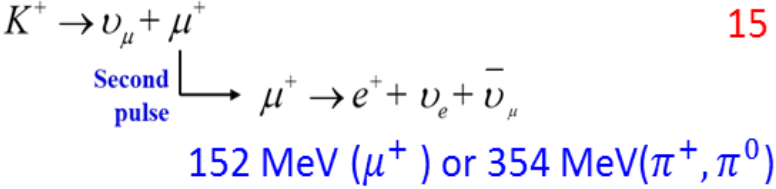
- 寻找核子衰变意义重大：宇宙物质-反物质不对称、检验大统一理论
- 第三代核子衰变实验(JUNO, Hyepr-K,DUNE)在几年内将相继运行
- 未来15年核子衰变的实验限制将得到极大的提升
- 3个实验既竞争又互补：不同探测技术、不同靶核(C12,O16,Ar40)
- JUNO在一些衰变道是有优势的，值得全面深入研究

	Hyper-K	DUNE	JUNO
Mass (kton)	258 (186)	4*17 (4*10)	20
Target Nucleus	H ₂ O	Ar40	12% H, 88% C12
Technology	Water Cerenkov	LAr TPC	Liquid Scintillator
Start Time	2027	2028/29	2025
Advantages	Large mass and cheap Good particle Identification Good direction resolution	Excellent track reconstruction Excellent particle Identification Good energy resolution	Excellent energy resolution 3% Excellent E threshold 0.7MeV
Shortcomings	Cerenkov threshold	Complex FSI for Ar40	Direction information lost

