



大亚湾实验液闪置换

于泽源 高能所

代表江门液闪组、大亚湾合作组

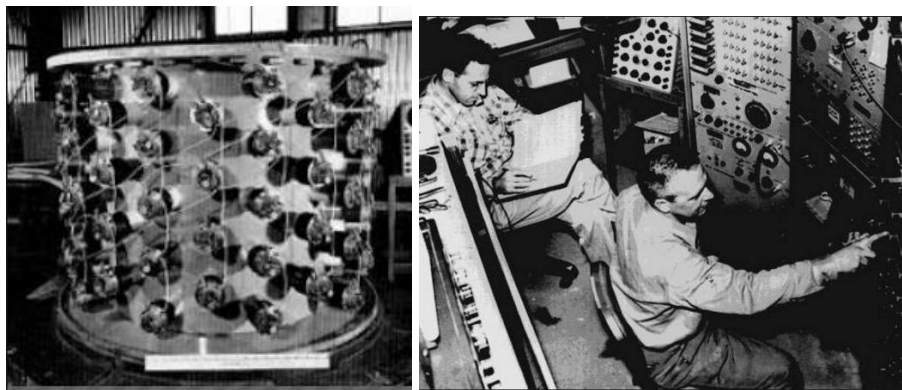
粒子物理卓越中心

2017年12月1日

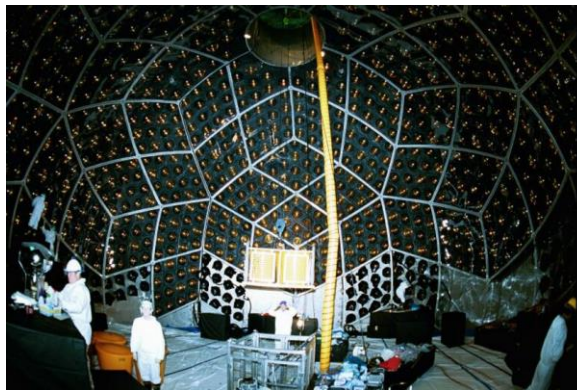
液体闪烁体和中微子实验

- 中微子实验最常用三种探测方法
 - 液体闪烁体：反应堆中微子、太阳中微子等
 - 水切仑科夫探测器：大气中微子、加速器中微子等
 - 稀有气体探测器（Ar、Xe）：加速器中微子、 $0\nu\beta\beta$ 实验等
- 液体闪烁体是探测反应堆 $\bar{\nu}_e$ 的“黄金”介质
 - 反beta衰变： $\bar{\nu}_e + p \rightarrow e^+ + n$ ，时间、空间和能量的关联信号

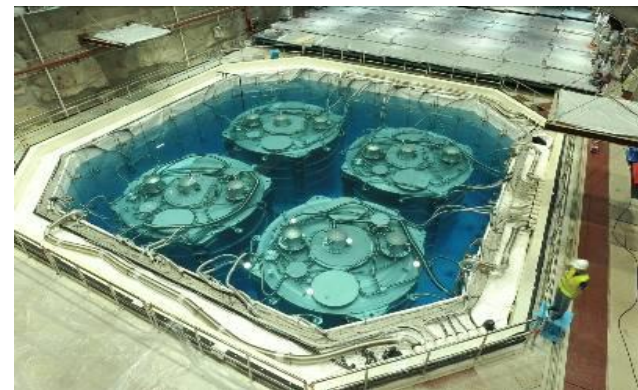
Reines and Cowan, discovery of neutrino



2000s: KamLAND θ_{12} , δm^2



2010s: Daya Bay, θ_{13}



江门中微子实验

物理目标

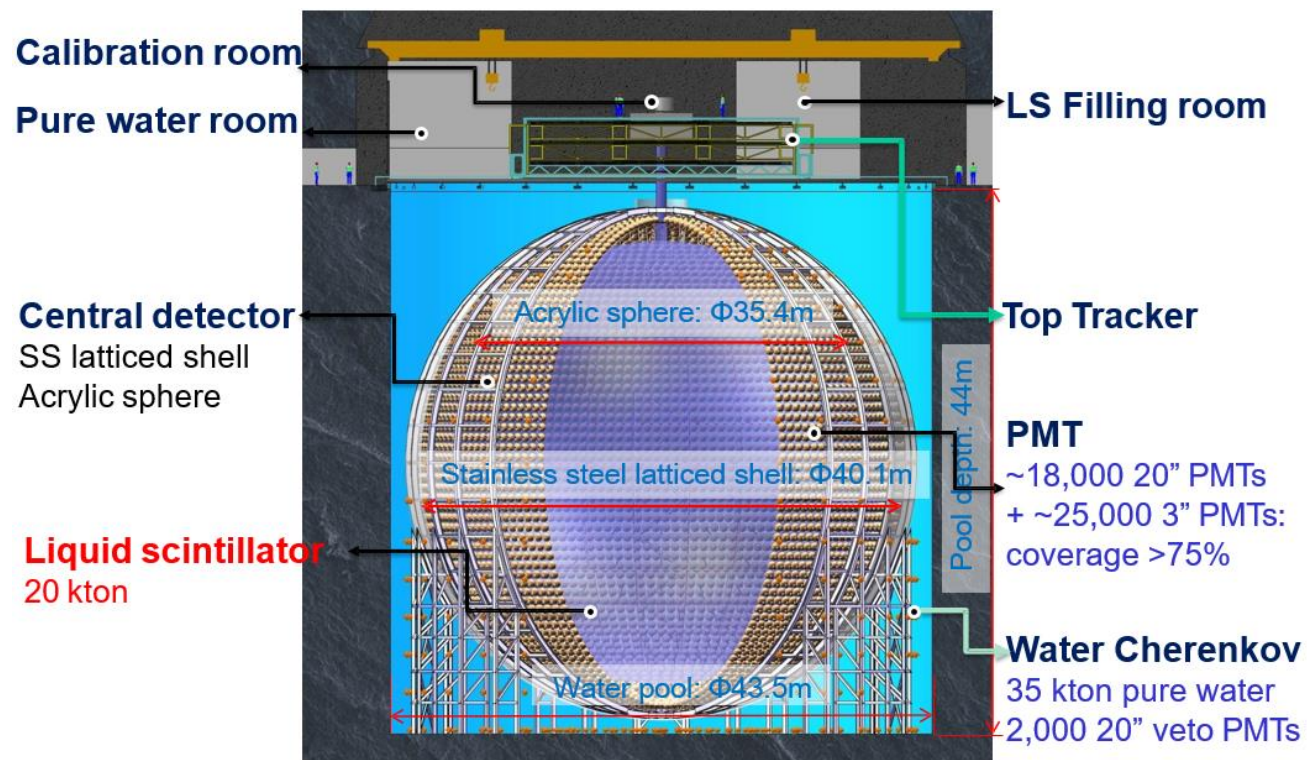
- 确定中微子质量顺序
- 精确测量中微子振荡参数等

探测器较目前国际最好水平

- 液闪体积增大**20倍** (靶质量)
 - 难点: 探测器尺寸, **液闪透明度**
- 光产额增大**三倍** (能量分辨率)
 - 难点: **液闪光产额**, 光电倍增管

