



四川大學
SICHUAN UNIVERSITY

液闪测氦装置研发

报告人：李倩沅

单位：四川大学

时间：2023.5



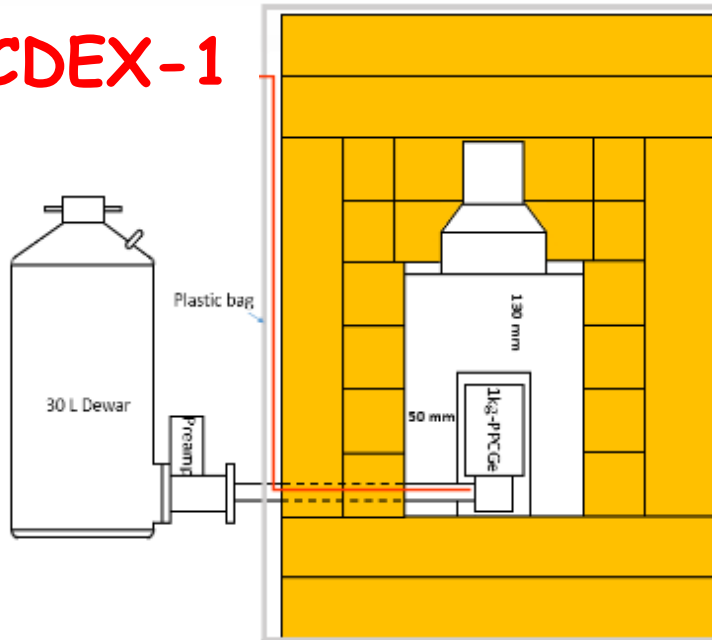
目录

CONTENT

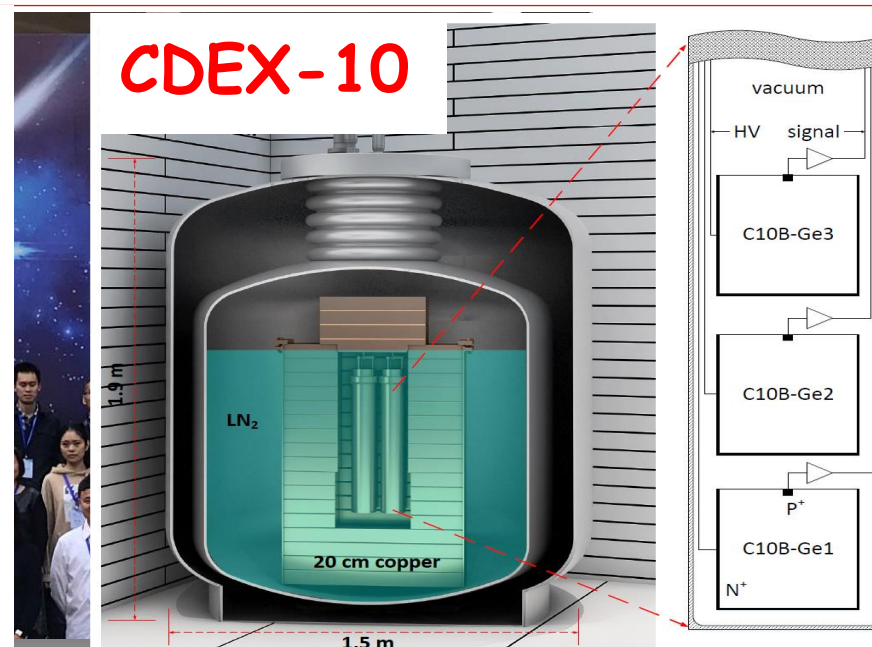
- 01 研究背景
- 02 极低氡浓度测量与抑制目标
- 03 研究现状与计划
- 04 总结与展望



CDEX-1



CDEX-10

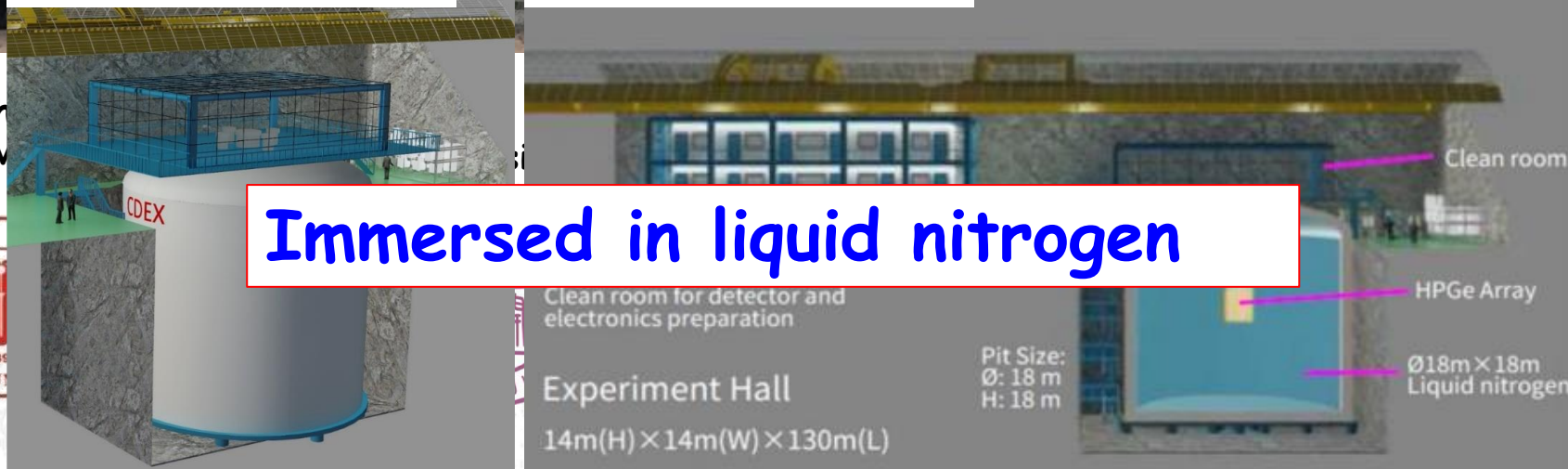


CDEX-50dm

CDEX-1000

Conceptual Layout

Immersed in liquid nitrogen



Tsinghua University

Sichuan University



欧洲XENON NT实验
Radon本底

E. Aprile et al JCAP11 (2020)

ER background

Detector radioactivity	25 ± 3
^{222}Rn	55 ± 6
^{85}Kr	13 ± 1
^{136}Xe	16 ± 2
^{124}Xe	4 ± 1
Solar neutrinos	34 ± 1
Total	148 ± 7

NR background

Neutrons	$4.25 \pm 0.1 \mu\text{Bq/kg}$ ----
CE ν NS (Solar ν)	$< 1 \mu\text{Bq/kg}$
CE ν NS (Atm+DSN)	
Total	$(1.0 \pm 0.2) \times 10^{-1}$

Table 4 Final background budget within the WIMP search window

Sources	ER in mDRU	NR in mDRU
Materials	0.0210 ± 0.0042	$(2.0 \pm 0.3) \times 10^{-4}$
^{222}Rn	0.0114 ± 0.0012	
^{85}Kr	0.0053 ± 0.0011	
^{136}Xe	0.0023 ± 0.0003	
Neutrino	0.0090 ± 0.0002	
Sum	0.049 ± 0.005	
2-year yield (evts)	1001.6 ± 102.2	
after selection (evts)	2.5 ± 0.3	2.3 ± 0.4

PandaX-4T实验
本底来源Sci. China Phys. Mech. Astron. 62,
31011 (2019).

