



Westlake University | DM and neutrino lab

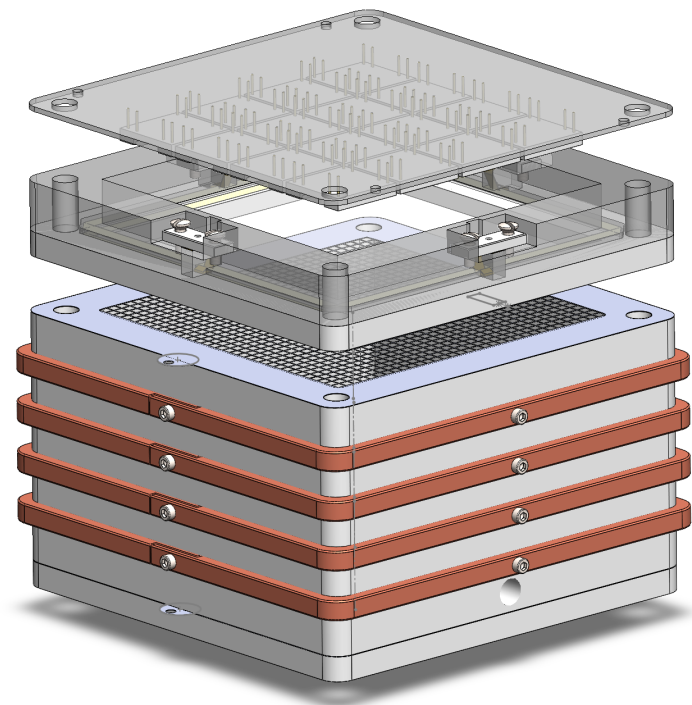
单相液氩中微子原型机研发

报告人: 王笑宇 (西湖大学)

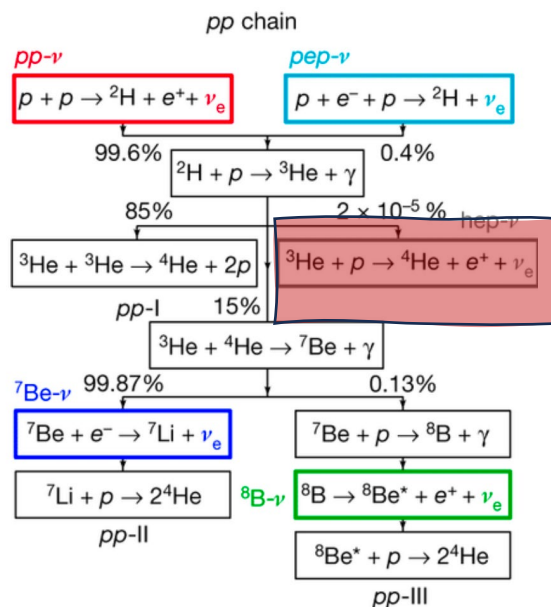
合作单位: 西湖大学/清华大学/UCSD

中国物理学会高能物理分会第十二届全国会员代表大会暨学术年会

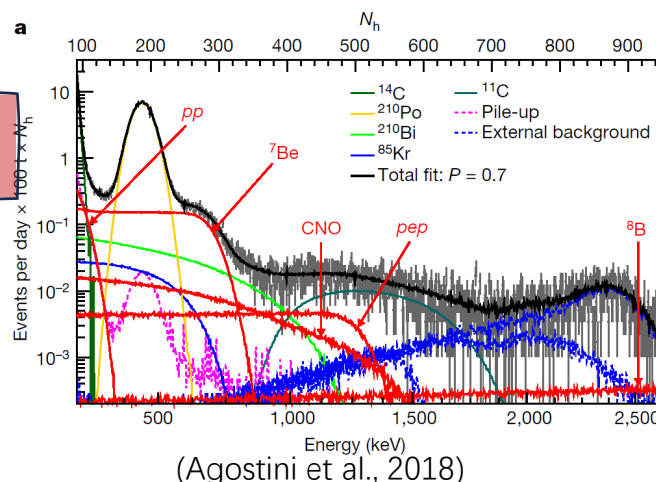
广州, 2026年7月16日



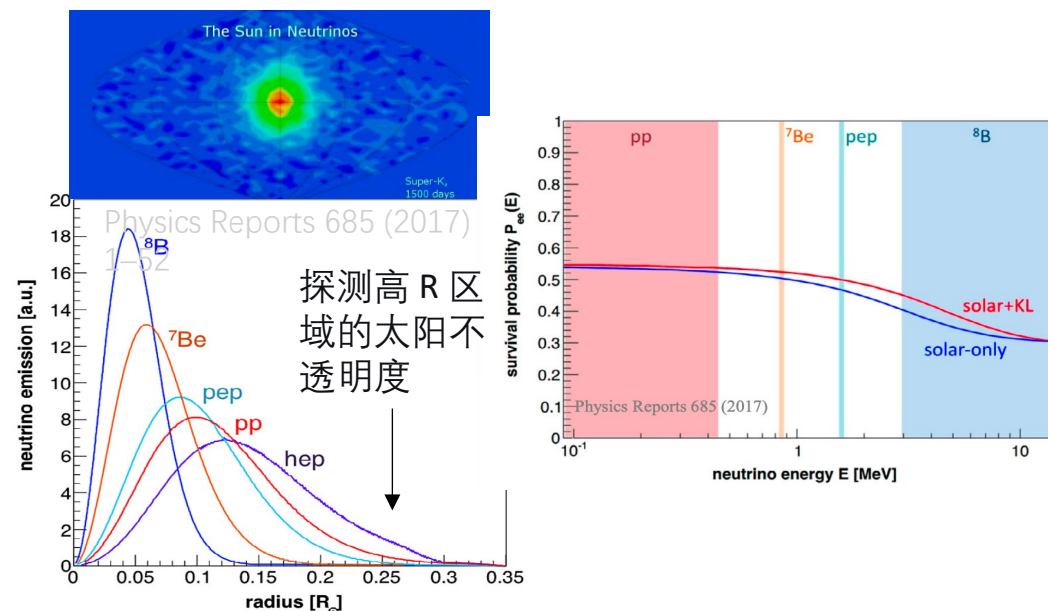
pp链太阳中微子：太阳中微子的主要来源



? hep 中微子



太阳中微子能谱与探测信号

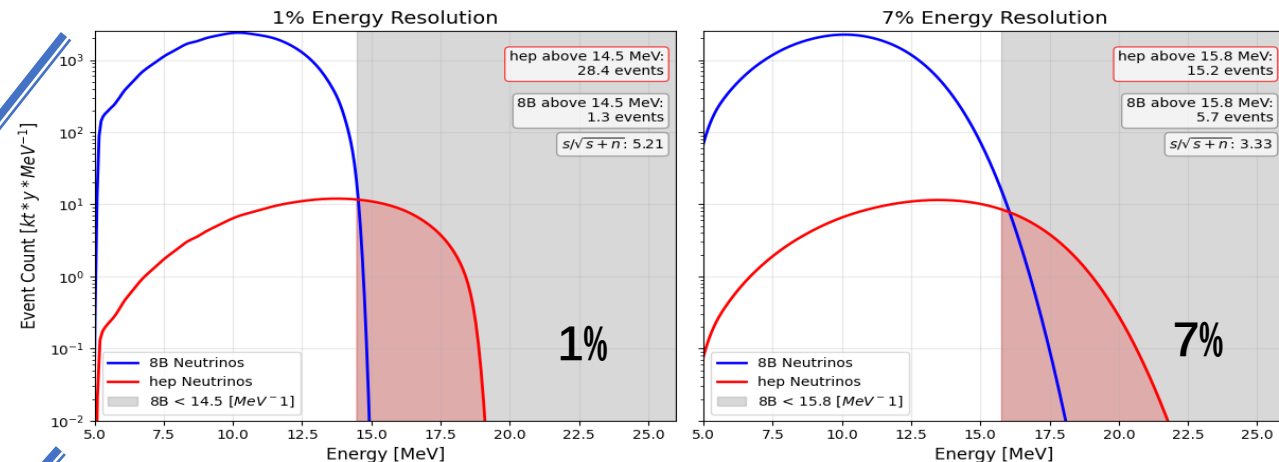
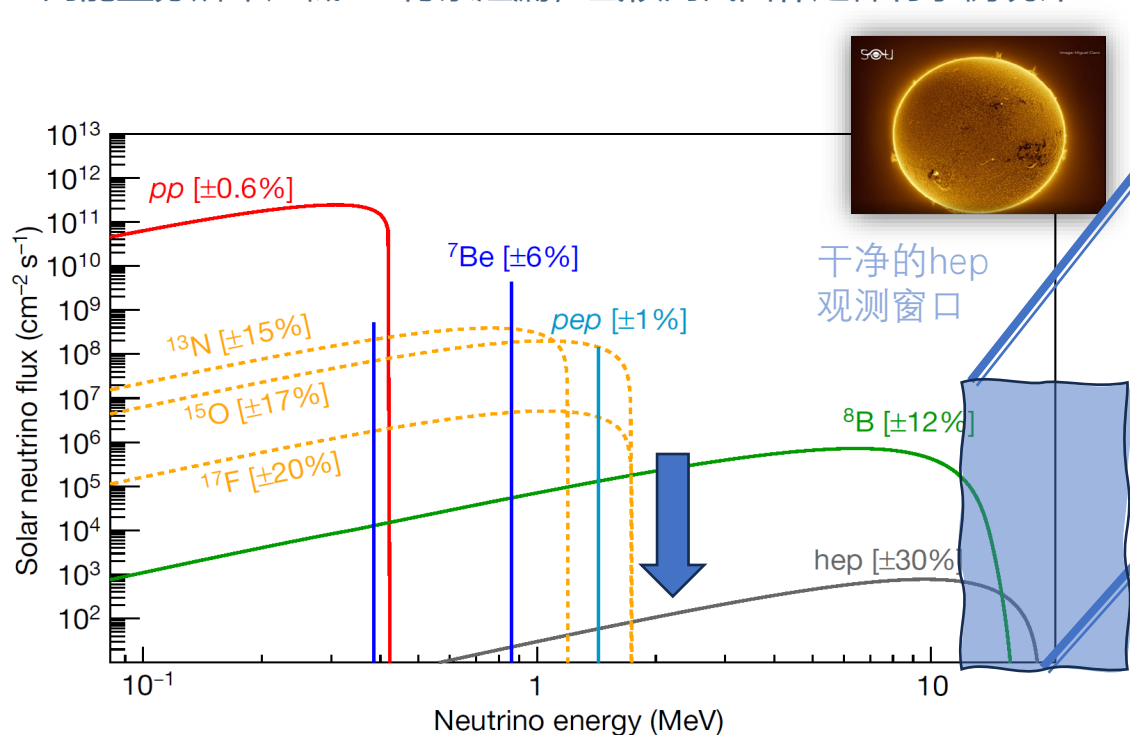


