



北京大学  
PEKING UNIVERSITY



## 课题4：面向下一代液氙实验的极低本底控制 技术研发中期检查报告

所属项目：基于PandaX-4T的物理和关键技术研究

汇报人：王思广  
北京大学物理学院

2025年11月22日

# 目录

## ➤ 年度计划与考核目标

- 低本底铜中铀、钍元素分析研究
- 氡、氡放射性活度测量与分析
- 氦中氡含量的降低
- 项目资源与成果概览
- 未来工作规划
- 总结



北京大学  
PEKING UNIVERSITY

# 2024-2025年度研究计划总览

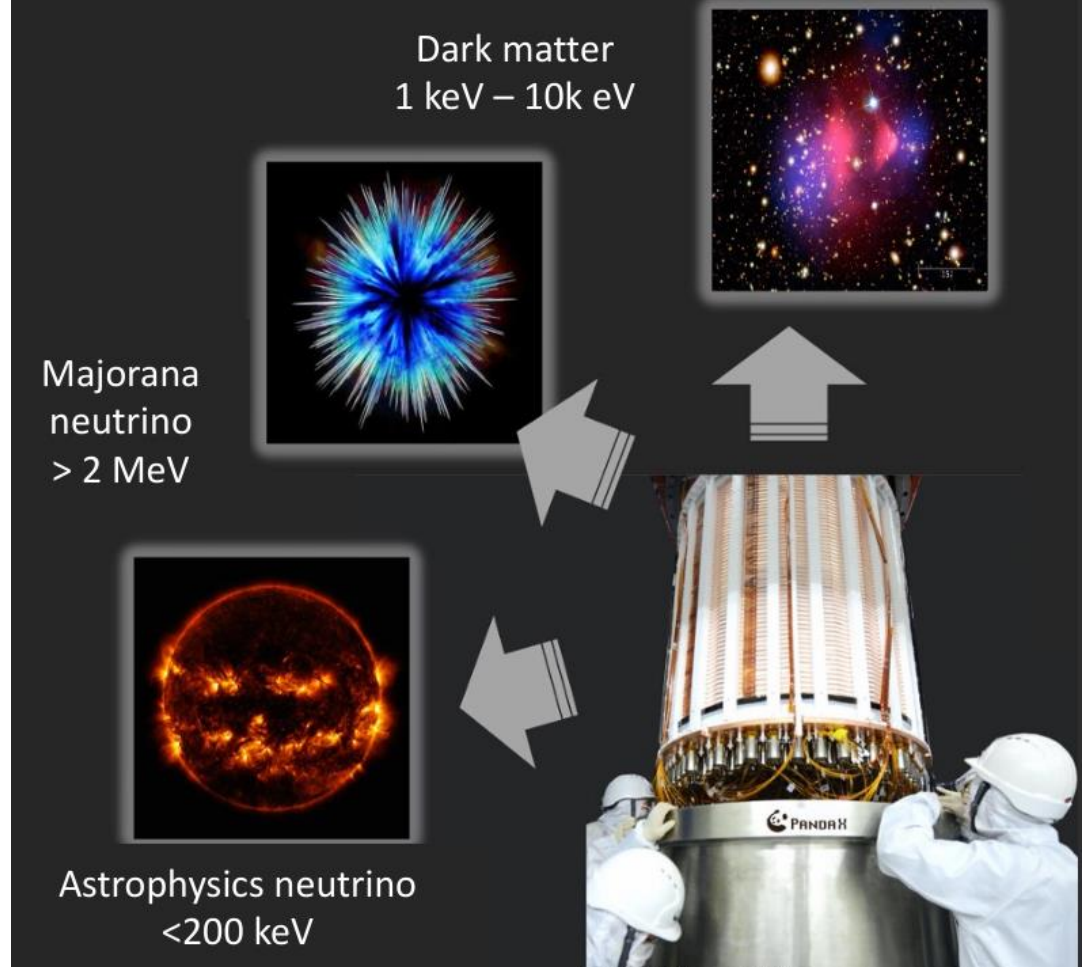
阶段划分	核心任务	考核指标	成果形式
第一阶段 (能力建设) (2023.12 - 2024.05)	1. 完成实验室改造与ICP-MS性能提升，初步开展铜样品中 <sup>238</sup> U、 <sup>232</sup> Th测量灵敏度方法研究。 2. 为材料对氡的富集/去除效率测试准备条件。	给出初步研究结果	实验文档
第二阶段 (方法优化) (2024.06 - 2024.11)	1. 细致优化 <sup>238</sup> U、 <sup>232</sup> Th测量方法。 2. 测试多种材料对氡的富集及去除效率。	给出比较成熟的研究结果和结论，并完成会议报告。	会议报告 或 实验文档
第三阶段 (技术验证) (2025.01 - 2025.05)	1. 利用研发的测量技术与电解铜工厂互动，提升铜材质量。 2. 进一步研究氡富集和去除的方案。	给出互动结果，给出氡富集/去除的研究结果。	实验文档
第四阶段 (成果转化) (2025.06 - 2025.11)	1. 深化与工厂互动，溯源铜的放射性主要来源。 2. 初步确定氡富集与去除的优化方案，参加国内或国际会议，进行技术交流。	提升测量灵敏度，完成电解铜的测量，初步确定氡富集/去除方案，参加会议交流。	技术文章 或 实验文档

# 课题目标及本年度考核指标完成情况

课题目标	成果编号	成果类型	考核指标	指标阶段对比		考核方式	中期完成状态
				立项值	结题目标值		
研发用于低温容器的极低本底铜材（ <sup>238</sup> U、 <sup>232</sup> Th）精准测量方法	4.1	■新技术■新方法■应用解决方案■实验装置■发明专利	铜材中 <sup>238</sup> U、 <sup>232</sup> Th质量占比	~20 pg/g	<5 pg/g	论文发表或评审	奥鲁比斯铜的铀钍含量<10 pg/g
发展惰性同位素的高效富集与高灵敏探测手段	4.2	■新技术■新方法■应用解决方案■实验装置■论文	氦/氡测量灵敏度	10 ppt 0.2 mBq	1 ppt 50 μBq	论文发表或评审	氦灵敏度： 1.1 ppt 氡灵敏度： 0.03±0.01mBq
联合多种方案有效去除氦中氡本底	4.3	■新技术■新方法■应用解决方案■实验装置■论文	氦中氡含量	35 μBq/吨	5 μBq/吨	论文发表或评审	4.83 μBq/吨

# 目录

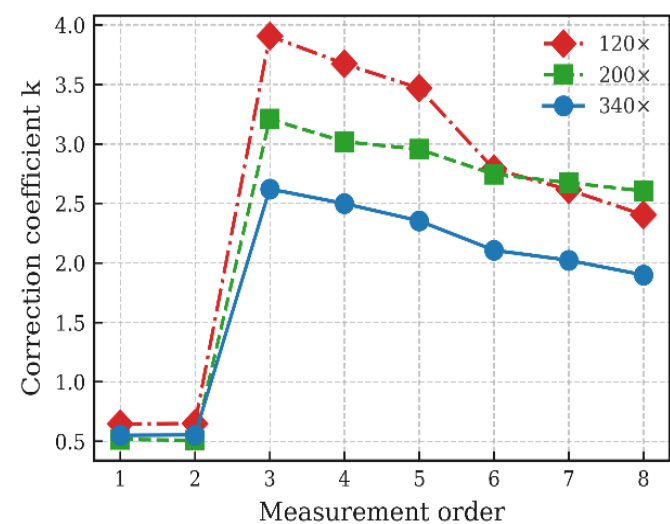
- 年度计划与考核目标
- **低本底铜中铀、钍元素分析研究**
- 氡、氦放射性活度测量与分析
- 氡中氦含量的降低
- 项目资源与成果概览
- 未来工作规划
- 总结



北京大学  
PEKING UNIVERSITY

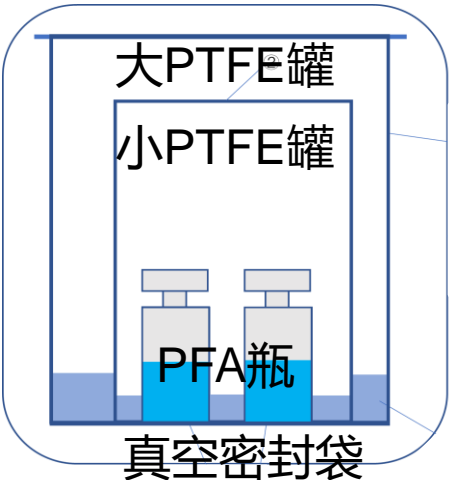
# 稀释法测量铜中铀钍含量方法改进

- ICPMS更换EM（Electron Multiplier），机器灵敏度提高约4倍；
- $^{235}\text{U}$ 同位素稀释法修正
- 引入密封湿室装置，减少在2-4天溶铜期间环境对非密封（排气）试剂瓶内样品的污染；



修正系数k随测量的变化

1、2空白各测1，3-5样品1重复测3次，6-8样品2重复3次



密封湿室装置实物照片及原理图

文章《核技术》审稿中



# 树脂法测量铜中铀钍含量方法研究

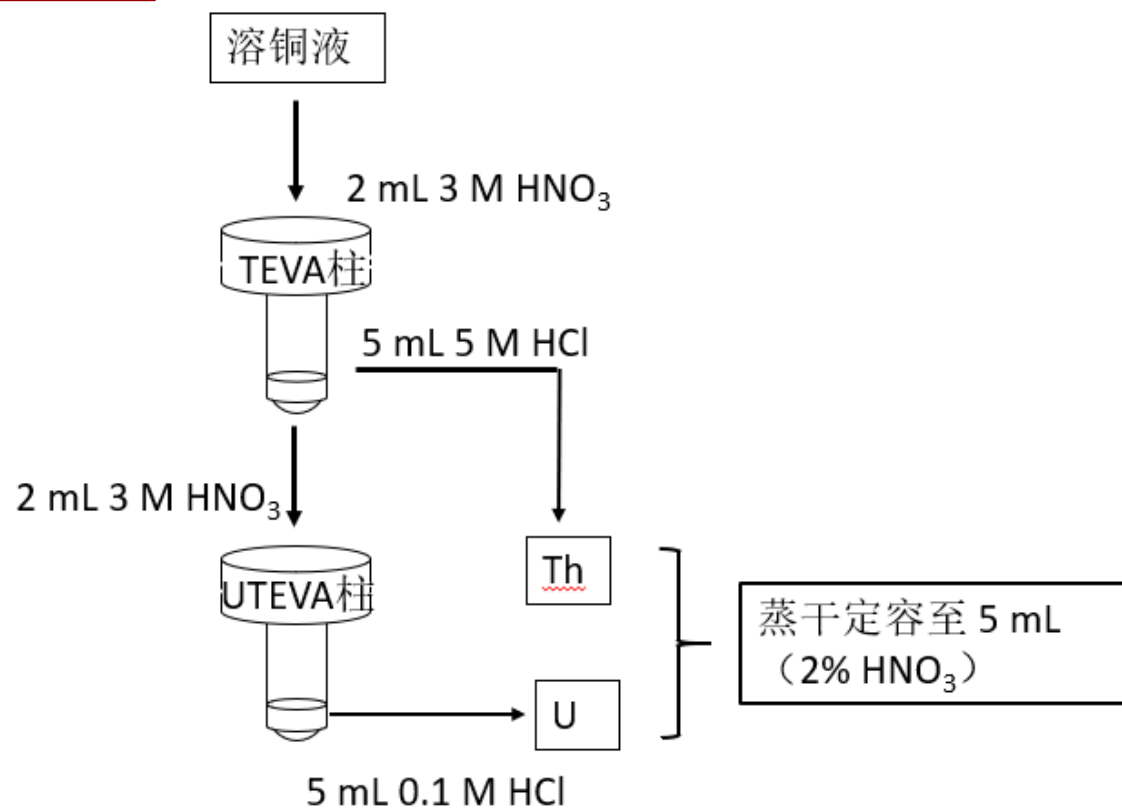


日期	样品制备方	标签	测量结果		树脂法	
			Th-232/ppt	U-238/ppt	回收率Th-230	回收率U-235
2024/10/20	北大	北大二次电解铜A	0.02±0.10	0.70±0.23	101%±9%	101%±8%
2024/10/20	北大	北大二次电解铜B	-0.12±0.07	0.56±0.12	103%±6%	100%±4%
2024/11/9	北大	Aurubis#1	0.59±0.17	-0.44±0.07	100%±13%	105%±14%
2024/11/9	北大	Aurubis#2	1.93±0.10	1.23±0.08	82%±2%	87%±2%
2025/1/12	北大	江铜A	3.8±0.4	0.82±0.10	79%±4%	85%±5%
2025/1/12	北大	江铜B	3.4±0.2	0.62±0.07	80%±2%	84%±2%
2025/1/12	北大	江铜C(加标 <sup>注</sup> )	12.9±0.5	8.0±0.4	79%±2%	85%±2%
2025/1/12	北大	江铜D(加标 <sup>注</sup> )	20.6±1.0	13.1±0.6	79%±2%	91%±2%

