

# 国家重点研发计划“大科学装置前沿研究”重点专项 基于惰性气体探测器的直接暗物质探测实验 中期总结

季向东，上海交通大学

2018年7月28日

合作单位：中国科学技术大学 中国科学院高能物理研究所

北京大学 中国原子能科学研究院 中山大学



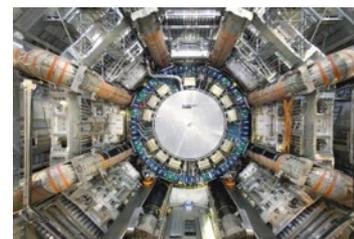
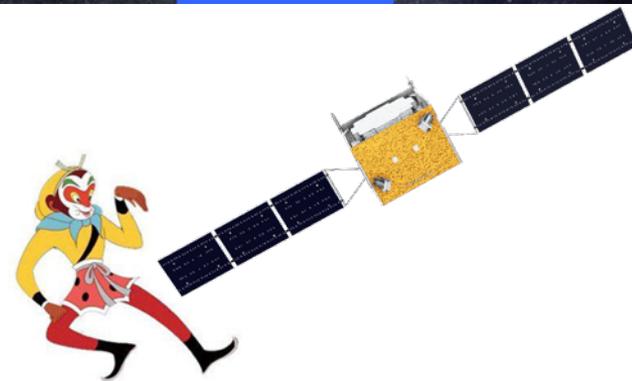
# 内容提要



- 立项背景与主要研究目标
- 国家经费支持和课题分解
- 各个课题最新成果
- 展望与总结

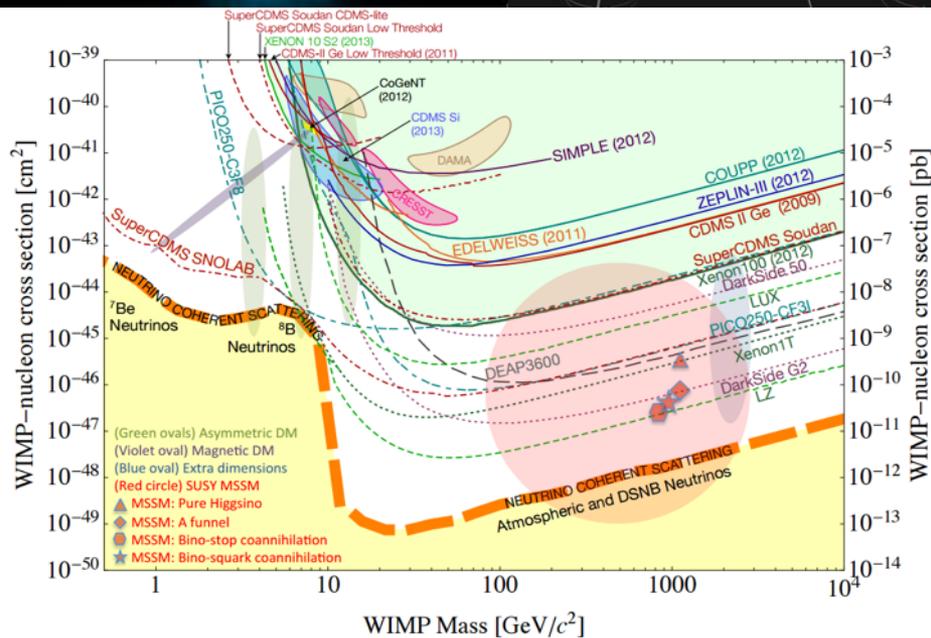
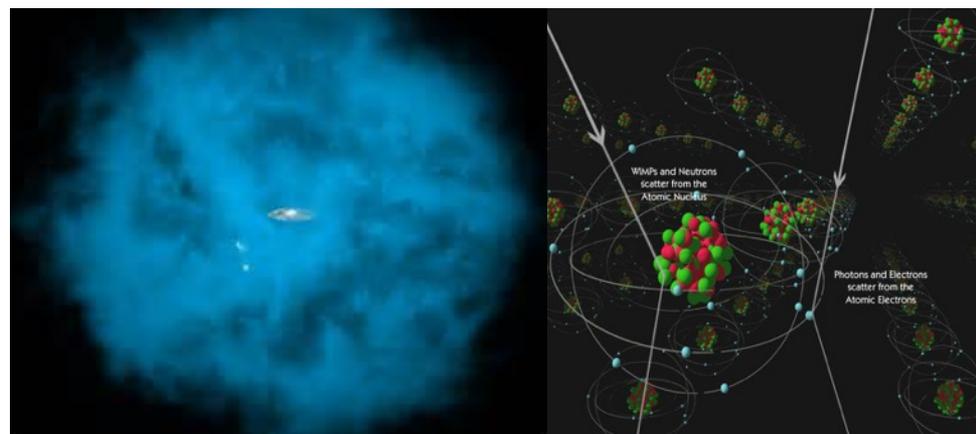
# 暗物质

- 宇宙中有27%能量来自暗物质
- 暗物质无法用粒子物理标准模型来描述，最有可能是一种“有弱相互作用的重粒子” (WIMPs)
- WIMPs能通过三种粒子实验手段来研究：



# 暗物质直接探测

- 银河系包含在一个巨大的暗物质晕里面，在太阳运行轨道附近，暗物质密度达  $\sim 0.3 \text{ GeV}/\text{cm}^3$
- 暗物质的直接探测是探测 WIMPs 粒子流与探测器的普通原子进行碰撞而引起的弹跳。
- 世界上最先进的探测“大质量暗物质粒子”的技术是氙和氩惰性气体探测器。



# 科技部立项 “惰性气体暗物质实验”



- 依托锦屏地下实验室PandaX-500公斤级液氙探测器，提高探测灵敏度，寻找高质量区的“弱相互作用重粒子” (WIMPs)
- 同时开发有巨大潜力的新型探测技术（包括气体探测器和液氙探测器）和相关电子学技术

国科高发计字〔2016〕15号附件 2-3

## 基于惰性气体探测器的直接暗物质探测实验 项目立项批复内容

一、项目名称（编号）：基于惰性气体探测器的直接暗物质探测实验（2016YFA0400300）

二、项目牵头承担单位：上海交通大学，

三、项目负责人：季向东

四、项目执行年限：2016年7月-2021年6月

五、项目总经费 3500 万元，其中中央财政经费 3500 万元

“惰性气体暗物质实验”项目启动会 - 2016年10月25日



# 课题设置与研究团队



课题1：PandaX-II 500 公斤级液氙探测器的优化和物理运行

上海交通大学，中山大学

课题2：用于暗物质探测与中微子性质研究的200公斤级气体探测器研发

上海交通大学，北京大学  
中国原子能科学研究院

课题3：用于暗物质探测等实验的低本底电子学系统研发

中国科学技术大学

课题4：吨级液氙暗物质探测器技术研发

中科院高能所

# 科技部经费支持



总经费 3500万元，执行计划2016/7/1-2021/6/30， **已到位2525万元**

课题	预算 (万)	已到位 (万)	任务
一	951.6	<b>686.51</b>	依托PandaX-500公斤级液氙探测器，优化探测器性能，提升探测器灵敏度，在高质量区 ( $\sim 100\text{GeV}/c^2$ ) 进行暗物质直接探测
二	849.75	<b>613.03</b>	研发高分辨率、具方向性成像的气体暗物质探测技术，开展 $^{136}\text{Xe}$ 无中微子双贝塔衰变的实验研究
三	850.87	<b>613.83</b>	研发探测暗物质和双贝塔衰变所必须的 <b>低本底电子学</b>
四	847.78	<b>611.63</b>	研发 <b>吨级液氙探测器</b> 的关键技术，为百吨级液氙暗物质探测实验开展预研