为解决液闪相关的难点

- 在大亚湾地下5号厅建设了20吨液闪生产、纯化设备
- 将大亚湾AD1中掺钷液闪替换为该设备生产的液闪



光产额: 探测器中心 1 MeV 电子对应的 PMT 观测到的总光电子数

液闪探测器核心问题 1

• 最大化光产额

- 去除溶剂中光学杂质：降低吸收

- 优化发光物质配比

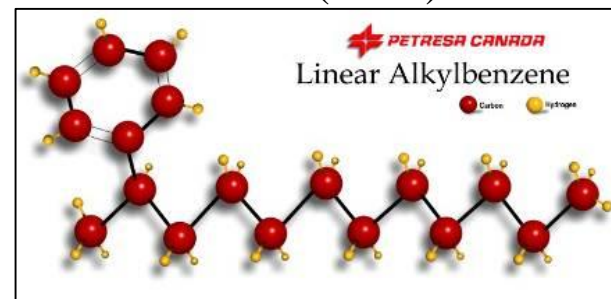
- 尚无可靠实验结果给出光产额随液闪配方的变化

- 可靠的光学过程模拟

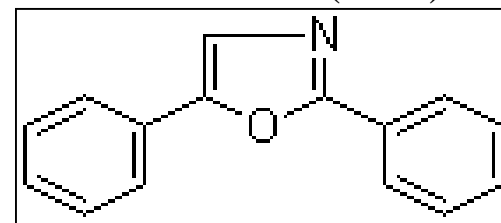
- 尚无经过数据检验的液闪三分量光学模型

世界首次对液闪发光模型的精确研究

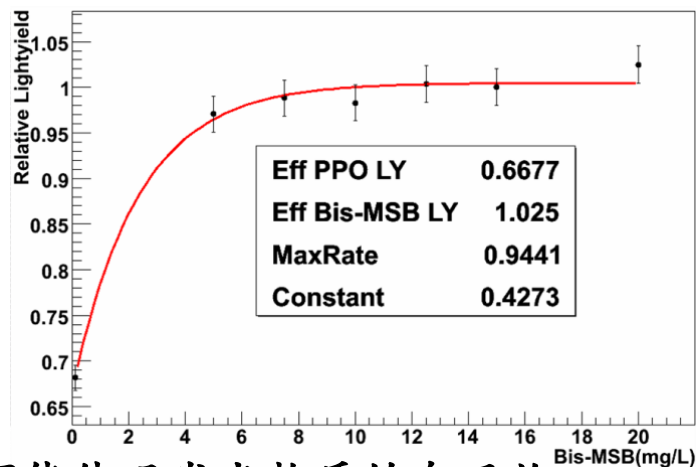
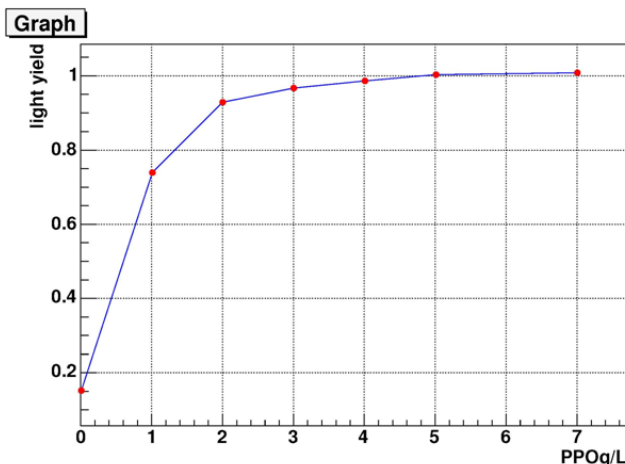
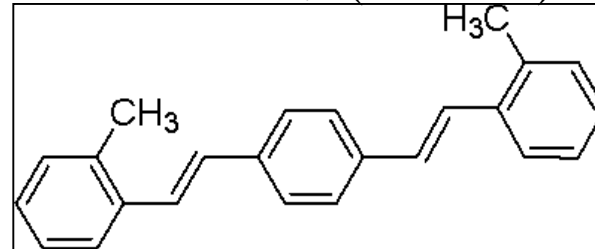
溶剂 (LAB)



发光物质 (PPO)



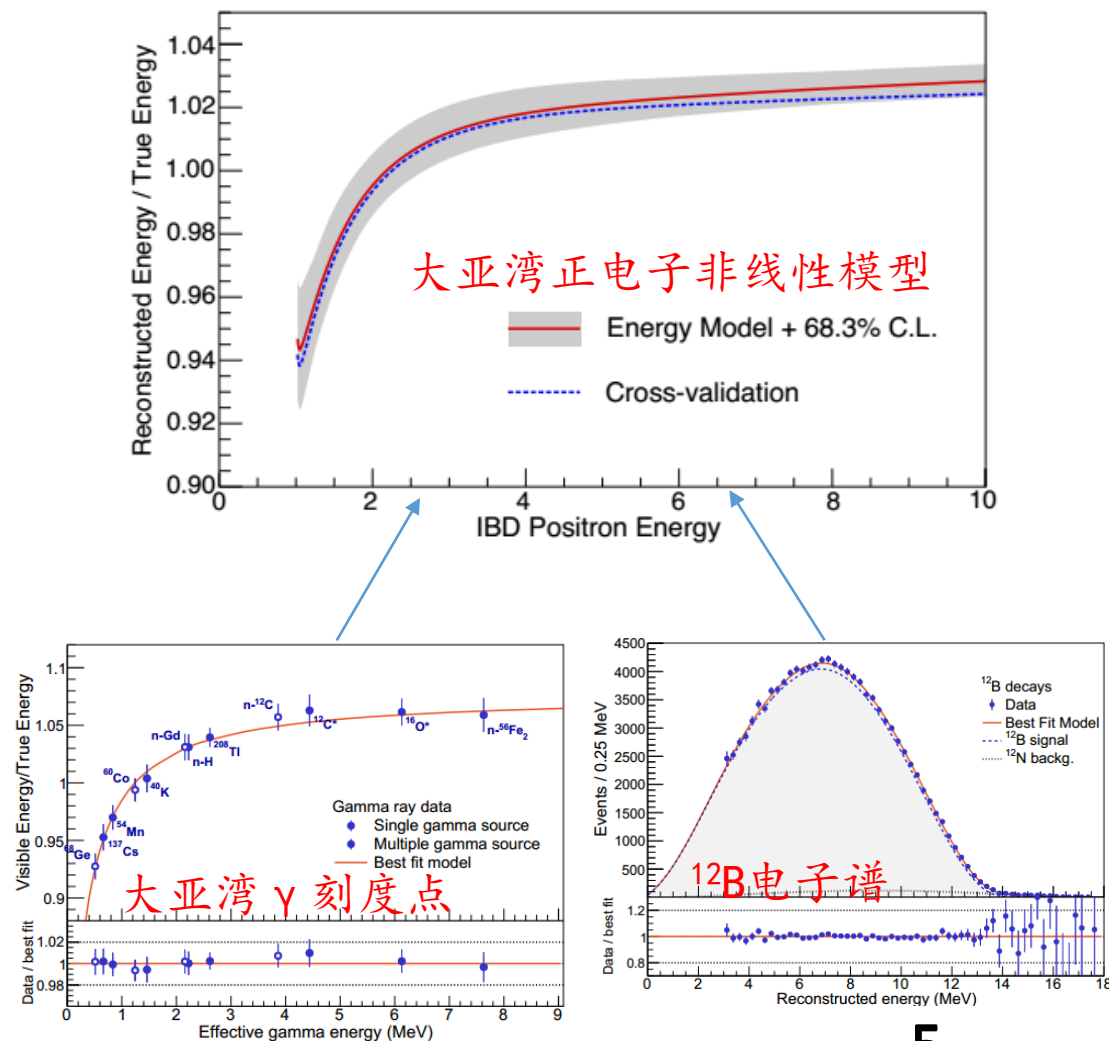
波长位移 (bis-MSB)



