



# 博士后面试报告

博士生：凌鑫  
合作导师：温良剑

# 目录



1. 个人简介
2. JUNO液闪光学纯化研究
3. 极低本底氮气纯化与氦测量
4. 未来工作计划



## ➤ 个人信息

姓名:	凌鑫	性别:	男
出生日期:	1995.08.	民族:	汉族
政治面貌:	中共党员	籍贯:	湖南省娄底市

## ➤ 学习经历

硕士: 2018年9月至2021年6月      南华大学, 核能与核技术工程, 衡阳, 核仪器辐射探测方向, 导师颜拥军

博士: 2021年6月-2024年12月      南华大学, 核科学与技术, 衡阳, 核辐射探测, 联培导师俞伯祥, 主要以联培学生参与江门中微子实验

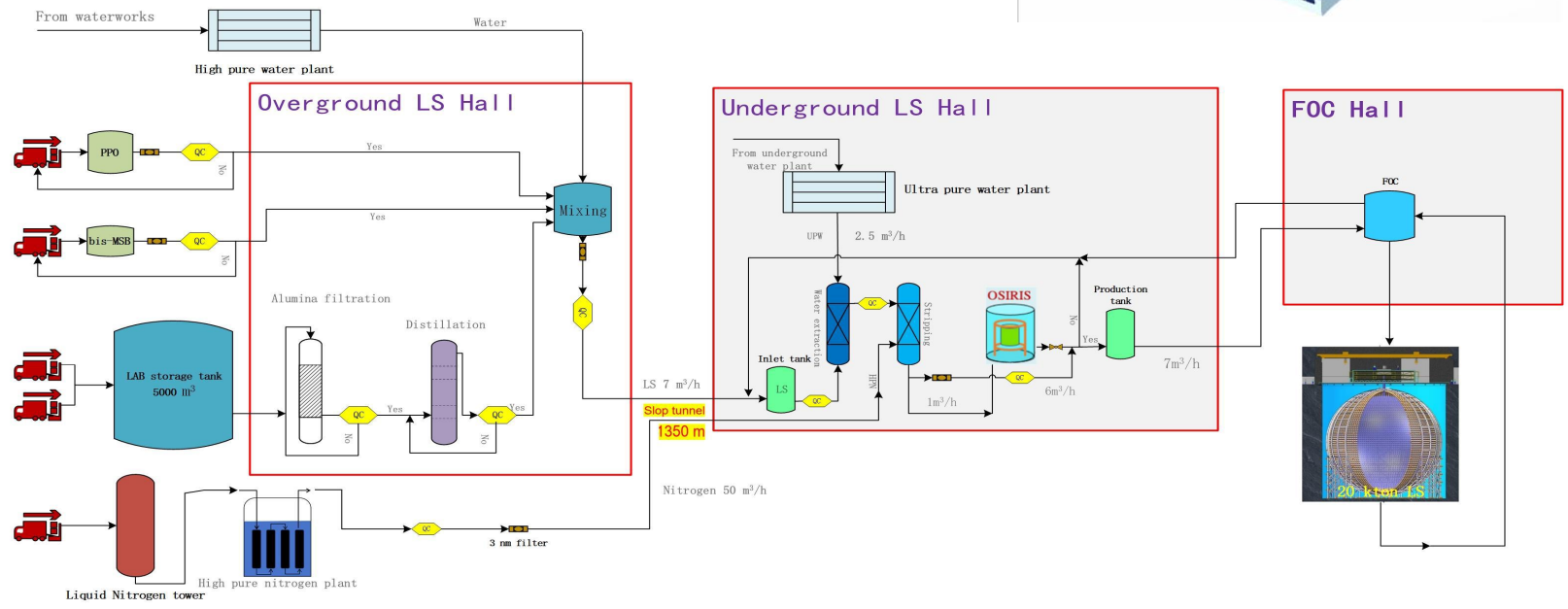
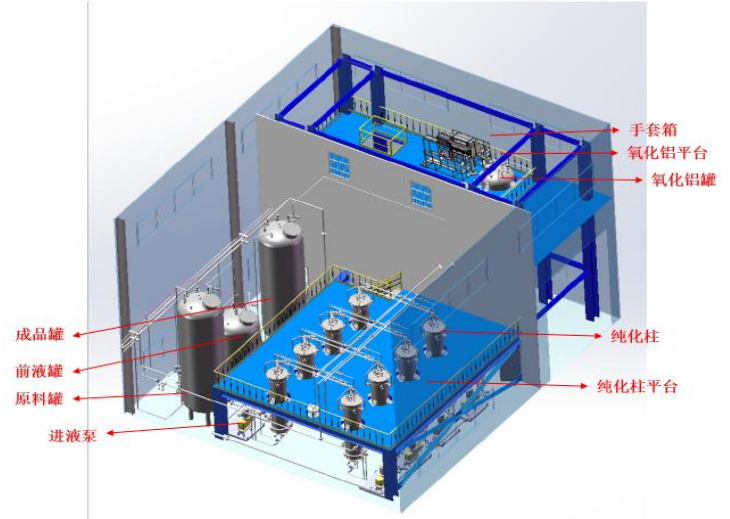
## ➤ 主要科研经历

- 1、主要负责高纯氦系统的清洗, 安装, 调试, 运维。高纯氦氡测量装置安装, 调试, 新氦测量系统升级与刻度。
- 2、主要负责氧化铝纯化系统的调试与结果分析。
- 3、主要参与液闪质检, 包括光产额, 衰减长度, 吸收光谱, 颗粒度。基于氦气剥离的方法构建一套液闪中氦测装置。