物理意义

- hep太阳中微子是pp链中微子谱的最后一块缺失拼图，目前**仅有实验上限约束**；
- ${}^8\text{B}$ 与 hep 中微子产生于靠近太阳核心的高温区域，**是研究太阳标准模型的重要探针**。
- 在数 MeV 及以上能区，太阳中微子的味转化受 MSW 物质效应显著影响，**可精确检验标准振荡图像**。

液氙 TPC 通过优异的能量分辨率获得干净的 hep 高能尾部观测窗口

高能量分辨率压低 ^8B 背景泄漏，氙核高截面补足稀有事例统计



■ 高能量分辨率压低 ^8B 背景泄漏

分辨率由 7% 变为 1% 时，信噪比大幅度的提升

■ 通量低, 需要足够的 hep 中微子数量

hep 中微子通量比 B-8 小三个数量级，探测需要更大反应截面+质量

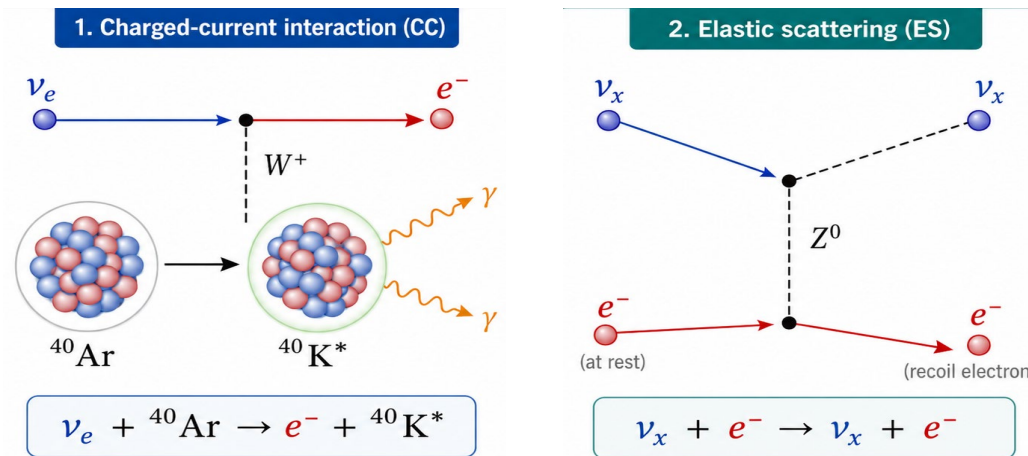
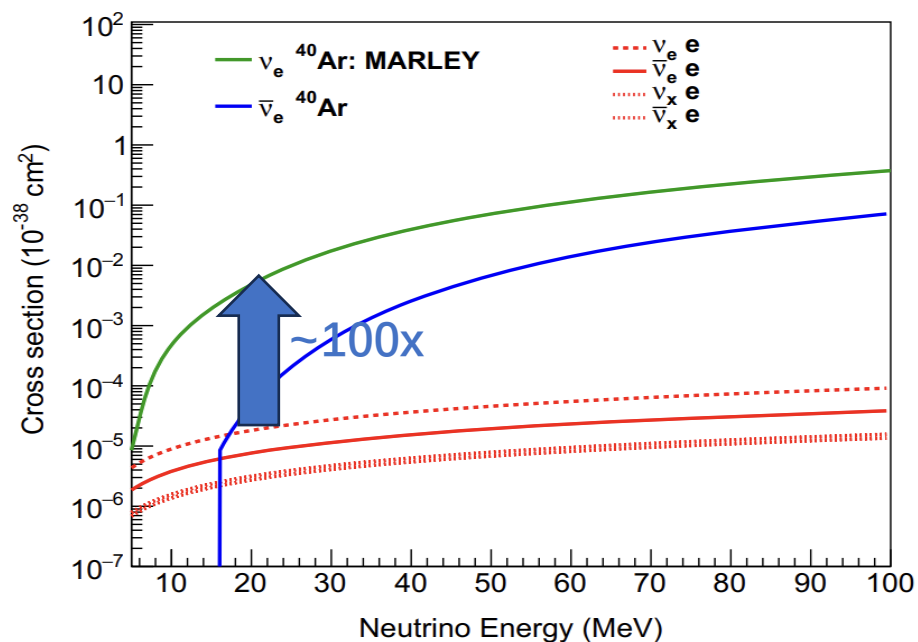
hep 中微子：通量低，除尾部外和 ^8B 大部分重合

利用液氩探测高能中微子

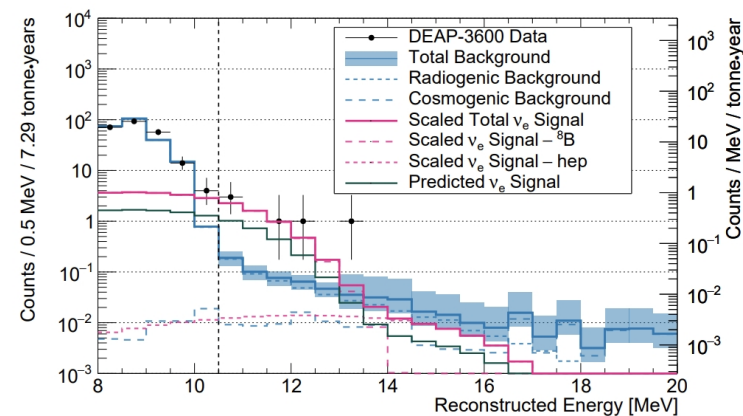
带电流反应随能量增强，截面约为 ES 的 100 倍；电子与 γ 末态提供清晰识别特征

对于高能太阳中微子液氩 CC 通道有一定优势

- 在太阳中微子能区相比 ES 高两个数量级。
- 反应末态 $e^- + \gamma$ ，核子退激发提供更多的特征



实验验证 | DEAP-3600已给出氩上太阳中微子反应截面高于理论预期



Source: DEAP-3600, First evidence of neutrino absorption on argon using ^{8}B solar neutrinos

液氩把低通量变成可观测：高截面提升事例率，电子 + γ 末态增强信号判别。

NOAr中微子实验简介

NOAr
(Neutrino Observatory with Argon)

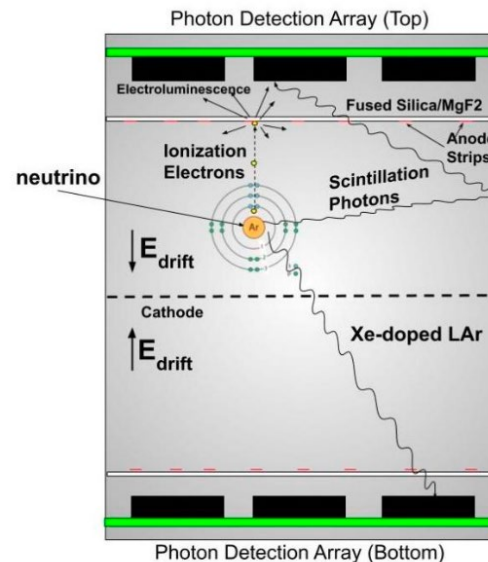


清华大学
Tsinghua University



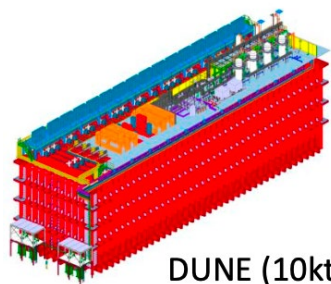
UC San Diego

单相液氩投影室 (LArTPC)



可扩展性

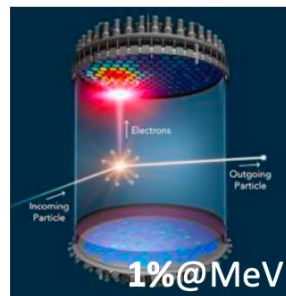
- **低成本**
天然大气氩
- **单相**
无复杂物理界面, 支持千吨级规模扩展



DUNE (10kt)

≈ 1%能量分辨率

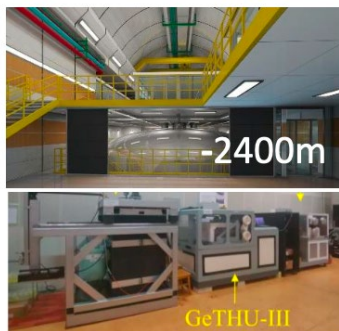
- **电荷信号**
S1+S2(液体电致发光)
- **Xe 掺杂**
增加量子产额, 并实现波长位移



PandaX, LZ, XENON

低本底

- **岩层覆盖**
CJPL, 宇宙线本底
- **低本底测量参考**
GeTHU平台



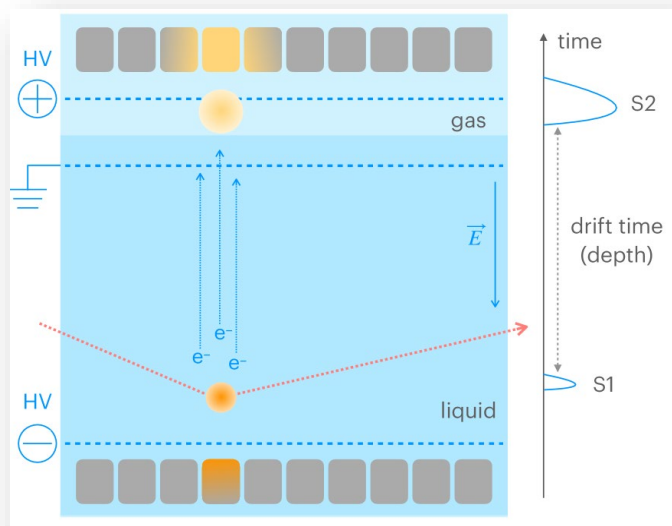
GeTHU-III

单相液氩 TPC：保留双相读出能力，降低液位控制复杂度

从双相到单相：性能提升，工程复杂度下降

双相 TPC

在气相电子产生电致发光



PandaX, XENON, Darkside

保留双相的探测能力

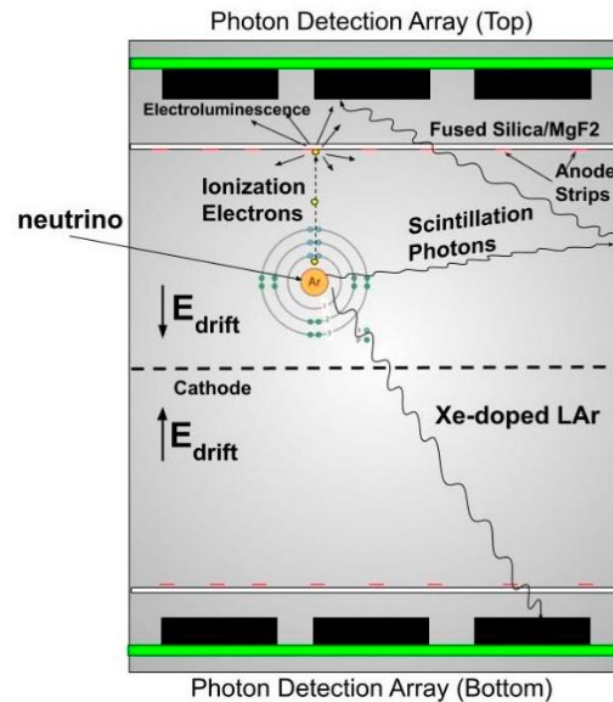
- 光子/电子双通道读出能力
- 保留三维位置重建能力

NEW!