5 cm容器测量结果：误差大，不能体现发光物质的自吸收

液闪探测器核心问题 2

- 能量响应模型误差小于1%
- 正电子的能量模型的建立
 - 大亚湾实验基于 γ 刻度源和 ^{12}B β 谱建立模型，误差大于1%
 - 国际上同类实验均使用类似方法，精度低于大亚湾
- 能否在液闪中掺入 β 核素，直接测量低能端电子非线性？
 - 液闪置换实验前，将 ^{40}K 混入大亚湾掺钆液闪，获得了 ^{40}K β 能谱
 - 首次实施此类探测器刻度



液闪探测器核心问题 3

- 液闪的天然放射性纯度
 - JUNO液闪不掺钷，天然放射性更容易形成偶然符合本底
- 需要足够灵敏的探测器检验放射性是否达标
 - 实验室小实验受限于液闪质量和本底，测量灵敏度仅为 10^{-12} g/g
 - Borexino实验开始前，先做了CTF实验检验液闪放射性纯度
 - 大亚湾探测器有20吨液闪质量和足够厚的屏蔽层，运行10天可达 10^{-15} g/g

实验	液闪质量	^{238}U 含量	^{232}Th 含量
Borexino	约600吨	$< 10^{-17}$ g/g	$< 10^{-17}$ g/g
KamLAND	约1000吨	$< 10^{-16}$ g/g	$< 10^{-16}$ g/g
Daya Bay	160吨普通液闪	2×10^{-14} g/g	4×10^{-14} g/g
JUNO	20,000 吨	要求小于10^{-15} g/g	要求小于10^{-15} g/g

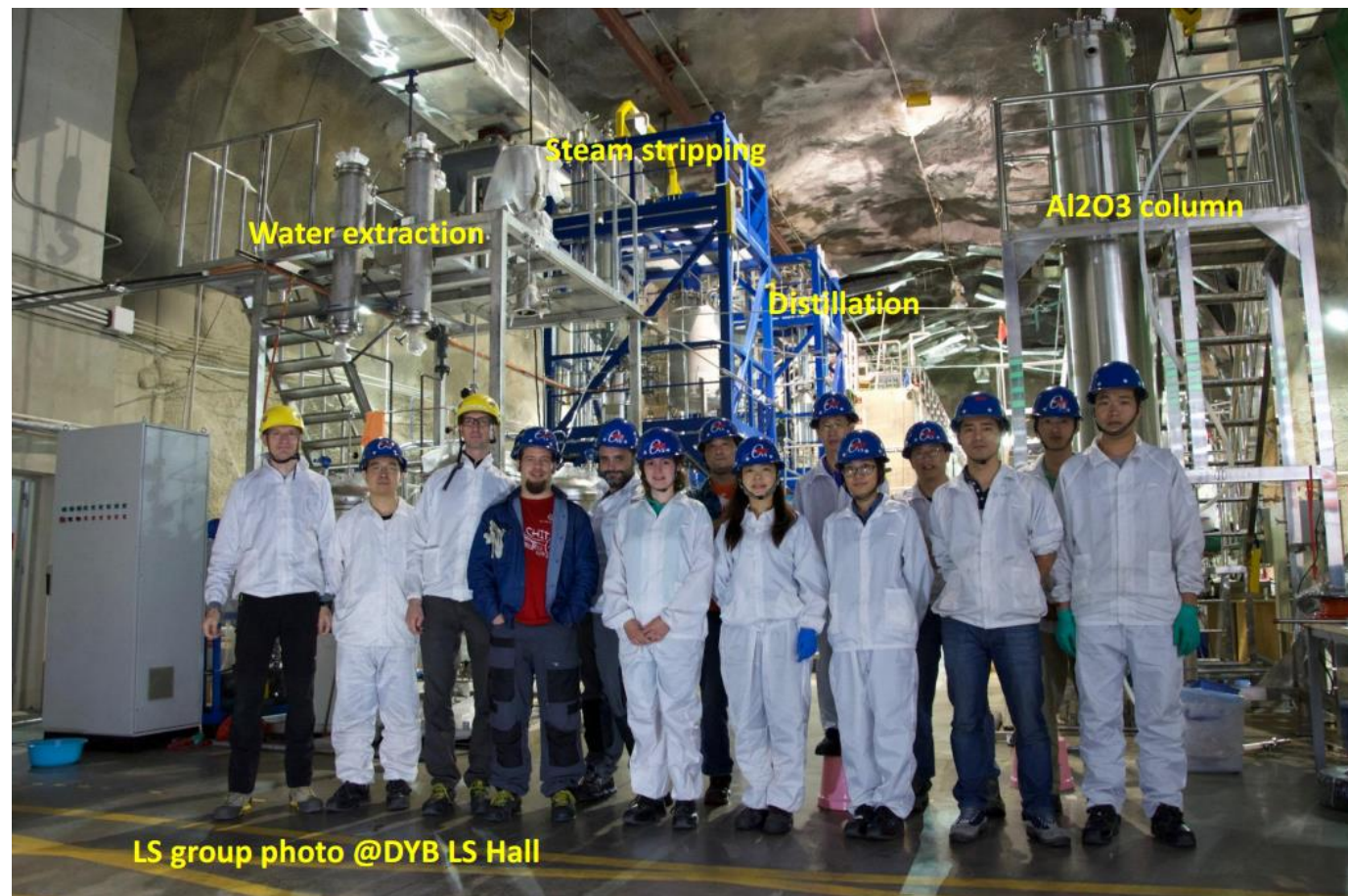
大亚湾实验液闪置换

- 针对液闪探测器的三个核心问题，15年提出了液闪置换实验
- 将大亚湾AD1中的20吨掺钷液闪置换为江门液闪
 - AD1退出大亚湾物理取数，但对 θ_{13} 灵敏度影响可以忽略
 - 16年分别通过了大亚湾国际合作组的物理评审和工程评审
 - 17年2月完成置换，前后进行了四次实验

