

天然放射性本底

赵洁

高能物理研究所 特聘青年研究员


江門中微子實驗

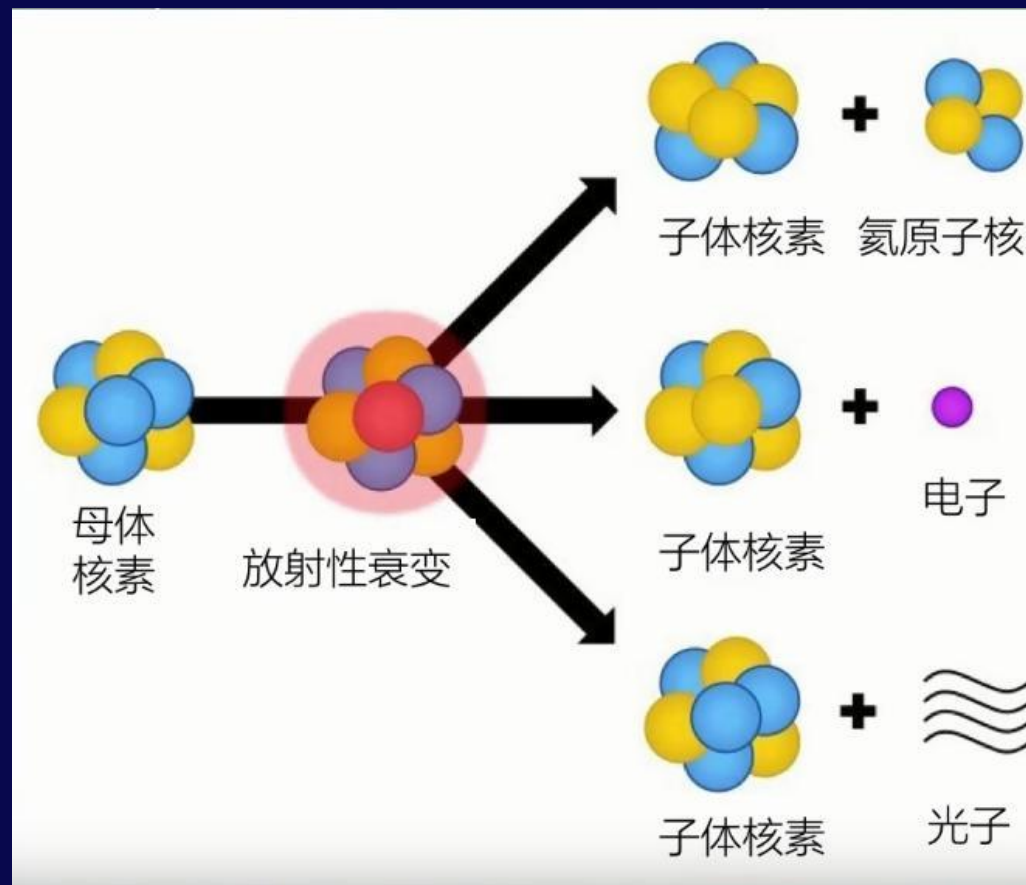
Jiangmen Underground Neutrino Observatory

2024年7月7日

什么是天然放射性？

- 天然放射性（Natural radioactivity）是指天然存在的放射性同位素，其能够从不稳定的原子核自发地放出射线，（如 α 射线、 β 射线、 γ 射线等）而衰变形成稳定元素的属性。
- 原子序数83（包括83）以后的所有元素都具有天然放射性

射线种类	组成物质	速率	贯穿本领	电离本领
α 射线	氦核 ${}^4_2\text{He}$	$\frac{1}{10}c$	最弱	最强
β	电子 ${}^0_{-1}e$	接近 c	较弱	较弱
γ	γ 光子	c	最强	最弱

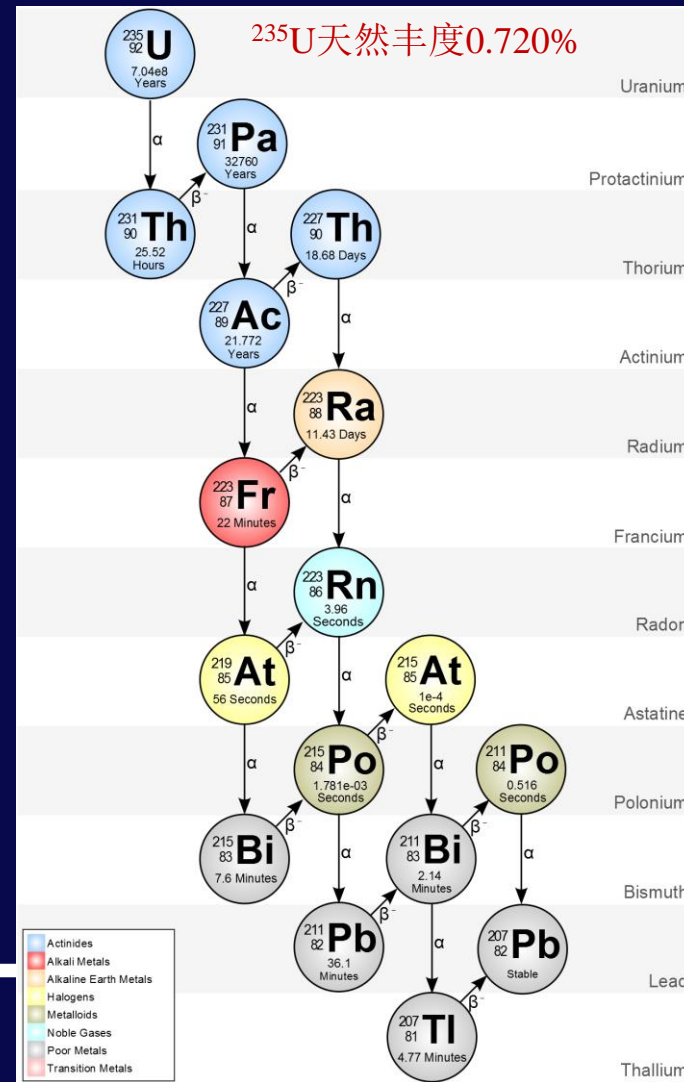
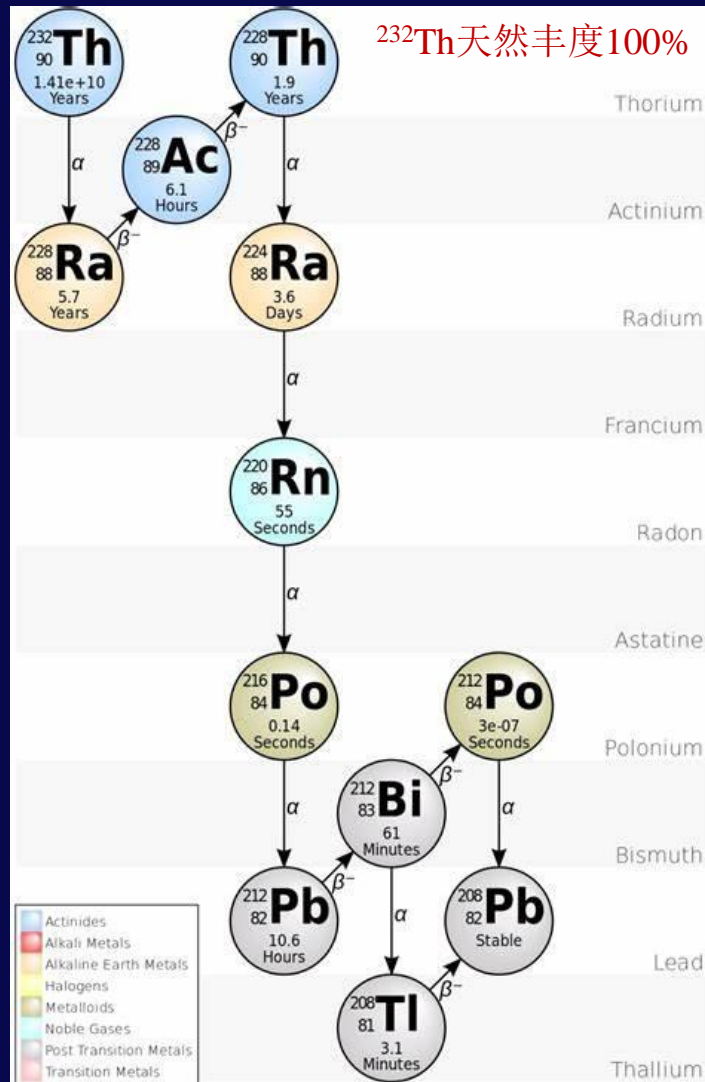
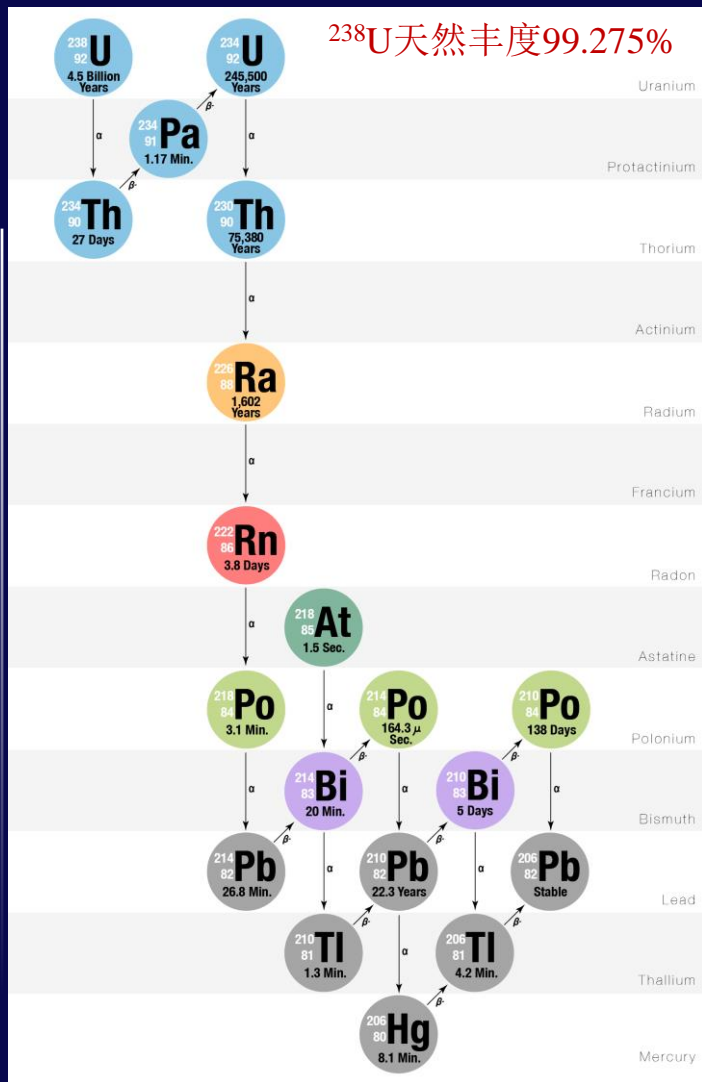


身边的放射性辐射

辐射种类	辐射权重因子
X射线、 γ 射线、 β 粒子	1
α 粒子、裂变碎片	20
中子 (<10keV)	5
中子 (10-100keV)	10
中子 (100keV-2MeV)	20