- S2 在液相产生，无需气液界面控制
- S2 产生不受重力限制

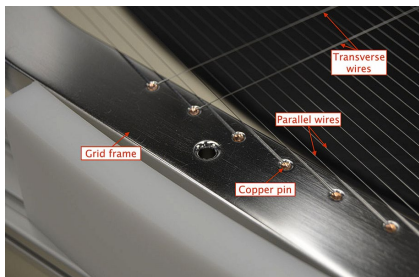
单相 TPC

在液相直接产生电致发光



在单相实现双相 TPC 的效果

基于 掺Xe增强 S2 信号的**单相 LArTPC**

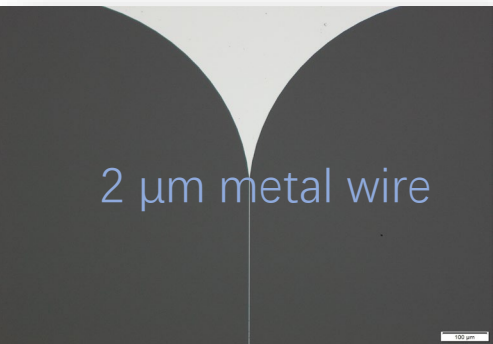
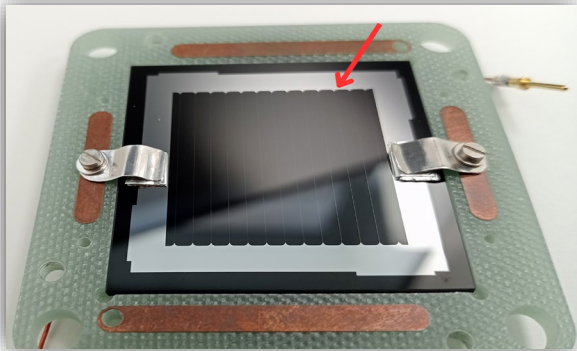


大尺寸电极的形变
导致电场畸变

液相电致发光：微纳电极设计

主要难度在液相实现电致发光

(Martínez-Lema et al., 2025)c



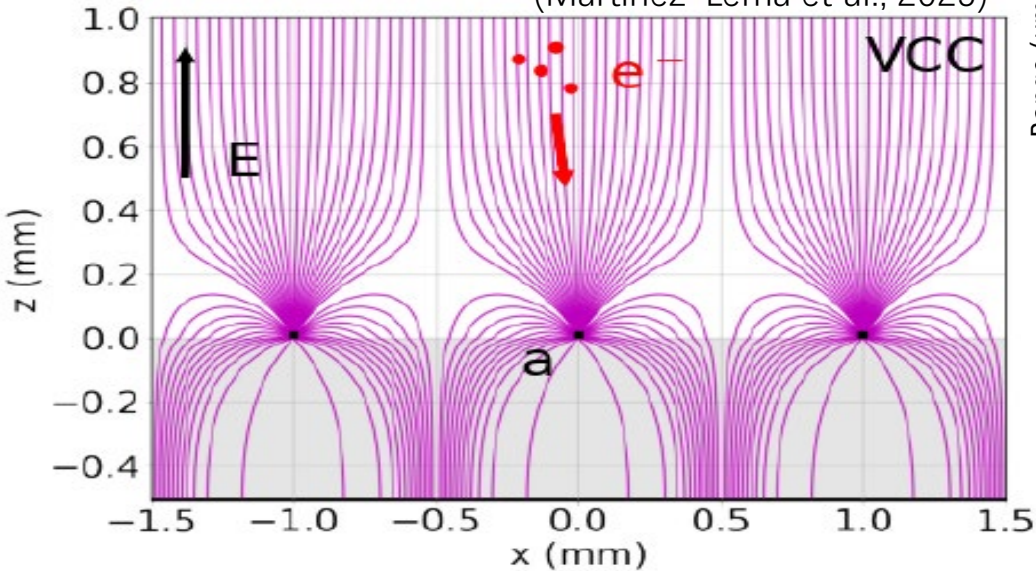
气相电致发光
 $E > 1 \text{ kV/cm}$

液相直接电致发光
 $E \gtrsim 4 \times 10^2 \text{ kV/cm}$

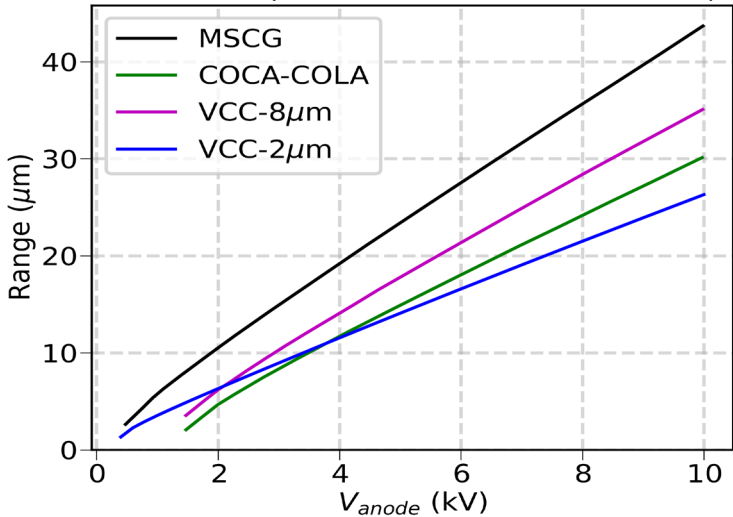
微米级电极丝结构 在局部形成超高电场

电极丝附近的电场分布

(Martínez-Lema et al., 2025)



(Martínez-Lema et al., 2025)



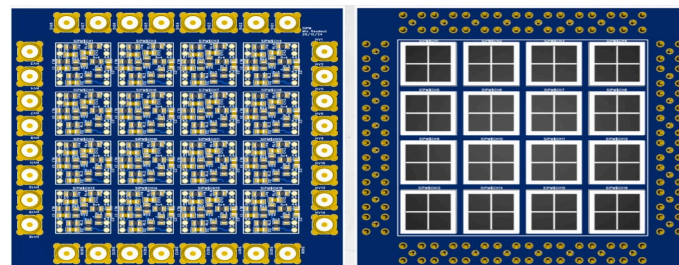
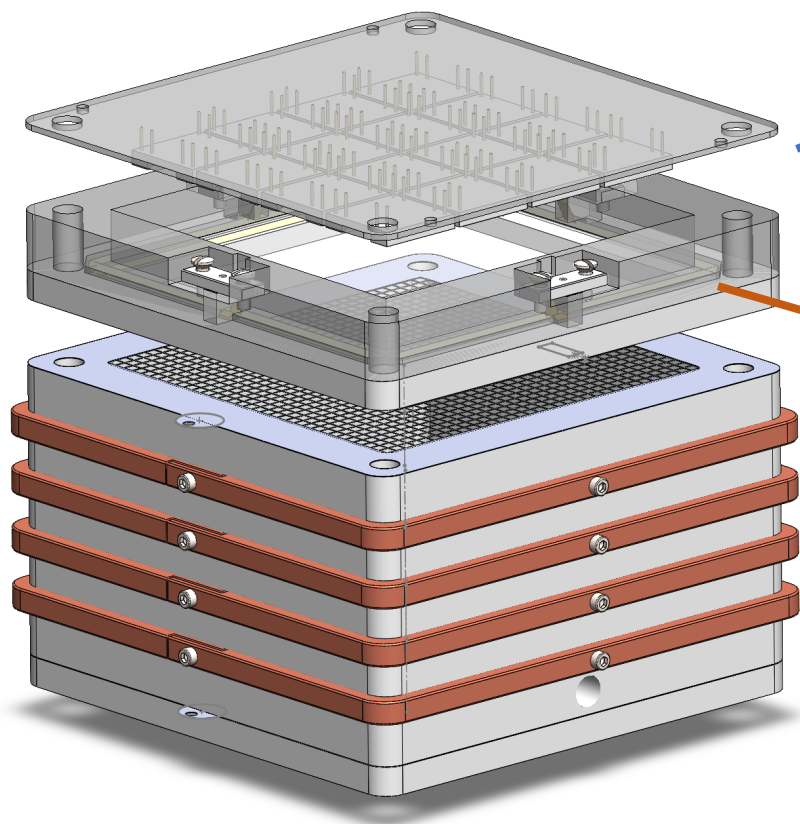
电场强度大于电致发光的区域中
可以产生电致发光

- 验证液相电致发光的可行性
- 电极稳定性是主要的挑战



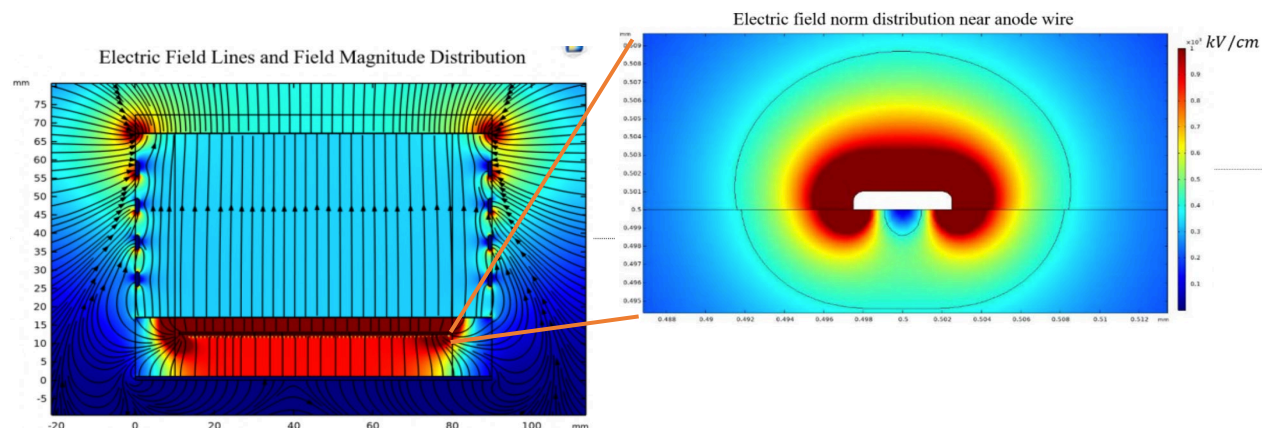
- 优化微丝阵列几何设计
- 提高电场的稳定性
- 氩中产生液相电致发光

NOAr 液相光电双读出原型机设计



SiPM 读出板设计 Credit Yifei Zhao (Tsinghua)