JUNO基于三重符合信号探测 $p \rightarrow \bar{\nu} K^+$

21

First pulse: K^+ kinetic energy of ~ 105 MeV, decay at rest
15 cm, 1.2ns

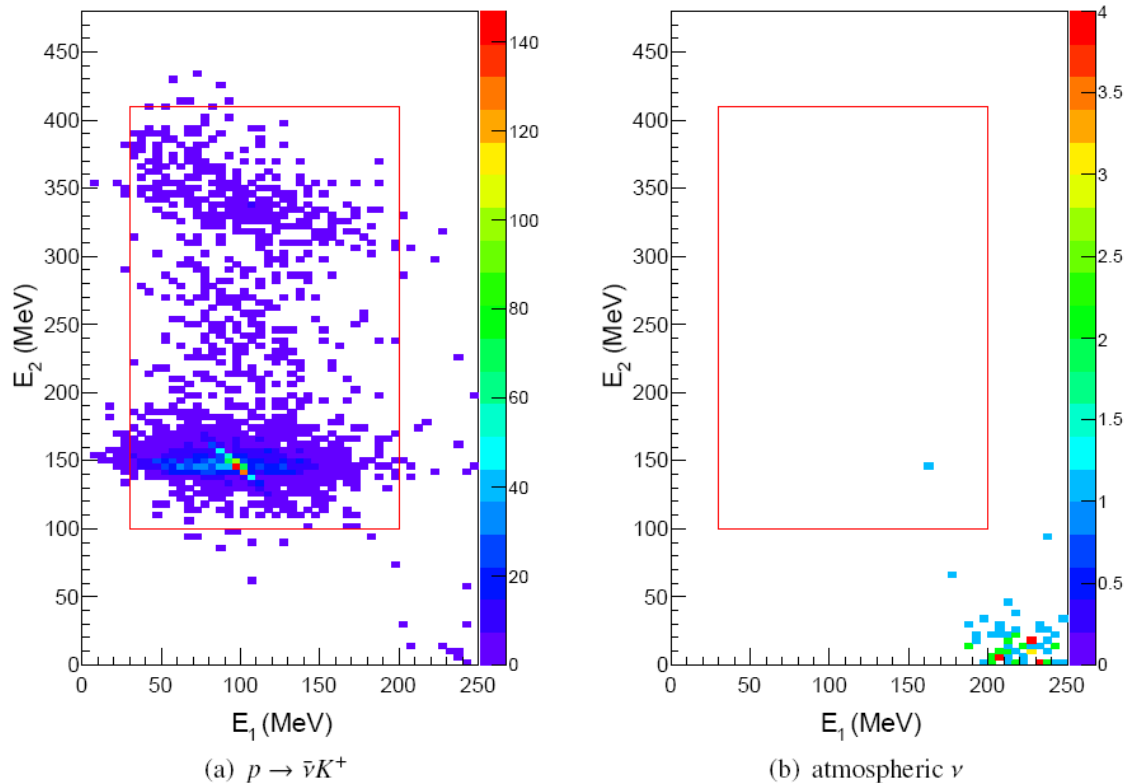


事例挑选、信号效率、大气中微子本底

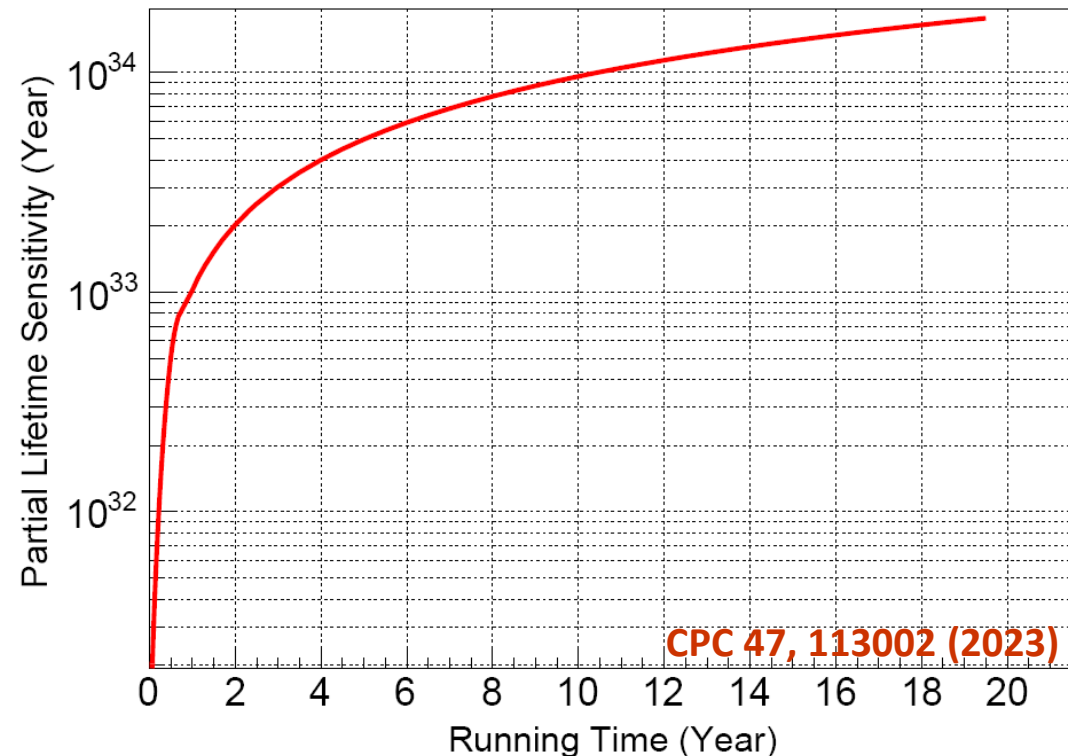
Criteria		Survival rate of $p \rightarrow \bar{\nu} K^+$ (%)			Survival count (fraction) of atmospheric ν		
		Sample 1	Sample 2	Sample 3	Sample 1	Sample 2	Sample 3
basic selection	E_{vis}	94.6			51299 (32.1%)		
	R_V	93.7			47849 (29.9%)		
Delayed signal selection	N_M	74.4		4.4	20739 (13.0%)		1143 (0.7%)
	ΔL_M	67.0		4.4	13796 (8.6%)		994 (0.6%)
	N_n	48.4	17.9	—	5403 (3.4%)	6857 (4.3%)	—
	ΔL_n	—	16.6	—	—	4472 (2.8%)	—
Time character selection	R_χ	45.9	9.0	3.8	4326 (2.7%)	581 (0.4%)	716 (0.4%)
	ΔT	28.3	7.7	2.4	121 (0.07%)	18 (0.01%)	30 (0.02%)
	E_1, E_2	27.4	7.3	2.2	1 (0.0006%)	0	0
Total		36.9			1		