三个天然衰变系

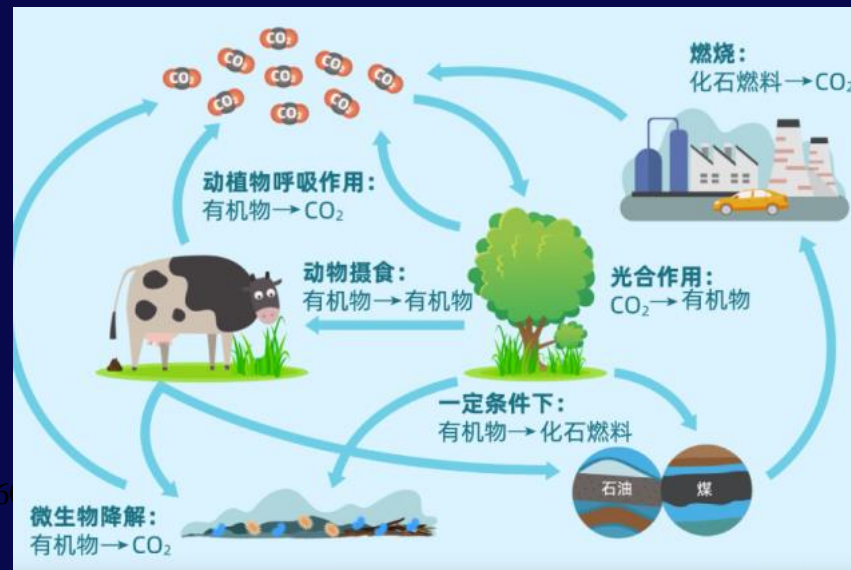


其他天然放射性核素

^{40}K 天然丰度0.0117%



^{14}C 天然丰度0.00000000010%

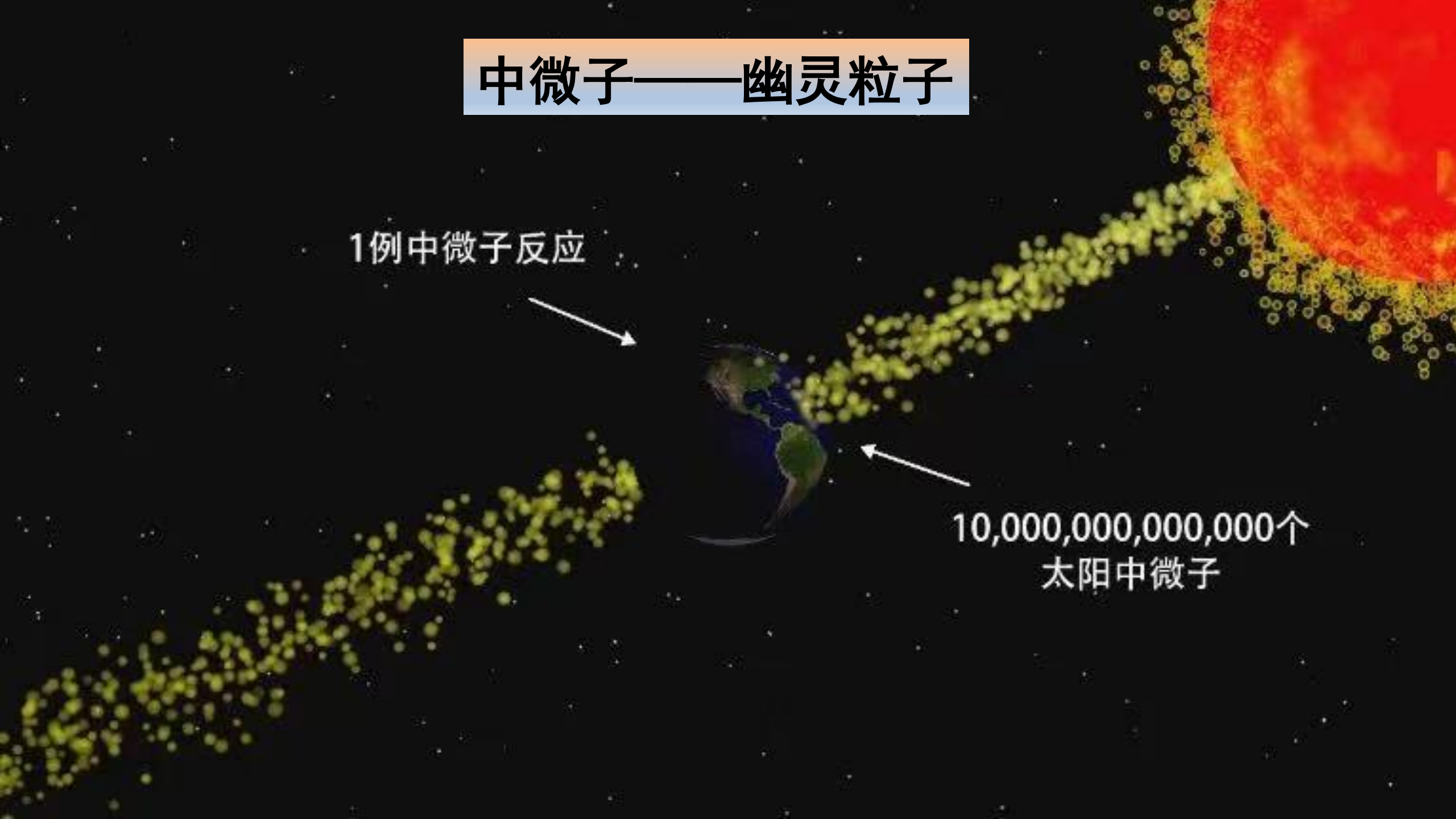


中微子——幽灵粒子

1例中微子反应



10,000,000,000,000个
太阳中微子



捕捉中微子的要点

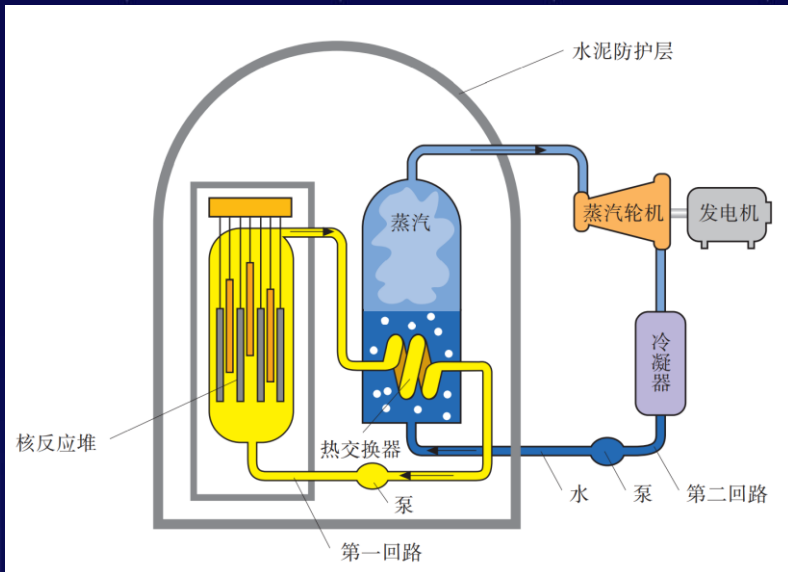
源
足够强

干扰
足够低

设备
足够大



大亚湾核电站



源
足够强

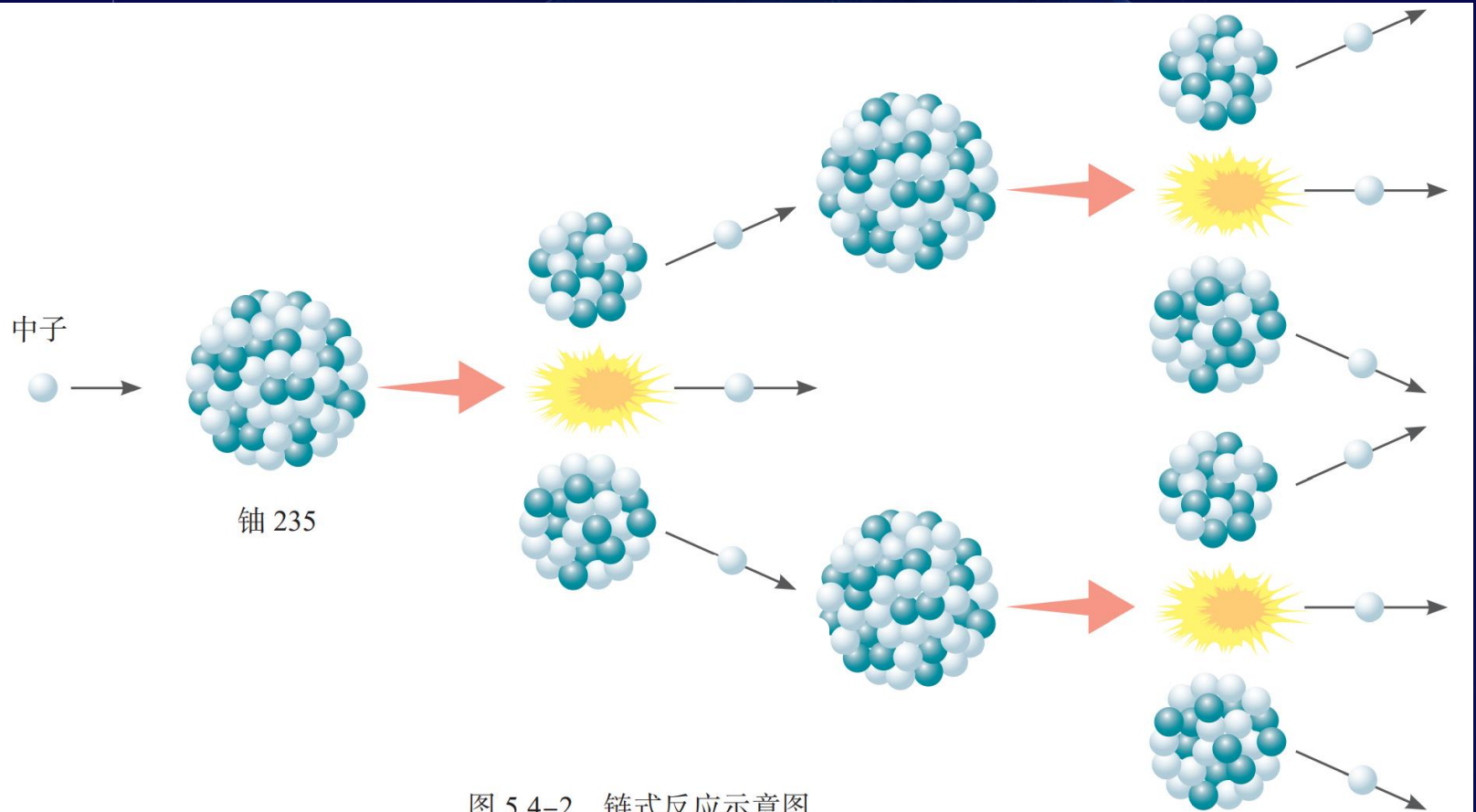
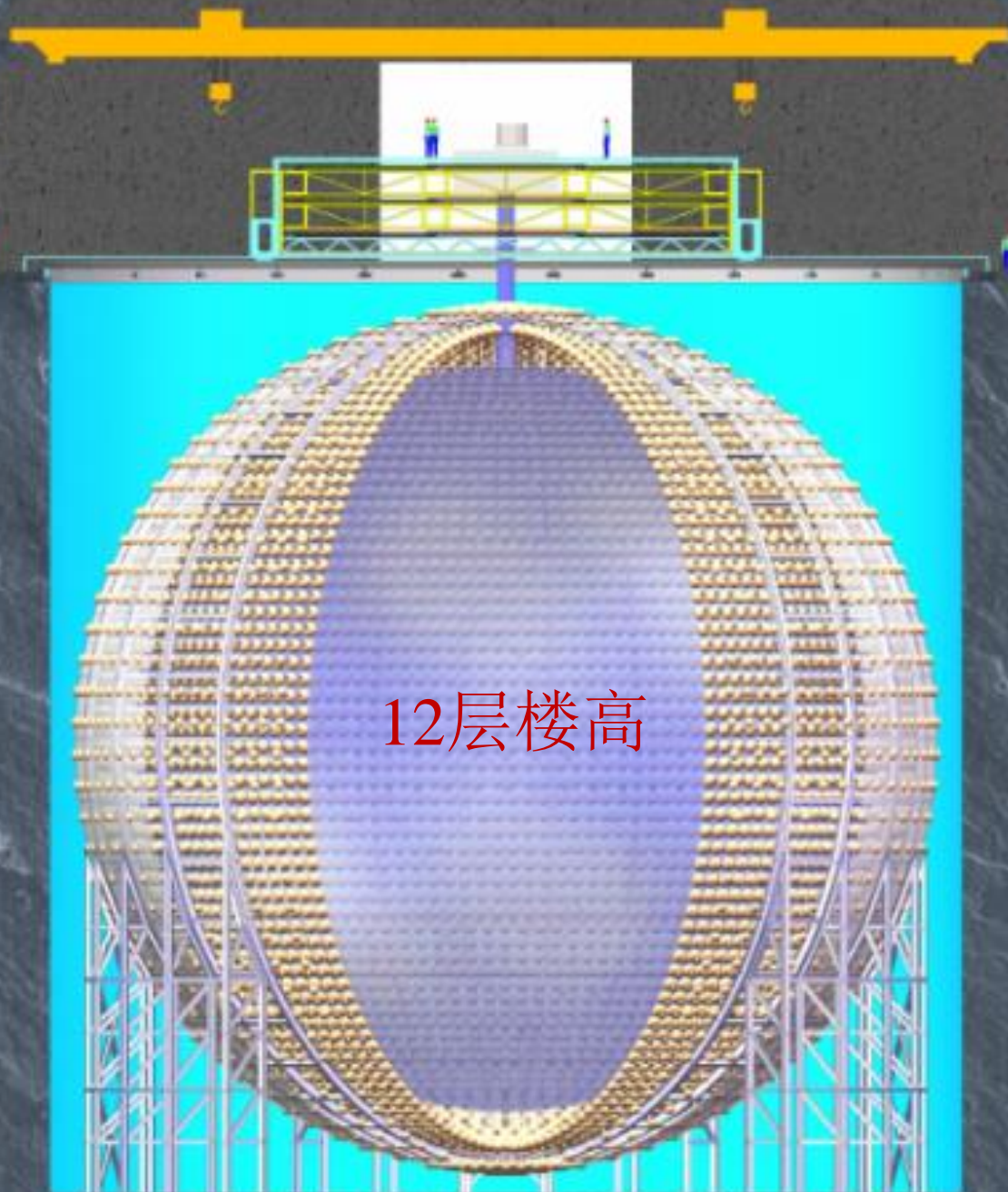