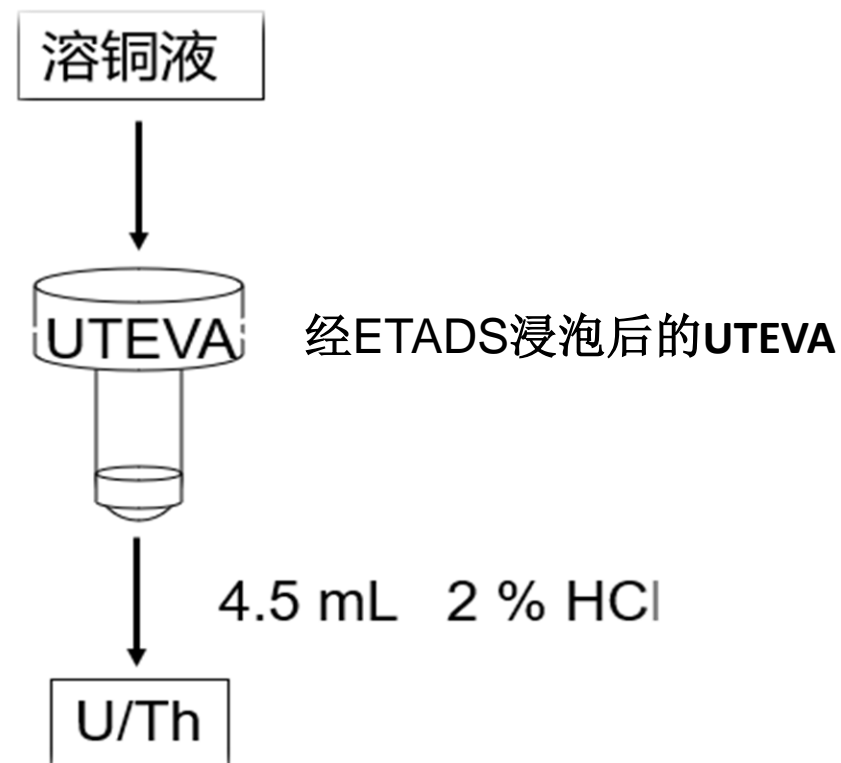
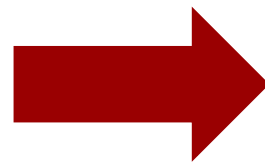
注：江铜ABCD为同一批铜，但C、D额外加了等效铜内9.68ppt的Th-232，10.24ppt的U-238

- UTEVA树脂（本来是吸附铀的）经ETADS (*E*thylenediamine *T*etraacetic *A*cid *D*isodium *S*alt, 乙二胺四乙酸二钠)处理后对硝酸铜液中铀、钍的回收率高（新发现）
- 加标后（江铜C、江铜D）能测量出来与不加标（江铜A、江铜B）的差异

# 树脂法测量铜中铀钍含量方法研究



传统的树脂法测量流程



改进后的树脂法测量流程

- 传统UTEVA+TEVA → ETADS处理过的UTEVA对U和Th都有高的吸附率
- 传统联合流程复杂易污染 → 仅用UTEVA树脂、采用4.5ml 2%HCl洗脱、直接测量
- 传统3M过量酸硝酸铜液本底高 → 铜液中无硝酸或微量过剩减少酸引入的本底



# 奥鲁比斯铜测量结果

2024年  
测量结果:

奥鲁比斯铜编号	测量方法	测量单位	<sup>232</sup> Th [pg/g]	<sup>238</sup> U [pg/g]	备注
#1-no.01	稀释法	PKU	14.9±0.6	10.4±0.7	污染? 不均匀?
#1-no.02	树脂法	PKU	0.57±0.09	0.11±0.04	
#1-no.03	稀释法	PKU	1.9±0.8	3.2±0.3	
#1-no.04	树脂法	PKU	1.91±0.03	1.79±0.03	

2025年  
测量结果:

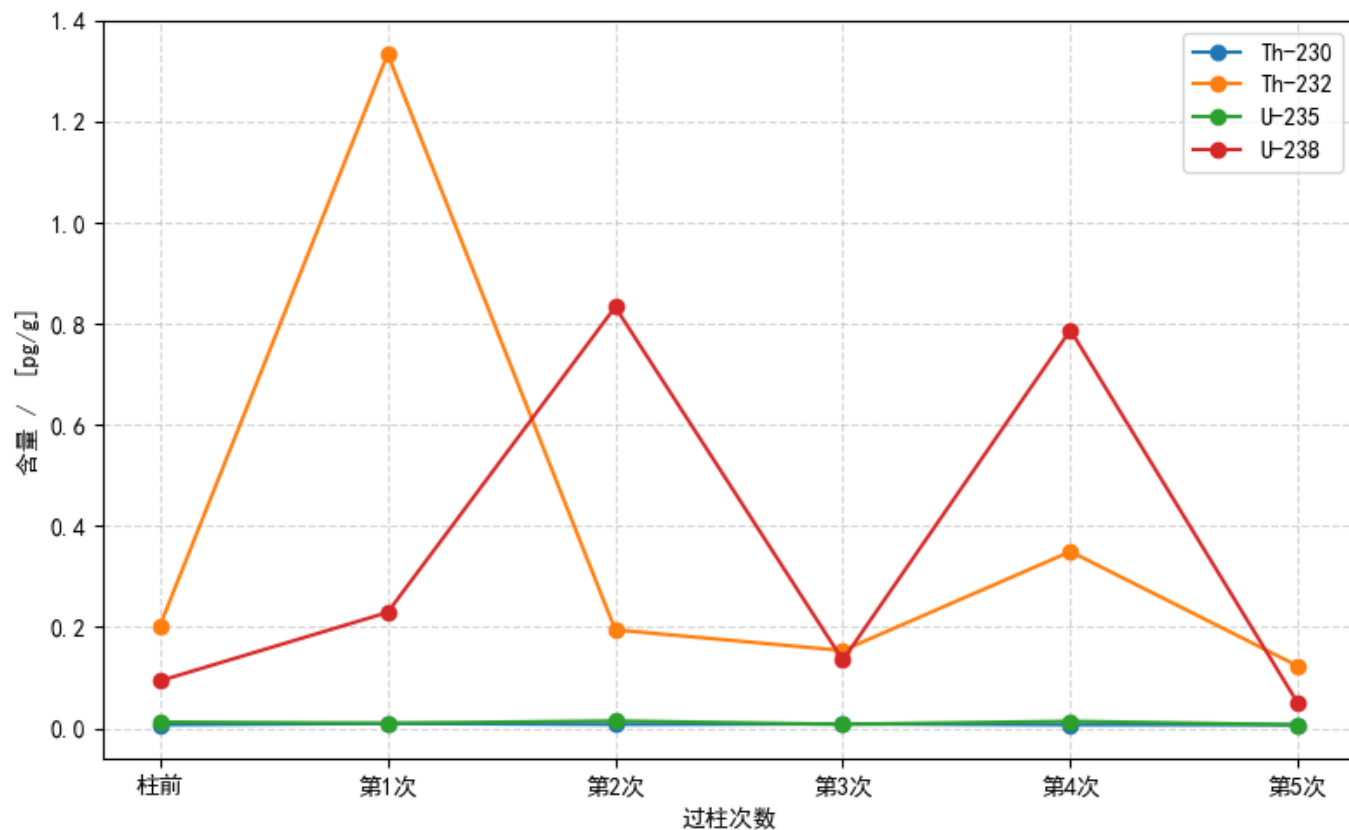
奥鲁比斯铜编号	测量方法	测量单位	Th232(pg/g)	U238(pg/g)	备注
#1-no.14	稀释法	SJTU	2.18±5.97	26.08±14.77	污染? 不均匀?
#1-no.15	稀释法	PKU	4.6±0.6	4.4±0.3	
#1-no.16	树脂法	SJTU(分测)	<1	1.14±0.01	Th低于检测限
#1-no.17	稀释法	SJTU	22.4±49.9	5.5±5.1	Th污染? 不均匀?
#1-no.18	树脂法	SJTU	<0.74	<2.28	低于检测限
#2-no.6	稀释法	PKU	6.0±0.5	5.1±0.5	
#2-no.7	树脂法	SJTU(分测)	<1	1.55±0.33	Th低于检测限

注: SJTU (分测) 代表该样品为上海交通大学分析测试中心制样测量

综合估计: <10pg/g  
任务目标: <5pg/g

# 树脂法测量结果偏低的原因探讨

将蒸过的浓硝酸和高纯水1:3（质量比）稀释后反复多次过ETADS处理后的UTEVA柱测量（共35ml，每次过树脂后取5ml留样直接用ICPMS测量，剩余的参与下次过柱）



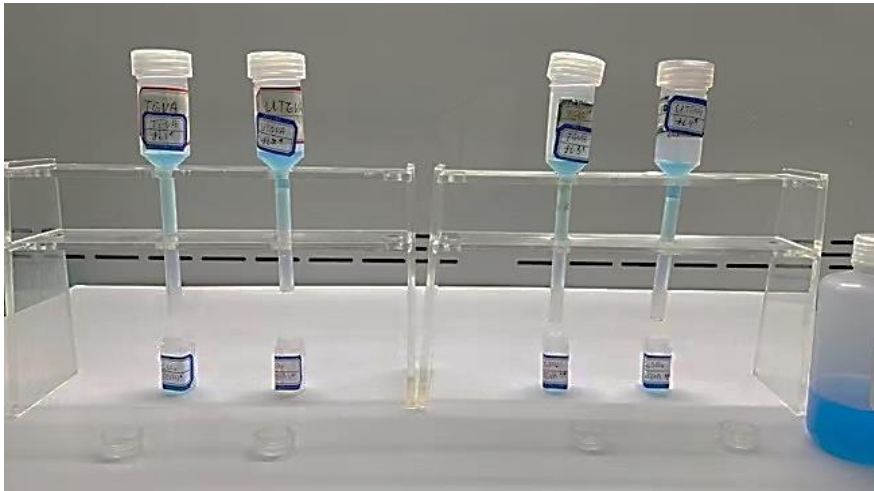
- 在低铀钍溶液反复过柱过程中,U-235、Th-230较为稳定,但U-238、Th-232的含量波动较大,甚至**反向析出**。
- 树脂自身较高的U-238/Th-232本底污染,导致其在处理低含量样品时,吸附与洗脱行为失衡,甚至**出现污染析出**。
- 当树脂对示踪剂 (U-235/Th-230) 吸附良好,却无法有效吸附样品中的U-238/Th-232时,将导致**后者测量结果显著偏低**。

# 奥鲁比斯铜购置



- 互动的铜厂：金川公司、洛阳铜厂、江西铜厂、东营铜厂、信承瑞、光微半导体、Aurubis
- 奥鲁比斯铜锭已于10.17日在德国汉堡出发，预计11.30到达上海，重量1230kg
- 后续对铜锻造及部件加工的放射性进行测量和控制

# TEVA树脂过滤硫酸铜可有效吸附其中铀、钍



装有TEVA及UTEVA树脂的过滤柱，编号从左到右为1-4

过树脂柱的顺序：  
1) 先用4ml的CuSO<sub>4</sub>溶液过柱，接过柱后的CuSO<sub>4</sub>待测；  
2) 然后用3ml的2%的HCl溶液进行冲洗过滤柱2次，留存待测。  
重复1-2步骤进行确认，一起测量