JUNO探测 $p \rightarrow \bar{\nu} K^+$ 的灵敏度

22



Background: 0.2/10years
Efficiency : 36.9%



SK(260 kt·y): 0.59×10^{34} yrs (PRD 90, 072005 (2014))

$\tau/B(p \rightarrow \bar{\nu} K^+) > 0.96 \times 10^{34}$ yrs

其他相似信号衰变道: $n \rightarrow \mu^- K^+$, $p \rightarrow e^+ K^*(892)^0$, $n \rightarrow \nu K^*(892)^0$, and $p \rightarrow \nu K^*(892)^+$

JUNO基于三重符合信号探测中子不可见衰变

23

^{12}C 中束缚中子不可见衰变：

- $n \rightarrow inv$ ($^{12}\text{C} \rightarrow ^{11}\text{C}^*$)
- $nn \rightarrow inv$ ($^{12}\text{C} \rightarrow ^{10}\text{C}^*$)

不可见粒子：

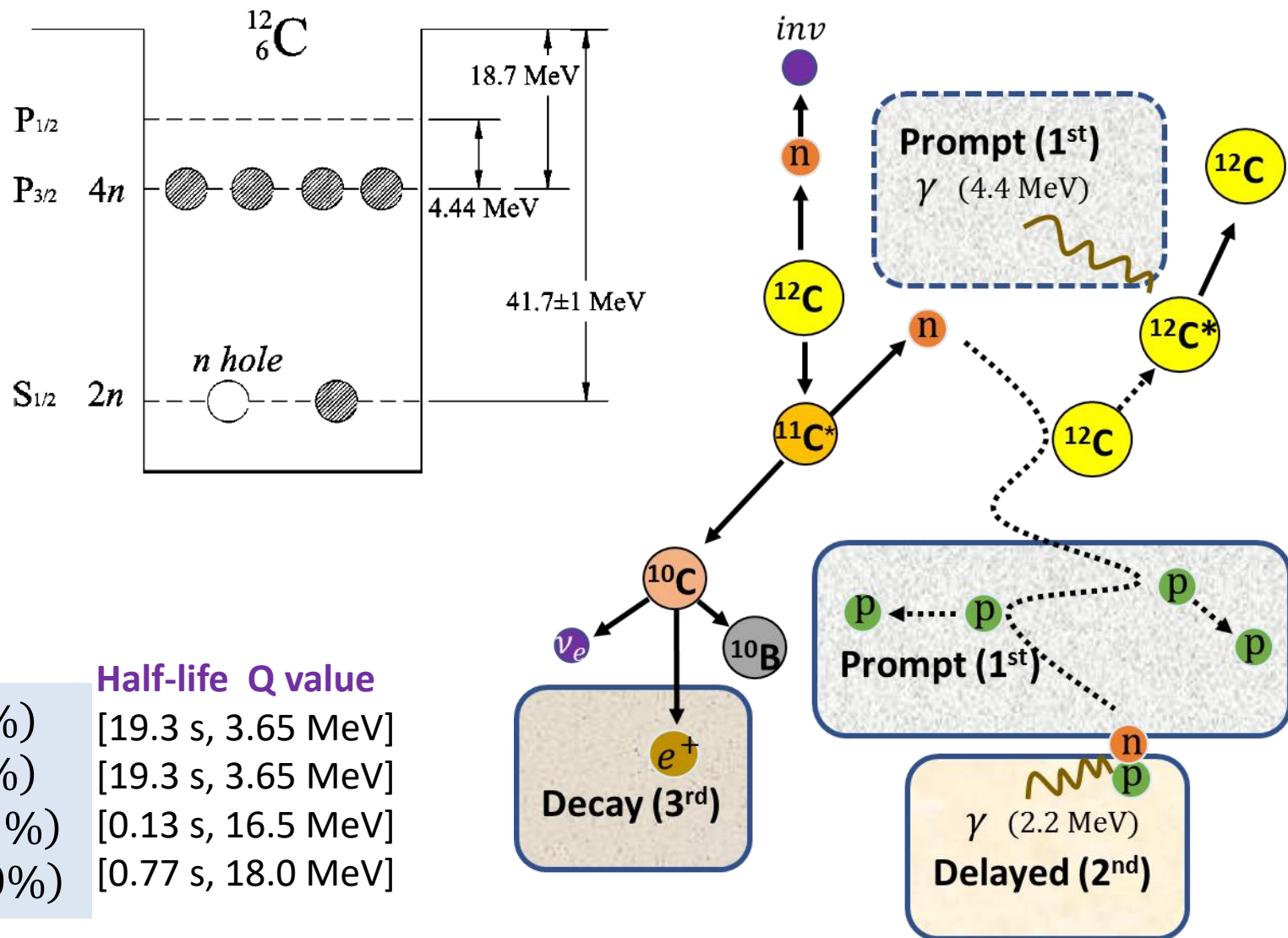
中微子，新物理粒子等

探测 $^{11}\text{C}^*$ 和 $^{10}\text{C}^*$ 退激发产物



三重复合信号：

$^{11}\text{C}^* \rightarrow n +$	^{10}C	$(Br_{n1} = 3.0\%)$	Half-life Q value
$^{11}\text{C}^* \rightarrow n + \gamma +$	^{10}C	$(Br_{n2} = 2.8\%)$	[19.3 s, 3.65 MeV]
$^{10}\text{C}^* \rightarrow n +$	^9C	$(Br_{nn1} = 6.2\%)$	[0.13 s, 16.5 MeV]
$^{10}\text{C}^* \rightarrow n + p +$	^8B	$(Br_{nn2} = 6.0\%)$	[0.77 s, 18.0 MeV]