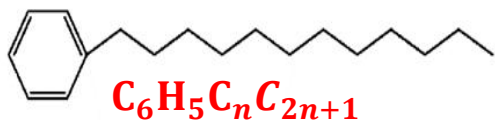
# JUNO液闪光学纯化研究-液闪纯化流程



- JUNO自研一套液闪生产及纯化流程
- 5套纯化子系统+1套内部质检系统+3套辅助系统
- 首次使用氧化铝进行光学纯化



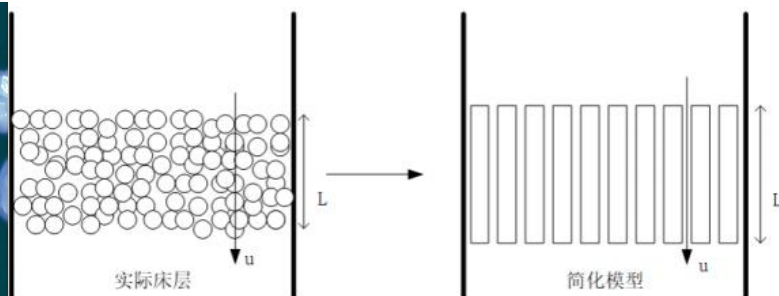
- 烷基苯高透明度，高闪点，低毒性，低挥发性，化学性质稳定，不易氧化及分解等  
适合于大批量制造液闪
- 工厂方式去除：多次蒸馏，精馏去除，成本较高  
氧化铝去除成本较低
- 氧化铝具有多孔结构，比表面积大~150m<sup>2</sup>/g



## 烷基苯光学杂质

重烷基苯：支链烷基苯与多烷基苯

具有荧光竞争（紫外至可见波段）的发光基团：  
二苯烷，硝基化合物，硝基苯，硫代羰基等



## 吸附原理

极性吸附：分布于晶体表面的活性中心

分子间隙间的摩擦力

# JUNO液闪光学纯化研究-光学性能检测技术



液闪中，宏观表现出的闪烁光的衰减长度 ( $\lambda_{att}$ ) 主要由两部分贡献：吸收 ( $\lambda_{abs}$ ) 和散射 ( $\lambda_{scatt}$ )

$$\frac{1}{\lambda_{att}} = \frac{1}{\lambda_{abs}} + \frac{1}{\lambda_{scatt}}$$

$L_{Rayleigh} = 28.5 \pm 2.3$  m, 为衰减长度测量及烷基苯的光学纯度提供上限值的理论参考

$$l_{ray} = \left[ \iint R(\theta) d\Omega \right]^{-1} = \left\{ \frac{8\pi^3}{3\lambda^4} \left[ \frac{(n^2-1)(2n^2+0.8n)}{n^2+0.8n+1} \right]^2 kT\kappa_T \frac{6+3\delta}{6-7\delta} \right\}^{-1}$$

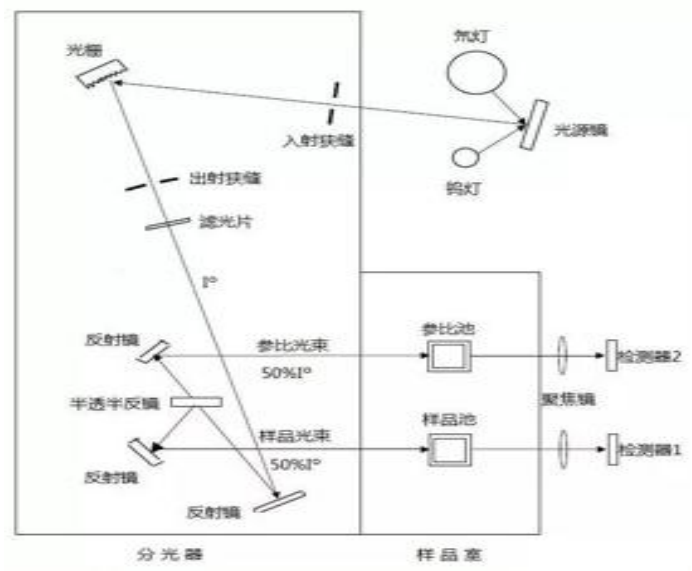
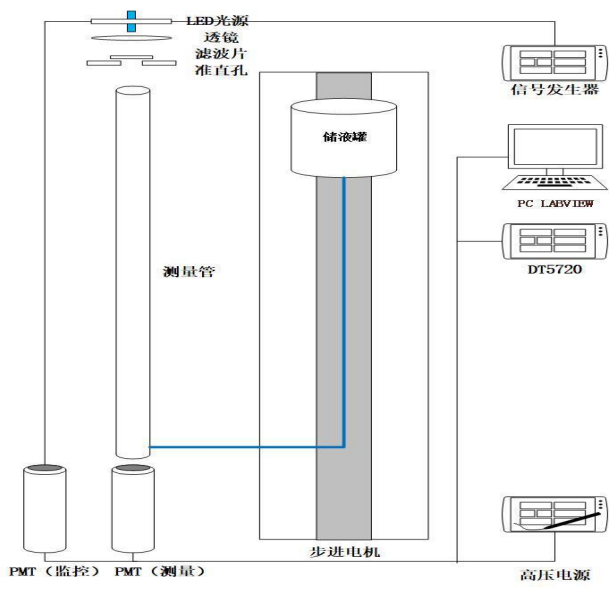


衰减长度测量主要实验测量： $I = I_0 e^{-\frac{x}{\lambda_{att}}}$

吸收光谱主要通过紫外分光光谱仪，

$$A = -\log T = -\log \left( \frac{I}{I_0} \right) = \sum bc$$

样品	$\lambda$ (nm)	T(°C)	n	$\kappa_T(10^{-10}Pa^{-1})$	$\delta$	$l_{ray}(m)$
LAB	430	23	$1.498 \pm 0.004$	$7.743 \pm 0.035$	$7.743 \pm 0.035$	$28.5 \pm 2.3$



# JUNO液闪光学纯化研究-光学纯化结果



- 对原料放射性本底测量，主要体现在<sup>226</sup>Ra的区别，为JUNO选择了放射性本底最低的氧化铝
- 氧化铝虽然是粉末，并没有带入微小颗粒，反而有过滤效果