样品	<sup>232</sup> Th		<sup>238</sup> U	
	浓度 (pg/ml)	吸收率	浓度 (pg/ml)	吸收率
原始CuSO <sub>4</sub> 溶液	101.9±3.8	-	171.1±3.7	-
第1次过1#TEVA柱后CuSO <sub>4</sub>	4.7±0.2	(95.4±5.1)%	1.4±0.2	(99.2±3.1)%
第1次过3#TEVA柱后CuSO <sub>4</sub>	3.4±0.4	(96.7±3.6)%	1.8±0.2	(98.9±2.2)%
第2次过1#TEVA柱后CuSO <sub>4</sub>	6.5±0.1	(93.7±3.5)%	2.3±0.3	(98.6±2.2)%
第2次过3#TEVA柱后CuSO <sub>4</sub>	3.6±0.4	(96.5±3.6)%	2.4±0.2	(98.6±2.2)%
第1次过2#UTEVA柱后CuSO <sub>4</sub>	89.7±0.7	(11.9±0.9)%	140.0±2.8	(18.2±1.7)%
第1次过4#UTEVA柱后CuSO <sub>4</sub>	86.4±1.8	(15.2±2.0)%	137.5±1.9	(19.6±2.0)%
第2次过4#UTEVA柱后CuSO <sub>4</sub>	96.5±1.1	(5.3±2.1)%	154.7±2.2	(9.6±1.7)%

结论：TEVA树脂对CuSO<sub>4</sub>中的<sup>232</sup>Th和<sup>238</sup>U的吸收率>93%



# TEVA树脂过滤硫酸铜可有效吸附其中铀、钍

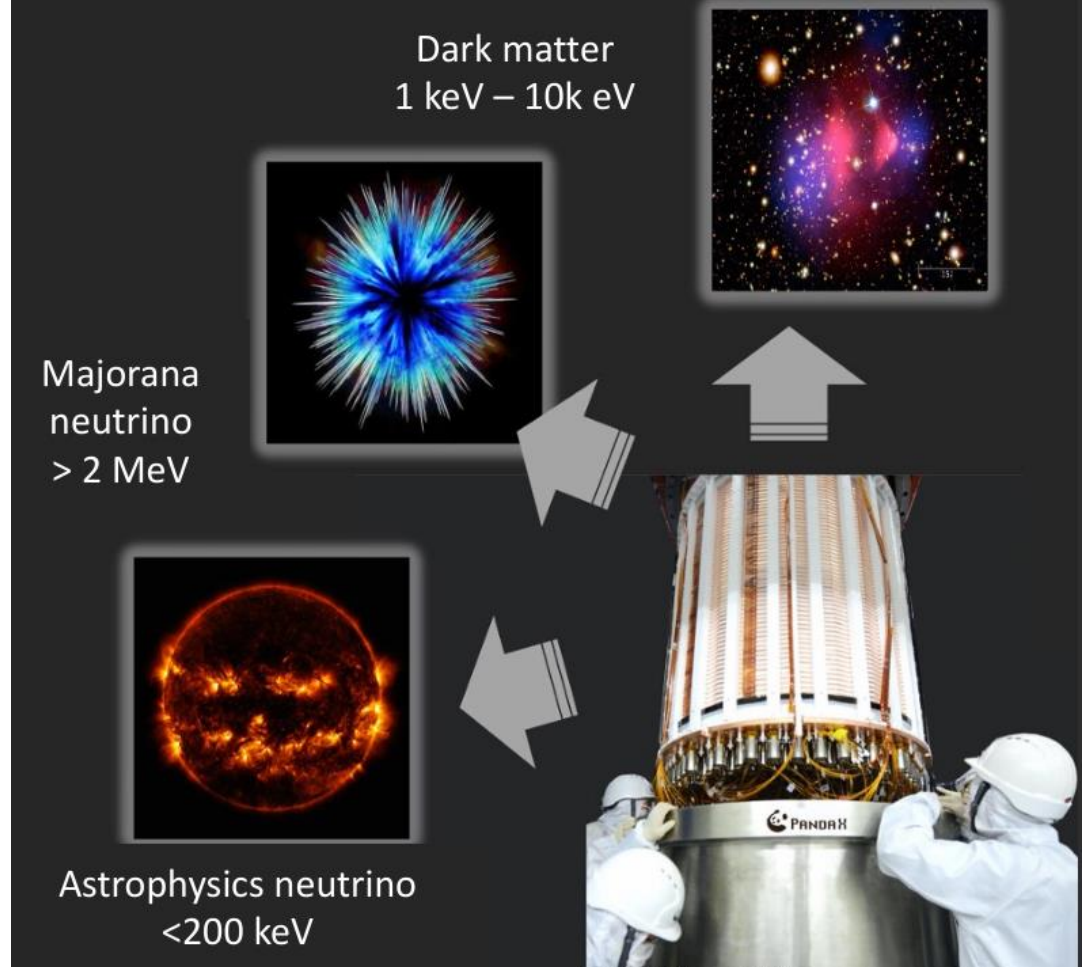
每次用3ml的2%的HCl冲洗过滤柱后用ICP-MS测量HCl溶液中<sup>232</sup>Th和<sup>238</sup>U浓度的结果

样品	<sup>232</sup> Th浓度(pg/ml)	<sup>238</sup> U浓度(pg/ml)
1#TEVA柱第1轮HCl第1次冲洗	99±3	133.9±0.6
1#TEVA柱第1轮HCl第2次冲洗	0.37±0.02	50±2
2#UTEVA柱第1轮HCl第1次冲洗	25.9±1.9	56±3
2#UTEVA柱第1轮HCl第2次冲洗	0.49±0.03	0.93±0.04
3#TEVA柱第1轮HCl第1次冲洗	106.2±1.9	120±2
3#TEVA柱第1轮HCl第2次冲洗	0.42±0.02	91±2
4#UTEVA柱第1轮HCl第1次冲洗	23.0±1.8	44±3
4#UTEVA柱第1轮HCl第2次冲洗	0.23±0.03	0.39±0.05
1#TEVA柱第2轮HCl第1次冲洗	94±3	134±5
1#TEVA柱第2轮HCl第2次冲洗	0.42±0.02	51.5±1.9
3#TEVA柱第2轮HCl第1次冲洗	93±2	107.9±0.6
3#TEVA柱第2轮HCl第2次冲洗	0.38±0.02	75.6±1.5
4#UTEVA柱第2轮HCl第1次冲洗	16.5±0.3	32.5±0.9
4#UTEVA柱第2轮HCl第2次冲洗	0.26±0.04	0.48±0.05

2%的HCl可以**有效洗脱**TEVA树脂吸附的U-238、Th-232 实现再生  
(专利号申请号：202410900620.4)

# 目录

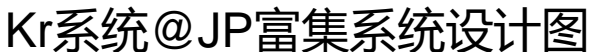
- 年度计划与考核目标
- 低本底铜中铀、钍元素分析研究
- **氦、氦放射性活度测量与分析**
- 氦中氖含量的降低
- 项目资源与成果概览
- 未来工作规划
- 总结



北京大学  
PEKING UNIVERSITY



\_\_\_\_\_



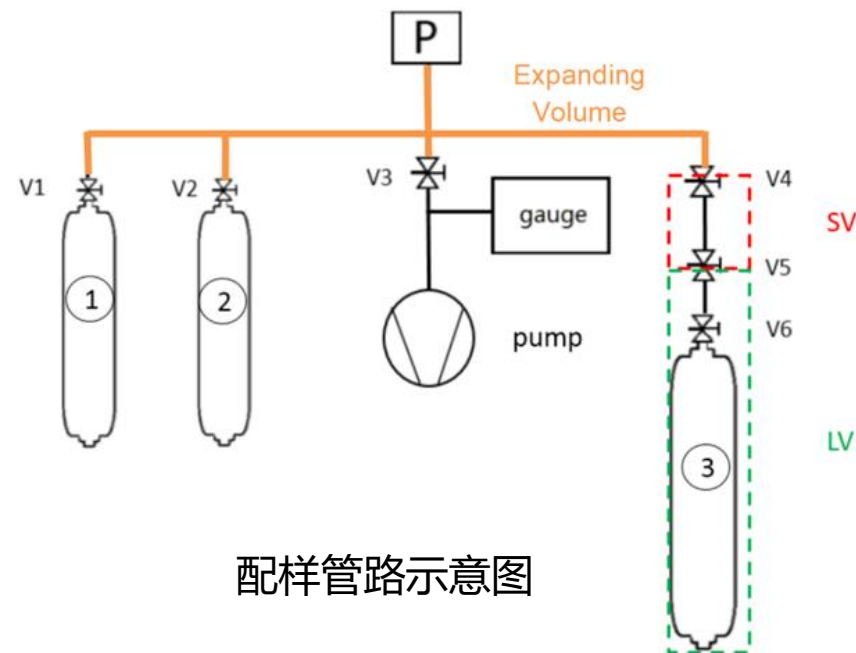
# 配样步骤更新

## 稀释方法

- 初始将氦气（或者已知浓度含氦氙气样品）注入SV。
  - 对EV抽真空，从初始体积膨胀至真空体积，以控制添加的氦总量。
- 可以一次性制备最低 1ppb 的样品。

## 混合方法

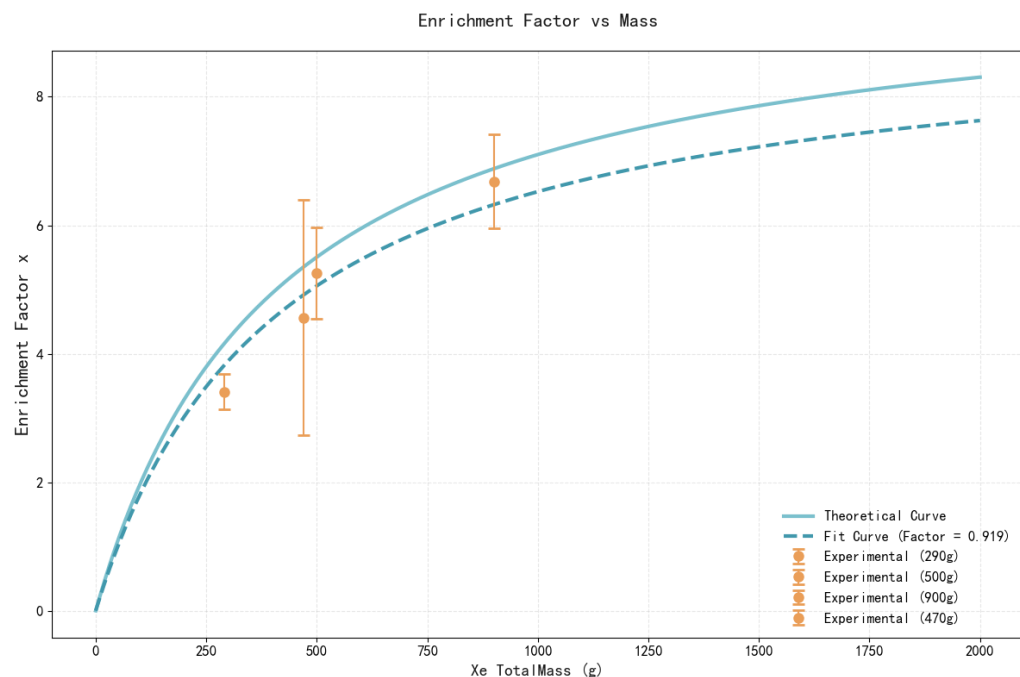
- 样品结氙冰回收并加热回温反复循环2-3轮，解决氦被局部管路捕获导致配样样品浓度偏低的系统误差。