氡是低温液体主要本底之一

本底来源

ation)
November 2018

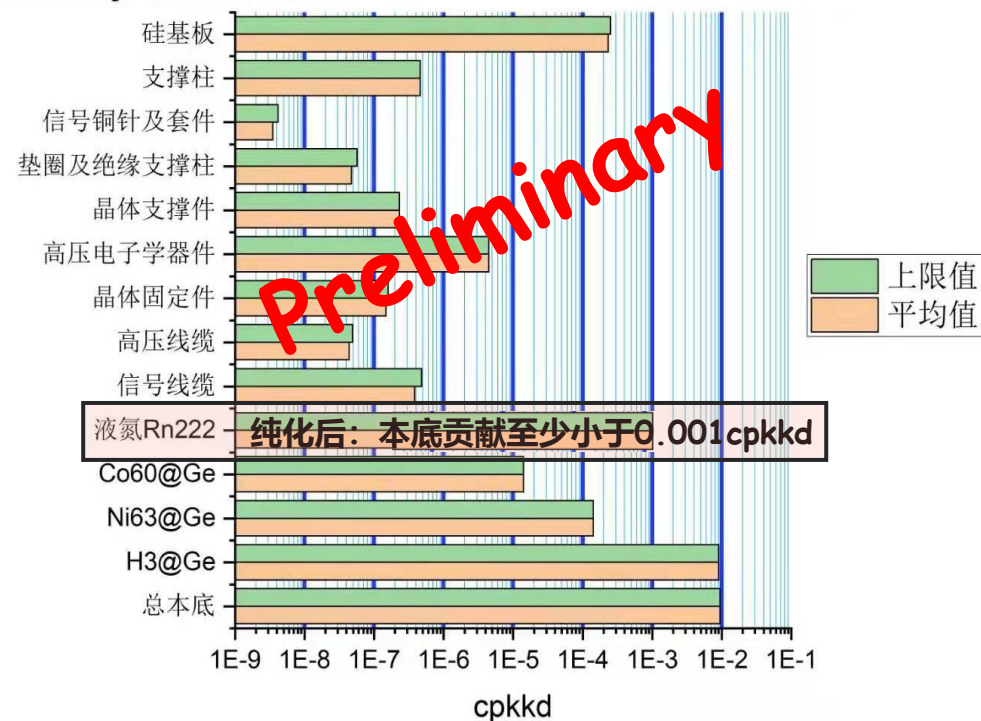
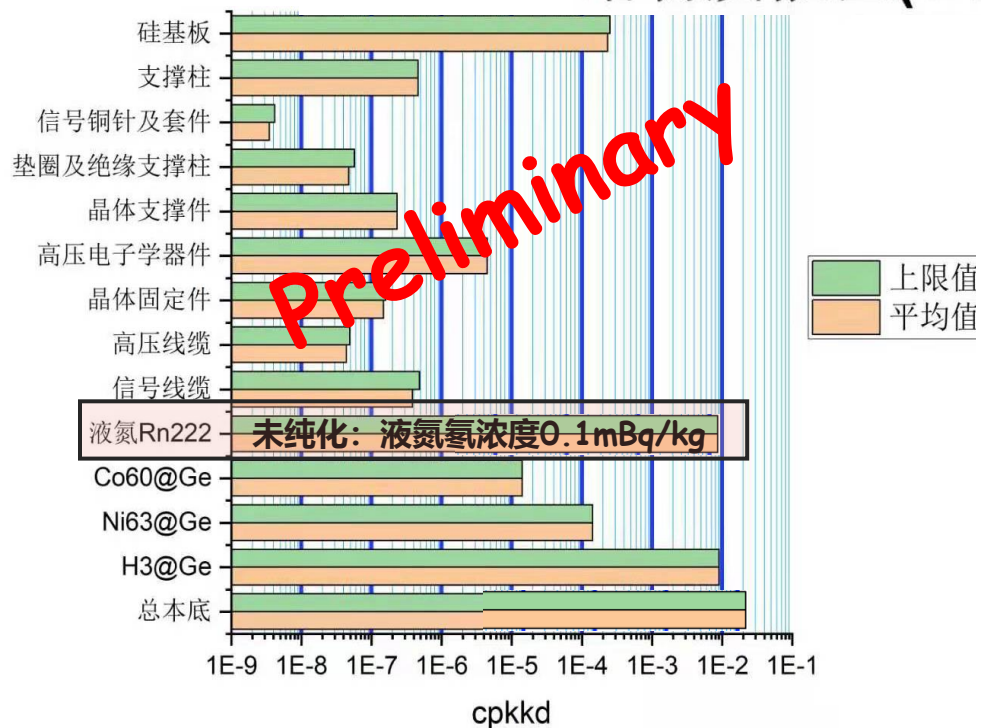
^{218}Po	$1.55 \pm 0.03 \mu\text{Bq/kg}$
^{39}Ar	$0.73 \pm 0.11 \text{mBq/kg}$
^{85}Kr	$1.9 \pm 0.1 \text{mBq/kg}$

Background source	Mass (kg)	mBq/kg	n/yr	ER (cts)	NR (cts)
Detector con					0.027
PMT system					0.022
TPC system					0.018
Cryostat					0.001
Outer detect					0.003
All else					0.07

美国LUX-ZEPLIN实验
本底来源

Surface contamination					
Dust (intrinsic activity, 50					0.2
Plate-out (PTFE panels, 5					...
^{210}Bi mobility (0.1 $\mu\text{Bq/k}$					40.0
Ion misreconstruction (50					...
^{210}Pb (in bulk PTFE, 10 r					...
					0.16
					0.12
					40
					0.39
Xenon contaminants					
^{222}Rn (1.8 $\mu\text{Bq/kg}$)					681
^{220}Rn (0.09 $\mu\text{Bq/kg}$)					111
^{84}Kr (0.015 ppt g/g)					24.5
^{86}Ar (0.45 ppt g/g)					2.5
					...
Subtotal					819
					0

Simulation results of CDEX-50dm for the various materials 暗物质能区(0-2keV)本底水平



CDEX-50dm物理目标: $<0.01 \text{ cpk/d}$

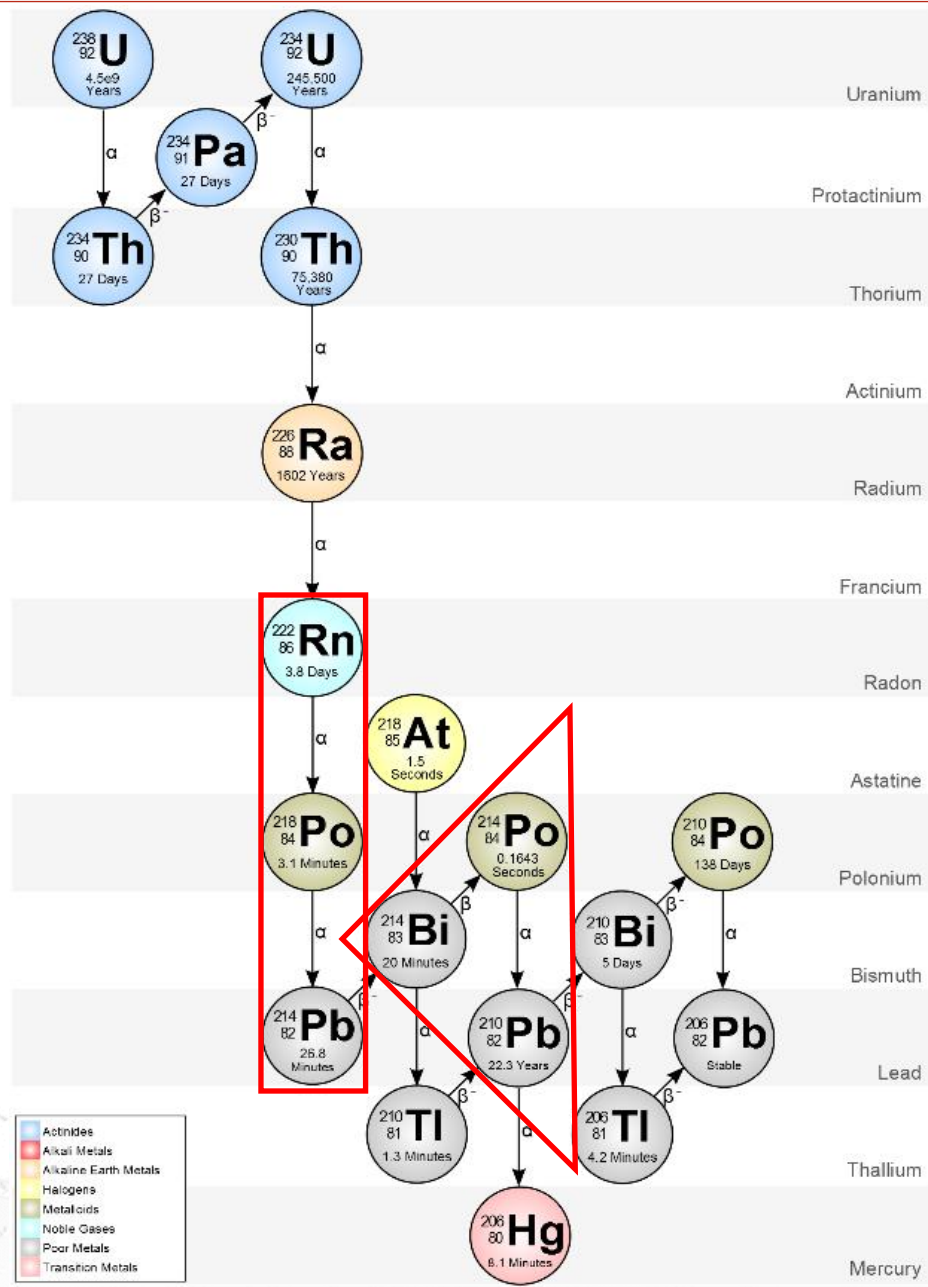
液氮中 ^{222}Rn 的本底 $<0.001 \text{ cpk/d}$, 液氮需要纯化到 $<10 \mu\text{Bq/kg}$ 量级

- 氡的来源及性质:
- ▶ 主要来自于铀钍
 - ▶ 惰性气体，具有很强的扩散性质
 - ▶ 空气中浓度高

(中国锦屏地下实验室环境中氡浓度 $\sim 58\text{Bq}/\text{m}^3$ [2015~2016])

除氡、测氡?