表 3.3 厂家各种材料氧化铝放射性本底测量

样品名称	质量(g)	测试时长(h)	U-238 ( <sup>214</sup> Pb, <sup>214</sup> Bi) (Bq/Kg)	Ra-226(Bq/Kg)	Th-232 ( <sup>212</sup> Pb, <sup>208</sup> Tl, <sup>228</sup> Ac) (Bq/Kg)	K-40(Bq/Kg)
岳阳慧璟 HB	610.9	67.71	<0.23	2.52±0.40	<0.29	0.81±0.40
岳阳慧璟 S	599.1	83.85	<0.20	11.9±0.81	<0.27	<0.76
岳阳慧璟 3#	636.3	72.42	<0.22	5.84±0.49	<0.27	<0.72
岳阳慧璟 2#	587.5	68.12	<0.24	7.52±0.58	<0.29	<0.87
智华杰 CX80151	606.5	70.59	<0.24	6.89±0.54	<0.28	<0.80
智华杰 CX1021	618.5	47.85	<0.28	6.17±0.61	<0.32	<0.84
山铝颐丰 1#	721.9	94.95	<0.14	<0.79	0.25±0.03	<0.49
山铝颐丰γ3 (80-200)	673.5	47.24	<0.23	<1.20	<0.28	<0.74
山铝颐丰 NS-γ4 (140-360)	655.8	65.99	0.32±0.04	<1.01	0.26±0.04	0.75±0.27
国药 202409	680.1	71.66	0.27±0.03	<0.99	<0.23	0.77±0.24

表 3.5 氧化铝系统各级颗粒物检测结果

样品	粒径 (>粒径总数)				
	0.1 μm	0.15 μm	0.2 μm	0.3 μm	0.5 μm
氧化铝进料罐 (个/ml)	2473.01	1249.51	596.66	221.47	85.05
氧化铝首液罐 (个/ml)	860.27	627.96	425.97	137.94	23.37
氧化铝成品罐 (个/ml)	158.49	108.03	72.15	26.6	10.86
ANOW220nm 过滤器 (旧) (个/ml)	7.2	4.8	3.1	1.6	0.5
PALL50nm 过滤器 (旧) (个/ml)	9.0	4.9	2.9	1.0	0.4
ANOW220nm 过滤器 (新) (个/ml)	10.6	6.0	3.6	1.6	0.7
科百特 50nm 过滤器 (个/ml)	0.4	0.2	0.1	0.1	0.0
科百特-50nm-7m3/h-AFP (个/ml)	1.77	1.13	0.66	0.25	0.15
pall-50nm-7m3/h-AFP (个/ml)	4.75	3.02	1.9	0.99	0.46

# JUNO液闪光学纯化研究-光学纯化结果



- 2BV之前光谱纯化效果明显，28BV之前对小峰有纯化效果，30BV杂质吸收峰重合，但30BV后仍将衰减长度提升至24m以上
- 经过氧化铝纯化后的烷基苯U/Th含量在ppq水平  
过滤器过滤后的U/Th含量会降低

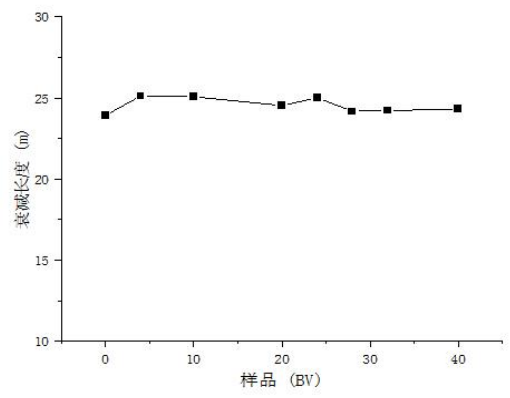
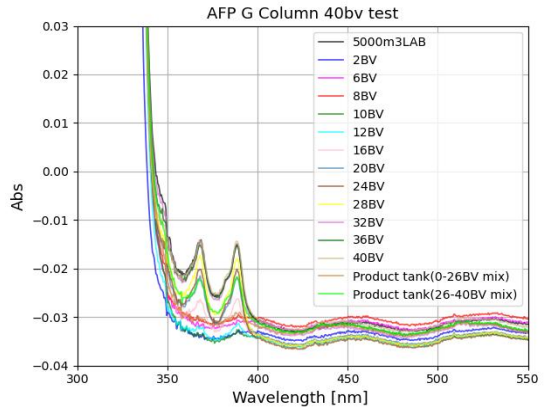


表 3.6 中子活化分析 U/Th 测量结果

	源料 LAB	氧化铝纯化后过滤器前 LAB
U-238(ppq)	<4	<4.4
Th-232(ppq)	<16	<5
K-40(ppq)	<3	<3

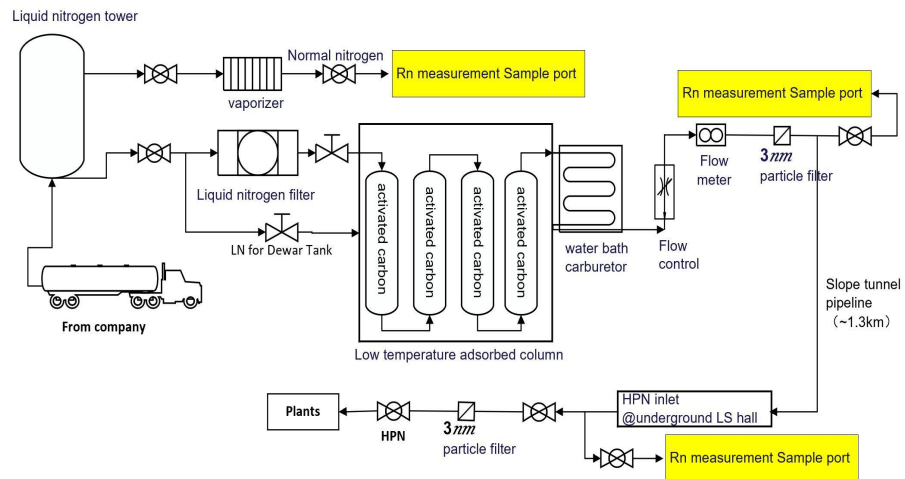
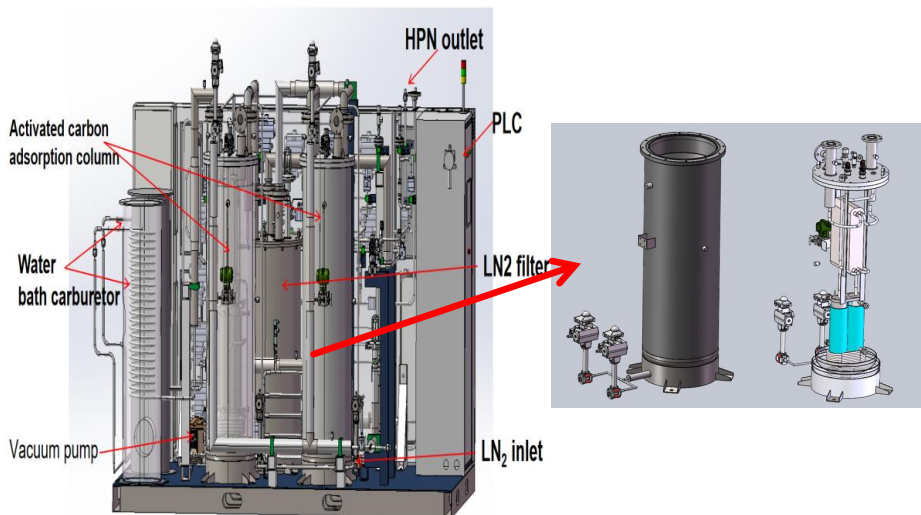
表 3.7 ICP-MS U/Th 测量结果