图 5.4-2 链式反应示意图

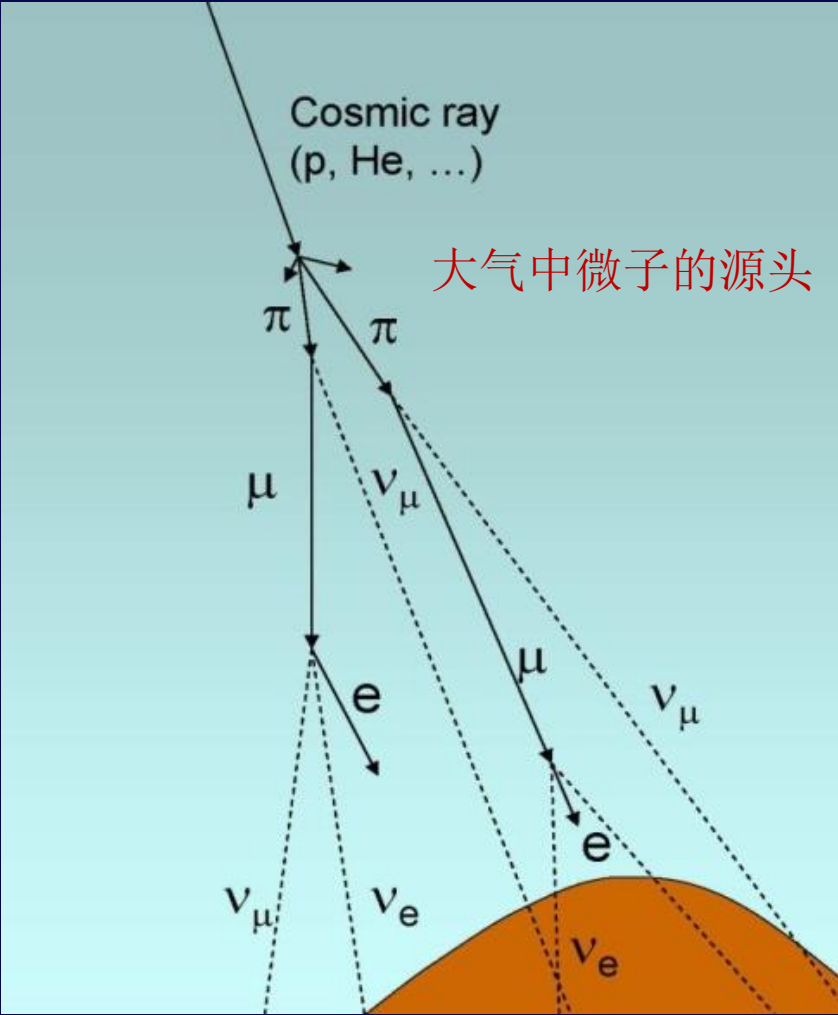
设备
足够大

12层楼高



干扰
足够低

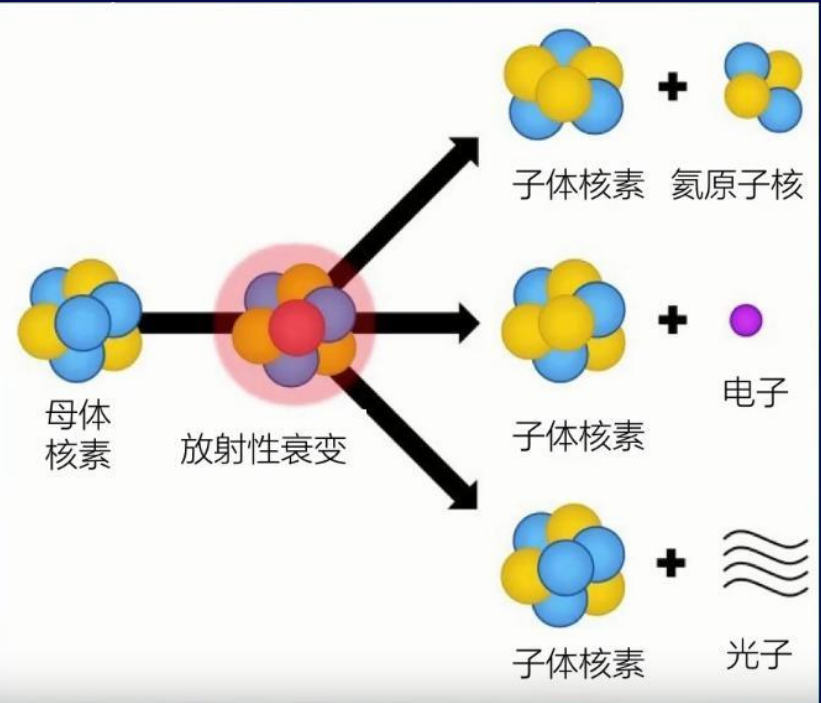
建在地下700米 → 宇宙射线降低十万倍



干扰
足够低

找最干净的原材料搭探测器

建在地下700米 → 宇宙射线降低十万倍

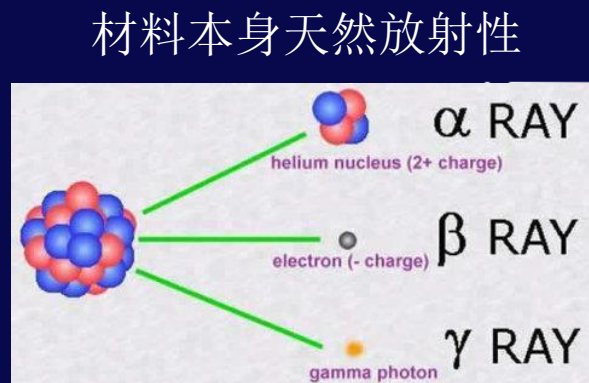


捕捉中微子的要点



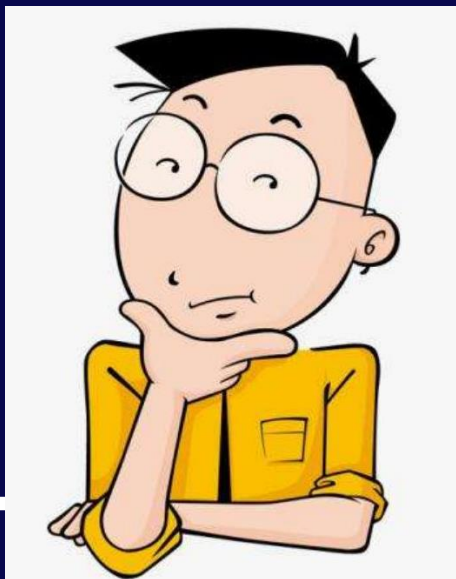
干扰
足够低

山下700米 最干净的液体

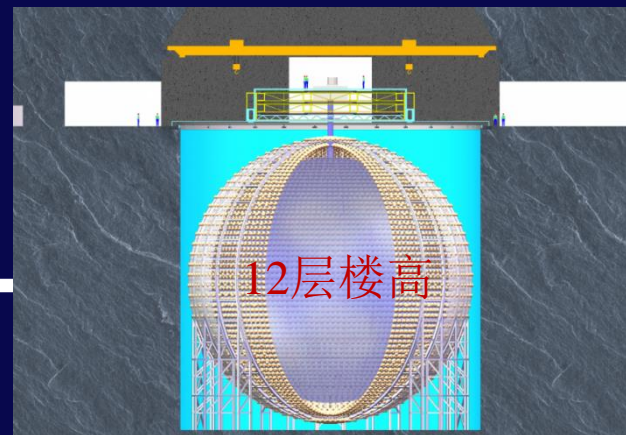


源
足够强

35万亿亿/秒



设备
足够大

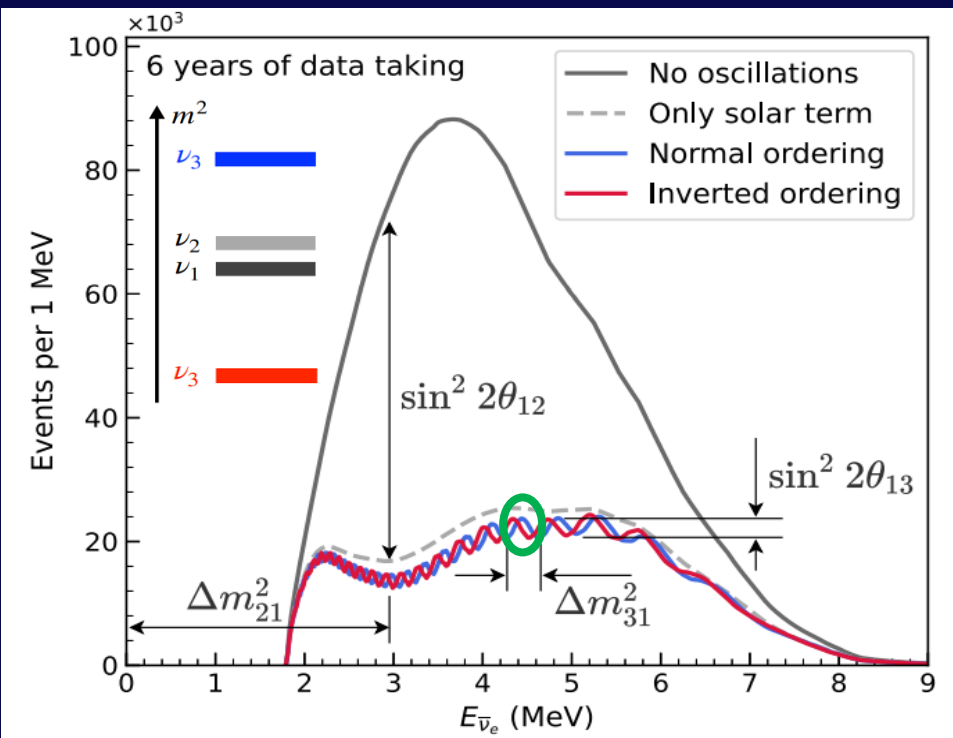


探测器本底指标设计

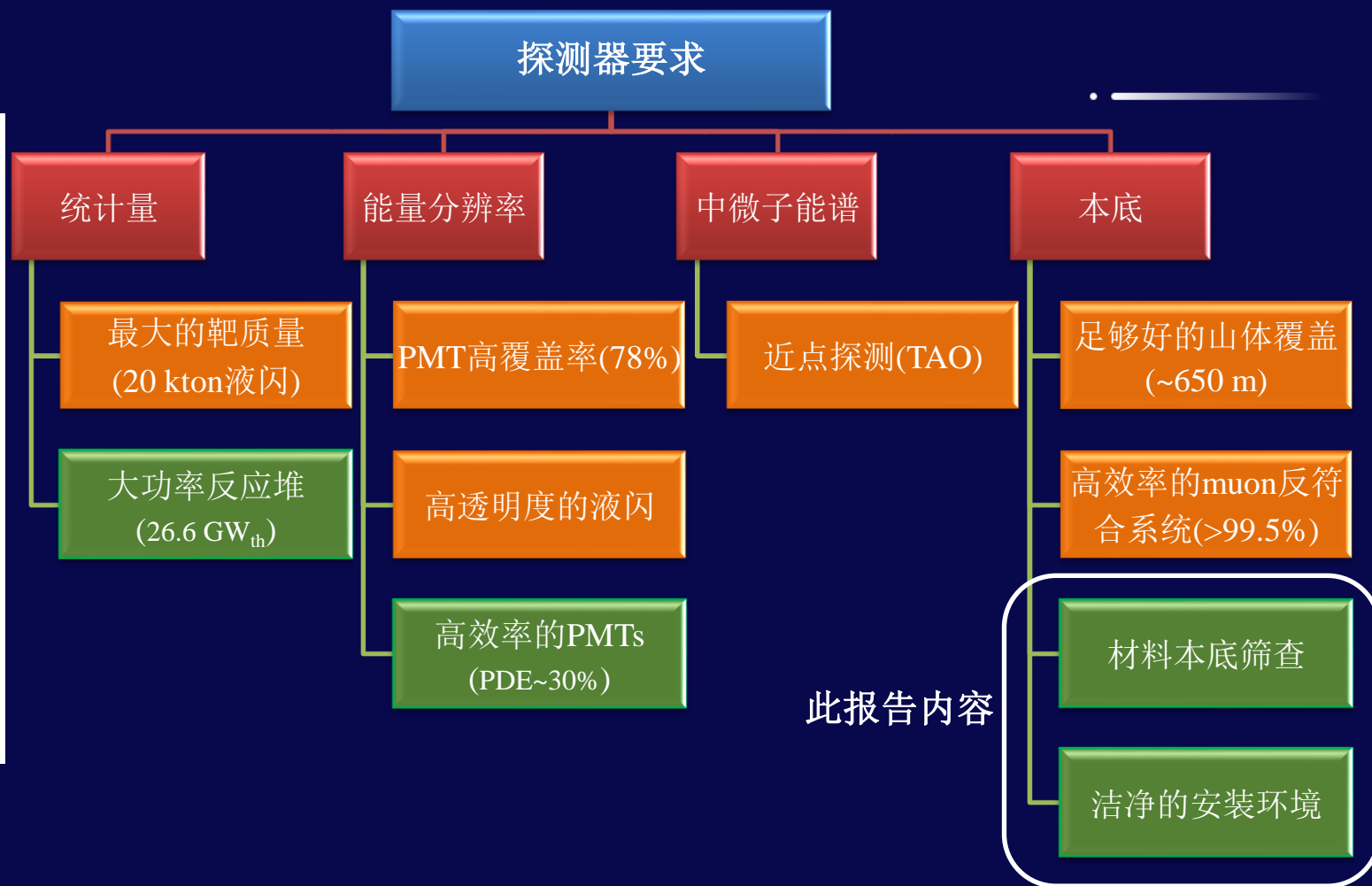


基于物理目标的探测器要求

举例: 精确测量中微子振荡参数



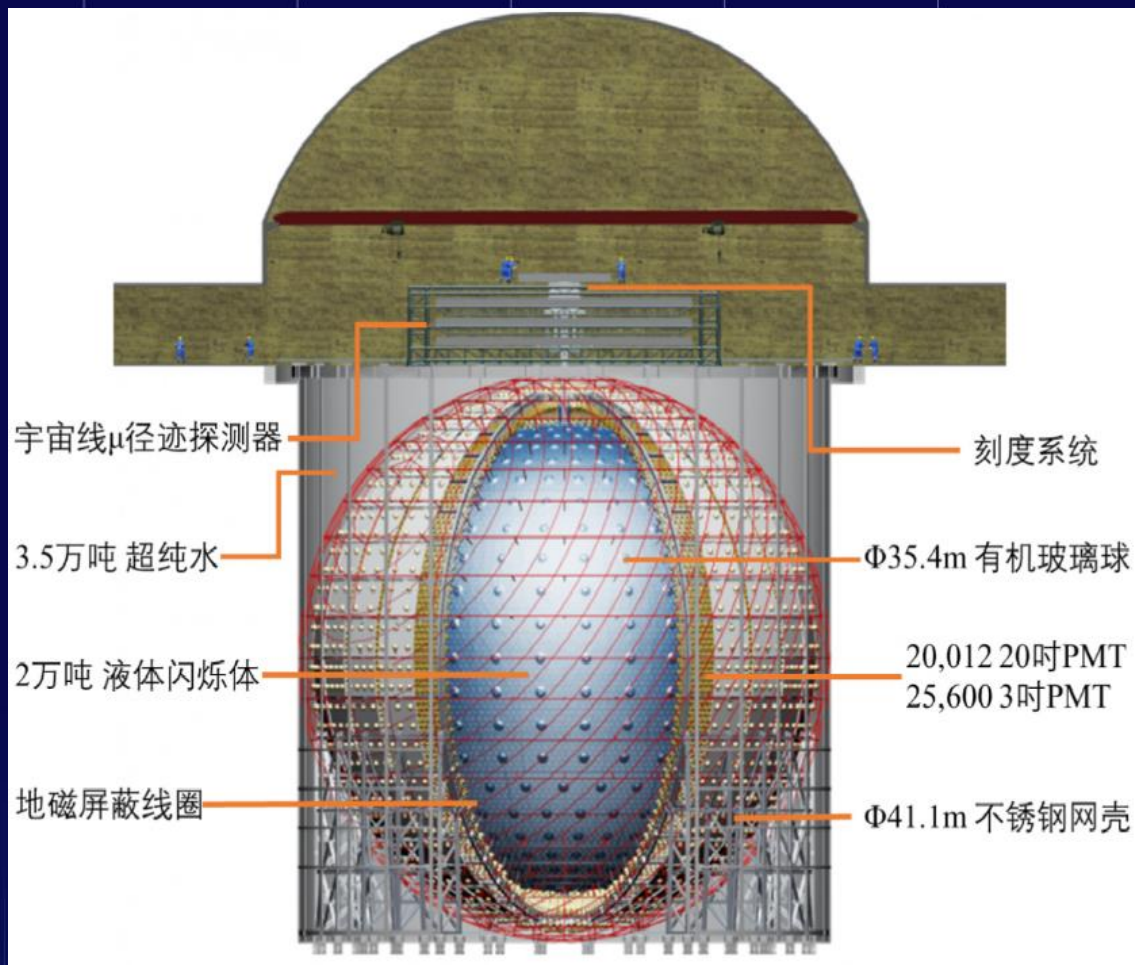
探测器要求



对于太阳中微子物理: 液闪中天然放射性含量要比反应堆物理严格1-2个数量级

细化每种探测器构件指标

——市场能力和模拟的平衡



Material	Mass [t]	Radius [m]	Target impurity concentration				
			²³⁸ U [ppb]	²³² Th [ppb]	⁴⁰ K [ppb]	²¹⁰ Pb/ ²²² Rn [ppb]/[mBq/m ³]	⁶⁰ Co [mBq/kg]
Liquid Scintillator							
LS-reactor	20000	0-17.7	10 ⁻⁶	10 ⁻⁶	10 ⁻⁷	10 ⁻¹³ ppb	
LS-solar			10 ⁻⁸	10 ⁻⁸	10 ⁻⁹	10 ⁻¹⁵ ppb	
Acrylic vessel	580	17.7-17.8	0.001	0.001	0.001		
Acrylic nodes	28.5	17.8-17.9	0.001	0.001	0.001		
Calibration parts	0.04		1.5	4.5	0.02		
SS structure							
- truss	1000	20.0-20.5	1	3	0.2		20
- bars	65	17.9-20.0	0.2	0.6	0.02		1.5
LPMT glass							
- NNVT	84.5	19.2-19.8	200	120	4		
- Hamamatsu	33.5	19.2-19.8	400	400	40		
- Veto (NNVT)	16.0	20.2-20.8	200	120	4		
LPMT cover							
- acrylic	110	19.2-19.4	0.003	0.01	0.01		
- SS	150	19.4-19.8	0.4	2.5	0.12		
LPMT readout							
- divider	0.6	19.8-19.9	3000	5000	100		
- potting	24.5	19.7-19.9	70	50	4		
- UWB	100	20.1-20.4	50	200	5		20
SPMT glass	2.6	19.3-19.4	400	400	200		
SPMT readout							
- divider	0.15	19.4	3000	10000	200		
- potting	5.1	19.4-19.5	100	50	20		
- UWB	11	20.1-20.4	50	200	5		20
Water	35000	17.8-21.8				10 mBq/m ³	
Rock			10000	30000	5000		

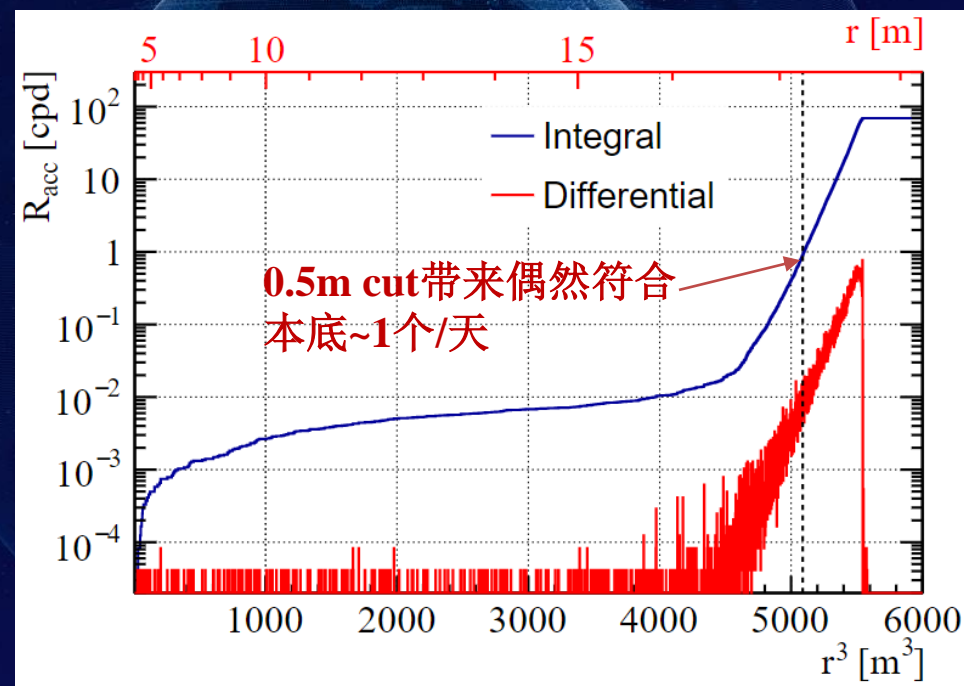
对物理的影响

——反应堆中微子 IBD

Selection	IBD efficiency	IBD	Geo- ν s	Accidental	${}^9\text{Li}/{}^8\text{He}$	Fast n	(α, n)
-	-	83	1.5	$\sim 5.7 \times 10^4$	84	-	-
Fiducial volume	91.8%	76	1.4	410	77	0.1	0.05
Energy cut	97.8%	73	1.3				
Time cut	99.1%						
Vertex cut	98.7%						
Muon veto	83%	60	1.1	1.1	1.6		
Combined	73%	60		0.9	3.8		

FV内单事例率为7.2Hz

Material	Mass [t]	Target impurity concentration					Singles	
		${}^{238}\text{U}$ [ppb]	${}^{232}\text{Th}$ [ppb]	${}^{40}\text{K}$ [ppb]	${}^{210}\text{Pb}$ [ppb]	${}^{60}\text{Co}$ [mBq/kg]	DV [Hz]	FV [Hz]
LS-reactor	20000	10^{-6}	10^{-6}	10^{-7}	10^{-13}		2.5	2.2
Acrylic	610	10^{-3}	10^{-3}	10^{-3}			8.4	0.4
SS structure	1000	1	3	0.2		20	15.9	1.1
	65	0.2	0.6	0.02		1.5		
PMT glass	33.5	400	400	40			26.2	2.8
	100.5	200	120	4				
PMT readout	2.6	400	400	200			3.4	0.4
	125	68	194	5	16			
	16.3	93	243	12	14			
Other							2.5	0.3
Sum							59	7.2

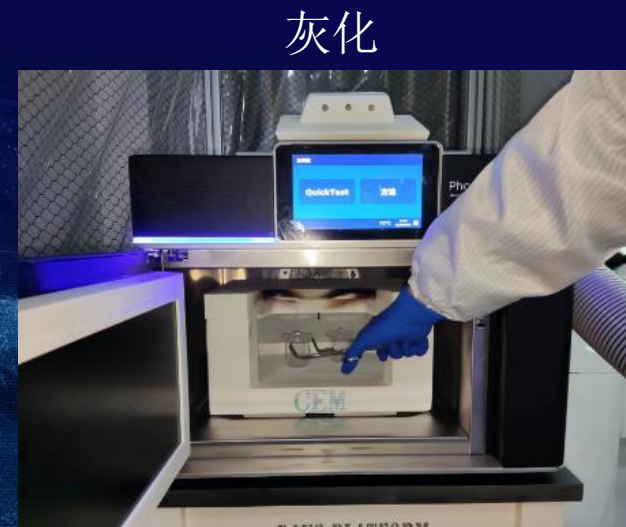


材料天然放射性筛查技术



材料本底筛查技术

为江门实验筛选样品达1000+



合作组资源

1、IHEP:

ICP-MS: 筛查有机材料类U/Th~sub-ppt

HPGe: 筛查U/Th~10 ppb

水Rn/Ra: 1 mBq/m³ Rn, 10 μBq/m³ Ra

气Rn: < 10 μBq/m³

2、INFN:

NAA: 筛查U/Th/K~sub-ppt

3、SJTU:

HPGe: 筛查U/Th~sub-ppb

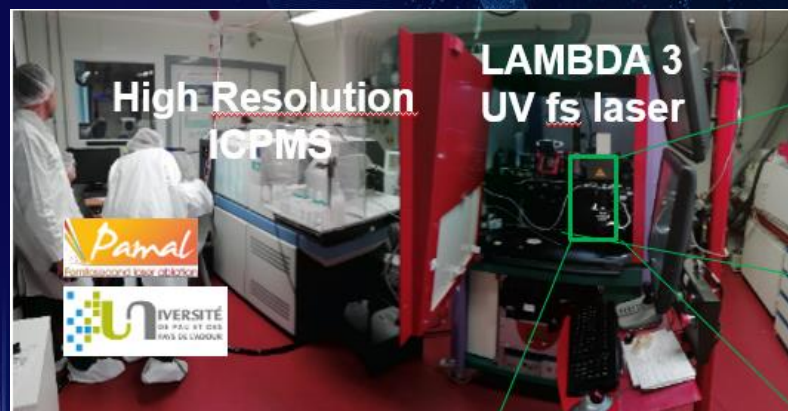
4、CENBG:

Rn emanation: bkg 3cpd

LA-ICPMS: 筛查U/Th随厚度分布



Radon emanation



LA-ICPMS

高纯锗 (HPGe) γ 能谱仪



■ 探测器工作原理

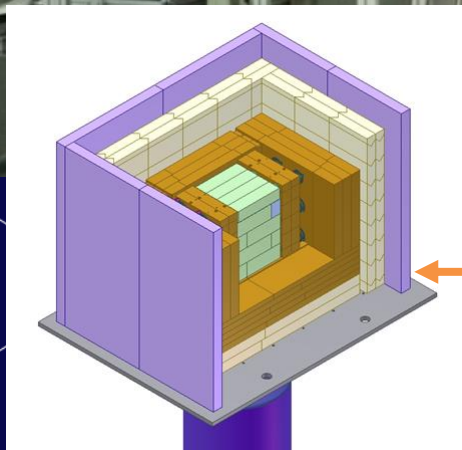
工作在液氮温度 (85~100 K)，探测的射线在高纯锗半导体中产生的载流子 (电子和空穴)，在反向偏压电场下被收集，由产生的电脉冲信号来测量

■ 优势：

高纯锗探测器有较高的能量分辨率，对 γ 辐射探测效率高，可在室温下保存，应用广泛。

样品无损检测，可以测U/Th衰变链是否平衡

■ 劣势： 检出限在ppb (10^{-9} g/g U/Th) 量级



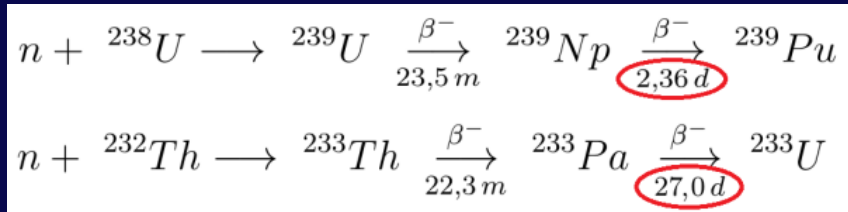
从外到里：塑料闪烁体 \rightarrow 铅砖 \rightarrow 无氧铜 \rightarrow PMT \rightarrow BGO \rightarrow HPGe

中子活化分析 (NAA)



■探测器工作原理

样品放在反应堆堆芯附近，辐照中子 ($\Phi \sim 10^{12} - 10^{13} \text{cm}^{-2}\text{s}^{-1}$) 使得长寿命的 ^{238}U 和 ^{232}Th 转化成短寿命的 ^{239}Np 和 ^{233}Pa ，进而用HPGe谱仪测 ^{239}Np 和 ^{233}Pa 衰变的特征 γ 峰



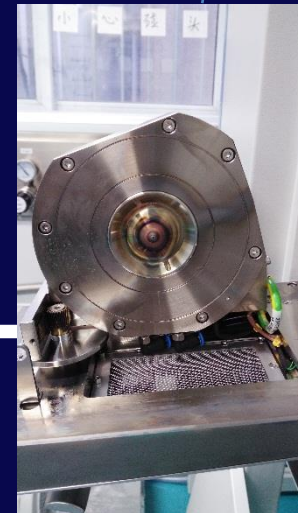
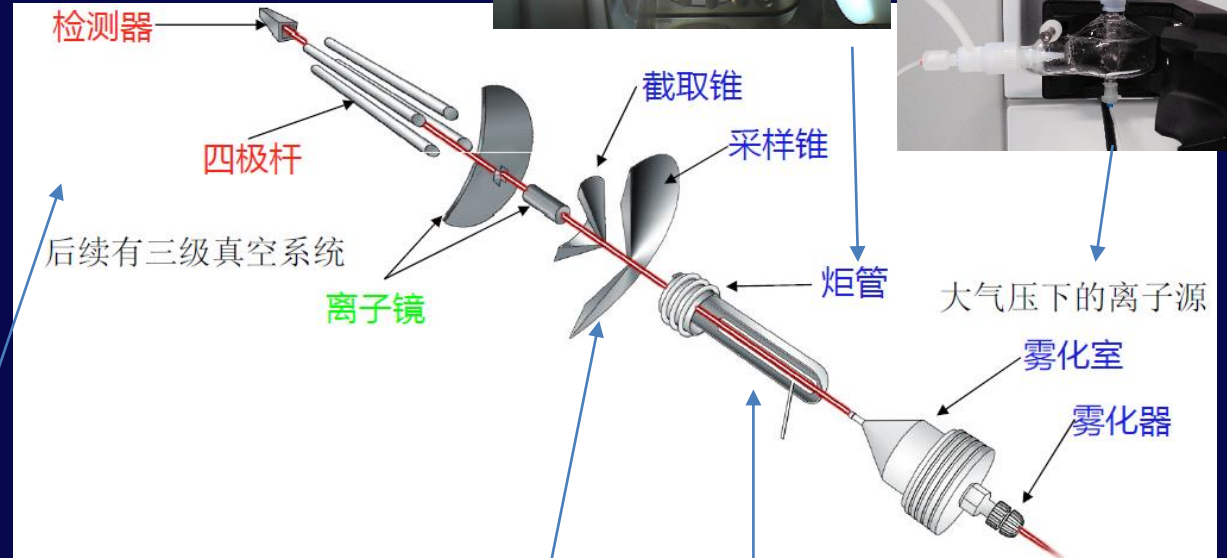
■优势:

通过中子活化提升衰变事例率，结合传统HPGe谱仪，灵敏度可达sub-ppt (10^{-12}g/g U/Th)

■劣势:

样品因为中子辐照已被破坏，属于有损检测，不可以测U/Th衰变链是否平衡

电感耦合等离子体质谱 (ICP-MS)



电感耦合等离子体质谱 (ICP-MS)



■ 探测器工作原理

雾化器将溶液样品送入等离子体光源，在高温下汽化，解离出离子化气体，通过铜或镍取样锥收集的离子，在低真空压力下形成分子束，再通过1~2mm直径的截取板进入四极质谱分析器，在外加电磁场情况下，只有特定质荷比的离子才能够到达离子探测器，根据探测器的计数与浓度的比例关系，可测出元素的含量或同位素比值。

■ 质荷比

$$m/z = \frac{H^2 R^2}{2V}$$

原子质量 m ，质子数 z ，偏转半径 R （固定），磁场强度 H ，扫描电压 V



电感耦合等离子体质谱（ICP-MS）



■优势：

灵敏度可达ppt-ppq (10^{-12} - 10^{-16} g/g U/Th)，主要质检 JUNO材料有机玻璃 (<1 ppt)、液闪 (<1 ppq)、超纯水 (<1 ppq) 这些传统HPGe无法质检的
测量时间短

■劣势：

样品需要处理成液体送入设备测量，属于有损检测，且处理过程涉及复杂的化学知识，每种材料需要单独开发处理办法。
不可以测U/Th衰变链是否平衡



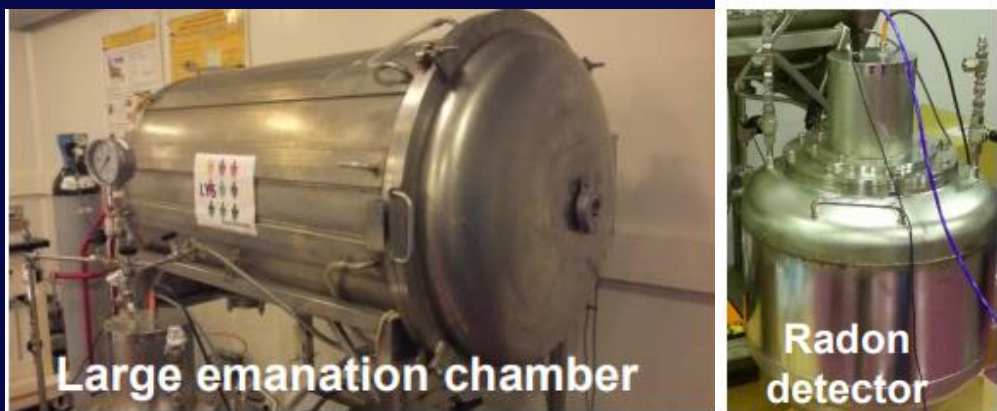
U/Th检测手段总结

	HPGe	NAA	ICP-MS
样品是否有损	否	是	是
样品处理过程	无需处理	简单	复杂
灵敏度	10^{-9} g/g	10^{-12} - 10^{-14} g/g	10^{-12} - 10^{-16} g/g
样品测量周期	1-10天	10-30天	2-5天
JUNO材料	PMT、电子学、 不锈钢、岩石	有机玻璃、液 闪	有机玻璃、液 闪、超纯水

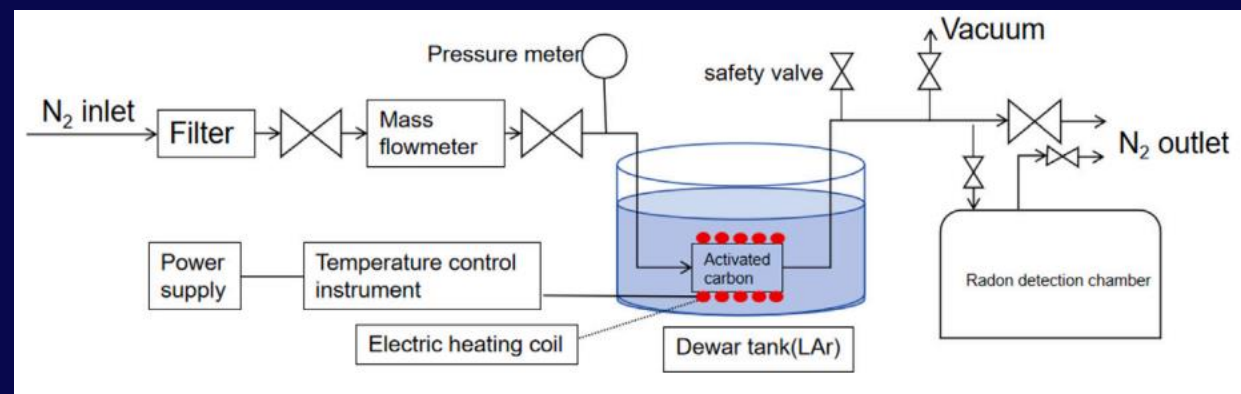
Material	Mass [t]	Radius [m]	Target impurity concentration				
			²³⁸ U [ppb]	²³² Th [ppb]	⁴⁰ K [ppb]	²¹⁰ Pb/ ²²² Rn [ppb]/[mBq/m ³]	⁶⁰ Co [mBq/kg]
Liquid Scintillator							
LS-reactor	20000	0-17.7	10^{-6}	10^{-6}	10^{-7}	10^{-13} ppb	
LS-solar			10^{-8}	10^{-8}	10^{-9}		
Acrylic vessel	580	17.7-17.8	0.001	0.001	0.001		
Acrylic nodes	28.5	17.8-17.9	0.001	0.001	0.001		
Calibration parts	0.04		1.5	4.5	0.02		
SS structure							
- truss	1000	20.0-20.5	1	3	0.2		20
- bars	65	17.9-20.0	0.2	0.6	0.02		1.5
LPMT glass							
- NNVT	84.5	19.2-19.8	200	120	4		
- Hamamatsu	33.5	19.2-19.8	400	400	40		
- Veto (NNVT)	16.0	20.2-20.8	200	120	4		
LPMT cover							
- acrylic	110	19.2-19.4	0.003	0.01	0.01		
- SS	150	19.4-19.8	0.4	2.5	0.12		
LPMT readout							
- divider	0.6	19.8-19.9	3000	5000	100		
- potting	24.5	19.7-19.9	70	50	4		
- UWB	100	20.1-20.4	50	200	5		20
SPMT glass	2.6	19.3-19.4	400	400	200		
SPMT readout							
- divider	0.15	19.4	3000	10000	200		
- potting	5.1	19.4-19.5	100	50	20		
- UWB	11	20.1-20.4	50	200	5		20
Water	35000	17.8-21.8				10 mBq/m ³	
Rock			10000	30000	5000		



Rn/Ra检测手段



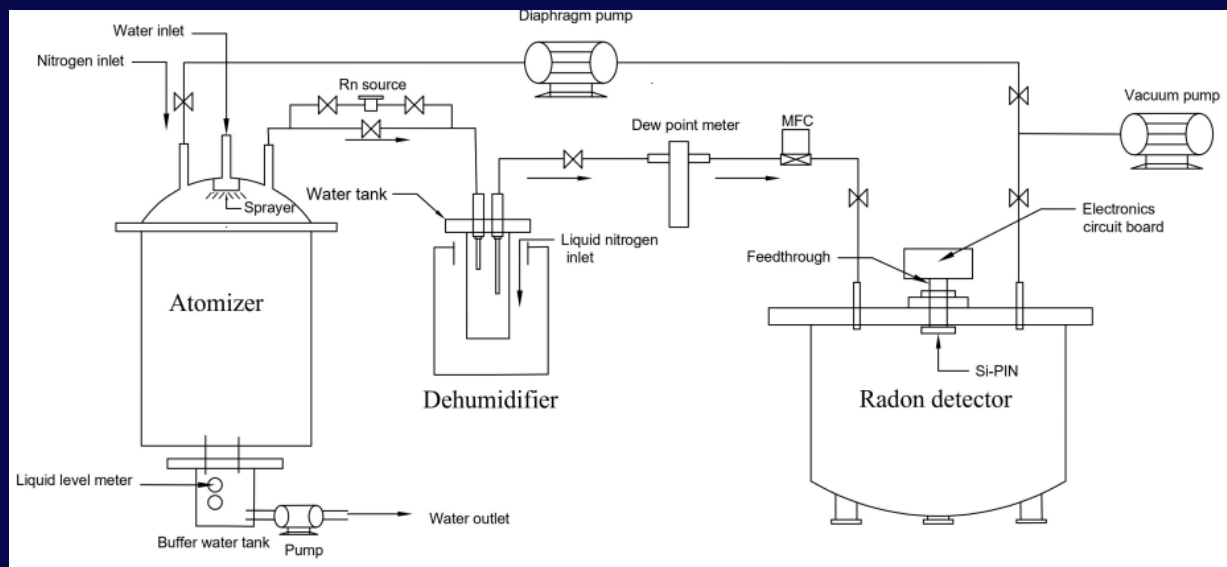
JUNO 20英寸PMT释氡率就是在这个桶里测的，无损测量（法国CENGB）



传统氡测量设备灵敏度在 mBq/m^3 ，JUNO 要求 $\mu\text{Bq/m}^3$ 氡含量的密封氮气，利用低温活性炭吸附富集测量（俞伯祥）



Rn/Ra检测手段



超纯水雾化，水中氡进入气体进入氡测量设备，可检测水中氡浓度 $<1 \text{ mBq/m}^3$ （郭聪）



利用锰丝吸附水中镭（Ra）实现富集效果，锰丝放入氡探测设备测量镭释氡情况，可检测水中Ra浓度 $<10 \text{ } \mu\text{Bq/m}^3$ （郭聪）