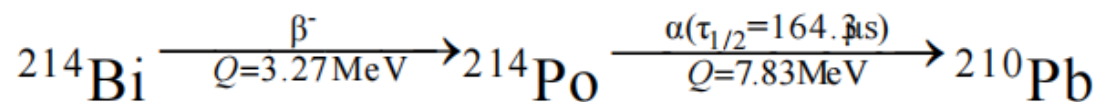
- ◀ 屏蔽体自身就会有氡溢出
- ◀ 氡及其子体产生多种次级粒子
(α 、 β 、gamma)



氦及其子体常用的测量方法：

- ① 电离室法
- ② 静电吸附法
- ③ 液体闪烁体测量法

β - α 级联衰变：



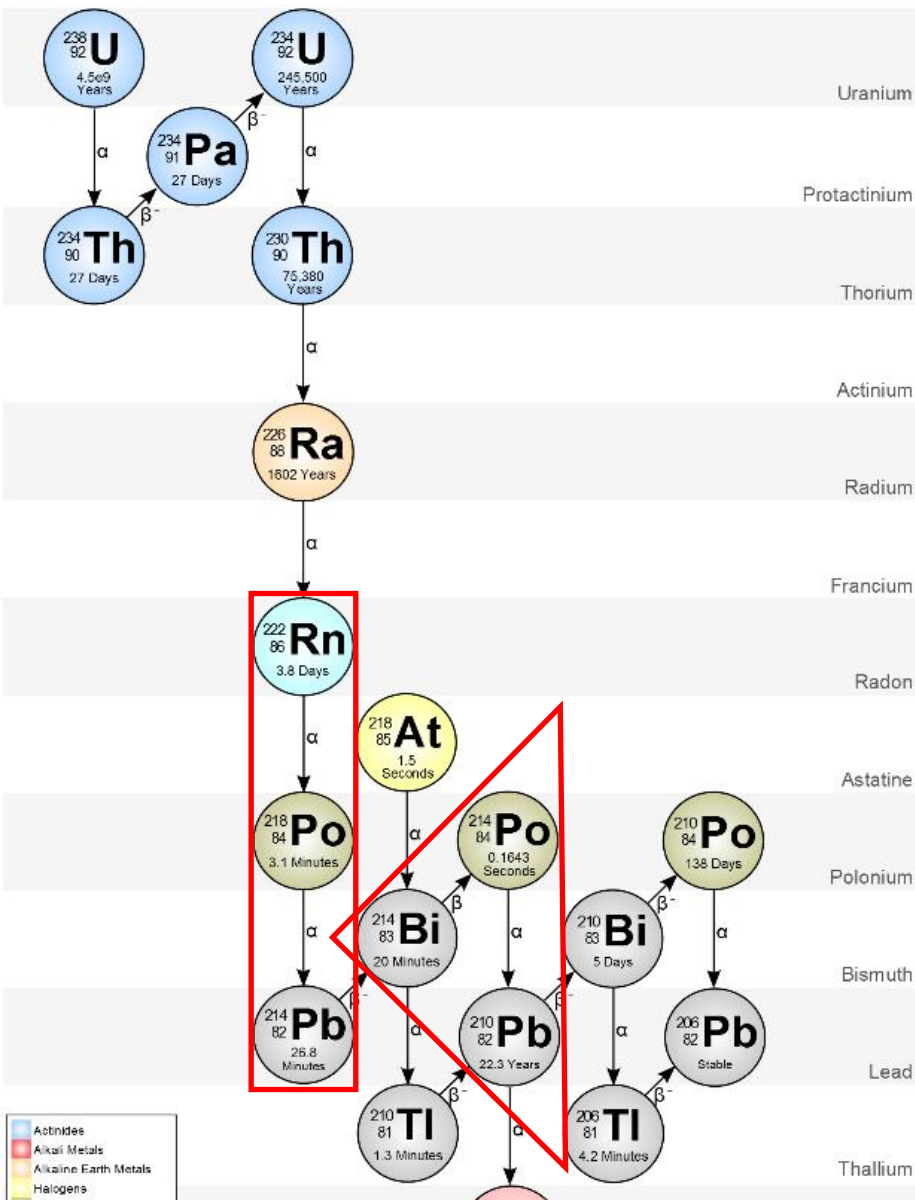
放射性平衡规律

获得氦放射性活度

冷凝法

	应用于	探测器	腔室体积	本底计
闪烁室法	GALLEX	ZnS(Ag)	6.7L	0.42
	Super-Kamiokande	Si-PIN	68.7L	2.4

	SuperNEMO	Si-PIN	50L	110
	DARKSIDE	PIPS	450L	9.4
	EXINO	计数管	0.001L	0.1~
冷凝法	DARKSIDE-50	PIPS	65L	25.4