液闪核心问题	大亚湾液闪置换实验
光产额优化和光学模型建立	分步增加PPO和bis-MSB含量，测量光产额并调节模拟
能量非线性误差小于1%	掺 ^{40}K 以研究1 MeV区间电子的非线性
天然放射性纯度	检验液闪纯化设备效果

液闪纯化

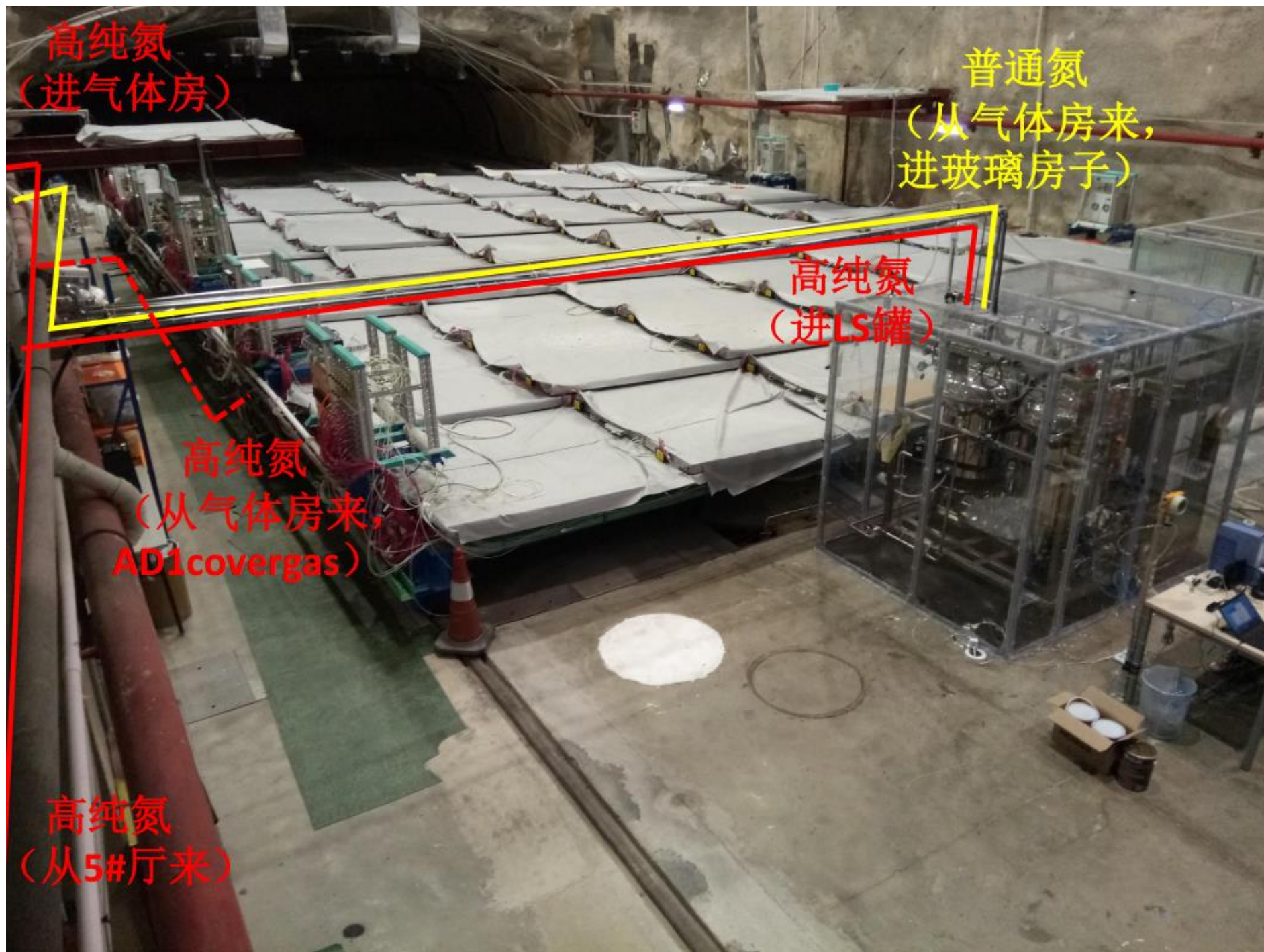
- 在大亚湾实验五号厅搭建了20吨液闪生产纯化设备
 - 100 L/h生产速度
- Al_2O_3 过滤塔
 - 有效去除光学杂质
- 烷基苯蒸馏（意大利）
 - 移除放射性杂质
- 水萃
 - 移除金属离子
- 蒸汽剥离（意大利）
 - 移除 ^{222}Rn



置换系统

- 在EH1搭建了液闪置换系统
 - 将掺钆液闪置换为高纯水，将水置换为纯化后液闪
 - 真空检漏：漏率小于 10^{-6} mbar*L/s
- 为江门液闪在线纯化做预研