	源料 LAB	氧化铝纯化后过滤器前	氧化铝纯化后过滤器后
U-238(ppq)	2.2±1.3	<2.6	0.27±0.08
Th-232(ppq)	2.6±1.1	<2.0	0.88±0.11



# 极低本底氮气纯化与氩测量-氮气纯化研究

- JUNO氮气放射性本底要求：单柱运行10天后  $Rn-222 < 10 \mu Bq/m^3$ ,  $Kr-85 < 50 \mu Bq/m^3$ ,  $Ar-39 < 50 \mu Bq/m^3$
- 两根低温吸附纯化柱，单柱运行设计流速50 Nm<sup>3</sup>/h，两柱同时工作可达到100 Nm<sup>3</sup>/h
- 双层保温杜瓦罐：提供制冷环境，**自动补液控制**  
活性炭柱：金属筛网阻挡活性炭颗粒，**采用串联方式提高柱径比**
- 设计3个取样口，用于监测普通氮气与高纯氮气，一级液氮过滤器，两级3nm氮气过滤器通过背压阀组，维持活性炭柱内压力，保证纯化效率



# 极低本底氮气纯化与氦测量-装置本底控制研究

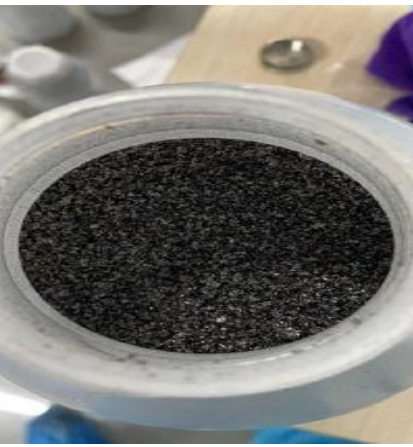
- CARBO\_ACT活性炭：氦本底 $0.3 \pm 0.1 \text{ mBq/kg}$ ，放射性铀、钍、钾的水平也较低
- 3kg 活性炭，吸附柱柱径比达到31.6，是同类实验的2-3倍，活性炭引入的本底  $2.7 \times 10^{-3} \mu\text{Bq/m}^3 \ll 10 \mu\text{Bq/m}^3$
- 316L低本底电解抛光管，焊接标准好于 ASME BPE level 3
- 经过2个月清洗过内表面的氦释放降到最低
- 密封方式：VCR连接，对单个部件系统漏率 $< 10^{-8} \text{ mbarl/s}$ ，系统整体漏率 $< 2.8 \times 10^{-8} \text{ mbarl/s}$

表 4.3 CarboAct 活性炭的参数

项目	参数
密度	$0.27 \text{ g/cm}^3 \pm 10\%$
比表面积	$1200\text{-}1500 \text{ cm}^2/\text{g}$
粒径	0-2mm

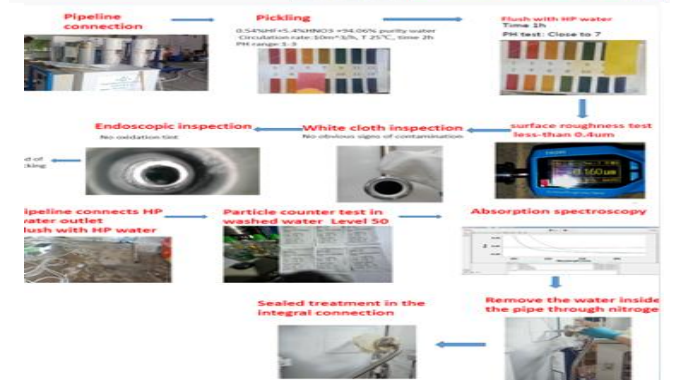
表 4.4 不同活性炭比活度

样品 HPGe 测量	比活度(Bq/kg)				
	$^{137}\text{Cs}$	$^{232}\text{Th}$	$^{40}\text{K}$	$^{226}\text{Ra}$	$^{222}\text{Rn}$
Silcarbon k48	$\leq 1$	$0.5 \pm 0.3$	$10 \pm 0.7$	$0.4 \pm 0.3$	$0.28 \pm 0.05$
Hydraffin CC&X30	$1.3 \pm 0.2$	$1.2 \pm 0.2$	$275 \pm 14$	$1.0 \pm 0.3$	$0.33 \pm 0.02$
Alcarbon 12x20	$0.1 \pm 0.06$	$\leq 0.3$	$590 \pm 24$	$\leq 0.3$	$0.17 \pm 0.02$
Alcarbon 7x16	$1.5 \pm 0.2$	$\leq 0.4$	$690 \pm 28$	$\leq 0.3$	$0.10 \pm 0.02$
CarboAct	$\leq 0.5$	$\leq 0.5$	$\leq 3$	$\leq 0.3$	$\leq 0.0003 \pm 0.0001$
样品 ICP-MS 测量	比活度(mBq/kg)				
	$^{238}\text{U}$	$^{232}\text{Th}$			
CarboAct	$1.3 \pm 0.2$	$0.117 \pm 0.014$			