优点

☑液闪对氦较高的氦溶解系数

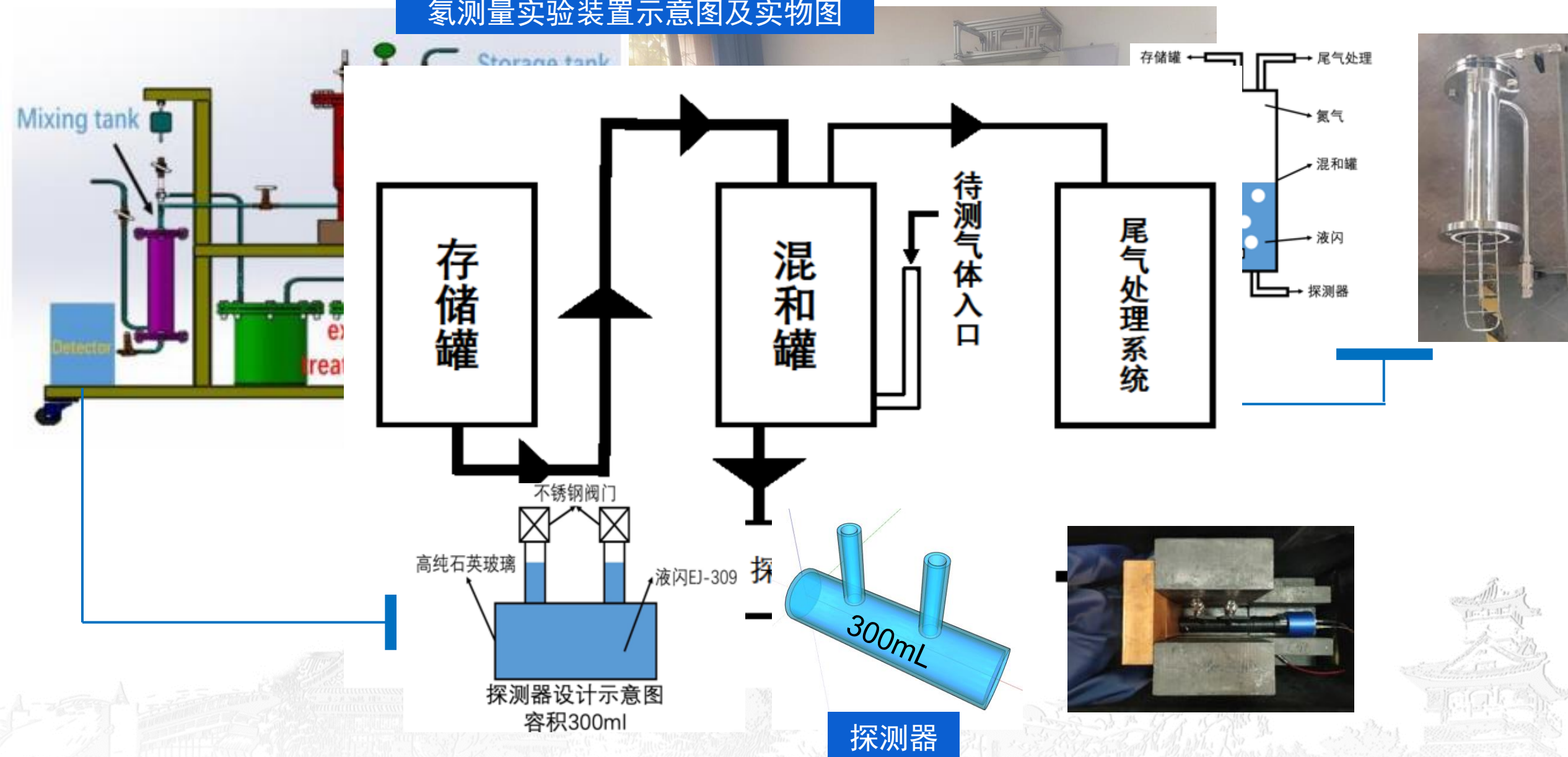
☑液闪铀钍含量低，能实现极低的自身氦放射性本底

BOREXINO: U/Th $\sim 10^{-18} \sim 10^{-17}$ g/g
JUNO: U/Th $\sim 10^{-18}$ g/g

☑探测器体积易增大，易实现氦富集

☑强的抑制本底能力，以及良好的甄别能力

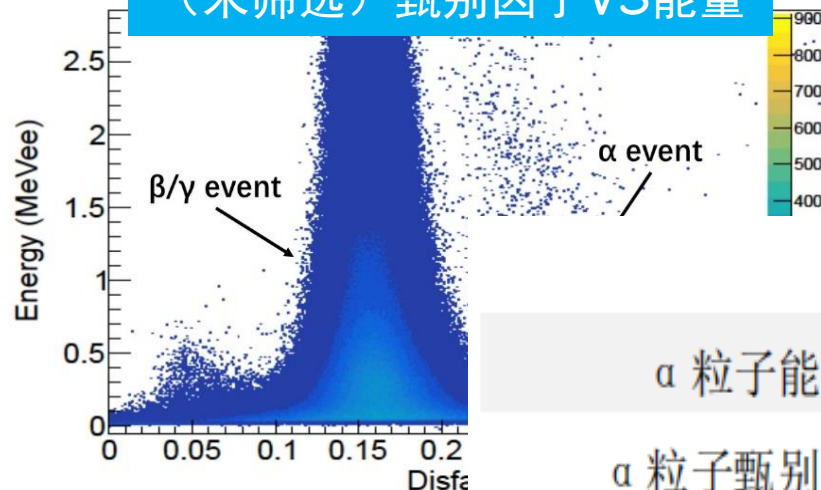
氦测量实验装置示意图及实物图



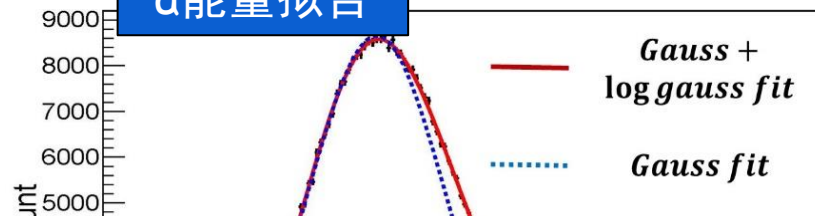
研究现状与计划

10

(未筛选) 甄别因子VS能量

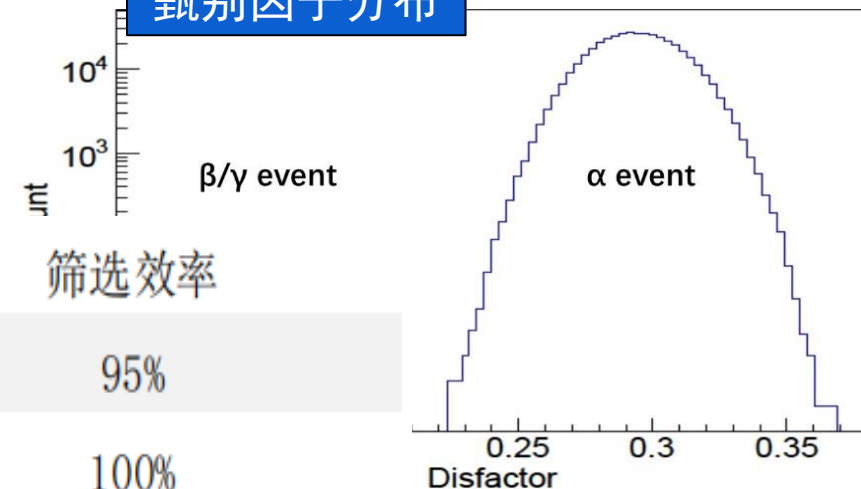


α能量拟合



筛选条件

甄别因子分布



筛选效率

α 粒子能量

0.88-1.05MeVee

95%

α 粒子甄别因子

0.22-0.38

100%

β 粒子能量

0.05-3.5MeVee

95.16%

β 粒子甄别因子

红框内

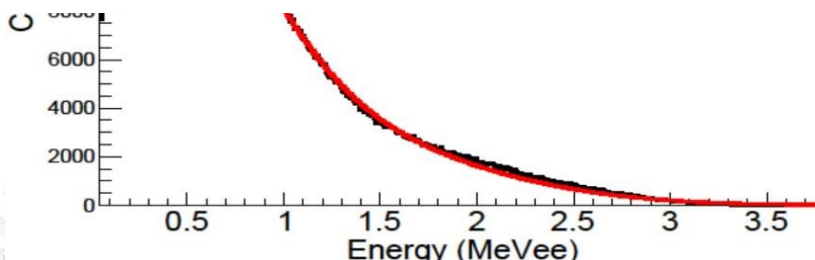
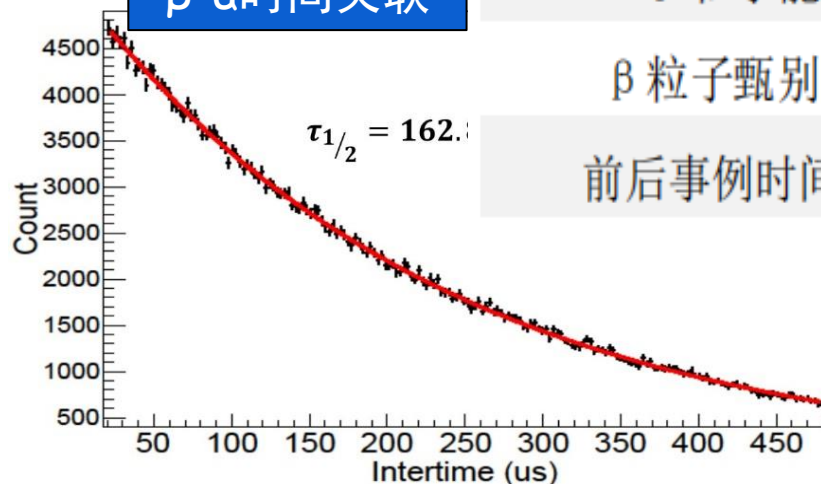
100%

前后事例时间间隔

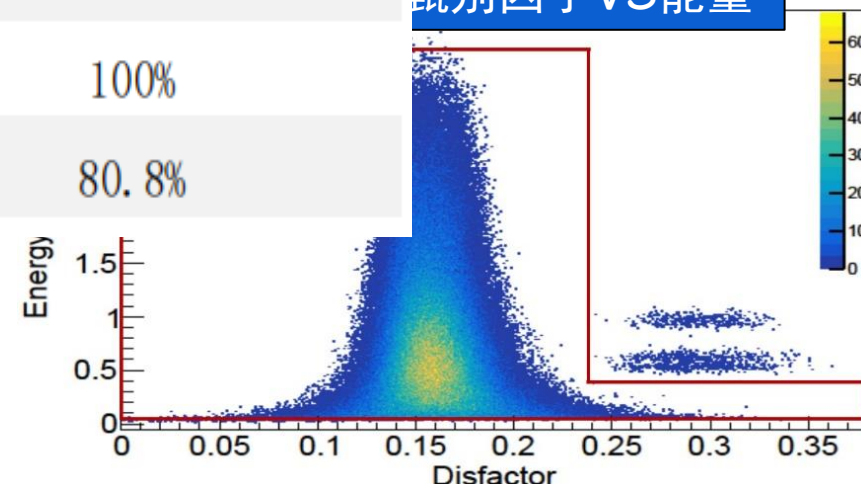
$0.1\tau_{1/2}-3\tau_{1/2}$

80.8%

β-α时间关联

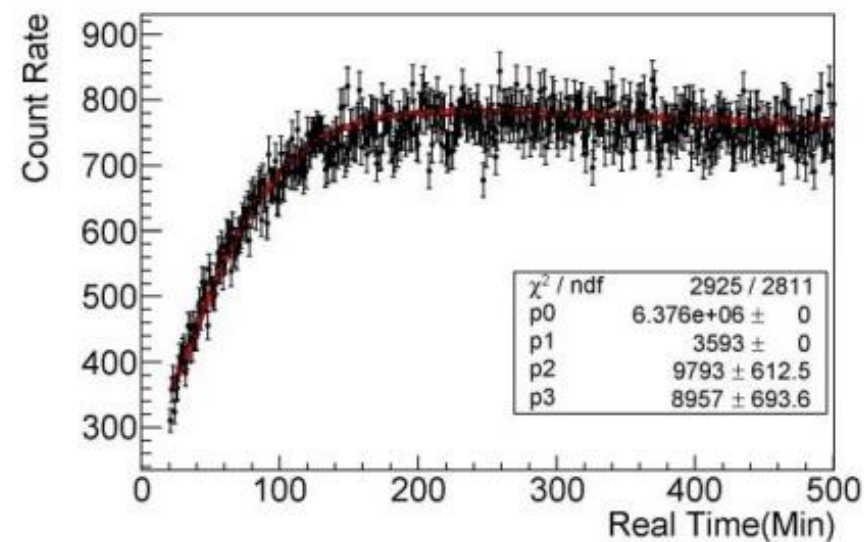
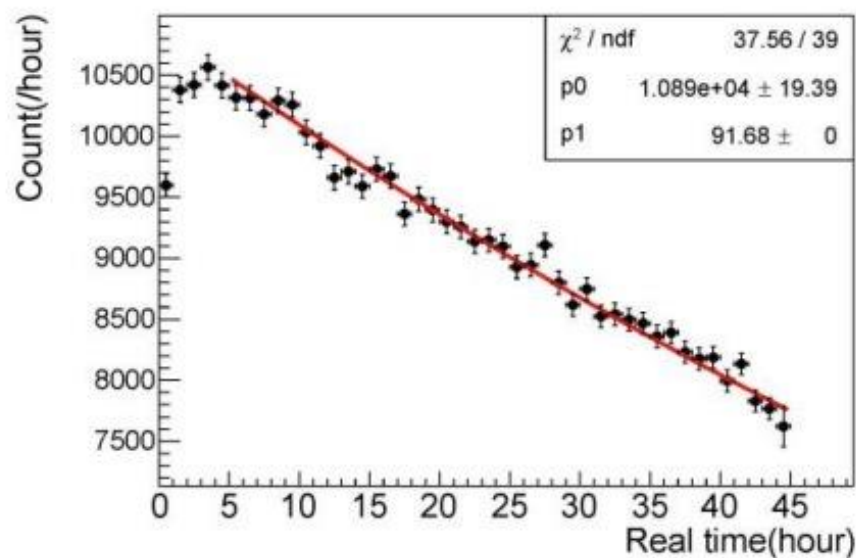