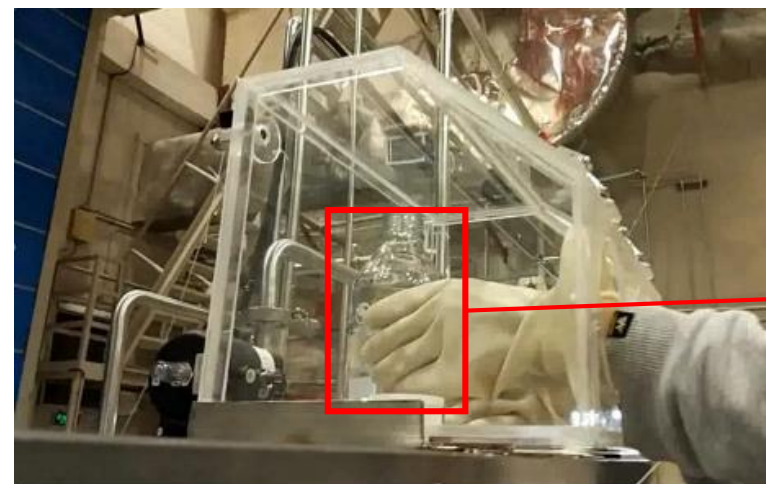


实验进展

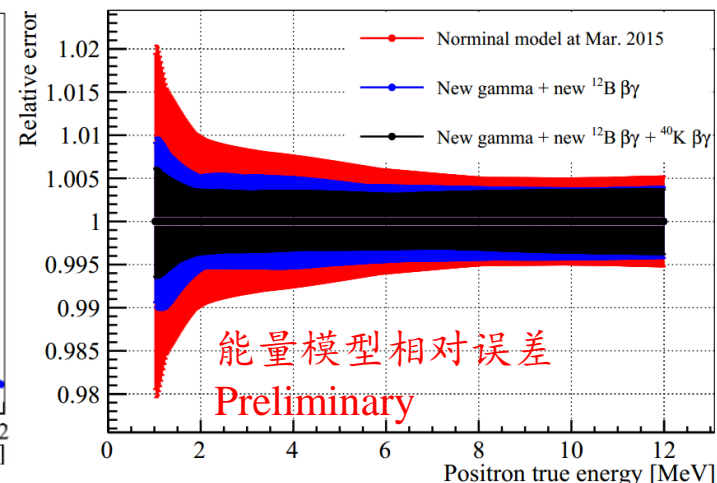
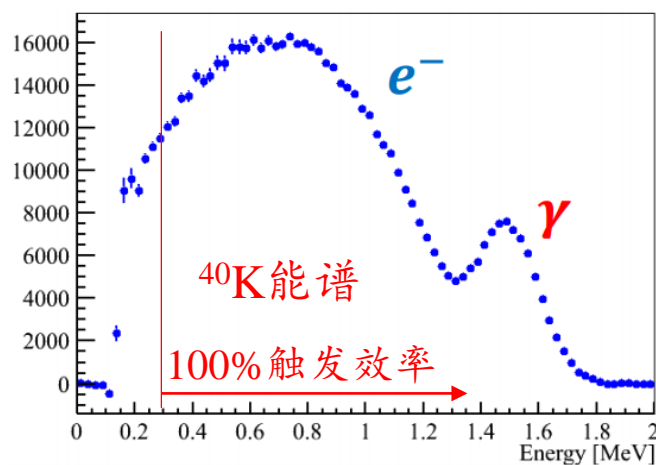
- 2016年
 - 20吨液闪生产和纯化设备安装调试
- 2017年1月
 - 置换系统和AD接口安装调试
- 2017年2月起
 - 掺⁴⁰K液闪混入大亚湾GdLS：能量非线性模型
 - 大亚湾GdLS置换为新液闪(LAB + 0.5 g/L PPO)：天然放射性本底测量
 - 逐步增加PPO和bis-MSB含量：光产额测量和光学模型调节
 - ²²²Rn检漏：积累极低本底实验的经验
 - 蒸汽剥离效率研究：在线纯化技术研究

^{40}K 探测器刻度

- 正电子能量模型需要低能电子刻度数据
 - 1 MeV以下液闪非线性最大
 - 直接测量电子非线性，降低 γ 到电子转换模型的影响
- 液闪置换前，将1升KLS混入GdLS，精确测量了低能电子响应
 - 进一步降低了能量模型误差
 - 提高反应堆中微子能谱测量精度
 - 精确测量的 ^{40}K 对原子核物理有额外帮助（唯一的第三禁戒跃迁核素）

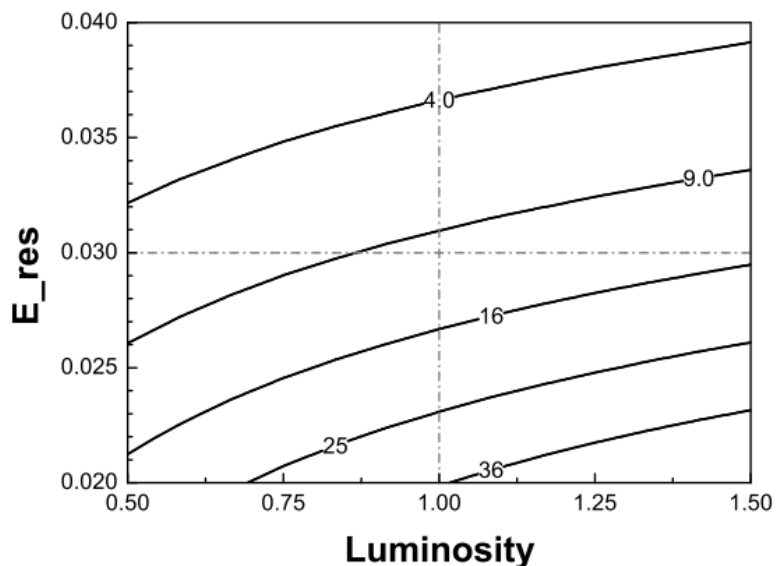


掺 ^{40}K 液闪



液闪光产额研究

- 光产额（能量分辨率）是江门达到设计灵敏度的关键
- 在新液闪中逐步添加发光物质，精确测量光产额和探测器响应的变化
 - 深入理解液闪发光和光传播过程
 - 构建三分量液闪的可靠光学模拟



NO.	PPO g/L	Bis-MSB mg/L
Raw	0.5	0
1	1	0
2	2	0
3	2	0.1
4	2	1
5	2	4
6	2	7
7	2.5	7
8	3	7
9	3.5	7
10	4	7
11	4	10
12	4	13

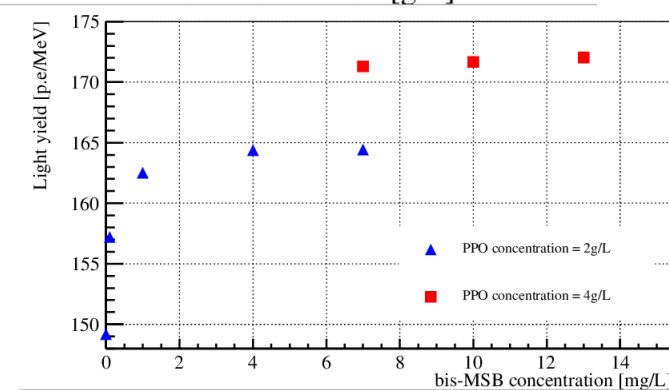
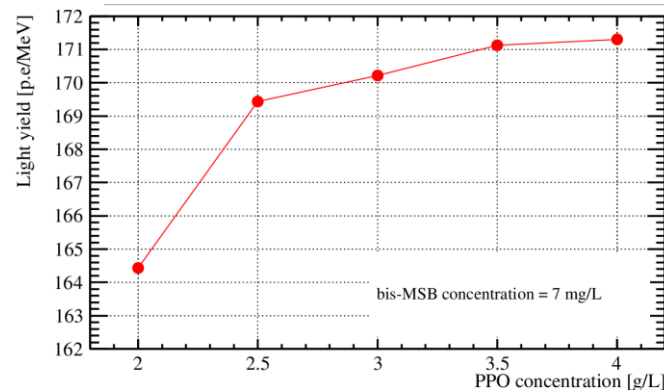
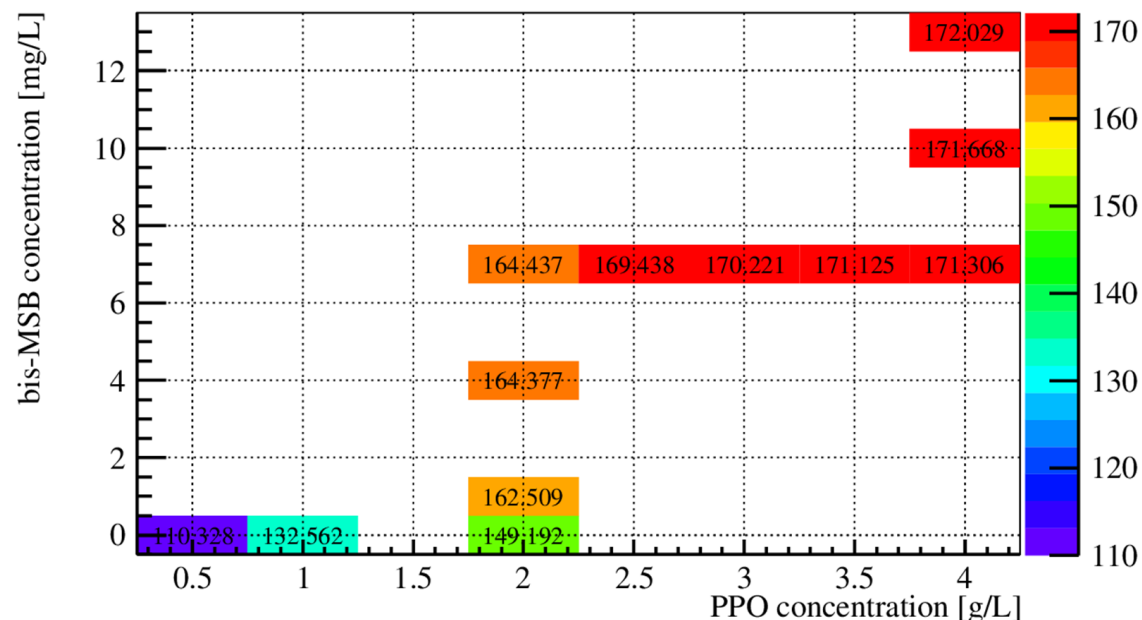
液闪光产额研究