- 4x4 个SiPM构成 PDU 单元
- 根据不同的探测器尺寸放置不同数目 PDU



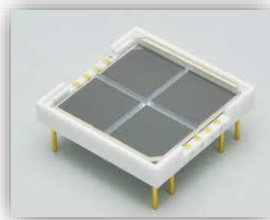
电极模拟 & 加工

- TPC 漂移电场模拟
- 电极丝区域 电致发光场模拟

赵一飞11:30报告

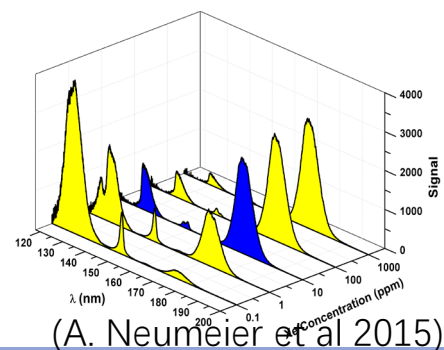
LAr SiPM读出测试

1. 测试 SiPM 在 LAr 中的读出
2. 对有窗/无窗的 SiPM 进行比较
3. 采集分析LAr 波形



Ar中Xe掺杂

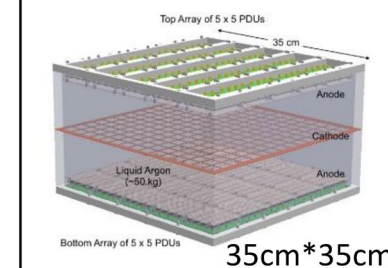
Xe 掺杂调节 Ar 发光特性



(A. Neumeier et al 2015)

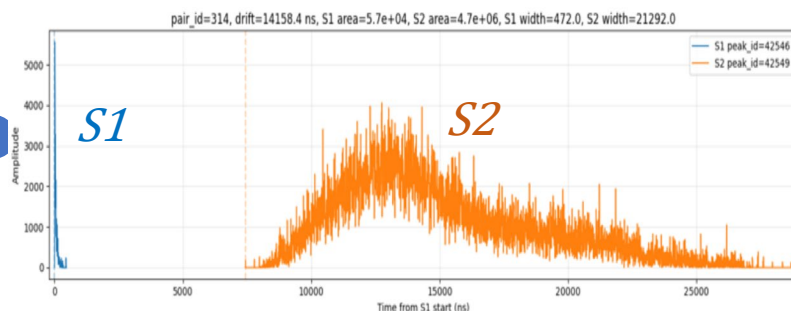
NOAr 原型机

NOAr-proto
50kg@Westlake



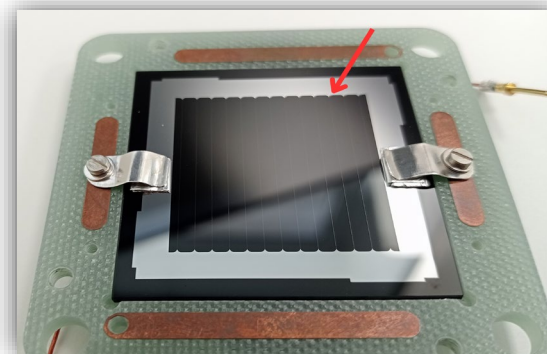
LXe 数据采集和系统测试

1. LXe 运行, 测试循环和纯化效率和慢控
2. S1,S2 数据采集-处理-分析框架的搭建

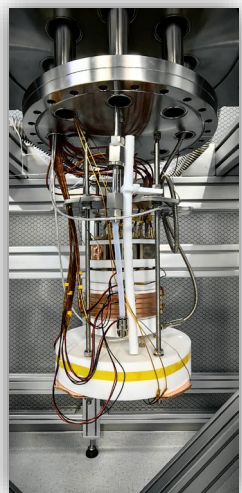


单相电极

测试电极工作情况, 电致发光效率

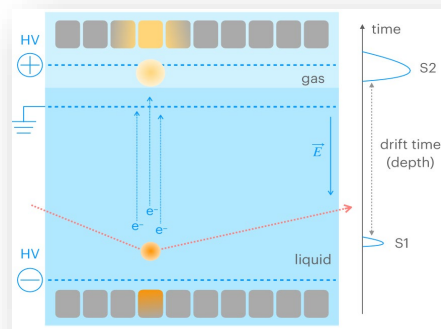


(G. Martínez-Lema et al 2025 JINST 20 P)



读出系统 SiPM 测试

- 测试比较 **SiPM 石英窗**对 SiPM 的影响
- 验证 SiPM 在 LAr (90K) 中读出, 刻度
- 测试 LAr **闪烁和电致发光**的波形

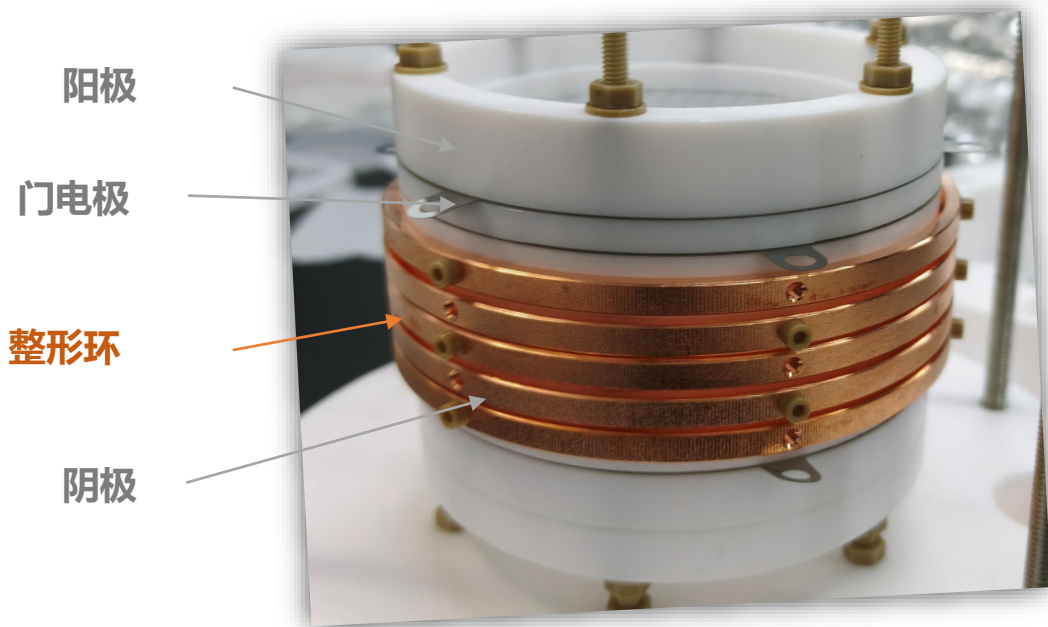
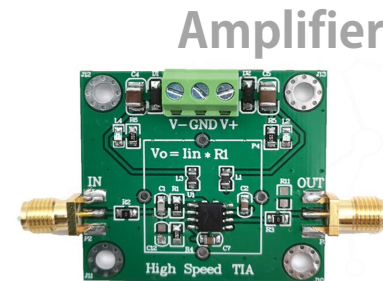