甄别因子VS能量



数据分析

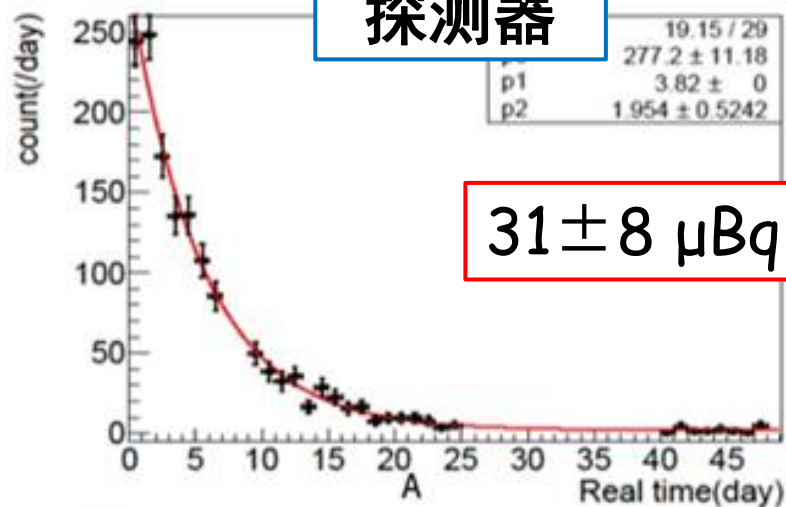
氦随时间衰变曲线图



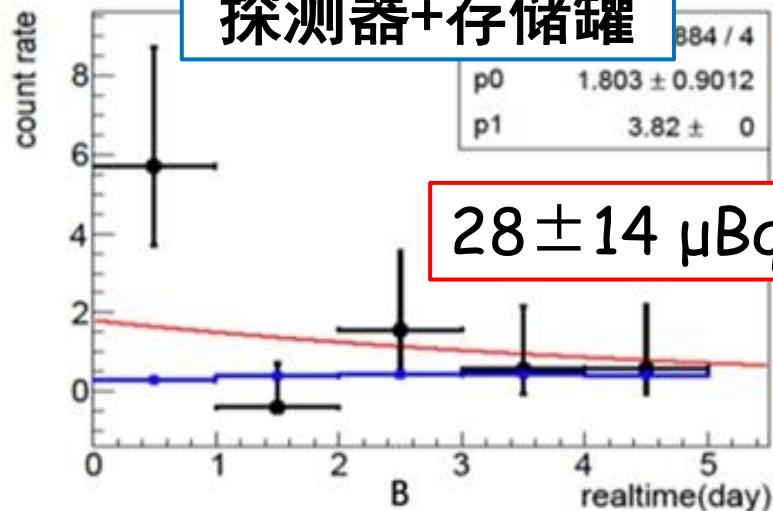
级联衰变计数率随时间的变化

本底测量

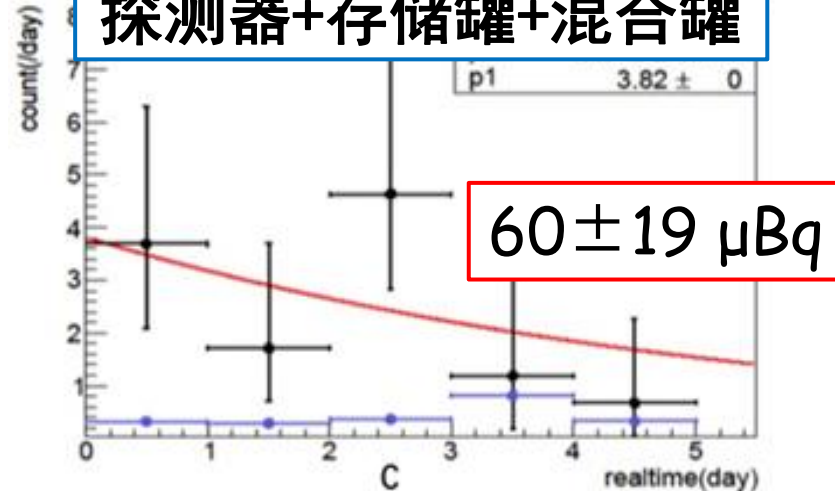
探测器



探测器+存储罐



探测器+存储罐+混合罐



► 整个系统本底约 $60 \mu\text{Bq}$

探测器下限估计

影响因素：

系统氦本底水平

溶解度系数 $c = \frac{c_{LS}}{c_{N_2}}$ (饱和时)

受到温度与压强的影响

21°C, 0.4MPa通气压强下约7mBq/m³

测量下限可由 $L = \frac{BG}{C_f}$ 计算，其中BG为氦本底浓度的90%置信区间

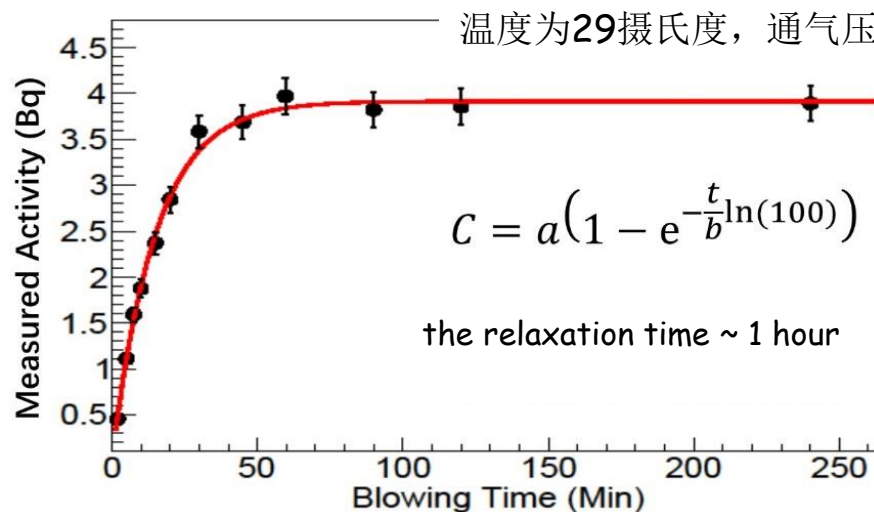


图1 液闪中氦浓度随通气时间的变化

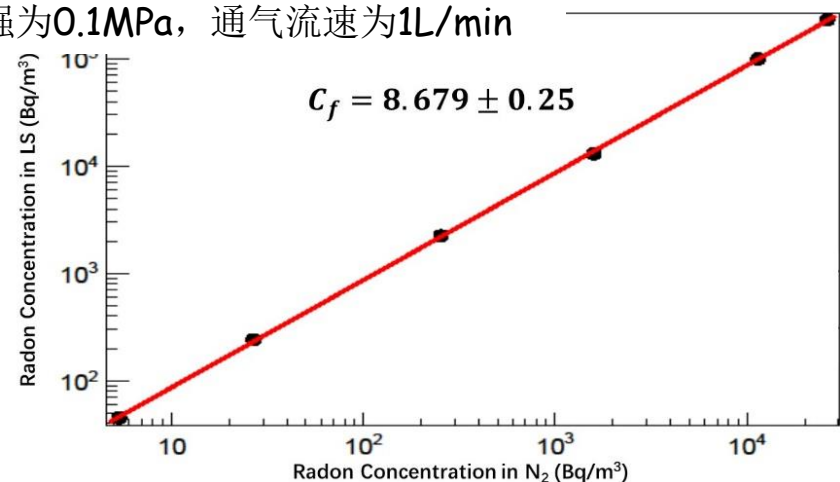


图2 液闪中饱和氦浓度与氦源浓度的关系

温度 (摄氏度)	通气压强 (MPa)	流速 (1L/min)	溶解度系数
21	0.4	1	8.68
21	0.2	1	9
21	0.2	1	18.8
21	0.2	1	36