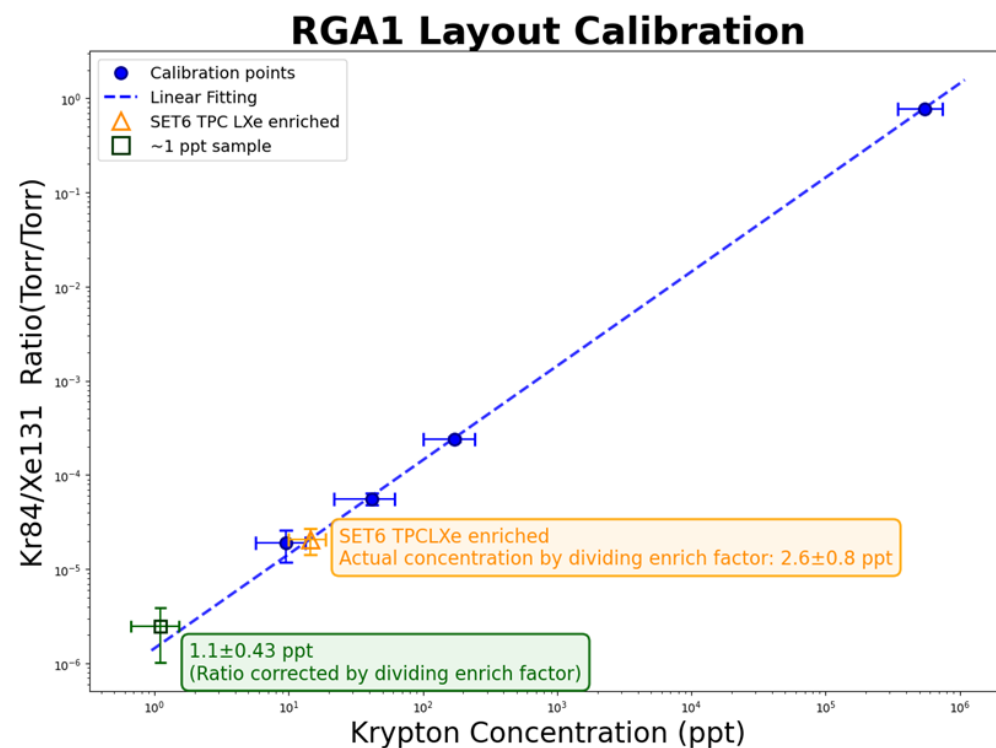
配样管路示意图

# Kr系统@JP状态

- 不同氙量的富集效果与理论预期较为一致
- 不同配样刻度，实测TPC氙以及Kr系统灵敏度



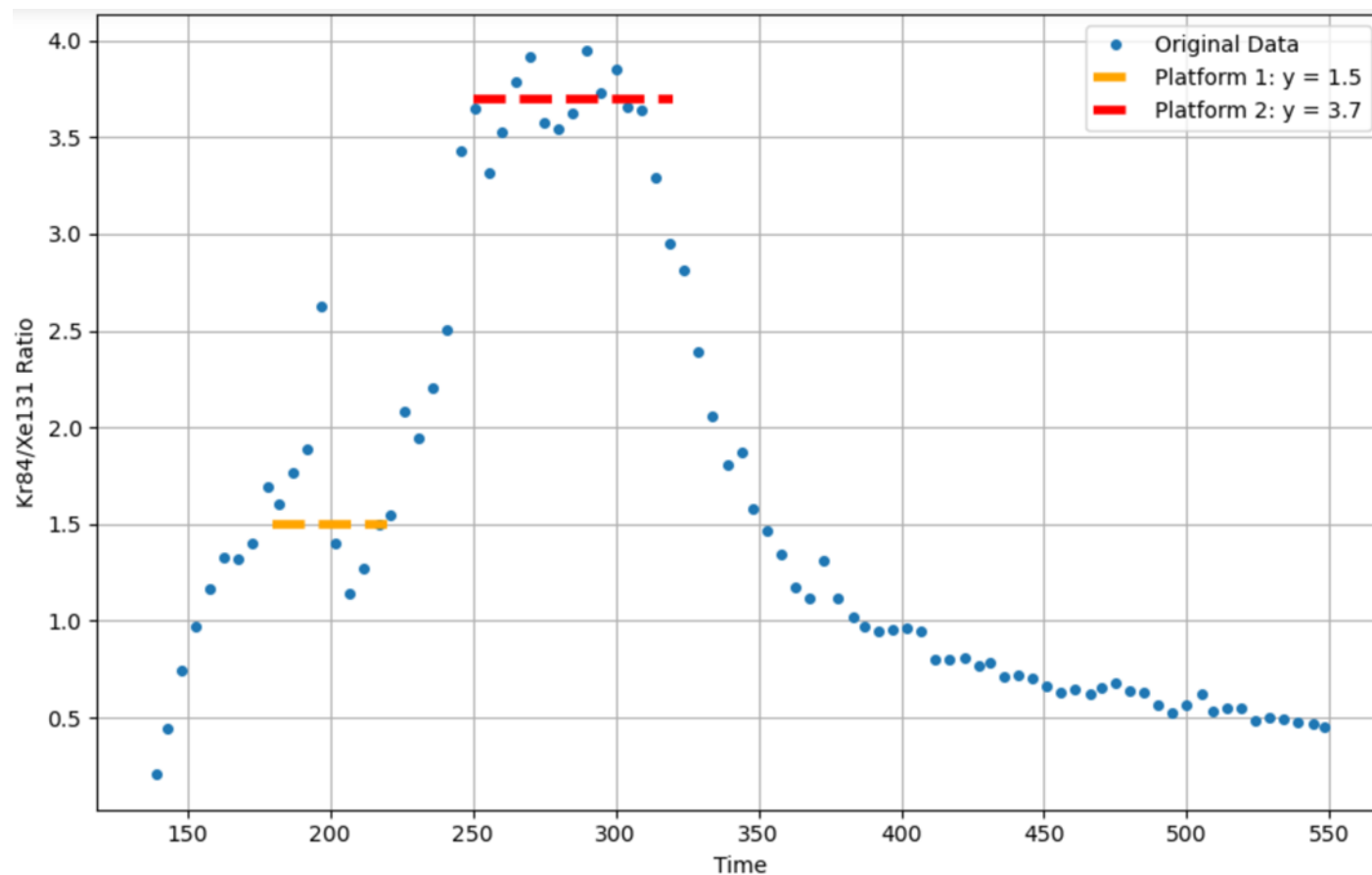
$$EF = 10 \times \frac{m_0}{m_0 + \frac{9PV}{22.4} \times 131.3}$$



Kr灵敏度: 7.99 ppt(2023)→1.1ppt (目标1ppt)

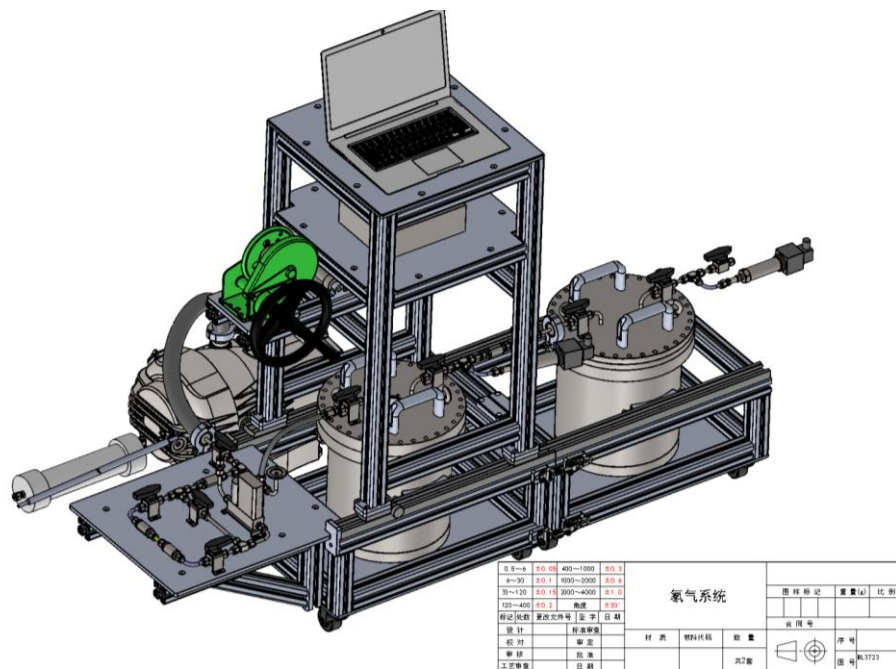
# 氦测量系统升级思路：流阻测试

- 初步验证  $5\times$  流阻 2 SLPM 测量条件下，可以实现 2.5 倍氦信号放大。
- 预期测试  $10\text{-}20\times$  流阻，期望实现 6 倍氦信号的放大【约0.2 ppt 灵敏度】。