# 研发进度 ( 2016/7/1-2021/6/30 )



	2016年度	2017年度	2018年度	2019年度	2020年度
课题1	发表首个500公斤探测结果	采集300天数据, 分析和发表结果	探测器维护升级	稳定运行、采集数据	物理分析、发表结果
课题2	20公斤级模型研究	完成200公斤级设计和材料选择	建造200公斤级探测器, 暗物质探测	装入200 kg $^{136}\text{Xe}$ , 研究双beta衰变	运行探测器, 发表物理结果
课题3	总体方案设计	单元测试, 批量生产	气体探测总体安装测试, 联调	液氙探测总体安装测试, 联调	运行维护, 数据采集
课题4	结构设计, 部件采购	完成液氙杜瓦, 制冷系统, PMT采购和测试	吨级探测器安装, 液氙循环提纯	连接电子学系统、吨级实验运行	探测器标定、分析性能、发表结果

现在

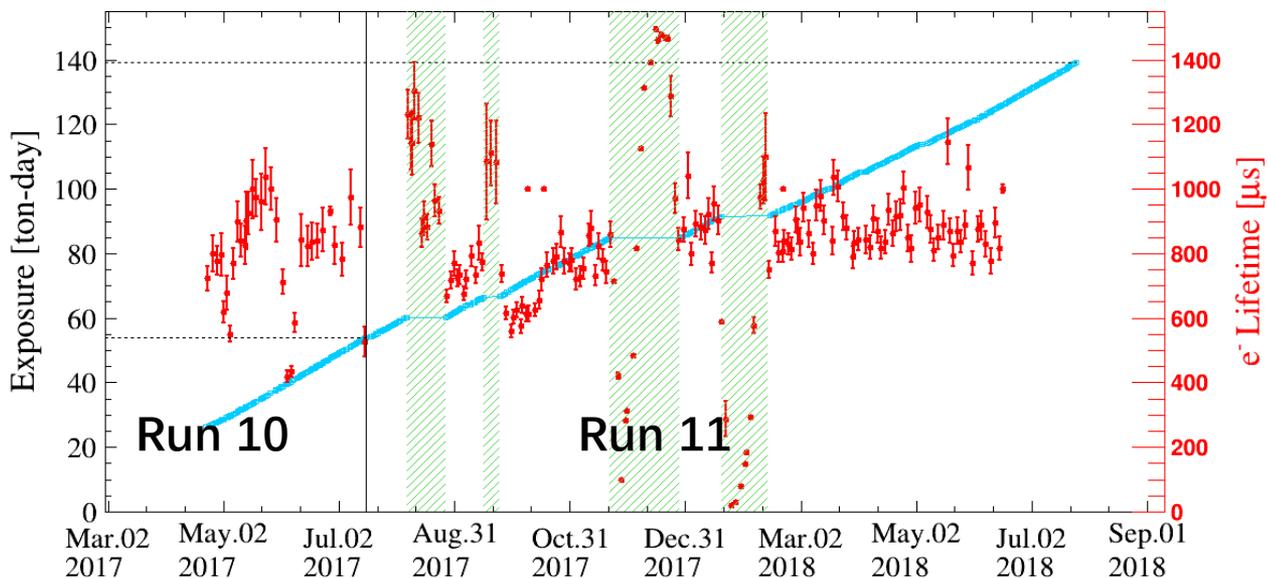
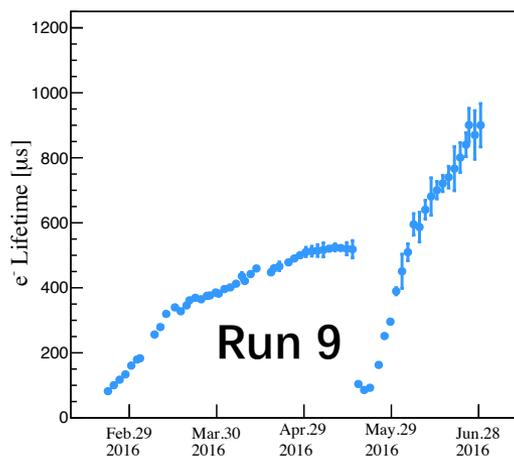
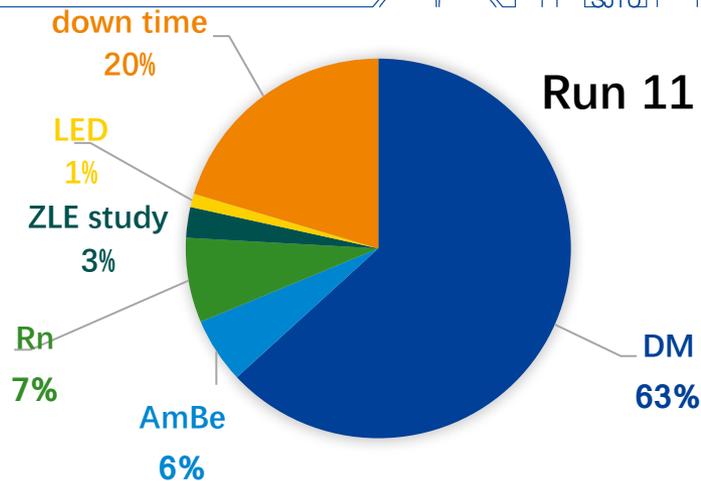
2016年度表示  
2016/7/1-2017/6/30



# 课题1：PandaX-II 500 公斤级 液氙探测器的优化和物理运行

# PandaX-II 平稳取数

- Run 8 : 6.8 吨天
- Run 9,10 : 54 吨天
- Run 11 : 85 吨天



# PandaX-II 运行情况



- 采用FPGA-based 触发方式，降低触发阈值
- 多种刻度方式，改进探测器响应模型
- 两次精馏，本底不断下降

mDRU	Run 8	Run 9	Run 10
$^{85}\text{Kr}$	11.7	1.19	0.20
$^{127}\text{Xe}$	0	0.42	0.021
Tritium	0	0	0.27
$^{222}\text{Rn}$	0.06	0.13	0.12
$^{220}\text{Rn}$	0.02	0.01	0.02
Detector ER	0.20	0.20	0.20
Solar neutrino	0.01	0.01	0.01
$^{136}\text{Xe}$	0.0022	0.0022	0.0022
<b>Total</b>	<b>12.0</b>	<b>1.96</b>	<b>0.79</b>