探测器优化

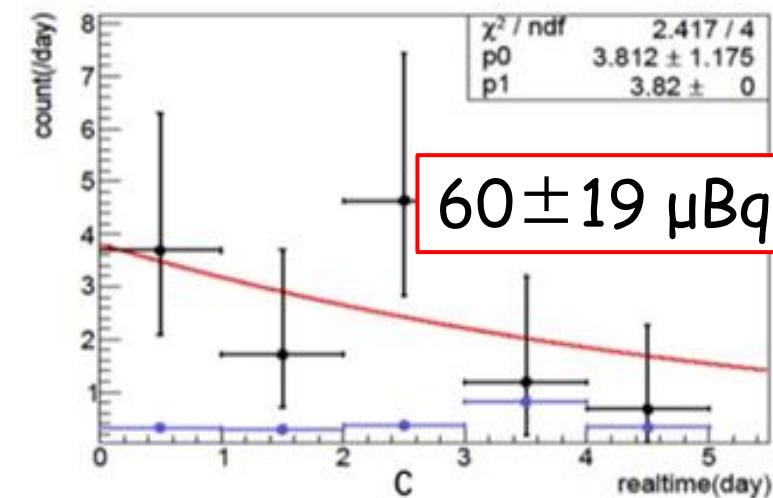


图1 300ml 普通玻璃探测器

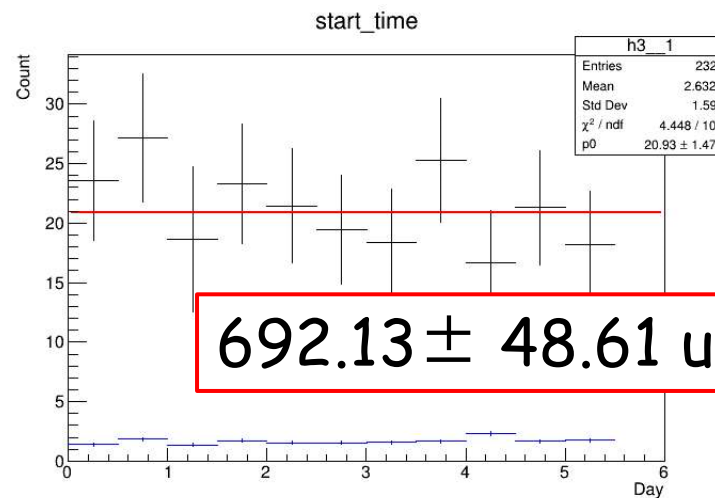


图2 3L普通玻璃液闪探测器
本底

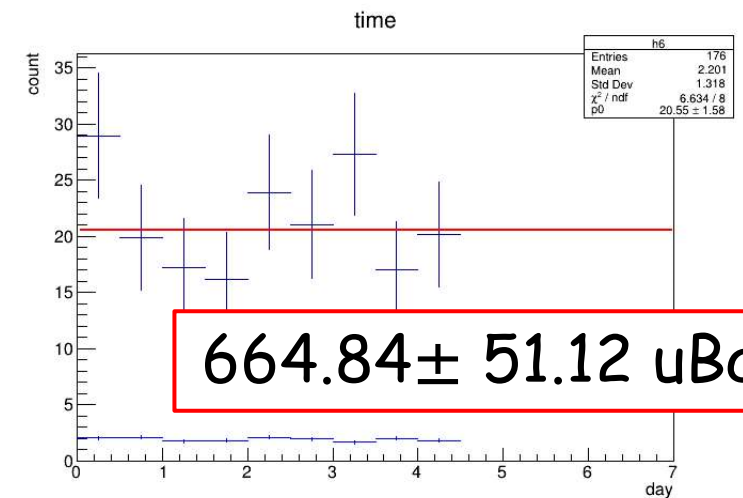


图3 3L低本底玻璃液闪探测器
器本底

►玻璃容器密封性需要改进

冷阱吸附



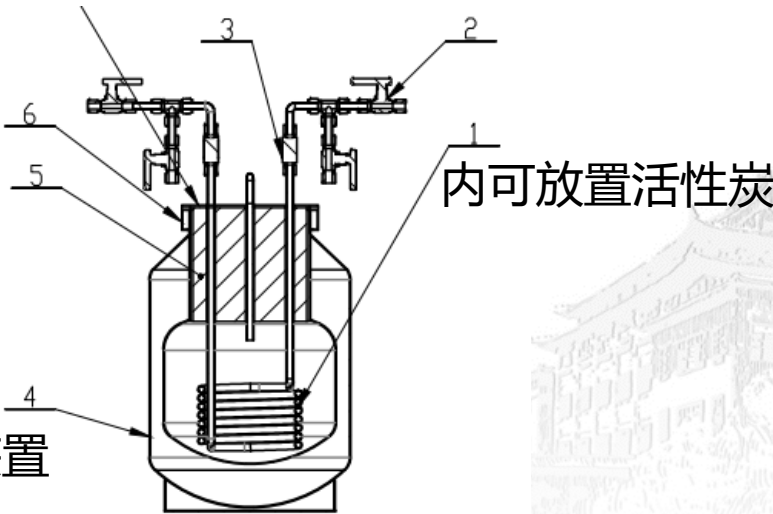
- 富集低浓度氡，降低探测下限
- 除氦

<https://doi.org/10.1016/j.nima.2018.06.076>

Table 2
Radon emanation screening from charcoals and their approximate prices in 2017. Uncertainties are statistical only and are reported at 68% C.L. The systematic uncertainty on the specific activity measurement.

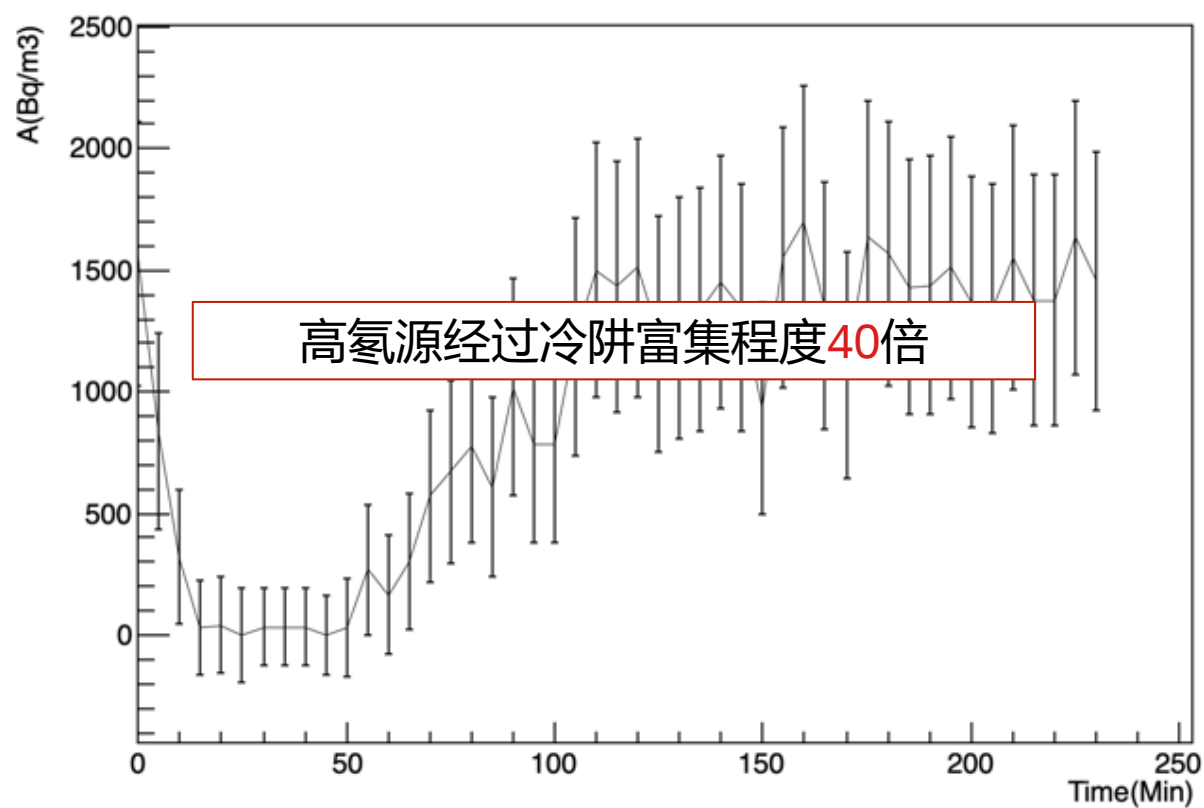
Charcoal	Specific activity (mBq/kg)	Price (USD/kg)	References
Calgon OVC 4 × 8	53.6 ± 1.3	6	This work
Shirasagi G2 × 4/6-1	101.0 ± 8.0	27	This work
Saratech	1.71 ± 0.20	35	This work
HNO ₃ etched Saratech	0.51 ± 0.09	135	This work
Carboact	0.23 ± 0.19	15,000	This work
Carboact	0.33 ± 0.05	15,000	[28]