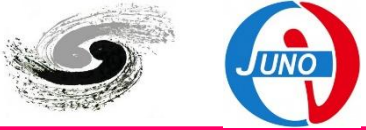


## specific activity measured by HPGe

sample	Specific activity
Pipelines	Ra-226 $< 1.42 \text{ Bq/kg}$
	Th-232 $< 0.06 \text{ Bq/kg}$
	K-40 $< 0.28 \text{ Bq/kg}$
Welding wires	Ra-226 $< 1.67 \text{ Bq/kg}$
	Th-232 $< 0.08 \text{ Bq/kg}$
	K-40 $< 0.40 \text{ Bq/kg}$



# 极低本底氮气纯化与氩测量-高纯氮气放射性本底研究



- 用特质钢瓶进行取样测量
- 样品测量采用外标法，下限检测限为 $1 \times 10^{-15}$  L/L，实验不确定性10%
- 高纯氮中的 $^{85}\text{Kr}$ ,  $^{39}\text{Ar} < 50 \mu\text{Bq}/\text{m}^3$

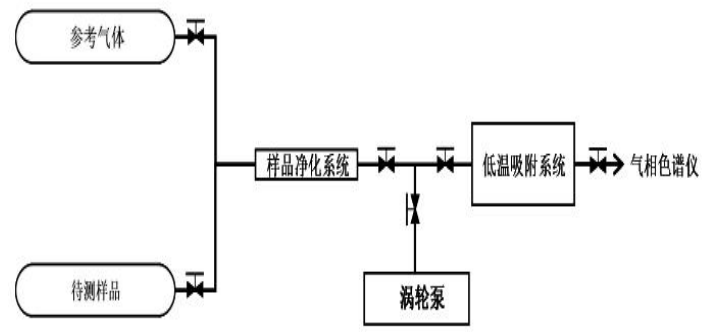
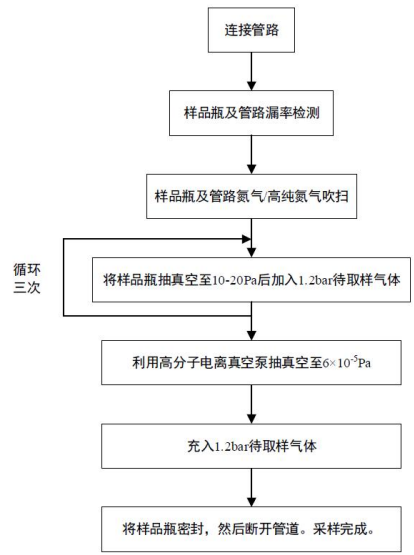


表 4.7 氮气样品氩，氙测量结果

样品名称	$^{84}\text{Kr}$ 体积比浓度 (L/L)	$^{85}\text{Kr}$ 体积比浓度 ( $\mu\text{Bq}/\text{m}^3$ )	$^{40}\text{Ar}$ 体积比浓度 (L/L)	$^{39}\text{Ar}$ 体积比浓度 ( $\mu\text{Bq}/\text{m}^3$ )
普通氮气	$56.1 \pm 5.6\text{ppt}$	$98.4 \pm 9.8$	$4.3 \pm 0.4\text{ppm}$	$4.3 \pm 0.4$
地面高纯氮气	$3.9 \pm 0.4\text{ppt}$	$6.8 \pm 0.7$	$3.6 \pm 0.4\text{ppm}$	$3.6 \pm 0.4$
地下高纯氮气	$17.9 \pm 1.8\text{ppt}$	$31.4 \pm 3.14$		
地下试验厅空气	$1.09 \pm 0.1\text{ppm}$	$1.9 \pm 0.2 \text{Bq}/\text{m}^3$		

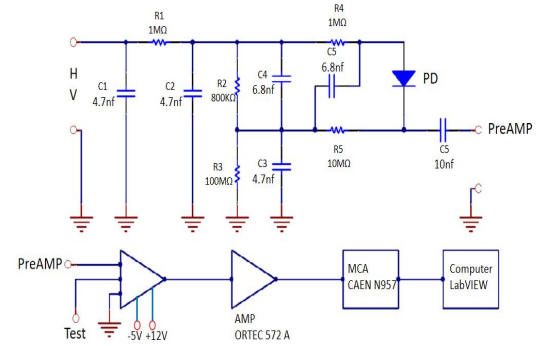
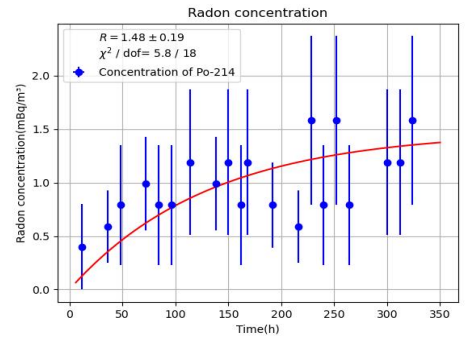
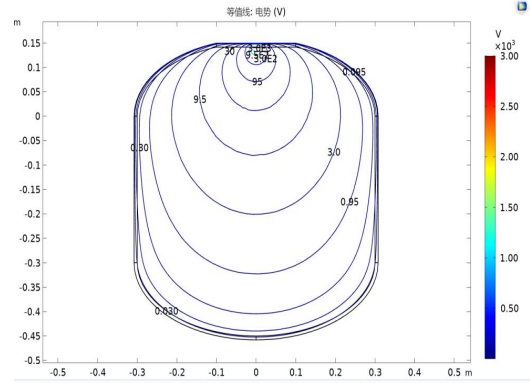
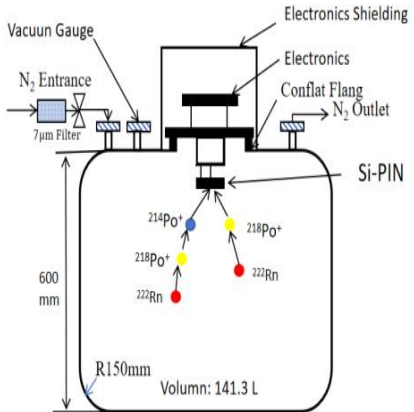
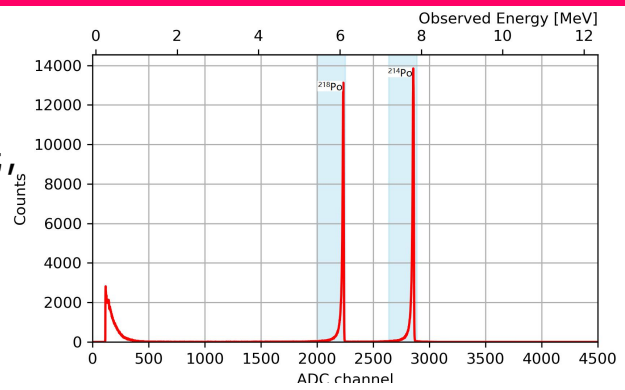
空气	浓度	$^{84}\text{Kr}$	$^{39}\text{Ar}$
Kr	$1.14 \times 10^{-6}$	57%	
Ar	$9.34 \times 10^{-3}$		99.6%