# PandaX-II 一系列重要物理结果



- ❑ 首个WIMP自旋无关结果发表为PRL封面文章
- ❑ 后续分析结果对多种暗物质模型给出世界领先灵敏度。

代表性成果	重要学术论文
1. PandaX-II 暗物质探测	<p><b>PRL 119, 181302 (2017), 编辑推荐</b></p> <p><b>PRL 118, 071301 (2017), 编辑推荐</b></p> <p><b>PRL 117, 121303 (2017), 编辑推荐</b></p>
2. PandaX-II 对新物理的检验	<p><b>PRL 121, 021304 (2018), 编辑推荐</b></p> <p><b>PRL 119, 181806 (2017),</b></p> <p><b>PRD 96, 102007 (2017),</b></p> <p><b>arXiv: 1807.01936</b></p>
3. 四吨级实验 预期	<p><b>arXiv: 1806.02229</b></p>

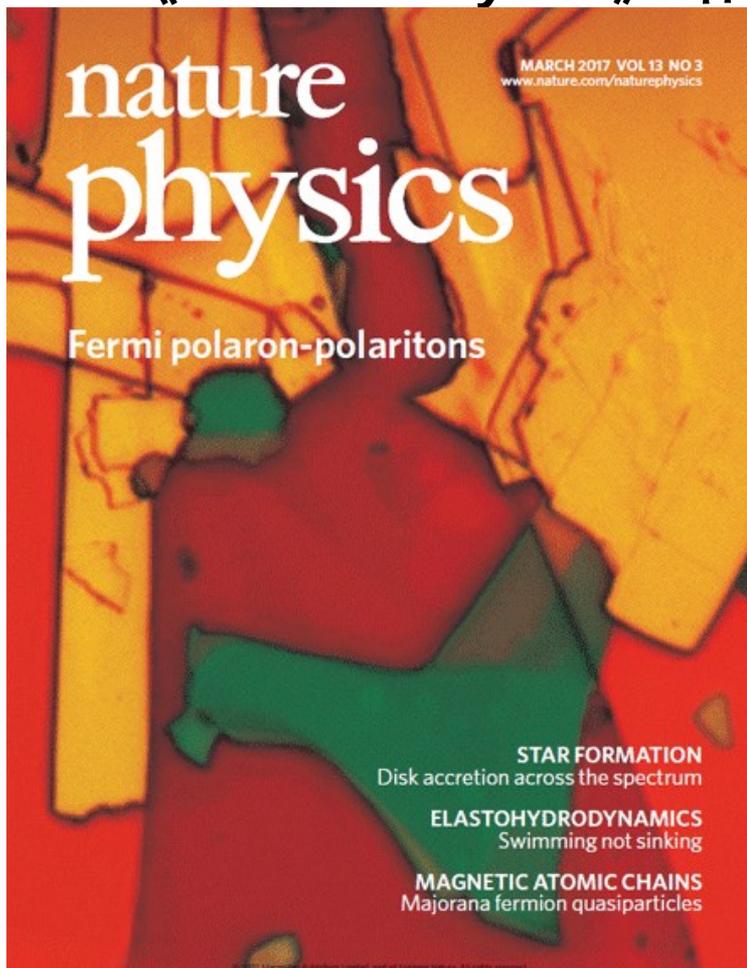


# 国内外影响力



- 《Nature Physics》暗物质直接探测综述文章

受《Nature Physics》邀请，  
撰写暗物质直接探测领域的综述文章。  
**Nature Physics 13, 212 (2017)**



nature physics

Home | Current issue | Comment | Research | Archive | Authors & referees | About the journal

home > current issue > progress article > full text

NATURE PHYSICS | PROGRESS ARTICLE

Current status of direct dark matter detection experiments

Jianglai Liu, Xun Chen & Xiangdong Ji

Affiliations | Corresponding author

**刘江来、谌勋、季向东**

Nature Physics 13, 212–216 (2017) | doi:10.1038/nphys4039  
Received 16 November 2016 | Accepted 13 January 2017 | Published online 02 March 2017

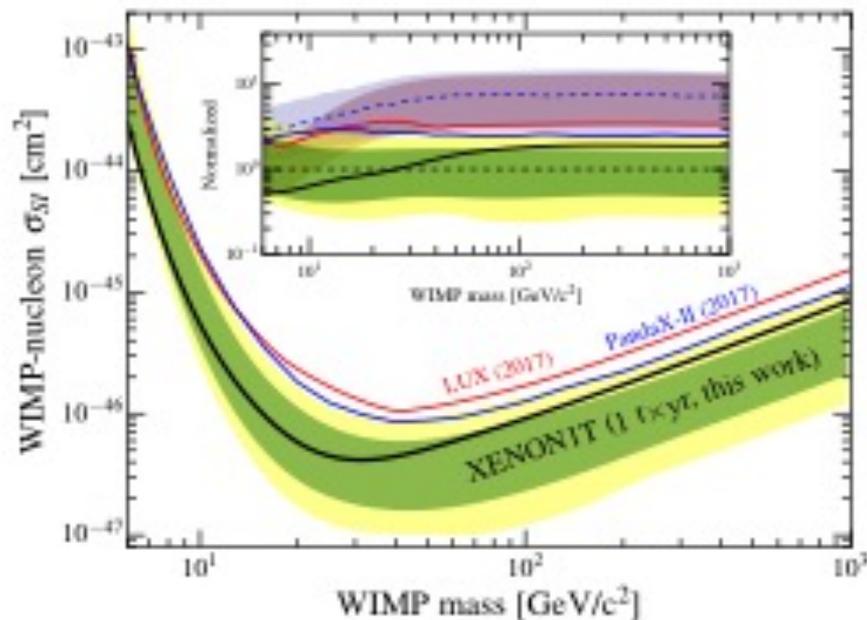
PDF | Citation | Reprints | Rights & permissions | Article metrics

Abstract

## 激烈国际竞争



- 在意大利LNGS的地下实验室开展的Xenon1T实验，探测仪的灵敏区域有2吨的液氙。
- 2016年初开始调试，2017年发表首个物理结果，2018年公布1吨年曝光量数据结果，数据略有超出。
- 计划2020年后升级到5吨