活性炭自身氡溢出 0.2~1 mBq/kg

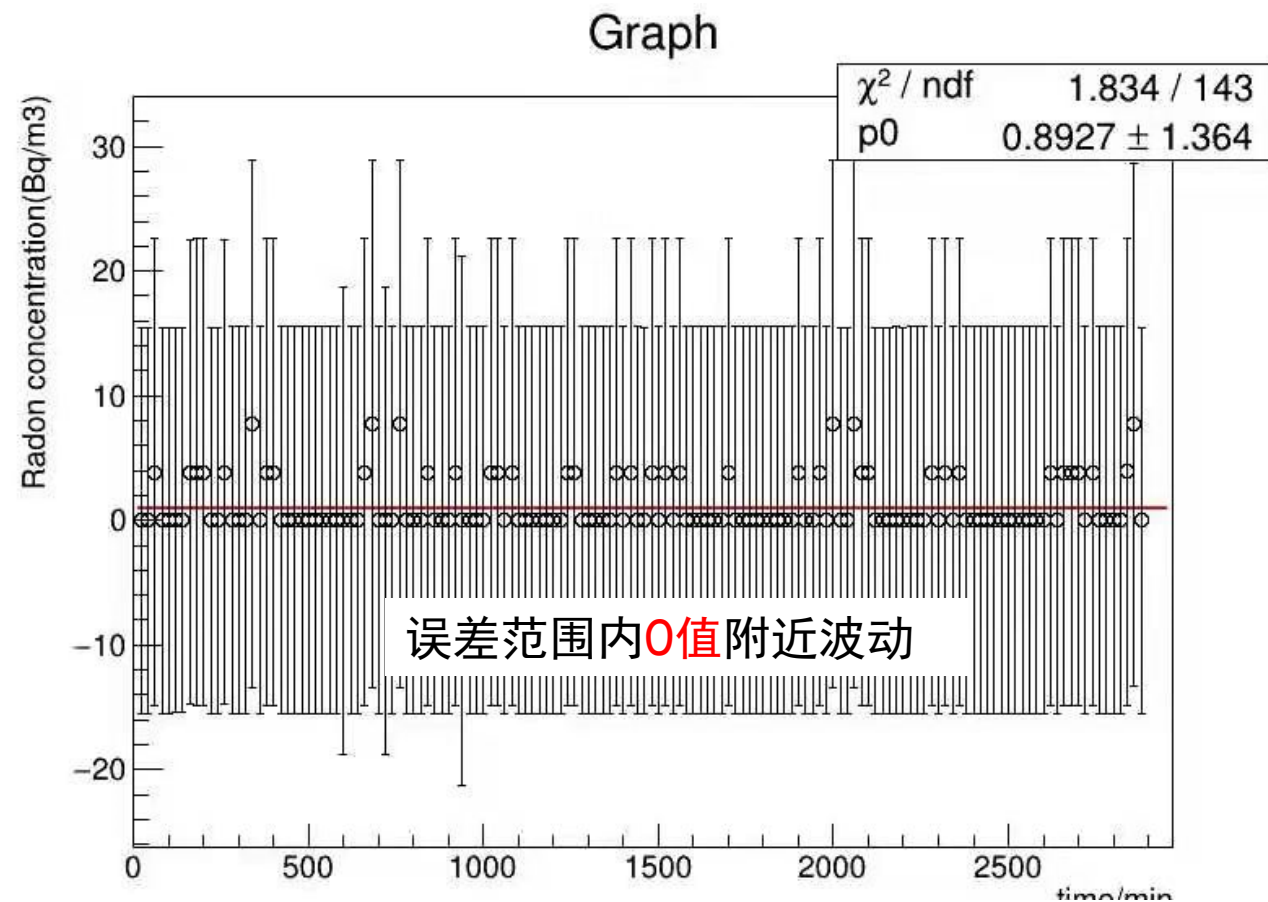


吸附结果

高浓度氦源 ◀



高氦源浓度氮气经过不锈钢（不含活性炭）冷阱



高氦源浓度氮，气经过含活性炭冷阱

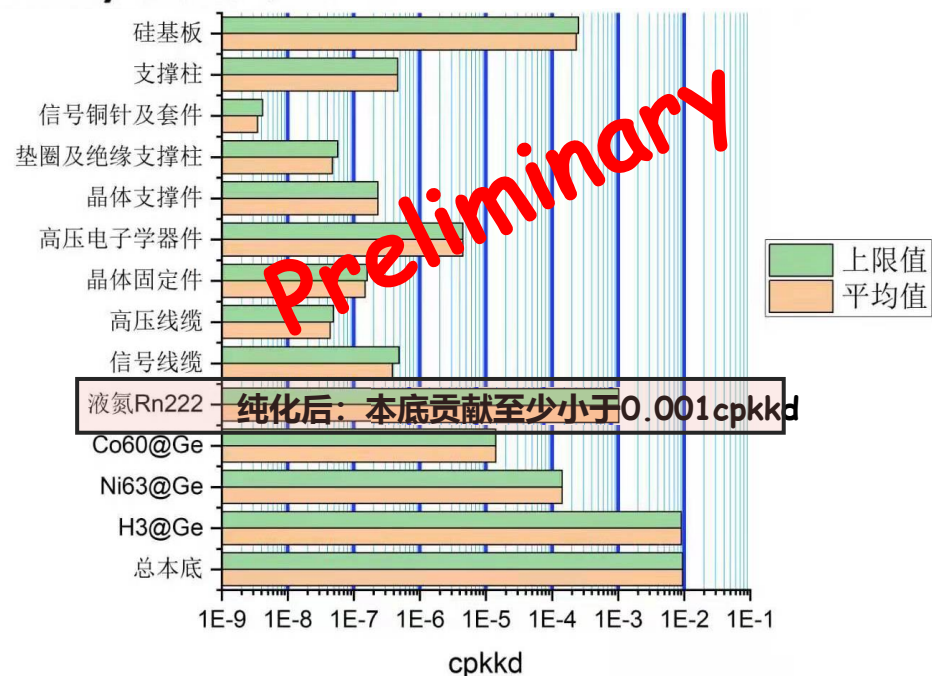
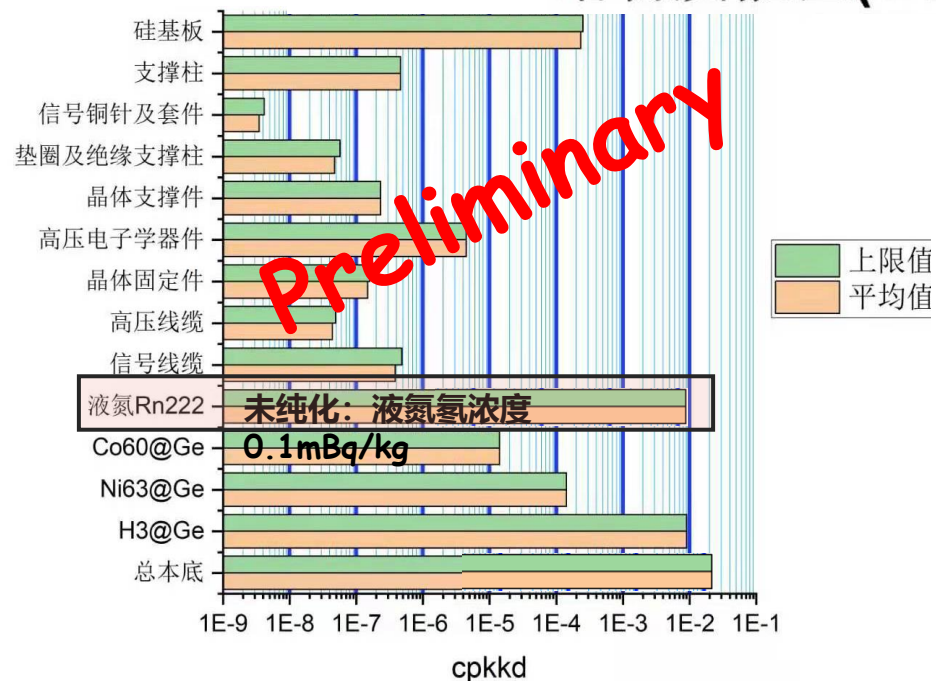
氦输运在液氮罐中的研究

►液闪测氦装置目的：测量实验环境中的低浓度氦

►最终目的：除氦

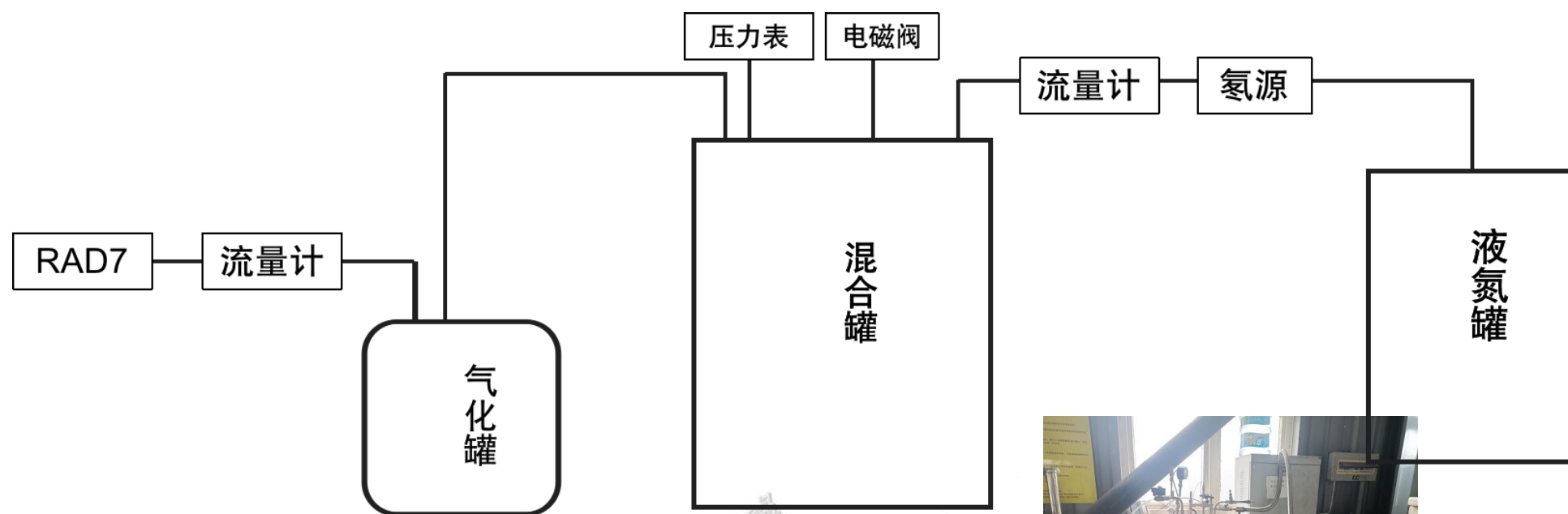
Simulation results of CDEX-50dm for the various materials