$^{85}\text{Kr}/\text{Kr} = 1 \times 10^{-11} \text{ L/L}$ ,  
 比活度为  $1 \text{ Bq}/\text{m}^3$   
 $^{39}\text{Ar}/^{40}\text{Ar} = 1 \times 10^{-16} \text{ L/L}$ ,  
 比活度为  $10 \mu\text{Bq}/\text{m}^3$

# 极低本底氮气纯化与氡测量-高纯氮气放射性本底研究



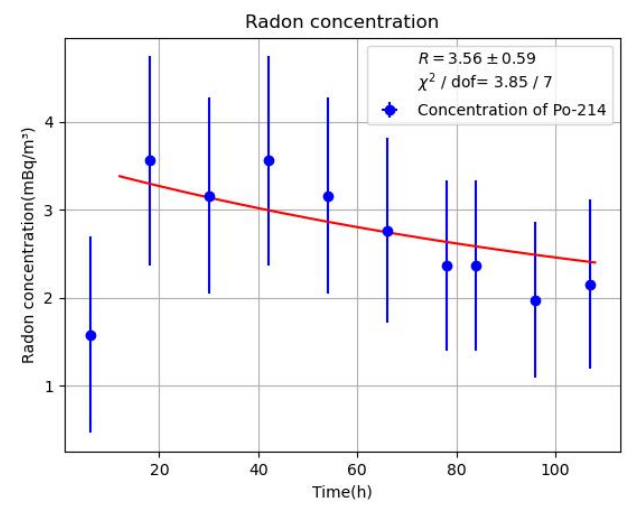
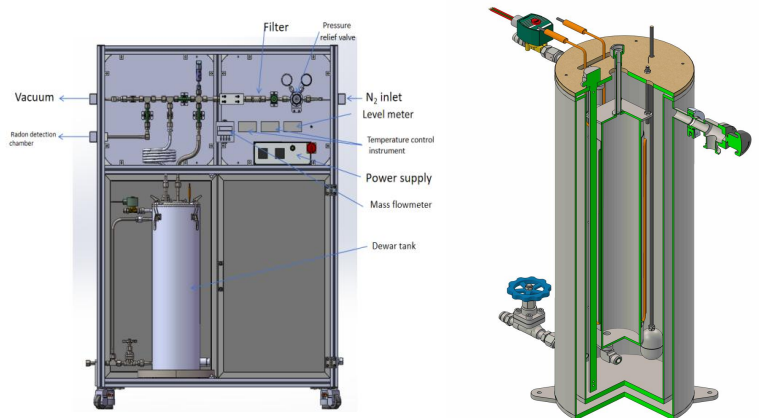
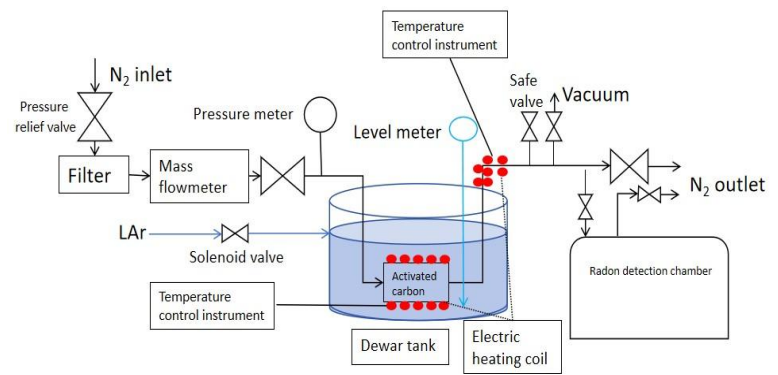
- 通过建立电场将氡子体收集至Si-PIN表面，能量沉积后，得到分辨率极高，无交叠的 $\alpha$ 峰用于氡的计数
- 采用低本底钢，对内表面进行抛光 ( $Ra < 0.2\mu m$ ),高纯酸清洗，将本底压制  $1.48 \pm 0.19 \text{ mBq/m}^3$
- 采用专用的高压元器件，减少了电子学的打火
- 探测器的探测限为  $1.60 \text{ mBq/m}^3$  (90% C.L.)