• 2017年5月18日至7月27日完成光产额实验

- 考虑PMT增益、探测器环境等影响，每个测量点误差约为0.15%
- 多种途径监测发光物质在探测器内均匀度

• 光产额随PPO、bis-MSB浓度的增加均达到平台

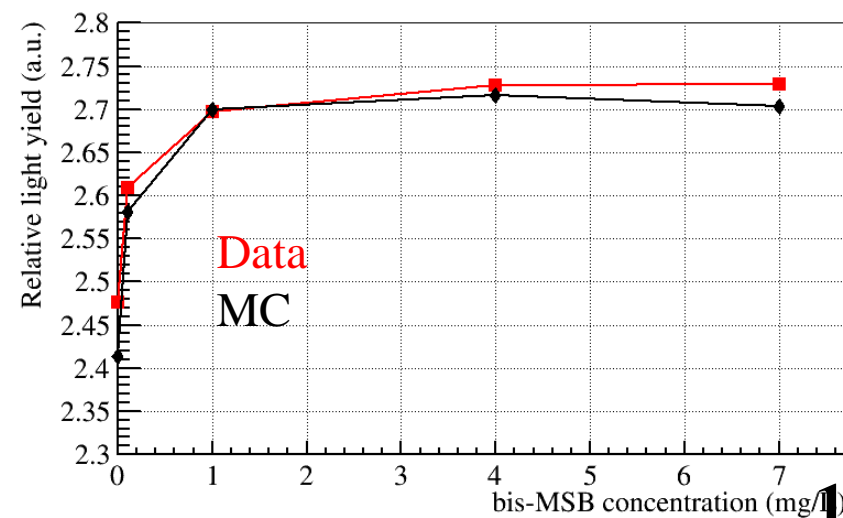
- 从HitPattern等其他方面观察到发光物质自吸收随浓度的增大



液闪光学模型研究

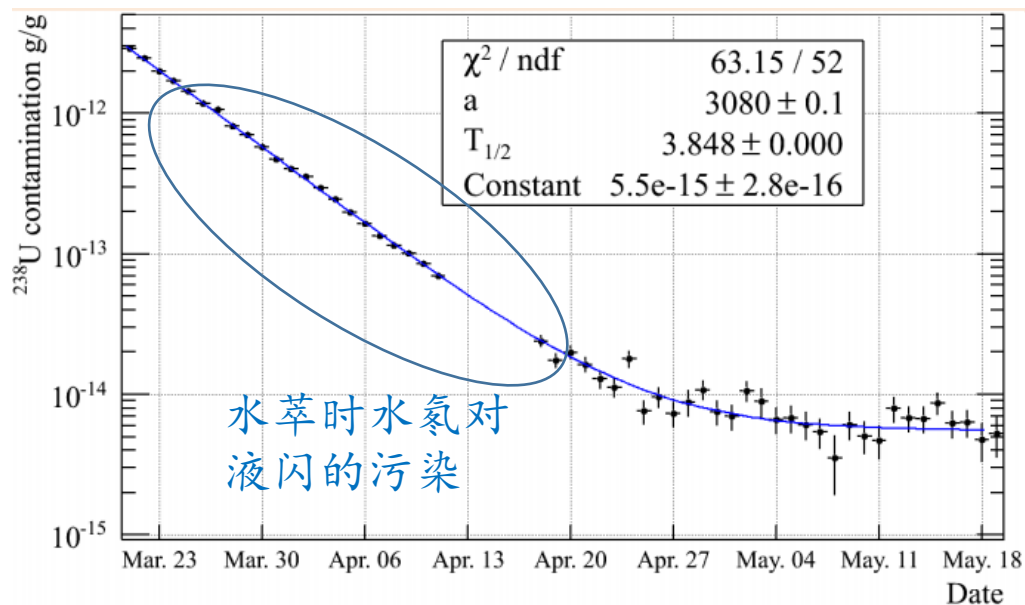
- 大亚湾实验结果不能直接推广到江门
 - 探测器尺度相差10倍，液闪对光子的吸收相差五倍以上
- 建立了三分量液闪光学模型，并使用大亚湾数据检验光学参数
 - 新模型完整描述了三分量液闪各个成分的发光、吸收和重发射过程
 - 模拟结果显示江门应采用**2.5 g/L的PPO**和**1.0 mg/L的bis-MSB**
 - 和直接使用大亚湾液闪配方相比，**总光电子数提高了5%**
 - 基于此结果，确定了PPO采购总量

过程	大亚湾光学模拟	新光学模型
闪烁光发光	bis-MSB发射	PPO发射
光子吸收	只有bis-MSB吸收	LAB、PPO和bis-MSB按吸收长度成比例的吸收光子
重发射	只有bis-MSB重发射	LAB吸收的光子无重发射；PPO、bis-MSB吸收的光子按照各自QE重发射



天然放射性杂质测量

- 江门实验要求液闪中 ^{238}U 、 ^{232}Th 含量均小于 10^{-15} g/g
 - 纯化系统设计了蒸馏、水萃和蒸汽剥离三个装置
- 新液闪灌入大亚湾AD1后，测量结果为
 - $^{238}\text{U} = (5.5 \pm 1.1) \times 10^{-15}$ g/g, $^{232}\text{Th} = (2.3 \pm 0.8) \times 10^{-15}$ g/g (0.5 g/L PPO)
 - $^{238}\text{U} = (2.7 \pm 0.3) \times 10^{-14}$ g/g (4.0 g/L PPO + 13 mg/L bis-MSB)