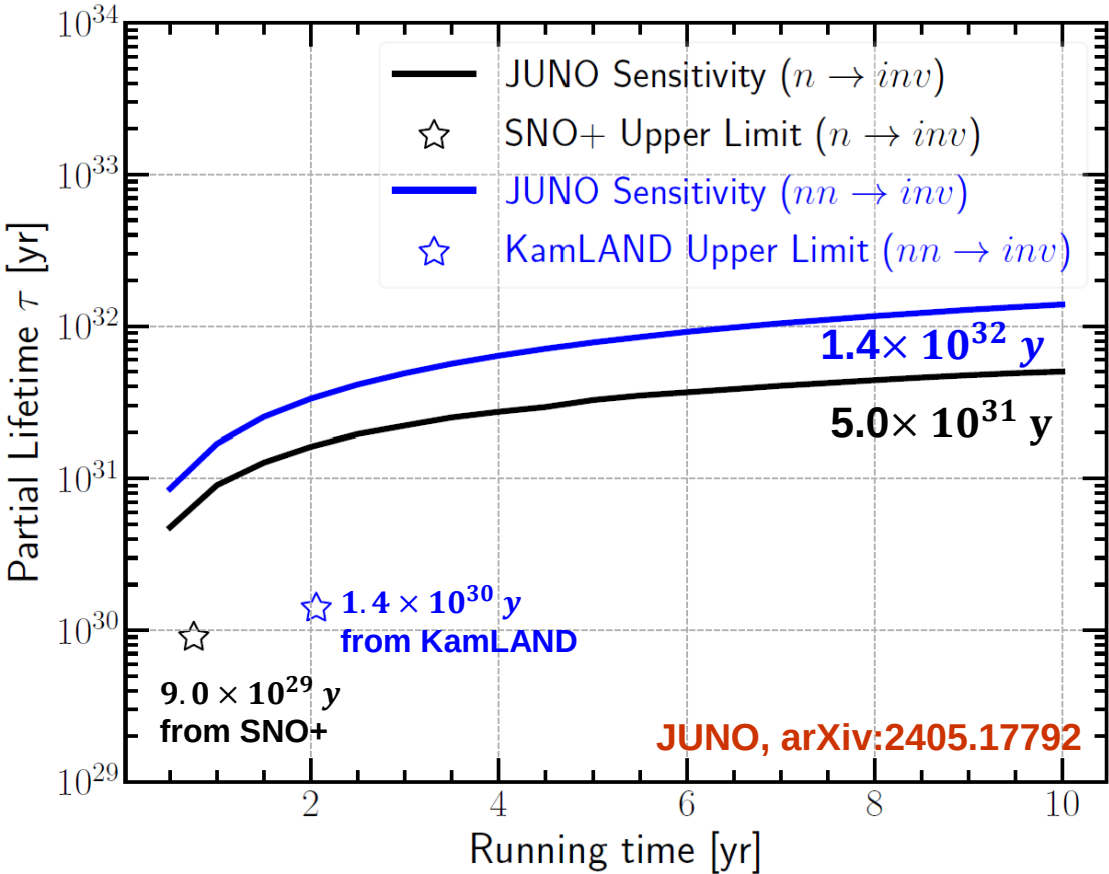


事例挑选:

Selection Criterion	$n \rightarrow inv$		$nn \rightarrow inv$	
	$^{11}\text{C}^* \rightarrow n + ^{10}\text{C}$	$^{11}\text{C}^* \rightarrow n + \gamma + ^{10}\text{C}$	$^{10}\text{C}^* \rightarrow n + ^9\text{C}$	$^{10}\text{C}^* \rightarrow n + p + ^8\text{B}$
All triple signals	100	100	100	100
Muon Veto	65.7 ± 0.2	65.5 ± 0.2	80.8 ± 0.2	78.3 ± 0.2
Fiducial Volume	83.5 ± 0.4	82.7 ± 0.4	82.9 ± 0.4	83.1 ± 0.4
Event Selection	75.4 ± 0.9	89.7 ± 0.3	89.2 ± 0.3	83.5 ± 0.3
Multiplicity Cut	93.8 ± 0.1	93.8 ± 0.1	$99.9 \pm \mathcal{O}(10^{-4})$	$99.9 \pm \mathcal{O}(10^{-4})$
Combined Selection	38.8 ± 0.5	45.6 ± 0.3	59.7 ± 0.4	54.3 ± 0.4

信号效率与本底:

Backgrounds (10 years)	$n \rightarrow inv$		$nn \rightarrow inv$	
	Basic selection	PSD + MVA	Basic selection	PSD + MVA
IBD + Single	1235 ± 50	2.72 ± 0.10	3.01 ± 0.09	0.0110 ± 0.0003
Atm- ν NC	3.0 ± 1.1	0.93 ± 0.67	4.3 ± 3.5	0.55 ± 0.63
$^{13}\text{C}(\alpha,n)^{16}\text{O}$ + Single	3.4 ± 1.4	0.036 ± 0.013	–	–
$^9\text{Li}/^8\text{He}$ + Single	1.55 ± 0.39	0.29 ± 0.17	0.13 ± 0.13	0.13 ± 0.13
Accidental	1.46 ± 0.05	0.095 ± 0.004	–	–
Total	1244 ± 50	4.07 ± 0.68	7.4 ± 3.5	0.69 ± 0.64
Signal efficiency (%)	$n \rightarrow inv$		$nn \rightarrow inv$	
	Basic selection	PSD + MVA	Basic selection	PSD + MVA
$\epsilon_{n(nn)1}$	35.6 ± 0.2	23.5 ± 0.2	54.0 ± 0.3	48.2 ± 0.3
$\epsilon_{n(nn)2}$	43.6 ± 0.3	30.3 ± 0.3	49.2 ± 0.3	36.3 ± 0.3