S1 ~ ns

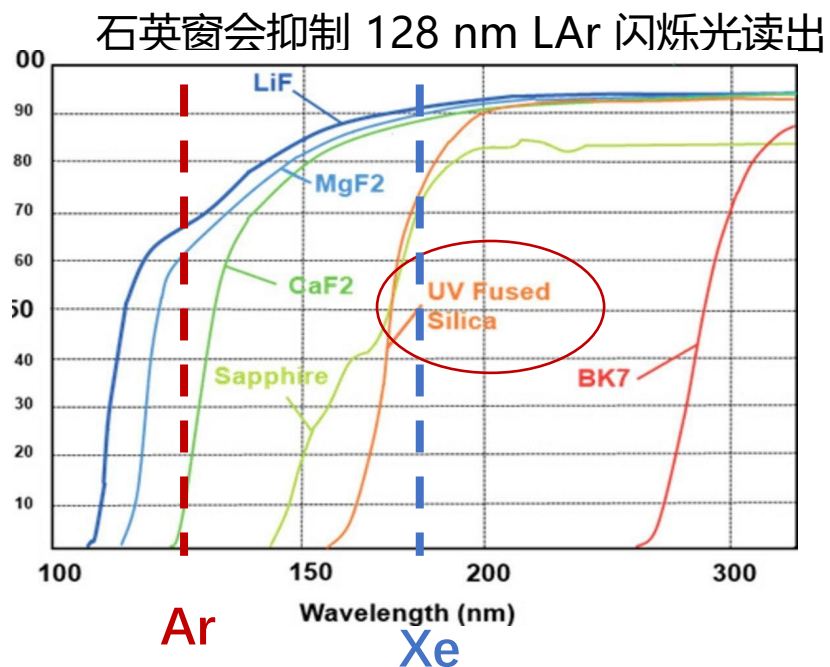


Hamamatsu VUV4 SiPM

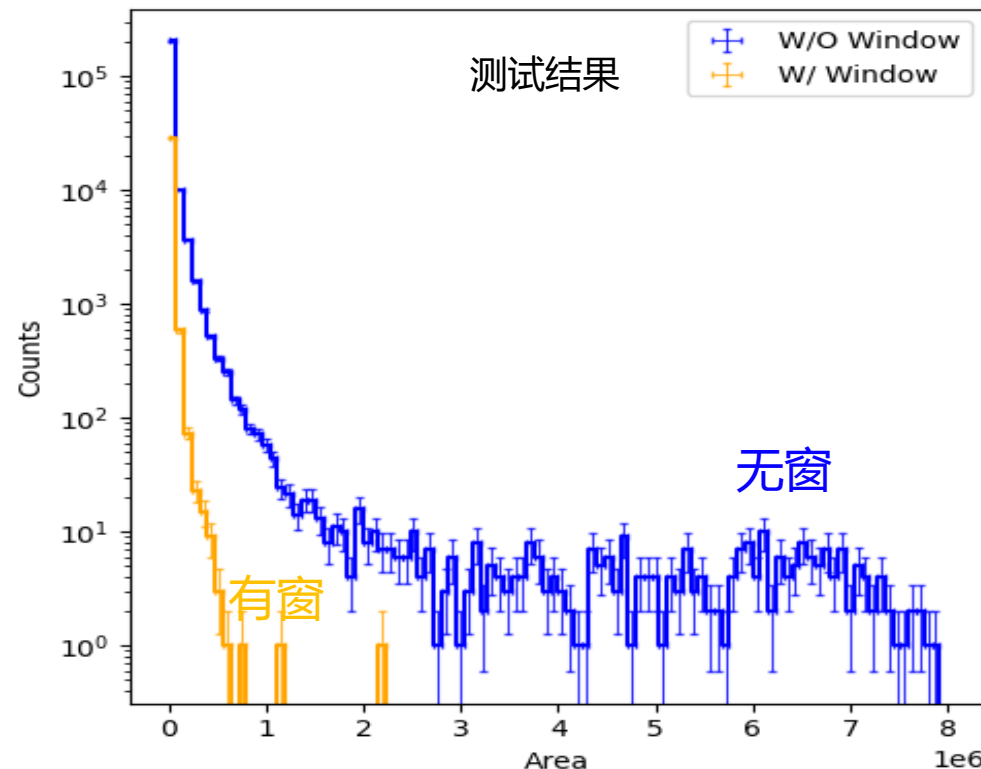
VX2730 Digitizer



测试有窗和无窗SiPM 对 LAr 光 (128nm) 读出效果



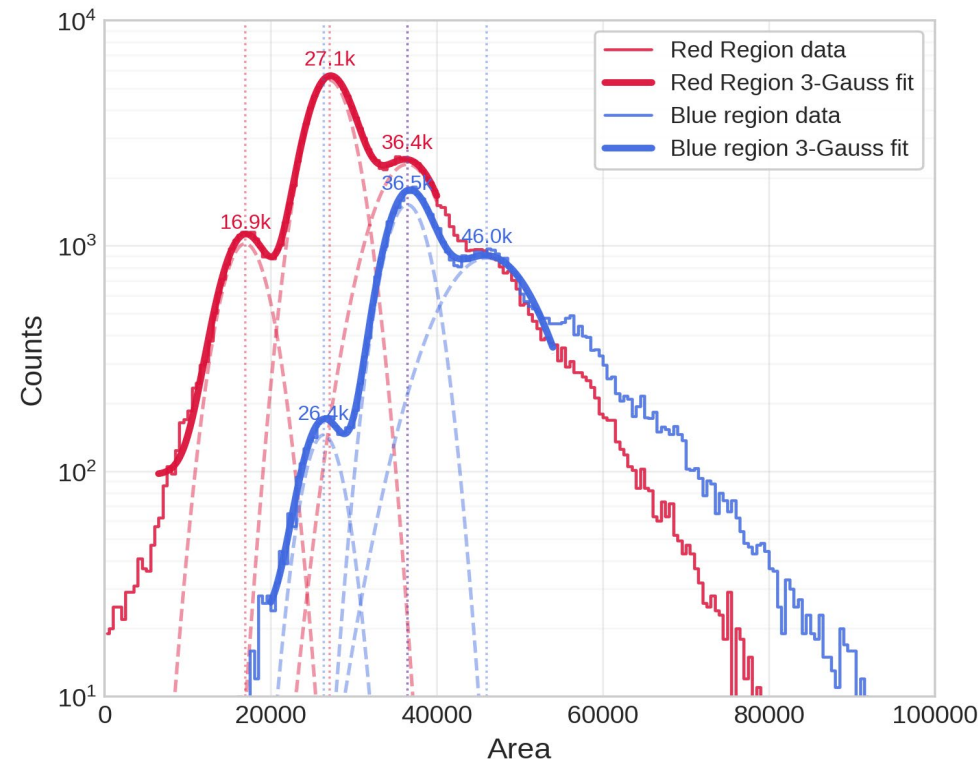
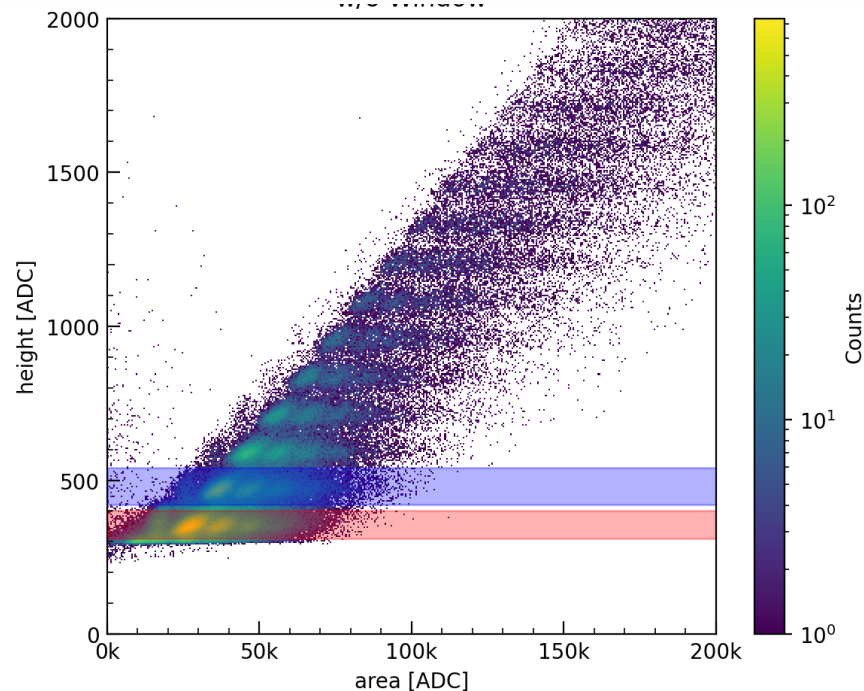
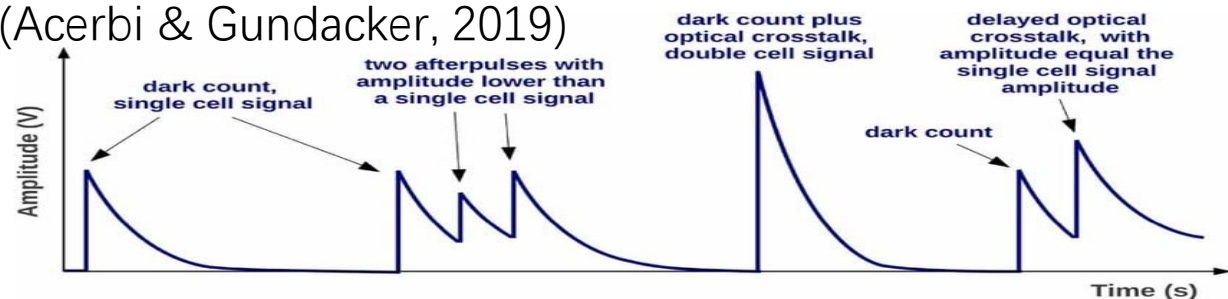
掺杂改变波长



- 对于LAr闪烁光, 无窗SiPM探测效率高于有窗
- 无窗SiPM可用于LAr光直接读出
- 通过Xe掺杂进一步提升光读出效率

在 LAr 温度下刻度 SiPM 的**单光子增益**，并研究**多维波形信息**

(Acerbi & Gundacker, 2019)