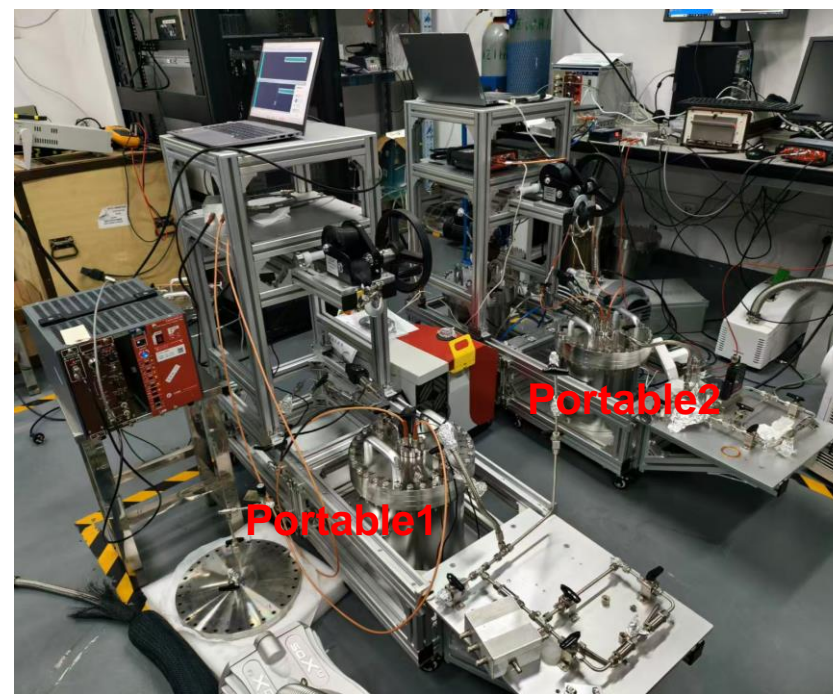


# 新设计氦探测器

- 两套新增的集成氦探测器，配套移动支架和管路@SJTU
- 两台分别配置了ORTEC电子学和CAEN电子学
- Portable1给到水氦做测量腔体



新型氦探测器设计图

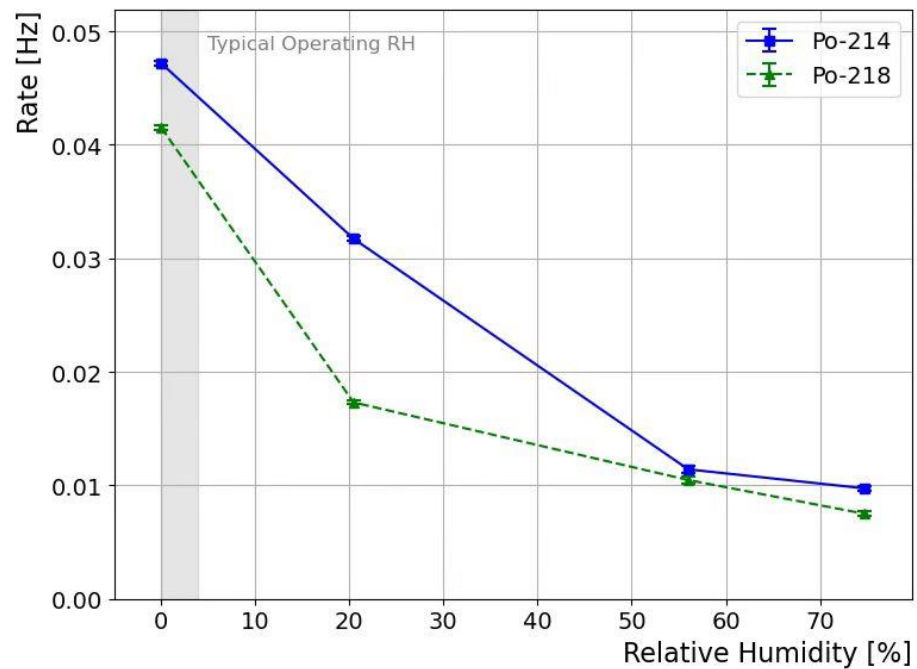


实物图

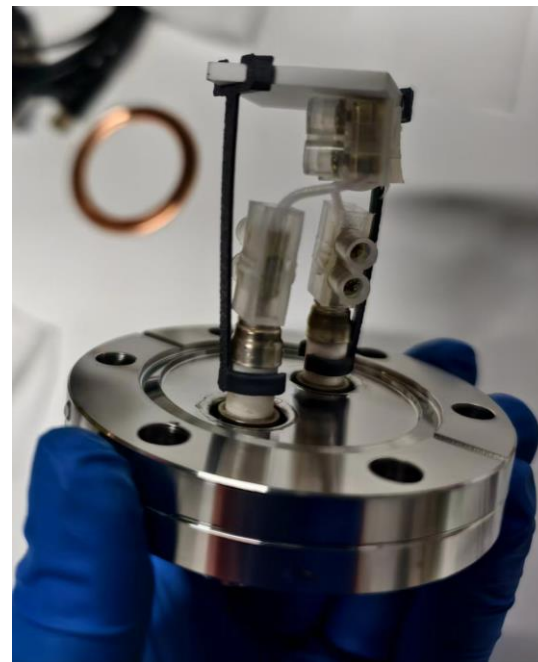


# 氦探测器效率

- 氦子体收集效率受湿度影响
- SiPIN位置变化可能改变效率，新增固定支架



探测氦事例率随湿度的变化关系



固定支架示意图（3D打印）



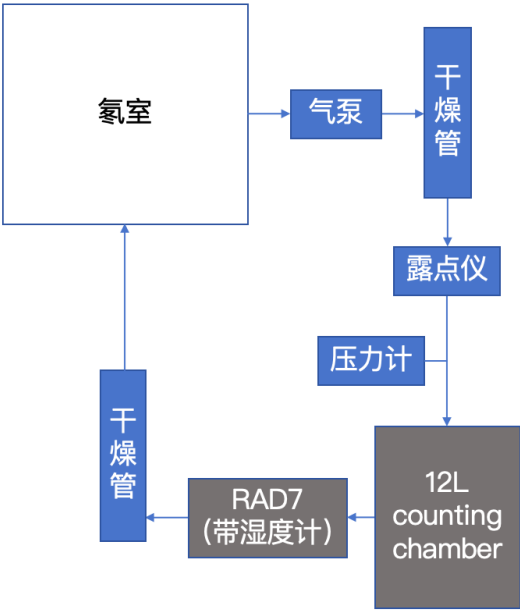
# 氡探测器刻度

- Portable2的counting chamber和RAD7去往南华大学利用**标准氡室**进行刻度

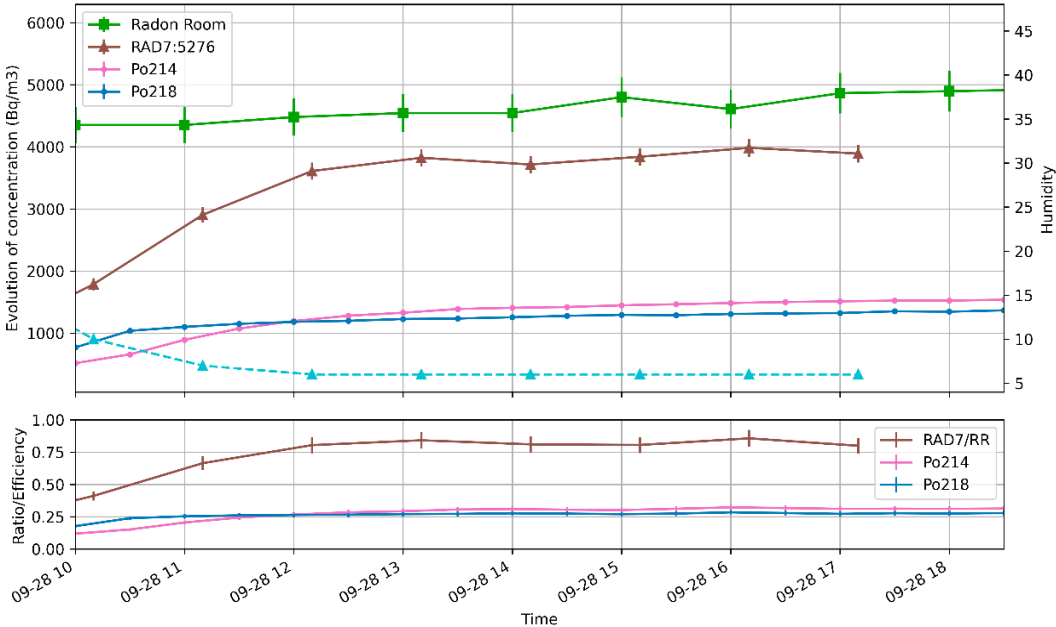


测试环境setup

测试环境	值
温度	~ 25°C
湿度（室内）	52%
湿度（管路内）	露点温度-58.3°C



管路连接示意图



氡室和刻度数据走势（流气式）

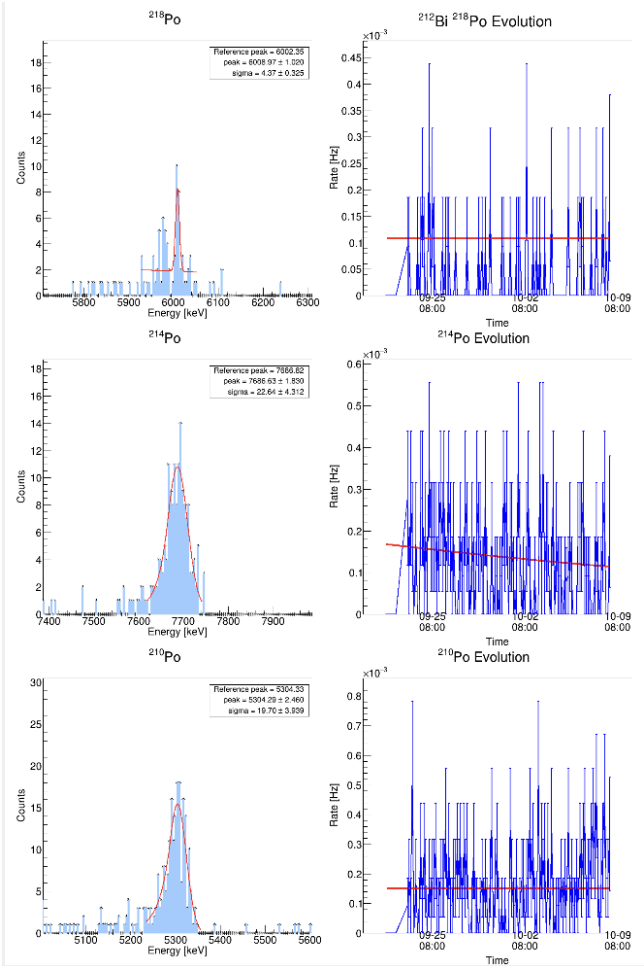
刻度模式	氡子体	探测效率
流气式	218Po	$26.97 \pm 1.82\%$
	214Po	$28.62 \pm 1.95\%$
静态	218Po	$28.55 \pm 1.61\%$
	214Po	$34.30 \pm 1.94\%$

# 氡探测器在线分析网页

- 目前Radon2可以通过网页查看各组取数氡子体能谱和走势



取数日程，能谱和二次微分（寻峰）



氡子体能峰和事例率走势

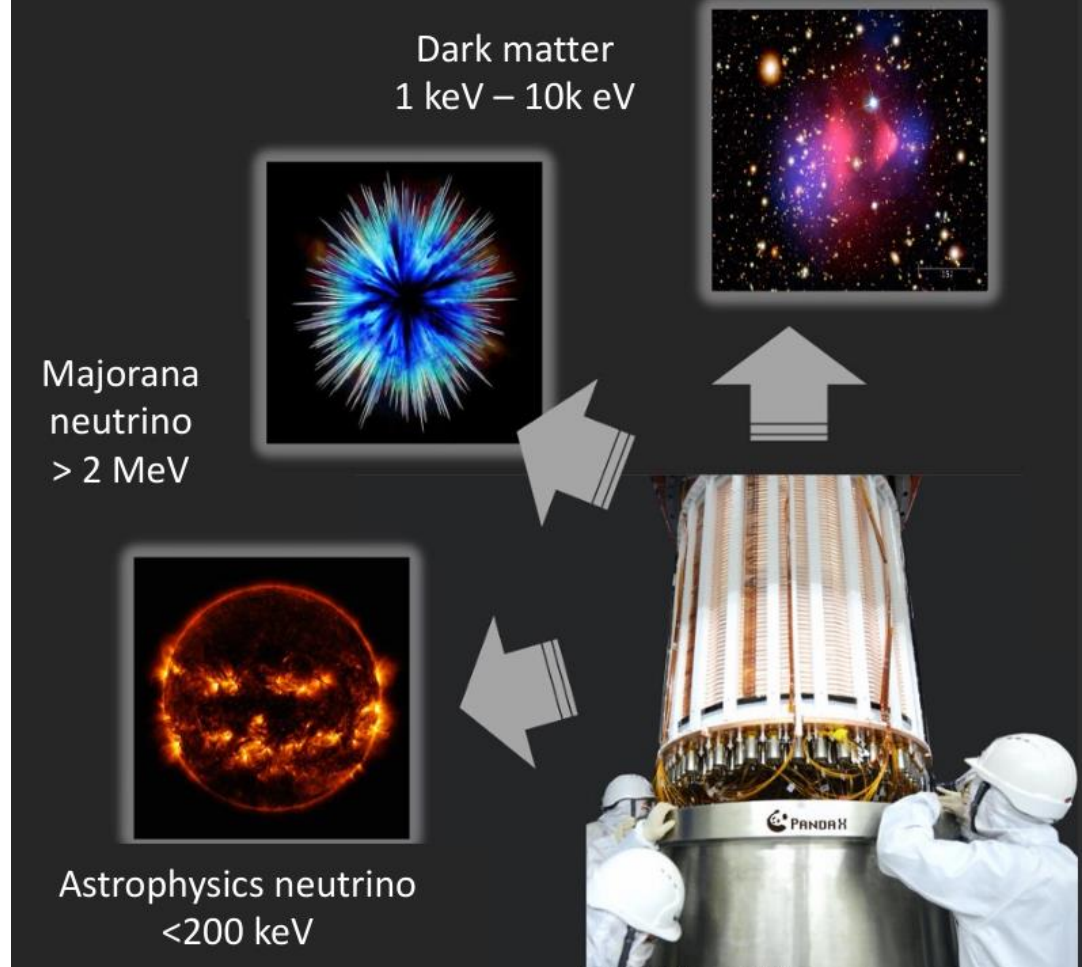
# 氡探测器状态

Name	location	Counting Chamber			Emanation chamber	
		Volume [L]	efficiency	Blank [mBq]	Volume [L]	Blank [mBq]
Radon2	127	7.4	25.5±2.2%	0.30±0.05	12.33	0.24±0.05
Radon3	Jinping	12.33	36.0±0.8%	0.03±0.01	12.33	0.16±0.08
Radon1	TDLI	12.33	32.9±0.8%	0.23±0.04	-	-
Copper	127	4.93	27.8±0.5%	0.48±0.10	cold trap and radon removal pipeline	
Portable1	127	12.33	38.0±4.7%	0.096±0.028	12.33	testing
Portable2	127	12.33	34.3±1.9%	0.047±0.018	12.33	0.55±0.31

灵敏度为**0.03±0.01mBq**，终期指标0.05mBq，虽然做到了但仍将继续研究表面处理来进一步降低氡！

# 目录

- 年度计划与考核目标
- 低本底铜中铀、钍元素分析研究
- 氡、氦放射性活度测量与分析
- **氙中氙含量的降低**
- 项目资源与成果概览
- 未来工作规划
- 总结