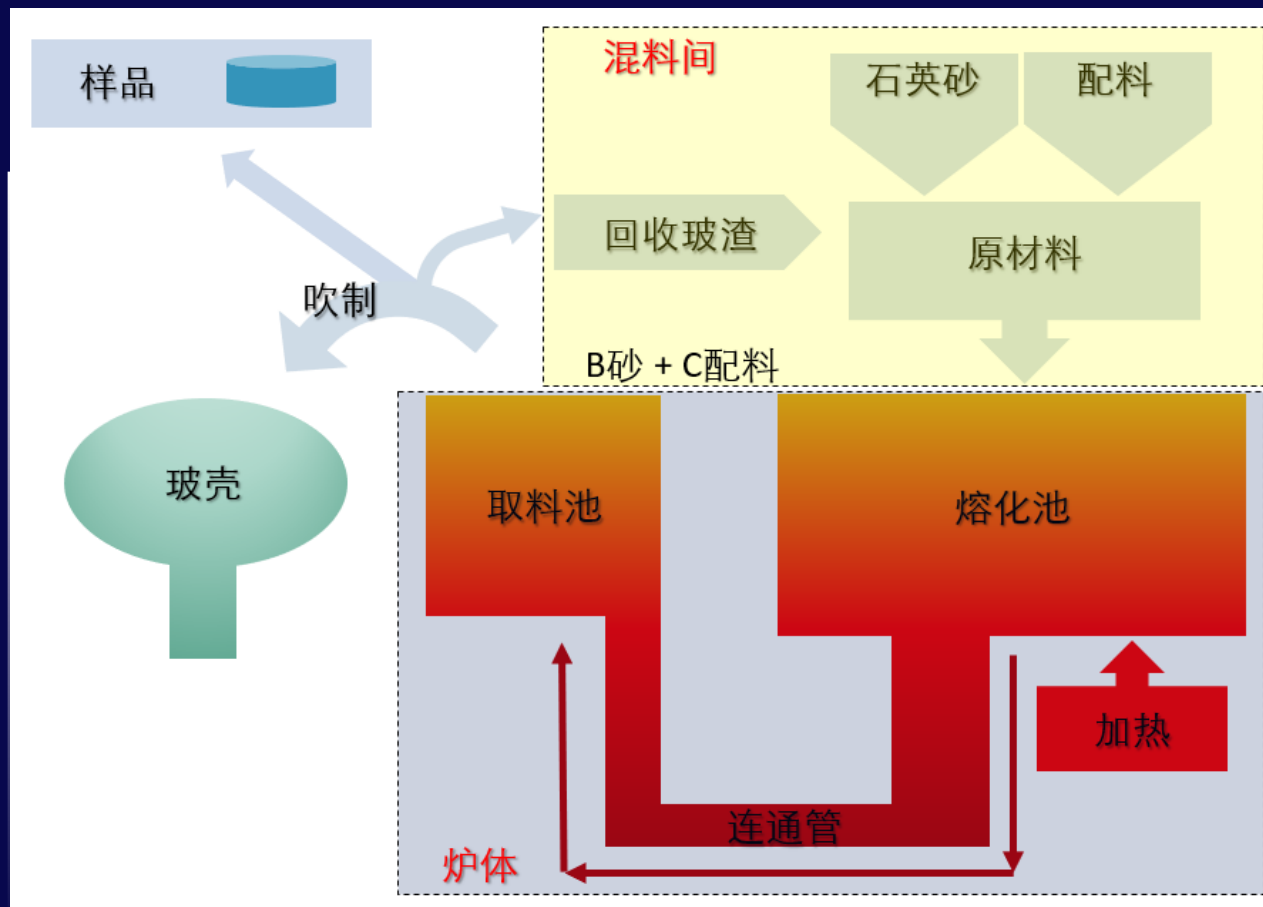


JUNO主要探测器构件生产质量控制



◆ 共45600支光电倍增管，通过**光电效应**探测微弱的光

PMT玻璃壳的生产：吹出来的



PMT玻壳的生产：本底控制策略

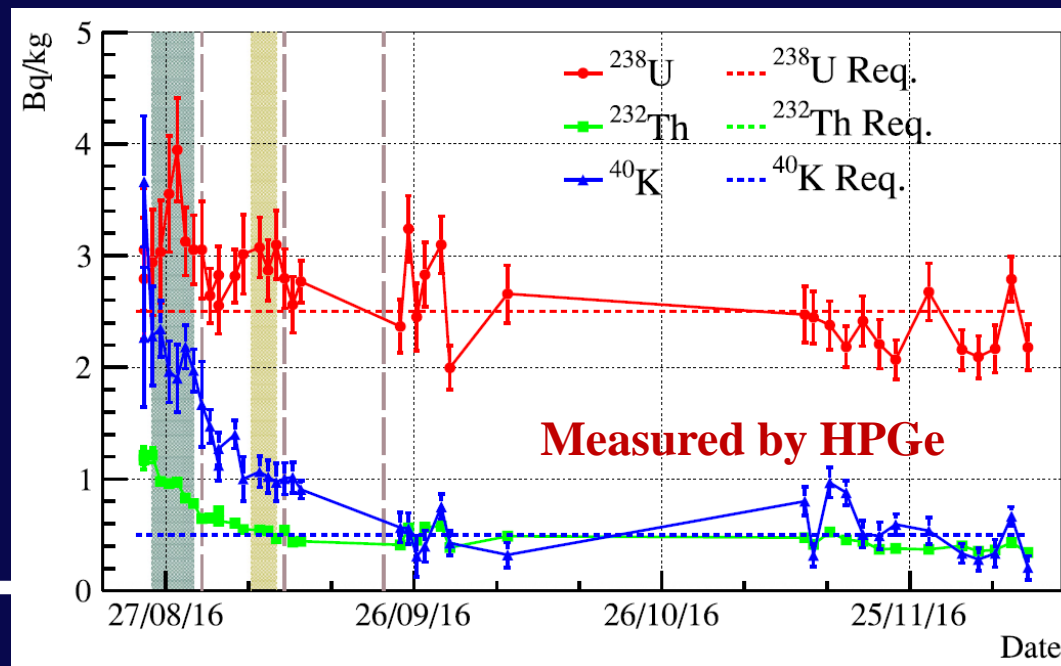
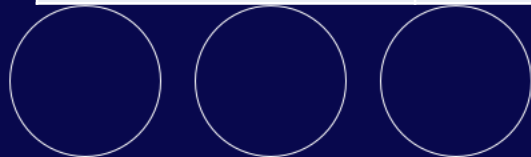
■改善策略

- ✓用低本底生产原料，比如石英砂
- ✓外在U/Th来源主要是灰尘，混料和送料过程中用不锈钢板隔绝原料和水泥地面的接触，增加覆盖膜防止灰尘落入等
- ✓K来源主要是水，冷却玻壳过程中用的井水改成~1us/cm电导率的纯水。
- ✓每周对取料池放料，排出底部沉积旧料，防止本底元素累积。

NIMA 898 (2018) 67-71

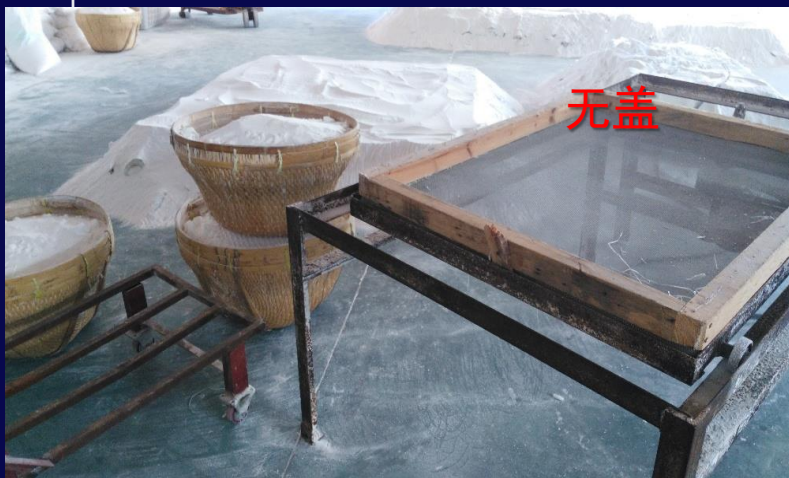
国产PMT玻壳本底远低于日本PMT玻壳

Bq/kg	^{238}U	^{232}Th	^{40}K
Hamamatsu PMT	4.96	1.62	10.8
MCP-PMT	2.5	0.5	1



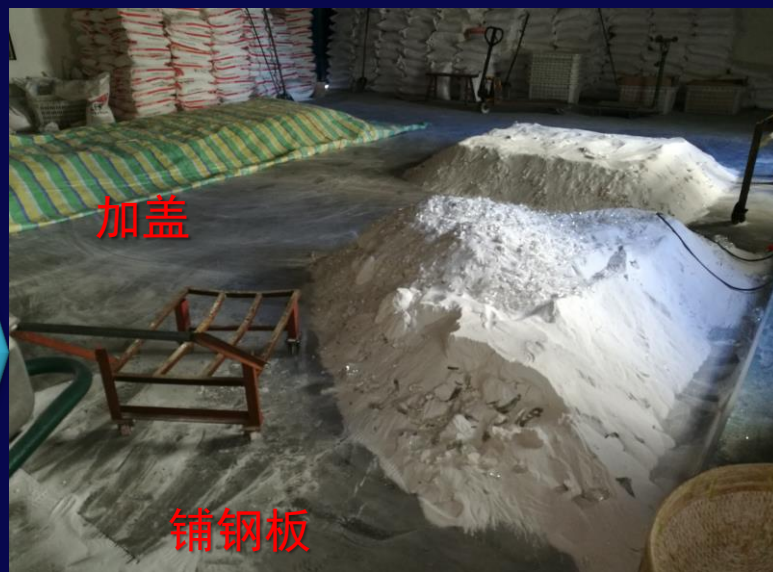


磨砂地面



无盖

混料间，用于堆放混好的玻璃原料



加盖

铺钢板

加料口，向炉内投入原料



无盖

普通钢板地面



取料池
放料口

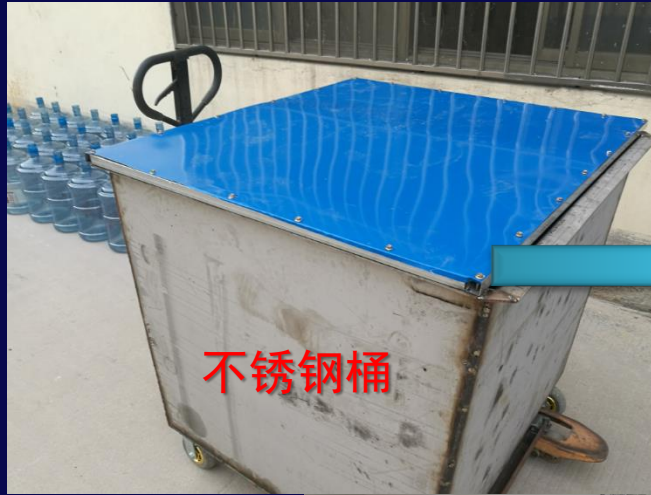
取料池
放料口



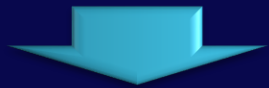
不锈钢板
地面

加盖小车

每周都通过放料口放出取料池底部陈料，防止陈料累积放射性本底元素。

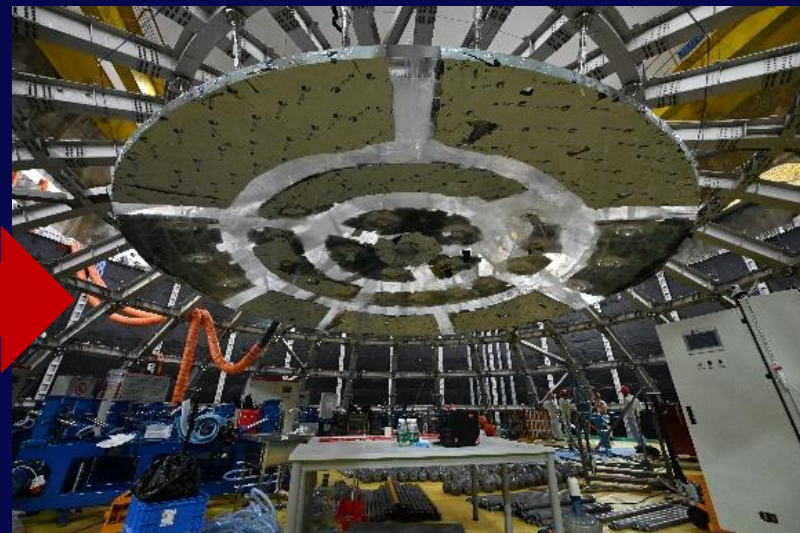
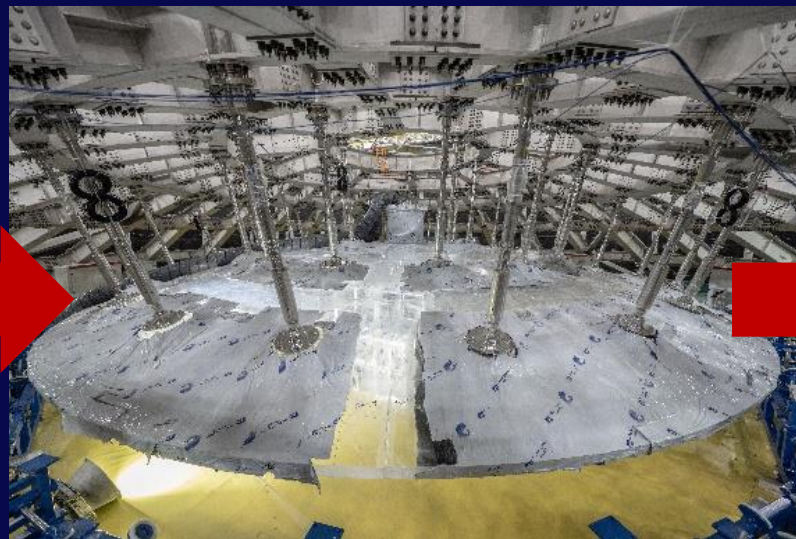


回收的玻璃渣存放处，
水泥地易起灰。



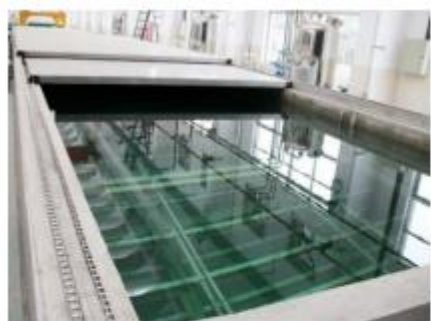
玻璃渣回收，回收生产
废料重新投入生产。

35米直径有机玻璃球是“粘”起来的

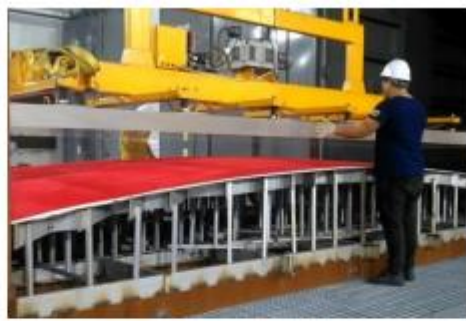


265块12厘米厚有机玻璃弯板利用**本体聚合**方法在实验现场粘接

有机玻璃板的生产



Flat panel



Heating mold



Bending panel



Five axes machining



bending panel with node

Background control for panels at factory



Transport



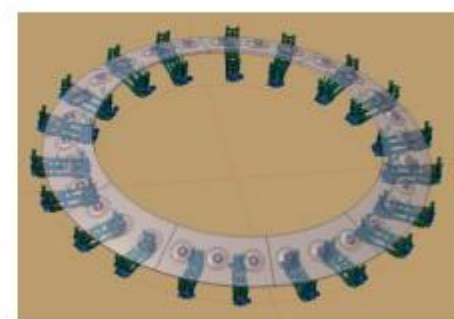
Light shield



sticking film

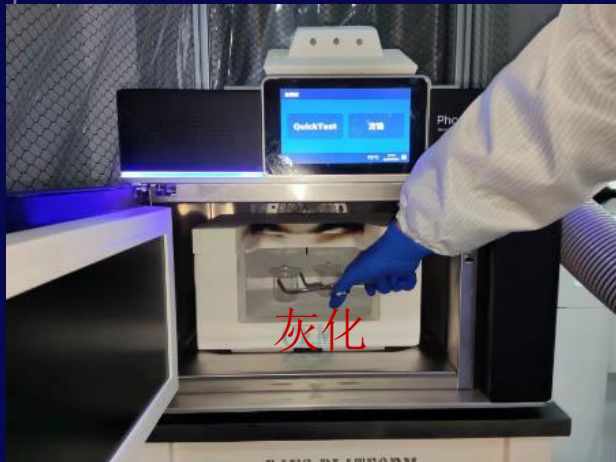
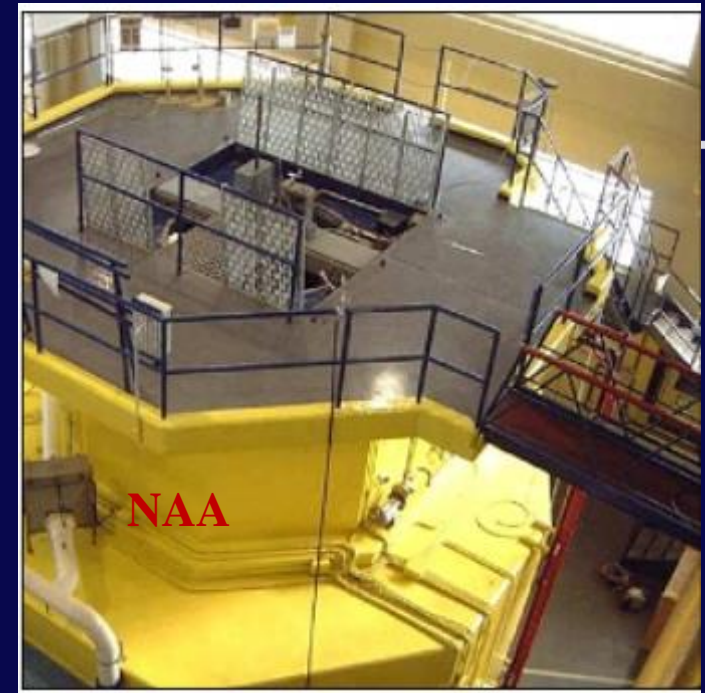