2年数据可以提升一个量级

1、研究JUNO有优势的衰变道（物理分析）

- 截止目前实验上共测量了82个衰变道→寿命下限
- Super-K测了38个道，绝大部分给出了最佳限制
- JUNO利用3年数据对很多衰变道能给出最佳限制

2、寻找动量守恒的物理量（重建方面）

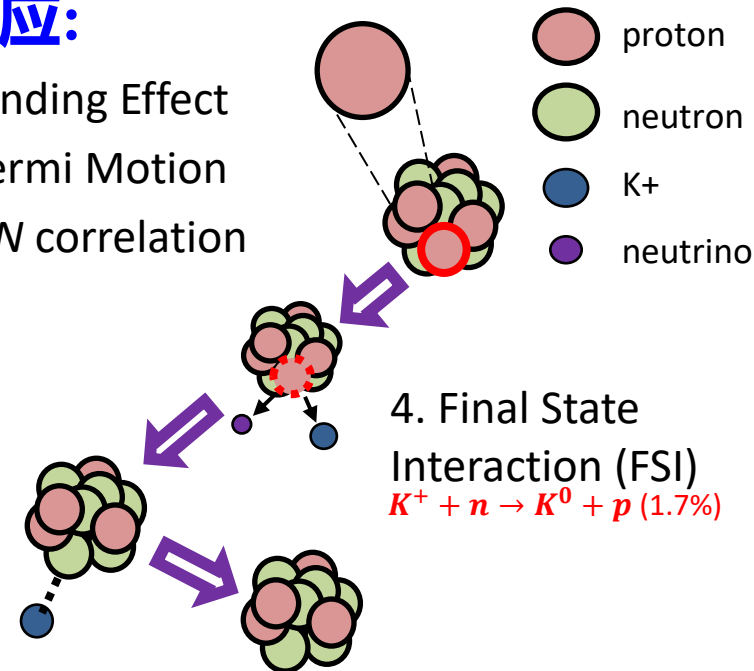
- 目前很难将大气中微子本底压到10年几个的水平
- 液闪在原理上能够重建有能量粒子的方向(动量)
- 利用动量守恒条件进一步区分核子衰变与大气本底
- 重建和鉴别muon衰变产生的米歇尔电子

3、研究核子衰变相关的核物理（产生子方面）

- 核子衰变相关的核效应 → 末态相互作用、退激发
- 修改中微子相互作用产生子 (GENIE、NuWro)
- 基于Spectral Function核模型→合理的激发能
- 校验/修改核子衰变和大气事例的末态相互作用
- 实现核子衰变和大气中微子事例残余核的退激发

核效应:

1. Binding Effect
2. Fermi Motion
3. NN correlation



- ✓ 已完成GENIE核子衰变部分的修改
- ✓ TALYS和GEMINI++ + 4v可用于退激发

H. Hu, W.L. Guo et al, PLB 831, 137183 (2022)

Y.J Niu, W.L. Guo, M. He and J. Su, 2408.14955

■ 天然放射性本底

- JUNO安装进入收尾阶段，清洁工作持续进行
- 在实验室层面研发了基于ICP-MS的LS质检方法，用于JUNO液闪生产质检
- 明年开始灌装，首要任务是理解探测器本底水平

■ 地球中微子

- 研究地球物理和化学，给出更精确的模型用于数据分析
- 研究JUNO探测地球中微子的物理灵敏度

■ 核子衰变

- 利用动量守恒条件优化重建，进一步区分核子衰变与大气中微子本底
- 研究核子衰变相关的核物理，优化产生子
- 分析其他核子衰变道的物理灵敏度

谢谢聆听！