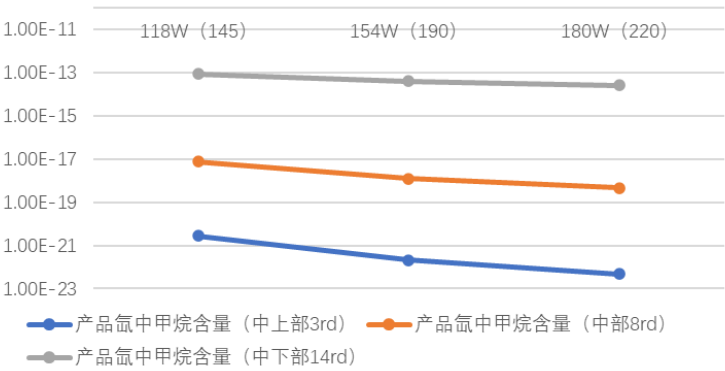
北京大学  
PEKING UNIVERSITY

# 氙本底控制研究

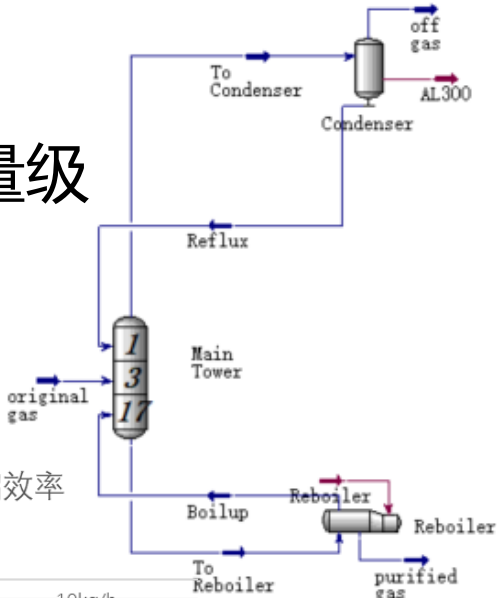
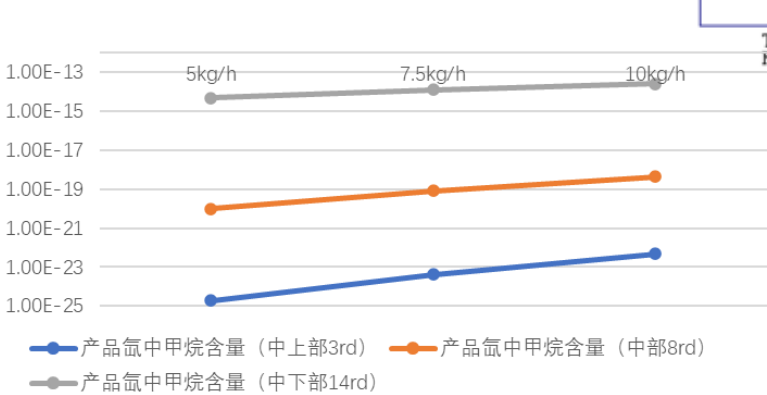
## 精馏除氙化甲烷方法

- 运用PandaX-4T超高纯氙除氙/氦低温精馏塔去除探测器中氙化甲烷
- 根据模拟计算，可将氙化甲烷提纯~10个数量级
- 操作条件为：中上部进料，加热量180W，回流比220，流量10kg/h

不同进料口及加热量（回流比）甲烷精馏效率



不同进料口及进料流量甲烷精馏效率

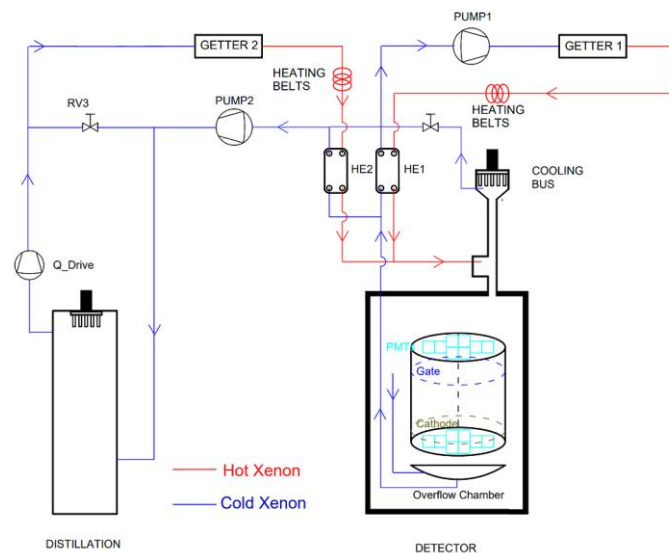


# 氙本底控制研究

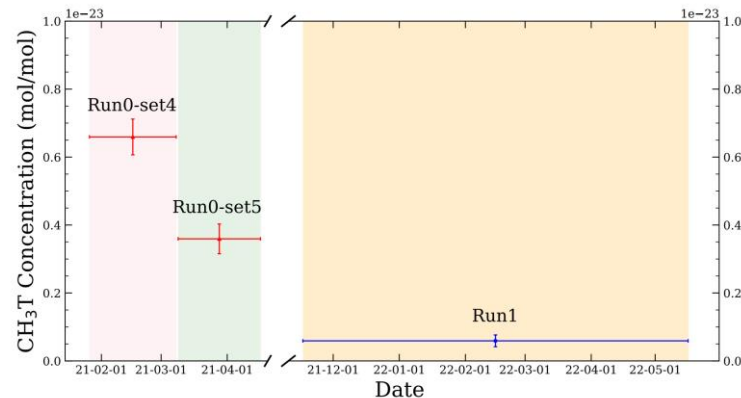
## 精馏除氙化甲烷方法

- 将PandaX-4T超高纯氙除氮/氬低温精馏塔耦合入探测器在线提纯，去除氙中的氙化甲烷。
- 根据实验结果进行分析，通过精馏探测器6吨液氙，将其中氙化甲烷浓度从 $3.6 \times 10^{-24}$  mol/mol降低 $5.9 \times 10^{-25}$  mol/mol。即由29.5 uBq/吨降低至**4.83 μBq/吨**（考核指标**5 μBq/吨**）

成果发表于Nuclear Inst. and Methods in Physics Research A



氙精馏流程图

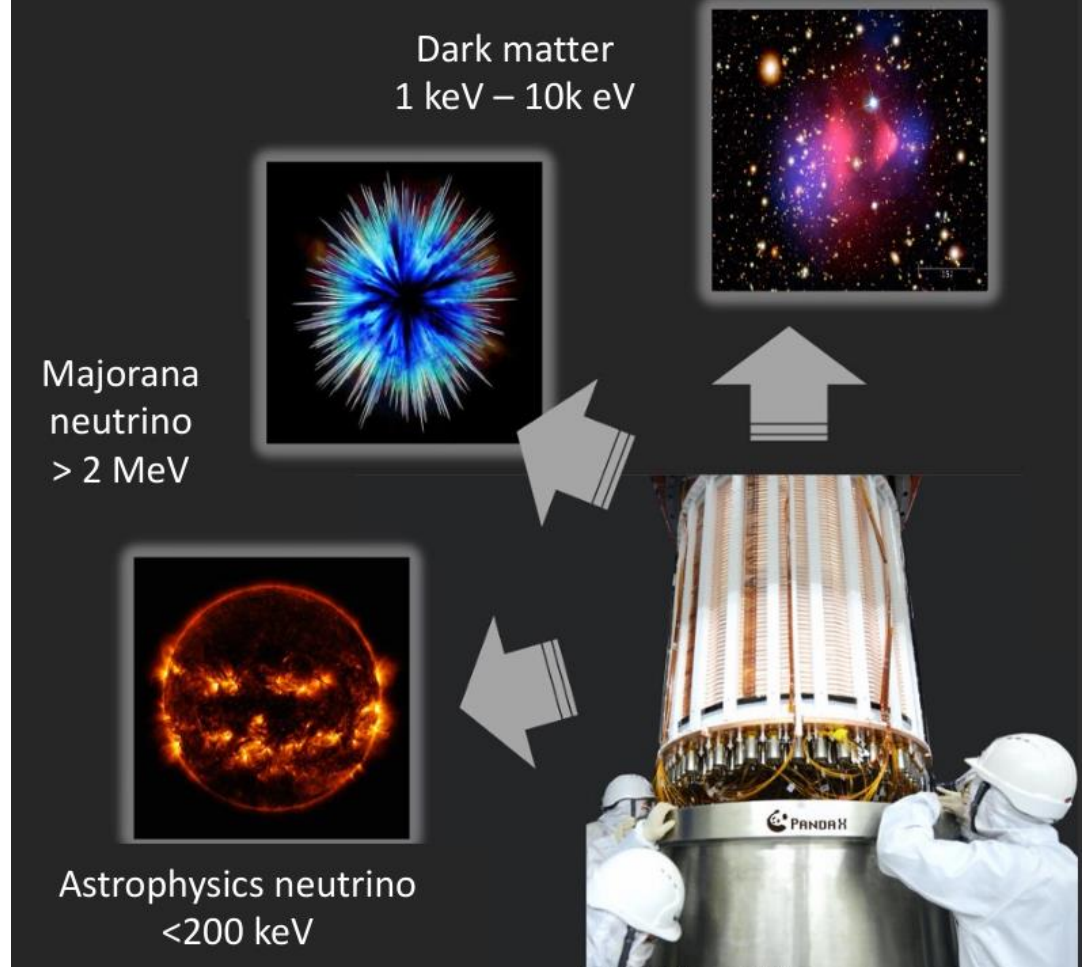


精馏过程中探测器中氙浓度变化



# 目录

- 年度计划与考核目标
- 低本底铜中铀、钍元素分析研究
- 氡、氩放射性活度测量与分析
- 氦中氖含量的降低
- **项目资源与成果概览**
- 未来工作规划
- 总结



北京大学  
PEKING UNIVERSITY

# 财务、人员、发表文章情况

总经费			专项经费					自筹经费		
预算数		到位数	预算数	到位数	是否按计划拨付课题承担单位		执行数	预算数	到位数	执行数
425		206.2	425	206.2	是		108.05	0	0	0
总人数	其中女性	高级职称	中级职称	初职称级	其他人员	博士	硕士	学士	其他学历	总人年
17	7	5	0	0	12	5	3	4	0	13
人才情况	院士	千人计划	万人计划	百人计划	长江学者	青年长江学者	杰青	优青	海外引进人才数	
			1				1	1	1	

总经费：425万  
到位：206.20万  
累积支出：108.05万  
执行率：52.40%

# 培养学生

研究生	毕业去向	奖项
钱志成【博】	TP_LINK测试设计工程师	
罗棱尹【博】	上海应用物理研究所博士后	
侯钰【硕】	中国北方工业有限公司	上海市优秀毕业生
吴渊【硕】	美国德州大学奥斯汀分校	上海市优秀毕业生

本科生	毕业去向	奖项
王好	上海交通大学攻读博士学位	上海交通大学优秀毕业生奖
吴粮宇	斯坦福大学攻读博士学位	上海市优秀毕业生奖
高智星	上海交通大学攻读博士学位	华中师范大学优秀毕业生
运有辉	上海交通大学攻读博士学位	
张智轩	上海交通大学攻读博士学位	上海交通大学优秀毕业生奖
刘吴俊哲	北京大学攻读博士学位	