暗物质能区(0-2keV)本底水平



氦输运在液氮罐中的研究

► 氦在液氮罐中如何输运



不锈钢罐中氢运输的理论模型

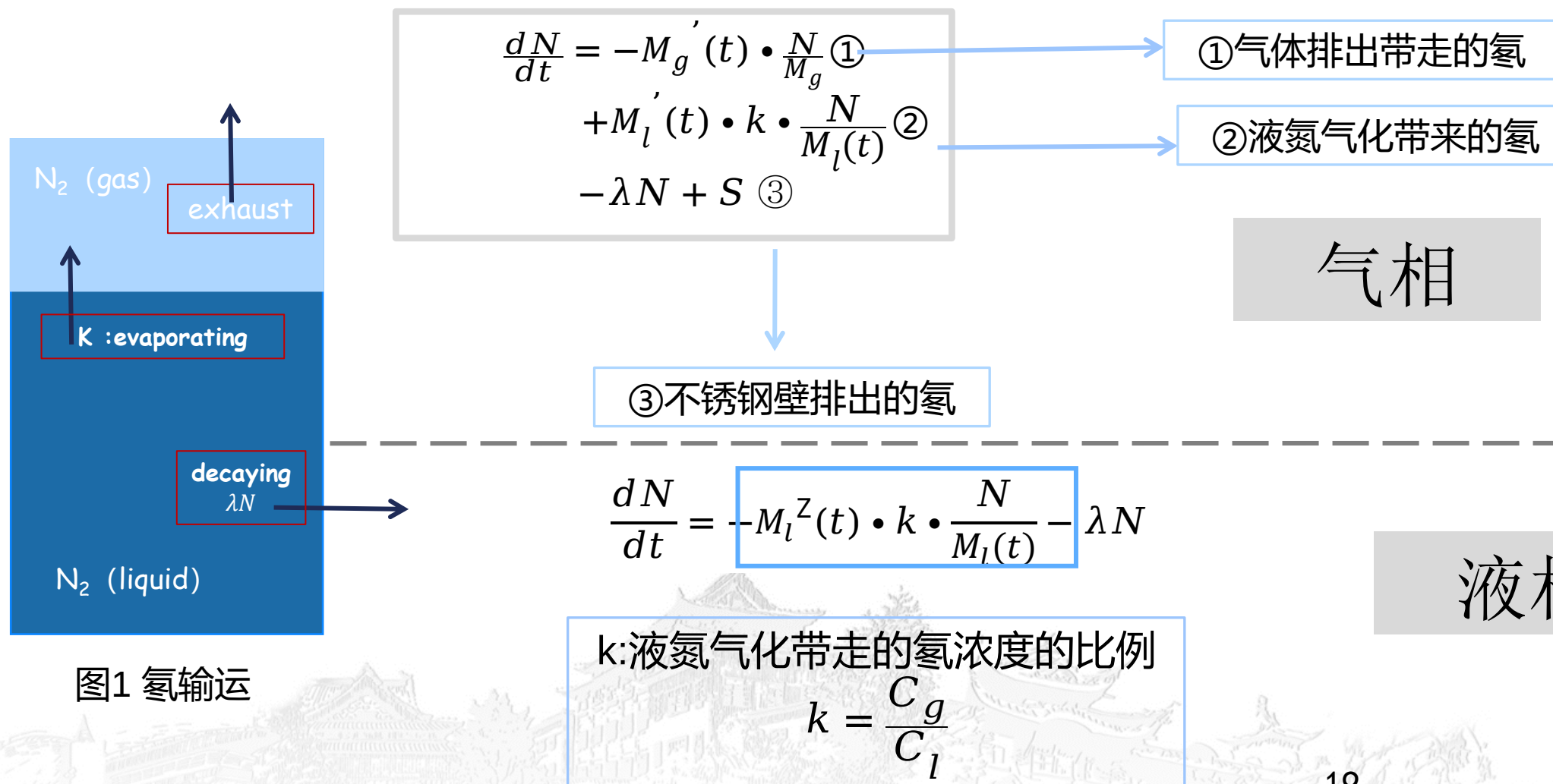


图1 氢运输

液相初步分析

实验组	氦源浓度 (Bq/m³)	混合时间 (min)	99kg浓度 (Bq/Kg)	k值
第一组实验	63820 ±360	464	296.9326094	-0.04054 ± 0.1134
第二组实验 (加不锈钢片)	54720 ± 480	1347	4718.77	-0.1729 ± 0.01013

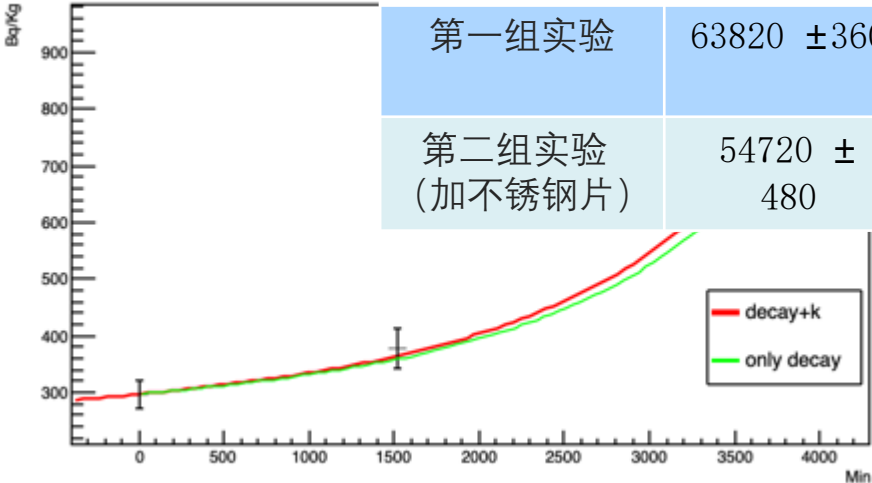


图1 第一组实验

$k = -0.04054 \pm 0.1134$

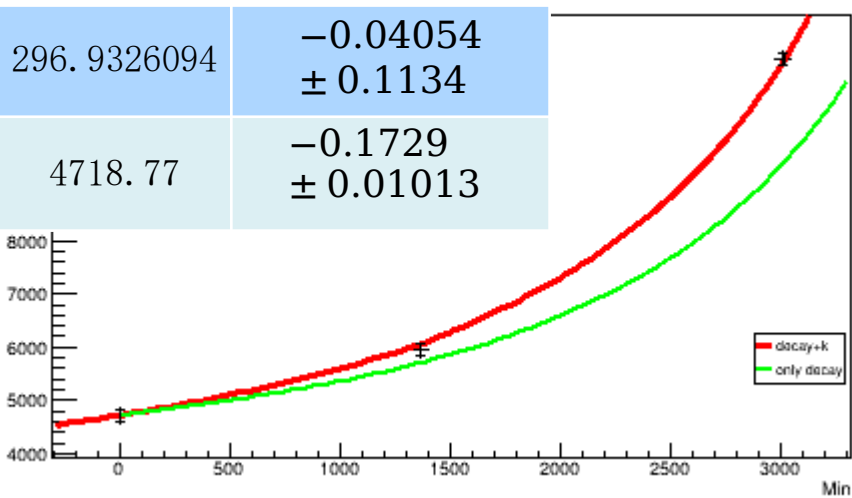


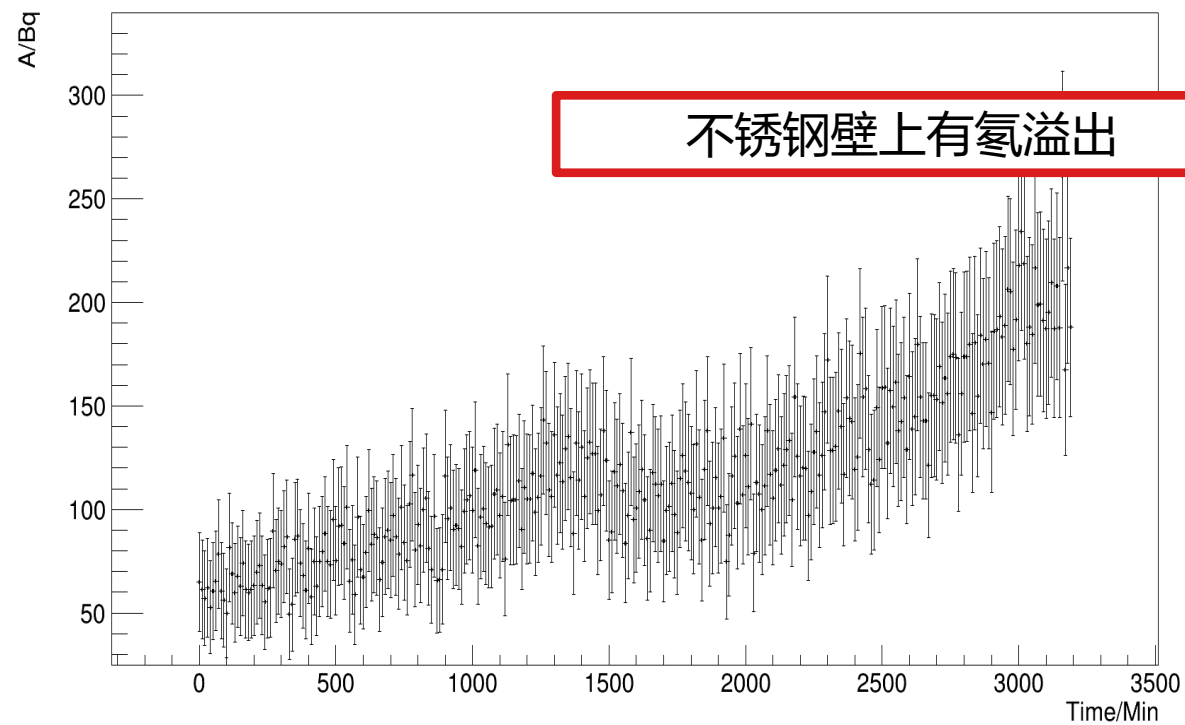
图2 第二组实验 (加10cm不锈钢片)

$k = -0.1729 \pm 0.01013$

- ▶ 第一组：90% C.L. 上限为0.146，液氮气化会带走较少的氦
- ▶ 第二组：k为负值，推测与氦溶解有关，需要进一步实验

气相初步分析

A

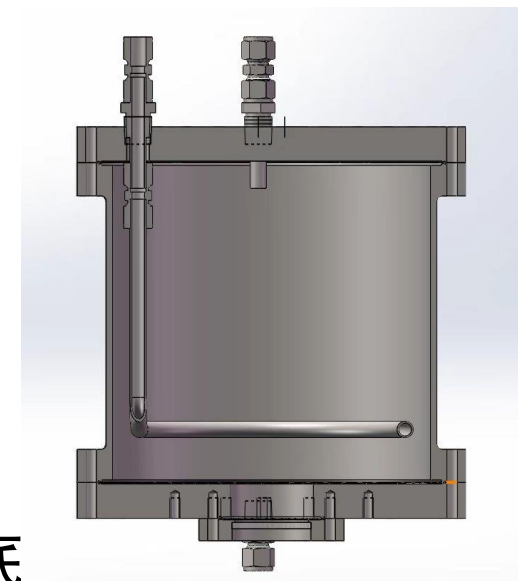


气相部分氢浓度

设备探测下限的提升

- 探测器自身结构 ——> 扩大探测器尺寸

存储罐、混合罐、探测器合为一体，控制本底



活性炭冷阱富集+探测器结构升级

探测器自身结构升级
预计可降三个数量级： $\sim 7\text{mBq/m}^3$ 降至 $\sim \mu\text{Bq/m}^3$

- 系统最大本底为 $60\mu\text{Bq}$ ，已达到国际较好的水平
- 无氦富集时探测下限 $<10\text{mBq}/\text{m}^3$ 量级
- 升级探测器结构材料，冷阱富集等，预期可降低探测下限至少三个数量级



谢谢各位老师同学的倾听

Thanks for your listening



四川大學
SICHUAN UNIVERSITY

报告人：李倩沅