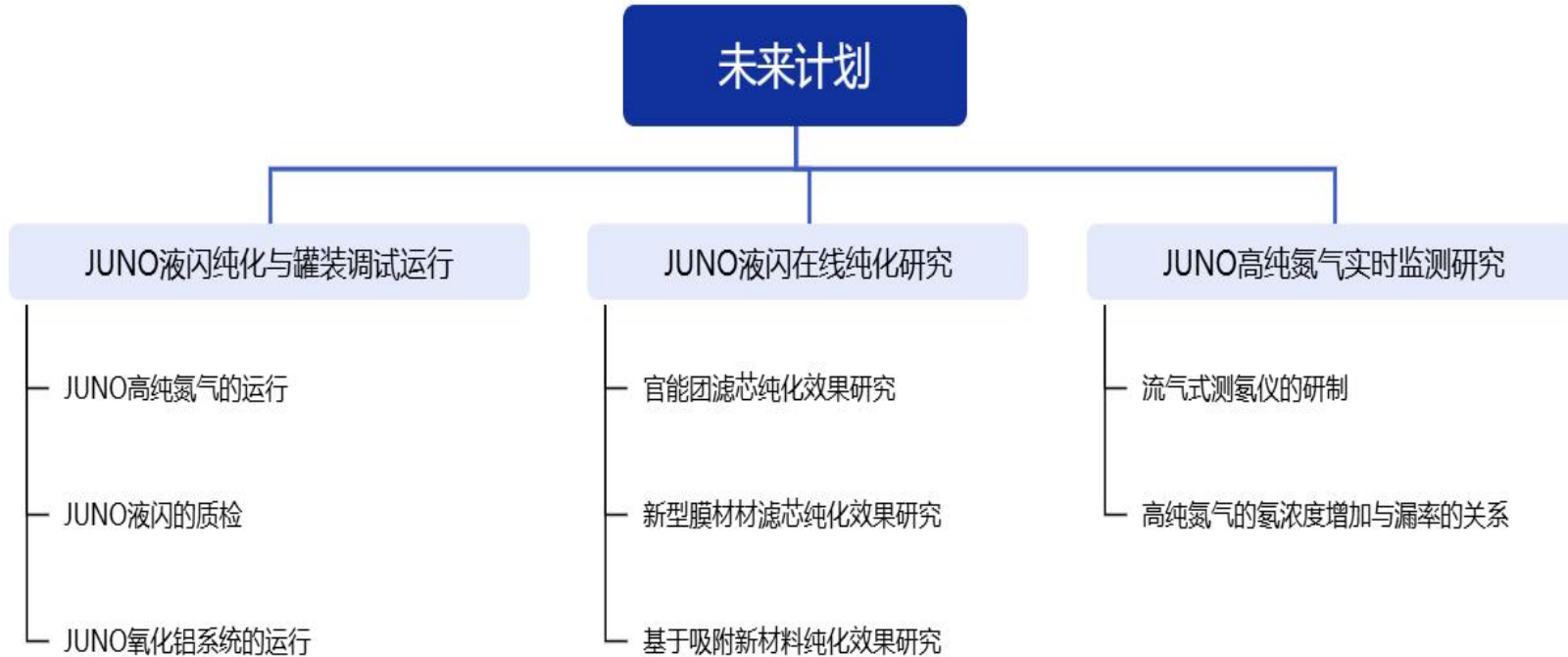


# 极低本底氮气纯化与氡测量-高纯氮气放射性本底研究



- 通过活性炭低温吸附, 增加取样体积, 从而降低探测限
- 472 g Carbo-Act 低本底活性炭, 高径比5:1
- VCR密封, 漏率小于  $2.4 \times 10^{-9} \text{ mbarL/s}$ , 控制系统的本底
- 富集1天, 测量时间1天, 探测限降低至  $0.26 \mu\text{Bq/m}^3$
- 高纯氮气: 平均流速  $35 \text{ m}^3/\text{h}$  运行19天后, 氡浓度为  $2.38 \pm 0.3 \mu\text{Bq/m}^3$

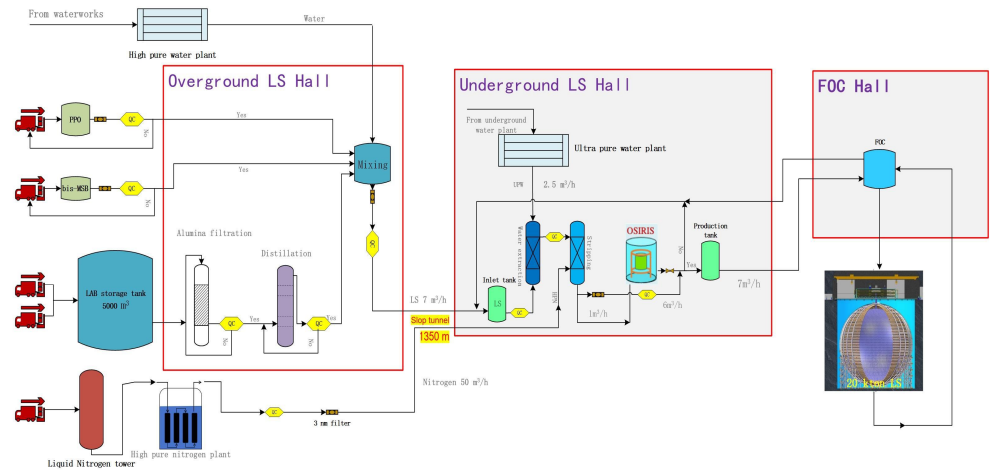
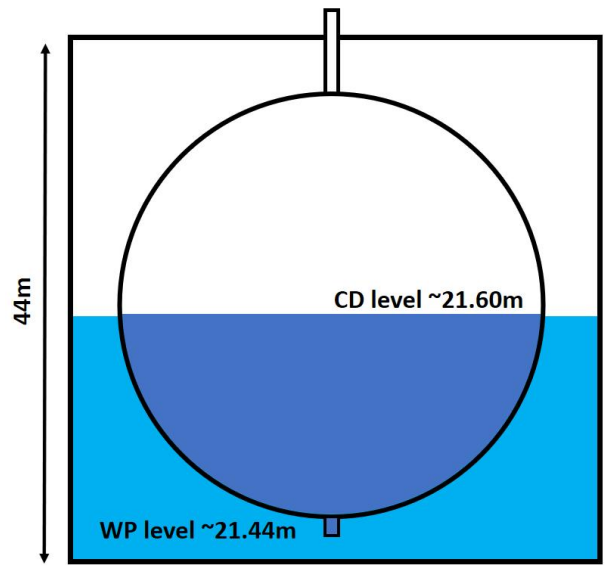




# 未来计划-JUNO液闪纯化与罐装调试运行



- JUNO已经开始水罐装，预计2025年2月17日开始2万吨液闪纯化与置换
- 负责JUNO液闪期间高纯氮气的供应以及质检（氦，氩，氙放射性气体杂质的监测）
- 负责与协调JUNO液闪质检：吸收光谱，衰减长度，浓度分析，放射性本底测量，光产额测量
- 协助负责氧化铝运行，处理系统的技术性故障