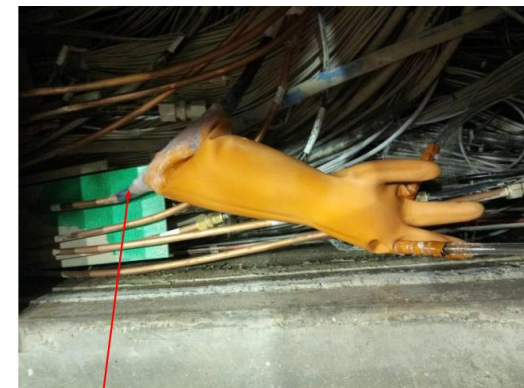
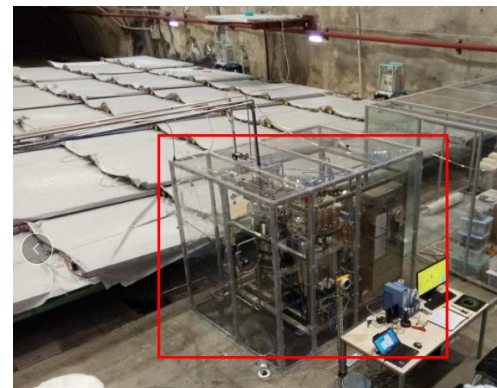
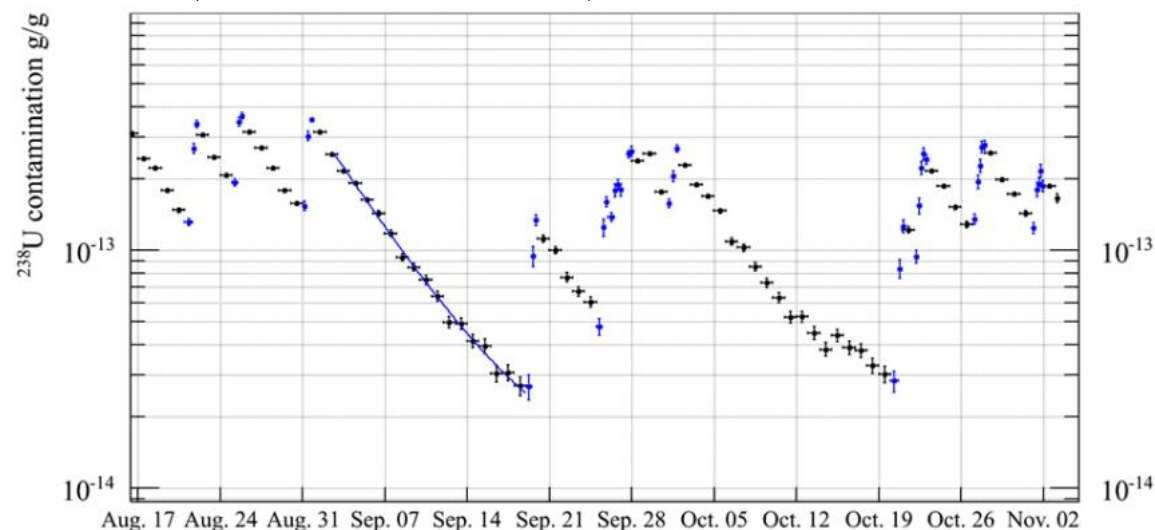


- 放射性超标可能原因:
 - PPO带入的放射性
 - ^{222}Rn 污染
 - 大亚湾GdLS残留 (约20L)

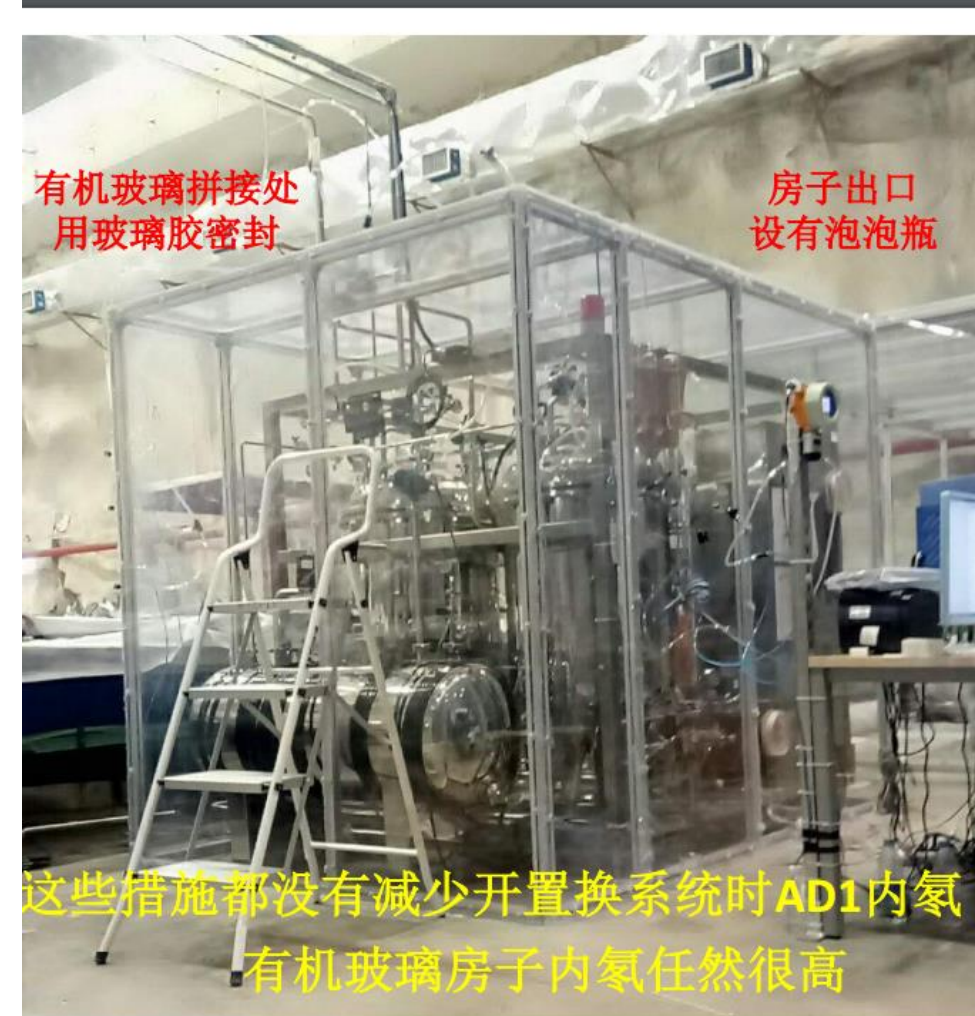
氦污染

- 发现探测器中 ^{222}Rn 本底和循环系统开机正相关
- ^{222}Rn 是 ^{238}U 的一个子核，是低本底实验天敌
- 实验结果说明循环系统或AD气体覆盖有漏
- 目前结果倾向于AD气体覆盖
 - 建造有机玻璃房保护置换系统
 - 氦封所有气体管路接口
 - 为江门实验积累了丰富的氦防护经验。。