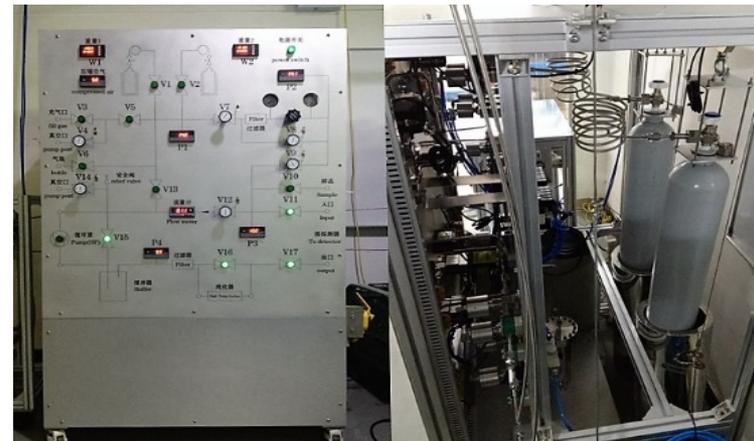
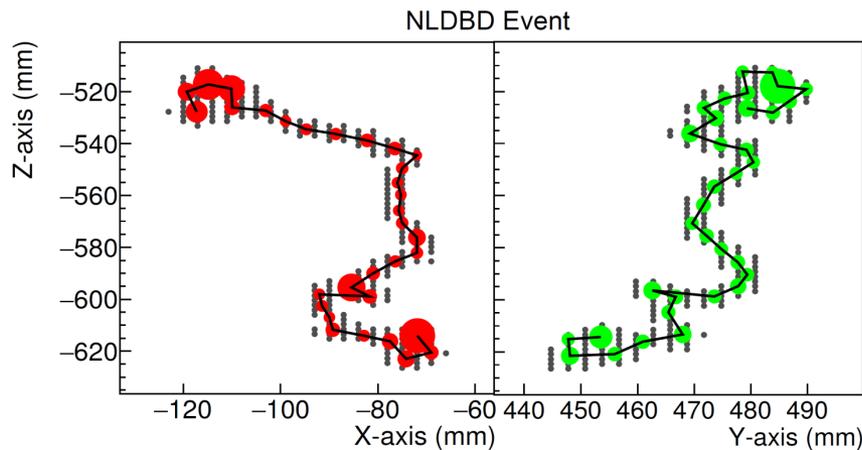
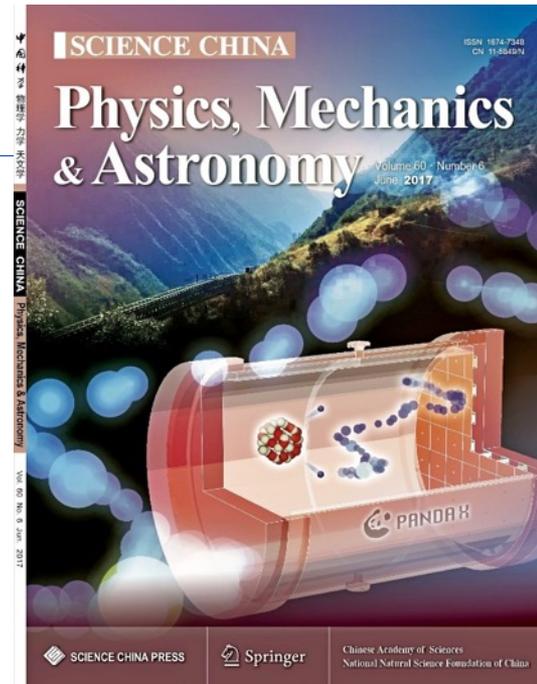