Grinding, polishing and cleaning



pre assembly

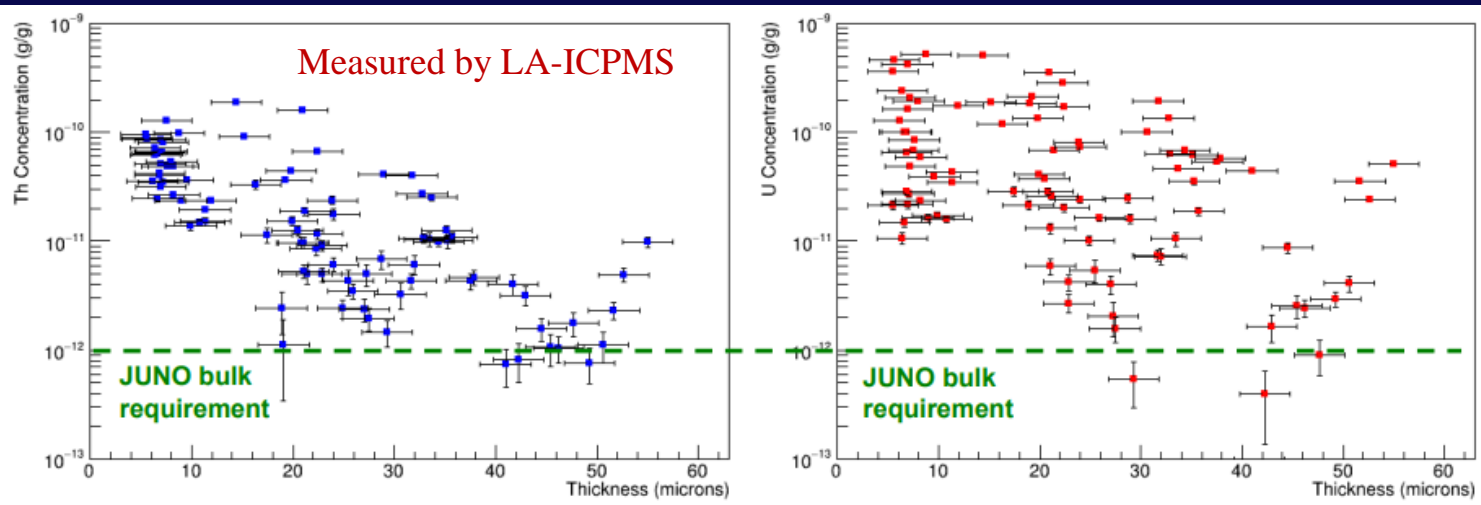
有机玻璃板的质检



IHEP: 灰化+ICP-MS
NAA: 中子活化+HPGe
LA-ICPMS: 激光质谱



有机玻璃板的生产

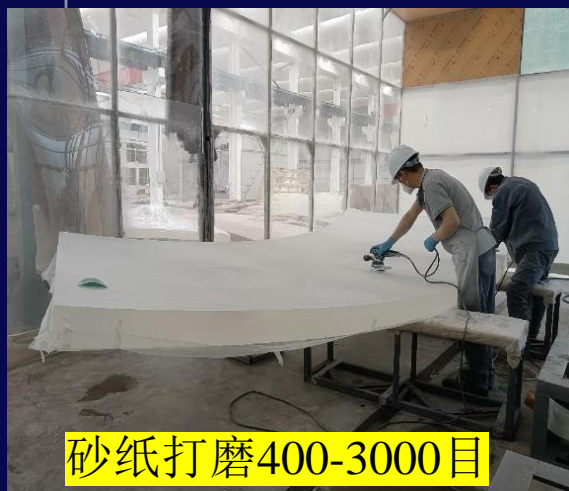


改善策略

- ✓ 用砂纸打磨掉表面100 μm 厚度
- ✓ 为了达到高透明度(96% @420 nm), 砂纸打磨需达到3000目, 且用去离子水抛光
- ✓ 冲洗完毕覆膜保护, 防氦子体沉降

生产完成的板材表面几十微米厚度内U/Th超标2-3个数量级

[arXiv2301.04902](https://arxiv.org/abs/2301.04902)



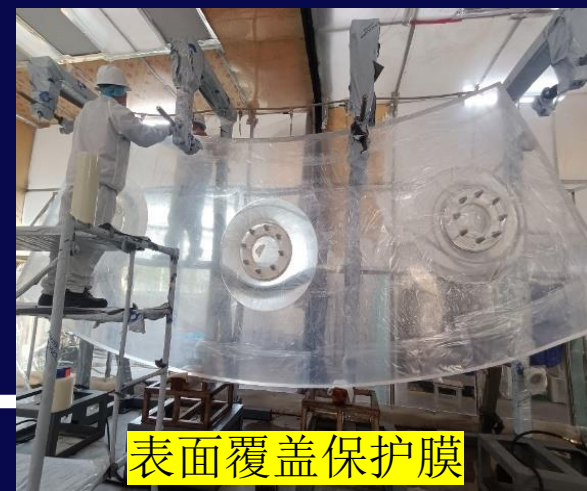
砂纸打磨400-3000目



去离子水抛光



高压水枪冲洗



表面覆盖保护膜

不锈钢的生产

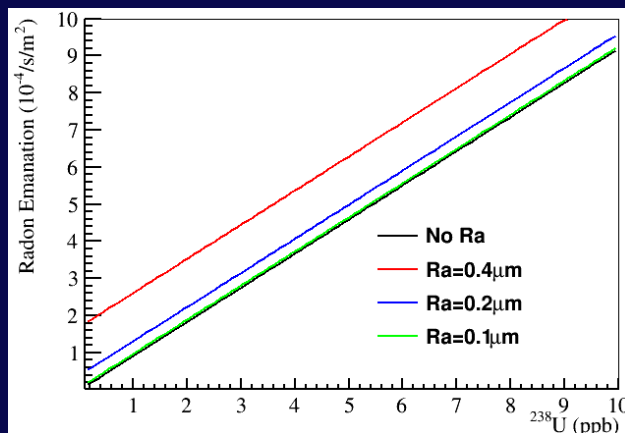
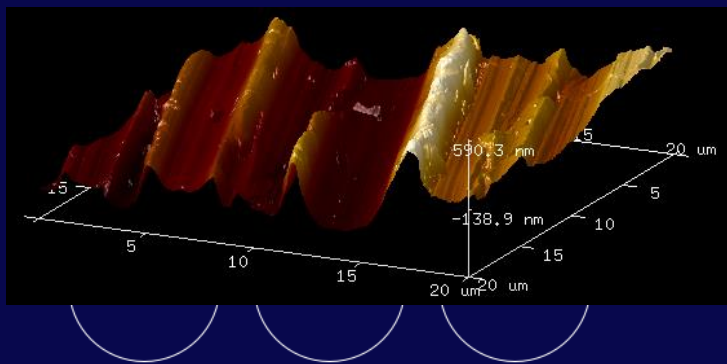
■ 不锈钢生产自太钢

- ✓ 包括不锈钢网壳，液闪相关系统用钢
- ✓ 策略：不添加废钢，生产前清洁炉体
- ✓ 焊料通过筛查，选取天津金桥相对低本底

■ 不锈钢表面处理

- ✓ 表面粗糙度要求：< 0.4 μm ，减少氦析出

0.2 μm surface, by atomic force microscope



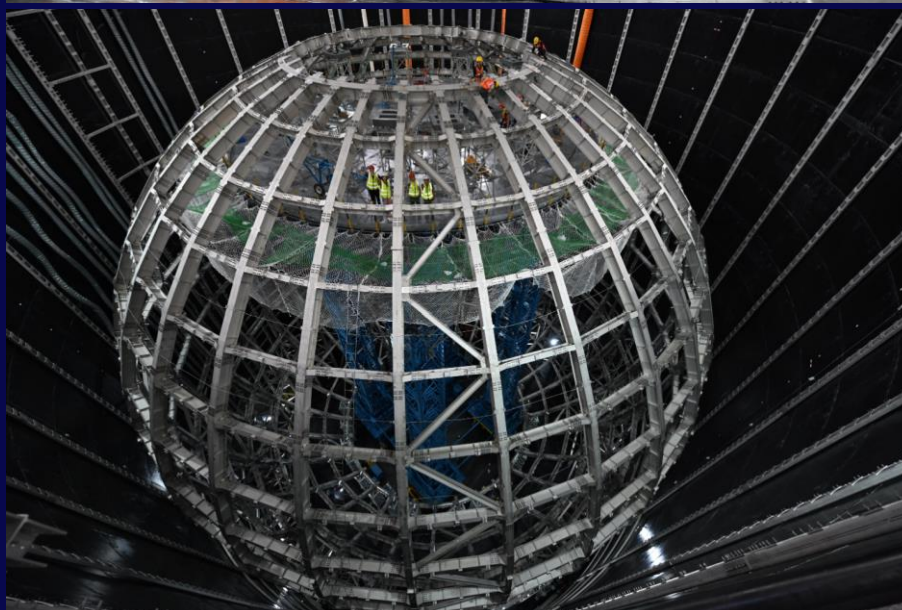
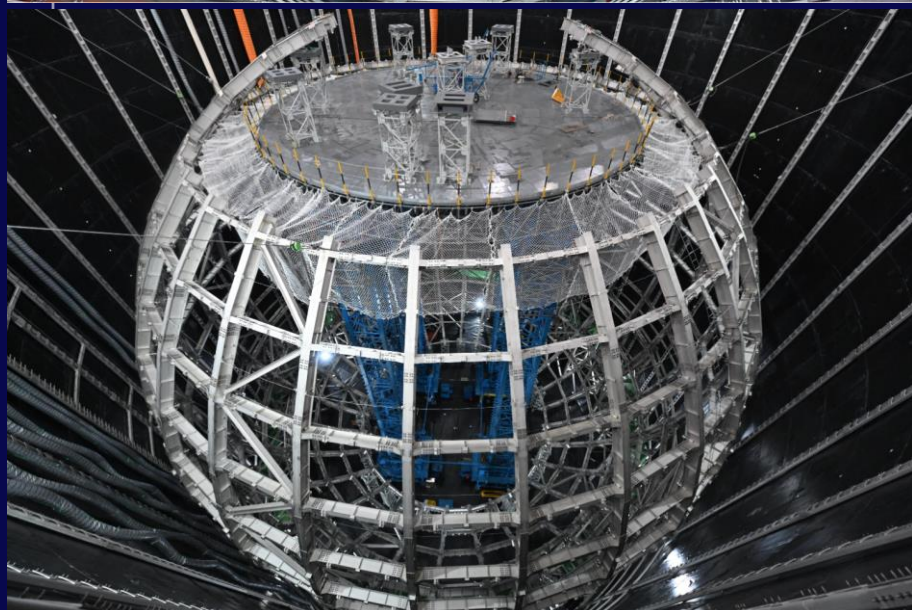
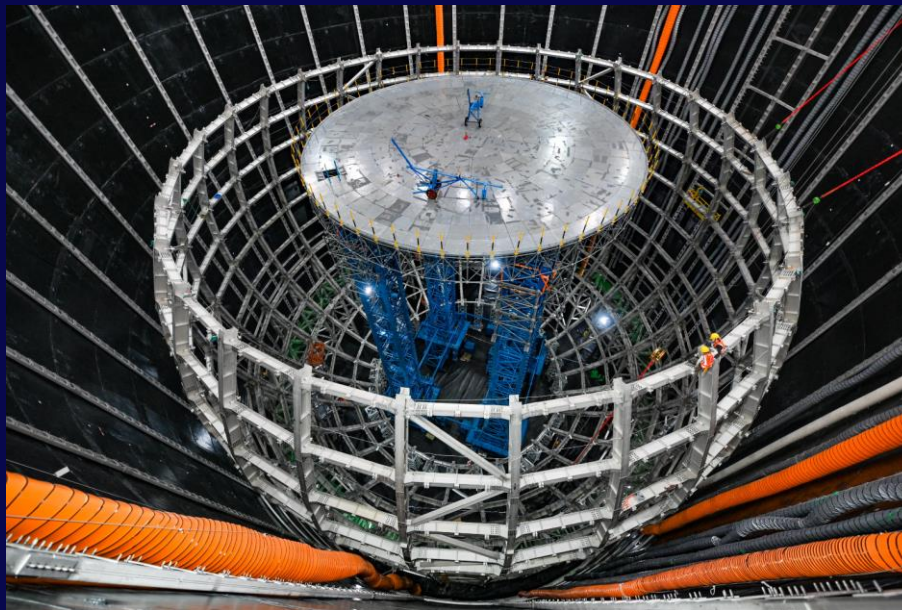
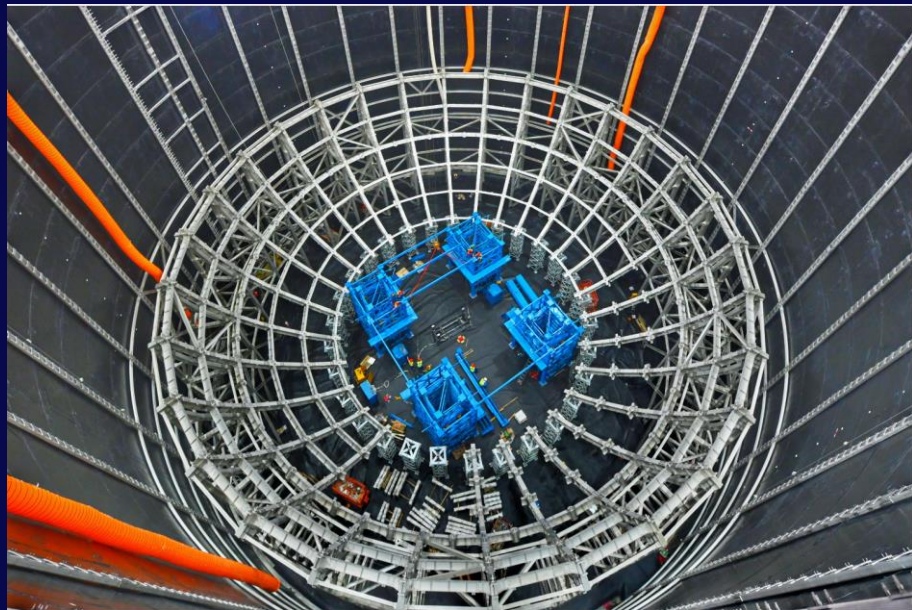
	Activity [mBq/kg]	Concentration [g/g]
²³² Th		
²²⁸ Ra	0,8±0,3	(2,1±0,8)·10 ⁻¹⁰
²²⁸ Th	0,5±0,2	(1,2±0,6)·10 ⁻¹⁰
²³⁸ U		
²³⁴ Th	<34	<2,8·10 ⁻⁹
^{234m} Pa	<12	<9,8·10 ⁻¹⁰
²²⁶ Ra	0,3±0,1	(3±1)·10 ⁻¹¹
²³⁵ U	<1,1	<2,0·10 ⁻⁹
⁴⁰ K	<2,8	<8,9·10 ⁻¹¹
⁶⁰ Co	0,4±0,1	
¹³⁷ Cs	<0,16	
⁵⁴ Mn	1,4±0,5	
⁵⁸ Co	0,9±0,2	
⁵¹ Cr	8±2	
⁴⁸ V	1,3±0,2	