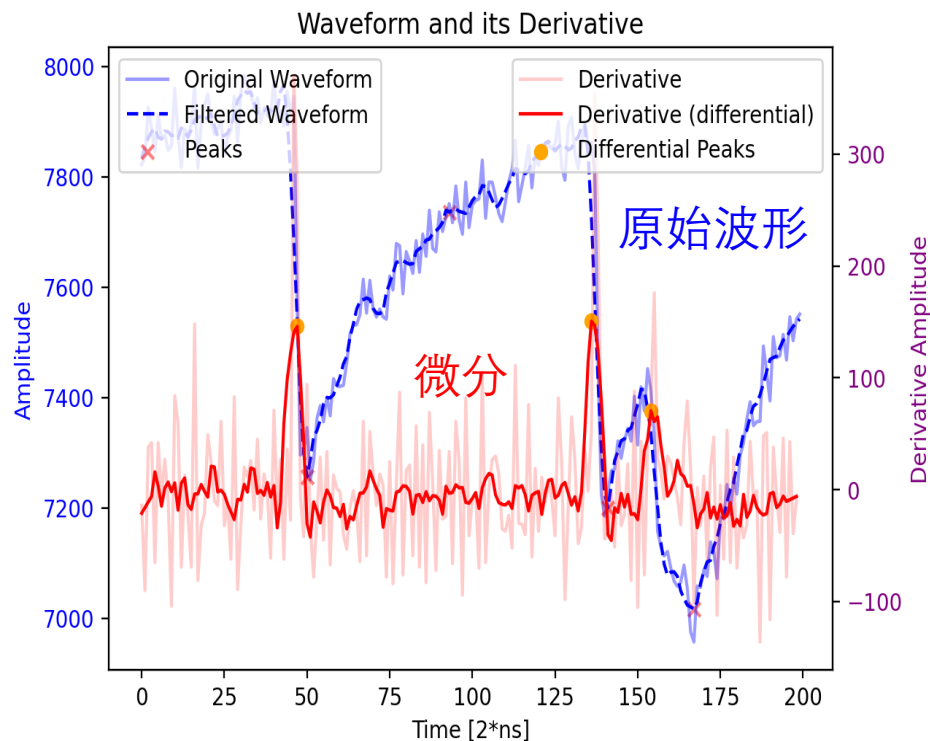


- 单光电子增益 1PE = 9850 ADC Area
- 波形存在**多维参数信息** (高度, 微分, 面积)
- 需继续研究pile-up影响

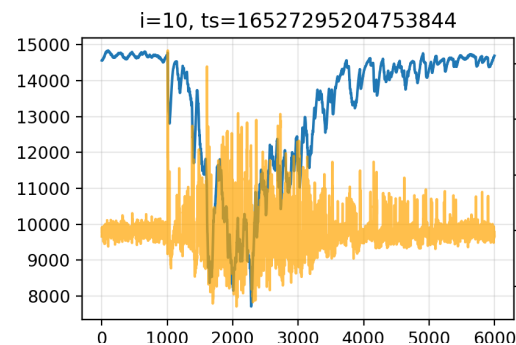
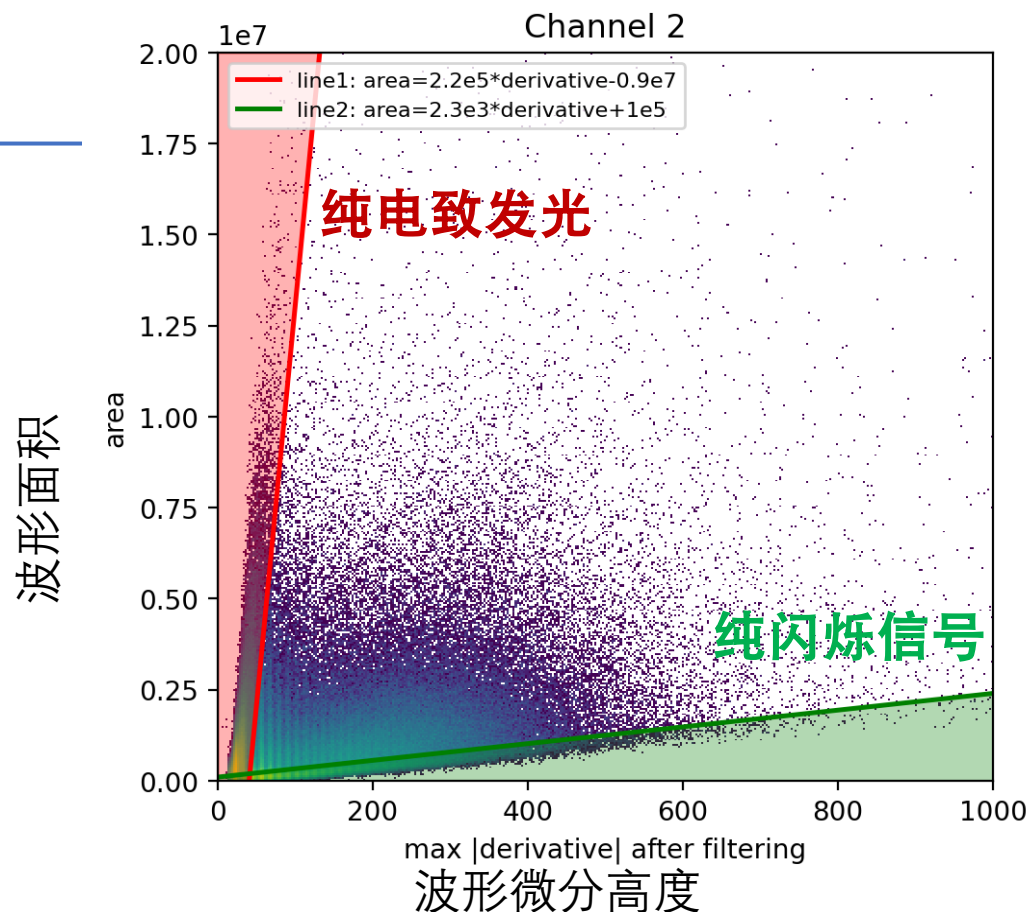
SiPM 接收到 LAr 闪烁光信号的 Area-height 分布