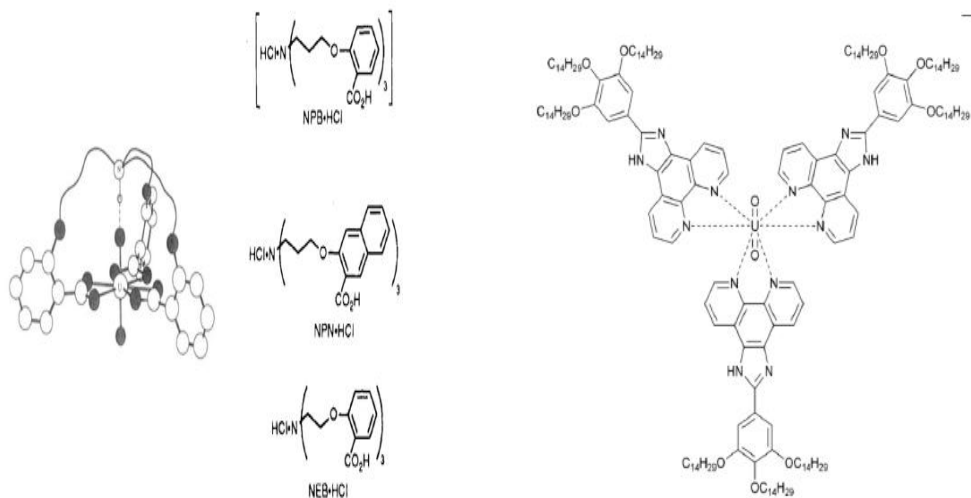


# 未来计划-JUNO液闪在线循环研究

- 主要是去除液闪中的U/Th离子，借鉴海水提铀技术，采用商用的官能团滤芯
- 官能团：是决定有机物性质的原子团，有羟基 (-OH)，羧基 (-COOH)，醛基 (-CHO)，酯基 (-COOR, R 为非H的其他基团，对铀的定向吸附能力：**像羧基，磷酸酯基**)

## 研究内容：

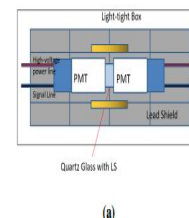
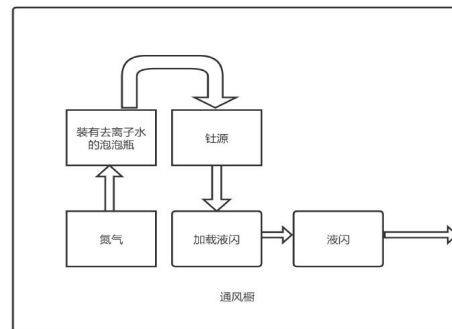
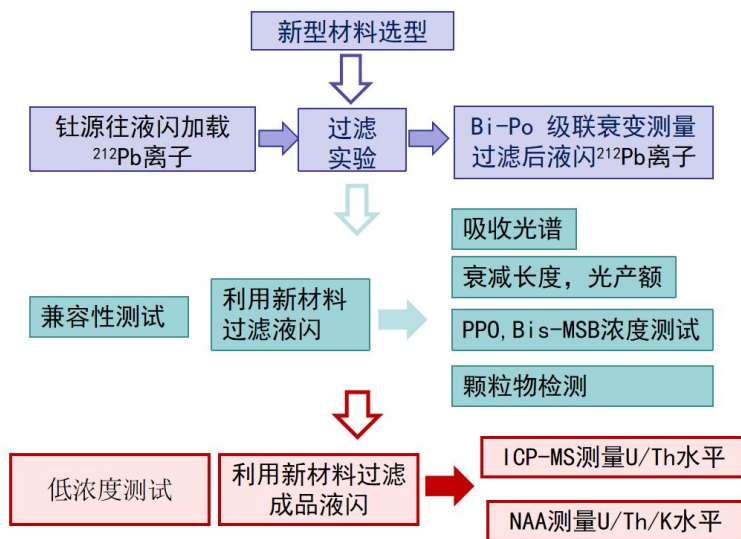
- 1、研究现有滤芯对液闪中低水平U/Th(ppq量级) 去除效果
- 2、研究官能团与过滤流速，过滤体积的关系
- 3、研究官能团滤芯的加载技术，选择加载吸附铀钍的定向基团
- 4、研究其他膜材料（纳米纤维膜）对液闪中低水平U/Th(ppq量级) 去除效果，研究膜蒸馏技术的可行性。





# 未来计划-JUNO液闪在线循环研究

- 调研现有比面积较大，对U/Th离子吸附选择性的材料  
如活性炭，COF(偕胺肟类配体吗，羧基功能化UiO-66),MOF,改性树脂（硅基离子交换树脂，萃淋树脂）等
- 利钍源往液闪加载铅，利用Bi-Po级联事例挑选，测试以液闪为基底的U/Th离子过滤效果
- 材料初选后，对过滤材料与液闪的兼容性进行测试，相关技术均以成熟
- 最后进行ppq水平U/Th的液闪过滤进行测试



# 未来计划-高纯氮气实时监测研究



- 现有的 $\mu\text{Bq}/\text{m}^3$ 水平氦测量均结合了富集过程，当富集时间1天，加上测量时间3天，响应时间较长
- 研制一个基于静电吸附的流气式测氦仪，实时监测高纯氮气的氦浓度

## 研究内容：

- 1、研究PD探测面积，探测器体积，高压等对探测效率的影响
- 2、刻度流气式测量下的探测效率
- 3、研究高纯氮气中氦浓度的增长与漏率的关系

型号	腔室体 积(L)	平均本底 (counts/d)	校准因子(cph/ Bq/m <sup>3</sup> )	有效探 测效率	判断限(mBq/ m <sup>3</sup> )
CJPL-HR2	2.3	0.7	2.1 ± 0.2	25.36%	27.22
CJPL-HR20	23.9	1.0	22.3 ± 1.0	25.92%	3.06
CJPL-HR140	139.5	3.3	183.6 ± 1.6	36.56%	0.68
CJPL-HR300	329.2	6.3	387 ± 7	32.65%	0.44
Super-K (1999)	70	2.4	91.7		1.4
Borexino (2001)	418	<2	1125		<1
Super-K (2017)	80	0.74	93.8		0.54
Darkside (2021)	450	3.0	579.2		0.05
Super-K (2021)	80	0.5	103.3		