SS for bars
Measured @ LNGS

CL 68%

液闪相关系统：脱脂（Alconox）、酸洗、钝化，目的去除表面灰尘及金属离子（U, Th, K, Pb, Po, Ra）

探测器主体钢结构：巨型乐高



- ◆ **40米**直径
- ◆ **1千吨**低本底不锈钢网架
- ◆ **12万套**高强度、高摩擦不锈钢螺栓
- ◆ **毫米级**精度

捕捉中微子：有机液体闪烁体

- ◆ 液体闪烁体主要成分：**线性烷基苯**，常用于生产洗涤剂
- ◆ 反应堆中微子与液体闪烁体中的氢核发生“**反β衰变反应**”，产生可见光
- ◆ **高透明度**：光在液体闪烁体中传播20米减弱到原来的1/3
- ◆ **高纯净度**：2万吨液体闪烁体中只能有0.01克灰尘，对应铀、钍含量小于 10^{-17}



2023年11月完成全系统联调



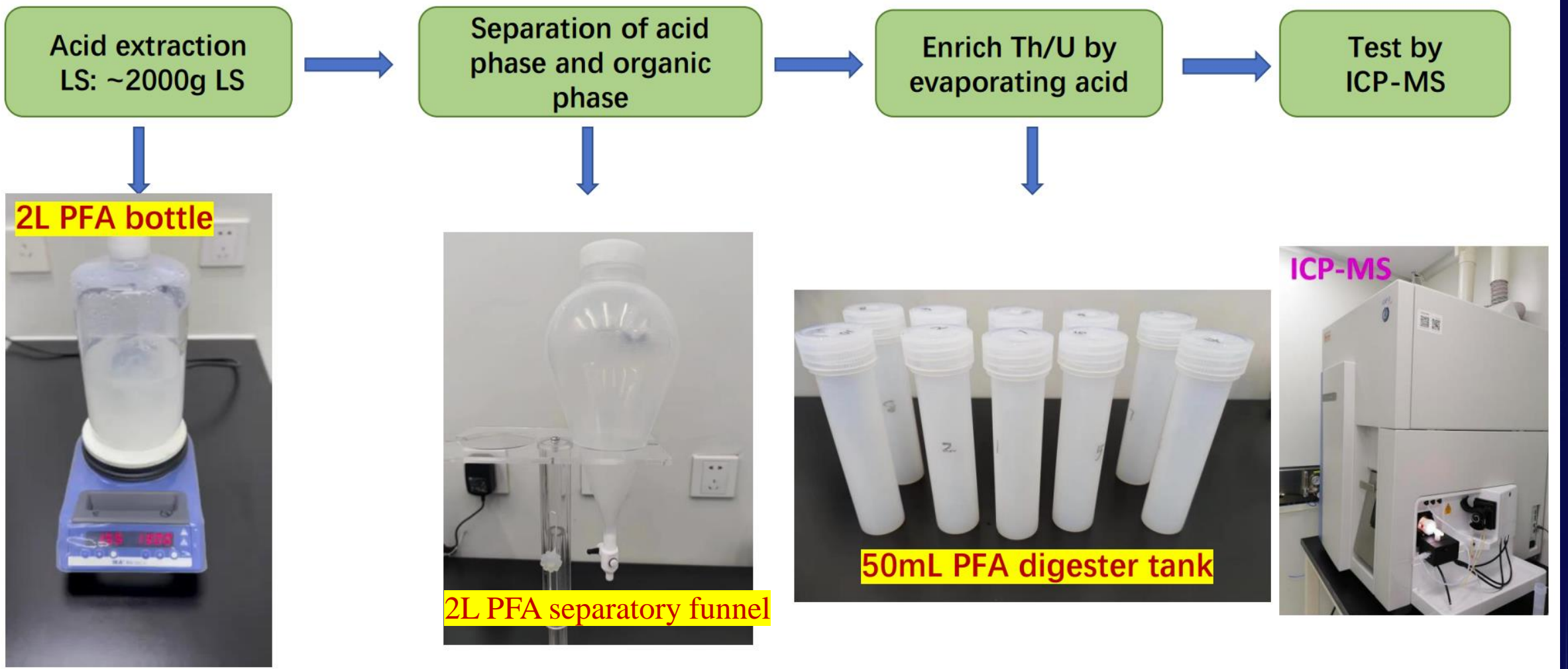
地上

地下

15%

85%

液闪的质检 (ICP-MS)



液闪的质检 (NAA)

LAB JUNO

Liquid-liquid
extraction
(LAB - H₂O)

UTEVA Resin

Neutron
activation

TEVA Resin

Gamma
measurement
(HPGe)

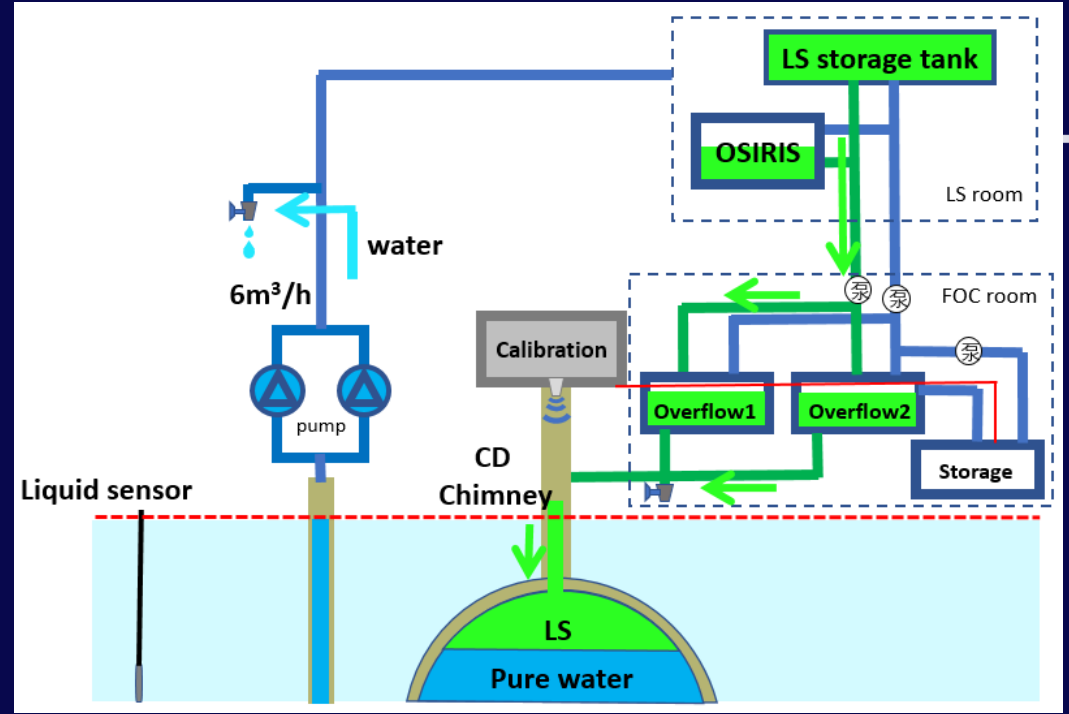
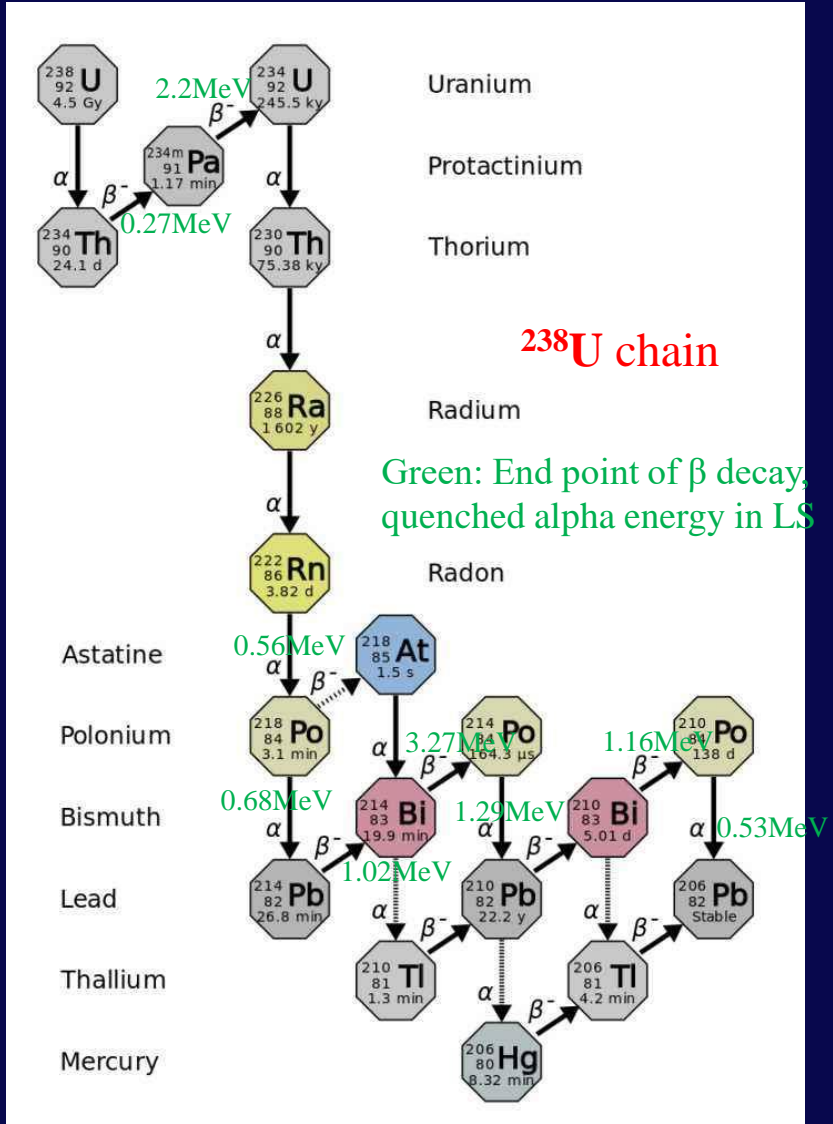
U - Th
concentration
determination



液闪的纯化及外在污染控制



液闪镭污染



■ JUNO用到的水

- ✓ 液闪纯化系统: 水萃取, 水中Ra < 5 $\mu\text{Bq}/\text{m}^3$
- ✓ 液闪灌装系统: 水置换, 水中Ra < 50 $\mu\text{Bq}/\text{m}^3$
- ✓ 纯化方法: RO、Resin、锰丝或锰珠, 小系统已达到20 $\mu\text{Bq}/\text{m}^3$

液闪氦及其子体污染

接触液闪的氦源

不锈钢

管路、罐体

要求 $^{238}\text{U} < 1$ ppb, 且粗糙度 $< 0.4 \mu\text{m}$

水

水萃取纯化系统, 水置换液闪

要求水氦含量 $< 10 \text{ mBq/m}^3$
目前大系统做到 $< 5 \text{ mBq/m}^3$

空气

漏率, 氦在有机玻璃中扩散

要求单部件漏率 $< 10^{-6} \text{ mbarL/s}$
现场安装测量结果显示大部分在 10^{-8} mbarL/s , 隔膜阀和泵等薄弱环节加氮气保护盒子双重保护

有机玻璃: 运输前打磨抛光去除表面, 整个安装过程覆膜保护

氮气

气体剥离纯化系统, 密封氮气

要求氮气中氦含量 $< 10 \mu\text{Bq/m}^3$
目前高纯氮系统(活性炭吸附)测量结果 $< 20 \mu\text{Bq/m}^3$

地下空气氦浓度要求 $\sim 100 \text{ Bq/m}^3$

现场安装环境洁净控制



■实验大厅：总体积12万m³

- ✓四台风柜(初中高效三级过滤)厅内自循环：20万m³/h

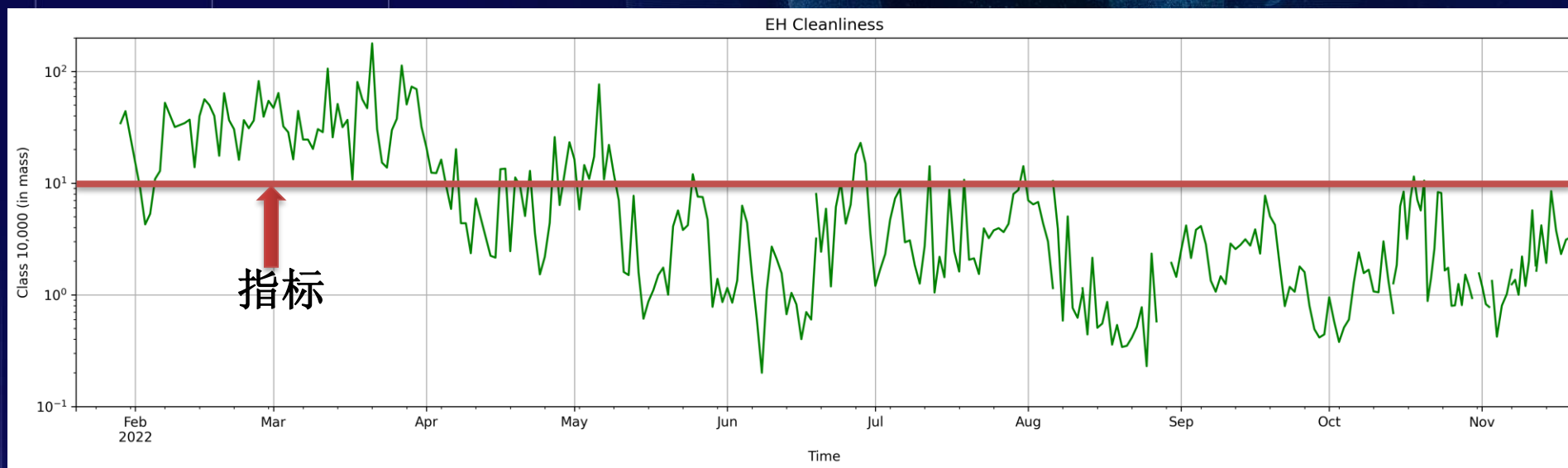
■整体环境洁净度控制（区域1）

- ✓人员穿戴洁净服，人员和货物进入大厅需风淋
- ✓货物在进厅前按照要求做好清洁，在大厅内安装前储存不落地且覆盖无尘布
- ✓不锈钢网壳安装完成后进行了两次彻底清洁

■PMT和有机玻璃夹层（区域2）

- ✓厅内洁净度平均在万级左右，夹层未特殊处理
- ✓备选方案：临时风柜所出洁净风通过风管拉到顶部夹层处

区域	洁净等级
1	Class 100,000
2	Class 10,000
3	Class 1000

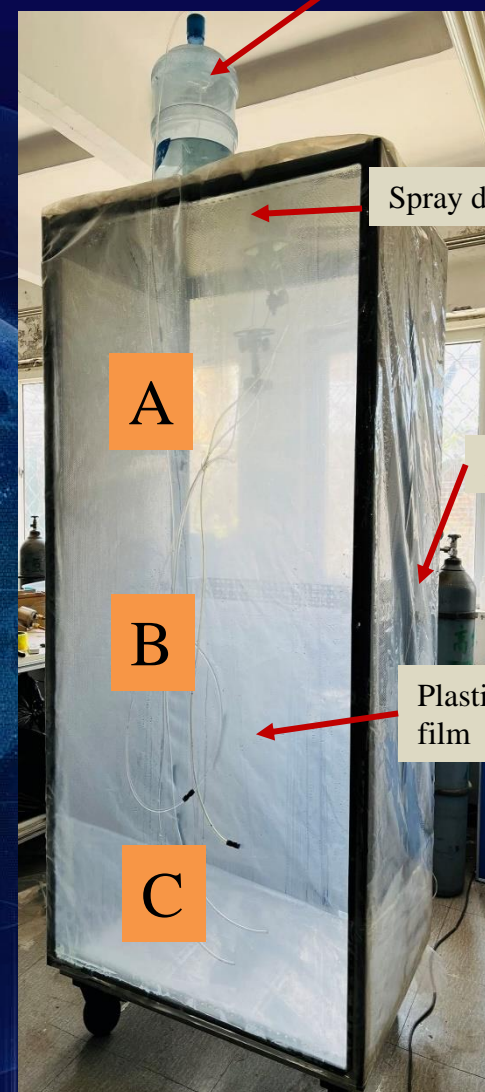


现场安装环境洁净控制



■有机玻璃球内（区域3）

- ✓ 安装完成后，顶部喷水雾降尘
- ✓ 实验室初步结果：水雾可将空气中灰尘颗粒降低2-3个数量级
- ✓ 适量阴离子表面活性剂可以增加尘埃颗粒的团聚，计划在去离子水源中加入少量SDBS