探测器中 ^{222}Rn 本底和循环系统开机（蓝色点）正相关



氦污染



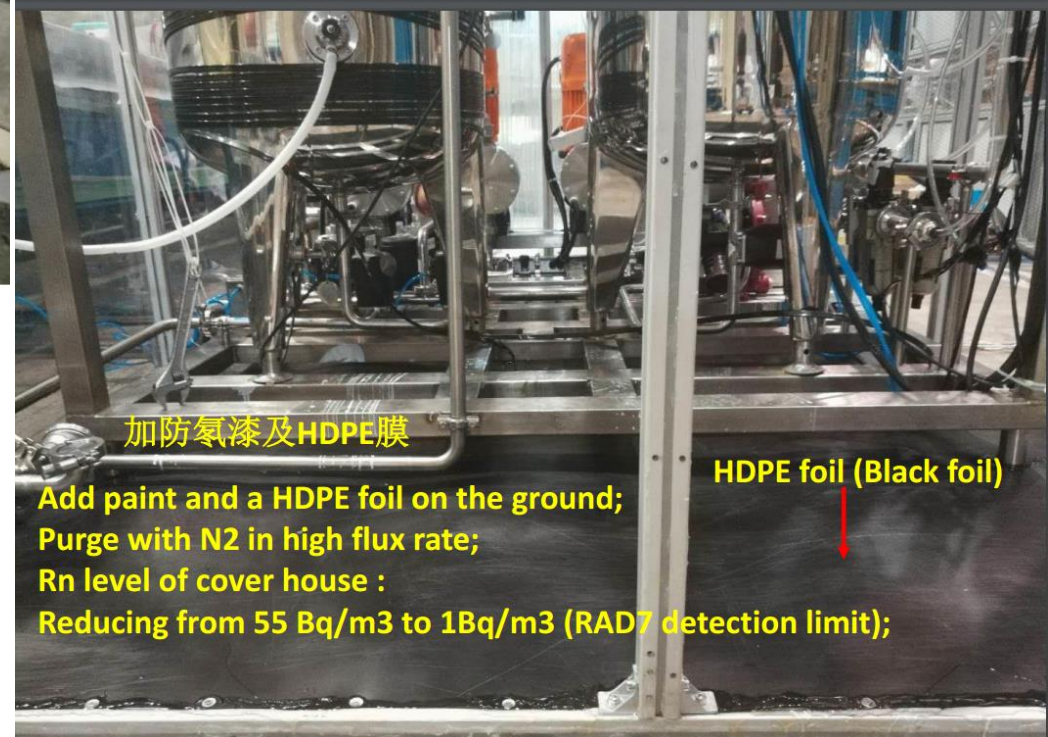
使用1cm厚有机玻璃将整个置换系统罩住，氮气保护



液管接头处加氮气保护

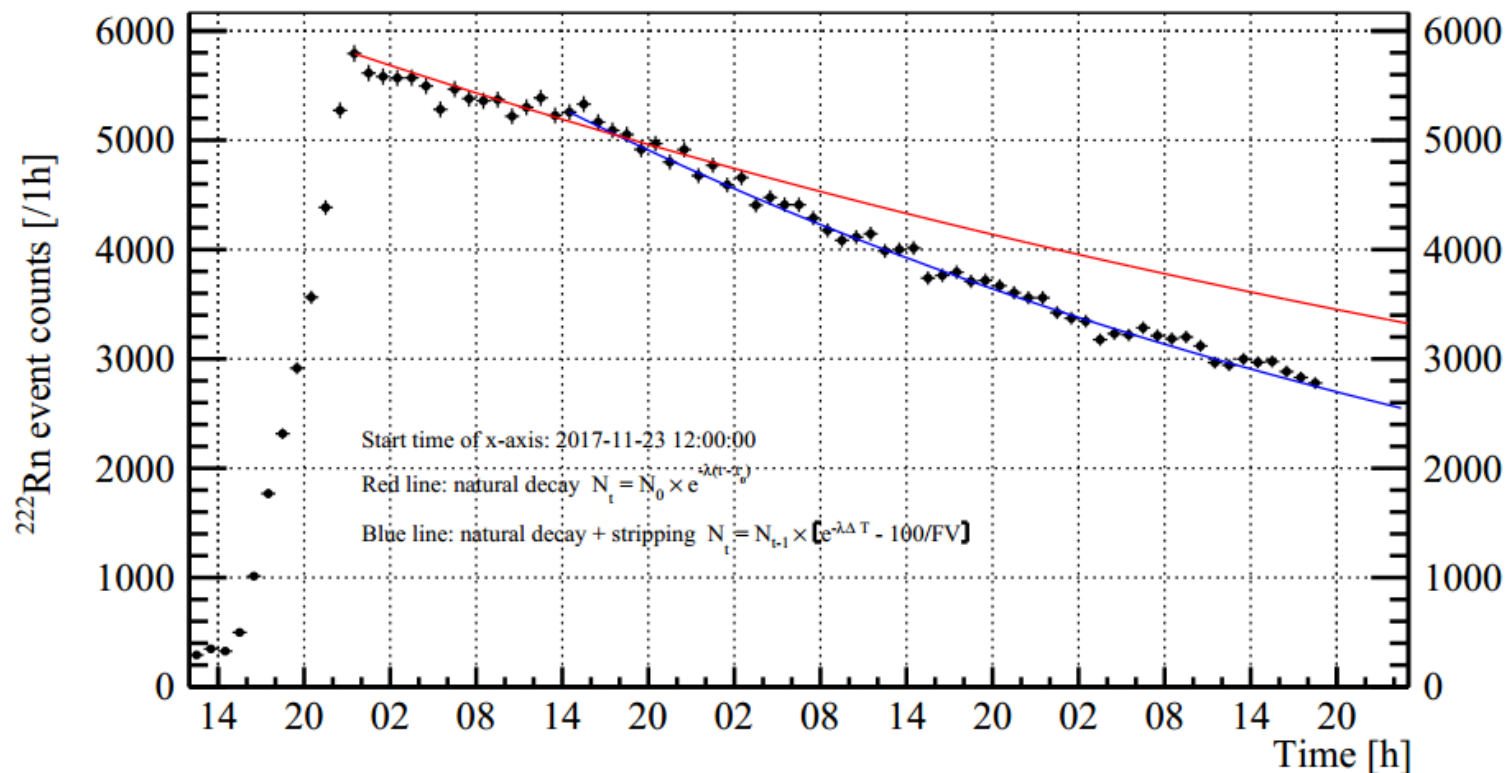


气动泵改氮气加压



在线循环纯化

- 蒸汽剥离设备可以有效移除 ^{222}Rn 但效率未知
- 11月23日开始，在探测器取数的同时，以100 L/h的速率循环和纯化液闪
- 实验结果表明：
 - 在线纯化是可行的，可以推广到江门实验
 - 蒸汽剥离对 ^{222}Rn 的去除效率大于90%



总结

- 针对液闪探测器的三个核心问题，开展了大亚湾液闪置换实验
 - 能量非线性：掺 ^{40}K 液闪刻度
 - 光产额优化：不同发光物质配比下光产额测量和光学模型研究
 - 放射性纯度：液闪纯化，在线循环纯化， ^{222}Rn 检漏等
- 通过置换实验，积累了液闪生产、纯化的宝贵经验
- 世界上对液闪光学和能量响应最深入的研究
- 多篇技术文章准备中

Backup