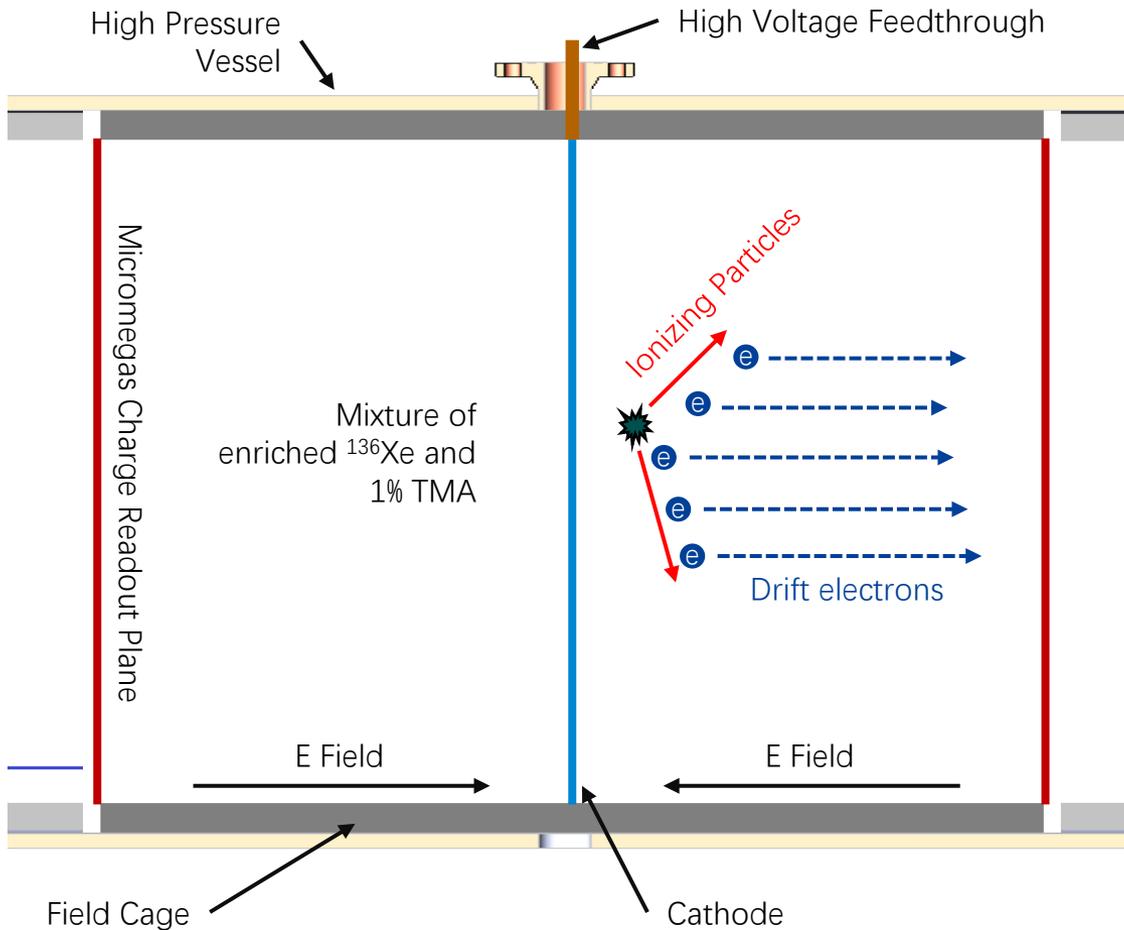
# 课题2：用于暗物质探测与中微子性质研究的200公斤级气体探测器研发

# 气氙概念设计报告

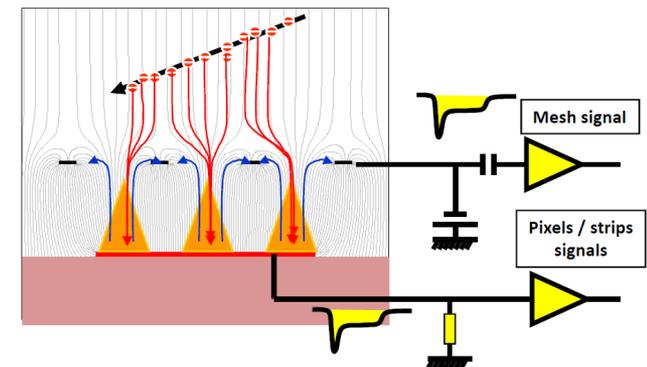
- 完成了200公斤高压气氙探测器的概念设计
- 利用蒙特卡洛模拟确认了粒子径迹对于压低本底的重要作用（40倍）
- 高压气体循环与提纯系统已经建成并应用到原型探测器上。



# 200公斤级高压气体探测器

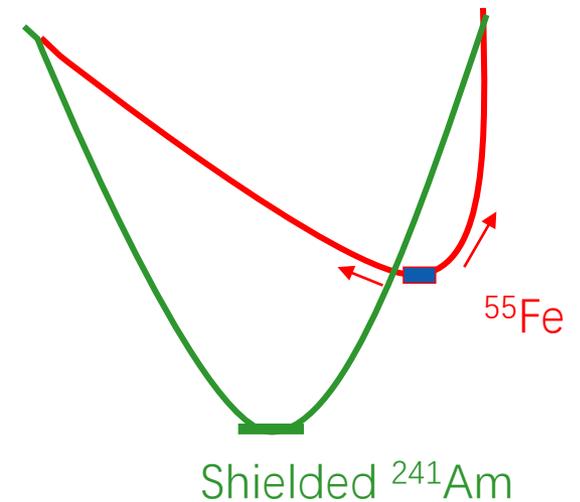
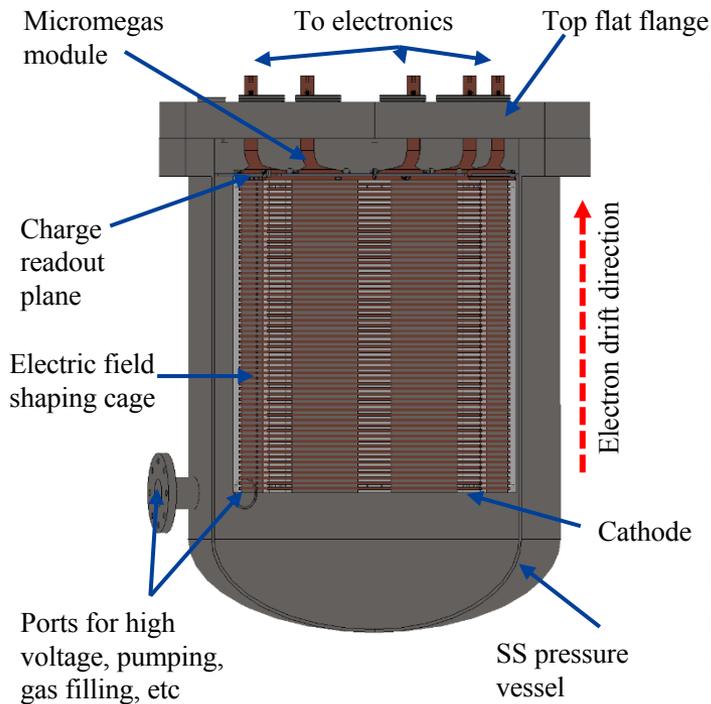
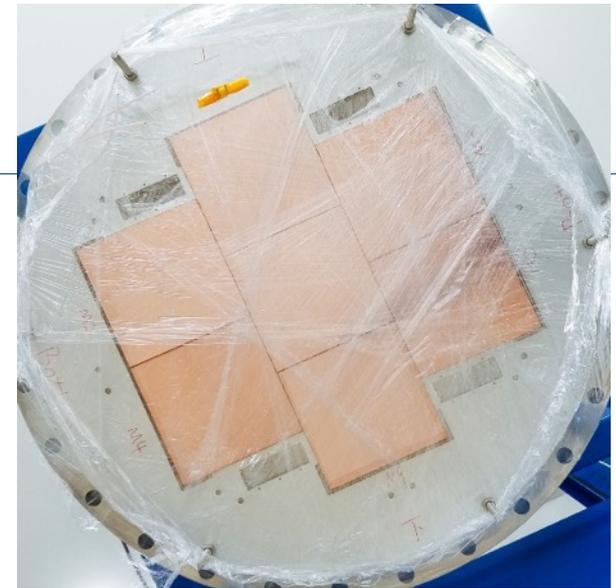