区域	洁净等级
1	Class 100,000
2	Class 10,000
3	Class 1000

Particle measurement		Initial status	A	B	C
Particle size (μm)	Number m ³	Number m ³	Number m ³	Number m ³	Number m ³
	Class 1000				
≥0.1	1.00E+06				
≥0.3	1.02E+05	7.2E+7	3.0E+5	1.6E+5	5.8E+4
≥0.5	3.52E+04	2.9E+7	1.0E+5	7.3E+4	3.2E+4
≥1	8.32E+03	1.1E+6	3.2E+3	7.0E+3	1.1E+4
≥3		3.3E+5	0	0	2.8E+3
≥5.0	2.93E+02	5.6E+4	0	0	0
≥10	0	1.6E+4	0	0	0

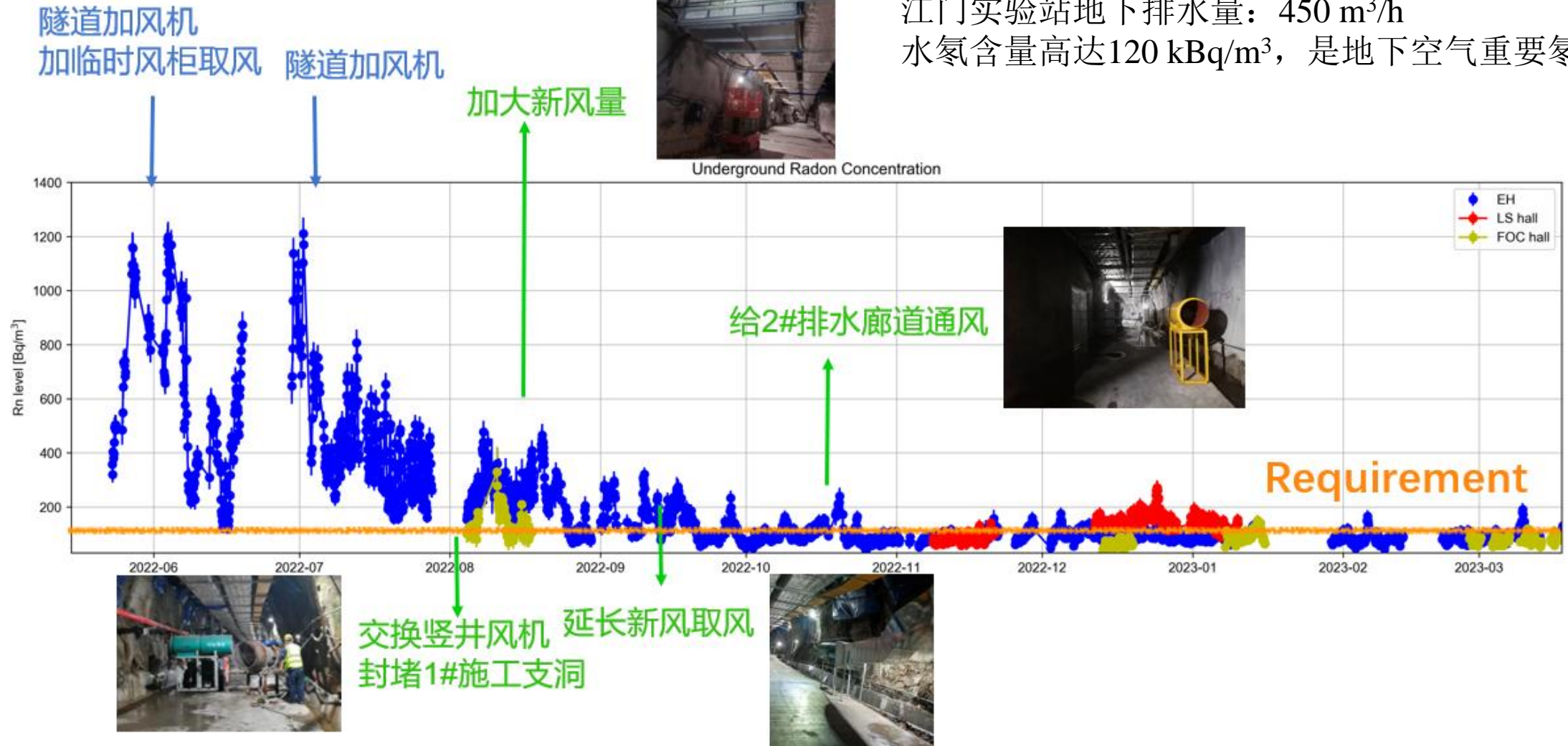
Experimental model

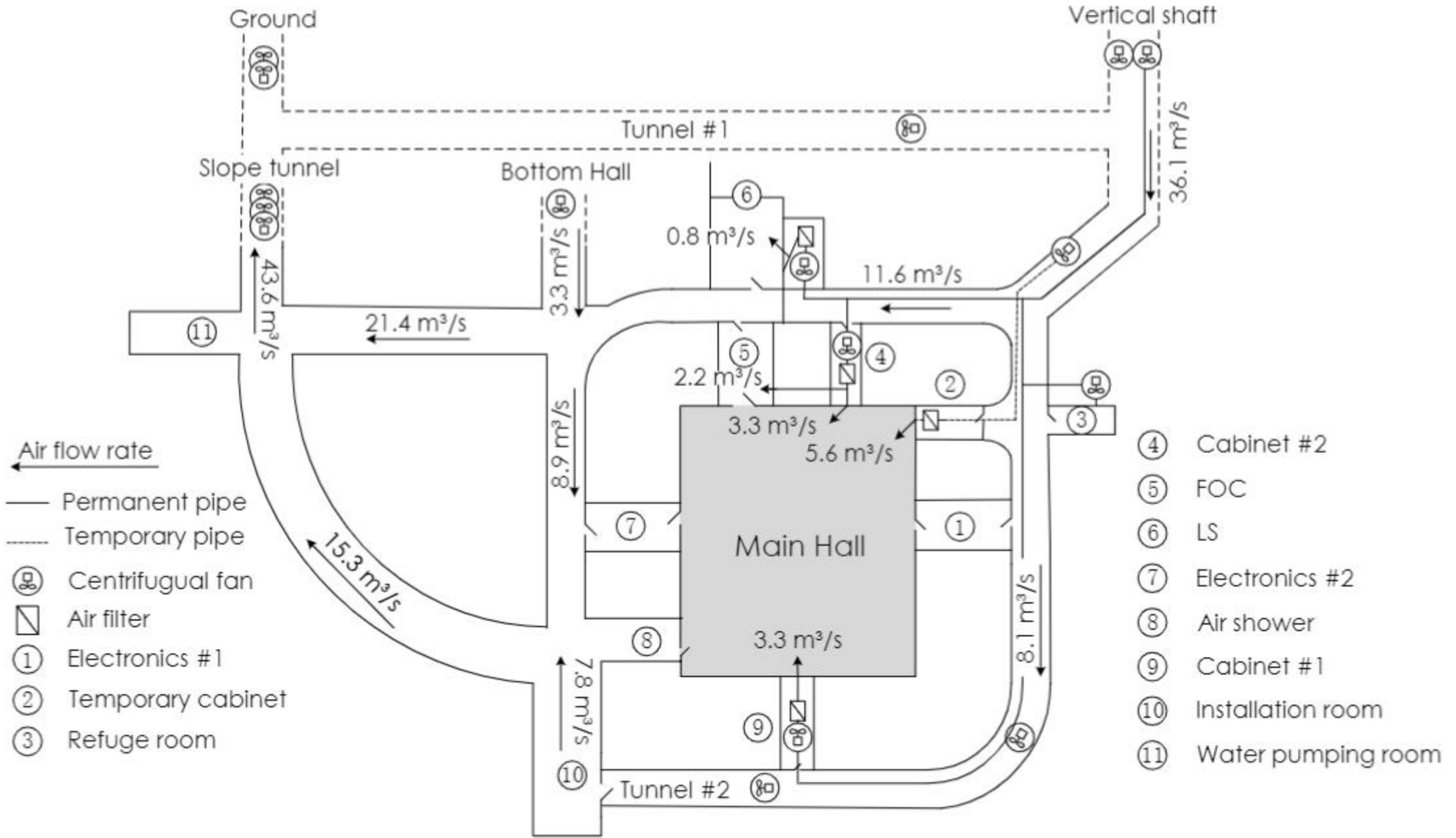
现场安装环境氡控制



Underground Radon Concentration

江门实验站地下排水量: 450 m³/h
水氡含量高达120 kBq/m³, 是地下空气重要氡源





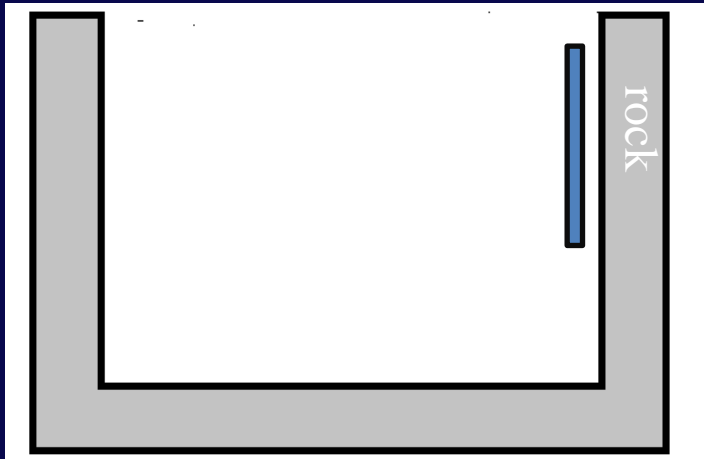
池壁氦阻挡

■水池内壁有50cm厚水泥硬化，并平铺5 mm厚HDPE，以阻挡岩石侧氦进入水系统

✓ $C_{RnHDPE} = e^{-\frac{x}{L}} \times \frac{E_{Rn} \cdot S}{V \cdot \lambda_{Rn}}$, HDPE的L~0.4 mm

✓ HDPE本身放射性含量: $^{238}\text{U} < 0.19 \text{ Bq/kg}$, $^{232}\text{Th} = 0.15 \pm 0.03 \text{ Bq/kg}$, $^{40}\text{K} = 0.81 \pm 0.46 \text{ Bq/kg}$

■池顶用橡胶覆盖，内侧水面上方同氮气密封



材料	厚度	Time(d)	Humidity	T(°C)	衰减倍数	P=DS (10 ⁻⁸ cm ² /s)
PA6	127 um	26	18.2%	18-32	152	(2.83-2.40) × 10 ⁻¹
PA6	76um	32	24.3%	18-32	205	(1.25-1.07) × 10 ⁻¹
HDPE	2mm	28	water	11-30	180	(4.11-3.6)
Rubber	0.5mm	43	water	7-30°C	48	(4.06-3.06)

HDPE清洁

■运输过程覆膜保护

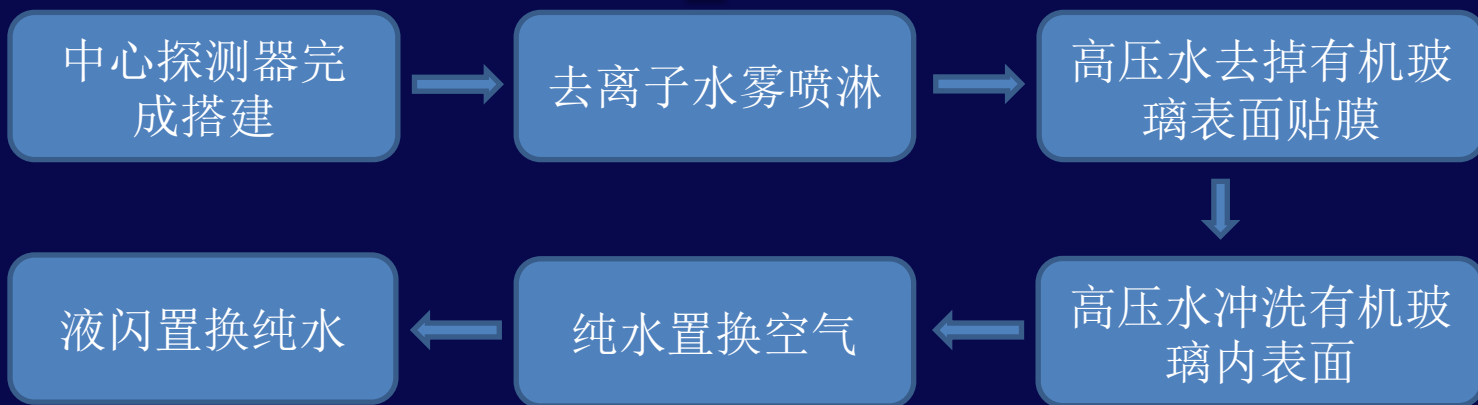
■共做过三次清洁

- ✓ 第一次：2021年底刚安装完，局部比较脏的地方用柠檬酸或草酸擦拭，然后用碱性溶液中和，最后高压水枪冲洗
- ✓ 第二次：2022年3月，厅内大清洁提升洁净度时期，中性除污清洗剂，可自然排放，最后纯净水冲洗干净
- ✓ 第三次：2022年12月，进一步提升洁净度，湿布擦拭，局部顽固污渍用酒精或柠檬酸帮助清洁



液闪灌装方案

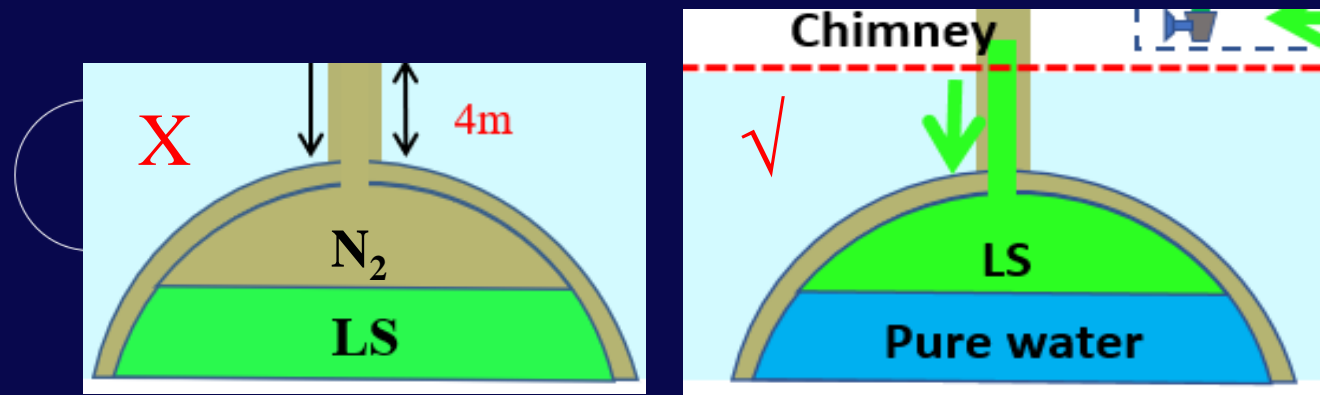
去除空气中的灰尘和附着的氦子体，且让氦衰变



3 m prototype中做高压水冲洗实验



总和考虑本底和工程风险，选择水置换方案。
水质要求提升： $U/Th < 10^{-15} \text{ g/g}$, $^{226}\text{Ra} < 0.1 \text{ mBq/m}^3$.



探测器安装暴露时间控制

■参考数据

- ✓ 大亚湾实验中两个探测器不同暴露时间，实验数据中看到不同含量的U/Th和Po，可解出灰尘和氦子体沉降速率
- ✓ 灰尘：万级洁净环境， $0.14 \text{ mg/m}^2/\text{d}$
- ✓ 氦子体： 100 Bq/m^3 空气氦环境， $0.5 \text{ mHz/m}^2/\text{d}$

	系统清洁后残留 灰尘含量	安装暴露环境	暴露时间
液闪纯化、灌装系统	$< 1 \mu\text{g/m}^2$	Class 10,000	$< 10 \text{ min}$
有机玻璃外表面	$< 3 \text{ mg/m}^2$	Class 10,000	$< 6 \text{ months}$
有机玻璃内表面	$< 2 \mu\text{g/m}^2$	控制表面处理时间在一天之内。 全程贴膜，最后整球清洗	

- ✓ 安装过程若不满足暴露时间要求，会局部通洁净低氦空气降低影响

■安装完成后最终串洗

- ✓ 水串洗、液闪串洗，通过检测水质和液闪中U/Th判断系统洁净度水平

总结

中微子、暗物质等信号极少的实验中，本底控制是实验成败的关键！

本底控制研究能够得到多方面的训练：软件、硬件、物理分析！

JUNO明年开始取数：第一项任务就是本底分析！