■ SG滤波 抑制高频的噪声

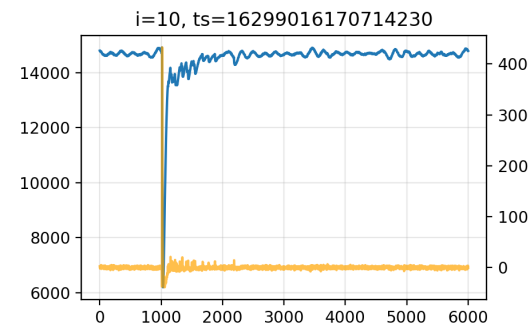
■ 寻峰算法 堆叠光子信号的分离



波形微分寻找上升沿特征,
用于分离堆叠光子



纯电致发光

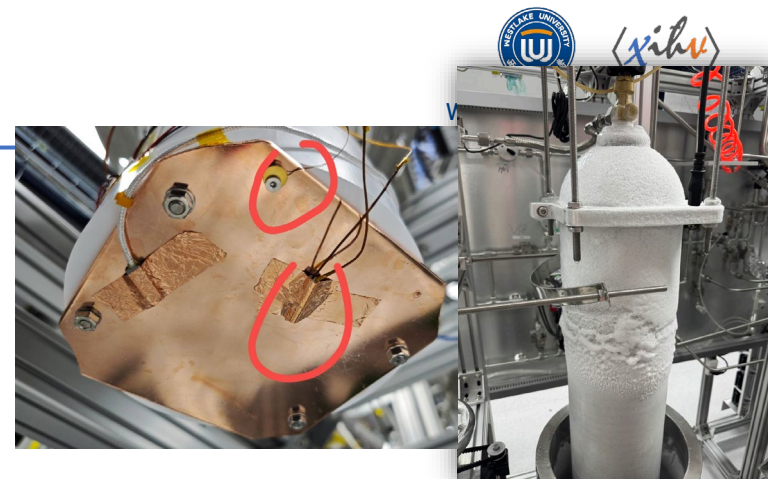


纯闪烁信号

LXe 惰性气体探测平台运行测试

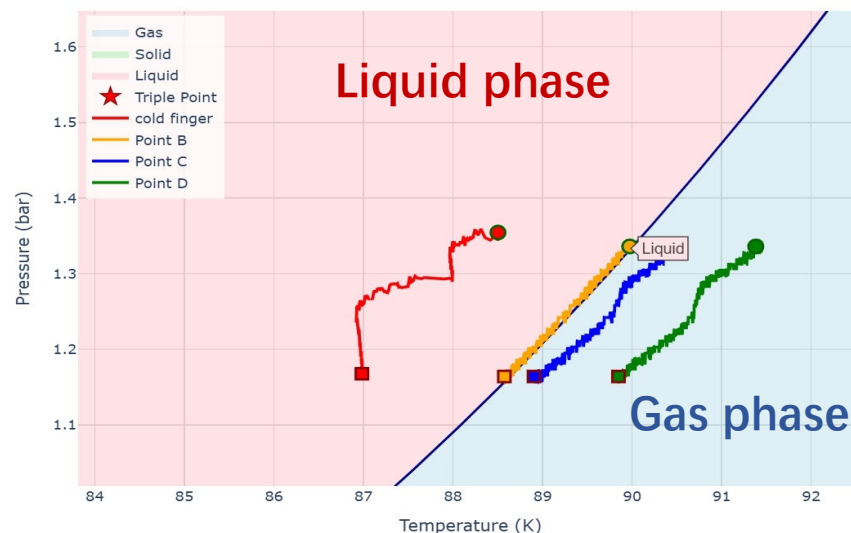
利用LXe作为系统参照，调试并验证探测器运行情况：

- 测试 循环系统慢控系统
- 通过 LXe 数据测试 S1,S2 配对, 位置重建等软件开发



- 通过流量计和加热电阻可控回收

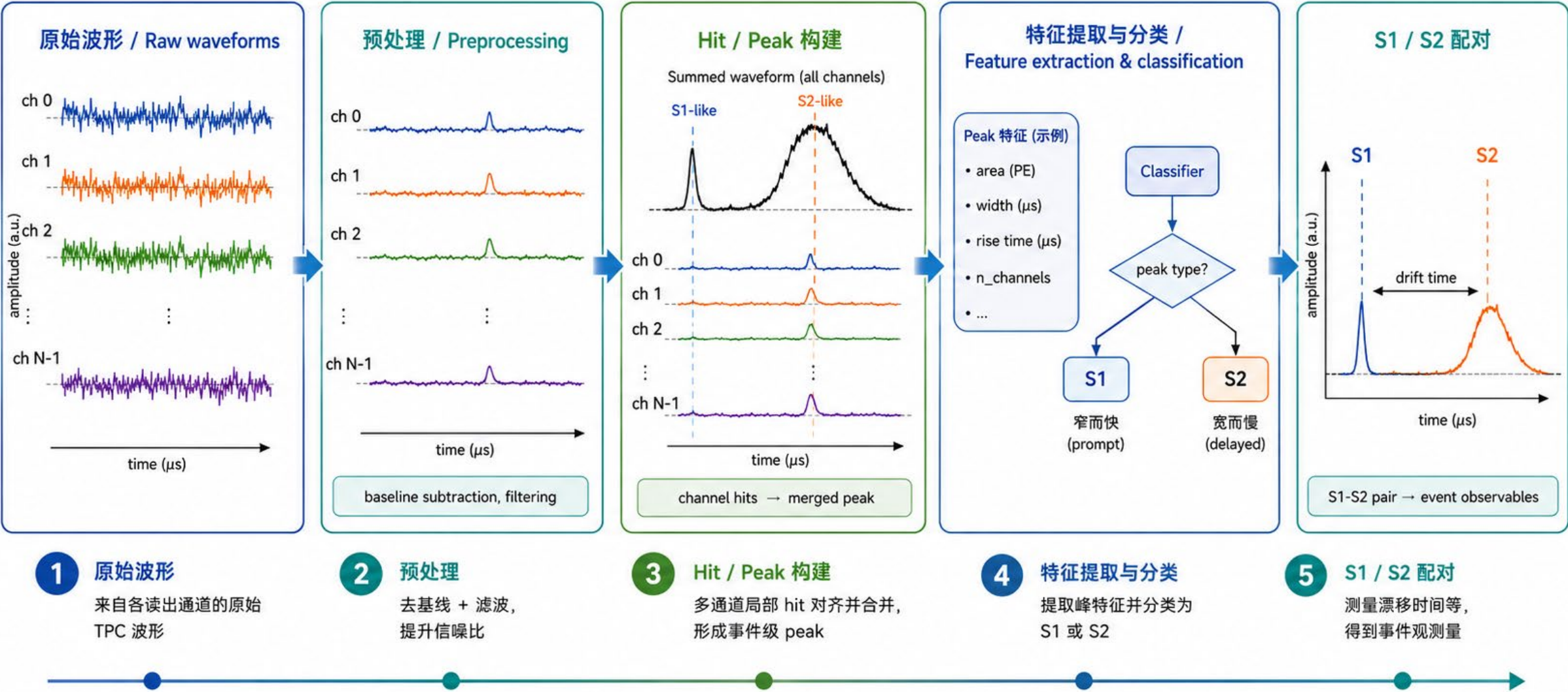
Hamamatsu R8520
PMT*



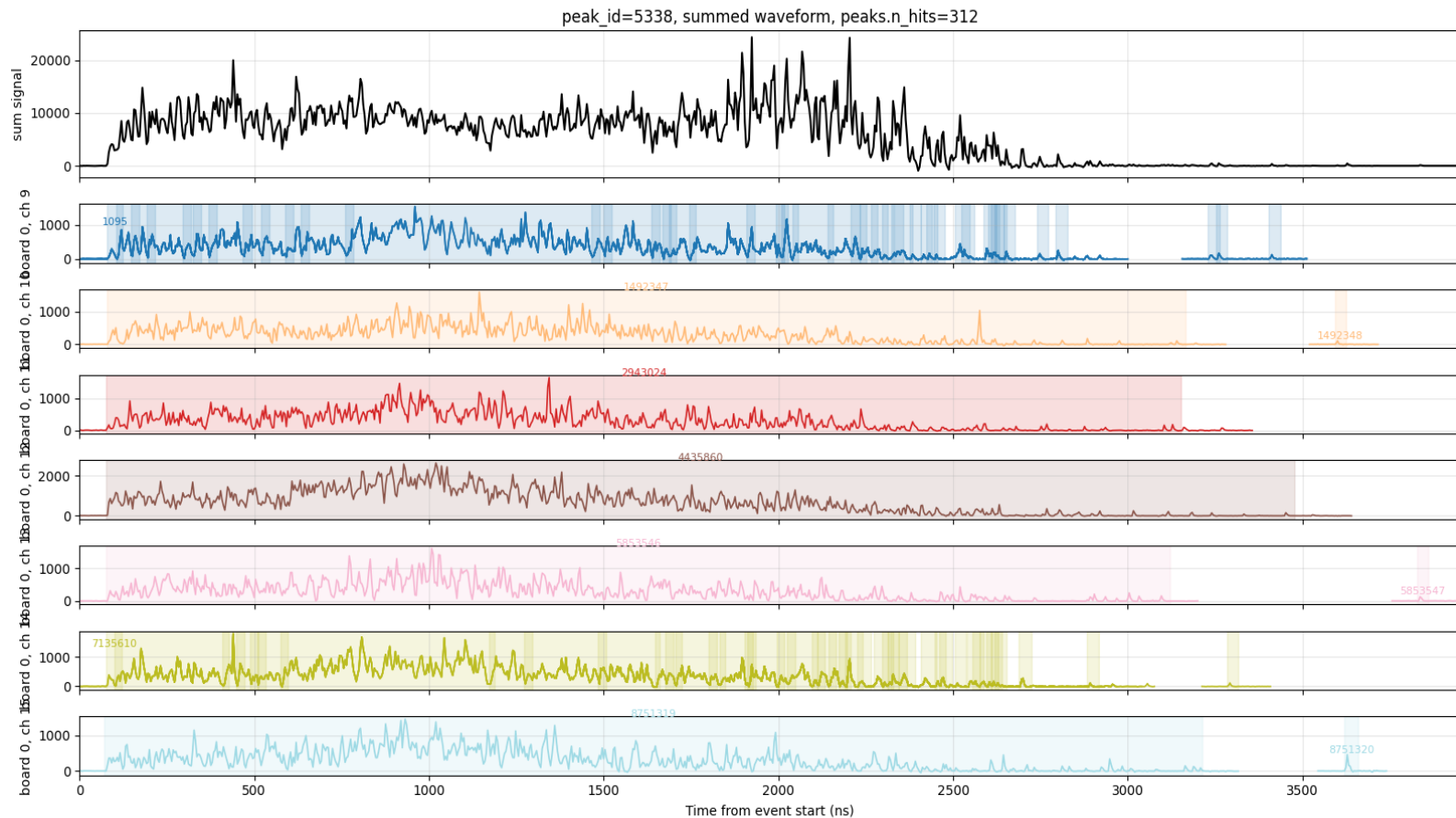
- 温度 & 压力传感器监测探测器相位状态



- 探测器监控面板开发和慢控系统调试

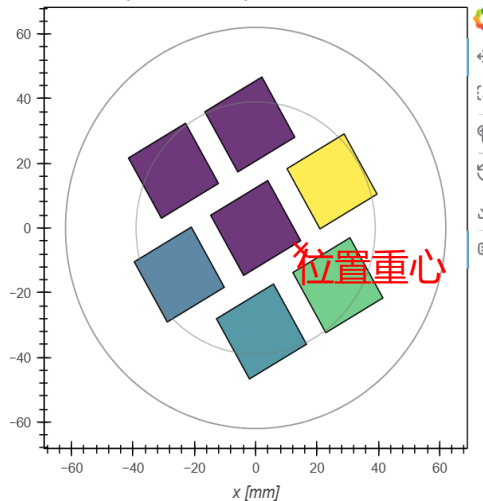


DAG (有向无环图): 1.复用中间结果; 2. 自动确定执行顺序; 3.插件化扩展

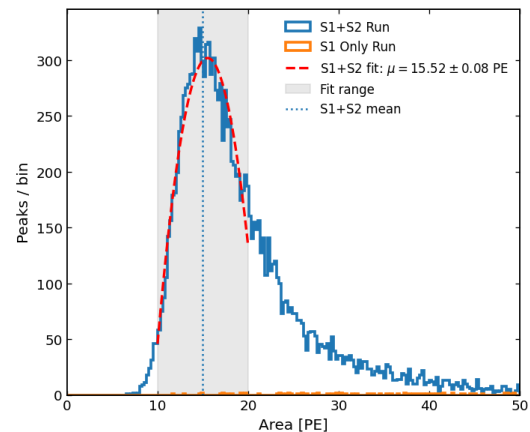


不同通道波形聚合/配对生成波峰 (peak)

Run 00188 peak 0: PMT map

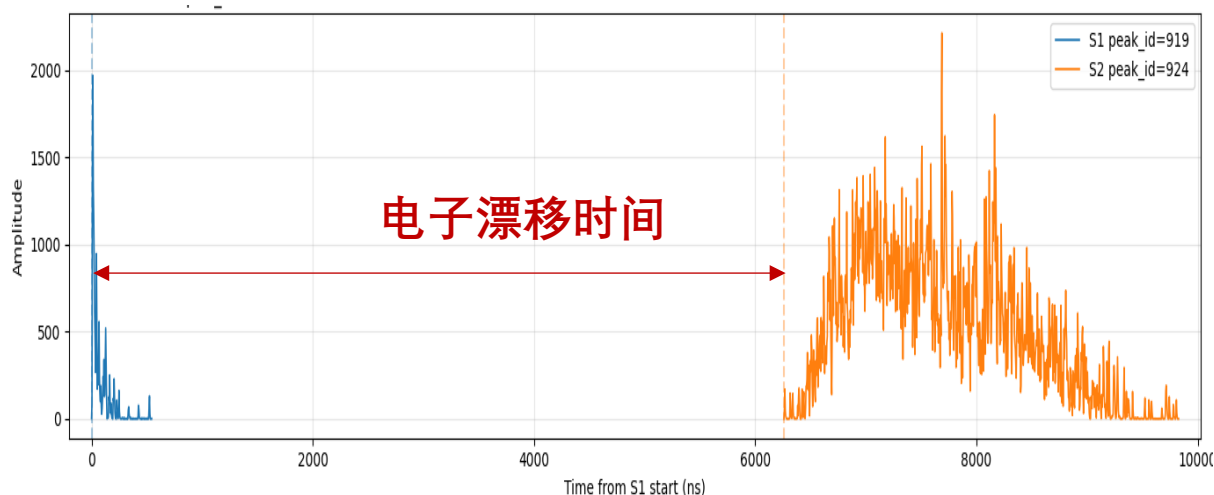


S2能量响应用于位置重建

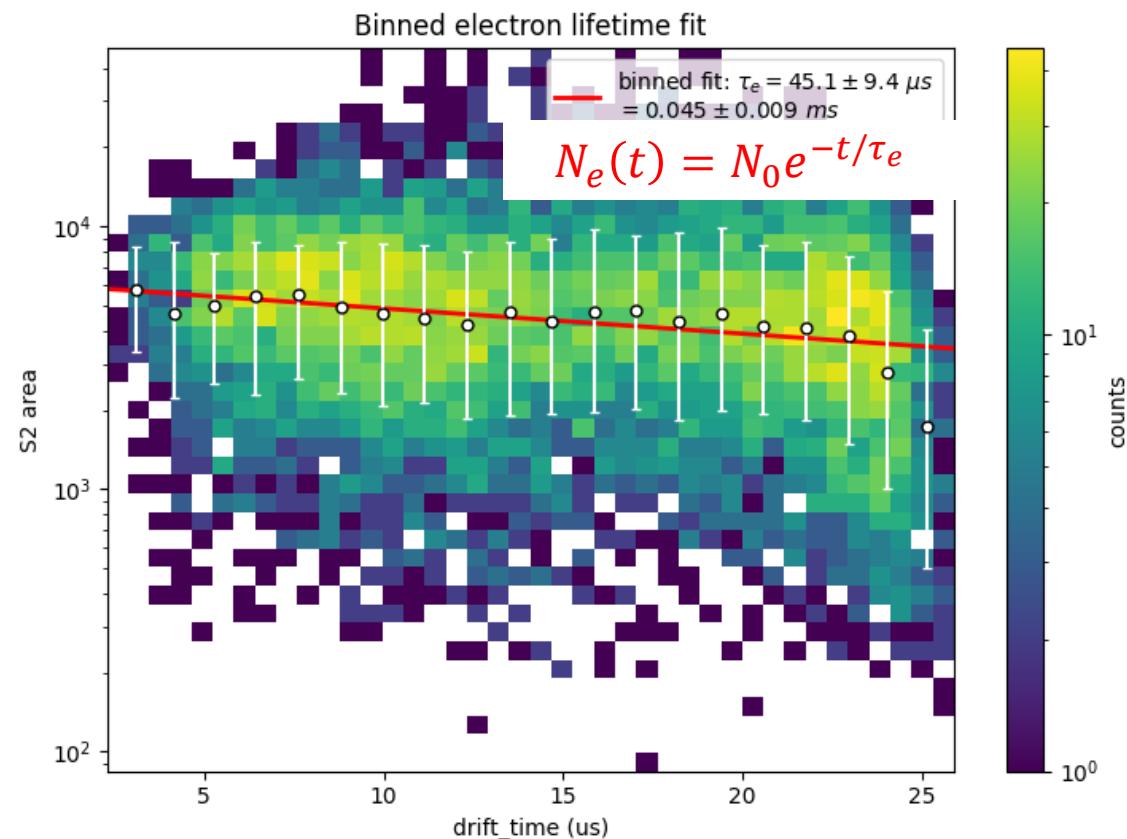


单电子增益标定

S1/S2 配对构建事件 (Event)



- 基于波形识别S1/S2
- 并配对为物理事件(event)



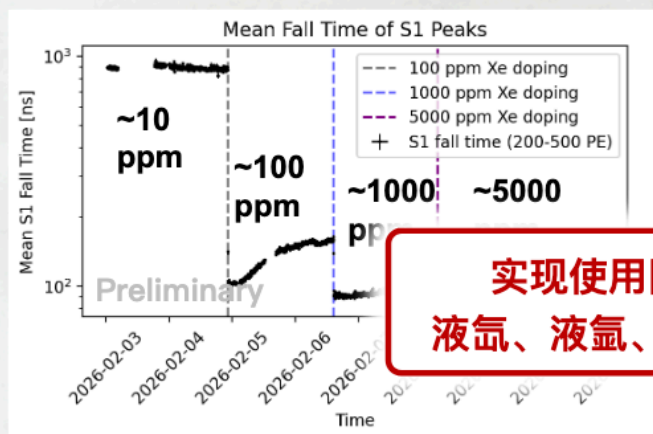
通过S2大小和漂移时间的物理联系进行拟合:

- 验证配对算法的有效性
- 得到电子漂移寿命 45 μs , 验证纯化效率

下一步: 对Ar/Xe掺杂进行验证

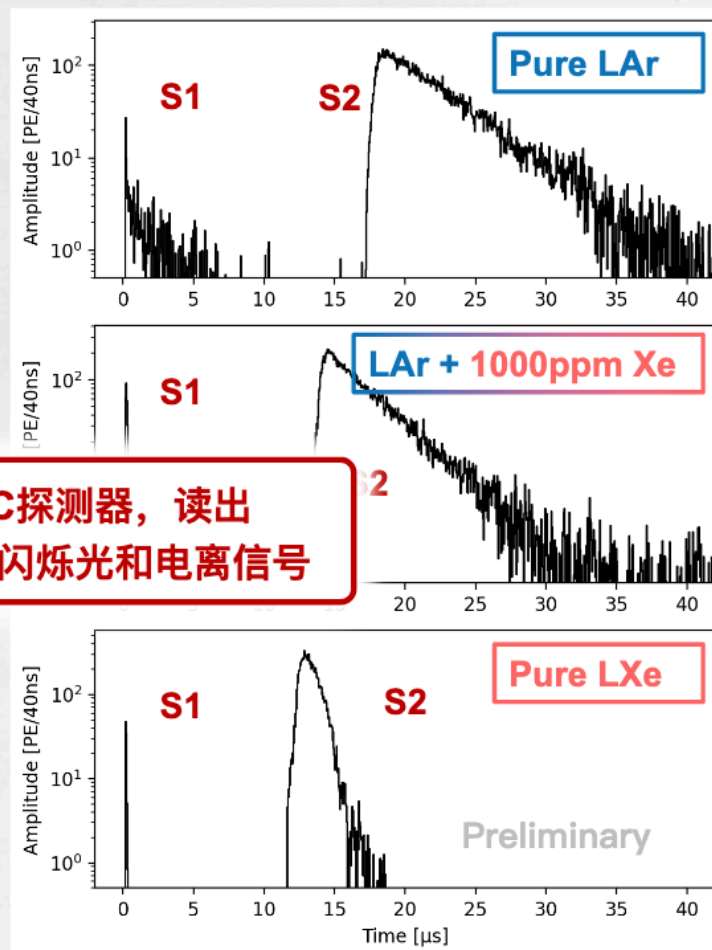
液氩掺杂氙探测器: 液氩掺杂氙信号

向液氩中掺入氙 (100ppm – 5000 ppm)



实现使用同一套TPC探测器, 读出
液氩、液氩、液氩掺杂氙闪烁光和电离信号

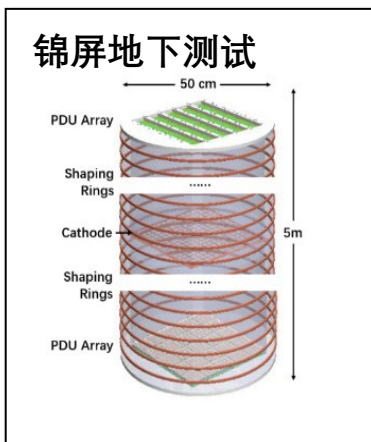
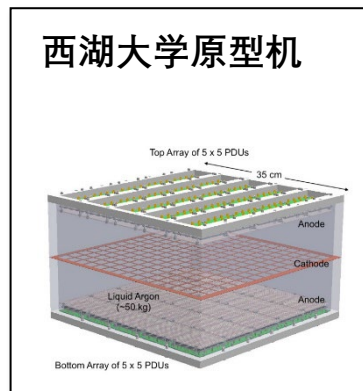
- 闪烁光 (S1) 拖尾缩短 → 明显的转化效果
- 电离信号 (S2) 转化效果不明显, 这是由于 $[\text{Xe}]_l/[\text{Xe}]_g \sim 1000$, 气体中氙浓度仅~1ppm



详细内容请见

清华大学 赵一飞 报告

7.16 探测器技术 11:20



本项目得到自然科学基金委国家自然科学基金锦屏重大科学基础设施国际合作研究计划专项支持



中国锦屏地下实验室
China Jinping Underground Laboratory
清华大学·雅砻江流域水电开发有限公司



2026



2027



2028



2029



2030+

远期物理目标

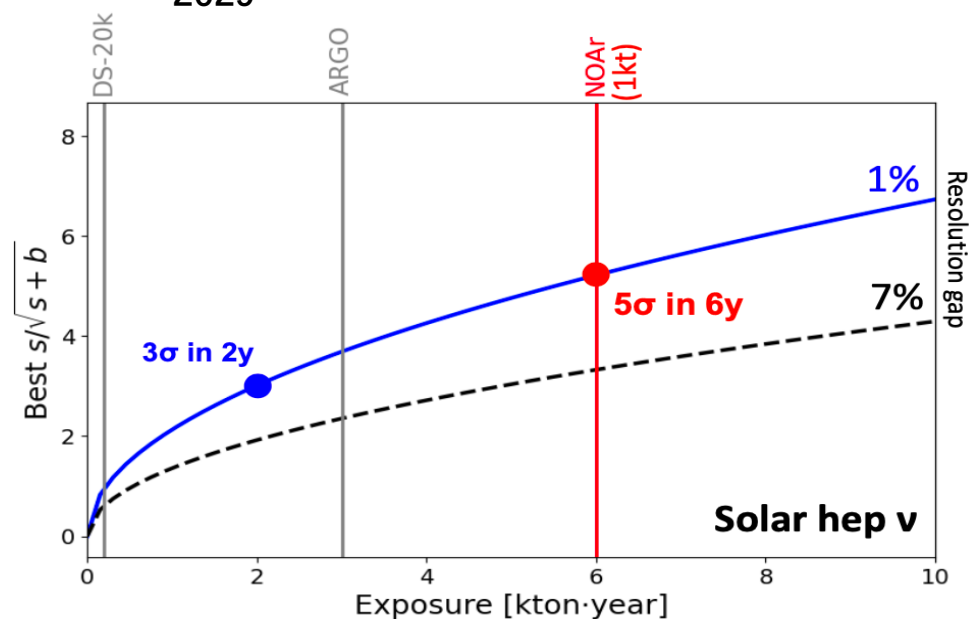
■ hep中微子探测

预期运行 2 年达到 3σ 证据水平, 6 年达到 5σ 发现水平。

■ 高能太阳中微子高精度测量:

实现对太阳中微子通量、中微子振荡、物质效应的精确测定。

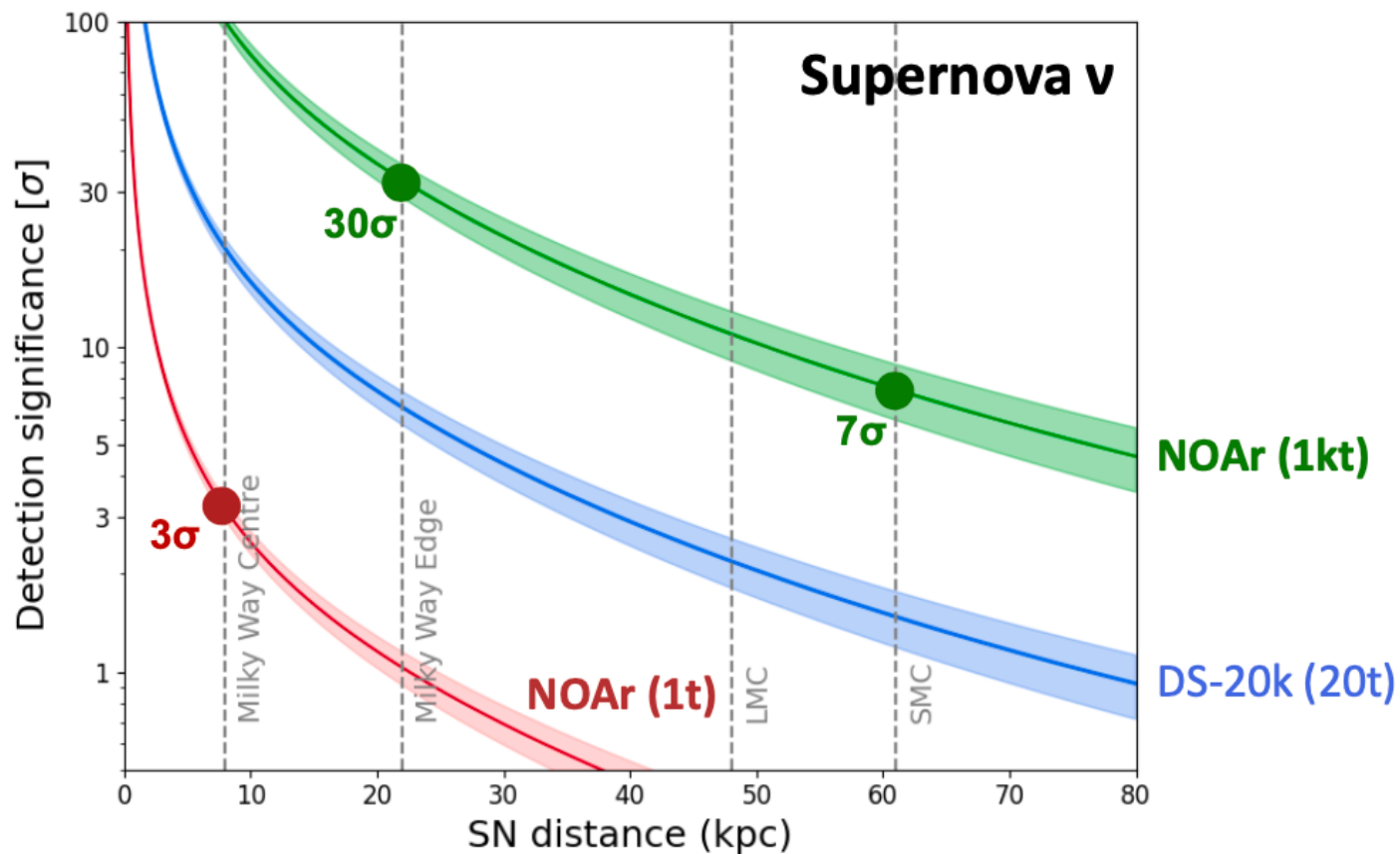
王笑宇 (西湖大学)



THANKS FOR LISTEING!

西湖大學
WESTLAKE UNIVERSITY

超新星中微子



- **超新星爆发预警：**对银河系内超新星可实现 **>30 σ** 极显著性探测；对近邻星系超新星达 **>7 σ** ；同时与超新星早期预警系统（SNEWS）建立报警联动。
- **超新星早期物理：**测量超新星爆发早期的中微子通量。