- 2m长，1.5m直径，在10个大气压下可容纳200公斤氙气
- 对称设计：10万伏负高压在中间，端盖两侧为MicroMegas电荷读出平面
- 只读电荷



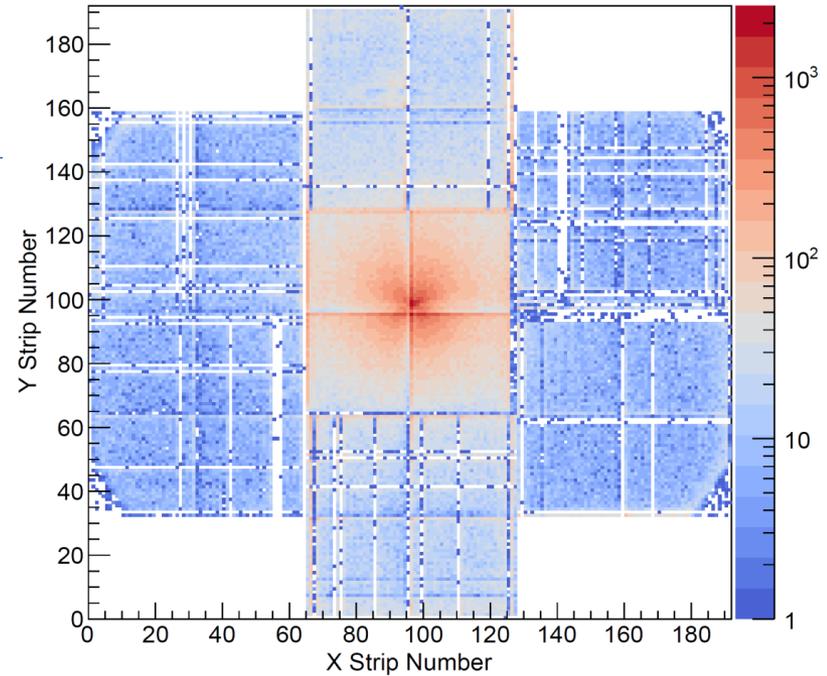
# 交大原型探测器

- 10个大气压下可以容纳16公斤氙气（有效质量）
- 用于研究Micromegas模块的能量，空间分辨率
- 用于研发标定和径迹重建算法
- 电子学联调

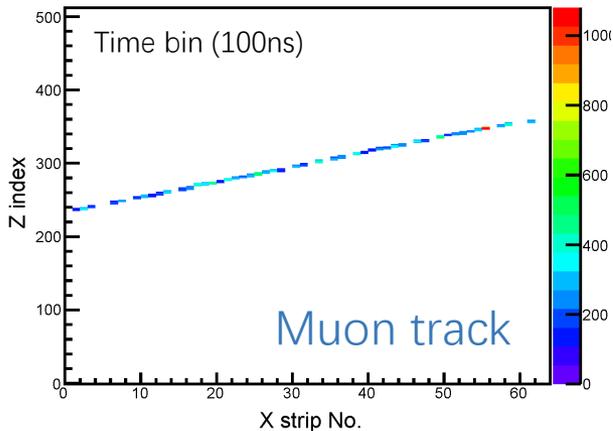


# 原型探测器初步数据

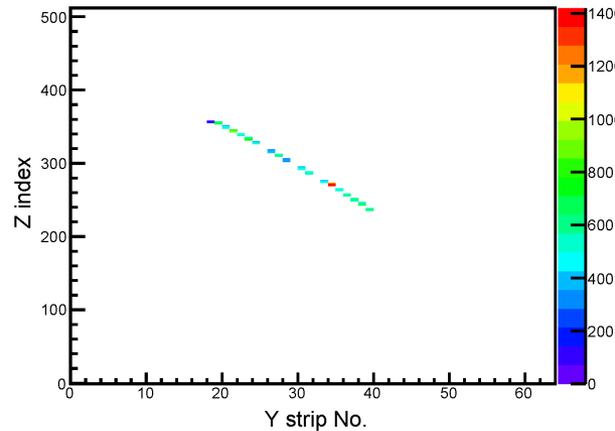
- 7块Micromegas同时取数
- 10个大气压Xe+TMA(1%)取数
- 探测器稳定性与能量分辨率为下一步工作重点



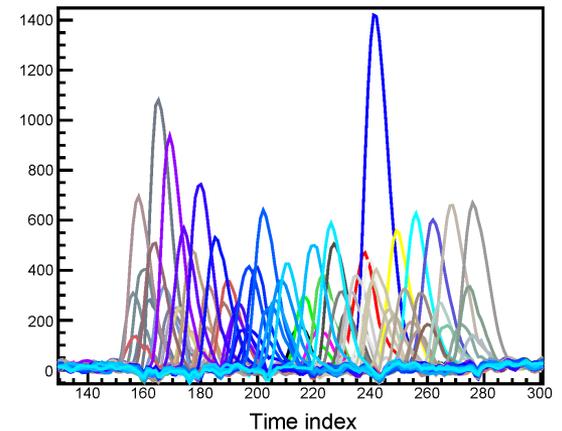
XZ plane



YZ plane



Pulses on strips

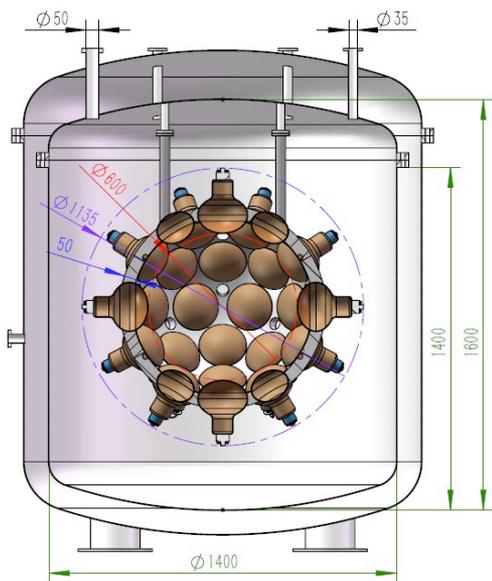




# 课题4：吨级液氙暗物质探测器技术研发

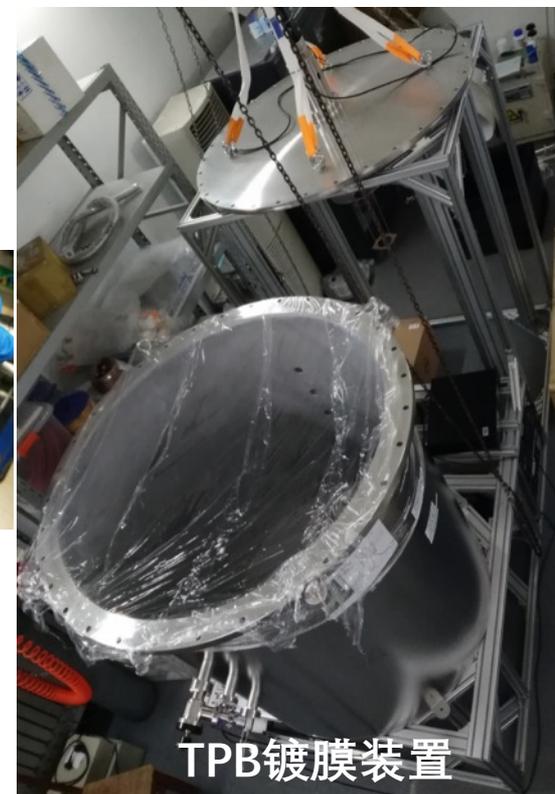
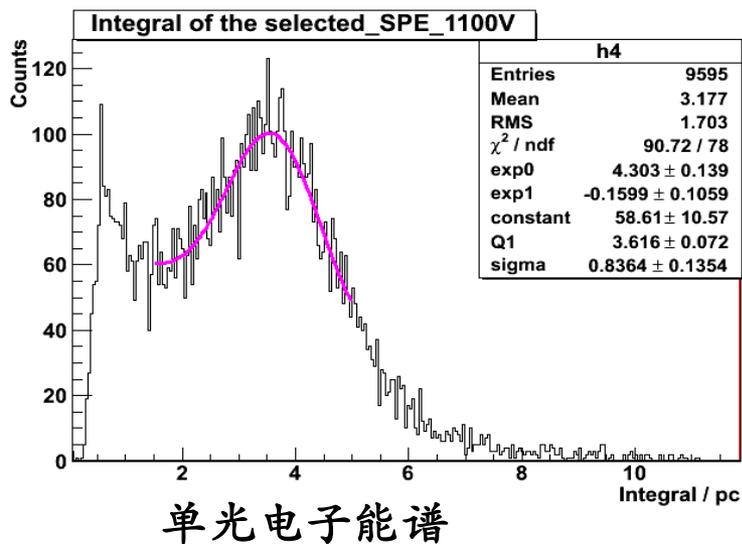
# 液氦探测器硬件进展