总数：2博+2硕+6本

# 发表文章

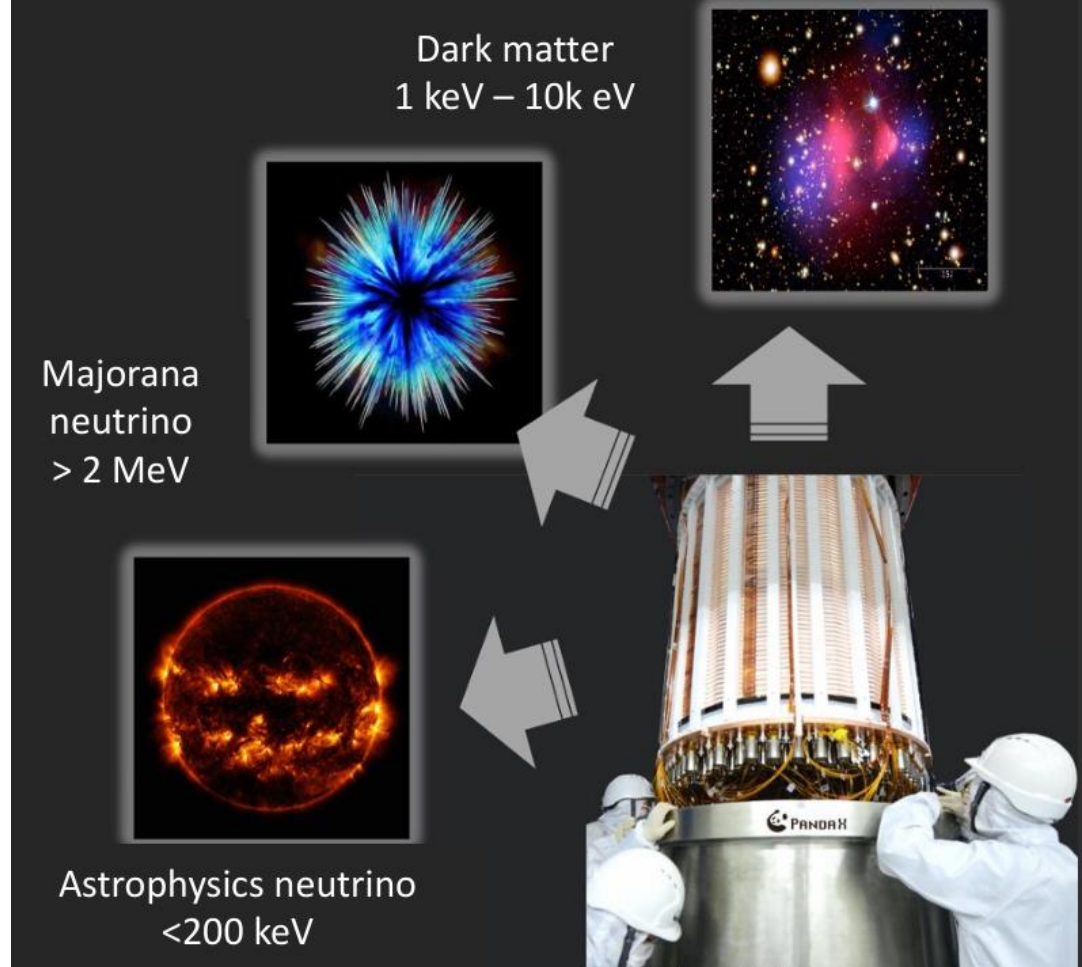
Title	Published in	Source	Supported by
Design and experimental application of a radon diffusion chamber for determining diffusion coefficients in membrane materials	Liangyu Wu et al 2025 JINST 20 P03031	<a href="https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1748-0221/20/03/P03031">https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1748-0221/20/03/P03031</a>	the Ministry of Science and Technology of China (No. <a href="#">2023YFA1606204</a> )
A novel low-background photomultiplier tube developed for xenon based detectors	Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A 1073 (2025) 170290	<a href="https://doi.org/10.1016/j.nima.2025.170290">https://doi.org/10.1016/j.nima.2025.170290</a>	the Ministry of Science and Technology of China (No. <a href="#">2023YFA1606203</a> and <a href="#">2023YFA1606204</a> )
Position reconstruction and surface background model for the PandaX-4T detector	Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A 1077 (2025) 170548	<a href="https://doi.org/10.1016/j.nima.2025.170548">https://doi.org/10.1016/j.nima.2025.170548</a>	the Ministry of Science and Technology of China (No. <a href="#">2023YFA1606204</a> )
Development of high-sensitivity radon emanation measurement systems with surface treatment optimization	Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A 1080 (2025) 170771	<a href="https://doi.org/10.1016/j.nima.2025.170771">https://doi.org/10.1016/j.nima.2025.170771</a>	the Ministry of Science and Technology of China (No. <a href="#">2023YFA1606204</a> )
Tritiated methane reduction in the PandaX-4T experiment via purge and cryogenic distillation processes	Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A 1083 (2025) 171128	<a href="https://doi.org/10.1016/j.nima.2025.171128">https://doi.org/10.1016/j.nima.2025.171128</a>	National Key R&D Program of China ( <a href="#">2023YFA1606204</a> , <a href="#">2023YFA1606200</a> )

# 参加的会议

- ① 孟月, 2025年紫金山暗物质研讨会, PandaX-4T进展及下一代探测器研发
- ② Yue Meng, 14th Sino-German Frontiers of Science Symposium, Dark Matter Direct Search in China Jinping Underground Laboratory
- ③ Yue Meng, the 4th Asian-European-Institutes Workshop for BSM, The PandaX-4T Experiment
- ④ Yue Meng, The 8th International Conference on Micro-Pattern Gaseous Detectors, Progress of Experiments in China's Underground Laboratories
- ⑤ Yue Meng, XeSAT2024 - International Workshop on Application of Noble Gas Xenon to Science and Technology, Radiopure 2 inch PMT for liquid xenon detectors,
- ⑥ Yue Meng, the 3rd Conference on frontiers of underground and space particle physics and cosmophysics, Ultra-low radioactive background techniques, COUSP2024
- ⑦ 王舟, 2024 Nagoya Workshop on Technology and Instrumentation in Future Liquid Noble Gas Detectors, PandaX Purification System and Cryogenic Distillation System;
- ⑧ 王舟, 2024年中国工程热物理学会工程热力学与能源利用学术会议, 极低浓度下双组份超高纯气体低温精馏的实验及机理研究

# 目录

- 年度计划与考核目标
- 低本底铜中铀、钍元素分析研究
- 氡、氩放射性活度测量与分析
- 氦中氖含量的降低
- 项目资源与成果概览
- 未来工作规划
- 总结



北京大学  
PEKING UNIVERSITY



# 未来工作规划

## 1. 铜的测量与研究

对于铜的测量工作，将进一步开展更加细致的研究。当前的样品中或存在一定的污染及采样不均匀性的问题，或存在低于检测限的情况，因此需要通过更为精准的样品测量与分析来深入理解其特性。

## 2. 氦气研究与流阻控制

对于氦气的研究，将聚焦于如何有效控制流阻，以提升探测器的灵敏度。同时，需要探索更为高效的技术手段，进一步降低探测器的极限，以确保在极低背景噪声的环境下，氦气的探测灵敏度达到最优。

## 3. 氦的多材料测量与放氦比较

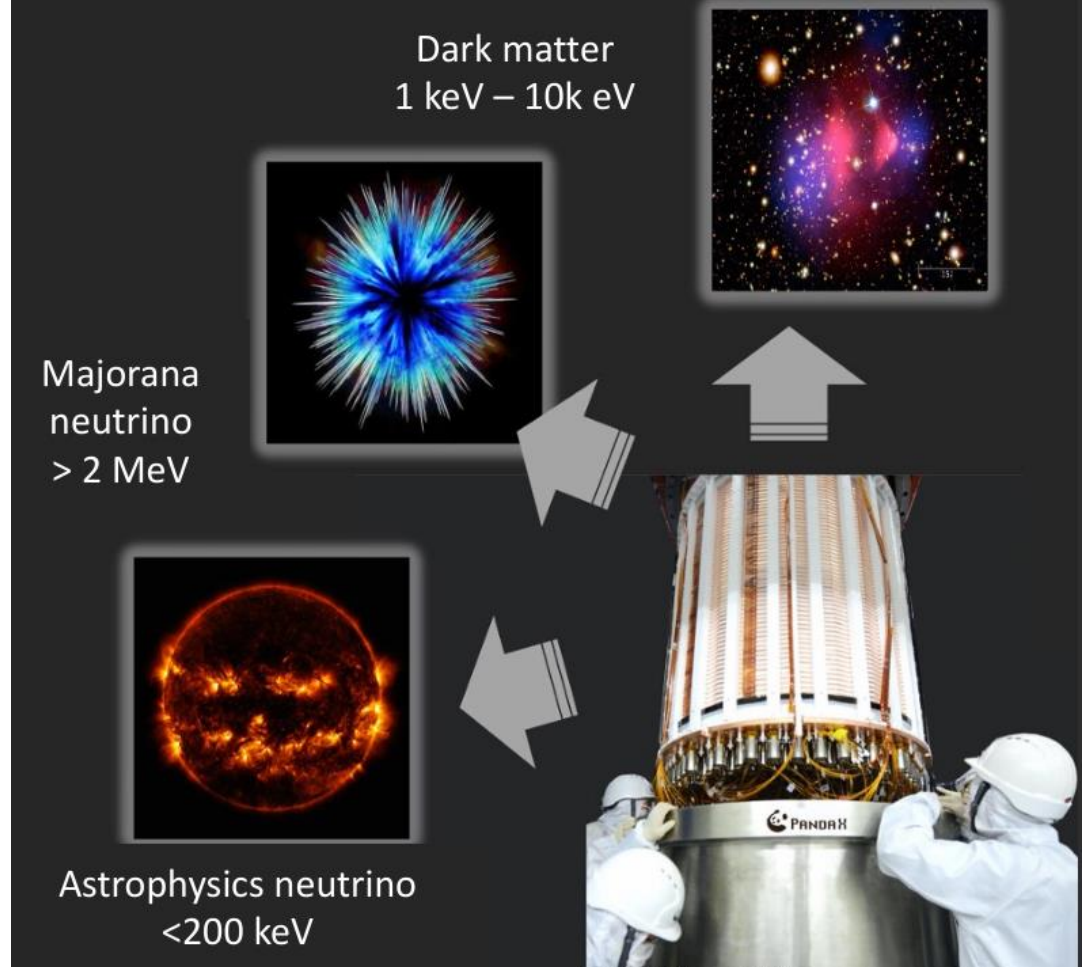
针对氦的测量，将采用多种材料进行测试与比较，重点关注不同材料在放氦过程中的表现。目前，氦的研究主要集中在探测器层面，下一步将挑选出具有较低放氦特性的材料，为后续探测器的建设提供更为精准的依据。

## 4. 氦本底降低与低温精馏塔优化

在氦本底降低方面，将通过提高低温精馏塔的处理流量并优化操作条件，进一步降低探测器中的氦本底。此举不仅有助于提升探测器的灵敏度，还将为探测器性能的优化提供更多的数据支持。

# 目录

- 年度计划与考核目标
  - 低本底铜中铀、钍元素分析研究
  - 氡、氩放射性活度测量与分析
  - 氦中氖含量的降低
  - 项目资源与成果概览
  - 未来工作规划
- 总结



北京大学  
PEKING UNIVERSITY

# 总结

- 铜：稀释法+树脂法综合寻找的奥鲁比斯铜中铀、钍 $<10\text{ pg/g}$ ，购置1230公斤样品将进行细致测量，目标 $<5\text{ pg/g}$ 。
- 氦：锦屏Kr系统增加富集系统，灵敏度提升至 $1.1\text{ ppt}$ ，接近任务目标 $1\text{ ppt}$ 。
- 氡：氡气测量仪器空白为 $0.03 \pm 0.01\text{ mBq}$ ，满足 $50\text{ }\mu\text{Bq}$ 任务目标，后续将进一步降低氡水平。
- 氙：低温精馏塔耦合入探测器，氙浓度从 $29.5\text{ }\mu\text{Bq/吨}$ 降低至 $4.83\text{ }\mu\text{Bq/吨}$ ，达到 $5\mu\text{Bq/吨}$ 任务目标。
- 学术与人才培养：发表4篇NIMA、1篇JINST，培养了2名博士生、2名硕士生和6名本科生。