- 吨级液氦杜瓦加工完成，通过验收。
- 完成电-液氮混合制冷机加工验收。
- 即将开展联合测试



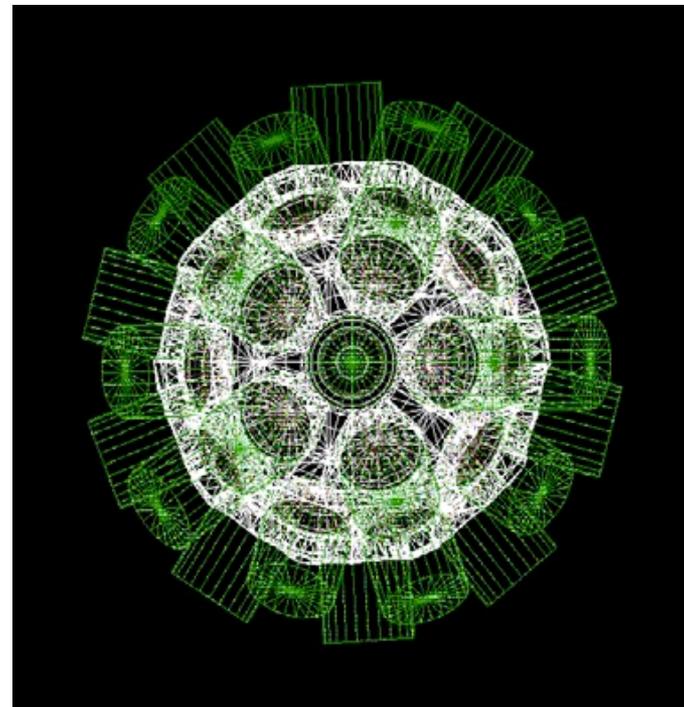
# 液氩探测器硬件进展

- TPB真空镀膜装置机械加工完成，镀膜流程、工艺、镀膜产品均已成熟。
- 完成低温光电倍增管的单管测试



## 吨级液氙探测器模拟

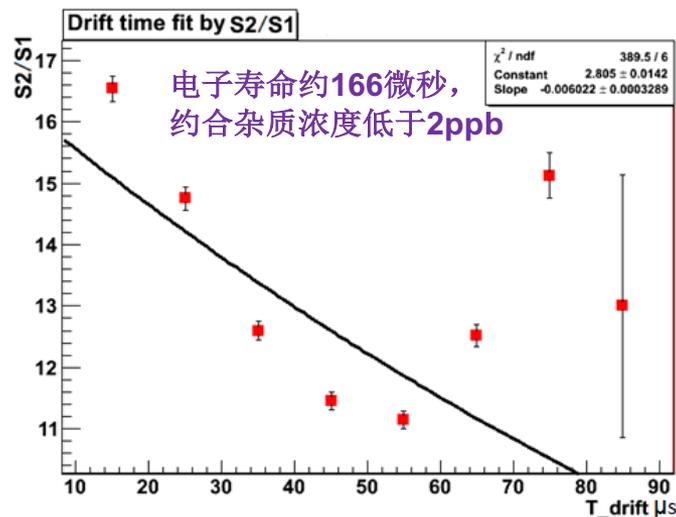
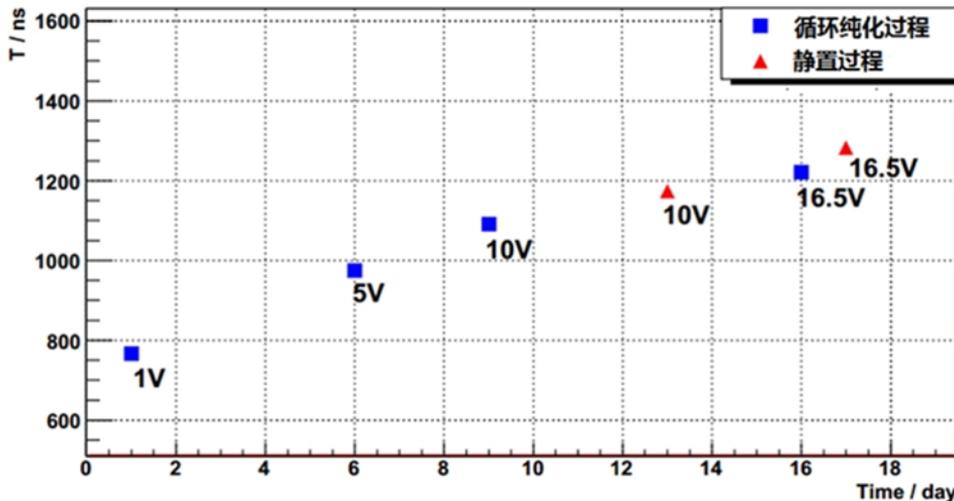
- Geant4探测器模拟结果表明：  
采用42只8寸PMT球状均匀排列，  
内部直径60cm的液氙为探测器  
灵敏物质。
- 光阴极覆盖率70%，滨松公司8  
寸低温PMT量子效率12%。
- 在内部PTFE表面和PMT外表面  
均镀上TPB波长位移剂时，可以  
获得设计值4.4pe/keV光产额。



Geant4模拟几何示意图，绿色为光电倍增管，白色为PTFE支撑结构，整体置于液氙中

# 氙气纯化量化测量和纯度高精度测量

- 液氙发光慢成份的时间常数：随累计循环纯化体积增加，液氙发光慢成分的时间常数呈现上升趋势
- 漂移电子寿命->纯度：通过两相液氙探测器模型测量，获得约166微秒的电子漂移寿命，结果远好于任务书的目标值20微秒。