北京大学  
PEKING UNIVERSITY



PANDA X  
PARTICLE AND ASTROPHYSICAL XENON TPC

感谢各位专家的指导！

2025年11月22日



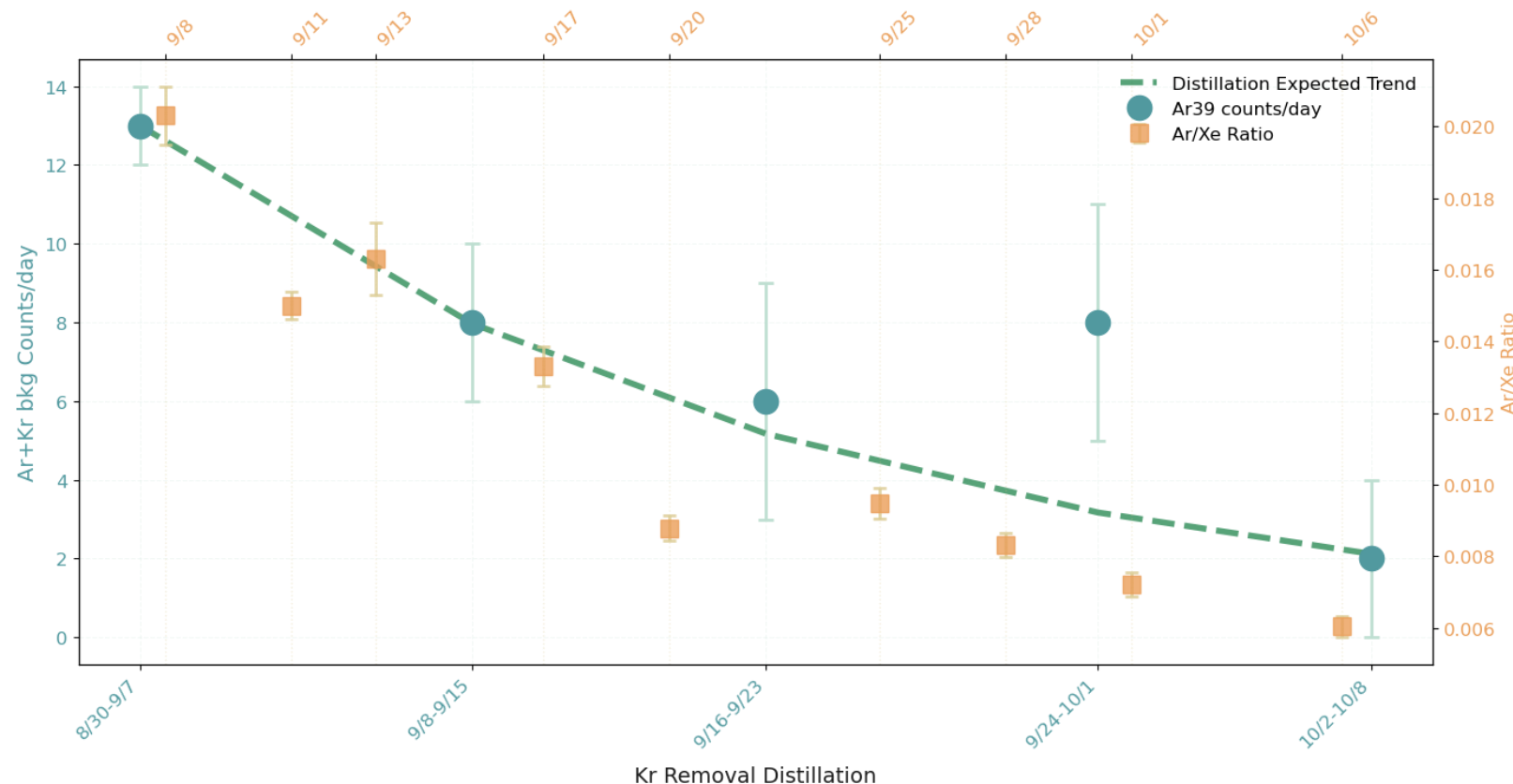
北京大学  
PEKING UNIVERSITY



# Backup

# PandaX-4T 除氦期间的氩本底监控

Run2 第二轮在线精馏除氦期间氩本底水平预期值（虚线），中高能能谱拟合（绿色点），氩系统实测值（橙色方块）变化趋势对比。



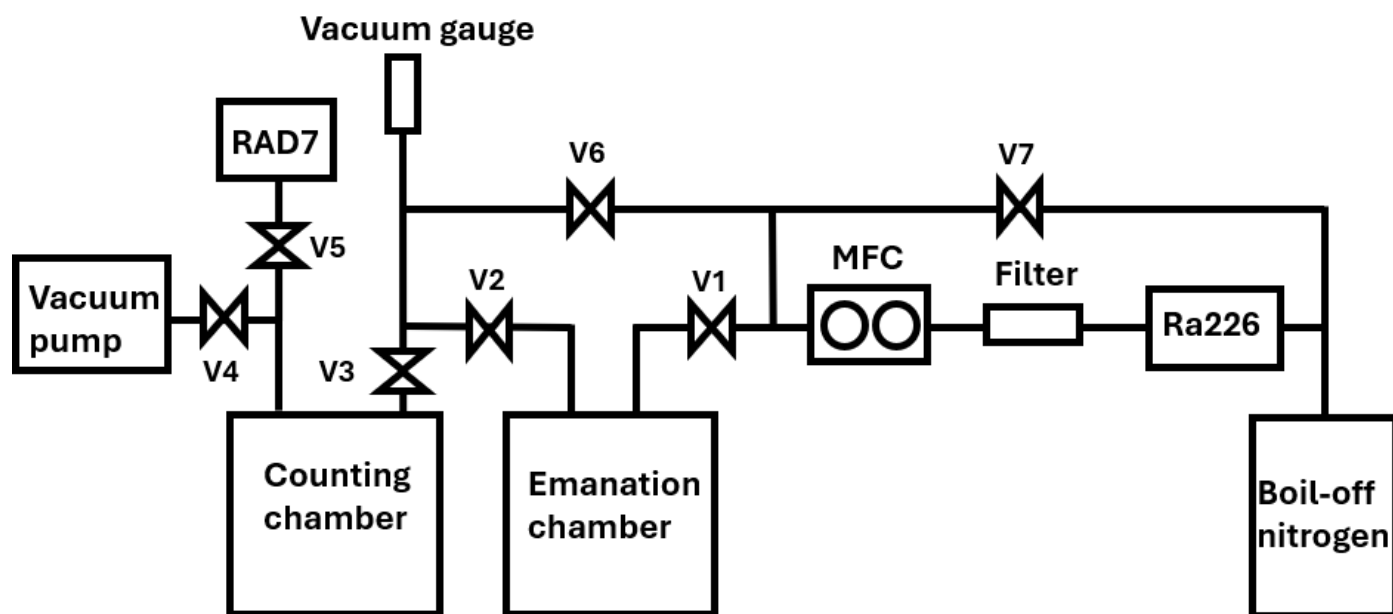
氩系统可以实现对在线除氦精馏氩本底的监控。氩系统氩测量、理论期望下降趋势和中高能数据拟合给出的氩氩本底水平在误差范围内符合良好。



## (2) 惰性放射性同位素高效富集测量

### 1. 氦气测量样机研发

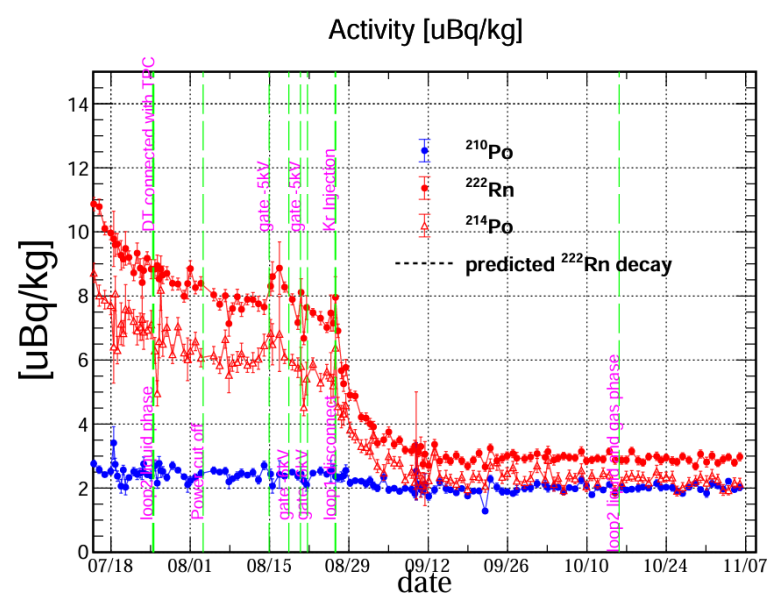
- 适合测量小型样品放氦率
- 探测器材料: 304 不锈钢
- 尺寸: 12.3L. 半径:  $123.6 \pm 0.5 \text{mm}$  圆柱形
- 探测效率:  $32.89 \pm 0.84\%$  in  $\text{N}_2$
- **空白:  $0.03 \pm 0.01 \text{mBq}$**



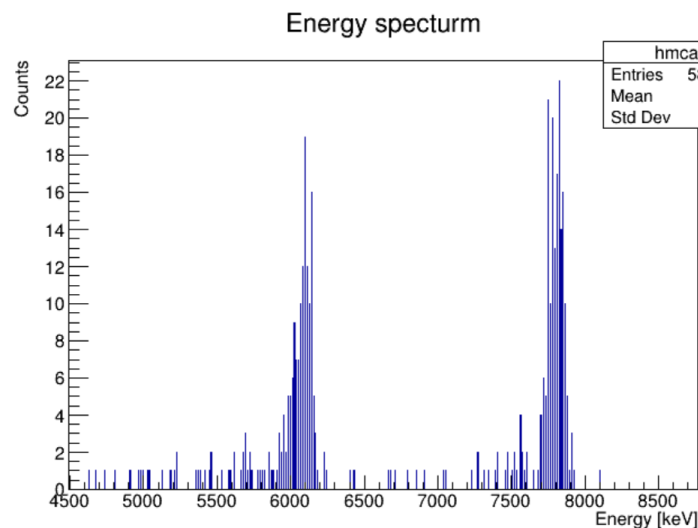
## (2) 惰性放射性同位素高效富集测量

### 2.利用氦气测量样机诊断PandaX-4T制冷系统的放氦

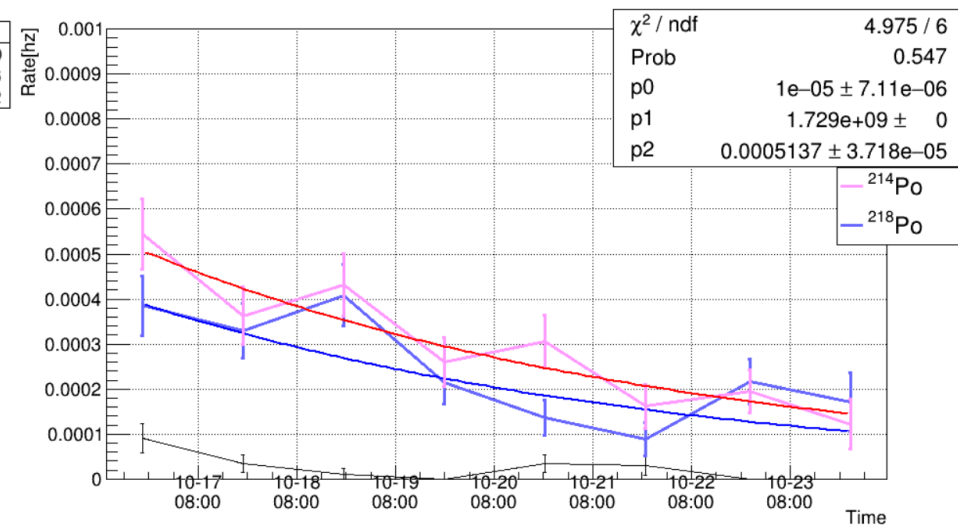
- PandaX-4T一半的氦气来自制冷循环 (Loop1)
- 利用氦测量系统独立测量, 确认放氦来源贡献为 $4.61 \pm 0.35 \text{ mBq}$



暗物质探测器氦气  
的时间演化图



氦系统独立测量能谱和衰变



## (2) 惰性放射性同位素高效富集测量

### 3. 氦气的富集及去除:

Calgon活性炭纤维

- 孔径尺寸: 1.7-2 nm
- 表面积: 1800-2000 m<sup>2</sup>/g
- 材料: 粘胶纤维, 聚丙烯腈基, 沥青基
- 7510cm<sup>2</sup> 活性炭纤维在1bar, 25°C吸收4.86L Xe
- 7510cm<sup>2</sup>活性炭纤维在1bar, -78°C吸收31.56L Xe



初步测试结果

流速(slpm)	温度 (° C)	高氦环境	低氦环境
1	25	↓ 94.5 ± 0.7%	Not obvious
	-78	↓ 95.0 ± 0.5%	↓ 62.5 ± 13.4%
4	25	To be measured	↓ 21.1 ± 9.2%
	-78	To be measured	↓ 71.5 ± 5.6%
8	25	↓ 26.3 ± 1.3%	↓ 30.5 ± 13.7%
	-78	↓ 75.5 ± 1.8%	↓ 56.1 ± 4.3%

## (2) 惰性放射性同位素高效富集测量

### 3. 氦气的富集及去除:

分子筛

- 孔径尺寸: 3 Å
- 形状: 微粒结构
- 1bar, 25°C吸收每公斤kg吸收23.5L, 持续两个月仍然没有稳定

初步测试结果

Flow 1slpm, 200Hz Rn	Carrier gas N <sub>2</sub>	Carrier gas Xe
25°C	↓ 50.7 ± 0.2%	Not obvious
-78°C	↓ 99.2 ± 0.1%	Not obvious

- 需要寻找更合适孔径材料