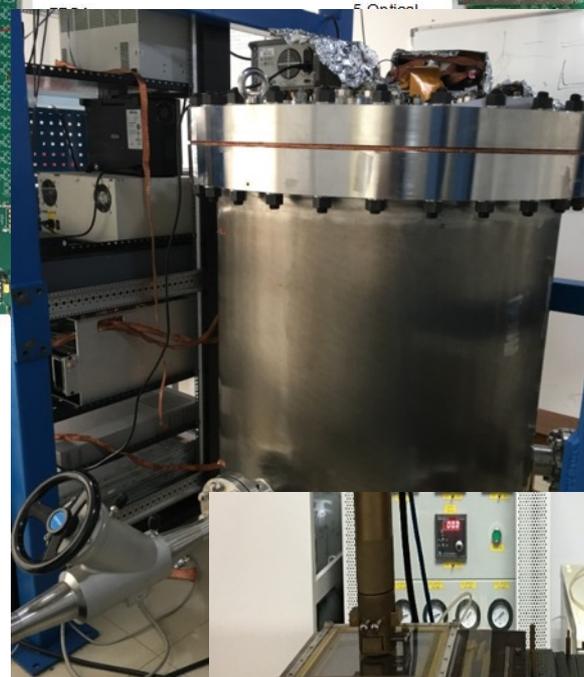




# 课题3：用于暗物质探测等实验的低本底电子学系统研发

# 气氙TPC读出方向

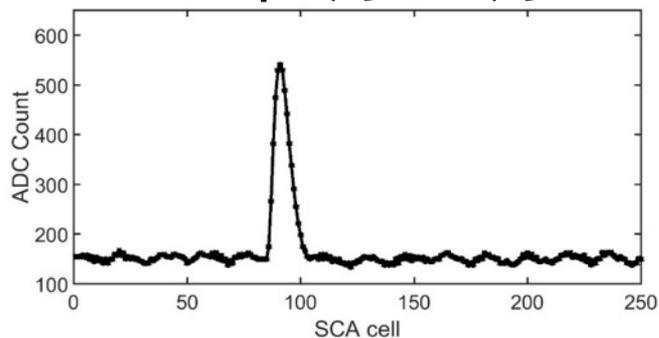
- ASIC芯片选型
- 电子学系统设计
  - 前端读出板
  - 丝网读出板
  - 数据获取板
  - .....
- 电子学性能测试
  - 实验室测试
  - 探测器联调
- 原型小系统设计和联调



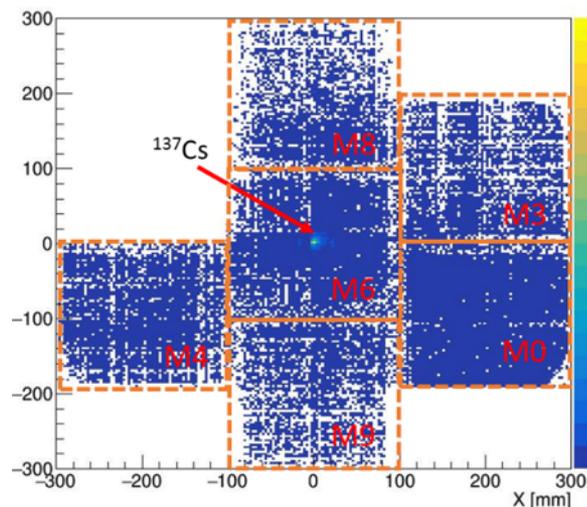
# 气氙TPC原型小系统联调



◆ 2018年1月、3月



读出通道的典型波形



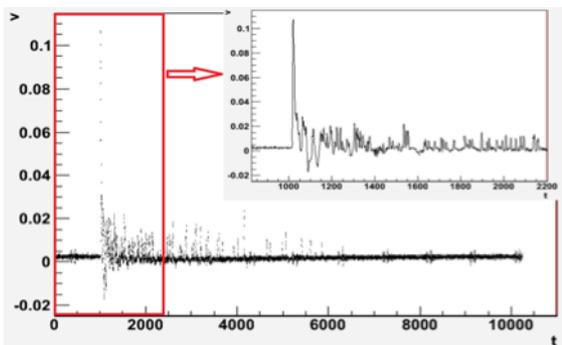
6块Micromegas对 $^{137}\text{Cs}$ 放射源成像图

# 液氦探测器读出方向

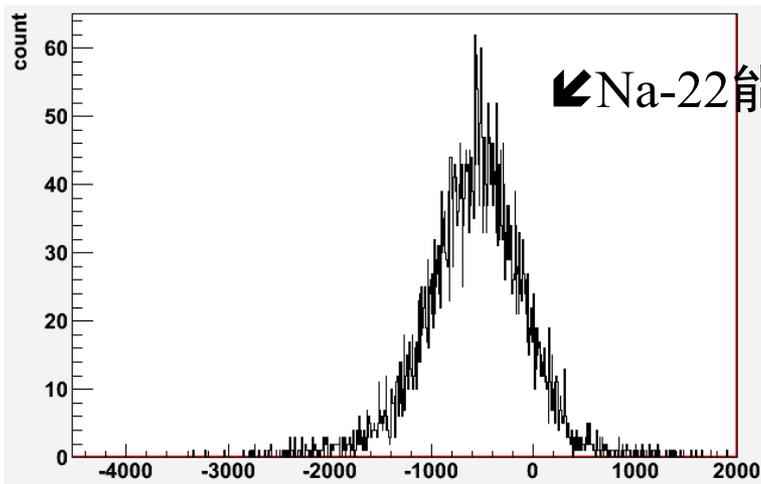
- 波形数字化芯片选型
  - 14bit@1GSPS双通道AD9680
- 电子学系统设计
  - 前放
  - 前端数字化模块
  - 时钟及触发处理模块
  - .....
- 波形数字化原型模块性能测试
  - 实验室测试
  - 探测器联调



# 液氦探测器联调



← Na-22事例信号波形



# 科研产出



- **博士论文五篇**
  - 上海交通大学：王旭明，谢鹏伟
  - 中国科学技术大学：董家宁，李诚
  - 北京大学，周小鹏
- **硕士论文三篇**
  - 北京大学，袁影，乔灏
  - 上海交通大学，林横
- **发表文章 16 篇，其中PRL 5篇（编辑推荐4篇）**
- **国际会议邀请报告40+次**

## 下一阶段的工作

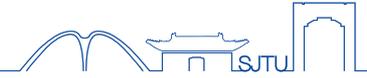


- 课题一：PandaX-II将持续运行发表最终的物理结果，同时积极展开更广泛的物理分析。基于PandaX-II实验，开展未来液氙暗物质探测技术研发。
- 课题二：PandaX-III探测器的工程设计将进一步细化200公斤级探测器的技术指标，开始建造200公斤级探测器。
- 课题三：气氙电子学将完善和原型小系统联调，启动FEC工程设计，并开始低本底电子学的选材和生产。液氙电子学将开展8通道电子学与探测器联调，完成时钟触发模块和前置放大器设计，搭建16通道小系统。
- 课题四：大液氙杜瓦和制冷剂联合测试，调试液氙探测器系统，开展吨级液氙探测器的标定工作，优化结构。

# 总结



- PandaX-II探测器在项目开始的2年时间内连续取得了暗物质探测的最好极限。它在今后的运行有希望发现暗物质或将暗物质探测极限推到更低。
- 气体、液氙探测技术和相关的电子学研究将为中国和世界的暗物质实验打开新的窗口。在过去两年，各个方向都取得了阶段性的进展。
- 本项目的实施是把自然条件最优越的中国锦屏地下实验室（大科学装置基地）建设成世界级地下实验室并产生世界级成果的关键步骤。



谢谢！